

中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 核心期刊

ISSN 1673-4831

生态与农村环境学报

Journal of Ecology and Rural Environment

2022. 10

第 38 卷 第10期 Vol. 38 No.10

农业文化遗产及其保护专题

生态城市建设与碳中和专题

主办单位：生态环境部南京环境科学研究所

目次

□ 农业文化遗产及其保护专题

自然保护地传统产业转型发展的经验与优化：来自武夷山国家公园茶产业的启示 王博杰 何思源 闵庆文(1229)

福州茉莉花茶文化系统与旅游产业耦合发展的影响因素研究 赖格英 邓名明 马云梦 赖怡恬(1239)

自然受益目标下食物系统转型研究：基于全球重要农业文化遗产(GIAHS)的解决方案 ... 何思源 焦雯璐 闵庆文(1249)

云南红河哈尼梯田生态系统的资源植物多样性与传统知识
..... 张 晴 程 卓 刘 博 杨 珺 李建钦 张红榛 张昕勃 马丽娟 龙春林(1258)

MaxEnt 与遥感技术在草原蝗虫灾害风险监测中的应用：以东乌珠穆沁旗农业文化遗产为例
..... 孙忠祥 胡泽学 叶回春 黄文江 额尔登其木格 张 莹(1265)

□ 生态城市建设与碳中和专题

长三角城市群减污降碳驱动因素研究 马伟波 赵立君 王 楠 张龙江 李海东(1273)

基于降温效应的长三角核心城市城区绿地节能减碳价值研究 仇宽彪 杜涵蓓 张龙江 张卫东 李海东(1282)

江阴市土地利用对碳储量的影响及优化研究 赵一行 高润艺 李海东 揣小伟 郭晓敏(1290)

大娄山区水源涵养与生物多样性保护重要区村镇生态建设模式研究 ... 陈 妍 王 楠 赵立君 冯 阳 李海东(1299)

□ 研究报告

区域环境与发展

大都市边缘区农村居民点时空演变及驱动因素研究：以天津市为例 李雪梅 刘 倩(1309)

滇中城市群土地利用/覆盖变化(LUCC)空间模拟研究 李 星 周京春 金婷婷 王金亮(1318)

辽宁省昌图县非耕地斑块对耕地系统景观异质性的影响 边振兴 关明昊 佟昊轩 杨玉静 初琢明 于 森(1330)

自然保护与生态

民勤绿洲不同退耕年限土壤微生物量的变化特性 ... 王理德 何洪盛 韩福贵 陈思航 宋达成 王梓璇 闫沛迎(1338)

污染控制与修复

基于絮凝强化的微气泡气浮技术应急高效处理富营养化地表水 谷 原 郭仕禹 赵文涛 宛 勇 隋 倩(1347)

生活污水-厨余-存量垃圾多元物料蚯蚓堆肥工艺及应用环境风险评估
..... 韦茜佳 周若昕 李娜英 李 浩 韩智勇(1354)

* * * * *

欢迎订阅 2023 年《生态与农村环境学报》..... (1238)

录用定稿网络首发启事 (1298)

本期执行编辑：许 素

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0244

王博杰,何思源,闵庆文.自然保护地传统产业转型发展的经验与优化:来自武夷山国家公园茶产业的启示[J].生态与农村环境学报,2022,38(10):1229–1238.

WANG Bo-jie, HE Si-yuan, MIN Qing-wen. Experience and Optimisation of the Traditional Industrial Development and Transformation in Protected Areas: A Case Study of Tea Industries in Wuyishan National Park[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1229–1238.

编者按:2002年,为应对农业生物多样性减少、传统农业技术与知识体系丧失、农业生态系统功能下降、农业环境污染严重等问题,联合国粮食及农业组织(FAO)发起了“全球重要农业文化遗产(Globally Important Agricultural Heritage Systems, GIAHS)”,旨在发掘、保护、利用、传承传统农业的经济、社会、文化、生态、科技等方面价值,建立全球重要农业文化遗产保护体系,促进农业农村可持续发展。经过20a的发展,GIAHS的价值和保护重要性已经获得了广泛的国际共识,23个国家和地区的67项传统农业系统被列入GIAHS名录。为纪念GIAHS倡议提出20周年,“农业文化遗产及其保护专题”选择了9篇论文,涉及生物多样性、景观特征、资源评价、农户生计、食物系统转型和产业发展、灾害风险监测等方面,以及稻作梯田、草原游牧、传统茶园、山地林果、特种作物种植等类型。这些文章丰富了农业文化遗产及其保护研究成果,可为农业文化遗产发掘与保护实践提供参考。本刊将分期刊载该专题的优秀文章。

自然保护地传统产业转型发展的经验与优化: 来自武夷山国家公园茶产业的启示

王博杰^{1,2}, 何思源^①, 闵庆文^{1,2} (1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:我国自然保护地内具有诸多独特且延续至今的传统农业生产系统,依托这些系统所形成的传统产业既扮演着当地的可持续生计和文化遗产角色,也影响着当地的生物多样性和生态系统的保护成效。然而,当前从产业角度解析这些传统产业与自然保护关系的研究较少,对传统产业的研究也缺乏对自然保护地管理背景和特征的考量。笔者以武夷山国家公园的传统茶产业为研究对象,采用质性研究方法,分析其近20a来发展的主导理念、路径、结果并提出相应的对策。研究发现,武夷山茶产业长期以来是社区生计与自然保护管理互动的核心体现,但其转型发展历程尚未能很好地与自然保护管理需求形成良性互动。虽然传统茶产业在生态化、标准化和规模化,茶叶品牌效应提升和茶旅融合发展这3个主导方向取得了一定成效,但在多重历史制度问题的影响和国家公园体制建设新需求的交织中,传统产业的转型发展在生态价值的科学评判与实现、文化价值的识别与传承以及多方利益相关者的交流与共识上还存在着诸多不足。基于此,研究提出传统产业应立足本土生态知识,形成科学管理标准,联动差异化生产经营者,寻求多种增值服务机会,进而促进自然保护地传统产业的特色生态化和自然生态价值的实现,落实“以人为本”的自然保护理念。

关键词:国家公园; 传统产业; 产业生态化; 产业多功能; 利益共同体; 社区参与

中图分类号: X37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1229-10

Experience and Optimisation of the Traditional Industrial Development and Transformation in Protected Areas: A Case Study of Tea Industries in Wuyishan National Park. WANG Bo-jie^{1,2}, HE Si-yuan^①, MIN Qing-wen^{1,2} (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, China Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Many traditional agricultural production systems exist in protected areas. These traditional systems are not only influential to the local sustainable livelihood and cultural inheritance, but also influential to biodiversity and ecosystem conservation outcomes. However, current industry studies seldom focus on the relationship between nature conservation and

收稿日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(42001194); 国家林业和草原局国家公园传统产业转型发展专题研究(JYCL-2020-00039)

① 通信作者 E-mail: hesy@igsrr.ac.cn

rural community economic development, or they rarely consider protected area management and demand. This research takes Wuyishan National Park as a case to focus on the traditional tea industry. Using a qualitative research method, this paper analyses the leading ideology, paths, and outcomes of regional industry development over the past 20 years, and provides countermeasures to the development of the tea industry. Results show that the tea industry in Wuyishan has been the interface of community livelihood and protected area management, although the transformation and development process has not interacted well with conservation management demand in general. In specific, the ecologisation, standardisation, and scaling of the tea industry, the promotion of the tea branding effect, as well as integrated development of tea production and tourism, have been realised to some extent; However, there are still old problems and variances under the new national park management, namely the scientific evaluation and realisation of ecological values of products and services, the identification and inheritance of cultural values, and the communication and consensus of multi-stakeholders. The research further proposes developing an ecological tea industry and expanding agriculture to tourism as two major industrial development goals. To achieve these goals, it is necessary to use local ecological knowledge as a base, to form scientific management standards, unite producers and operators of different scales, and seek a variety of value-added opportunities. In this way of tea industry ecologisation and valorisation of ecological value from multi-functionality, it is promising to finally implement the “human-centered” conservation concept in nature conservation from the full play of the social, economic, and ecological values of the traditional community industries.

Key words: national park; traditional industry; industrial ecologisation; multi-functionality of industry; community of common interest; community participation

自然保护区周边社区生计与保护目标协同发展是“以人为本”的自然保护的目标和路径^[1]。生计是人们建立在能力、资产和活动基础上的谋生方式,而社区居民从事的产业活动是实现社区生计的重要路径^[2]。从世界范围内自然保护区规划和建设的地理位置来看,其周边社区一般都是乡村社区,其居民的生计活动长期以来依托区域自然环境条件,依赖土地和其他自然资源,形成了较为系统的农、林、牧、渔等为主导的传统农业生产系统,并在长期的发展中形成了独特的资源管理体系和本地文化,并以其系统性为乡村产业发展和产业融合提供了基础^[3]。

研究表明,自然保护区的建立往往因限制林业、渔业资源收获和经营,种养殖业的范围、方式、强度等原因降低周边居民资源利用可能性及其收入和工作机会^[4-7];同时,也会因面向保护的基础设施建设、社区能力建设而联动政府、非政府组织、企业等提高资源利用效率、实现土地多功能与价值,如提供生态管护岗位、生态体验服务供给机会、通过生态农业提升产品附加值等,从而深化或拓宽产业^[8-12]。因此,在与自然保护区管理的互动中,如何发挥传统产业的多元价值,促进传统产业适应于生态保护目标并保障社区福祉,是自然保护区及其周边传统产业保护和利用面临的关键问题之一。

当前,从产业角度解析自然保护区与传统产业发展的研究较少。一方面,在自然保护区与社区关系的研究中一般将产业发展作为替代生计或生计多样化的策略提出^[11,13-14],鲜有研究深入探讨产业组

织模式和发展路径^[15-16];另一方面,以乡村地区为研究对象的产业研究^[11,17-18]主要聚焦产业本身来研究三产融合、发展的原理、路径和结果,缺乏对具有自然保护区管理背景地区的研究。自然保护区社区的产业发展不能脱离区域背景存在,是地方政府管理的一部分,受制也得益于区域经济发展规划;同时,自然保护区的社区管理也是自然保护区管理的一部分,自然保护区实践既对传统产业中不符合自然保护区发展目标的发展路径予以限制,也为传统产业优化、转型提供机会^[19-20]。

自然保护区内及其周边的传统产业的延续往往建立在其生态经营理念之上,充分体现农业生产系统中的自然生态系统与农、林系统的互惠互利。例如,在斯洛文尼亚国家公园内传统土地利用与自然生态系统衔接,在实现产业发展功能的同时也为捕食性鸟类和昆虫提供自然栖息地^[21]。法国国家公园建立国家公园品牌管理制度,以严格的生态标准将国家公园内农产品生态稀缺性转化为品牌和经济附加值^[22]。传统产业也开始充分对接市场需求。在农业普遍倡导专业化、规模化、集约化和面向世界市场的背景下,以小农为主体经营的产业能够以特色产品服务地区市场^[23],通过增强稀缺性和品牌效应来吸引外来者;同时,也通过互联网、新媒体、电子商务等新兴技术手段推动经营主体在销售过程中增加产品附加值^[24]。此外,自然保护区为实现保护目标,会指导和联动企业将当地社区纳入良性的生态农业产业链,促进生产、加工和零售业发展,并将农业与生态旅游业相融合,发挥土地物质

与非物质价值,实现传统农业系统和自然保护区社区的可持续管理^[25]。

可见,自然保护区周边的传统产业政策目标需与保护目标一致,需要以自然保护区管理者、地方政府、社区为主的利益相关方协同非政府组织、企业和大众共同维持和促进传统产业的生态化和产业拓展与融合。如何践行以人为本的自然保护理念,并通过发挥传统产业的多元价值以促进产业转型发展,对于长期与多类型自然保护区共存,同时又富有社会、经济、生态和景观等价值的自然保护区尤为重要。

武夷山国家公园建立在原有国家级自然保护区、风景名胜等多类型自然保护区空间整合的基础上,旨在保护同纬度面积最大和最具代表性的亚热带常绿阔叶林。武夷山地区的茶叶种植历史悠久,至明末清初茶叶生产日渐繁荣,声名远播。1999 年 12 月,武夷山正式被联合国教科文组织列入《世界遗产名录》,旅游业的快速发展不仅为武夷山地区带来了大量的游客,同时也助推了武夷山地区的茶叶产品及品牌快速走向全国及世界,带动了传统茶产业的繁荣发展。因此,笔者以典型的茶文化系统所在的武夷山国家公园为案例地,以茶产业为研究对象,分析其近 20 a 来产业发展的主导理念、路径、结果并提出对策。武夷山茶文化系统历史悠久,茶产业作为生计支柱产业是社区发展与自然保护区关系的载体,通过对其产业发展与转型历程与经验进行分析研究,有助于理顺自然保护区目标、理念与区域政策的关系,以及透视自然保护区管理与地方政府决策间的博弈,进而为其他自然保护区传统产业的转型与发展提供经验借鉴。

1 研究方法

1.1 数据收集

首先采用历史视角,以武夷山地区的社区生计发展与自然保护区关系为背景,分析作为重要生计支柱产业和地方经济发展组成部分的传统茶产业如何协同自然保护区需求。再通过现实视角,以当前国家公园管理空间范围和需求为对象,分析传统茶产业发展协同国家公园管理目标的问题和路径。研究区为广义的武夷山市行政区划范围与其多类型自然保护区的并集,从历史沿革看涉及自然保护区、风景名胜区、世界遗产、森林公园及其统筹整合后的国家公园等多类型保护地,在行政区域上则以武夷山市为主。

研究采用质性研究方法,针对历史和现实视

角,分别采用文献收集和半结构访谈方式进行原始数据收集。文献来源主要分为武夷山地区产业发展研究、自然保护区社区生计研究的学术文章,政府规章和政策文件以及经济发展统计公报和数据。访谈问题针对国家公园管理局、政府相关部门、村集体与村民分别设计并以不同语言表述,但集中在 3 个方面:(1)茶产业系统特征;(2)茶产业的优势与不足;(3)茶产业的机遇和挑战。实地调研于 2020 年 8 月 3—7 日进行,分别与武夷山国家公园管理局,地方产业管理部门、财政局、发展和改革局等部门的人员开展座谈活动 2 次,访谈人数共 18 人;研究人员在武夷山国家公园内不同地区的茶产业发展典型村落进行走访,与乡镇、村委管理人员及农户开展访谈活动 11 次,访谈人数 22 人,每场访谈时间为 1~2 h。座谈与访谈都在获得访谈对象同意后录音,并及时对原始数据进行初步的信息编码。在对个人访谈进行到第 7~8 次时,通过原始数据分析发现不再出现新的内容,因此认为现有访谈数据量已达到饱和。

1.2 数据分析

主要运用扎根理论作为研究方法,指导对文献资料和访谈文本进行质性分析,通过对文本数据不断进行比较来归纳形成研究的理论范式。研究遵循扎根理论的分析路径,在确定访谈主题与进行实地调研后,对数据进行扎根编码^[26]。具体通过开放编码、主轴编码和选择编码 3 个步骤进行分析:(1)开放编码:对收集到的原始资料进行文字整理,从原始的文本及访谈资料中逐步识别并筛选出与武夷山国家公园传统产业发展与转型相关的表述,并将其进行初步概念化;(2)主轴编码:在初步概念化所获得的编码的基础上,通过分析不同范围之间的内在逻辑关系,提炼归纳出相应的主范畴;(3)选择性编码:在主轴编码的结果基础上,选择核心范畴,并将其与研究问题相结合来阐释系统关系,同时再次筛选文献资料与访谈文本数据,对尚未完备的概念化范畴进行补充,并对概念之间的关系进行整合重组和维度抽取,不断循环“资料分析—概念形成—整合重组—理论提取”的过程^[27]。

1.2.1 开放编码

开放编码是通过将文本资料分解、比较、概念与范畴化,再以新的方式重新组合并操作编码的过程^[28]。通过将文本资料中发现的相同或相近的类型进行归总并命名,进而确定相应的概念和维度。研究人员通过将收集的文献资料和访谈数据进行编码,将资料不断对比提炼,得到可以反映武夷山

国家公园传统产业转型发展的初步概念化分析(表 1),为主轴编码奠定基础。

1.2.2 主轴编码

 主轴编码的主要目的是发现和建立概念之间的各种关系,用以表征各个范畴之间的有机关联^[29]。进一步反复比较开放编码中初始范畴中的现象、内容以及各个范畴之间的相互关系,基于产业发展的基本逻辑和主要影响因素,充分考虑武夷山地区茶产业的转型与发展路径及其与自然保护管理目标之间的逻辑关系,结合目前已有研究成果,最终将文本初始概念聚敛为 8 个主范畴(表 2)。

1.2.3 选择性编码

 在主轴编码的基础上,选择性编码结合主轴编码获得的结果以及原始文本数据中所反映的现实问题,以产业发展的“条件与现状-内在问题-应对

策略”为逻辑提取核心范畴,筛选出在自然保护地管理目标背景下与社区产业转型与发展关系最为紧密的编码,结合调研和研究主题,以“近 20 a 来茶产业发展路径”“茶产业发展的制度保障与成效”和“茶产业转型发展的典型问题与国家公园管理下的协同困境”这一逻辑主线来涵盖上述编码所得到的范畴。研究人员通过对比原始访谈文本及编码数据,发现在已有研究的基础上没有出现新的概念及关系,因此判断关于“武夷山国家公园茶产业转型与发展”的编码已达到理论饱和状态。基于上述编码结果,通过呈现原始资料与数据的编译过程,对武夷山国家公园传统产业转型发展过程中的经验进行回顾演绎,并结合国家公园管理目标的现实需求提出传统产业未来的优化方向。

表 1 武夷山国家公园传统产业转型发展初步概念化分析结果示例

Table 1 Examples of preliminary conceptualization analysis of the transformation and development of traditional industries in Wuyishan National Park

原始资料	初步概念化
目前针对茶叶质量只做农残的检测,没有其他的检测指标	农残检测
生态茶园要看效果的话,必须有一些其他方面的监测手段;家家户户都有自己的茶叶加工方式,我们比的就是不同的茶味;好多人都不在村里了,现在我们茶叶采摘和加工的人工成本很高	生态茶园、茶味、人工成本
有些游客对茶园十分感兴趣,我们也试着把茶园开放给游客旅游;武夷山地区的文化很深厚,但怎么把这个和旅游结合,其实我们也不太明白;村子里好多茶农都做民宿和旅游,现在做的人多了,也不太好做了;我们试着搞了些科普教育,吸引了一大批香港的小朋友过来,效果还不错	茶旅融合、文旅融合、同质化竞争、科普研学
保护区建立了这么多年,当时的管理措施对茶叶品质的提升是有好处的	保护区建设
我希望把房子拆掉,一楼做厂房,二楼来办公,三楼来接待	基础设施建设
我相信国家公园是个好事,但目前我们还没有看到它的价值;世界遗产这块牌子含金量非常高,也给我们武夷山对外宣传推广带来了品牌效益	国家公园价值、世界遗产价值
小种茶熏制做的就是口碑,我们想做的就是维护好我们自己的回头客;那些大企业只来我们这收茶青,加工上他们有自己的一套;政府出了一套标准加工流程,但各家设备不一样,出来的茶叶质量差别挺大	小种茶熏制、松散买卖关系、产品质量不稳定
我们申请了地理标志产品,顾客比较认可	地理标志产品
为了茶叶质量我们不怎么用化肥,现在也不让客土了,这对土壤肥力影响比较大;为了防松材线虫病,现在禁止外面的松木进来,我们只能从外面拉液化气进来,对茶味影响很大	限制客土、限制外来松木
现在合作社是政府比较鼓励的趋势,大家都抱团组成合作社	合作社
有些人在外省收劣质茶叶,在这个地方挂牌子生产,其实就是假冒伪劣产品	假冒伪劣

2 结果与分析

2.1 近 20 a 来茶产业发展路径

 作为典型的传统农业生产系统,茶产业被武夷山政府列为农业主导产业。近 20 a 来,其主要发展方向包括茶产业生态化、标准化和规模化,茶叶品牌效应提升以及茶旅融合发展(图 1)。

 地方政府带头采取了一系列措施来推动产业发展。在文献研阅和实地访谈的基础上,研究将其总结为以下 4 个方面:首先,通过正负两方面举措推动全产业链的生态化和标准化管理。在正面提升

方面,进行生态茶园建设、改造和茶园科学管护,改良茶叶品种,使用生物农药、农家肥和有机肥,开展生产技术、质量安全管理培训和生产技术交流活 动,以此引导茶农保持可持续的生产模式;在负面管控方面,持续开展茶山整治专项行动,打击违规非法开茶山和违规改扩建厂房的行为,对违规使用农药及农残超标进行监管和处罚。其次,推动龙头企业带动散户茶农建立“公司+基地+农户”模式,提高茶产业规模化经营;鼓励产业链延伸,推进茶叶加工区、精加工区建设,发展食品、工艺品、保健品等深加工企业,并引进包装、设计等生产配套型企

业协同发展。第三,进行区域尺度的茶叶品牌创建、宣传和维护。在品牌创建方面,武夷山市政府于 2001 年开始统一规范岩茶商标、生产管理和产业转型方向;在品牌宣传方面,地方政府始终致力于以展会、多媒体、非物质文化遗产等多种方式进行茶文化推广和市场营销;在品牌维护方面,进行茶叶质量管控,实行茶叶质量可追溯体系建设,规范

商标认证和地理标志的申报使用管理,组织民间开展茶叶质量评比并开展农药市场管理和茶叶市场专项整顿与品牌打假。最后,以茶文化为内涵,促进茶旅融合。通过发挥武夷山“世界双遗产地”吸引力,并以茶企为主体,以体验、展示、销售等多种方式发挥茶业的观光科普、研学体验、休闲度假等多重功能,实现茶业跨界融合,协同转型发展。

表 2 武夷山国家公园传统产业转型发展主轴编码范畴提取

Table 2 Categories of axial coding of the transformation and development of traditional industries in Wuyishan National Park

编号	主范畴	初步概念化提取的范畴
C1	产业发展	标准化建设、规模化建设、专业化水平、专业分工、合作社、基础设施建设、集体经营、扩大工厂规模、深加工、同质化竞争、龙头企业带动、松散买卖关系
C2	生产管理	农残检测、茶青、家庭生产、茶味、资质、质量管控、生态监测、有机肥、科学管护、限制开垦、限制客土、茶叶生产培训、人工成本、小种茶熏制、限制外来松木、残留检测、地方标准、产品质量不稳定、茶叶安全
C3	产业生态化	生态品牌打假、生态化技术、生态茶园、生态价值、保护区建设、生态技术规范、品牌生态化、生态文化、生态文明、产品生态化、林业产业发展
C4	品牌建设	商标、推介会、驰名商标、茶叶宣传、品牌知名度、品牌竞争力、品牌利用、茶叶评比、假冒伪劣、以次充好、品牌维护、茶叶宣传、武夷岩茶、地理标志产品、世界遗产价值、国家公园价值、生态价值、生态附加值
C5	市场管理	茶山整治专项行动、工商管理、注册茶企、监管处罚、指导意见、综合整治、黑名单
C6	政策扶持	挂牌上市、信贷优惠、公益林奖补、专项资金、生态补偿、金融服务、茶叶电商平台、茶叶拍卖中心、物流服务网络、产业扶贫
C7	文化底蕴	历史文化、文化景观、世界遗产价值、农业文化遗产、非物质文化遗产、世界遗产
C8	旅游发展	茶园体验、生态旅游、自然风光、文化体验、旅游接待、科普研学、手工业文创产品、景区、旅游收入、茶旅融合、文旅融合、民宿

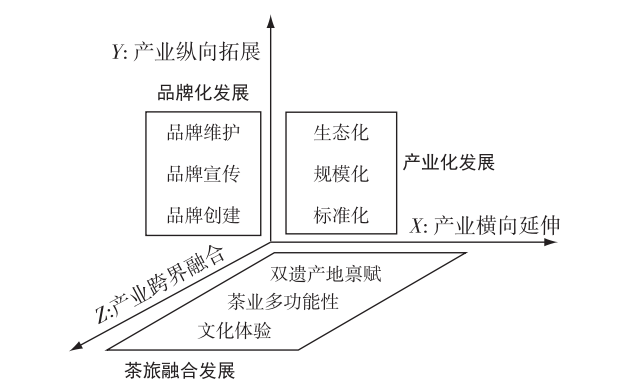


图 1 武夷山茶产业发展路径
Fig. 1 Development path of the Wuyishan tea industry

2.2 茶产业发展的制度保障与成效

为推动传统茶产业和茶农生计的转型发展,地方政府提供了具体的保障措施并取得了一定成效(图 2)。研究将保障措施总结为政策、资金和服务 3 个方面。在政策引导方面,地方政府出台了一系列茶产业转型升级指导意见和各类管理措施。2008 年武夷山在全国率先制订了一系列规范性管控文件指导茶山综合整治,严控茶山开垦行为,并于 2013 年起明确规定全面禁止开垦茶山,较早在国内

实现了茶山的规模管控。为规范传统茶叶生产转型方向,2016 年后武夷山市政府发出多项指导意见推进武夷山茶产业转型升级,以传统茶叶生产系统为基础,促进茶业由传统生产为主向传统与现代生产兼容转变。同时借力于武夷山自然与文化双遗产地、中国茶文化艺术之乡和非遗项目武夷岩茶(大红袍)制作技艺的文化禀赋,持续挖掘传统茶叶生产系统中深厚的文化底蕴,使单一茶叶营销向茶文化、茶旅游观光综合营销转变,单一茶叶产品加工向多元产品精细深加工提高附加值转变。在资金支持方面,地方政府加大资金扶持力度保障政策实施。自 2016 年起,武夷山市财政每年安排茶产业转型升级发展专项资金 500 万元,支持生态茶园建设和茶旅项目。相应地,金融机构也推出一系列优惠信贷措施解决茶农茶企资金周转。在服务支持方面,地方政府强化现代茶业科技服务和产业链社会化服务体系,进行种质资源研究,加强对茶叶病虫害的预测预报,搭建茶叶电商平台和物流服务网络。

近 20 a 来茶产业转型升级在生态化、标准化和多元化方面取得了一定的成效,并产生了明显的经济、生态和社会效益(图 2)。在经济效益方面,茶产

业现代化、品牌化、经营规模化明显提升,不同规模茶业生产加工者逐步在产业链上进行分工合作,传统茶农的市场意识逐渐提升,收入显著提高。在生态效益方面,茶山整治直接改善了生态环境,间接促进了生物多样性和生态系统保护。随着生态茶园面积不断扩大,茶业生态化的理念深入人心,在社会效益方面,茶业的转型发展提供了大批就业岗位,产业扶贫和就业扶贫取得一定成效;茶叶生产制作等传统工艺逐渐形成传承人制度,促进了非物

质文化遗产保护。

2.3 茶产业转型发展的典型问题与国家公园管理下的协同困境

传统茶产业在经历了近 20 a 的发展和转型后,尽管各类效益具有明显提升,但产业整体还存在一些典型问题,结合实地调研与访谈过程中所呈现的突出问题,分别从其 3 个转型方向对典型问题予以分析(表 3)。

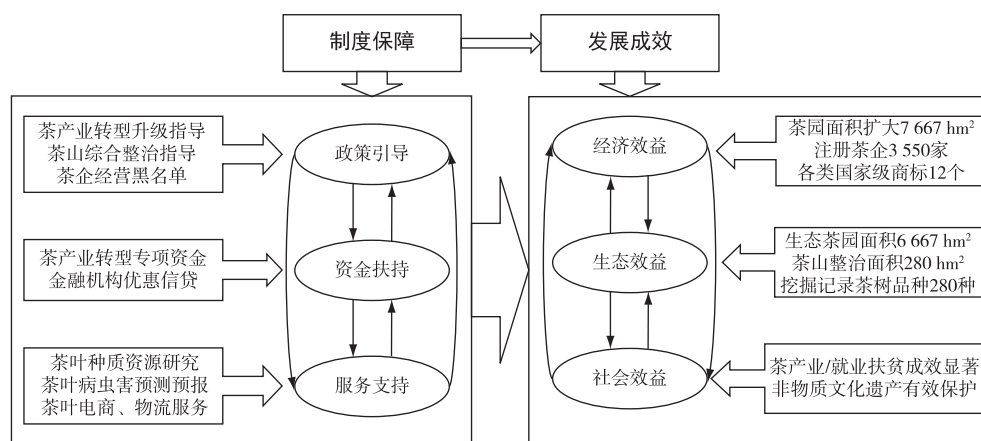


图 2 武夷山茶产业制度保障及发展成效

Fig. 2 Policy guarantee and development achievements of Wuyishan tea industry

表 3 武夷山茶产业转型发展典型问题

Table 3 Typical problems in the transformation and development of the Wuyishan tea industry

典型问题	外在表现
产业规模小而分散	专业化水平低,抗风险能力弱;生产标准难以执行,产品质量不稳定;品牌分散,规模优势不强;产业链短,附加值低
品牌策略缺乏生态视域	品牌定位偏差,重文化,轻生态;品牌价值错位,重人力资本,轻自然资本;品牌营销文化浅表化,市场行为缺乏理性
茶旅融合定位偏差	旅游资源定位单一,文化开发流于表面;缺乏专业文旅参与,投资建设较为盲目

产业从业者以中小规模、分散经营的茶农为主,家庭式加工厂广泛而密集分布,带来几类突出问题。武夷山地区的茶农家庭集种茶、制茶、卖茶于一身,难有余力发挥茶业多功能,使得单一产业抗风险能力较低。茶农分散生产,管理水平存在差异,难以执行和监督生产设备、加工条件、技术水平、操作规程、质量安全管控等标准,这使得茶叶质量不稳定。同时,龙头企业与茶农的关系大多限于松散的买卖关系,不同规模从业者尚未形成利益共同体,品牌合力不足,龙头和梯队效应不明显。

茶产业品牌提升策略存在对生态内涵理解的偏差和品牌定位与区域生态保护的脱节。武夷山地区历来重视饮茶文化,这也使得对茶叶的品牌定位和宣传偏重产品及文化内涵,茶叶生产侧重人力资本价值(如制作工艺等技艺和文化遗产),轻自然

资本价值(如茶山森林生态系统的多重功能和服务价值),传统茶叶生产系统中的资源管理及其生态知识价值被忽视,由此导致在市场营销时茶叶宣传缺乏理性,过分强调产品与消费者身价品味的关系,引起价格哄抬和虚高。一方面茶山的传统生态种植受到市场经济冲击,造成现代茶园的生态理念缺失和生态破坏;另一方面市场假冒伪劣、以次充好产品较多,口碑受到影响,茶农的市场风险增大。

部分规模性茶企尝试从茶旅融合层面进行突破来降低单一产业风险,但目前的发展存在定位偏差。在旅游资源价值定位上,缺乏对自然资源与文化资源的整合,旅游产品和项目较为单调,在文化展示上流于表面,缺乏生态底蕴、科学性和由此而来的高附加值产品。同时,缺乏与专业文旅机构的协作,在进行旅游产品和服务开发时无论是规模化

茶企还是小规模茶农均在管理资金、人才和理念方面存在不足,导致同质化竞争严重。

上述传统茶产业发展的典型问题在国家公园建设与管理时期持续存在,呈现为经济发展与自然保护的协同困境(图 3)。首先,茶叶生产与国家公园管理尚未融合。一方面,与传统知识未能融合。例如,国家公园管理严禁“客土”更新土壤肥力;为控制松材线虫病,国家公园禁止松木进入,但上述 2 种传统生产所必备的条件尚未找到合适的可持续替代措施。另一方面,适度规模化受到制约。例如,茶叶生产加工设施更新维修阻力较大。这些都在一定程度上直接影响到茶农的基本生计以及对维系传统农业系统的信心。其次,茶叶生产与生态理念尚未协同。一方面,茶叶生产科技支撑不足。

例如,对茶叶品质主要依赖主观评价,缺乏科学检测、分等定级以及生态监测与评估。另一方面,缺乏市场规范,以次充好、假冒伪劣、滥用地理标志等现象屡禁不止,生态稀缺性难以体现,生态附加值难以真正实现。再次,茶产业旅游化拓展尚未融入国家公园建设。国家公园的生态游憩规划尚未落地,国家公园管理局生态保护和游憩管理被割裂,茶农及其社区的旅游服务参与机制仍不明确。

研究发现,在国家公园管理体制完善进程中,地方政府与国家公园管理机构在协调生态保护与社区传统产业提升、转型和发展联动不足。社区发展本身是地方事权,但随着国家公园体制建设推进,产业发展方向受限,地方政府对国家公园多元管理目标存在疑虑。

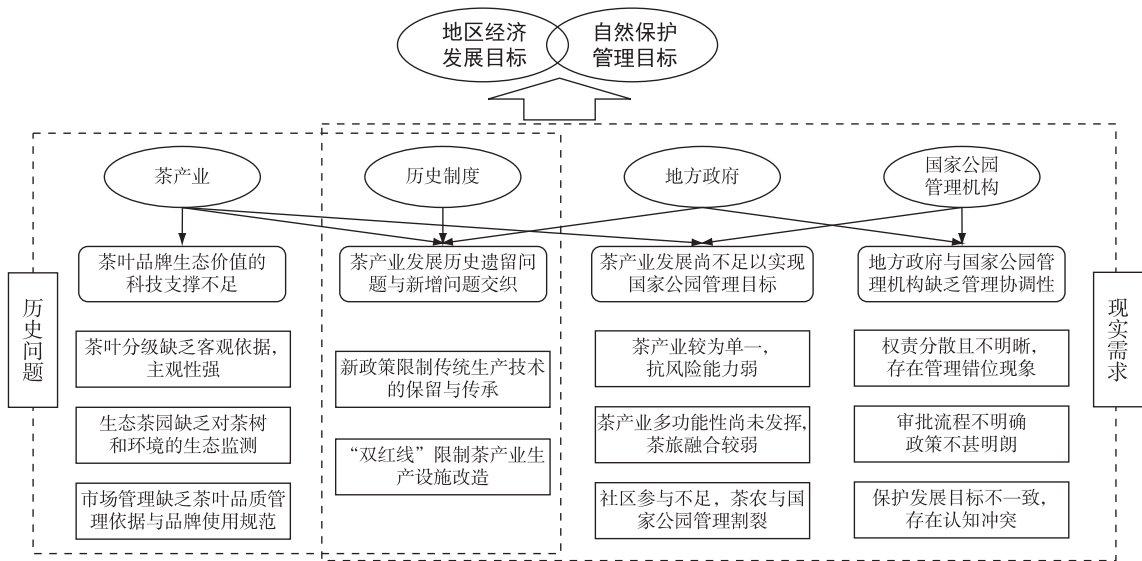


图 3 武夷山茶产业转型发展与自然保护在国家公园建设管理时期的协同困境

Fig. 3 Synergistic dilemmas between the transformational development of the tea industry and nature conservation management of Wuyishan National Park

3 讨论与建议

历史视角下的武夷山地区传统茶产业转型研究表明,生态本底虽然是茶叶种植的基础和保障,但在茶产业转型过程中,仅有茶产业的生态化这一途径来保障当地的生态资源基础,以地域品牌进行产品价值的提升以及以茶带旅的发展方式来拓展茶产业,都未能充分认识和发挥生态保护的重要作用,这也在一定程度上阻碍了茶产业实现生态价值向经济价值的转变。经济发展作为地方政府事权,在产业发展上总体还是体现了对于产业化、规模化和经济效益的追求,对于不同规模经营者的分工、

联动形成利益共同体和一致对外的品牌效应重视不够,在尊重产品差异化的基础上形成整个产业链的标准化和规模化上认知不足,对茶旅产业间的规划联动、自然保护的社会经济效益理解不深,从而导致生态价值难以体现,文化价值流于表面,自然保护和乡村发展在区域尺度上尚未形成相互支持与协作。

研究也发现,虽然茶农散户经营为主的局面长期以来并未有明显改变,但产业组织形式出现了变化,产业链上的专业分工、标准化管理和产品生态价值的实现呈现出一些自下而上的探索。茶业合作社的作用在产业前端体现在整合散户茶山进行

规模化管理和购买化服务上,如以争取有机生产补贴、生产资料折扣、统一完善生产设备设施等方式降低生产成本,在后端则体现在对不同茶农的初制毛茶进行统一分等定级、细分产品市场、开拓不同经销渠道并使用合作社统一商标售卖上。同时,对于生态理念的阐释也在逐步增强,出现了对于茶园生态的长期监测活动。

在国家公园管理体制下推动传统产业转型,需要进一步认识传统产业中丰富的经济、生物多样性、传统知识与技术体系、生态与文化景观等多功能和复合价值,理解自然保护地管理体制变迁中的区域产业兴衰历程,从匹配国家公园管理理念和对标国家公园管理目标的角度,在茶产业和茶旅融合发展中融入更多的生态观念和科学理念。为此,研究提出武夷山国家公园茶产业经营理念的转变方向和以茶带旅的产业功能拓展的主要目标。

首先,以建立国家公园品牌为目标,强化从茶叶种植到产品的基于科学指标的管理体系,以客观指标体现稀缺生态资源对茶叶品质的贡献,全面提升茶产业生态化水平。以国家公园体制建设为契机,在尊重茶叶生产传统知识和文化的基础上,加强科学指标体系的建设和管理,适当弱化茶叶地域差异,强化生态特质,以国家公园绿色品牌一致对外。

其次,从不同生产规模茶业从业者经营差异出发,构建茶农之间、茶农与茶企间的利益共同体关系,推进区域上的规模化管理和后端产品规模化经营。由于分散经营、中小规模的茶农在武夷山地区占主导地位,因此,在武夷山地区进行空间上的集约化规模生产既不符合生态保护需求,也违背茶叶种植的自然和社会条件。不过,差异化经营规模可以与完善的产业链专业分工进行匹配,以合作社促进茶山整合的规模化管理和提升社会化服务程度,让龙头企业的收购和加工成为拓展茶农销售渠道,稳定收入来源,提高品质标准的保障,也有利于确保龙头企业获得足够生产资料开展精深加工,从而促进茶业产业链的延伸。

第三,以提升自然体验质量与推进文化传承相结合为目标,拓展茶产业在国家公园生态体验与游憩管理中的功能。茶农对茶山生态特征的认知和对茶园的管理能够为自然景观和茶园景观的体验提供导赏;茶叶生产过程能够提供季节性的农事观摩、体验等。通过进行村庄规划并与国家公园生态游憩规划对接和落实,创新资源有偿利用机制、探索特许经营制度。通过特许经营项目的进一步细

化和规范化,使不同经营规模的茶产业从业者能够面向不同目标群体提供细分的、差异化的服务,包括一般游线上的大众交通、食宿,茶艺修行和茶俗体验,生态体验路线上的补给点等,同时引导管理者、社区居民、特许经营者以及访客等多元利益相关者践行负责任的、生态友好的行为。

4 结论

研究从历史视角出发,分析了近 20 a 来武夷山基于茶文化系统的传统茶产业转型发展理念、方向、路径、措施和成效。研究发现,茶产业转型发展还未能很好地与自然保护管理需求形成高层次的良性互动。传统茶产业生态化、标准化和规模化,茶叶品牌效应提升和茶旅融合发展这 3 个主导方向在具体路径实施、制度保障下取得了相应成效,但在自然保护地建设发展的背景下,需要立足国家公园建立理念和管理目标来重新思考其实现方式。

武夷山传统茶产业在继承历史问题和满足现实需求时产生的典型问题集中体现在产品生态价值的科学评判与实现、文化价值的识别与传承以及多方利益相关者的交流与共识上。在我国现实国情下,自然保护与乡村发展不能是互相独立的 2 个事业,乡村社区生计发展所依赖的土地利用和资源使用也不能与自然保护地在空间上完全割裂,这就要求在宏观层面上产业政策与生态保护政策互不矛盾,在微观层面上社区生计活动与生态保护互相兼容,在区域空间规划和管理中地方政府与自然保护地管理机构就自然保护管理涉及的社区产业发展上达成共识、形成合力。因此,自然保护地内传统产业的转型与社区的可持续发展需要立足本土生态知识,形成科学管理标准,联动差异化生产经营者,寻求多种增值服务机会,从而促进茶产业形成有特色的生态化体系和发挥多功能价值。

参考文献:

- [1] WESTERN D, PEARL M. Conservation for the 21st Century [M]. New York, United States: Oxford University Press, 1989: 31-34.
- [2] 陈传明, 侯雨峰, 吴丽媛. 自然保护区建立对区内居民生计影响研究: 基于福建武夷山国家级自然保护区 272 户区内居民调研[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(1): 219-224. [CHEN Chuan-ming, HOU Yu-feng, WU Li-yuan. The Influence of Establishing the Nature Reserve on Residents Livelihood: Based on Investigations of 272 Residents in Wuyishan National Nature Reserve of Fujian Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(1): 219-224.]
- [3] 张灿强, 沈贵银. 农业文化遗产的多功能价值及其产业融合发展途径探讨[J]. 中国农业大学学报(社会科学版), 2016, 33

- (2):127-135.[ZHANG Can-qiang, SHEN Gui-yin. Multifunction of Agricultural Heritage and Its Industrial Development and Industrial Convergence Approaches [J]. China Agricultural University Journal (Social Sciences Edition), 2016, 33(2):127-135.]
- [4] 宋文飞, 李国平, 韩先锋. 自然保护区生态保护与农民发展意向的冲突分析: 基于陕西国家级自然保护区周边 660 户农民的调研数据[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(10):139-149. [SONG Wen-fei, LI Guo-ping, HAN Xian-feng. Conflict between Farmers' Ecological Protection and Development Intention in Nature Reserve: Based on the Research Data of 660 Households of Farmers around the National Nature Reserve in Shaanxi [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(10):139-149.]
- [5] STEVENS S. Indigenous Peoples, National Parks, and Protected Areas: a New Paradigm Linking Conservation, Culture, and Rights [M]. Tucson, United States: University of Arizona Press, 2014: 74-76.
- [6] CAPISTRANO R C G, CHARLES A T. Indigenous Rights and Coastal Fisheries: A Framework of Livelihoods, Rights and Equity [J]. Ocean & Coastal Management, 2012, 69:200-209.
- [7] 王一超, 郝海广, 张惠远, 等. 自然保护区农户参与生态补偿的意愿及其影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(6):895-900. [WANG Yi-chao, HAO Hai-guang, ZHANG Hui-yuan, et al. Willingness of Farm Households in National Nature Reserves to Participate in Ecological Compensation and Its Affecting Factors [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(6):895-900.]
- [8] 赵翔, 朱子云, 吕植, 等. 社区为主体的保护: 对三江源国家公园生态管护公益岗位的思考[J]. 生物多样性, 2018, 26(2):210-216. [ZHAO Xiang, ZHU Zi-yun, LÜ Zhi, et al. An Observation to the New Initiative of Community Conservation Guard Posts in the Pilot Three-River-Source National Park [J]. Biodiversity Science, 2018, 26(2):210-216.]
- [9] RAINA S K, KIOKO E, ZETHNER O, et al. Forest Habitat Conservation in Africa Using Commercially Important Insects [J]. Annual Review of Entomology, 2011, 56:465-485.
- [10] GÖSSLING S. Ecotourism: A Means to Safeguard Biodiversity and Ecosystem Functions? [J]. Ecological Economics, 1999, 29(2):303-320.
- [11] 陈秧分, 刘玉, 李裕瑞. 中国乡村振兴背景下的农业发展状态与产业兴旺途径[J]. 地理研究, 2019, 38(3):632-642. [CHEN Yang-fen, LIU Yu, LI Yu-rui. Agricultural Development Status and Industrial Prosperity Path under the Background of Rural Revitalization in China [J]. Geographical Research, 2019, 38(3):632-642.]
- [12] 徐网谷, 高军, 夏欣, 等. 中国自然保护区社区居民分布现状及其影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(1):19-23. [XU Wang-gu, GAO Jun, XIA Xin, et al. Distribution of Community Residents in Nature Reserves and Its Impacts on the Reserves in China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(1):19-23.]
- [13] 杨悦, 员学锋, 马超群, 等. 秦巴山区农户生计与乡村发展耦合协调分析: 以陕西省洛南县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(4):448-455. [YANG Yue, YUN Xue-feng, MA Chao-qun, et al. Coupling Coordination Analysis of Farmers' Livelihoods and Rural Development in the Qinling-Daba Mountains: A Case Study of Luonan County in Shaanxi Province [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(4):448-455.]
- [14] 王瑾, 张玉钧, 石玲. 可持续生计目标下的生态旅游发展模式: 以河北白洋淀湿地自然保护区王家寨社区为例[J]. 生态学报, 2014, 34(9):2388-2400. [WANG Jin, ZHANG Yu-jun, SHI Ling. Evaluation Index System of Sustainable Livelihoods Ecotourism Strategy: A Case Study of Wangjiazhai Community in Baiyangdian Wetland Nature Reserve, Hebei [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9):2388-2400.]
- [15] 王真, 王谋. 自然保护区周边环境友好型农业产业组织模式演进分析: 以朱鹮保护区为例[J]. 生态经济, 2016, 32(12):192-197. [WANG Zhen, WANG Mou. Analysis of Evolution of Environment Friendly Agricultural Industrial Organization Mode around the Nature Reserve: Taking Crested Ibis Nature Reserve as an Example [J]. Ecological Economy, 2016, 32(12):192-197.]
- [16] 韦惠兰, 赵松松. 自然保护区中的生态产业链系统模型构建: 基于自然保护区发展转型期的市场保护分析[J]. 生态经济, 2014, 30(10):38-41, 86. [WEI Hui-lan, ZHAO Song-song. Construction on the System Model of the Ecological Industry Chain in the Nature Reserves [J]. Ecological Economy, 2014, 30(10):38-41, 86.]
- [17] 杨建利, 邢骄阳. 我国农村产业融合发展研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(9):72-78. [YANG Jian-li, XING Jiao-yang. The Convergence Development of Agriculture, Second Industry and Third Industry in Rural Area of China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(9):72-78.]
- [18] 何思源, 王博杰, 王国萍, 等. 自然保护地社区生计转型与产业发展[J]. 生态学报, 2021, 41(23):9207-9215. [HE Si-yuan, WANG Bo-jie, WANG Guo-ping, et al. Rural Livelihood Transition and Industrial Development in Protected Areas: Experience and Inspiration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23):9207-9215.]
- [19] ŠTRAUS S, BAVEC F, BAVEC M. Organic Farming as a Potential for the Development of Protected Areas [J]. Acta Geographica Slovenica, 2011, 51(1):151-168.
- [20] 肖文书, 詹晨, 王梦桥, 等. 国家公园资源利用体系优化策略: 以海南热带雨林国家公园霸王岭片区为例[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2021, 20(2):35-43. [XIAO Shu-wen, ZHAN Chen, WANG Meng-qiao, et al. The Optimization Strategy of Resources Utilization System of National Parks: Taking the Bawangling Zone of the Hainan Tropical Rainforest National Park as an Example [J]. Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences), 2021, 20(2):35-43.]
- [21] 陈叙图, 金筱霆, 苏杨. 法国国家公园体制改革的动因、经验及启示[J]. 环境保护, 2017, 45(19):56-63. [CHEN Xu-tu, JIN Xiao-ting, SU Yang. The Initiative and Experiences of the National Park Management System Reform in France and Its Enlightenment to China [J]. Environmental Protection, 2017, 45(19):56-63.]
- [22] VAN DER WINDT H J, SWART J A A. Aligning Nature Conservation and Agriculture: The Search for New Regimes [J]. Restoration Ecology, 2018, 26:S54-S62.

- [23] 熊爱华,张涵.农村一二三产业融合:发展模式、条件分析及政策建议[J].理论学刊,2019(1):72-79.[XIONG Ai-hua,ZHANG Han.Integration of Primary,Secondary,and Tertiary Industries:Development Patterns,Condition Analysis and Policy Recommendations[J].Theory Journal,2019(1):72-79.]
- [24] LELE S,WILSHUSEN P,BROCKINGTON D,*et al.*Beyond Exclusion:Alternative Approaches to Biodiversity Conservation in the Developing Tropics[J].Current Opinion in Environmental Sustainability,2010,2(1/2):94-100.
- [25] 李辛怡,陈旭兵,陈恒毅.武夷山国家公园体制试点区旅游发展现状与对策研究[J].武夷学院学报,2019,38(10):37-41.[LI Xin-yi,CHEN Xu-bing,CHEN Heng-yi.Research on Current Situation and Countermeasures of Tourism Development in Wuyishan National Park Pilot Area[J].Journal of Wuyi University,2019,38(10):37-41.]
- [26] 陈向明.扎根理论的思路和方法[J].教育研究与实验,1999(4):58-63,73.[CHEN Xiang-ming.Grounded Theory:Its Train of Thought and Methods[J].Educational Research and Experiment,1999(4):58-63,73.]
- [27] 孙晓娥.扎根理论在深度访谈研究中的实例探析[J].西安交通大学学报(社会科学版),2011,31(6):87-92.[SUN Xiao-e.Grounded Theory:Theory-Development in In-Depth Interview Research[J].Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences),2011,31(6):87-92.]
- [28] 陈向明.质的研究方法与社会科学研究[M].北京:教育科学出版社,2000:286-288.[CHEN Xiang-ming.Qualitative Research in Social Sciences[M].Beijing:Educational Science Publishing House,2000:286-288.]
- [29] GLASER B G,STRAUSS A L.The Discovery of Grounded Theory:Strategies for Qualitative Research[M].London,UK:Routledge,2017:98-103.

作者简介:王博杰(1997—),男,河南三门峡人,博士生,主要研究方向为自然保护地管理、遗产旅游与生态旅游。
E-mail:wangbj.19b@igsrr.ac.cn

(责任编辑:陈 昕)

欢迎订阅 2023 年《生态与农村环境学报》

《生态与农村环境学报》系生态环境部主管、生态环境部南京环境科学研究所主办的全国性学术期刊,是《中文核心期刊要目总览》2020 年版入编期刊、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊、中国学术期刊评价研究报告(RCCSE)核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、被中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)、中文社会科学引文索引(CSSCI)、中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)、中国期刊全文数据库(CJFD)、中国核心期刊(遴选)数据库、CA/CABI/BA/BP/BD/UPD/GeoBase/ZR/EM/Scopus/AGRIS/JST/BIOSIS/GH/RB/EBSCO 等国内外重要刊库网收录。曾荣获全国优秀环境科技期刊、江苏省优秀期刊,荣获第二届江苏“十强科技期刊”、第三届江苏省新闻出版广电政府奖期刊奖提名奖及第七届华东地区优秀期刊奖,为中国期刊协会赠建全国百家期刊阅览室指定赠送期刊。

本刊宗旨:及时报道生态与农村环境保护领域创新性研究成果等。

主要栏目:研究报告、研究简报、研究方法、专论与综述、学术讨论与建议等。

主要内容:(1)区域环境与发展,包括生态环境变化与全球环境影响、区域生态环境风险评价、环境规划与管理、区域生态经济与生态安全等;(2)自然保护与生态,包括自然资源保护与利用、生物多样性与外来物种入侵、转基因生物环境安全与监控、生态保护、生态工程与生态修复、有机农业与农业生态、气候变化与生态响应等;(3)污染控制与修复,包括污染控制原理与技术、土壤污染与修复、水环境污染与修复、大气污染防控、农业废物综合利用与资源化、农用化学品风险评价与监控、化学品环境与健康等。

主要读者对象:从事生态学、环境科学、农学、林学、地学、资源科学等研究、教学、生产的科技人员,相关专业的高等院校师生以及各级决策与管理人員。

本刊为月刊,每月 25 日出版,A4 开本,每期 136 页,每期定价 30.00 元,全年定价 360.00 元,公开发行,国内邮发代号 28-114,全国各地邮局均可订阅;国外由中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱)负责发行,国外发行代号 Q5688。如漏订,可向本刊编辑部补订。编辑部地址:江苏省南京市蒋王庙街 8 号;邮政编码:210042;电话:(025) 85287052,85287092,85287053,85287036,85287601,85287630;网址:<http://www.ere.ac.cn>;E-mail:ere@vip.163.com,bjb@nies.org。

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0599

赖格英, 邓名明, 马云梦, 等. 福州茉莉花茶文化系统与旅游产业耦合发展的影响因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1239–1248.
LAI Ge-ying, DENG Ming-ming, MA Yun-meng, et al. Research on the Influencing Factors of Coupling Development of the Fuzhou Jasmine Tea Culture System and the Tourism Industry[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1239–1248.

福州茉莉花茶文化系统与旅游产业耦合发展的影响因素研究

赖格英^{1,2①}, 邓名明¹, 马云梦¹, 赖怡恬³ (1. 江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022; 2. 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022; 3. 江西师范大学科学技术学院, 江西 共青城 332020)

摘要: 作为传统农业生产系统的农业文化遗产在传承与保护过程中与休闲农业和乡村旅游相结合, 不仅能充分发挥农业文化遗产诸多功能中的生产功能, 而且还能在结合过程中实现传承与保护优秀农耕文化的作用, 促进重要农业文化遗产的可持续发展, 然而定量分析农业文化遗产与旅游产业耦合发展和提取影响耦合因素方面的研究不多。该研究选取全球重要农业文化遗产的福州茉莉花与茶文化系统为研究对象, 通过构建多层次的农业文化遗产与旅游产业耦合发展的评价指标体系, 定量分析了 2008—2020 年茶文化系统与旅游产业的综合发展水平、耦合协调程度、耦合影响因素, 以期通过评估遗产系统在入选前及入选后经过多年保护与发展的状况, 为后续的优化策略和研究提供参考。结果表明: (1) 在旅游产业综合发展水平评价层面, 福州茉莉花与茶文化系统作为全球农业文化遗产整体发展情况较好, 呈持续上升趋势; (2) 在与旅游产业耦合协调发展水平分析层面, 茶文化系统与旅游产业处于高耦合水平, 但存在低程度的波动; (3) 在测算影响两者耦合发展的驱动因素和障碍因素分析层面, 灰色关联分析法测算影响因素的关联度普遍大于 0.6, 表明耦合关联度较高。

关键词: 农业文化遗产; 旅游产业; 福州茉莉花与茶文化系统; 耦合协调; 影响因素

中图分类号: X37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1239-10

Research on the Influencing Factors of Coupling Development of the Fuzhou Jasmine Tea Culture System and the Tourism Industry. LAI Ge-ying^{1,2①}, DENG Ming-ming¹, MA Yun-meng¹, LAI Yi-tian³ (1. College of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. The Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Nanchang 330022, China; 3. School of Science and Technology, Jiangxi Normal University, Gongqingcheng 332020, China)

Abstract: In the process of inheritance and protecting agro-cultural heritage, as a traditional agricultural production system combined with leisure agriculture and rural tourism, it can not only give full play to the production function among the many functions of agro-cultural heritage, but also realize the role of inheritance and protection of excellent farming culture in the process of combination, and promote the sustainable development of important agro-cultural heritage. However, research on quantitative analysis of coupling development of the agro-cultural heritage and tourism industry and extraction influencing factors remains insufficient. This study takes the globally Important Agricultural Heritage Fuzhou Jasmine and Tea Culture System (Chinese first list of important agricultural heritage in 2013) as an example, constructs a coupling evaluation index system of agro-cultural heritage and tourism industry with a hierarchical and favorable evaluation, analyses the comprehensive development level, the coupling coordination degree and the coupling influence factors of the tea culture system and tourism industry from 2008 to 2020, so as to provide reference for subsequent optimization strategies and research by assessing the status of protection and development of the heritage system before and after being selected. Results show that: (1) At the evaluation of the comprehensive development level, the development of Fuzhou Jasmine and Tea Culture System as a global agro-cultural heritage is good and shows a continuous upward trend. (2) At the coupling coordi-

收稿日期: 2020-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(42161014)

① 通信作者 E-mail: laigeying@126.com

nation development level, they are at a high level of coupling, but with a low degree of fluctuation. (3) At the analysis level of measuring the drivers and obstacles affecting the two coupling development, the correlation degree of the influencing factors calculated by the gray relational analysis method is generally above 0.6, indicating that the coupling correlation degree is high.

Key words: agro-cultural heritage; tourism industry; Fuzhou Jasmine and Tea Culture System; coupling coordination; influencing factors

农业文化遗产与一般的文化遗产、自然遗产有所不同,它是农村与其周围环境长期协同进化和动态适应下形成的独特土地利用系统、农业景观和农业文化,是一种特殊的活态遗产^[1]。如何促进农业文化遗产的可持续发展并在传承保护过程中充分挖掘与利用农业文化遗产的功能与价值,近年来得到政府、学界、业界的高度关注。第 3 个“文化遗产日”提出发展旅游是促进农业文化遗产地保护传承的有效途径^[2];此外,大众旅游需求从物质消费向文化多样性体验过渡,为农业文化遗产的旅游开发提供了良好契机^[3]。

在农业文化遗产与旅游发展意义、旅游开发模式、旅游资源开发、旅游影响及社区参与等方面,我国学者进行了大量深入的探讨^[4-17],方法多以定性分析为主,定量研究较为缺乏;旅游产业作为农业文化遗产活化发展最有效的途径,是当前的研究热点,有关农业文化遗产与旅游耦合研究领域,尤其在探析遗产系统与旅游系统各组织之间的内在演变过程、机制方面,我国学者进行了许多有益的初步探讨,如李伯华等^[18]在自组织理论的框架下,将湖南的重要农业文化遗产新化紫鹊界梯田作为研究对象,揭示了其与当地旅游产业之间的依托关系,阐述了内部融合、外部延伸以及空间系统拓展等多种融合发展途径,同时从政府、企业和社区居民等多个角度出发,指出农业文化遗产地旅游产业融合所需要的基础条件。然而,目前关于农业文化遗产与旅游产业两者耦合发展的研究多以中国农业文化遗产总体情况为对象^[19-20],尽管存在一定的通用性,却忽略了个体之间的差异性,得出的结论大多是农业文化遗产与旅游产业有较高的耦合发展前景,却未对影响耦合的因素进行提取分析。因此,着眼于多层次且更微观因素的研究,以易于发现农业文化遗产耦合发展中的具体问题,仍是值得探讨的领域。

笔者以农业文化遗产与旅游产业间的耦合发展为目标,以全球重要农业文化遗产(2013 年入选第 1 批中国重要农业文化遗产)的福州茉莉花与茶文化系统为对象,通过构建多层次的农业文化

遗产与旅游产业耦合发展的评价指标体系,在评测两者耦合度的基础上尝试引入最优模型分析影响因素,定量分析 2008—2020 年茶文化系统与旅游产业的综合发展水平、耦合协调程度、耦合影响因素,以期通过多层次的定量分析,评估遗产系统在入选前及入选后经过多年保护与发展的状况,为后续的优化策略提供支撑,为农业文化遗产与旅游耦合发展的深入研究提供参考。

1 研究区概况

福州茉莉花与茶文化系统遗产地福州市位于我国福建省闽江河口(图 1),全市辖鼓楼、仓山、晋安等 6 区 6 县,国土面积 11 968 km²;截至 2021 年,常住人口为 842 万。属于亚热带海洋性季风气候区,年均气温 20~25℃,年均降水 900~2 100 mm,年均日照时数为 1 700~1 980 h,无霜期达 326 d;土壤以偏酸性的红壤、赤红壤、黄壤为主,垂直分布特征明显,土壤质地疏松、土层深厚、通气排水性能好。这为喜湿怕涝、喜酸性土壤的茶树和茉莉的生长提供了适宜的自然条件。

遗产地主要分布在福州市境内的晋安区、仓山区、闽侯县、连江县、长乐市和永泰县 6 个县(市、区),遗产地总面积 3 291 km²(图 2),其中连江县与长乐市主要为茉莉花茶综合发展区,永泰县、闽侯县和晋安区主要为茶种植发展区,仓山区主要为茉莉花种植区与遗产保护区(图 3)。

2 数据与方法

2.1 指标体系的构建

基于耦合分析理论构建的福州茉莉花与茶文化系统指标体系使用主要词频统计法,利用 CNKI 数据库关于“农业文化遗产”“旅游发展”的相关研究成果作为支撑,参考《福建福州茉莉花与茶文化系统》^[21],以专家意见为补充,通过研究茉莉花茶农业文化遗产综合发展现状,对其景观、文化、生态、生产进行梳理,并在参考前人研究^[19]的基础上,构建福州茉莉花茶农业文化遗产综合评价指标体系(表 1)。旅游产业系统指标体系在借鉴已有成

果^[22-23]的基础上,进一步研究确定旅游产业评价体系,包括旅游效应、旅游收入、旅游服务、旅游设施、旅游就业 5 个维度。指标体系中各指标的权重值采

用熵值法确定。熵值法可根据指标的变异程度,客观计算出指标权重,并为多指标综合评价提供依据^[24]。

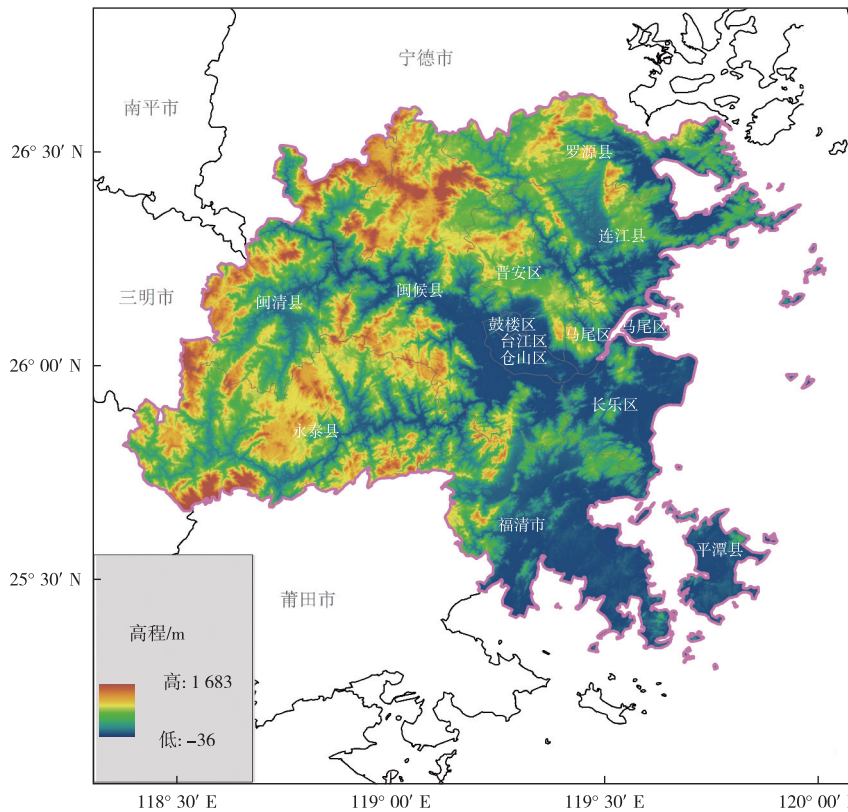


图 1 研究区概况
Fig. 1 Location of the study area

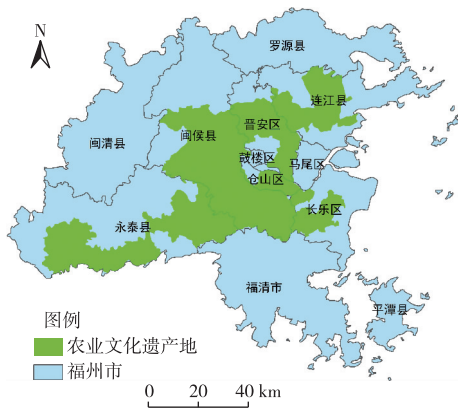


图 2 福州茉莉与茶文化系统农业文化遗产地范围
Fig. 2 Scope of the Fuzhou Jasmine and Tea Culture System agro-cultural heritage Site

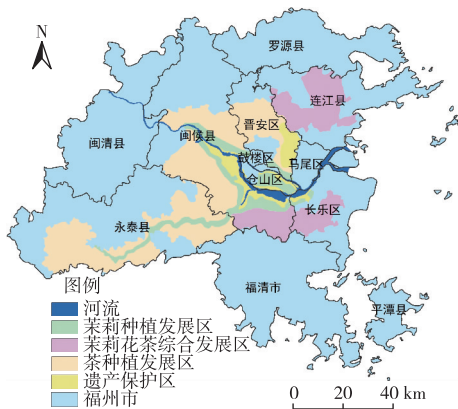


图 3 福州茉莉与茶文化系统农业文化遗产地功能分区
Fig. 3 Functional zoning of the Fuzhou Jasmine and Tea Culture System agro-cultural heritage site

2.2 数据来源

研究所涉及的福州地区 35 个指标 13 a 的时间序列数据(2008—2020 年)主要来源于以下 3 条途径:(1)统计年鉴及公报,包括《福州统计年鉴》《国

民经济与社会发展统计公报》和《中国文化和旅游年鉴》等;(2)研究报告,包括《中国农业文化遗产研究》^[25]和《乡村振兴与农业文化遗产——中国重要全球农业文化遗产保护发展报告(2019)》^[26]等;

(3) 政府官网,包括福州市农业农村局、中国茶叶流通协会和福州市人民政府网等。此外,由于时间跨度大,数据均以最新版本为准,部分缺失数据根据其他年份的数值和增长率经科学计算得出。福州市行政区划矢量数据来源于国家基础地理信息中心网站。

表 1 福州茉莉花与茶文化系统与旅游产业系统耦合评价指标体系

Table 1 Coupling evaluation index system for Fuzhou Jasmine and Tea Culture System and tourism industry

目标层	I 级指标 (权重)	Ⅱ 级指标	Ⅱ 级指标单位	正、逆向	权重
A 福州茉莉花与茶文化系统	A1 资源要素 (0.202)	A11 核心保护区数	个	正	0.052
		A12 品种资源	种	正	0.051
		A13 生物多样性	种	正	0.044
		A14 茶园面积	hm ²	正	0.055
	A2 文化传承 (0.194)	A21 工艺传承人	人	正	0.043
		A22 博物馆	座	正	0.086
		A23 地理标志	个	正	0.065
	A3 生产发展 (0.297)	A31 茶叶总产量	万 t	正	0.053
		A32 茶叶综合产值	亿元	正	0.046
		A33 品牌价值	亿元	正	0.045
		A34 茶厂数量	个	正	0.048
		A35 茶叶出口均价	美元·kg ⁻¹	正	0.037
		A36 茉莉花茶当年均价	元·kg ⁻¹	正	0.032
		A37 茶农人均收入	元	正	0.036
	A4 科研效应 (0.094)	A41 申请专利数	个	正	0.043
		A42 研究报告	部(篇)	正	0.051
	A5 政策保护 (0.087)	A51 政策法规建设	条	正	0.043
		A52 财政补贴	元·(667 m ²) ⁻¹	正	0.044
	A6 生态环境 (0.124)	A61 闽江流域福州段Ⅱ类以上水质水体占比	%	正	0.017
		A62 大气质量优良率	%	正	0.026
		A63 空气质量综合指数		逆	0.034
		A64 绿化覆盖率	%	正	0.027
		A65 森林覆盖率	%	正	0.020
B 旅游产业系统	B1 旅游效应 (0.213)	B11 国内旅游人次	万人次	正	0.116
		B12 入境旅游人次	万人次	正	0.097
	B2 旅游收入 (0.210)	B21 国内旅游收入	亿元	正	0.148
		B22 国际旅游收入	万美元	正	0.062
	B3 旅游服务 (0.216)	B31 旅游饭店数	家	正	0.074
		B32 星级酒店数 ¹⁾	家	正	0.079
		B33 医疗床位数	张	正	0.063
	B4 旅游设施 (0.166)	B41 旅行社数	家	正	0.087
		B42 旅游景区数	个	正	0.079
	B5 旅游就业 (0.195)	B51 旅行社从业人员	人	正	0.048
		B52 旅游饭店人员	人	正	0.065
		B53 旅游景区人员	人	正	0.082

1) 星级酒店指二星以上的酒店。

2.3 数据分析方法

2.3.1 指标权重的熵值确定方法

在构建的耦合指标中原始数据的各项指标之间会存在一定的差异性,包括差异化的量纲和单位。在进行指标权重计算前对数据标准化,将数据转化为相对量;在分析时以无量纲化做极值化的方式进行,并在计算结果的基础上加 0.01,防止出现统计结果无意义的情况,其计算公式为

$$Z_{ij} = \frac{A_{ij} - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} + 0.01。 \tag{1}$$

式(1)中, Z_{ij} 为经过数据标准化后的指标计算结果; A_{ij} 为第*i*个指标的第*j*个原始指标数据; $A_{\min}$ 为此项指标的最小值; $A_{\max}$ 为此项指标的最大值。评价体系中有些指标的数据方向不一致,在 SPSS 21.0 软件中进行数据正向化处理。

用熵值法计算农业文化遗产与旅游产业耦合

指标的权重,以增加评价结果的客观性,并减弱人为主观因素干扰^[24]。

$$S_{ij} = Z_{ij} / \sum_{i=1}^m Z_{ij} \quad (2)$$

式(2)中, S_{ij} 为信息熵,表示在第 j 项指标下第 i 个年份所占该项指标的比重。

$$V_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m S_{ij} \ln S_{ij} \quad (3)$$

式(3)中, V_j 为 j 项指标的熵值,其中 m 是统计得到的年数。

$$W_j = (1 - V_j) / \sum_{i=1}^m (1 - V_j) \quad (4)$$

式(4)中, W_j 为第 j 项指标的权重。

2.3.2 综合发展水平评价指数的线性加权计算方法

利用线性加权法计算 2 个系统各自的综合发展水平,采用 U_1 表示农业文化遗产系统综合评价指数, U_2 表示旅游产业发展综合评价指数。

$$U_i = \sum_{j=1}^m W_j Z_{ij}, i = 1, 2. \quad (5)$$

式(5)中, U_1 和 U_2 数值大小表示农业文化遗产系统和旅游产业整体发展情况的好坏,取值为 $[0, 1]$ 。

2.3.3 耦合协调度模型

耦合度可以体现农业文化遗产与旅游产业 2 个系统的关联程度,直观表达 2 个系统之间的和谐程度。通过搭建耦合度函数来计算农业文化遗产与旅游产业的耦合度,设耦合度为 C ^[27]。

$$C = \left(\frac{U_1 U_2}{U_1 + U_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式(6)中,耦合度 C 值取值范围为 $[0, 1]$, C 值越小,表明系统间耦合性越低; C 值越大,表明系统间耦合性越高。

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2, \quad (7)$$

$$\alpha + \beta = 1. \quad (8)$$

式(7)~(8)中, T 为综合协调指数; α 、 β 为待定权重。考虑到旅游产业发展要素有多种,而农业文化遗产只属于其中一种,因此 α 取 0.3, β 取 0.7。

$$D = \sqrt{T \times C} \quad (9)$$

式(9)中, D 为协调度指数,取值为 $[0, 1]$,用以衡量 2 个系统的协调发展程度。

通过协调细分的方式可直观反映不同年份农业文化遗产与旅游产业的协调情况,目前针对两者的协调度水平标准细分尚未有统一的结论,参照文献[28],将耦合协调等级划分为 10 级(表 2)。

表 2 耦合协调度等级划分

Table 2 Coupling coordination level classification

耦合状态	范围	耦合协调等级
萌芽	0.00~0.10	极度失调
	>0.10~0.20	严重失调
	>0.20~0.29	中度失调
磨合	0.30~0.40	轻度失调
	>0.40~0.49	濒临失调
稳定	0.50~0.60	勉强协调
	>0.60~0.70	初级协调
	>0.70~0.79	中级协调
高水平耦合	0.80~0.90	良好协调
	>0.90~1.00	优质协调

2.3.4 影响因素筛选的灰色关联分析法

基于福州茉莉花与茶文化系统与旅游产业发展现状,研究耦合协调度 D 的影响因素,将 D 值作为参考数列,并将两者耦合发展的一、二级指标作为比较数列的影响因素。

设参考序列为

$$M = \{M(k), k = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (10)$$

比较序列为

$$K_i = \{K_i(k), i = 1, 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (11)$$

依据灰色系统理论^[29],计算第 k 年与第 i 个指标对应的参考指标的关联系数 ζ_i 。

$$\zeta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (12)$$

式(12)中, $\Delta_{\max}$ 为参考数列 M 与比较数列的 K_i 最大差值; $\Delta_{\min}$ 为参考数列与比较数列的最小差值; $\Delta_{oi}(k)$ 为参考数列与比较数列差值的数列;分辨率系数 ρ 反映相关系数之间的差异显著性,一般取值 0~1,当 $\rho \leq 0.546$ 时,分辨率较好,该研究取 0.5。

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) \quad (13)$$

式(13)中, R_i 为灰色关联度, R_i 的取值为 $[0, 1]$,越接近 1,表明 M 与 K_i 之间的关联度越大。

3 结果与分析

3.1 综合发展水平分析

表 3 和图 4 分别给出了福州茉莉花与茶文化系统综合指数(U_1)及旅游产业综合指数(U_2)、耦合协调度及其等级。

U_1 与 U_2 的最小值均在研究的起点年份 2008 年取得,之后均连年增长。其中, U_1 从 2008 年的 0.027 递增至 2020 年的 1.002,增长了约 37 倍。

2008—2011 年 U_1 处于较低水平,这是由于早期农业文化遗产的宣传力度低和相关配套设施不完善。2012 年后 U_1 呈现较好走势,这与政策的引导密不可分。2014 年福州茉莉花与茶文化系统入选全球重要农业文化遗产。自 2016 年起,中央一号文件多

次对农业文化遗产的保护和发展提出意见。 U_2 从 2008 年的 0.014 9 增长到 2018 年的 0.913 2,增长了约 61 倍,其间未出现下降,表明旅游产业呈现持续发展的态势。从 U_1 和 U_2 的大小来看, U_1 总体高于 U_2 ;从发展速度来看, U_1 发展速度慢于 U_2 。

表 3 福州茉莉花与茶文化系统与旅游产业综合指数、耦合协调度数值及等级

Table 3 Comprehensive index, coupling coordination value and rank of Fuzhou Jasmine and Tea Culture System and tourism industry

年份	U_1	U_2	T	C	D	耦合协调等级
2008	0.027 3	0.014 9	0.018 7	1.000 0	0.018 7	极度失调
2009	0.051 5	0.077 0	0.069 4	0.922 0	0.063 9	极度失调
2010	0.112 7	0.102 6	0.105 7	0.999 0	0.105 6	严重失调
2011	0.170 3	0.132 8	0.144 1	0.999 0	0.143 9	严重失调
2012	0.289 0	0.232 2	0.249 2	0.999 0	0.249 0	中度失调
2013	0.377 4	0.293 1	0.318 4	0.997 0	0.317 4	轻度失调
2014	0.556 2	0.372 8	0.427 8	0.989 0	0.423 1	濒临失调
2015	0.635 9	0.429 4	0.491 3	0.989 0	0.485 9	濒临失调
2016	0.702 0	0.496 0	0.557 8	0.992 0	0.553 4	勉强协调
2017	0.789 5	0.580 4	0.643 2	0.994 0	0.639 3	初级协调
2018	0.862 2	0.717 5	0.760 9	0.999 0	0.760 2	中级协调
2019	0.930 4	0.828 0	0.858 7	1.000 0	0.858 7	良好协调
2020	1.001 7	0.913 2	0.939 7	1.000 0	0.939 7	优质协调

U_1 为农业文化遗产系统综合评价指数, U_2 为旅游产业发展综合评价指数, T 为综合协调指数, C 为耦合度指数, D 为协调度指数。

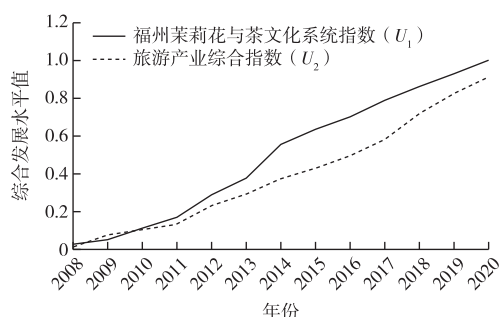


图 4 福州茉莉花与茶文化系统及旅游产业的综合发展水平

Fig. 4 Fuzhou Jasmine and Tea Culture System and tourism industry integrated development level

3.2 耦合协调度分析

从图 5 可知,茶文化系统与旅游产业的耦合度 C 呈现较小波动,总体在 0.900 以上,表明茶文化系统与旅游产业相互作用、相互影响的程度较高,但由于两者的发展速度差异较大,因此耦合度值存在波动。此外,2 个系统的综合协调指数 T 从 2008 年的 0.010 到 2020 年的 0.990,增长了 99 倍,表明 2 个系统的协调程度在逐渐提高,相互影响的程度逐步加深并呈现更加协调的态势。

从表 3 的耦合协调度和图 5 的耦合发展情况走势来看,福州茉莉花与茶文化系统及旅游产业的耦合协调度在 2008—2020 年的 13 a 间均呈上升趋势,

从 2008 年的 0.018 7 上升到 2020 年的 0.939 7,耦合协调等级也从 2008 年的极度失调上升到 2020 年的优质协调,表明 13 a 间茶文化系统与旅游产业的融合程度逐步提高。2014 年入选全球重要农业文化遗产使两者的耦合协调度上升到了新高度,耦合协调速度加快并呈现出逐渐协调的趋势。

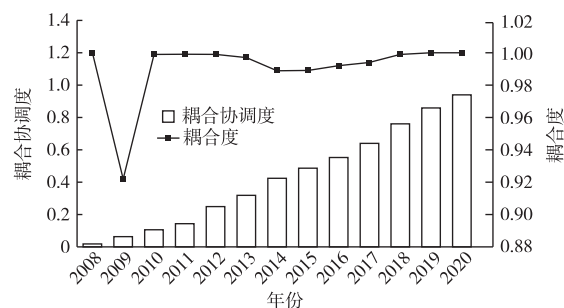


图 5 2008—2020 年福州茉莉花与茶文化系统及旅游产业耦合发展情况

Fig. 5 Coupled development of Fuzhou Jasmine and Tea Culture System and tourism industry from 2008 to 2020

从研究的时序来看,茉莉花茶农业文化遗产及旅游产业的耦合协调度发展过程可以划分为 3 个阶段,第 1 阶段为失调阶段(2008—2015 年),耦合协调等级从极度失调发展为濒临失调,耦合协调度 D 值从 0.018 7 上升到 0.485 9。可能是因为“农业文

化遗产”概念提出较晚,由于政策作用的滞后性效应导致农业文化遗产休闲旅游模式尚未成型。

第 2 阶段为低级协调阶段(2016—2018 年),耦合协调度 D 值从 0.553 4 上升到 0.760 2,耦合协调等级从勉强协调发展到中级协调,农业文化遗产旅游也由此得到初步发展,农业文化遗产与旅游产业融合发展逐渐兴起,呈现了协调发展的趋势。这一时期相关推动政策成为农业文化遗产耦合发展的重要动力。

第 3 阶段为高级协调阶段(2019—2020 年),耦合协调度等级从良好协调发展到优质协调,耦合协调度 D 值从 0.858 7 上升到 0.939 7,农业文化遗产与旅游产业形成较好的融合态势。该阶段政府高度重视农遗文化遗产旅游发展,推动 2 个系统之间更深层次的融合。

3.3 耦合发展的影响因素分析

3.3.1 耦合发展的一级影响因素分析

通过对茶文化系统与旅游产业耦合发展指标进行灰色关联分析,可知两者的耦合发展水平与资源要素、政策保护和生产发展等 11 个一级影响因素有较高的关联,整体关联度大于 0.6,平均关联度达 0.804(图 6)。

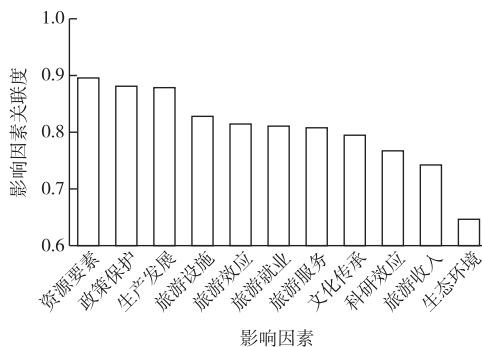


图 6 耦合发展的一级影响因素关联度

Fig. 6 Correlation of the first-level influences on coupled development

对灰色关联度排序从大到小依次为 $A1(0.895) > A5(0.880) > A3(0.877) > B4(0.826) > B1(0.813) > B5(0.809) > B3(0.806) > A2(0.793) > A4(0.765) > B2(0.741) > A6(0.644)$ (表 4)。一般而言,关联度大于 0.6 表明两者具有较强的关联性,因此认为上述 11 个影响因素在两者耦合协调发展中有较强的内在联系。同时,通过对灰色关联系数的分析可知,茉莉花茶农业文化遗产与旅游产业系统内部各要素均对两者的耦合发展做出了中等及

以上程度的贡献值。

资源要素($A1$)是促进福州茉莉花与茶文化系统及旅游产业耦合协调的关键,意味着以农业文化遗产完整性保护为核心,合理地将农业文化遗产系统的现实特征与休闲旅游结合能够助推两者的发展。政策保护($A5$)是促进两者耦合协调的重要因素,表明市政府所采取的相关政策,如财政的基金补贴,可为两者耦合发展提供稳定的外部环境。农业文化遗产相关生产发展($A3$)对促进两者耦合发展具有推动作用,表明建设以茉莉花茶(农业文化遗产中的特色产品)为核心的旅游产品体系有助于农业文化遗产旅游资源和产品的整合。生态环境($A6$)和旅游收入($B2$)的关联度排名后 2 位,表明生态环境和旅游收入在耦合发展中并未发挥充分作用。

3.3.2 耦合发展的二级影响因素分析

由图 7 可以看出,二级影响因素都有较高的关联,平均关联度达到 0.801。35 个二级指标因素的灰色关联度最低为 0.603,最高为 0.900。同时,通过对 2008—2020 年灰色关联系数的分析可知,2020 年国内旅游收入($B21$)关联系数最低(0.333),可能是因为旅游行业受疫情冲击,市场处于低迷态势。此外,35 个影响因素均对两者的耦合协调发展做出了中等及以上程度的贡献值。

通过运用灰色关联分析茶文化系统与旅游产业耦合体系指标发现,35 个二级指标影响因素的灰色关联度分布在 0.603~0.900 之间,其中茶叶综合产值($A32$)、茶叶总产量($A31$)、茶园面积($A14$)的关联度皆在 0.9 左右,茶园的面积产量和产值是农业文化遗产系统的基本,稳定的茶园面积不仅可以吸引游客观光,有利于实现集约化种植和产品现代化,更能促进茶产业的可持续发展。农业文化遗产博物馆($A22$)、空气质量综合指数值($A63$)仅有 0.665 和 0.603,成为表现力最弱的影响因素。

财政补贴($A52$)是保护茉莉花与茶种植面积指标变量,证明目前福州市对农业文化遗产的经济投入处于较高的水平,对福州茉莉花茶文化系统可持续发展起着重要推动作用。茶农人均收入($A37$)表明,福州市茉莉花茶种植收入并不低,2018 年企业每卖出 100 元茶叶中有 65 元是农民的收入(<http://www.cnnews.net/>),这提高了茶农种植积极性,有助于遗产系统的可持续发展。国际旅游收入($B22$)、茶厂数量($A34$)、旅游饭店数($B31$)、旅游景区数($B42$)、星级饭店数($B32$)在两者耦合协调影响因素中为中上程度,表明 13 a 间福州政府颇为重视旅

游产业。农业文化遗产博物馆(A22)和空气质量综合指数值(A63)仅有 0.665 和 0.603,在耦合协调影响因素中表现力最弱,影响了茶文化系统与旅游产业耦合协调发展。

表 4 影响因素灰色关联度及排序
Table 4 Grey relational degrees and ranking of influencing factors

I 级影响因素	II 级影响因素	灰色关联度	排序	关联度	排序
A1 资源要素	A11 核心保护区数	0.739	29	0.895	1
	A12 品种资源	0.783	23		
	A13 生物多样性	0.811	20		
	A14 茶园面积	0.896	3		
A2 文化传承	A21 工艺传承人	0.810	21	0.793	8
	A22 博物馆	0.665	34		
	A23 地理标志	0.736	31		
A3 生产发展	A31 茶叶总产量	0.897	2	0.877	3
	A32 茶叶综合产值	0.900	1		
	A33 品牌价值	0.860	7		
	A34 茶厂数量	0.840	8		
	A35 茶叶出口均价	0.827	14		
	A36 茉莉花茶当年均价	0.739	28		
	A37 茶农人均收入	0.880	5		
A4 科研效应	A41 申请专利数	0.820	16	0.765	9
	A42 研究报告	0.760	25		
A5 政策保护	A51 政策法规建设	0.828	13	0.880	2
	A52 财政补贴	0.881	4		
A6 生态环境	A61 闽江流域福州段Ⅱ类以上水质水体占比	0.735	32	0.644	11
	A62 大气质量优良率	0.734	33		
	A63 空气质量综合指数	0.603	35		
	A64 绿化覆盖率	0.759	26		
	A65 森林覆盖率	0.738	30		
B1 旅游效应	B11 国内旅游人次	0.813	19	0.813	5
	B12 入境旅游人次	0.813	18		
B2 旅游收入	B21 国内旅游收入	0.741	27	0.741	10
	B22 国际旅游收入	0.874	6		
B3 旅游服务	B31 旅游饭店数	0.840	9	0.806	7
	B32 星级酒店数	0.832	11		
	B33 医疗床位数	0.808	22		
B4 旅游设施	B41 旅行社数	0.825	15	0.826	4
	B42 旅游景区数	0.840	10		
B5 旅游就业	B51 旅行社从业人员	0.814	17	0.809	6
	B52 旅游饭店人员	0.770	24		
	B53 旅游景区人员	0.832	12		

4 结论

选取全球重要农业文化遗产的福州茉莉花与茶文化系统为研究对象,通过构建耦合发展评价指标体系,基于 2008—2020 年数据对茶文化系统与旅游产业的耦合发展进行测度,通过灰色关联分析法分析了耦合发展的影响因素。分析结果表明:
(1)茶文化系统与旅游产业综合发展水平整体情况较好,呈持续上升趋势,2008—2020 年福州茉莉

花与茶文化系统和旅游产业综合发展水平指数分别从 0.027 3 和 0.014 9 上升至 1.001 7 和 0.913 2。
(2)在茶文化系统与旅游产业耦合协调发展水平分析层面,2 个系统处于高水平耦合,相关系数达 0.981,但在 2009—2014 年出现低程度波动。
(3)在测算影响两者耦合发展的影响因素层面,2008—2020 年一、二级指标灰色关联系数普遍处于 0.6 以上,与耦合有较高的关联度。一级指标影响因素中资源要素、政策保护、生产发展为主要

驱动影响因素,生态环境为障碍影响因素;二级指标影响因素中茶叶综合产值、茶叶总产量、茶园面

积为最主要驱动影响因素,博物馆数量和空气质量综合指数成为排序较低的障碍因素。

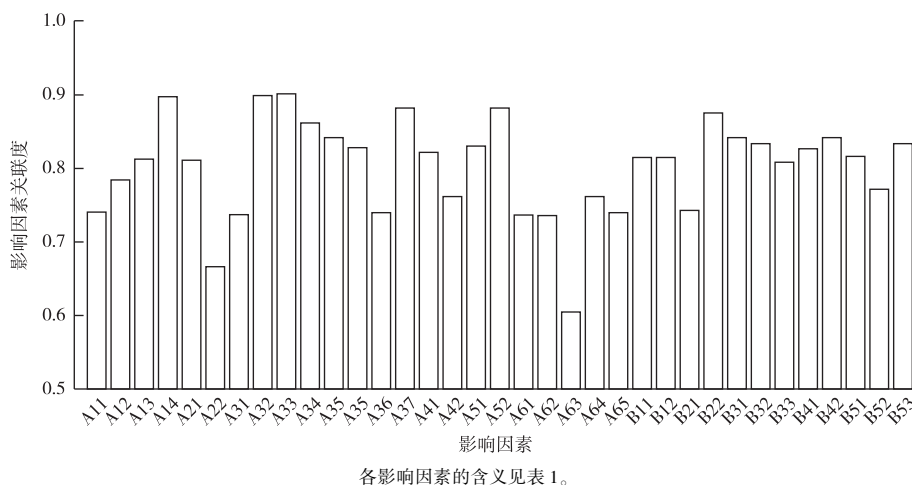


图 7 耦合发展的二级影响因素关联度

Fig. 7 Correlation of secondary influences on coupled development

参考文献:

- [1] 闵庆文,孙业红.农业文化遗产的概念、特点与保护要求[J].资源科学,2009,31(6):914-918.[MIN Qing-wen,SUN Ye-hong.The Concept, Characteristics and Conservation Requirements of Agro-Cultural Heritage[J].Resources Science,2009,31(6):914-918.]
- [2] 闵庆文,孙业红.发展旅游是促进(农业文化)遗产地保护的有效途径:中国科学院地理科学与资源研究所自然与文化遗产保护论坛综述[J].古今农业,2008,22(3):82-84.[MIN Q W,SUN Y H.Tourism Development as an Effective Way to Promote Conservation of (Agro-cultural) Heritage Sites: Review of the Forum on Conservation of Natural and Cultural Heritage at the Institute of Geographical Sciences and Resources,Chinese Academy of Sciences[J].Ancient and Modern Agriculture,2008,22(3):82-84.]
- [3] 吴合显.论重要农业文化遗产的当代创新利用[J].中国农史,2018,37(1):115-121,130.[WU He-xian.Analysis on Contemporary Innovation and Utilization of Outstanding Agricultural Heritage Systems[J].Agricultural History of China,2018,37(1):115-121,130.]
- [4] 徐远涛,闵庆文,白艳莹,等.会稽山古香榧群农业多功能价值评估[J].生态与农村环境学报,2013,29(6):717-722.[XU Yuan-tao,MIN Qing-wen,BAI Yan-ying,et al.Evaluation of Agricultural Multi-Functional Value of the Living Ancient Torreya Grandis Community in Kuai Ji Mountain[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2013,29(6):717-722.]
- [5] 闵庆文,孙业红,成升魁,等.全球重要农业文化遗产的旅游资源特征与开发[J].经济地理,2007,27(5):856-859.[MIN Qing-wen,SUN Ye-hong,CHENG Sheng-kui,et al.Primary Study on the Features and Development of Giah's Tourism Resources[J].Economic Geography,2007,27(5):856-859.]
- [6] 孙业红.农业文化遗产及其旅游发展研究进展[J].安徽农业科学,2012,40(20):10490-10493,10602.[SUN Ye-hong.Research Review on Agricultural Heritage Systems and Its Tourism Development[J].Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,40(20):10490-10493,10602.]
- [7] 韦妮妮.景观型农业文化遗产保护性旅游开发探究:以广西龙脊梯田为例[J].农业农村部管理干部学院学报,2019(3):73-78.[WEI Ni-ni.A Study on the Development of Tourism with Protection of Landscape Agricultural Cultural Heritage[J].Journal of Agricultural Management Institute of Ministry of Agriculture and Rural Affairs,2019(3):73-78.]
- [8] SUN Y H,CRUZ M J D,MIN Q W,et al.Conserving Agricultural Heritage Systems through Tourism:Exploration of Two Mountainous Communities in China[J].Journal of Mountain Science,2013,10(6):962-975.
- [9] SUN Y,TIMOTHY D J,WANG Y,et al.Reflections on Agricultural Heritage Systems and Tourism in China[J].Journal of China Tourism Research,2019,15(3):359-378.
- [10] 刘芝,唐英,史承勇.遗产价值导向下紫阳古茶园生态旅游开发模式与对策[J].茶叶通讯,2020,47(2):339-343.[LIU Zhi,TANG Ying,SHI Cheng-yong.Development Mode and Countermeasures of Eco-Tourism of Ancient Tea Garden in Ziyang County under Guidance of Heritage Value[J].Journal of Tea Communication,2020,47(2):339-343.]
- [11] 刘镜茹,沈世伟.全球重要农业文化遗产湖州桑基鱼塘系统保护与旅游发展研究[J].现代化农业,2020(11):57-60.[LIU Jing-ru,SHEN Shi-wei.Study on the Protection and Tourism Development of Sangji Fish Pond System in Huzhou,an Important Global Agricultural Cultural Heritage[J].Modernizing Agriculture,2020(11):57-60.]
- [12] 苏莹莹,孙业红,闵庆文,等.中国农业文化遗产地村落旅游经营模式探析[J].中国农业资源与区划,2019,40(5):195-201.[SU Ying-ying,SUN Ye-hong,MIN Qing-wen,et al.Discussion on

- Tourism Management Mode in Villages of China's Agricultural Heritage Sites[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(5): 195-201.]
- [13] 张灿强, 闵庆文, 张红榛, 等. 农业文化遗产保护目标下农户生计状况分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(1): 169-176. [ZHANG Can-qiang, MIN Qing-wen, ZHANG Hong-zhen, *et al.* Analysis on the Rural Households Livelihoods Aiming at the Conservation of Agricultural Heritage Systems [J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(1): 169-176.]
- [14] 于帅. 福州茉莉花茶文化旅游开发对策探讨[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(9): 32-35. [YU Shuai. Discussion on Cultural Tourism Development Countermeasures of Jasmine Tea in Fuzhou[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(9): 32-35.]
- [15] 林铃静, 曾芳芳. 福州茉莉花农业文化遗产地休闲农业开发策略研究[J]. 农村经济与科技, 2016, 27(23): 110-112. [LIN Ling-jing, ZENG Fang-fang. Study on Leisure Agriculture Development Strategy of Jasmine Agricultural Cultural Heritage Site in Fuzhou [J]. Rural Economy and Science-Technology, 2016, 27(23): 110-112.]
- [16] 郭莉. 保护福州茉莉花与茶文化系统 共创美丽福建[J]. 中外企业家, 2016(25): 50-52. [GUO Li. Protecting Jasmine Flower and Tea Culture System in Fuzhou to Create Beautiful Fujian[J]. Chinese & Foreign Entrepreneurs, 2016(25): 50-52.]
- [17] 侯玉婷. 福州茉莉花茶旅游业发展的 SWOT 分析[J]. 农业考古, 2019(2): 94-97. [HOU Yu-ting. SWOT Analysis on the Development of Jasmine Tea Tourism in Fuzhou[J]. Agricultural Archaeology, 2019(2): 94-97.]
- [18] 李伯华, 刘沛林, 窦银娣. 基于自组织理论的农业文化遗产地旅游产业融合发展研究: 以湖南省新化县紫鹊界梯田为例[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2015, 9(6): 60-66. [LI Bo-hua, LIU Pei-lin, DOU Yin-di. A Study of Tourism Industry Convergence in Agricultural Heritage Systems Based on Self-Organization Theory: A Case Study of Ziquejie Terraced Field in Xinhua County, Hunan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences), 2015, 9(6): 60-66.]
- [19] 张琳, 贺浩浩, 杨毅. 农业文化遗产与乡村旅游产业耦合协调发展研究: 以我国西南地区 13 地为例[J]. 资源开发与市场, 2021, 37(7): 891-896. [ZHANG Lin, HE Hao-hao, YANG Yi. Research on the Coupling Harmonious Development of the Agricultural Heritage and the Rural Tourism Industry: Evidences from 13 Places in Southwest China[J]. Resource Development & Market, 2021, 37(7): 891-896.]
- [20] 刘进, 冷志明, 刘建平, 等. 我国重要农业文化遗产分布特征及旅游响应[J]. 经济地理, 2021, 41(12): 205-212. [LIU Jin, LENG Zhi-ming, LIU Jian-ping, *et al.* Spatial Distribution Characteristics and Tourism Response of Important Agricultural Cultural Heritage in China [J]. Economic Geography, 2021, 41(12): 205-212.]
- [21] 闵庆文, 张永勋. 福建福州茉莉花与茶文化系统[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 3-40. [MIN Qing-wen, ZHANG Yong-xun. Jasmine and Tea Culture System in Fuzhou[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 3-40.]
- [22] 舒小林, 高应蓓, 张元霞, 等. 旅游产业与生态文明城市耦合关系及协调发展研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(3): 82-90. [SHU Xiao-lin, GAO Ying-bei, ZHANG Yuan-xia, *et al.* Study on the Coupling Relationship and Coordinative Development between Tourism Industry and Eco-Civilization City [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(3): 82-90.]
- [23] 孙剑锋, 李世泰, 纪晓萌, 等. 山东省文化资源与旅游产业协调发展评价与优化[J]. 经济地理, 2019, 39(8): 207-215. [SUN Jian-feng, LI Shi-tai, JI Xiao-meng, *et al.* Coupling Analysis and Optimization Measures of Cultural Resources Endowment and Tourism Industry in Shandong[J]. Economic Geography, 2019, 39(8): 207-215.]
- [24] 陈伟, 夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(1): 17-22. [CHEN Wei, XIA Jian-hua. An Optimal Weights Combination Method Considering both Subjective and Objective Weight Information[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007, 37(1): 17-22.]
- [25] 王思明, 李明. 中国农业文化遗产研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015: 179-180. [WANG Si-ming, LI Ming. Research on Chinese Agricultural Cultural Heritage[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 179-180.]
- [26] 农业农村部国际交流服务中心. 乡村振兴与农业文化遗产: 中国全球重要农业文化遗产保护发展报告(2019)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020: 136-141. [Center of International Cooperation Service, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Rural Revitalization and Agricultural Cultural Heritage: Report on the Development of Conservation of Globally Important Agricultural Cultural Heritage in China(2019)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020: 136-141.]
- [27] 丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误区[J]. 经济地理, 2019, 39(4): 18-25. [CONG Xiao-nan. Expression and Mathematical Property of Coupling Model, and Its Misuse in Geographical Science[J]. Economic Geography, 2019, 39(4): 18-25.]
- [28] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810. [WANG Shu-jia, KONG Wei, REN Liang, *et al.* Research on Misuses and Modification of Coupling Coordination Degree Model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810.]
- [29] 鲍学英, 李海连, 王起才. 基于灰色关联分析和主成分分析组合权重的确定方法研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(9): 129-134. [BAO Xue-ying, LI Hai-lian, WANG Qi-cai. The Combined Weight Based on Grey Relation and Principal Component Analysis [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(9): 129-134.]

作者简介: 赖格英(1963—), 男, 江西寻乌人, 教授, 博士, 主要从事流域地表过程、农业文化遗产等方面的研究。E-mail: laigeying@126.com

(责任编辑: 陈 昕)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0621

何思源, 焦雯珺, 闵庆文. 自然受益目标下食物系统转型研究: 基于全球重要农业文化遗产 (GIAHS) 的解决方案[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1249–1257.

HE Si-yuan, JIAO Wen-jun, MIN Qing-wen. The Transition of the Food System for A Nature-positive World: A GIAHS-based Solution[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1249–1257.

自然受益目标下食物系统转型研究: 基于全球重要农业文化遗产 (GIAHS) 的解决方案

何思源^①, 焦雯珺¹, 闵庆文^{1,2} (1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 从当前全球实现可持续发展目标——自然受益角度出发, 分析全球重要农业文化遗产 (GIAHS) 作为富有传统智慧和随着现代技术而发展的食物生产体系在推动全球食物系统根本性变革中的可能性, 从自然受益的食物系统转型的需求与挑战提出 GIAHS 研究和治理的需求。研究表明, GIAHS 作为活态系统运作所依据的整体观是当下自然受益观念的具体体现, 可以系统推动农业和食物系统走上生态农业发展方向, 并能够提供基于自然解决方案的 3 条有效路径: (1) 保护自然生态系统免于退化和转化; (2) 更可持续地管理现有生产系统来支持 (农业) 生态系统健康和维持景观层面的恢复力; (3) 恢复退化生态系统的生产力, 提升生态系统服务功能。面对 GIAHS 面临的困境, 要通过强化研究和完善治理体系促进其帮助自然受益的食物系统转型。

关键词: 自然受益; 农业文化遗产; 生物多样性; 自然受益食物系统; 可持续发展目标

中图分类号: X37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1249-09

The Transition of the Food System for A Nature-positive World: A GIAHS-based Solution. HE Si-yuan^①, JIAO Wen-jun¹, MIN Qing-wen^{1,2} (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In 2020, the international community proposed the Nature-Positive Global Goal for Nature. Nature-positive means halting and reversing nature loss by 2030, measured from a baseline of 2020. The transition of the current agricultural and food system to a nature-positive food system is critical to halt and reverse the nature loss. This approach aims at curbing the land productivity degradation, resource depletion, and biodiversity loss caused by the food production system, thus maintaining the sustainability of the food system. The Food and Agriculture Organisation (FAO) of the United Nations launched the Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) in 2002. After 20 years of research and conservation practice, we have gained an increasing understanding of the formation and evolution of the agricultural heritage systems, their ecological and social sustainability, and multiple functions and values. GIAHS is proved possible to provide new solutions to the global crisis including climate change, biodiversity loss, environmental pollution, and the degradation of agricultural ecological functions. However, their potential as nature-based solutions is yet to be fully recognised, and the systematic approaches to a nature-positive food system and sustainable development goals are yet to establish. Therefore, based on the literature review, we analysed the feasibility of GIAHS to facilitate the revolutionary change of the global agriculture production and food system from the perspective of nature-positive. We also proposed urgent research and practical requirements based on the demand and challenges of transitioning the food system. We found that the holistic view of GIAHS as a living system is a manifestation of the conceptual shift in the nature-positive global goals. The functions and the mechanism of GIAHS can facilitate the shift to agroecology for a sustainable food system. They are capable to provide the three routes as nature-based solutions: 1) to protect the natural system from degrading and land use change; 2) to sustain-

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金 (42001194)

① 通信作者 E-mail: hesy@igsrr.ac.cn

ably manage the production system to provide ecosystem services and maintain landscape resilience, and 3) to restore certain productivity of degraded ecosystems and improve their functions and services. We should also strengthen research and improve governance to give full play to the agricultural heritage system in achieving a nature-positive food system.

Key words: nature-positive; agricultural heritage system; biodiversity; nature-positive food system; sustainable development goals

为应对全球面临的生物多样性危机及其对地球、人类和其他生命体健康的严重影响,2020 年联合国大会和生物多样性峰会召开伊始,一个由 14 位国际知名的科学研究、生态保护和企业联盟机构的领导人组成的小组提出了“自然受益全球目标”(Nature-Positive Global Goal for Nature)的行动倡议,旨在实现自然的整体保护和恢复,使其融入包括全球气候目标、联合国 2030 可持续发展目标等其他全球目标来创造一个“公平、碳中和与自然受益的世界”^[1]。为了实现自然受益目标,应采取的具体措施既包括停止物种损失、保护关键生物多样性区域、维护完好的自然系统等保护措施,又包括恢复受人类影响的地景与海景的修复措施,还包括减少生物多样性丧失的消费与生产驱动力的遏制措施。其中,在农业、渔业、林业等关键经济部门实现变革性转型被认为是遏制生物多样性丧失驱动力的根本方式^[2]。

过去数十年陆地生态系统的生物多样性丧失最重要而直接的驱动力是土地利用变化,即森林、草原、红树林等自然生境转变为半自然生境的农田^[2]。此外,过度捕捞是导致海洋资源耗竭的关键驱动力^[2],淡水渔业生产则导致淡水生态系统生物多样性丧失增加了 50%^[3]。另外,农业生产消耗了全球 70% 的淡水^[4],世界上一些大河流和淡水湖的近乎消失都与过度灌溉有关^[5-6]。农业生产还因为将农用化学品、有机物、药物残留等排入水体而造成水污染^[7]。大量使用农用化学品导致昆虫物种灭绝,危及以昆虫为基础的生态系统服务的持续供给^[8],导致生物多样性进一步丧失。由于农业和食物生产系统强烈依赖自然生态系统提供的服务,其对土壤肥力、养分循环、传粉、生物虫害控制、气候调节、水体净化等的负面影响最终都会对农业和食物生产造成不利影响^[9]。因此,对全球食物生产系统进行根本性变革不仅关系到生态安全,而且关系到食物安全与人类健康,成为实现全球自然受益目标的关键途径之一。

在推动实现自然受益的食物生产时,国际社会十分重视传统食物生产系统(如日本的里山和中国的稻鱼共生^[10-11])所能发挥的重要作用。事实上,

早在 2002 年,联合国粮食及农业组织(FAO)就启动了“全球重要农业文化遗产(Globally Important Agricultural Heritage System, GIAHS)”保护项目,作为对现代常规农业生产中食品安全、生态失衡、环境污染等负面问题的反思,FAO 将 GIAHS 定义为“农村与其所处环境长期协同进化和动态适应下所形成的独特的土地利用系统和农业景观,这些系统与景观具有丰富的生物多样性,而且可满足当地社会经济与文化发展需求,有利于促进区域可持续发展”^[12]。截至 2022 年 3 月底,全球共有 22 个国家的 62 个传统食物生产系统被 FAO 列入 GIAHS 保护名录。GIAHS 不仅具有可持续的生产功能,还具有生态保护、文化遗产、社会维系等多样化的非生产功能,表现出经济与生计、生态与环境、社会与文化等多重价值,对保障食品安全、保护生物多样性、应对气候变化、保护文化多样性等人类面临的重大问题具有重要意义。尽管 GIAHS 的多功能性与多重价值在全球范围内得到共识,但其作为基于自然的解决方案的潜力还未被充分认识,其助力自然受益的食物系统转型的解决方案也尚未建立。

该研究从全球实现可持续发展目标的自然受益角度出发,首先阐述自然受益目标下全球食物系统转型的需求和路径,然后分析 GIAHS 在推动全球食物系统根本性变革中所能起到的作用,并提出 GIAHS 所能提供的多种基于自然的解决方案,最后讨论 GIAHS 在助力自然受益的食物系统转型中所面临的挑战并提出相应的研究和治理需求。一方面通过挖掘 GIAHS 提供基于自然解决方案的潜力,进一步加深人们对 GIAHS 功能与价值的理解与认识;另一方面,通过助力自然受益目标下食物系统转型,也将进一步促进 GIAHS 的保护与管理以及所在地区的可持续发展。

1 自然受益的食物系统转型需求和路径

1.1 观念转变下的自然受益食物系统转型需求

自然受益全球目标提出 3 个可量化的分段目标:从 2020 年起实现自然净零损失(zero net loss),到 2030 年实现自然的净正值(net positive),到 2050 年实现自然全面恢复(full recovery)^[13],实现联合国

《生物多样性公约》2050 愿景：“人与自然和谐共处”。自然受益包含生物多样性的不同层级：遗传多样性；物种分布、丰富度、功能特征、种群规模趋势；生态系统和生物群区的无损性和完整性。此外，自然受益也涵盖全球生态过程，如水文、降水、迁徙等生态过程，因为这些功能/过程的实现支持生物多样性，并能维持饮用水供给、农业生产和气候稳定性。只有上述自然的各个方面都受益，才能确保地球拥有足够的恢复力来应对冲击和压力而不至于崩溃。

为实现自然受益目标，人类经济活动不仅要将对自然的负面影响降到最低，而且要力求改善生态系统，通过丰富生物多样性、固碳、净化水、降低疾病大流行风险等措施增强地球与社会的恢复力^[14]。这是一个观念上的转变，即认识到自然、社会和经济呈现为由低到高的层级结构：自然不是人类生存的外在条件，而是包括人类在内的所有生命的内在背景；人类社会是所有人类活动的背景；经济活动只是人类社会的一种活动。实现自然受益目标不再是寻求自然、社会和经济相互竞争的利益平衡点，而是对自然这个基本层级进行改善。

在这一观念转变指导下，2021 年联合国食物系统峰会 (UNFSS) 提出了“自然受益的食物系统”，指出全球需要围绕食物生产、分配、消费进行国际合

作来实现可持续发展目标，即为全人类提供健康和营养丰富的食物，同时在食物系统中创造生计机会并减轻其负面的环境、气候和健康影响。国际统称的食物系统 (food systems) 也被称为农业与食物系统 (agri-food systems, 农食系统)，是指农业与食物价值链上的所有活动和要素及其交互关系的总和^[15]。现有食物系统转向“自然受益的食物系统”也是一个多领域全方位的转型，最终需要能够：(1) 确保提供安全和营养的食物；(2) 鼓励可持续性消费；(3) 实现自然受益的生产；(4) 促进公平的生计；(5) 建立抵御冲击和胁迫的能力^[16]。自然受益的食物系统的本质是以系统性思维设计支持粮食安全和地球健康的协同方案，推动食物系统转型，这一思维方式考虑到食物系统的整体结构、相互联系和反馈循环。食物系统被视为“生态-农业-食物”系统，从生态系统到农场，从中间商到加工商，再到零售商和消费者，所有活动在食物价值链条上进入一个系统^[17]，帮助人们重新界定食物系统的外部性，激励自然受益行为 (图 1)。因此，自然受益的食物系统转型需求是彻底改变食物系统内各个环节对生物多样性的威胁：食物、饲料和纤维生产必须要支持生物多样性、恢复土壤、保护淡水供给、增强水资源安全、促进生态系统固碳；要创造就业机会，增加粮食安全，增强气候适应性和社会稳定^[18]。

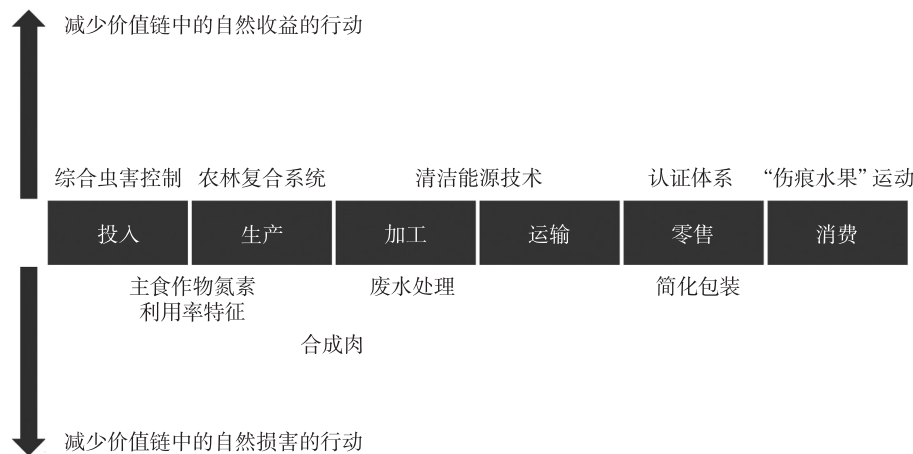


图 1 实现自然受益的食物系统的行动^[16]

Fig. 1 Actions to achieve a nature-positive food system

从与环境关系最为密切的生产环节看，UNFSS 提出“自然受益的食物系统”，以“对自然资源的再生式、非枯竭和非破坏性的利用为特征”，通过对环境和生物多样性的负责任管理，促进食物系统强化固碳功能，维持土壤、水和气候调节等关键生态系

统服务。在 2019 年，FAO 也提出以生态农业 (agro-ecology) 向可持续农业和食物系统转型。生态农业是一种着眼于整体的综合性方法，将生态学和社会学的概念和原则同时应用于可持续农业和食物系统的设计和管理，其目的是改善植物、动物、人类和

环境之间的关系,同时促进粮食体系的社会公平性。在过去几十年来其概念外延不断扩大,现在是一个跨学科领域,包含食物系统生产到消费的各个环节,涉及生态、社会文化、技术、经济、政治等各方面。可见,鉴于生物多样性丧失的关键与直接因素,转向“自然受益的食物系统”的核心在于通过自然受益的食物生产来同时满足食物需求并保护和恢复(自然)生态系统。因此,该研究将以自然受益的食物生产系统转型为核心,兼顾健康膳食、生计公平和食物-农业-生态系统的综合韧性。

1.2 实现自然受益的食物系统转型的基于自然的解决方案路径

实现多尺度的自然受益目标越来越多地依赖于实施基于自然的解决方案(nature-based solutions, NbS)。世界自然保护联盟(IUCN)、世界银行、欧盟等都对 NbS 进行了解释,其相同之处都在于通过有效利用生态系统及其服务来应对重大的社会挑战,同时重视 NbS 所能带来的一系列环境、社会、经济等协同效益^[19-21]。通过实施基于自然的解决方案,自然受益的食物系统可以建立以下 3 种转型路径。

第 1 条路径是保护自然生态系统和已有自然保护区,使其不因新的食物需求而转化为生产用地。要直接抑制土地利用变化,不能继续通过将自然生态系统和未受干扰的栖息地转化为食物生产用地来增加食品供给^[22-24]。除了保护原生自然生态系统外,也有必要确保一些具有高生物多样性的农业边缘土地处于自然状态,如陡坡、湿地等^[25],并通过对一些低产并引发生态退化的农业用地上进行提质增效,确保农业边缘用地保持自然状态。

第 2 条路径是可持续地管理现有食物生产系统,在有限的土地上持续获得更多的产出。自然受益的食物生产以生物多样性为基础,利用多种生态系统服务,特别是土壤、水和气候调节服务,结合农民外部投入和人力或机械力,最终得到物质产出^[26]。因此,必须保持土壤健康、水源清洁、传粉者丰富来获得安全的产品,最终实现生态系统净效益。达到自然受益的生产既需要技术创新,又需要社会支持。在技术创新上,要积极探索和实践生态-经济-社会多赢的农业系统,推广环境友好的耕作方法。在社会支持上,则需要争取消费者支持减少食物浪费和减少生物质能源作物生产,认同膳食结构转型来降低对以谷物为基础的肉类和奶制品的依赖。

第 3 条路径是恢复和重建退化生态系统以实现可持续的食物生产和生态系统服务。全球 1/3 到

3/4 的土地已经退化,面对这一现状,恢复或修复退化生态系统的潜力巨大。一方面,需要通过“再野化”实践从景观层面恢复土壤健康、增强生物多样性和生态系统服务,提高整个生态系统恢复力^[27];另一方面,需要通过采用因地制宜、符合当地生物物理、社会经济和文化条件的具体措施,结合现代科学和传统开展合作生产,逐步恢复农业生产力,并鼓励农业边缘用地回归自然。

这 3 条路径因其目标生态系统特征、对生态系统干预程度和干预目标的差异,对于实现自然受益的食物生产系统作用不同。保护路径是根本,恢复路径是补充,管理路径是核心。可持续的资源管理使恢复退化农田成为可能,避免更多自然生态系统衰退并有利于更多土地回归自然。

2 GIAHS 在推动自然受益的食物系统转型中的作用

2.1 GIAHS 有利于实现食物系统转型下的可持续发展目标

GIAHS 作为经济活动的生产性土地利用仅是社会生活的一部分,在整个系统中还存在着社会与文化互动,而由多种活动形塑的农业景观形成的根本是与自然环境的长期互动。这一定义显示出生计保障、社会发展与自然环境的层级关系。这是自然受益理念在农业的体现:GIAHS 内的农业生产及其相关活动不是寻找利益平衡点,而是以自然环境为基础的整体发展。

FAO 提出的 GIAHS 的 5 个认定标准也反映出 GIAHS 以实现食物系统转型目标——为全人类提供健康和营养丰富的食物,同时在食物系统中创造生计机会并减轻负面的环境、气候和健康影响,来实现可持续发展目标的特征、功能和路径(图 2)。具体而言,维持 GIAHS 可以确保食物数量和质量,保护生物多样性并提供生产之外的生态系统服务,保有丰富的生态知识来实现生计和生态双重目标,也充分尊重和发挥人力资本力量,其定义中所强调的环境协同和动态适应也体现了 GIAHS 的气候适应能力。

2.2 GIAHS 有助于推动食物系统向生态农业发展方向转型

GIAHS 的结构、功能及其运行有利于促进食物生产系统以生态农业路径向自然受益方向转型,保护 GIAHS 能够强化 FAO 所提出的生态农业关键要素及其关联(图 3)。

实现自然受益的食物系统转型时,生态农业框

架下的多样性(1)、协同作用(2)、效率(3)、循环利用(4)和恢复力(5)是核心要素^[28]。其中,维持多样性是关键,它确保食物安全和营养,同时保护和强化自然资源。多样性与其他 4 个要素之间也相互关联。多样化的生产方式能够提升系统的资源使用效率,不同组分间的协同作用可以支持生产和增强多种生态系统服务,进而提升系统恢复力,既包括生态系统抵御病虫害、极端天气事件等以维持生产和生态功能的能力,又包括社会恢复力,即生产者个人及其组织降低生计脆弱性等能力,如减少单一产品下的生计风险,因此多样性是实现自然受益的食物系统转型的核心,它联接了生态与社会。相应的, GIAHS 最突出的特征便是多样性。首先, GIAHS 有丰富的生物资源,既确保了居民的营养充足和食物安全^[29-30],又提供了丰富的物种和品种多样性^[31],也通过对孤儿作物,即被人类驯化而现在

没有被充分利用的作物的保护利用,为健康饮食和种质资源保护提供了基础。其次, GIAHS 保留了轮作、间作、套种等多样化种植方式,不仅能够充分利用光、热、水、土资源,而且能通过不同生物间相互作用减少病虫害发生(2,3)^[32-33]。再者,很多 GIAHS 采取复合种养模式,如中国的青田稻鱼共生系统,利用生物间复杂的营养关系产生相互制约,加强资源循环利用,减轻环境负外部性,提高系统的生态稳定性(2,3,4,5)^[34-36]。最后, GIAHS 的景观结构具有多样性。例如,中国的哈尼稻作梯田通过协调自然森林与人工稻田可有效应对资源时空分布的动态性,提高系统的气候变化适应性^[37];匈牙利的传统农林复合系统中,高大的果树稀疏分布在割草或放牧草场上,在提供经济产品的同时,林上和林下成为多种生物的良好栖息地(2,4)^[38]。

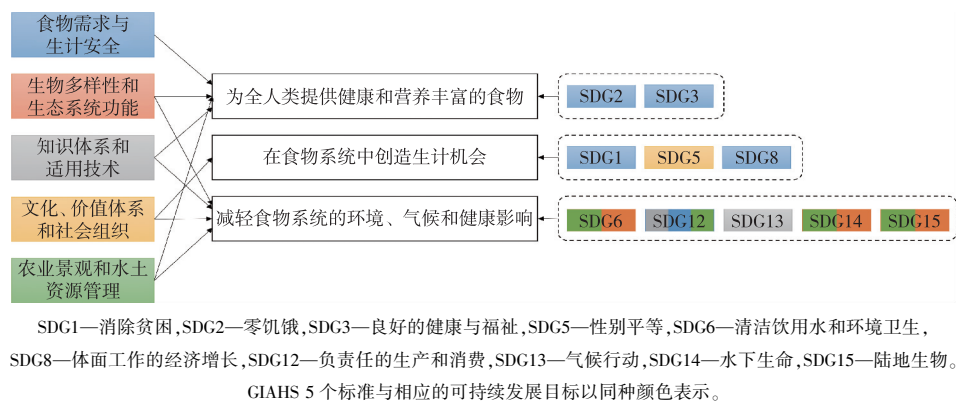


图 2 全球重要农业文化遗产 (GIAHS) 推动食物系统转型以实现可持续发展目标

Fig. 2 The transition to a nature-positive food system to realise sustainable development goals through GIAHS management

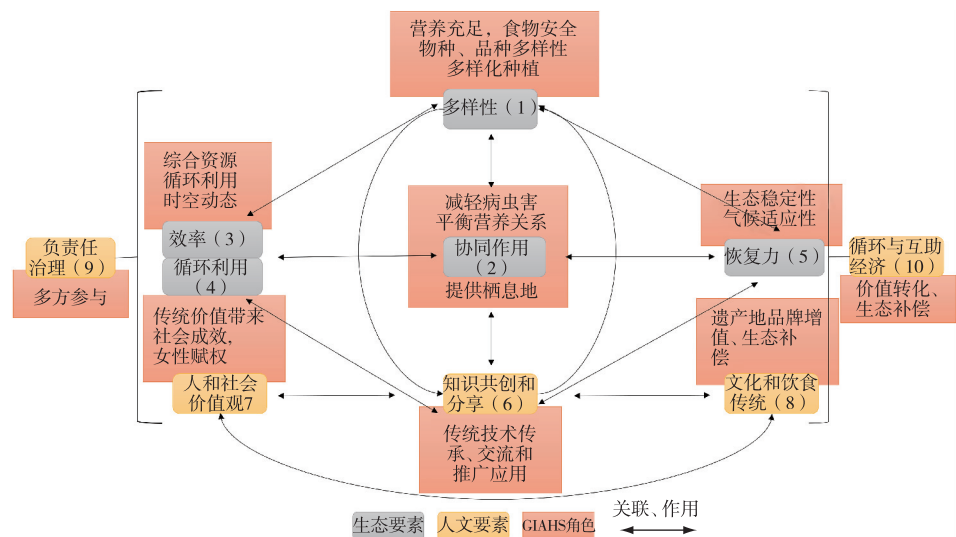


图 3 全球重要农业文化遗产 (GIAHS) 强化生态农业 10 项要素及其相互关系^[28-49]

Fig. 3 The mechanism of GIAHS to strengthen ten elements and their interactions of agroecology

为保障上述 5 个要素能够在区域和地方通过有效实践得以实现,FAO 提出了另外 5 个要素:知识共创和分享(6)、人类和社会价值观(7)、文化和饮食传统(8)、负责任治理(9)以及循环和互助经济(10)^[28]。向自然受益的食物系统转型需要从局地到全球建立负责任和有效的治理机制,为理念传播、技术研发推广、激励机制设计与应用等提供良好的环境;通过结合现代科学与传统知识、推动多方参与、对接生产者和消费者,为符合自然受益标准的产品创造价值转化渠道,因地制宜地推动建立可持续农业和食物系统应对全球挑战,也可以服务本地发展。农业文化遗产 GIAHS 的保护和传承正在践行上述要素。通过传统知识和技术的传承和交流,不仅帮助当地人实现了作物品种保护、水土资源的合理利用和农业的持续发展^[39-41],而且通过现代生态技术的优化,在更广泛的地域得到应用和推广(6)^[42]。传统文化与价值体系的约束以及文化牵引力有效地吸引部分当地人留在遗产地内按照传统方式进行农业生产,巩固有效的资源管理体系,增强乡村凝聚力和社会稳定性^[43],增强女性参与和赋权(7)。通过价值转化、生态补偿、多方参与等机制的建立,GIAHS 保护与传承正在成为乡村生计改善的重要手段。遗产地产品增值体系在一些地区成为有效的增收方式,在无法进行规模化的小农经济形态下连结了生产者和消费者(8,10)^[44-45],也可以形成具有适宜性、可持续性的基于本地生产和消费的膳食结构。为鼓励农民继续使用传统的或激励其采用更加环境友好的农业生产方式,通过现金补偿、价格补贴、项目资助等方式来构建有效的生态补偿机制(8,10)^[46-47]。为应对劳动力流失、土地利用方式改变、文化传承不利等问题,遗产地探索建立多方参与机制,通过利益共享、能力提升、知识合作等方式推动 GIAHS 保护(9)^[48-49]。

2.3 GIAHS 能够提供多路径的基于自然的解决方案

农业文化遗产的生态与社会可持续机制本质就是基于自然的解决方案,农业文化遗产的活态传承集中体现了其作为自然受益的食物系统转型的管理路径的潜在可能,以及协助保护路径、支持恢复路径的可能方式。

管理路径:大量研究已经揭示了农业文化遗产的生态可持续机制,其多样的农业系统类型、种植方式、种养模式和景观结构为进一步开展技术创新提供了思路和方法,也为建立自然受益的食物生产规范提供了参考范式;对其社会可持续机制的解读

和传承能够为建立更有效的多方参与治理体系提供借鉴;农业文化遗产作为可持续的食物生产系统能够促进现代科技与传统知识结合,进一步推动生态高效、经济可行、社会包容的食物系统转型。

保护路径:许多农业文化遗产地在空间分布上与自然生态系统部分重叠,其生产活动的高效进行有赖于自然生态系统的完整性。传统知识与技术体系对农业生产实践、水土资源管理等的支持与指导以及传统文化与价值体系对人与人、人与自然之间关系的规范与约束可以有效地保护自然生态系统和已有保护地;通过生产性景观促进连结自然保护地和景观尺度上保护地网络的形成,也作为其他有效的基于区域的保护地(OEAMs)直接贡献于生物多样性保护^[50]。

恢复路径:农业文化遗产的生态可持续机制也为应对土地退化、恢复农业生产力提供了多种多样的考虑到自然、社会和文化因素的技术与模式,通过与现代生态科学结合提供技术适宜、经济科学和社会可接受的生态修复和重建方式。

3 GIAHS 在推进自然受益的食物系统转型中的挑战与应对

3.1 GIAHS 在推动自然受益的食物系统转型中的挑战

研究指出,向自然受益的食物系统转型目前面临着包括农艺、经济和社会等诸多方面的挑战,也存在知识体系的不足^[19]。从传统农业系统保护与发展来看,其面临的诸多威胁与挑战既是当前食物系统转型挑战的典型表现,也制约了其长期有效地发挥生态-农业-食物综合理念与实践。因此,解决这些挑战本身是各国在推动食物系统转型中必须应对的。

在现代化背景下,传统农业生产的劳动密集性高、机械化程度有限、比较效益低,劳动力成本高和初级产品市场价格低导致生产收入不能满足农民预期,容易造成农村劳动力流失、生产方式改变、土地利用变化,导致自然受益的生产方式弱化、无人继承,生产系统的生态与社会可持续性受损。

农业文化遗产因其较高的系统多样性能够带来多类型产品,但每种产品产量有限,难以带来规模经济效益和深加工机会;小农户与市场关联松散,经营知识和经济风险应对能力有限;乡村凝聚力弱化,社会组织松散,不利于开展集体合作。

农业文化遗产系统的生态、社会和文化价值所具体展现的健康、安全和持续产出的食物和其他初

级产品虽然在理论上得到政策制定者和社会的普遍认可,但系统所蕴含的多重价值在生产、加工、贸易和消费这一系列价值链中还没有得到充分体现,生产者难以获利,而消费者在价格驱动下仍倾向于选择低成本规模化生产的产品。

农业文化遗产保护与管理的主要部门和政策制定者集中于农业部门,推动自然受益的食物系统转型不只是生产部门的行动,还包括农业、环境、卫生、贸易、科教等多领域开展政策协作;同时,农业部门本身也处于生物多样性主流化进程中,其生产激励措施还需要以自然受益为导向。

农业文化遗产概念、可持续机制、价值和功能还未能得到食物系统各环节上的参与者和利益相关方的广泛了解,其所代表的自然受益的观念转变与基于自然的解决方案的必要与可行性,还没能充分融入教育体系、科普宣传、专业咨询、商业投资等领域。

3.2 强化 GIAHS 科学研究与实践以促进向自然受益食物系统转型

从促进自然受益的食物系统转变角度开展农业文化遗产管理,以农业文化遗产研究促进其保护,提出推动自然受益的食物系统转向的农业文化遗产研究和治理需求。

在研究方面,自然受益的食物系统建立在可持续的生产系统上,其中农业文化遗产的生态可持续性建立在其独特的水土资源管理体系上,应进一步研究多地域、多类型的传统生产系统的物种选择、种植模式、种养模式、景观管理的生态学机制,评估其综合成效,如固氮、固碳、水土保持能力、资源利用效率、系统抗干扰(如气候变化)能力等,为模式推广、结合现代技术进行精细管理打下基础。

农业生产决策复杂,权衡生态与经济充满不确定性,应进一步研究传统农业生产决策机制,识别对开展自然受益的生产具有关键作用的社会、经济、心理因素,分析当前政策对推动农业文化遗产保护的有效性,为政策制定和优化提供科学依据。

在保护实践方面,农业文化遗产保护与管理应完善治理体系。进一步践行多方共治,形成不同参与者和利益相关者之间的知识合作生产,推动不同群体间对自然受益理念达成一致,形成管理规则,开展管理实践。建立农民与科学家、消费者、政府、投资者之间的关联,刺激传统知识与技术创新之间的互动,改变消费群体的观念认知,促进政府构建更为聚焦的社会服务体系,吸引外部投资进入可持续生产。

在政策层面,政府应出台相应政策确保传统食物生产系统的经济可行性,完善包括现金补偿、价格补贴、项目资助等多种形式的生态补偿机制;对于自然受益的生产系统所需要的密集劳动力和劳动分工,政府需要留住劳动力并吸引劳动力返乡,探索推进有限的规模化、合作生产经营来减轻劳动力负担,并赋予女性更多参与生产决策的机会;进一步通过绿色、有机产品认证体系等方式提高产品附加值;为种类丰富但数量有限、难以规模化生产的产品提供社会服务,包括并不限于加工设施和技术培训、质量控制、存储和运输规划,帮助小农在生产后端形成一定的规模化和市场进入渠道;引导社会企业进入生态产品、文创产品开发,促进农业文化遗产地产业融合发展,推动局地 and 区域整合形成生产、消费和废弃物循环利用的自然受益的食物系统。

同时,在教育体系中,应进一步强化农业文化遗产价值和功能及其与食物安全、营养和健康的关联;在大众传媒中,应提供更全面和科学的信息指导日常消费,推广农业文化遗产地产品,引导消费行为发生改变。

4 结论

农业文化遗产以其生态与社会可持续发展机制在保护生物多样性、保障乡村生计、促进社会发展方面有力地对抗着造成生物多样性丧失、土地退化、水资源短缺、温室气体加速排放的常规农业与食物系统。这些活态系统运作所依据的整体观是“自然受益”观念在主流经济部门的具体体现,为农业生产与生物多样性保护提供对话基础;其物种资源保护、种养模式选择、水土资源与景观维持以及传统文化与价值观念传承有利于保持食物系统的生产力、可持续性和恢复力,已经并将继续促进自然受益的食物系统转型。

保护农业文化遗产,传播其理念,研究其生态机制,推广其系统管理技术,符合基于自然的解决方案的要求,能够保护自然生态系统免于退化和转化,更可持续地管理现有生产系统来支持(农业)生态系统健康和维持景观层面的恢复力,并恢复退化生态系统的一定生产力,提升生态系统服务功能。

面对农业文化遗产面临的困境,要充分认清其在水土管理、生物多样性保护、农业生态学和循环经济方面的机制和成效,为传统技术和现代科学结合创造条件,通过政策、投资、激励和补贴等联合一致改善农业文化遗产治理体制,将其内涵和实效广

为宣传并纳入教育体系,构建多方参与的保护和利用机制,进一步以农业文化遗产促进和巩固自然受益的食物系统转型。

参考文献:

- [1] Nature Positive. Environment, Development and Other Partner Organizations[EB/OL].[2022-01-21].<https://www.naturepositive.org/callstoaction>.
- [2] Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Global Biodiversity Outlook [M]. 5th ed. Montreal, Canada: [s. n.], 2020: 148-167.
- [3] ALMOND R E A, GROOTEN M, PETERSEN T. Living Planet Report 2020: Bending the Curve of Biodiversity Loss, 2020 [R]. Gland, Switzerland: World Wide Fund for Nature, 2020.
- [4] MATEO-SAGASTA J, MARJANI Z S, TURRAL H. More people, More Food, Worse Water? A Global Review of Water Pollution from Agriculture[R]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization, 2018: 225.
- [5] SMALL I, VAN DER MEER J, UPSHUR R E. Acting on an Environmental Health Disaster: The Case of the Aral Sea[J]. Environmental Health Perspectives, 2001, 109(6): 547-549.
- [6] GAO H, BOHN T J, PODEST E, *et al.* On the Causes of the Shrinking of Lake Chad [J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(3): 034021.
- [7] MONTANARELLA L, SCHOLLES R, BRAINICH A. IPBES Assessment Report on Land Degradation and Restoration[R]. Bonn, Germany: Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2018.
- [8] SÁNCHEZ-BAYO F, WYCKHUYS K A G. Worldwide Decline of the Entomofauna: A Review of Its Drivers[J]. Biological Conservation, 2019, 232: 8-27.
- [9] ZHANG W, RICKETTS T H, KREMEN C, *et al.* Ecosystem Services and Dis-Services to Agriculture [J]. Ecological Economics, 2007, 64(2): 253-260.
- [10] KOBORI H, PRIMACK R B. Participatory Conservation Approaches for Satoyama, the Traditional Forest and Agricultural Landscape of Japan[J]. Ambio, 2003, 32(4): 307-311.
- [11] WAN N F, LI S X, LI T, *et al.* Ecological Intensification of Rice Production through Rice-Fish Co-culture [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 234: 1002-1012.
- [12] KOOHAFKAN P. Conservation and Adaptive Management of Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) [J]. Resources Science, 2009, 31(1): 4-9.
- [13] LOCKE H, ROCKSTRÖM J, BAKKER P, *et al.* A Nature-Positive World: The Global Goal for Future [EB/OL]. [2022-05-21]. <https://f.hubspotusercontent20.net/hubfs/4783129/Nature%20Positive%20The%20Global%20Goal%20for%20Nature%20paper.pdf>.
- [14] IPCC. Summary for Policymakers[R]//Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. Geneva, Switzerland: IPCC, 2019.
- [15] 樊胜根, 高海秀, 冯晓龙, 等. 农食系统转型与乡村振兴[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2022, 21(1): 1-8. [FAN Sheng-gen, GAO Hai-xiu, FENG Xiao-long, *et al.* Transformation of Agrifood Systems to Boost Rural Revitalization[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2022, 21(1): 1-8.]
- [16] HODSON E, NIGGLI U, KITAJIMA K, *et al.* Boost Nature Positive Production [R]. Bonn, Germany: Center for Development Research, 2021.
- [17] The Economics of Ecosystems and Biodiversity. Measuring What Matters in Agriculture and Food Systems: A Synthesis of the Results and Recommendations of TEEB for Agriculture and Food's Scientific and Economic Foundations Report[R]. Geneva, Switzerland: UN Environment, 2018.
- [18] ROHR J R, BARRETT C B, CIVITELLO D J, *et al.* Emerging Human Infectious Diseases and the Links to Global Food Production [J]. Nature Sustainability, 2019, 2: 445-456.
- [19] IUCN. Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges[R]. Gland, Switzerland: IUCN, 2016.
- [20] World Bank. Biodiversity, Climate Change and Adaptation: Nature-based Solutions from the World Bank Portfolio [R]. Washington DC, USA: World Bank Publication, 2008.
- [21] BAUDUCEAU N, BERRY P, CECCHI C, *et al.* Towards an EU Research and Innovation Policy Agenda for Nature-based Solutions & Re-naturing Cities: Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on "Nature-based Solutions and Re-naturing Cities" [R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
- [22] SHAW R, ANDERSON C, FABRICIUS C, *et al.* Beyond Boundaries: Insights into Emerging Zoonotic Diseases, Nature and Human Well-being[EB/OL]. [2022-05-21]. https://unemg.org/wp-content/uploads/2020/07/WWF-Science-Brief_Beyond-Boundaries_5.6.20_lowres.pdf.
- [23] DARGIE G, LEWIS S, LAWSON I, *et al.* Age, Extent and Carbon Storage of the Central Congo Basin Peatland Complex [J]. Nature, 2017, 542: 86-90.
- [24] KIEW F, HIRATA R, HIRANOT, *et al.* Carbon Dioxide Balance of an Oil Palm Plantation Established on Tropical Peat [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 295: 108189.
- [25] GARRETT R D, NILES M T, GIL J D B, *et al.* Social and Ecological Analysis of Commercial Integrated Crop Livestock Systems: Current Knowledge and Remaining Uncertainty [J]. Agricultural Systems, 2017, 155: 136-146.
- [26] FISCHER A, EASTWOOD A. Coproduction of Ecosystem Services as Human-Nature Interactions: An Analytical Framework [J]. Land Use Policy, 2016, 52: 41-50.
- [27] LORIMER J, SANDOM C, JEPSON P, *et al.* Rewilding: Science, Practice, and Politics [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2015, 40: 39-62.
- [28] FAO. The 10 Elements of Agroecology Guiding the Transition to Sustainable Food and Agricultural Systems[EB/OL]. [2022-05-21]. <http://www.fao.org/3/i9037en/i9037EN.pdf>.
- [29] MA N, HE S Y, MIN Q W. Edible Biological Resource Use in an

- Agricultural Heritage System and Its Driving Forces; A Case of the Shuangjiang Mengku Ancient Tea and Culture System[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7791.
- [30] HE Xia-hong, SUN Yan, GAO Dong, *et al.* Comparison of Agronomic Traits between Rice Landraces and Modern Varieties at Different Altitudes in the Paddy Fields of Yuanyang Terrace, Yunnan Province[J]. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(1): 46–50.
- [31] HARA Y, OKI S, UCHIYAMA Y, *et al.* Plant Diversity in the Dynamic Mosaic Landscape of an Agricultural Heritage System; The Minabe-Tanabe Ume System[J]. Land, 2021, 10(6): 559.
- [32] FERRARIO V. Learning from Agricultural Heritage? Lessons of Sustainability from Italian “Coltura Promiscua”[J]. Sustainability, 2021, 13(16): 8879.
- [33] SUN Xue-ping, WANG Bin, LIU Mou-cheng, *et al.* The Ecosystem Service Function of Shandong Xiajin Yellow River Ancient Mulberry Trees System and Its Effect on Regional Ecosystem[J]. Journal of Resources and Ecology, 2016, 7(3): 223–230.
- [34] SANTORO A, VENTURI M, BEN M S, *et al.* Agroforestry Heritage Systems as Agrobiodiversity Hotspots: The Case of the Mountain Oases of Tunisia[J]. Sustainability, 2020, 12(10): 4054.
- [35] 谢坚, 刘领, 陈欣, 等. 传统稻鱼系统病虫害控制[J]. 科技通报, 2009, 25(6): 801–805, 810. [XIE Jian, LIU Ling, CHEN Xin, *et al.* Control of Diseases, Pests and Weeds in Traditional Rice-Fish Ecosystem in Zhejiang, China[J]. Bulletin of Science and Technology, 2009, 25(6): 801–805, 810.]
- [36] 张丹, 成升魁, 杨海龙, 等. 传统农业区稻田多个物种共存对病虫害生态控制效应: 以贵州省从江县为例[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1032–1037. [ZHANG Dan, CHENG Sheng-kui, YANG Hai-long, *et al.* Ecological Control Effects on Pest, Pathogen and Weed of Multiple Species Coexistence in Paddy Fields in Traditional Agricultural Regions [J]. Resources Science, 2011, 33(6): 1032–1037.]
- [37] LI Jing, JIAO Wen-jun, MIN Qing-wen, *et al.* Effects of Traditional Ecological Knowledge on the Drought-resistant Mechanisms of the Hani Rice Terraces System[J]. Journal of Resources and Ecology, 2016, 7(3): 211–217.
- [38] CENTERI C, SALÁTA D, SZILÁGYIA, *et al.* Selected Good Practices in the Hungarian Agricultural Heritage [J]. Sustainability, 2021, 13(12): 6676.
- [39] NAHUELHUAL L, CARMONA A, LATERRA P, *et al.* A Mapping Approach to Assess Intangible Cultural Ecosystem Services: The Case of Agriculture Heritage in Southern Chile[J]. Ecological Indicators, 2014, 40: 90–101.
- [40] LI G Y. Mechanism of the Original Ecology Gravity Irrigation in the Ziquejie Terrace[J]. American Journal of Water Science and Engineering, 2018, 4(2): 40.
- [41] REN W Z, HU L L, GUO L, *et al.* Preservation of the Genetic Diversity of a Local Common Carp in the Agricultural Heritage Rice-Fish System[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(3): e546–e554.
- [42] 李妹娟, 钟旭华, 梁开明, 等. 广东省稻鱼共生生态种养发展现状与对策建议[J]. 广东农业科学, 2021, 48(10): 111–120. [LI Mei-juan, ZHONG Xu-hua, LIANG Kai-ming, *et al.* Development Situation and Countermeasures of Rice-Fish Co-Culture System in Guangdong Province [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2021, 48(10): 111–120.]
- [43] YANG L, LIU M C, LU N F, *et al.* An Analysis on Crops Choice and Its Driving Factors in Agricultural Heritage Systems; A Case of Honghe Hani Rice Terraces System [J]. Sustainability, 2017, 9(7): 1162.
- [44] 张永勋, 刘某承, 闵庆文, 等. 农业文化遗产地有机生产转换期农产品价格补偿测算: 以云南省红河县哈尼梯田稻作系统为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(3): 374–383. [ZHANG Yong-xun, LIU Mou-cheng, MIN Qing-wen, *et al.* Calculation of Price Compensation of Agriculture Products in the Period of Organic Conversion in Agricultural Heritage Sites: Taking Paddy Rice of Hani Terrace in Honghe County of Yunnan Province as an Example [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(3): 374–383.]
- [45] NAKAMURA S, TSUGE T, OKUBO S, *et al.* Exploring Factors Affecting Farmers’ Implementation of Wildlife-Friendly Farming on Sado Island, Japan[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(4): 370–380.]
- [46] YIU E. Noto Peninsula after GIAHS Designation: Conservation and Revitalization Efforts of Noto’s Satoyama and Satoumi[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(4): 364–369.
- [47] LIU M C, YANG L, BAI Y Y, *et al.* The Impacts of Farmers’ Livelihood Endowments on Their Participation in Eco-compensation Policies: Globally Important Agricultural Heritage Systems Case Studies from China[J]. Land Use Policy, 2018, 77: 231–239.
- [48] QIU Z M, CHEN B X, TAKEMOTO K. Conservation of Terraced Paddy Fields Engaged with Multiple Stakeholders: The Case of the Noto GIAHS Site in Japan [J]. Paddy and Water Environment, 2014, 12(2): 275–283.
- [49] MARTINA S, ALEXANDRA K, INGRID B, *et al.* Old but Not Old Fashioned: Agricultural Landscapes as European Heritage and Basis for Sustainable Multifunctional Farming to Earn a Living[J]. Sustainability, 2021, 13(9): 4650.
- [50] HE Si-yuan, DING Lu-bin, MIN Qing-wen. The Role of the Important Agricultural Heritage Systems in the Construction of China’s National Park System and the Optimisation of the Protected Area System[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(4): 444–452.

作者简介: 何思源(1984—), 女, 江西太原人, 助理研究员, 博士, 主要从事生态系统服务、社会-生态系统动态和保护地管理研究。E-mail: hesy@igsrr.ac.cn

(责任编辑: 陈 昕)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0603

张晴,程卓,刘博,等.云南红河哈尼梯田生态系统的资源植物多样性与传统知识[J].生态与农村环境学报,2022,38(10):1258–1264.

ZHANG Qing, CHENG Zhuo, LIU Bo, et al. Diversity of Resource Plants and Associated Traditional Knowledge in the Honghe Hani Terraced Ecosystem of Yunnan[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1258–1264.

云南红河哈尼梯田生态系统的资源植物多样性与传统知识

张 晴^{1,2}, 程 卓^{1,2}, 刘 博^{1,2}, 杨 珺³, 李建钦⁴, 张红榛⁵, 张昕勃², 马丽娟², 龙春林^{1,2,6,7①} [1. 民族地区生态环境国家民委重点实验室(中央民族大学), 北京 100081; 2. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 3. 中国科学院昆明植物研究所, 云南 昆明 650201; 4. 西南林业大学林学院, 云南 昆明 650224; 5. 红河学院红河哈尼梯田保护与发展研究中心, 云南 蒙自 661199; 6. 民族医药教育部重点实验室(中央民族大学), 北京 100081; 7. 中央民族大学国家安全研究院, 北京 100081]

摘要: 云南红河哈尼稻作梯田系统是全球重要的农业文化遗产和世界文化遗产,拥有丰富的生物多样性和重要的生态功能。在由森林、村寨、梯田、水系构成的哈尼梯田生态系统中,植物(特别是资源植物)是该生态系统的重要组成部分,也是维持这个系统稳定性的重要因素。笔者采用植物分类学、植物生态学、民族植物学等方法,以云南省红河州梯田最集中的4个县域哈尼梯田生态系统的重要资源植物为对象,调查了其多样性状况及相关的传统管理与利用知识,探讨了两者在支撑、保护哈尼梯田农业文化遗产系统中的作用。结果表明,哈尼梯田生态系统有151科445属651种资源植物,其中药用植物255种、食用植物226种;当地百姓拥有十分丰富的管理和利用植物多样性的传统知识,包括森林和树木、食用和药用植物、草果和板蓝种植以及薪柴等方面的知识和文化,应用类别涉及日常生活和梯田保护等诸多方面;资源的多用途、多功能特点明显,体现了当地深厚的植物利用文化和紧密的人地互动关系。当地丰富的植物多样性构筑了哈尼梯田农业生态系统的基础,居民对资源植物的长期采集、管理和利用承载着独具地方和民族特色的传统知识和文化,支撑着当地居民的生计,在维持整个哈尼梯田农业生态系统稳定、保护农业文化遗产和推动遗产地经济发展方面发挥着非常重要的作用。

关键词: 哈尼梯田; 农业文化遗产; 资源植物多样性; 民族植物学; 药用植物; 食用植物; 传统知识

中图分类号: X37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1258-07

Diversity of Resource Plants and Associated Traditional Knowledge in the Honghe Hani Terraced Ecosystem of Yunnan. ZHANG Qing^{1,2}, CHENG Zhuo^{1,2}, LIU Bo^{1,2}, YANG Jun³, LI Jian-qin⁴, ZHANG Hong-zhen⁵, ZHANG Xin-bo², MA Li-juan², LONG Chun-lin^{1,2,6,7①} [1. Key Laboratory of Ecology and Environment in Minority Areas (Minzu University of China), National Ethnic Affairs Commission, Beijing 100081, China; 2. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 3. Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201, China; 4. Faculty of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 5. Research Center for Conservation and Development of Hani Terraced Paddy Rice Fields, Honghe University, Mengzi 661199, China; 6. Key Laboratory of Ethnomedicine (Minzu University of China), Ministry of Education, Beijing 100081, China; 7. Institute of National Security Studies, Minzu University of China, Beijing 100081, China]

Abstract: As a site of Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) and a World Cultural Heritage, there is rich biodiversity in Yunnan's Honghe Hani terraced paddy rice fields with important ecological, economic and social values. Resource plants refer to the plants that are beneficial and available to human beings, often carrying rich traditional knowledge of collection, utilization and management of plants, and showing the reciprocal relationship between man and plants. The Hani terraced ecosystem is composed of forests, villages, terraced rice paddies and water systems in Honghe Hani and Yi Autonomous Prefecture, Yunnan, Southwest China. Plants, in particular useful plants, as the crucial component of this ecosystem for maintaining its stability, unfortunately, has always been overlooked. Through the methods of plant taxonomy, plant ecology and ethnobotany, the present study revealed the status of major resource plant diversity and

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(31870316, 31761143001); 中央民族大学交叉学科研究专项(2022ZDPY10, 2022GJAQ04, 2020MDJC03)

① 通信作者 E-mail: long.chunlin@mus.edu.cn

associated traditional knowledge of the Hani terraced ecosystem. The sampling areas covered the paddy rice fields together with their surrounding forest lands from four counties with most Hani terraces in Honghe Prefecture. The relationship between the Hani terraced rice ecosystem and plant diversity has been analyzed. The results show that there are 651 species of useful plants in the Hani terraced ecosystem, including 255 medicinal plant species and 226 edible plant species. The local people have rich traditional knowledge in the management and utilization of these plants, such as the scared forests and trees, edible and medicinal plants, cultivation of *Amomum tsaoko* and *Strobilanthes cusia*, and firewood collection. The plants can be used for daily production, livelihood and protection of Hani terraced paddy rice fields with obvious characteristics of the resources of multi-purposes and multi-functions, indicating the profound plant utilization culture and the close human-land interaction on which the stability of agricultural heritage will depend. The local rich plant diversity formed the basis of Hani terraced rice field ecosystem. The long-term collection, management and use of plant resources reflected traditional knowledge and culture, and supported local people's livelihood. The rich plant diversity, combined with its traditional knowledge, plays a very important role in maintaining the entire Hani terraced agroecosystem, conserving agricultural heritage and promoting rural economy.

Key words: Hani terrace; agricultural heritage; diversity of resource plants; ethnobotany; medicinal plants; edible plants; traditional knowledge

联合国粮农组织在其官方网站 (<https://www.fao.org/giahs/>) 对全球重要农业文化遗产的介绍中强调:“由于不断创新、世代相传以及与其他社区和生态系统的交流,动态保护战略和进程能够维持生物多样性和基本的生态系统服务。资源管理和利用方面积累的相关知识和经验丰富而广博,是一项具有重要全球意义的宝藏,应加以推广和养护,同时使其能够继续发展演化。”可见,国际社会已充分认识到全球重要农业文化遗产地在维持生物多样性和生态系统服务功能方面的重要作用,生物多样性成为农业文化遗产领域的主要研究方向之一。2021 年联合国《生物多样性公约》第十五次缔约方大会通过了《昆明宣言》(<https://www.cbd.int/meetings/COP-15-PART1>), 将推动生物多样性保护主流化,包括加强对农耕系统中生物多样性的研究和保护。

近年来,研究者对英国坎泊兰郡平原^[1]、韩国青山岛^[2]、意大利南部佩拉杰群岛^[3]等农业遗产地开展了研究,揭示这些农业遗产地的生物多样性状况及其对作物品种、野生生物及传统知识的保护作用,并发现生物多样性对传统农业生态系统和当地人们的生计有着重要影响。其他拥有全球重要农业文化遗产地的国家和地区也纷纷研究其生物多样性,如日本、摩洛哥、智利等^[4-8]。研究发现这些传统农业生态系统还与当地丰富的传统知识和传统文化紧密相关,有力维护了这些全球重要农业文化遗产地的生物多样性和生态系统功能。

中国是世界上拥有全球重要农业文化遗产地最多的国家,截至 2022 年 5 月,全球重要农业文化遗产地总数达到 18 个。此外,还有 138 处为我国农

业农村部认定的中国重要农业文化遗产以及数量众多的传统农耕系统。我国对这些重要农业文化遗产地开展了大量卓有成效的研究工作,但研究热点主要集中在农业文化遗产资源和产业化研究、农业文化遗产价值与保护体制研究、农业文化遗产与乡村振兴研究等方面,其中以针对浙江青田稻鱼共生系统和云南红河哈尼稻作梯田系统两大农业文化遗产地的研究为多。针对云南红河哈尼稻作梯田系统的研究多围绕生态补偿、当地居民生计、土地利用等内容^[9],鲜有涉及生物多样性的研究。针对学术界和广大公众长期关注的农业文化遗产内涵及如何保护的问题,有学者提出“保护中应注意把握的 8 组关系”^[10],但作为农业文化遗产重要组成单元的生物多样性及相关传统知识却不在其中。值得一提的是,我国学者已经注意到农业文化遗产地的生物多样性及当地传统知识系统的重要性,其中张丹等^[11]对我国全球重要农业文化遗产地的农业生物多样性进行了回顾,提出强化农业生物多样性保护与可持续管理的研究、建立农业生物多样性保护的激励机制等建议,并对传统文化与农业生物多样性保护之间的关系进行了阐述,认为传统文化对农业生物多样性保护具有积极意义。而农业生物多样性作为传统文化的载体也可以用来传达和保护民族传统文化^[12]。

久负盛名的全球重要农业文化遗产“云南红河哈尼稻作梯田系统”所在的云南省红河哈尼族彝族自治州是我国生物多样性最丰富的区域之一,其生态系统复杂多样,拥有我国最完整的热带山地森林植被垂直带谱,分布有野生高等植物约 6 000 种、陆栖脊椎野生动物 690 种、国家重点保护野生动物

102 种^[13]。哈尼稻作梯田生态系统包含农业系统、自然生态系统和社会文化系统,具有生态、经济和社会多方位价值^[14]。对云南红河哈尼稻作梯田系统的生物多样性开展了初步的研究,其中较为深入的是梯田中传统栽培的水稻品种及其遗传多样性以及稻鱼共作系统中的部分浮游动植物和底栖动物^[14-18],而对系统中植物多样性的研究较为匮乏,尤其没有资源植物方面的研究报道。资源植物指对人类有益和可以利用的植物^[19],往往蕴含着丰富的采集、利用和管理植物的传统知识,承载着人与植物的互惠关系。由于哈尼梯田农业生态系统独特而复杂,植物物种多样性丰富,而且当地居民已经发展和积累了许多传统的植物学知识^[20],亟待总结、梳理。因此,十分有必要开展对哈尼梯田生态系统中的资源植物多样性及其相关传统知识的研究,这不仅有利于保护和持续利用当地植物资源,也有利于深度了解哈尼梯田生态系统的科学内涵和其生态系统服务功能,这对促进农业文化遗产的保护和乡村振兴具有重要意义。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区域

哈尼梯田地处北回归线以南,属亚热带季风气候,年均温度约为 14℃,年均降水量达 1 400 mm;所处地区河流众多,山势高大,立体气候明显。在多元化的气候条件作用下,哈尼梯田生态系统的植被类型多样,从热带雨林到山地苔藓林、从干热河谷半萨王纳植被到暖温性竹林都有分布。云南红河哈尼稻作梯田系统主要分布在红河州的元阳县、红河县、金平县和绿春县,总面积约 6 666 hm²,其中元阳县的梯田处于红河哈尼梯田的中心地带。

从 2015 年 6 月起,笔者先后 4 次对云南红河哈尼稻作梯田系统中的资源植物进行了调查。所调查的区域涵盖 4 个县哈尼梯田的主要分布区,包括元阳县的坝达、多依树、老虎嘴、牛角寨片区,红河县的甲寅、撒玛坝片区,绿春县的腊姑、桐株片区,金平县的阿得博、马鞍底片区。除了这十大片区梯田的稻作系统和梯田间残留的植被,调查范围也外扩到梯田周边的环境,具体做法是从梯田边缘往外延伸 100 m,包括旱地、天然林、人工林、神林、村庄、水域、荒地等。

1.2 研究方法

1.2.1 植物生态学方法

(1) 样线法

从梯田上部沿直线往下部延伸,在坝达、甲寅、

撒玛坝、腊姑、阿得博 5 个片区各设置 6 条样线,每条长度为 10 m。记录各样线内的植物物种数量、名称、用途等。

(2) 样方法

在 10 个梯田片区的稻田中各选择 2 个样方,分别位于村寨下方约 100 m 和底部河沟上方约 100 m 的梯田中,每个样方大小为 2 m×2 m,记录每个样方内的植物物种数量、名称、用途等。在坝达、多依树、甲寅、撒玛坝、腊姑、阿得博 6 个片区靠近梯田的天然次生林各选 1 个样方,在多依树、甲寅 2 个片区的人工林各选 1 个样方,8 个样方大小均为 20 m×20 m,记录每个样方内的植物物种数量、名称、用途等,对胸径大于 10 cm 的乔木树种,记录其数量、高度、胸高直径、幼苗数量等。

1.2.2 民族植物学方法

采用民族植物学方法调查哈尼梯田生态系统的植物种类及相关民间利用知识,主要采用参与式观察(participant observation)、半结构式访谈(semi-structured interview)、关键人物访谈(key informant interview)等方法在野外、村社和集市进行调查。运用“5W+1H”提问法^[21],即从原因(Why)、对象(What)、地点(Where)、时间(When)、人员(Who)、数量(How much/many)6 个方面,了解所调查植物的当地名、食用/入药部位、用途、管理方式和制备方法等,获得相关传统知识。对当地使用的植物采集凭证标本,保存于中央民族大学标本室。

1.2.3 植物分类学方法

在当地专家的协助下,对哈尼梯田生态系统的植物物种多样性进行调查,并采集植物标本。参照《中国植物志》《Flora of China》和网络资源如植物智(<http://www.iplant.cn/>)及 The World Flora Online(www.worldfloraonline.org)等,对采集到的标本进行鉴定并确定学名,整理形成哈尼梯田生态系统资源植物名录。

以上所有方法均辅以访谈、记录(图片和音像)等手段。对于资源的归类,该研究未进行细分,仅把植物资源分为食用类、药用类、生产实践类和其他 4 个类别;对于多用途的物种,根据其最主要的用途进行归类。

2 结果与分析

2.1 哈尼梯田生态系统的资源植物物种多样性

从广义上说,哈尼梯田传统农业生态系统包括为梯田提供水源和部分养分的森林生态系统,该系统拥有 2 个国家级自然保护区(黄连山自然保护区

和分水岭自然保护区)、2 个省级自然保护区(观音山自然保护区和阿姆山自然保护区)以及神林和天然林、人工林等森林植被。从自然保护区考察报告所报道的数据来看,该系统拥有约 6 000 种高等植物,包括苔藓、蕨类、裸子和被子植物^[22-23]。

研究界定的哈尼梯田传统农业生态系统为梯田本身及向周边延伸 100 m 的区域。经实地考察、统计,该系统拥有 151 科 445 属 651 种资源植物(附件 1),包括食用植物 80 科 226 种、药用植物 89 科 255 种,具有丰富的物种多样性。在哈尼梯田生态系统的 651 种资源植物中以豆科植物为多,共 32 种;其次为蔷薇科、菊科、樟科植物,分别有 28、24、21 种;此外,唇形科(19)、禾本科(18)、报春花科(16)、茜草科(16)、五加科(15)和杜鹃花科(15)植物也较多。

2.2 哈尼梯田生态系统中植物的民间利用

当地哈尼族、彝族、汉族等都拥有十分丰富的管理和利用植物多样性的传统知识,包括森林和树木(特别是神林神树)、食用和药用植物、草果和板蓝种植、薪柴等方面的知识和文化。当地少数民族对植物资源的利用方式和用途可分为木材、薪柴、观赏、药用、食用、固埂、玩具、染色、饲料、香料、毒药 11 类。资源利用的单一用途和多种用途并存,多用途、多功能特点明显。很多植物在当地既有食用价值,又可以治疗疾病,具有药用价值。药食两用植物的知识多样且独特,兼具药用和食用价值的植物有 42 种。

2.2.1 食用植物

由于哀牢山区山高坡陡,各村寨缺乏平缓的园地种植蔬菜,所以采集野菜是山区各民族最直接的蔬菜来源。滇橄榄(余甘子, *Phyllanthus emblica*)是云南及周边地区重要的野生药食两用植物,一般果实食用,可生食、腌制或泡酒,哈尼族、彝族也用其树皮制作菜肴;梯田生态系统中出产的毛胶薯蓣(粘黏黏, *Dioscorea subcalva*)可用于制作美味的特色食品“山药豆腐”;鱼腥草(*Houttuynia cordata*)是当地各少数民族最喜欢食用的野菜和调味植物。蘸水是哈尼族等当地百姓的饮食文化中不可缺少的调味品,其所用的调味植物较多,除了鱼腥草,还有 3 种木姜子、2 种辣椒、3 种唇形科和 2 种姜科植物。来自哈尼梯田生态系统的多样化食材成就了世界遗产地独具特色的饮食文化,如入选吉尼斯世界纪录的长街宴等。

2.2.2 药用植物

药用植物一般用于治疗跌打损伤以及消炎等,

如吊石苣苔(*Lysionotus pauciflorus*)用于舒经活血,石柑子(*Pothos chinensis*)用于治疗跌打损伤,山营(*Dianella ensifolia*)用于治疗肚子痛,多毛悬钩子(*Rubus lasiotrichos*)用于治疗乳腺炎等。除了用于治疗自身的疾病外,村民也采集经济价值较高的药材到集市上摆摊出售或者卖给固定的草药收购者,比如翠云草(*Selaginella uncinata*)在当地被较多收购,拥有一定的经济价值。草果(*Amomum tsaoko*)、板蓝(*Strobilanthes cusia*)是哈尼梯田传统农业生态系统中栽培最多的 2 种植物,都具有多种用途,既可作为日常生计被利用,也是重要的经济作物。草果的嫩芽是当地人喜爱的菜肴,果实是著名的南药;板蓝(马蓝、南板蓝根)一直以来都是当地各民族的染料植物,也是用途广泛的药用植物。

2.2.3 生产资料植物

生产资料植物主要用于编织、包装、制作工具和用具等。统计显示,当地有材用植物 66 种,至少 40 种用于薪柴。当地人用桂樱属的云南桂樱(*Laurocerasus andersonii*)和长叶桂樱(*Laurocerasus dolichophylla*)做刀柄,用酸藤子属的平叶酸藤子(*Embelia undulata*)和肉果酸藤子(*Embelia carnosisperma*)的藤做绳子;建房时用到五节芒(*Miscanthus floridulus*)和白茅(*Imperata cylindrica*)。

2.2.4 其他资源植物

药用植物和食用植物是当地数量最多、不同民族使用最广泛的 2 类植物。除此之外还有大量植物被用作饲料、染色、观赏、香料等,如生长在村寨周边、林下、箐沟等旁的各类野生植物可作为饲料用于喂养牲口,猪殃殃(*Galium spurium*)用于染制米饭和节日使用的鸡蛋等。

此外,哈尼梯田中还有一些具有生态功能的植物,主要用于水源涵养、防风、固田埂,对维持梯田生态系统的稳定性有重要作用。最著名的涵养水源树种是水冬瓜树(尼泊尔桤木, *Alnus nepalensis*),其在田间地头广泛分布,或与草果、板蓝等构成混农林系统。村民也在田埂边刻意种植和保留了柳属的华西柳(*Salix occidentalisinensis*)用于固着田埂,因为该种植物枝叶稀疏,种在田间不会遮挡其他作物。

3 讨论

作为文化景观遗产,云南红河哈尼稻作梯田系统中的梯田和村落往往受到更多关注,而与梯田生态系统可持续发展有重要联系的自然资源,特别是野生植物资源和生物多样性在农业文化遗产保护

中却常被忽视。梯田生态系统的稳定不仅有赖于气候、地貌、植被和水文等地理要素,也与原住民和自然资源的长期互动所形成的人地共生体系密不可分^[24]。当地丰富的植物多样性构筑了哈尼梯田自然生态系统的基础,对相关植物的长期采集、管理和利用承载着独具地方和民族特色的传统知识和文化,支撑着当地百姓生计,在维持整个哈尼梯田复合型农业系统稳定、保护农业文化遗产和推动遗产地经济发展方面发挥着非常重要的作用。

3.1 丰富的植物多样性维系整体农业生态系统稳定

在哈尼族“森林-村寨-梯田-水源”四位一体的系统格局中,植物资源是贯穿其中的重要要素,它不仅提供了多样的产品,在民族社区生计发展和自然资源可持续经营方面发挥着多重作用,同时在保障生态系统服务功能和生态安全方面产生了不可替代的价值。与此同时,健康稳定的复合型农业生态系统也保证了当地生物多样性的丰富和稳定。

在哈尼村落的森林里生长有大量涵养水源能力极强的阔叶树种,它们构成了复杂多样的生态系统。正是这些阔叶树在不同层次中的存在,保证了哈尼梯田在大旱之年依然能够水源长流。但因遗产地人口众多,人地、人林矛盾突出,私挖乱采、乱砍滥伐等现象时有发生。同时,因目前退耕还林补偿少、经济效益较低,导致当地农民种树造林积极性不高,部分农民甚至为追求经济效益在水冬瓜林等水源林下套种草果等林下经济作物,或者用杉木等速生经济林替代水冬瓜林。还有一些梯田核心区为发展林下种植,将小乔木、灌木、草本植物都进行了清理,仅保留部分高大乔木。这些人为活动都严重破坏了生物多样性,极大地影响了森林涵养水源的能力,导致森林蓄水能力下降;而水源不足会直接影响水稻种植,部分水田变成了旱地,用来种植香蕉、除虫菊等收益更高的经济作物,这有违哈尼梯田可持续性发展的观念,使梯田生态环境保护压力陡增。此外,全球气候变化带来的干旱问题,以及紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)、飞机草(*Chromolaena odorata*)、肿柄菊(*Tithonia diversifolia*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等多种外来入侵植物也威胁着哈尼梯田生态系统的安全。

在农业文化遗产保护工作中应关注植物多样性的保护工作,强化梯田生态系统的森林植被保护;可继续通过利用哈尼族崇拜树木和森林的传统信仰有效地保存和维持森林资源;通过制定地方法

律法规或政策来稳定并扩大水源森林的保护区域;重视并加强防止外来入侵物种,保护生态系统内部健康稳定,从而实现梯田农业生态系统稳定运行、良性循环。

3.2 紧密的人地互动关系促进农业文化遗产动态保护

日常生产生活中,当地人对植物的利用方式主要集中在药用、木材、食用、饲料等不同方面。植物与各民族的联系最早源于人们对植物资源的物质性依赖,随着这种依赖关系的持续紧密发展,植物对各民族的信仰、行为等也产生了一系列的影响,并从社会文化角度建立了认知、利用、保护的互动体系,从而构成了整个人类生态系统中复杂的人与植物的关系,影响着整个系统的稳定运行。哈尼梯田生态系统中的植物多样性的管理和利用正是这种关系的典型体现。哈尼梯田农业文化遗产长期以农业生产这一核心经济活动动态保持其服务功能和独特的生态、文化、审美价值^[25]。而在居住和耕作之外,野生植物的存在极大丰富了当地居民的日常生活,为他们的生产生活带来很多便利,强化了遗产地与当地居民之间的联系,因此有利于和谐人地关系的建立和保持,对遗产地聚落的可持续发展具有促进作用。

由于受到现代文明和外来文化的冲击,传统植物和生态知识及其维持体系受到了严重威胁。目前,对植物的传统认知和传统知识主要集中在老一辈人手中,年轻人缺乏相关的知识传承的情况比较严重。在城镇化发展和利益需求的驱动下,很多村寨的轻壮年劳力都选择外出打工,他们大多不愿像父辈一样承受繁重而复杂的梯田劳作,因此使得这些传统知识的传承面临困难。

保护农业文化遗产既要保护梯田、民居、水系、动植物资源等物质性要素,也要对地方性知识和传统文化给予足够的关注,充分尊重当地传统习俗习惯,保持村民对民族传统的认同和理解,并强化梯田农耕文化传承,加强梯田人文环境塑造,尽力保留紧密的人地互动关系,使村民劳作之余的生活更丰富而生动。

3.3 民族植物学知识为遗产地乡村振兴提供契机

民族植物学知识源于当地百姓长年累月的实践经验,常为植物的可持续开发利用提供主要线索。哈尼梯田生态系统中的长苞白珠(*Gaultheria longibracteolata*)在民族植物学调查中被发现具有类似冬绿油(wintergreen oil)的芳香气味,且传统用法也与消炎相关,故对其精油进行成分分析和抑菌实

验,结果证实其为优良天然冬绿油的替代原料植物,拓宽了冬绿油资源^[26]。此外,当地多种野菜已成为人们喜爱的天然、绿色、生态食品,这些植物均具有较高的开发利用潜力,有望成为当地产业发展的灵感源泉,为乡村振兴提供新动力。

在现代化发展的今天,传统梯田生态系统的运行面临着诸多问题,资源、环境保护与村民生计发展之间的博弈从未停止。如随着城市里“品味自然”观念的兴起,野菜需求量大增,当地社区群众在经济利益的驱使下,进入保护区采集野菜的人数逐渐增多。在调查中发现野生药材收购市场生意红火,对重楼、黄精等 30 多种野生植物资源的需求较大,导致当地村民除在水源林、风景林采挖外,进入保护区内采挖的现象愈演愈烈,这种掠夺式采挖是直接导致保护区某些资源锐减的一个重要原因。村民有追求富裕生活的权利,只是在低水平的土地价值、外来利益驱动和城镇化的现实背景下,边缘民族地区传统的生计方式呈现出固有的脆弱性^[27]。

无论是从植物资源保护和利用的角度来看,还是从推动区域经济发展和进步的方向而言,挖掘并认知梯田生态系统内植物资源的丰富性和重要性,对其进行保护和合理的开发利用,从外部加大技术、生产、市场、信息方面的投入,借助好梯田生态农业和世界文化遗产的品牌,提高当地村民的收入,促进当地经济发展,不失为一个有效策略。在农业文化遗产保护工作中必须重视民族植物学知识线索,即重视并合理利用地方性知识,发掘具有开发潜力的自然资源,在维持梯田生态系统的良性运行的基础上探索地区产业发展新思路、新路径,从而促进梯田聚落的稳定和可持续发展,助力乡村振兴。

4 结论

通过植物分类学、植物生态学、民族植物学等调查手段发现,哈尼梯田生态系统中的资源植物种类丰富,达到 151 科 445 属 651 种,包括食用植物 80 科 226 种、药用植物 89 科 255 种,表现出高度的资源植物物种多样性。当地百姓拥有十分丰富的管理和利用植物多样性的传统知识,包括森林和树木、食用和药用植物、草果和板蓝种植以及薪柴等方面的知识和文化,应用类别涉及日常生活和梯田保护等诸多方面,资源的多用途、多功能特点明显。哈尼族、彝族等对各种植物资源的多种利用和管理方式体现了当地深厚的植物利用文化和紧密的人地互动关系。丰富的植物多样性及对相关

植物采集利用的地方性知识在维持整个哈尼梯田农业生态系统稳定、保护农业文化遗产、推动当地经济建设和可持续发展方面发挥着非常重要的作用。

致谢: 感谢红河哈尼族彝族州世界遗产管理局、红河州元阳县、红河县、金平县和绿春县的梯田管理部门、县级农业和林业部门、梯田分布区有关乡镇的大力支持。

参考文献:

- [1] MORRIS E C, DE BARSE M, SANDERS J. Effects of Burning and Rainfall on Former Agricultural Land with Remnant Grassy Woodland Flora[J]. *Austral Ecology*, 2016, 41(1): 74–86.
- [2] PARK H C, OH C H. Flora, Life Form Characteristics, and Plan for the Promotion of Biodiversity in South Korea's Globally Important Agricultural Heritage System, the Traditional Gudeuljang Irrigated Rice Terraces in Cheongsando[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(6): 1212–1228.
- [3] LA MANTIA T, CARIMI F, DI LORENZO R, et al. The Agricultural Heritage of Lampedusa (*Pelagie archipelago*, South Italy) and Its Key Role for Cultivar and Wildlife Conservation[J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2011, 6(2): 17.
- [4] 吴合显, 李玮. 借鉴与启示: 国外重要农业文化遗产研究再认识[J]. *原生态民族文化学刊*, 2020, 12(4): 121–129. [WU Hexion, LI Wei. Reference and Enlightenment: Research and Practice of GIAHS in Foreign Countries[J]. *Journal of Original Ecological National Culture*, 2020, 12(4): 121–129.]
- [5] AKIRA N, EVONNE Y. Ten Years of GIAHS Development in Japan[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(4): 567–577.
- [6] 姚忠, 辛在军, 吴永明, 等. 日本里山环境管理模式及对我国新农村建设的启示[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(9): 769–774. [YAO Zhong, XIN Zai-jun, WU Yong-ming, et al. Environmental Management Mode of Satoyama in Japan and Its Enlightenment to Construction of New Countryside in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(9): 769–774.]
- [7] HIROAKI H. Understandings of Relationships between Agriculture and Biodiversity in Kunisaki GIAHS[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, 5(4): 395–397.
- [8] HIDEHIRO I, YOSHINOBU K. Assessment of GIAHS in Shizuoka: The Traditional Tea-Grass Integrated System[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, 5(4): 398–401.
- [9] 但方, 王堃, 但欢, 等. 农业文化遗产研究热点及趋势分析[J]. *世界农业*, 2022(5): 108–118. [DAN Fang, WANG Kun-he, DAN Huan, et al. Research Hotspots and Trends of Agricultural Cultural Heritage[J]. *World Agriculture*, 2022(5): 108–118.]
- [10] 王思明. 农业文化遗产的内涵及保护中应注意把握的八组关系[J]. *中国农业大学学报(社会科学版)*, 2016, 33(2): 102–110. [WANG Si-ming. The Connotation of Agricultural Heritage and the Eight Relations for Better Conservation[J]. *China Agricul-*

- tural University Journal of Social Sciences Edition, 2016, 33(2): 102-110.]
- [11] 张丹, 闵庆文, 何露, 等. 全球重要农业文化遗产地的农业生物多样性特征及其保护与利用[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 451-459. [ZHANG Dan, MIN Qing-wen, HE Lu, *et al.* Agro-biodiversity Features, Conservation and Utilization of China's Globally Important Agricultural Heritage Systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 451-459.]
- [12] MA N, YANG L, MIN Q W, *et al.* The Significance of Traditional Culture for Agricultural Biodiversity: Experiences from GIAHS[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(4): 453-461.
- [13] 洪正华. 擦亮生物多样性红河名片[J]. 社会主义论坛, 2021(9): 4-6. [HONG Zheng-hua. Polishing Biodiversity Honghe Business Card[J]. Socialist Forum, 2021(9): 4-6.]
- [14] LI F F, GAO J C, XU Y, *et al.* Biodiversity and Sustainability of the Integrated Rice-Fish System in Hani Terraces, Yunnan Province, China[J]. Aquaculture Reports, 2021, 20: 100763.
- [15] 徐福荣, 汤翠凤, 余腾琼, 等. 中国云南元阳哈尼梯田种植的稻作品种多样性[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3346-3357. [XU Fu-rong, TANG Cui-feng, YU Teng-qiong, *et al.* Diversity of Paddy Rice Varieties from Yuanyang Hani's Terraced Fields in Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(12): 3346-3357.]
- [16] 徐福荣, 董超, 杨文毅, 等. 利用微卫星标记比较云南元阳哈尼梯田两个不同时期种植的水稻地方品种的遗传多样性[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 381-386. [XU Fu-rong, DONG Chao, YANG Wen-yi, *et al.* Comparison of Genetic Diversity of Rice Landraces Planted in Two Periods in Hani's Terraced Fields in Yuanyang County, Yunnan Province, China Using Microsatellite Markers[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(4): 381-386.]
- [17] 马孟莉, 郑云, 周晓梅, 等. 云南哈尼梯田红米地方品种遗传多样性分析[J]. 作物杂志, 2018(5): 21-26. [MA Meng-li, ZHENG Yun, ZHOU Xiao-mei, *et al.* Genetic Diversity Analysis of Red Rice from Hani's Terraced Fields in Yunnan Province[J]. Crops, 2018(5): 21-26.]
- [18] 何柳, 宋英杰, 龙春林. 哈尼梯田水稻农家品种遗传多样性的原生境保护研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(10): 87-94. [HE Liu, SONG Ying-jie, LONG Chun-lin. Genetic Diversity of Rice Landraces in Yuanyang Hani Terraced Rice Fields under In-Situ Conservation: Research Progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(10): 87-94.]
- [19] 朱太平, 刘亮, 朱明. 中国资源植物[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 10. [ZHU Tai-ping, LIU Liang, ZHU Ming. Plant Resources of China[M]. Beijing: Science Press, 2007: 10.]
- [20] LUO B S, LIU B, ZHANG H Z, *et al.* Wild Edible Plants Collected by Hani from Terraced Rice Paddy Agroecosystem in Honghe Prefecture, Yunnan, China[J]. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 2019, 15(1): 56.
- [21] 王洁如, 龙春林. 基诺族传统食用植物的民族植物学研究[J]. 云南植物研究, 1995, 17(2): 161-168. [WANG Jie-Ru, LONG Chun-Lin. Ethnobotanical Study of Traditional Edible Plants of Jinuo Nationality[J]. Acta Botanica Yunnanica, 1995, 17(2): 161-168.]
- [22] 许建初. 云南金平分水岭自然保护区综合科学考察报告集[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2002: 5-44. [XU Jian-chu. Collection of Comprehensive Scientific Investigation Reports of Fenshuiling Nature Reserve of Jinping, Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Press, 2002: 5-44.]
- [23] 许建初. 云南绿春黄连山自然保护区[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003: 119-213. [XU Jian-chu. Huanglianshan Nature Reserve of Lichun, Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Press, 2003: 119-213.]
- [24] 张新梅. 世界遗产视野下哈尼梯田的多重价值与保护方法研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021. [ZHANG Xin-mei. Research on the Multiple Values and Protection Methods of Hani Terraces from the Perspective of World Heritage[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2021.]
- [25] 闵庆文. 哈尼梯田的农业文化遗产特征及其保护[J]. 学术探索, 2009(3): 12-14, 23.
- [26] LUO B S, KASTRAT E, MORCOL T, *et al.* *Gaultheria Longibracteolata*, an Alternative Source of Wintergreen Oil[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128244.
- [27] 周宗俊, 保继刚, 翁时秀. 梯田保护利用的演化逻辑及外力影响因素: 以元阳哈尼梯田为例[J]. 热带地理, 2021, 41(2): 388-397. [ZHOU Zong-jun, BAO Ji-gang, WENG Shi-xiu. Evolution of Terrace Farming and External Factors of Terrace Protection Measures: A Case Study of Hani Terraces[J]. Tropical Geography, 2021, 41(2): 388-397.]

作者简介: 张晴(1997—), 女, 北京市人, 主要从事民族植物学研究。E-mail: chelseyzq@163.com

(责任编辑: 陈 昕)

附录

附件 1 哈尼梯田生态系统中的主要资源植物编目

Appendix 1 Inventory of major useful plant species in Hani terrace ecosystem

<http://www.ere.ac.cn/attached/file/20221011/2022101116043.806.pdf>

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0600

孙忠祥, 胡泽学, 叶回春, 等. MaxEnt 与遥感技术在草原蝗虫灾害风险监测中的应用: 以东乌珠穆沁旗农业文化遗产为例[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1265–1272.

SUN Zhong-xiang, HU Ze-xue, YE Hui-chun, et al. Application of MaxEnt and Remote Sensing Technology in Grassland Locust Disaster Risk Monitoring: An Example from the Agricultural Heritage Systems of East Ujimqin Banner[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1265–1272.

MaxEnt 与遥感技术在草原蝗虫灾害风险监测中的应用: 以东乌珠穆沁旗农业文化遗产为例

孙忠祥¹, 胡泽学¹, 叶回春^{2,3①}, 黄文江^{2,3}, 额尔登其木格⁴, 张莹¹ (1. 中国农业博物馆, 北京 100026; 2. 可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094; 3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 4. 内蒙古自治区锡林郭勒盟草原工作站, 内蒙古 锡林郭勒 026000)

摘要: 东乌珠穆沁旗游牧生产系统是我国重要的农业文化遗产, 具有极高的生态、经济、景观、技术和文化价值, 然而近年来当地饱受蝗虫灾害的影响, 草原正面临着前所未有的威胁与挑战。该研究选取东乌珠穆沁旗为研究区, 以草原蝗虫为风险因子, 结合草原蝗虫生长特性, 基于最大熵模型(MaxEnt), 构建基于遥感、土壤、植被和地形的草原蝗虫发生风险指标体系, 分析不同生境因子对草原蝗虫发生的影响, 对草原蝗虫发生风险区进行提取并分级。结果表明: 模型模拟结果良好, 平均曲线下面积(areas under curve, AUC)为 0.826; 草原蝗虫发生风险的主要影响因子为孵化期地表温度、生长期地表温度和产卵期降水; 高风险区主要分布在嘎达布其镇, 面积为 920 km²。该研究有利于更好地保护东乌珠穆沁旗游牧生产系统农业文化遗产, 也可为其他草原类农业文化遗产灾害风险监测提供技术支撑。

关键词: 农业文化遗产; 东乌珠穆沁旗游牧生产系统; 遥感; 草原蝗虫; 最大熵模型

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1265-08

Application of MaxEnt and Remote Sensing Technology in Grassland Locust Disaster Risk Monitoring: An Example from the Agricultural Heritage Systems of East Ujimqin Banner. SUN Zhong-xiang¹, HU Ze-xue¹, YE Hui-chun^{2,3①}, HUANG Wen-jiang^{2,3}, Erden Qimuge⁴, ZHANG Ying¹ (1. China Agricultural Museum, Beijing 100026, China; 2. International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China; 3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 4. Grassland Workstation of Xilinguole League, Inner Mongolia Autonomous Region, Xilinguole 026000, China)

Abstract: The nomadic production system of East Ujimqi Banner is an important agro-cultural heritage system in China with high ecological, economic, landscape, technological and cultural values. However, in recent years the local area has been suffering from locust disaster and the grassland is facing unprecedented threats and challenges. East Ujimqin Banner was selected as the study area, and an occurrence risk index system of grassland locust was built based on remote sensing, soil, vegetation, and topography data as well as maximum entropy model (MaxEnt), combined with grassland locust growth characteristics, to analyze the influence of different habitat factors on grassland locust occurrence. The occurrence risk areas of grassland locust in the study area were then extracted and graded. The results show that the simulated results of MaxEnt model are good with an average AUC value of 0.826. The main factors determining the occurrence risk of grassland locust are surface temperature during the incubation period, surface temperature during the growing period, and precipitation during the egg-laying period. The high-risk areas are mainly located in Gadabchi town with the area of 920 km². The results of the study are beneficial to better protect the agro-cultural heritage of nomadic production system in East Ujimqi Banner and

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 可持续发展大数据国际研究中心主任青年基金(CBAS2022DF001); 中国科学院青年创新促进会项目(2021119); 中国科学院空天信息创新研究院“未来之星”人才计划项目(2020KTYWLZX08)

① 通信作者 E-mail: yehc@aircas.ac.cn

can provide technical support for disaster risk monitoring of other grassland agro-cultural heritage as well.

Key words: agro-cultural heritage; nomadic production system of East Ujimqi Banner; remote sensing; grassland locusts; maximum entropy model

东乌珠穆沁旗(以下简称“东乌旗”)游牧生产系统以东乌旗全境为遗产地范围,以蒙古族传统“冬春-夏秋,逐水草而居”的四季游牧生产生活方式为特征,在漫长的历史进程中,形成了以牧民-牲畜(五畜)-草原(河流)为主体的游牧生产系统,孕育出辽阔淳朴的游牧文化。东乌旗游牧生产系统于 2021 年被认定为第 6 批中国重要农业文化遗产^[1],然而当地尚欠缺对农业文化遗产的价值和保护重要性的认识,农业文化遗产在促进乡村振兴、文化传承和生态保护等方面的潜在价值还未得到充分发挥^[2]。近年来由于全球变暖、超载过牧等因素的影响,蝗虫逐渐成为最频繁和最具破坏性的草原灾害之一^[3],且蝗虫种群高度集中在东乌旗游牧生产系统内。据相关研究,东乌旗 70% 以上的可利用草场遭受了蝗虫灾害,这给畜牧业带来致命性的打击^[4]。另外,由于长期存在的“重农轻草”思想,当下关于农业遗产保护方面的研究大多集中于农田方面,对草原及草原灾害的关注较少^[5]。因此,亟须明确东乌旗草原的蝗虫发生风险区域,提出相应的保护措施,保障东乌旗游牧生产系统的可持续发展。

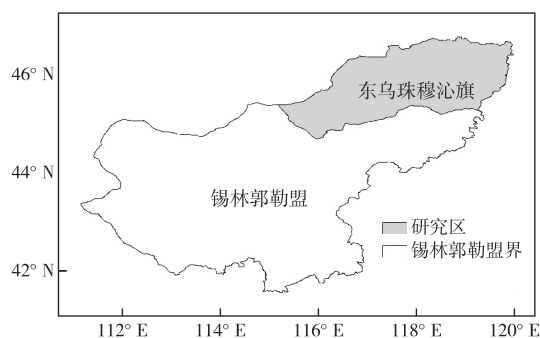
目前关于蝗虫发生风险区域提取方法主要有 2 类:一类是筛选与蝗虫生长发育密切相关的气候和土壤等要素作为指标,划分不同的生态适生区^[6-7];另一类是建立物种生态适宜性评估模型,依据蝗虫实际分布点,结合其生境因子评估物种适宜性^[8]。相比前者,后者的结果更加客观,可避免因研究尺度不同造成研究结果的差异。其中,基于最大熵原理建立的最大熵模型(MaxEnt)对已有分布样本数据的数量要求低且预测精度高,已广泛用于物种分布的预测研究^[9-10]。目前我国仅少数研究基于 MaxEnt 模型评价了蝗虫的气候和生态适宜性,这些研究在选择生境因子时多考虑气候和土壤因素^[8,11],对蝗虫生态适宜性的研究多为小尺度。因此,有必要融合气候、植被、土壤和遥感等多源数据高精度评估草原蝗虫的发生风险,为保护草原类农业文化遗产提供支撑。农业文化遗产的保护与发展离不开科技的支撑与助力,实地观测、遥感和地理信息系统技术以其成熟的监测手段为农业文化遗产系统中景观要素的监测提供了技术方法支撑^[12-15]。

笔者以东乌旗游牧生产系统为研究区,收集并整理地面调查数据,包括抽样样点的地理位置、蝗虫发生面积和密度,探究草原蝗虫关键生境因子的遥感可反演性,对蝗虫发生区的关键生境因子进行遥感反演,结合植被类型、海拔、土壤类型和蝗虫地面观测等数据,在地统计学等技术手段辅助下实现星地多源数据的信息融合,获取满足高时空分辨率的数据源;结合最大熵模型对东乌旗草原蝗虫发生风险区进行提取,确定草原蝗虫发生的关键生境因子;对东乌旗草原蝗虫发生风险分级并提取,探讨不同风险区的保护对策。研究结果有利于更好地保护东乌旗游牧生产系统农业文化遗产,是生态草原建设的重要内容之一,也可为其他草原类农业文化遗产灾害风险监测提供技术支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

东乌旗位于内蒙古正北方,东邻兴安盟、通辽市和赤峰市,南接锡林浩特市,北与蒙古国接壤,国境线长 527.6 km,属北温带大陆性气候区,冬季寒冷风大,夏季水热同期,北部为低山丘陵,南部为盆地,地处乌珠穆沁草原^[16](图 1)。



该图基于国家测绘地理信息与标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 东乌珠穆沁旗游牧生产系统地理位置

Fig. 1 Location of nomadic production system in East Ujimqi Banner

乌珠穆沁草原是亚洲东部草原亚区保存比较完整的天然草甸草原,草原生物多样性突出,植被类型多样,为畜牧业发展提供了良好的天然生态环境。通过现场调研发现,东乌旗主要蝗虫成灾种包括毛足棒角蝗(*Dasyhippus barbipes*)、宽须蚁蝗

(*Myrmeleotettix palpalis*)、鼓翅皱膝蝗(*Angaracris barabensis*)、白边痲蝗(*Bryodema luctuosum*)和亚洲小车蝗(*Oedaleus decorus asiaticus*)(表 1)。其中,亚洲小车蝗占整个蝗虫种群的 50%~60%,严重时达 90%以上。亚洲小车蝗趋光性强,其习性与飞蛾相

似,常爆发成灾^[17]。东乌旗草原蝗虫在 7—9 月产卵,冬季(1—2 月)停留在土壤中,直到翌年 4—5 月孵化,6 月生长成熟。因此,将东乌旗草原蝗虫生育期分为 4 个阶段:产卵期(7—9 月)、越冬期(1—2 月)、孵化期(4—5 月)和生长期(6 月)。

表 1 东乌旗草原主要蝗虫的生物学特性

Table 1 Biological characteristics of the main locusts in East Ujimqin Banner grassland

物种	种类	孵化时间	成虫时间	分布	食性
毛足棒角蝗	早期种	4 月中下旬	6 月中下旬	羊草和大针茅草原	禾本科牧草
宽须蚁蝗	早期种	5 月中上旬	6 月下旬—7 月下旬	典型草原	禾本科牧草、豆科、菊科等
鼓翅皱膝蝗	早期种	5 月上旬	7 月中下旬	典型草原和荒漠草原	禾本科牧草、豆科、菊科等
白边痲蝗	早期种	5 月中上旬	7 月中上旬	典型草原和荒漠草原	禾本科牧草、豆科、菊科等
亚洲小车蝗	中期种	5 月下旬	7 月中下旬	典型草原	禾本科牧草、豆科、菊科等

1.2 数据来源

研究所选取的草原类型数据来自 1:100 万中国植被图,由中国科学院植物研究所科学数据中心提供;土壤类型数据来自 1:100 万中国土壤图,由中科院南京土壤研究所提供;高程数据来自 ASTER GDEM V3 数据,该数据从 Google Earth Engine 平台获得。蝗虫生境的温度和降水数据来源于 MOD11A2 V6 的 8 d 平均陆地表面温度(land surface temperature, LST)和 Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data(CHIRPS)的 30 多 a 再分析降水数据。蝗虫生境的植被状况数据来源于 MOD13A2 V6 计算的归一化差异植被指

数(normalized difference vegetation index, NDVI),各生育期遥感数据从 Google Earth Engine 平台获得,共计 6 种生境因子,详细参数见表 2。

研究区地理信息数据来源于 2017 年国家 1:100 万基础地理信息数据,数据为矢量格式,由国家基础地理信息中心提供。东乌旗草原蝗虫发生数据由内蒙古自治区锡林郭勒盟草原工作站提供。东乌旗草原蝗虫调查在 2020 年 6—8 月进行,当草原蝗虫密度>15 只·m⁻²时,该地点被标记为蝗虫分布点。基于 2020 年草原蝗虫调查数据,通过 ArcGIS 10.3 软件对数据进行处理,具体点位分布如图 2 所示。

表 2 东乌旗草原蝗虫生境因子

Table 2 Habitat factors of grassland locusts in East Ujimqin Banner

数据类型	生境因子	缩写	分辨率	单位	数据来源
静态因子	土壤类型	ST	1:100 万		中国土壤图
	草原类型	GT	1:100 万		中国植被图
	海拔高度	Elevation	30 m	m	ASTER GDEM V3
遥感因子	地表温度	LST	1 000 m	℃	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006/
	降水	RP	0.05°	mm·d ⁻¹	https://chc.ucsb.edu/data/chirps
	植被长势	NDVI	1 000 m		https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v006/

1.3 研究方法

1.3.1 MaxEnt 模型

使用 MaxEnt 3.4.1 进行模拟,MaxEnt 模型的一般公式为

$$P_w(y|x) = \frac{1}{Z_w(x)} \exp \left[\sum_{i=1}^n w_i f_i(x, y) \right], \quad (1)$$

$$Z_w(x) = \sum_y \exp \left[\sum_{i=1}^n w_i f_i(x, y) \right]. \quad (2)$$

式(1)~(2)中, x 为输入环境变量; y 为东乌旗蝗虫发生区域的地理位置; $f_i(x, y)$ 为特征函数; w_i 为特

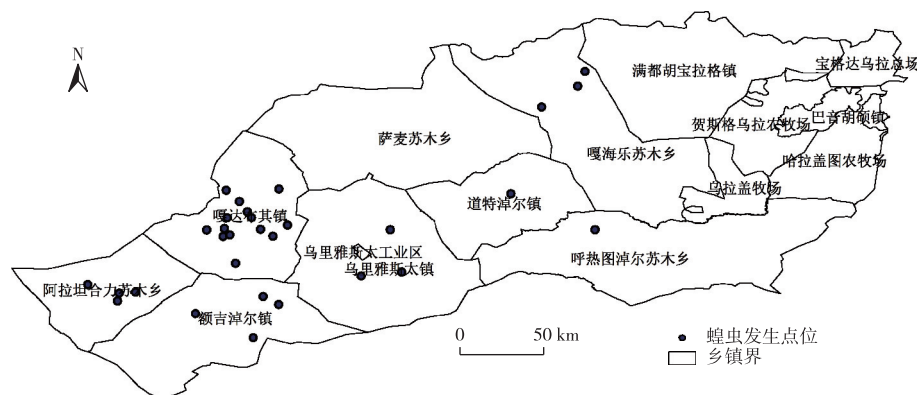
征函数的权重; n 为数据集的数量; $Z_w(x)$ 为环境变量的权重函数; $P_w(y|x)$ 为东乌旗蝗虫的适宜性^[18]。采用子抽样复制运行的方式,随机抽取 70% 的样本点作为训练数据集,其余 30% 作为测试数据集。收敛阈值被设定为 10⁻⁵,当每次迭代的对数损失低于收敛阈值时,训练将停止。预测分布所选择的输出格式为 Logistic,其值为概率(在 0~1 之间),可以解释为相对适宜性^[19]。

1.3.2 MaxEnt 验证

为了确定最佳模型,使用测试数据的接受者操

作特征曲线下的面积 (AUC) 来评估模型的质量。AUC 值在 0.5~1.0 之间, 随机模型的 AUC 值为 0.5, 完美模型的 AUC 值为 1^[8-9]。根据 AUC 值对

不同模型的表现进行分类: 0.5~0.6, 失败; >0.6~0.7, 差; >0.7~0.8, 一般; >0.8~0.9, 良好; >0.9~1.0, 极好。



该图基于国家测绘地理信息与标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作, 底图无修改。

图 2 2020 年东乌旗各乡镇草原蝗虫发生点位

Fig. 2 Location of locust occurrence in 2020 grassland in each township of East Ujimqin Banner

1.3.3 生境因子筛选

优先筛选合适的指标进行建模, 土壤类型、草原类型和海拔等静态生境因素会影响蝗虫生境的时空分布特征^[6]。研究选取的遥感因子包括地表温度、降水和植被长势, 主要影响蝗虫发生的时间变化^[20-21]。针对东乌旗草原蝗虫的不同生育期, 计算不同生育期的遥感因子。

初始模型构建过程中选择 MaxEnt 软件中的刀切法检验 (jackknife test) 来测定环境变量对模型预测的贡献大小, 以此剔除对 MaxEnt 模型预测结果贡献较小的环境变量, 对贡献较大的因子进行 Spearman 相关分析, 减小因子自相关性, 提高模型模拟精度。在此基础上重建草原蝗虫分布的最大熵模型, 并对模拟结果进行准确性评价^[11]。刀切法检验使用 MaxEnt 软件, Spearman 相关分析使用 R 语言完成。

1.3.4 发生风险分区

MaxEnt 模型输出结果为草原蝗虫在研究区域的存在概率, 数据为 ASC II 格式, 首先使用 ArcGIS 10.3 的 ArcToolbox 格式转换工具, 将该数据转为 Raster 格式, 使该结果可在 ArcGIS 10.3 中显示, 而后使用“提取分析”功能得到蝗虫在研究区的存在概率分布图^[22]。MaxEnt 软件模拟输出的结果值在 0~1 之间, 值越接近 1 表示物种越可能存在。参考 IPCC 报告关于评估可能性的划分方法^[23], 结合草原蝗虫的实际情况, 利用“Reclassify”功能, 划分分布值等级及相应分布范围, 并使用不同颜色表示, 存在概率划分标准为: <0.05 为低风险区; 0.05~

<0.33 为中等偏低风险区; 0.33~<0.66 为中等偏高风险区; ≥0.66 为高风险区。

2 结果与分析

2.1 生境因子筛选

使用 Spearman 相关系数法计算所有生境因子间的相关性, 以消除共线性对模型建模过程和结果解释的影响, 生境因子之间的相关系数绝对值大于 0.8, 则认为两者具有很强的相关性^[8]。图 3 表明, 所有生境因子两两之间相关系数均未超过 0.8, 因此选定上述 6 种环境变量来对草原蝗虫的分布进行模拟。

2.2 MaxEnt 模型精度测试

以 AUC 为评价指标, 选择具有最佳参数组合的 MaxEnt 模型来预测东乌旗草原蝗虫的适生区。红色 (训练) 线表示模型对训练数据的拟合程度, 蓝色 (测试) 线表示模型对测试数据的拟合程度, 是对模型预测能力的真正测试。每个参数组合的结果都是 10 次重复的平均值。评估结果显示, MaxEnt 模型 AUC 值为 0.826, 表明该模型很适合模拟东乌旗草原蝗虫的潜在分布 (图 4)。

2.3 东乌旗草原发生风险分布

提取结果表明, 东乌旗草原蝗虫的低风险区、中等偏低风险区、中等偏高风险区和高风险区的面积分别为 10 982、20 094、7 494 和 1 426 km², 分别占全旗面积的 32.49%、37.06%、26.70% 和 3.75%。

其中高风险区主要分布在嘎达布其镇, 面积为 920 km², 占高风险区的 64.52%; 中等偏高区主要分

布在萨麦苏木、嘎达布其镇、阿拉坦合力苏木、额吉淖尔镇, 面积为 6 533 km², 占中等偏高区的 87. 18%; 中等偏低区主要分布在额吉淖尔镇、道特淖尔镇、呼热图淖尔苏木、萨麦苏木和嘎海乐苏木, 面积为 16 023 km², 占中等偏低区的 79. 74%; 低风险区主要分布在哈拉盖图农场、贺斯格乌拉农牧场、呼热图淖尔苏木和满都胡宝拉格镇, 面积为 8 095 km², 占低风险区的 73. 71%(图 5)。

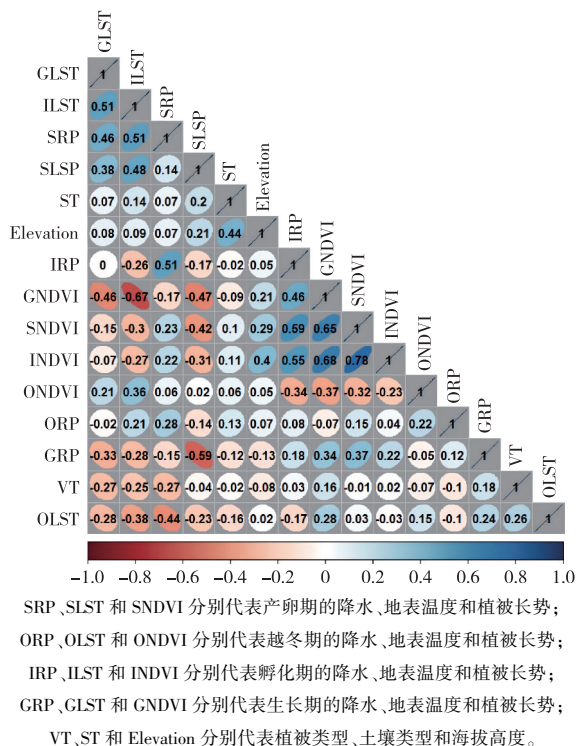
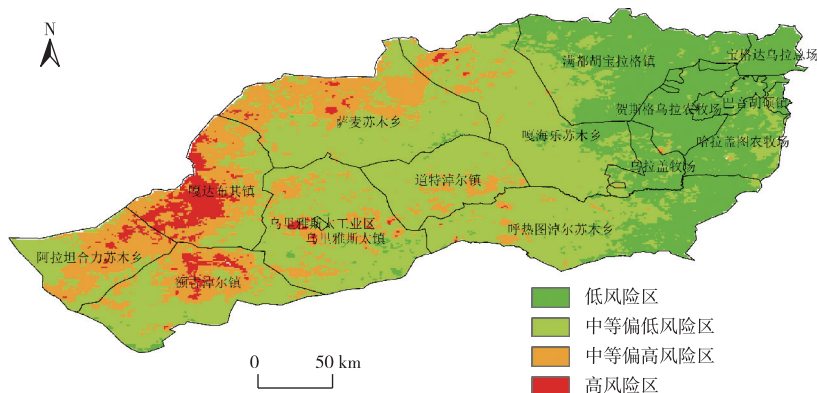


图 3 不同生境因子间的相关系数分布
Fig. 3 Distribution of correlation coefficients
between habitat factors



该图基于国家测绘地理信息与标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作, 底图无修改。

图 5 东乌旗草原蝗虫发生风险分布
Fig. 5 Risk distribution of grassland locusts in East Ujimqin Banner

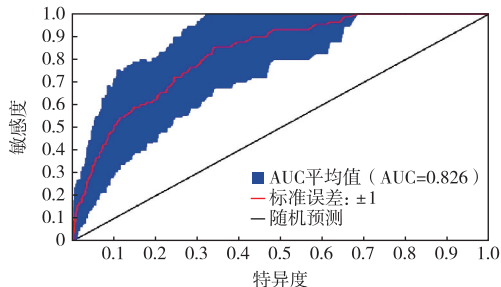


图 4 东乌旗草原蝗虫生境适宜性模型的 AUC 曲线
Fig. 4 Results of AUC curves of habitat suitability models
for locusts in East Ujimqin Banner

2. 4 影响蝗虫分布的主要生境因子

贡献率是指每个生境因子对模型的贡献, 数值越大, 该因子对模型的贡献就越大。置换重要性是指训练样本点生境因子的随机替换。减少值越高, 替换百分比越高, 模型对该变量的依赖性就越高。根据 Jackknife 方法, 各生境因子贡献率最高的是孵化期地表温度 (ILST, 23. 4%)、产卵期降水 (SRP, 23. 1%)、生长期植被长势 (GNDVI, 14. 2%)、生长期地表温度 (GLST, 10. 3%)、生长期降水 (GRP, 8. 6%) 和产卵期植被长势 (SNDVI, 4. 4%)。置换重要性最高的是孵化期地表温度 (ILST, 39. 6%)、生长期地表温度 (GLST, 22. 9%)、生长期降水 (GRP, 11. 2%)、孵化期降水 (IRP, 7. 5%)、孵化期植被长势 (INDVI, 6. 7%) 和产卵期植被长势 (SNDVI, 4. 0%)(表 3)。综合考虑到贡献率和置换重要性, ILST、GLST、SRP、GRP、GNDVI 和 INDVI 这 6 个生境因子被选为影响蝗虫分布的主要因素。

表 3 影响东乌旗蝗虫分布的环境变量贡献百分率和置换重要性

Table 3 Percentage contribution and replacement importance of environmental variables affecting the distribution of locusts in East Ujimqin Banner

变量	贡献率/%	置换重要性/%
孵化期地表温度 (ILST)	23.4	39.6
产卵期降水 (SRP)	23.1	1.4
生长期植被长势 (GNDVI)	14.2	0.7
生长期地表温度 (GLST)	10.3	22.9
生长期降水 (GRP)	8.6	11.2
孵化期植被长势 (INDVI)	4.4	6.7
产卵期植被长势 (SNDVI)	4.3	4.0
海拔高度 (Elevation)	4.0	1.3
越冬期降水 (ORP)	3.0	1.0
孵化期降水 (IRP)	1.9	7.5
越冬期地表温度 (OLST)	1.0	0.3
产卵期地表温度 (SLST)	0.9	0.2
植被类型 (VT)	0.5	2.1
土壤类型 (ST)	0.3	1.1
越冬期植被长势 (ONDVI)	0.1	0

2.5 主要生境因子响应分析

图 6 显示了 6 个主要生境因子的响应曲线。在孵化期和生长期,蝗虫发生风险随着地表温度的增加而增加。这是因为孵化期和生长期是蝗虫生长最为迅速的阶段,此期气温每升高 1℃,蝗虫的生理生化速率约提高 9.8%,采食量也有明显增加^[20]。产卵期蝗虫发生风险与降水呈负相关,生长期降水在 3.0 mm·d⁻¹时最适合蝗虫生长,超过这一范围蝗虫发生风险与降水呈负相关,可能是因为蝗虫卵

长期浸泡在温暖潮湿的土壤中会发霉,从而降低蝗虫的孵化率^[24]。孵化期和生长期蝗虫发生风险随植被指数的增加而减少,可能是因为当植被指数过高时,植被覆盖度过大,地面温度较低,蝗虫取食、活动受到限制^[25]。

3 讨论

草原蝗虫的爆发成灾对东乌旗游牧生产系统农业文化遗产的危害主要体现在 3 个方面:(1)生态方面,东乌旗草原具有遗传资源与生物多样性、水土保持等多种生态服务功能。草原蝗虫灾害使草原生态环境发生不可逆转的恶化,对生态造成巨大破坏。近年草原蝗虫灾害此起彼伏,致使部分地区寸草不留,个别地方甚至出现了“虫进人退”的现象,严重破坏当地的生态环境。(2)经济方面,草原蝗虫持续大面积发生,近 5 a 东乌旗年均蝗虫危害面积达 1 181.33 km²,牧草损失与大面积防控给农牧业生产带来严重的经济损失。加之财政补助和地方自筹能力有限,使得草原虫害年均防治比例不高,害虫残留基数和越冬基数较高,为翌年发生留下隐患,从而造成恶性循环。(3)文化方面,东乌旗草原文化是中华文化的杰出代表,也是草原丝绸之路的重要枢纽之一。近年来为了追求短期经济效益,草原放牧强度较大,草原蝗虫频发加速了草地的退化沙化,从而破坏了“人与自然和谐相处”的核心理念。

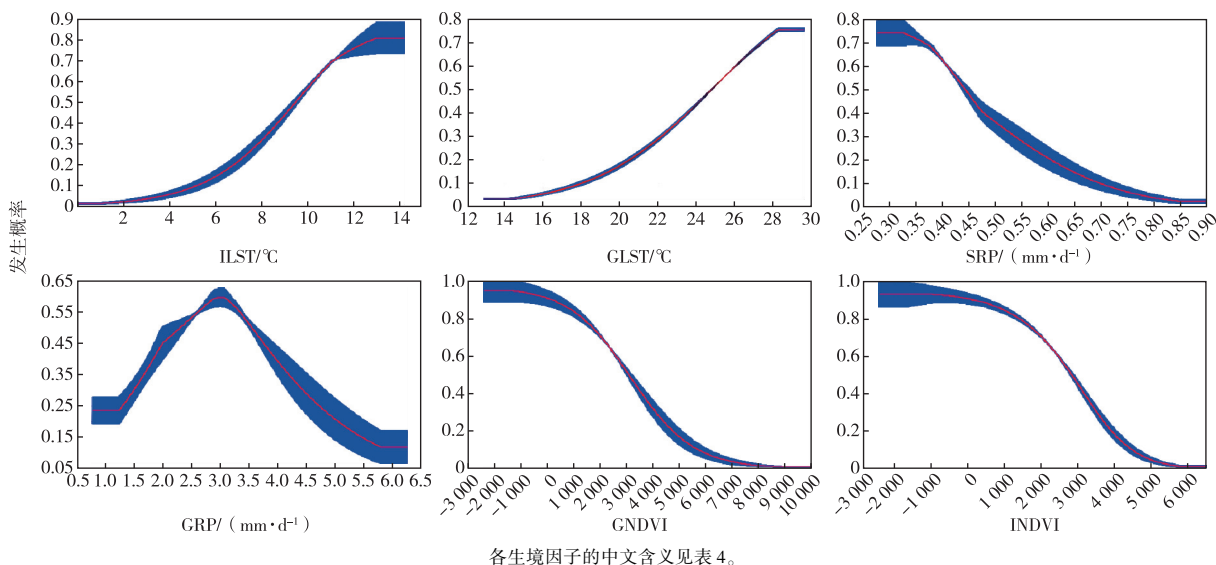


图 6 模型预测中的主要生境因子的响应曲线
Fig. 6 Response curves of major habitat factors in model predictions

该研究综合土壤、植被和遥感数据, 利用 MaxEnt 模型预测东乌旗草原蝗虫的发生风险。基于以上研究, 建议采取以下措施, 以实现东乌珠穆沁旗游牧生产系统的动态保护。

(1) 由于草原地区经济相对落后, 近年来政府追求经济增长时容易造成生态、文化和社会价值的缺失, 而且对草原农业文化遗产的保护规划较缺乏^[26]。因此, 在遗产保护中政府应发挥主导作用, 合理控制放牧强度, 尤其是在草原蝗虫高风险区如嘎达布其镇, 需减少由放牧过度导致的草原退化。

(2) 由于研究区地广人稀, 基层保护人员紧缺, 在遥感等数据获取处理方面存在技术短板, 因此应建立基层与科技支撑部门的快速对接通道, 通过遥感数据对草原蝗虫关键生境因子实时监测, 重点关注草原蝗虫孵化期和生长期的温度变化, 在温度较高的年份加强防控力度。

(3) 由于农业文化遗产本身的复杂性, 遥感与 GIS 技术在农业文化遗产研究中的应用是一项长期复杂的工作, 需各相关行业学者的积极参与和共同努力, 以充分发挥遥感与 GIS 技术在农业文化遗产开发、管理、保护、宣传和创新中的优势和使用价值^[15]。

(4) 与其他文化遗产类资源相比, 农业文化遗产更强调系统性、动态性以及遗产地社区的主体性。牧民是遗产地草原文化、知识与技术体系、生物多样性、民俗与饮食文化等的创造者和传承者, 随着城镇化的发展, 一些地区“空心化”严重, 存在文化不自信、发展前景不明朗等问题, 面对这些问题, 可以通过欣赏式探询这一手段将问题研究转变为关注组织的积极方面, 更大程度上提高牧民保护农业文化遗产的积极性^[27]。

该研究所选取的生境因子及研究方法具有一定的普适性, 研究结果有助于当地及其他草原地区植保部门提高防控效率, 对于减少农药使用量、蝗虫风险发生强度和生态保护方面有一定的指导意义。但是由于数据的可得性和问题的复杂性, 该研究尚有如下不足, 需要进一步研究: (1) 研究只是利用短时序的蝗虫发生数据提取了适生区, 未进行长时间序列的监测分析。(2) 对影响因素及风险因子的选择是有限的, 没有考虑鼠害、放牧强度和防治情况等因素。(3) 关于草原蝗虫对农业文化遗产的危害关系部分缺乏定量分析, 需进一步收集数据, 完善研究方法, 通过多因素综合分析, 明确草原蝗虫和其他因素与农业文化遗产之间的相互作用机制。

4 结论

(1) MaxEnt 模拟结果良好, 平均 AUC 值为 0.826。

(2) 决定草原蝗虫发生风险的主要影响因子为孵化期地表温度、生长期地表温度和产卵期降水。

(3) 在孵化期和生长期, 蝗虫发生风险随着地表温度的增加而增加。在产卵期, 蝗虫发生风险与降水呈负相关, 生长期降水在 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时最适宜蝗虫生长, 超过这一范围蝗虫发生风险与降水呈负相关。在孵化期和生长期, 蝗虫发生风险随植被指数的增加而减少。

(4) 嘎达布其镇草原蝗虫发生风险等级较高, 需密切关注该地蝗虫发育情况, 做到早防早控。

参考文献:

- [1] 程天赐, 周涵维. 焕发优秀农耕文化新活力: 写在第六批中国重要农业文化遗产公布之际 [N/OL]. 农民日报, 2021-11-23 (1). http://journal.cmnews.net/ncpsczk/2021n/d23q/gz/945350_20220303063248.html.
- [2] 闵庆文. 我国少数民族地区的重要农业文化遗产及其发掘与保护 [J]. 原生态民族文化学刊, 2020, 12(3): 116-127. [MIN Qing-wen. Exploration and Conservation of Important Agricultural Heritage Systems in Minority Areas of China [J]. Journal of Original Ecological National Culture, 2020, 12(3): 116-127.]
- [3] LE GALL M, OVERSON R, CEASE A. A Global Review on Locusts (*Orthoptera acrididae*) and Their Interactions with Livestock Grazing Practices [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2019, 7: 263.
- [4] 其乐木格. 干旱牧区灾害风险及生态保护长效机制研究: 以锡林郭勒草原牧区东乌珠穆沁旗为例 [J]. 现代经济信息, 2014 (17): 455-462. [Qilemuge. Study on Disaster Risk and Long-Term Mechanism of Ecological Protection in Arid Pastoral Area: A Case Study of Dongwuzhumuqin Banner in Xilingol Grassland Pastoral Area [J]. Modern Economic Information, 2014 (17): 455-462.]
- [5] 焦雯璐, 崔文超, 闵庆文, 等. 农业文化遗产及其保护研究综述 [J]. 资源科学, 2021, 43(4): 823-837. [JIAO Wen-jun, CUI Wen-chao, MIN Qing-wen, et al. A Review of Research on Agricultural Heritage Systems and Their Conservation [J]. Resources Science, 2021, 43(4): 823-837.]
- [6] 杜桂林. 草原蝗虫监测预警技术研究与应用 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014. [DU Gui-lin. Research and Application in Monitoring and Warning Technology on Rangeland Grasshoppers [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.]
- [7] KIMATHI E, TONNANG H E Z, SUBRAMANIAN S, et al. Prediction of Breeding Regions for the Desert Locust *Schistocerca gregaria* in East Africa [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 11937.
- [8] 王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测 [J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8556-8566. [WANG Ru-lin, LI Qing, FENG Chuan-hong, et al. Predicting Potential Eco-

- logical Distribution of *Locusta migratoria* Tibetensis in China Using MaxEnt Ecological Niche Modeling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8556–8566.]
- [9] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231–259.
- [10] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 等. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势 [J]. *地球科学进展*, 2020, 35(12): 1292–1305. [GUO Yan-long, ZHAO Ze-fang, QIAO Hui-jie, *et al.* Challenges and Development Trend of Species Distribution Model [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(12): 1292–1305.]
- [11] 郭安红, 王建林, 王纯枝, 等. 内蒙古草原蝗虫发生发展气象适宜度指数构建方法 [J]. *气象科技*, 2009, 37(1): 42–47. [GUO An-hong, WANG Jian-lin, WANG Chun-zhi, *et al.* Meteorological Suitability Index of Grasshopper Growth and Development in Inner Mongolia [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2009, 37(1): 42–47.]
- [12] SHI Y, HUANG W J, DONG Y Y, *et al.* The Influence of Landscape's Dynamics on the Oriental Migratory Locust Habitat Change Based on the Time-Series Satellite Data [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 218: 280–290.
- [13] 饶滴滴, 刘某承, 闵庆文. 农业文化遗产系统景观要素分析的思考 [J]. *自然与文化遗产研究*, 2019, 4(11): 53–56. [RAO Di-di, LIU Mou-cheng, MIN Qing-wen. Thoughts on the Analysis of Landscape Elements in Agricultural Heritage Systems [J]. *Study on Natural and Cultural Heritage*, 2019, 4(11): 53–56.]
- [14] 刘洁. 基于遥感和 GIS 的世界文化遗产风险综合研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. [LIU J. Integrated Research on Risk Assessment of World Culture Heritage using Remote Sensing and GIS [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.]
- [15] 胡最, 闵庆文. 构建农业文化遗产数字化保护的概念框架探讨 [J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(9): 1632–1645. [HU Zui, MIN Qing-wen. A Research on the Conceptual Framework for Digitalized Conservation of Agricultural Heritage System [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(9): 1632–1645.]
- [16] 宋梦龙, 颜涛, 张海龙, 等. 基于 Landsat 数据的东乌珠穆沁旗生态演变分析 [J]. *内蒙古科技与经济*, 2021(11): 58–61. [SONG Meng-long, YAN Tao, ZHANG Hai-long, *et al.* Analysis of Ecological Evolution in Dongwuzhumuqin Banner Based on Landsat Data [J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2021(11): 58–61.]
- [17] 周建国. 内蒙古锡林郭勒盟草原蝗灾防治研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007. [ZHOU Jian-guo. Study on the Control and Prevention for the Locust Disasters in Xilinguole District in Inner Mongolia [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.]
- [18] NING S Y, WEI J F, FENG J N. Predicting the Current Potential and Future World Wide Distribution of the Onion Maggot, *Delia Antiqua* Using Maximum Entropy Ecological Niche Modeling [J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171190.
- [19] HUANG Y R, DONG Y Y, HUANG W J, *et al.* Overwintering Distribution of Fall Armyworm (*Spodoptera Frugiperda*) in Yunnan, China, and Influencing Environmental Factors [J]. *Insects*, 2020, 11(11): 805.
- [20] 倪绍祥. 环青海湖地区草地蝗虫遥感监测与预测 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 49. [NI Shao-xiang. Remote Sensing Monitoring and Prediction of Grasshoppers around Qinghai Lake [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2002: 49.]
- [21] 张显峰, 饶俊峰, 潘一凡. 基于遥感的新疆蝗虫灾害渐进式修正预测方法 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 202–208. [ZHANG Xian-feng, RAO Jun-feng, PAN Yi-fan. Progressive Approach for Risk Prediction of Rangeland Locust Hazard in Xinjiang Based on Remotely Sensed Data [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 202–208.]
- [22] 应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 等. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(4): 453–461. [YING Ling-xiao, LIU Ye, CHEN Shao-tian, *et al.* Simulation of the Potential Range of Pistacia Weinmannifolia in Southwest China with Climate Change Based on the Maximum-Entropy (Maxent) Model [J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(4): 453–461.]
- [23] 段居琦, 周广胜. 中国水稻潜在分布及其气候特征 [J]. *生态学报*, 2011, 31(22): 6659–6668. [DUAN Ju-qi, ZHOU Guang-sheng. Potential Distribution of Rice in China and Its Climate Characteristics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22): 6659–6668.]
- [24] 白月明, 刘玲, 高素华. 草原蝗虫气象监测预测与防御对策研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2013: 68. [BAI Yue-ming, LIU Ling, GAO Su-hua. Study on Meteorological Monitoring, Prediction and Defense Countermeasures of Grasshopper in Grassland [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013: 68.]
- [25] 杜桂林, 赵海龙, 涂雄兵, 等. 亚洲小车蝗在内蒙古草原宜生区划分研究 [J]. *植物保护*, 2018, 44(6): 24–31. [DU Gui-lin, ZHAO Hai-long, TU Xiong-bing, *et al.* Division of the Inhabitable Areas for *Oedaleus decorus* Asiaticus in Inner Mongolia [J]. *Plant Protection*, 2018, 44(6): 24–31.]
- [26] 闵庆文, 张碧天. 中国的重要农业文化遗产保护与发展研究进展 [J]. *农学学报*, 2018, 8(1): 221–228. [MIN Qing-wen, ZHANG Bi-tian. Review on Conservation and Development Study of Important Agricultural Heritage System in China [J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 221–228.]
- [27] 姚灿灿, 王英, 孙业红, 等. 欣赏式探询方法及在农业文化遗产研究中的应用前景 [J]. *古今农业*, 2021(4): 78–87, 14. [YAO Can-can, WANG Ying, SUN Ye-hong, *et al.* Review of Appreciative Inquiry and Its Application in Agricultural Heritage Sites [J]. *Ancient and Modern Agriculture*, 2021(4): 78–87, 14.]

作者简介: 孙忠祥 (1991—), 男, 安徽亳州人, 助理研究员, 博士, 研究方向为农业文化遗产与农耕文化. E-mail: sunzx@aircas.ac.cn

(责任编辑: 陈 昕)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0125

马伟波, 赵立君, 王楠, 等. 长三角城市群减污降碳驱动因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1273–1281.

MA Wei-bo, ZHAO Li-jun, WANG Nan, et al. Study on Driving Factors of Pollution and Carbon Reduction in the Yangtze River Delta Urban Agglomerations[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1273–1281.

长三角城市群减污降碳驱动因素研究

马伟波, 赵立君, 王楠, 张龙江, 李海东^① (生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 城市发展的同时也面临着应对气候变化、生态环境保护和经济发展的多重压力, 探究城市群尺度减污降碳的时空驱动特征及其演变特征, 有助于更好地理解城市化与环境的互动关系。以长三角城市群为研究对象, 基于碳排放水平和污染物排放数据构建了减污降碳强度指标, 并通过时空地理加权回归 (GTWR) 方法和随机森林 (RF) 方法分析经济发展、产业结构、土地利用结构、人口以及气候变化对减污降碳强度指标的时空驱动特征及驱动因素重要性变迁特征。结果表明: 2003—2017 年, 长三角城市群整体减污降碳强度呈下降趋势, 27 个城市平均减污降碳强度由 2003 年的 0.23 下降到 2017 年的 0.05; 其中, 滁州 2003—2017 年的平均减污降碳强度仍处于较高水平的梯队, 且其减污降碳强度变幅为 18.62%。在考虑时间效应后, GTWR 模型 R^2 与调整 R^2 均高于 0.96, 与 GWR 模型相比, 拟合精度和优度提升较大; 上海、苏州和浙江 9 市受园林绿地面积的负向驱动, 导致减污降碳强度下降。能源消费总量在 2003—2007、2008—2012 和 2013—2017 年 3 个时期的重要性排名均为第 1, 同时园林绿地面积的重要性排名从 2003—2007 年的第 5 逐渐上升到 2013—2017 年的第 2, 人口密度和人口总量的重要性排名虽然靠后, 但总体上重要性呈上升趋势。总体而言, GTWR 模型对减污降碳强度具有较好的时空拟合能力, 减污降碳强度指标时空分异特征显著。建议长三角城市群提升能源利用效率, 大力发展第三产业, 优化土地利用结构。

关键词: 减污降碳; 时空效应; 驱动机制; 长三角城市群

中图分类号: X24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1273-09

Study on Driving Factors of Pollution and Carbon Reduction in the Yangtze River Delta Urban Agglomerations.

MA Wei-bo, ZHAO Li-jun, WANG Nan, ZHANG Long-jiang, LI Hai-dong^① (Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: Urban development is simultaneously facing multiple pressures of climate change, ecological protection, and economic development. Therefore, exploring the characteristics of spatial and temporal driving factors for pollution and carbon reduction at the urban agglomeration scale and their evolution characteristics will help us develop a better understanding of the interaction between urbanization and the environment. Taking the Yangtze River Delta Urban Agglomeration (YRDUA) as the research object, the Index of Pollution and Carbon Reduction (IPCR) is constructed on the basis of carbon emission levels and pollutant emission data. Moreover, the spatial and temporal driving characteristics of economic development, industrial structure, land use structure, population, and climate change on the IPCR and the changes in the importance of the driving factors are analyzed by the Geographically and Temporally Weighted Regression (GTWR) and Random Forest (RF) methods. The results show that: from 2003 to 2017, the overall IPCR of the YRDUA showed a downward trend, with the average IPCR of the 27 cities decreasing from 0.23 in 2003 to 0.05 in 2017; during this period, Chuzhou was still in the higher echelon of the average IPCR, with the amplitude of variation 18.62%. Considering the time effect, the adjusted R^2 and R^2 of the GTWR model are higher than 0.96, which improves the fitting accuracy and superiority compared with the GWR model. Shanghai, Suzhou, and nine cities in Zhejiang province are negatively driven by the size of landscaped green areas, which leads to the IPCR decrease. Total energy consumption ranks 1st in importance in three periods, 2003–2007, 2008–2012, and 2013–2017, while landscaped green area gradually increased in importance from the 5th in 2003–2007 to the 2nd in 2013–2017. Although population density and total population ranked lower, the

收稿日期: 2022-02-21

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (GYZX220308, GYZX210101)

① 通信作者 E-mail: lihd2020@163.com

overall importance registered an upward trend. Generally speaking, the GTWR model has an excellent spatial and temporal fitting ability for the IPCR, and the spatial and temporal effects of the IPCR are significant. We suggest that the YRDUA to improve energy utilization efficiency, increase efforts on developing tertiary industries and optimize land use structure.

Key words: pollution and carbon reduction; spatial and temporal effect; driving mechanism; Yangtze River Delta Urban Agglomeration

随着城市化、工业化不断加速,中国城市发展面临气候变化、生态环境保护和经济增长的多重压力。中国城市地区排放的 CO_2 约占全国排放总量的 80%, 其主要来源于城市经济、城市建筑和城市交通等领域的人类活动^[1]。同时,城市也是各类污染物排放相对集中的地区,中国城市人口占比已达 63.98%^[2],城市环境空气质量及其对健康的影响越来越受到关注^[3]。有研究表明,温室气体与环境污染排放具有同根、同源、同过程的特点,如煤炭等化石燃料在燃烧过程中会排放颗粒物、 SO_2 等空气污染物,也会排放 CO_2 、黑碳等温室气体^[4-5]。因此,利用该特点,采取相应的手段同时减少污染物排放(简称“减污”)和降低温室气体排放(简称“降碳”),是一种高效环境管理策略。然而,该策略在城市尺度的应用效果缺乏有效的评价手段。探究城市群尺度减污降碳的时空驱动及其演变特征,有助于更好地理解城市化与环境的互动关系,可服务于城市可持续发展。

研究表明,城市的空间、人口和经济聚集特征对碳排放有确定性的影响^[5],而城市化与碳排放之间存在倒“U”型曲线,且城市空间集聚在一定程度上有助于碳减排^[6]。整体上,人口、地区生产总值(GDP)和归一化植被指数(NDVI)对全国城市 CO_2 排放量均为正驱动,但温度和降水量对其有负面影响^[7];在污染物排放驱动方面,同样表现出稳定的空间集聚特征,城市化地区各项特征与污染物排放水平显著相关。如 $\text{PM}_{2.5}$ 与土地利用和经济产业结构均有显著的联系,但不同经济发展阶段的特征存在差异^[8]。尽管减污降碳协同效应的量化方法可以提供更为有效的减污降碳技术路径^[2,9],但是减污降碳的驱动剖析案例仍然较少,对其驱动效应的内在机制分析不足^[10-12]。当前,减污降碳已成为新时期污染防治和环境保护的核心思想^[13],减污降碳协同增效成为我国“十四五”时期深入打好污染防治攻坚战的总抓手。然而,现阶段城市群水平的减污降碳缺乏测度指标,无法支撑区域减污降碳一体谋划、部署和考核。

为探究减污降碳评估方法,并剖析其驱动机制,笔者以长三角城市群(Yangtze River Delta Urban

Agglomeration, YRDUA)为研究对象,基于碳排放水平和污染物排放数据构建减污降碳强度指标,并通过时空地理加权回归(geographically and temporally weighted regression, GTWR)和随机森林(random Forest, RF)方法分析经济发展、产业结构、土地利用结构、人口以及气候变化对减污降碳强度指标的时空驱动特征及驱动因素的重要性变迁特征,以期为全国城市水平的减污降碳政策制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长三角城市群位于长江入海之前的冲积平原,是长三角一体化发展中心区,具有辐射带动长三角地区高质量发展的重要功能。根据《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》《长江三角洲城市群发展规划》^[14-15],长三角城市群包括:上海,江苏省的南京、无锡、常州、苏州、南通、盐城、扬州、镇江、泰州,浙江省的杭州、宁波、温州、嘉兴、湖州、绍兴、金华、舟山、台州,安徽省的合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城,共 27 市,面积为 $22.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。据测算,2017 年长三角城市群 CO_2 排放量达 $1.22 \times 10^{10} \text{ t}$;其中以上海排放量最高,为 $1.93 \times 10^9 \text{ t}$, 占长三角总排放量的 15.74%(图 1)^[16]。

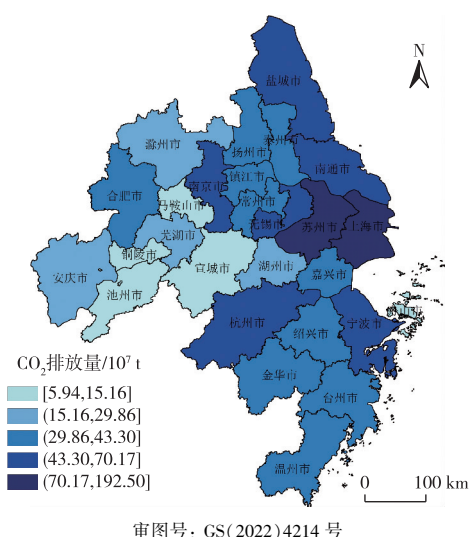


图 1 2017 年长三角城市群 CO_2 排放空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of CO_2 emission of the YRDUA in 2017

1.2 数据来源

1.2.1 减污降碳强度指标

为表征城市减污降碳整体效能,研究构建减污降碳强度指标 (Index of pollution and carbon reduction, IPCR, R_{IPC}),将多种污染物排放效率与温室气体排放效率纳入到 1 个指标,计算公式为

$$R_{IPC} = \sum_{i=1}^4 E_i \times q_i。$$

(1)

式(1)中, R_{IPC} 为城市减污降碳强度指标,其取值范围为 0~1,越接近 0 则表示减污降碳的效果越显著,经济发展的清洁低碳程度更高; E_i 为该城市减污降碳细分项指标,细分项指标采用 0~1 值的归一化方法以消除极值影响,同时细分项指标可随研究区特征条件而做出调整; q_i 为细分项指标对应的权重,权重和为 1,权重确定方法为专家打分法。

综合考虑数据的可获取性以及减污降碳各细分领域代表性指标,细分项指标选择工业废水排放

效率、工业二氧化硫排放效率、工业烟(粉)排放效率以及二氧化碳排放强度(表 1)。考虑到当前减污和降碳工作重要性均非常突出,专家建议对两者权重均设为 0.5;细分项指标目前仅考虑长三角城市群水污染和大气污染,由于颗粒物对空气环境质量的影响受外来输入影响,因此专家建议将工业烟(粉)排放效率指标权重设置为 0.12,与工业废水排放效率相同,同时将工业二氧化硫排放效率权重设置为 0.14。工业废水排放效率、工业二氧化硫排放效率、工业烟(粉)排放效率细分项指标数据主要来源于《中国城市统计年鉴(2004—2018)》;二氧化碳排放强度细分项指标中碳排放数据来源于中国县级二氧化碳排放量数据集^[16],地级市总排放量通过下辖县(区、市)排放量求和得到,经检验该数据集对 CO₂排放的拟合精度达 $R^2 = 0.998$ 。GDP 数据来源于《中国城市统计年鉴(2004—2018)》。

表 1 减污降碳指标及数据来源

Table 1 Index of pollution and carbon reduction (IPCR) and data sources

指标类型	细分项指标	计算方法	单位	权重	数据来源
减污指标	工业废水排放效率	工业废水排放量/GDP	t·万元 ⁻¹	0.12	《中国城市统计年鉴(2004—2018)》
	工业二氧化硫排放效率	工业二氧化硫排放量/GDP	t·万元 ⁻¹	0.14	《中国城市统计年鉴(2004—2018)》
	工业烟(粉)排放效率	工业烟(粉)排放量/GDP	t·万元 ⁻¹	0.12	《中国城市统计年鉴(2004—2018)》
降碳指标	二氧化碳排放强度	二氧化碳排放量/GDP	t·万元 ⁻¹	0.50	文献[25]

1.1.2 驱动因素

为揭示长三角城市群减污降碳强度的时空驱动特征,该研究选择经济发展水平、地区产业结构、人口、土地利用结构、能源消费水平和气候变化 6 个方面共 11 项具体指标作为解释变量(表 2)。经济发展水平选择 GDP 和人均 GDP 表征(均为不变价单位),地区产业结构用第二产业增加值占 GDP 比例和第三产业增加值占 GDP 比例表征,人口选择人

口密度和常住人口数量表征,土地利用结构用建设用地面积和园林绿地面积表征,能源消费水平选择能源消费总量表征,气候变化影响采用年均气温和年降水量表征。其中经济发展水平、地区产业结构、人口、土地利用结构的具体指标数据来源于《中国城市统计年鉴(2004—2018)》,能源消费总量通过将能源消费相关指标折算为吨标准煤数据求和得到,气候变化数据来源于城市气象观测站数据。

表 2 减污降碳驱动力因素及数据来源

Table 2 Driving factors and the data sources of IPCR

指标类型	具体指标	数据来源
经济发展水平	GDP、人均 GDP	《中国城市统计年鉴(2004—2018)》
地区产业结构	第二产业增加值占 GDP 比例、第三产业增加值占 GDP 比例	《中国城市统计年鉴(2004—2018)》
人口	人口密度、常住人口数量	《中国城市统计年鉴(2004—2018)》
土地利用结构	建设用地面积、园林绿地面积	《中国城市统计年鉴(2004—2018)》
能源消费水平	能源消费总量	《中国城市统计年鉴(2004—2018)》
气候变化	年均气温、年降水量	气象观测站数据

1.3 研究方法

回归分析被广泛应用于驱动分析研究,但传统的多元线性回归不能比较影响因素的重要性,该研

究拟采用 RF 以克服传统方法的不足^[17]。同时,与局部空间回归相比,全局空间回归假设所有参数在空间中都是平稳的或结构稳定的,这并不符合现实

情况^[18]。因此,该研究拟采用 GTWR 方法,其允许不同影响因素的回归系数变化,并对每个研究单元进行显著性检验^[18]。

1.3.1 GTWR 模型

GTWR 在地理加权回归的基础上引入时间因子,既解决了截面数据样本数量有限的问题,还考虑了时间与空间的非平稳性,能有效估计因子参数。模型^[18-19]为

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, v_i, t_i) X_{it} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式(2)中, (μ_i, v_i, t_i) 为长三角城市群第 i 个城市的时空坐标, μ_i, v_i, t_i 分别为第 i 个城市的经度、纬度和时间; $\beta_0(\mu_i, v_i, t_i)$ 为第 i 个城市的回归常数,即模型中的常数项; ε_i 为残差; $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 为第 i 个城市的第 k 个回归参数,估计方法为

$$\hat{\beta}(\mu_i, v_i, t_i) = [X^T W(\mu_i, v_i, t_i) X]^{-1} X^T W(\mu_i, v_i, t_i) Y \quad (3)$$

式(3)中, $\hat{\beta}(\mu_i, v_i, t_i)$ 为 $\beta_k(\mu_i, v_i, t_i)$ 的估计值; X 为自变量构成的矩阵; X^T 为矩阵 X 的转置; Y 为时间尺度下长三角城市群减污降碳强度测度指标矩阵值; $W(\mu_i, v_i, t_i)$ 为时空权重矩阵。选择高斯距离函数,利用 bi-square 空间权重函数得到时空权重矩阵,样本 i 和样本 j 之间的时空距离 d_{ij} 为

$$d_{ij} = \sqrt{\delta [(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2 + \mu(t_i - t_j)^2]} \quad (4)$$

式(4)中, δ 为带宽。该研究减污降碳强度 GTWR 模型的实现主要基于 ArcGIS 10.5 软件,采用 HUANG 等^[18]制作的 GTWR 插件,带宽采用 AICc 优化设置。

1.3.2 RF 方法

RF 是一种集成学习方法,它由使用数据集的自举(bootstrap)样本独立构造的树组成^[20],该方法对过拟合具有鲁棒性,且能充分探测变量对被解释变量的驱动贡献程度^[21]。训练一个 RF 的本质是训练多个分类与回归树(classification and regression trees, CART)。CART 是一个二叉树模型,其核心是切割变量和切割点的选择^[22]。在 RF 中,单棵 CART 首先遍历一部分变量和变量数据,然后根据切割后节点的不纯度,确定最佳切割变量和切割点,综合所有树的结果得到最终模型。节点不纯度的计算公式为

$$G(x, y) = \frac{1}{N_s} \left[\sum_{y_i \in X_{\text{left}}} (y_i - \bar{y}_{\text{left}})^2 + \sum_{y_i \in X_{\text{right}}} (y_i - \bar{y}_{\text{right}})^2 \right] \quad (5)$$

式(5)中, x 为一个分切变量; y 为 x 的分切值; N_s 为所有训练样本的数量; X_{left} 为由 $y_i (y_i < y)$ 组成的数据集; X_{right} 为由 $y_i (y_i > y)$ 组成的数据集; $\bar{y}_{\text{left}}$ 和 $\bar{y}_{\text{right}}$ 分别为 X_{left} 和 X_{right} 的平均值。该方法虽然降低了单个 CART 在其对应的训练数据集上的表现,但能够降低所构建的不同树之间的相关性,从而降低多个决策树平均后减污降碳模型的最终方差。

同时,通过 RF 可定量测度解释变量的重要性,因此可通过不同时间点变量重要性的变迁解释变量的时间效应,提高长三角减污降碳模型时空效应的解释能力。RF 通过袋外误差(out-of-bag error, OOB)样本来估计变量的重要性,具体公式为

$$p_{\text{IM}}(\text{Var}_i) = \frac{\sum_{j=1}^n (e_{\text{B2},ij} - e_{\text{B1},ij})}{n} \quad (6)$$

式(6)中, $p_{\text{IM}}(\text{Var}_i)$ 为变量 i 的重要性值; $e_{\text{B1},ij}$ 为根据 CART_{*j*} 中变量 i 出袋数据计算的误差; $e_{\text{B2},ij}$ 为根据 CART_{*j*} 中变量 i 出袋数据加上噪声干扰计算的误差; n 为 CART 数量。该研究中,RF 回归模型采用 R 软件包 randomforest 和 R 编程语言实现^[20],其中 80% 的数据集被随机选为训练集,其余 20% 数据集被选为测试集。该研究通过设置固定随机值,保证 RF 结果可复现,同时采用 10 次结果的均值作为最终模型精度评价结果。

2 结果与分析

2.1 长三角城市群减污降碳强度时空特征

2.1.1 时间变化特征

由图 2 可见,2003—2017 年,长三角城市群整体减污降碳强度呈下降趋势,表明长三角城市群整体呈清洁发展趋势。27 个城市平均减污降碳强度由 2003 年的 0.23 下降到 2017 年的 0.05,但江苏 9 市、浙江 9 市和安徽 8 市减污降碳强度的最低点是 2016 年,分别为 0.04、0.03 和 0.07。从减污降碳强度下降绝对值来看,安徽 8 市最大(0.26),上海次之(0.17),浙江 9 市下降幅度最小(0.13)。从减污降碳强度变化率绝对值来看,安徽 8 市仍然最大,为 0.019 9;浙江 9 市最小,为 0.010 7。2003 年,浙江 9 市和上海减污降碳强度总体接近,但浙江 9 市在 2005 年小幅上升之后才保持下降。整体来看,2003—2017 年长三角城市群减污降碳效果非常显著。

2.1.2 空间变化特征

图 3 展示了 27 个城市减污降碳强度的时空分布特征。虽然 2003—2017 年每个城市整体上减污

降碳强度均呈下降趋势,但在重要节点年份可以观测不同城市减污降碳强度水平的分异特征。2003—2017 年,上海、无锡、温州和合肥的减污降碳强度总体上均保持较好的下降趋势,其中上海和杭州在 2003 年减污降碳强度处于中等偏高水平,之后的 2008、2013 和 2017 年均保持较好的下降势头。滁州在 2003 年减污降碳强度并不高,但在 2008、2013 和 2017 年的横向比较中,其减污降碳强度始终处于同时期较高水平;滁州在 2003—2017 年的平均减污降碳强度仍处于较高水平的梯队中,且其减污降碳强度变幅为 18.62%。与滁州情况类似的还有宣城、池州和马鞍山。从 2003—2017 年减污降碳强度的变化幅度来看,上海、杭州、合肥、南京和常州的

下降幅度均超过 91%,清洁低碳发展趋势较好。

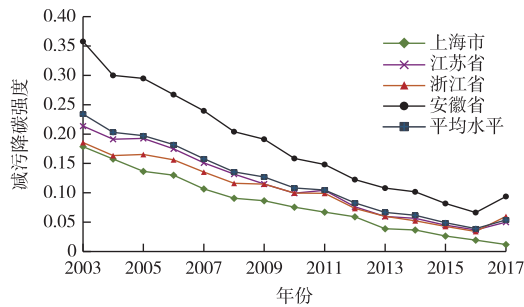


图 2 长三角城市群减污降碳强度变化
Fig. 2 Changes of IPCR in the YRDUA

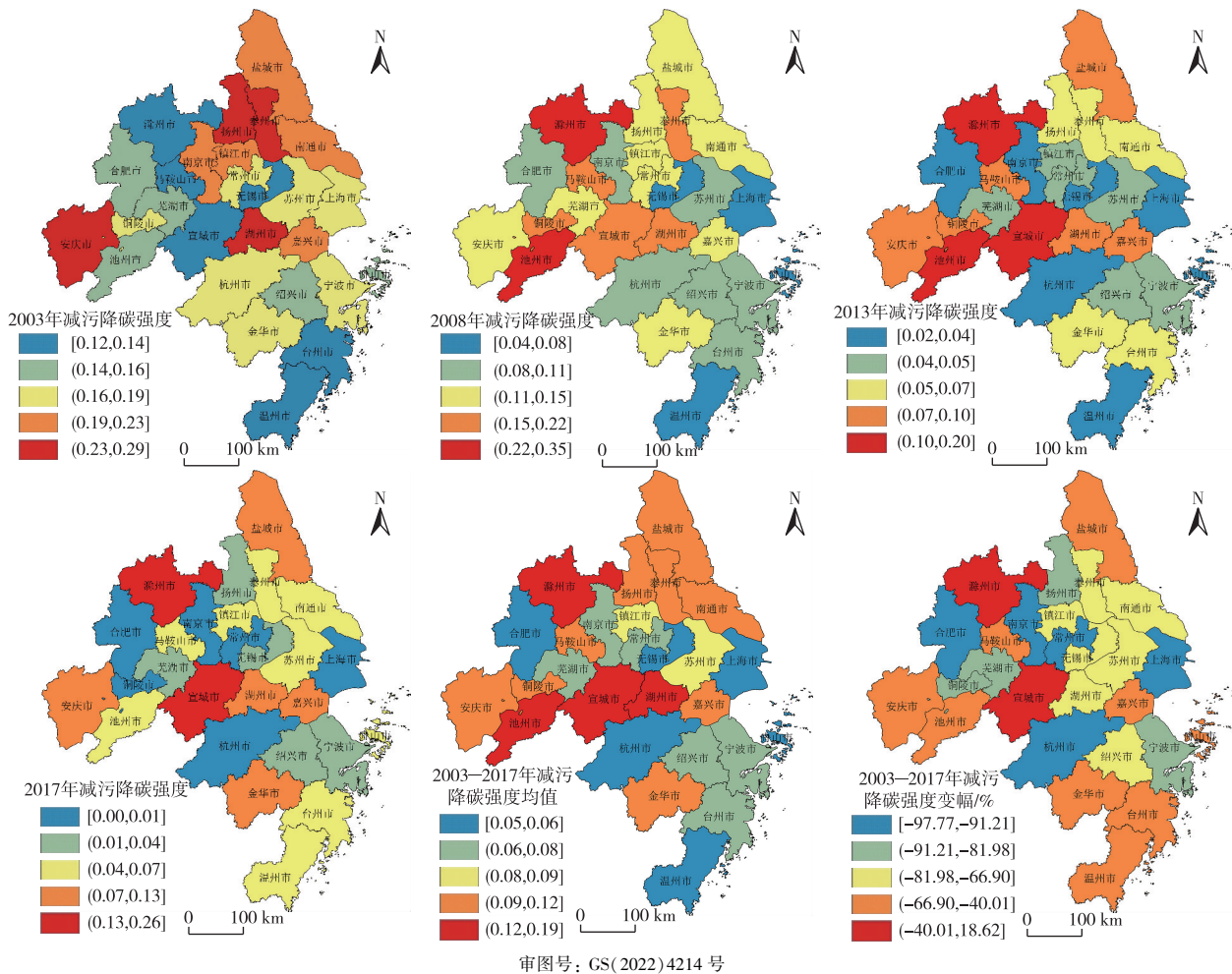


图 3 长三角城市群减污降碳强度的时空分布特征

Fig. 3 Temporal and spatial characteristics of IPCR in the YRDUA

2.1.3 空间自相关分析

由表 3 可知,2003—2017 年长三角城市群减污降碳强度的 Morans's I 指数为 0.320 7,且 P 值通过显著性检验, Z 值大于 1.96,表明长三角城市群减

污降碳强度有较强的空间聚集特征。从不同时期来看,2003—2007 和 2008—2012 年减污降碳强度的 Morans's I 指数高于 2013—2017 年,表明随时间变化,长三角城市群减污降碳强度空间聚集特征呈

下降趋势,而空间离散特征趋于强烈。

表 3 长三角城市群减污降碳强度的全局 Moran's I 指数
Table 3 Global Moran's I index of IPCR in the YRDUA

年份	Moran's I 值	方差	Z 值	P 值
2003—2007	0.751 3	0.003 5	12.795 6	0.000 0***
2008—2012	0.780 5	0.003 5	13.293 0	0.000 0***
2013—2017	0.356 4	0.003 2	6.424 0	0.000 0***
2003—2017	0.320 7	0.000 3	17.581 8	0.000 0***

*** 表示在 1%水平显著。

2.2 长三角城市群减污降碳驱动分析

2.2.1 数据检验和精度评价

在构建 GTWR 模型前,需对所有变量进行标准化处理;同时,为避免在回归时出现伪回归现象,需对标准化后的所有变量进行多重共线性检验。结果表明,11 项指标的方差膨胀因子均小于 10,但 GDP 和园林绿地面积的膨胀系数较高,分别为 9.16 和 9.38。表 4 统计了回归模型的精度评价结果,可以看出,在考虑时间效应后,GTWR 模型 R^2 与调整 R^2 均高于 0.96,相比 GWR 模型的拟合精度和优度提升较大, R^2 提升 0.193 1,残差下降 0.649 3,且 AICc 值下降 398.24。可见,GTWR 回归模型能够较好地与时空尺度拟合 11 项具体驱动指标与减污降碳强度因变量的线性关系。RF 模型的精度评价结果见表 5。

表 4 减污降碳驱动模型精度评价

Table 4 Accuracy evaluation of driving model for IPCR

模型	带宽	sig. 值	残差	AICc 值	R^2	调整 R^2
GWR	0.205 9	0.043 7	0.774 5	-1 273.86	0.769 7	0.762 6
GTWR	0.125 0	0.017 6	0.125 2	-1 672.10	0.962 8	0.961 6

表 5 长三角城市群减污降碳强度的 RF 模型精度评价

Table 5 Accuracy evaluation of RF model for IPCR in the YRDUA

年份	Var 解释程度/%	均方根误差/ 10^{-4}
2003—2007	75.86	7.36
2008—2012	79.95	6.89
2013—2017	78.61	4.23

2.2.2 驱动因素回归系数空间特征

图 4 展示了 GTWR 局部回归系数的空间分布,27 个城市局部回归系数均达显著水平 ($P<0.01$)。GDP 与盐城和金华减污降碳强度呈显著负相关;而安庆、滁州则受到人均 GDP 影响最为显著,人均

GDP 越高则减污降碳强度越低。从产业结构来看,上海、嘉兴、宁波、绍兴、舟山、台州和温州受第二产业增加值占 GDP 比例的正向驱动显著,而滁州、扬州、南京、马鞍山和常州受第三产业增加值占 GDP 比例的负向驱动更为显著。从土地利用结构来看,上海、苏州和浙江 9 市受园林绿地面积的负向驱动,即其园林绿地面积的增加驱动减污降碳强度下降;而滁州、合肥、马鞍山、芜湖、铜陵和池州受建设用地面积的负向驱动。从人口角度来看,滁州、合肥和安庆的人口密度对减污降碳强度的负向驱动显著;常住人口数量对安庆、池州和温州的减污降碳强度也为负向驱动,但盐城、南通、上海、苏州、无锡和嘉兴的减污降碳强度则受常住人口数量的正向驱动。安庆、池州、铜陵和合肥减污降碳强度受能源消费总量的负向驱动显著,而绍兴、台州、金华和温州减污降碳强度则受能源消费总量的正向驱动。从气候变化响应来看,研究区南部城市的减污降碳强度受年均气温和年降水量的负向驱动较为显著。

2.2.3 驱动因素重要性变迁

表 5 显示,2003—2007、2008—2012 和 2013—2017 年 3 个时期 RF 模型的 Var 解释程度分别为 75.86%、79.95% 和 78.61%,均超过 75%,这意味着该模型具有良好的拟合效果,对各个时期均有较好的解释能力。模型精度也很高,3 个时期的均方根误差 (RMSE) 均小于 8×10^{-4} 。

RF 模型对变量重要性的测度可消除其他变量的间接影响。由表 6 可知,能源消费总量在 2003—2007、2008—2012 和 2013—2017 年 3 个时期的重要性均为第 1;而第三产业增加值占 GDP 比例在 2003—2007、2008—2012 年均为第 2 重要的影响因素,在 2013—2017 年重要性排名下降到第 3。园林绿地面积的重要性排名从 2003—2007 年的第 5 逐渐上升到 2013—2017 年的第 2,说明园林面积增加对降碳和污染物净化的效用在逐渐提升;同时建设用地面积的重要性也在不断提升。人均 GDP 在 2003—2007 和 2008—2012 年的重要性排名分别为第 3 和第 4,但在 2013—2017 年下降到第 8;同时,GDP 的重要性排名也呈下降趋势。虽然人口密度和人口总量重要性排名靠后,但总体呈上升趋势。气候变化响应方面,年均气温、年降水量始终是重要性排名最靠后的影响因素,说明气候变化对减污降碳的影响并不显著。

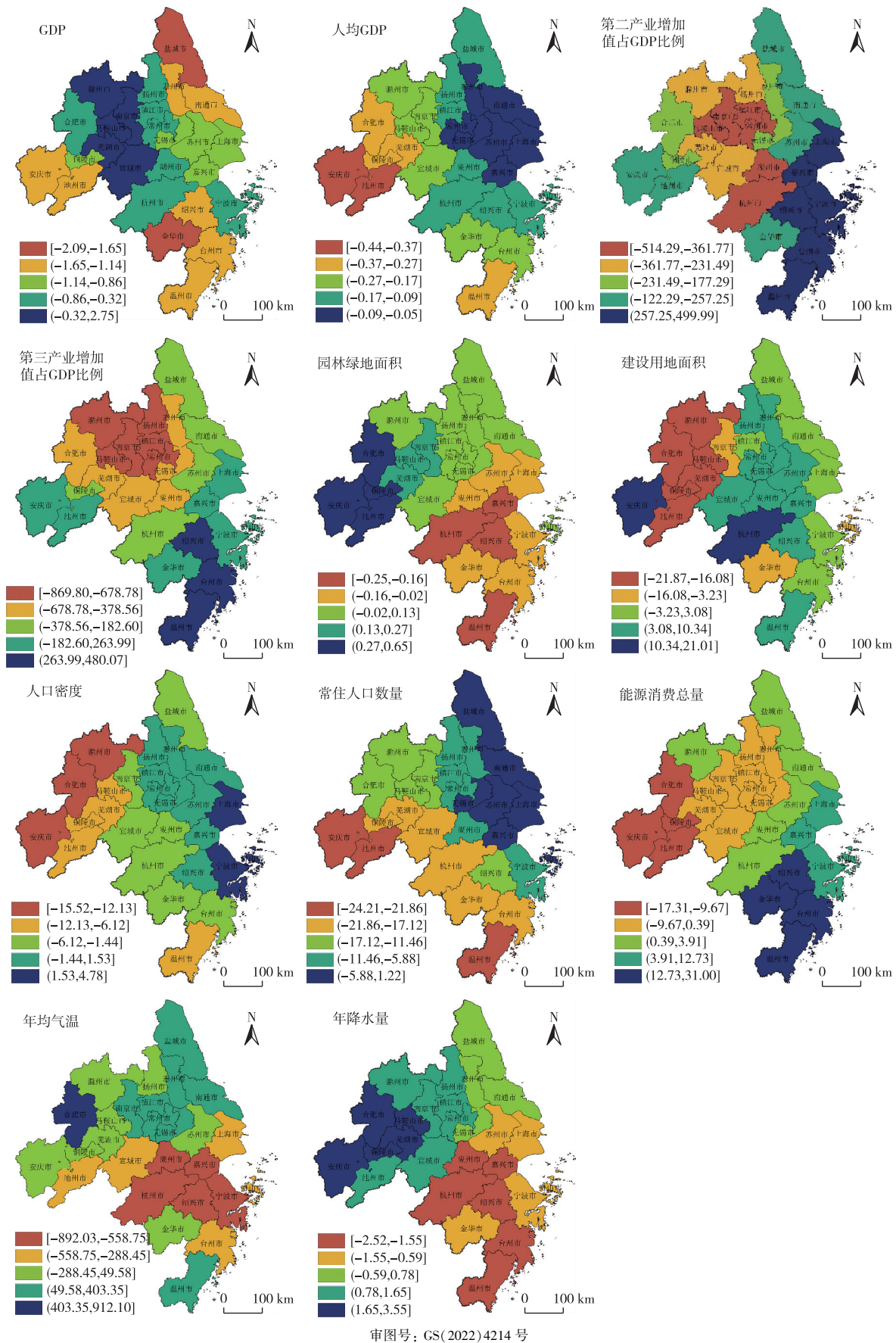


图 4 GTWR 模型局部回归系数的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of local regression coefficients of GTWR model

表 6 减污降碳强度驱动因素的重要性变迁
Table 6 Changes in the importance of driving factors for
IPCR

变量	2003— 2007 年	2008— 2012 年	2013— 2017 年
GDP	16.40 (7)	18.55 (5)	16.80 (6)
人均 GDP	25.53 (3)	19.43 (4)	13.21 (8)
第二产业增加值占 GDP 比例	22.29 (4)	13.93 (9)	10.69 (9)
第三产业增加值占 GDP 比例	26.01 (2)	26.67 (2)	26.84 (3)
园林绿地面积	20.24 (5)	23.65 (3)	29.30 (2)
建设用地面积	15.63 (8)	17.55 (7)	21.43 (4)
人口密度	17.43 (6)	18.02 (6)	20.70 (5)
人口总量	15.47 (9)	15.70 (8)	15.55 (7)
能源消费总量	29.86 (1)	28.57 (1)	29.67 (1)
年均气温	9.23 (10)	8.54 (10)	9.89 (10)
年降水量	7.81 (11)	6.98 (11)	8.50 (11)

括号外数据为重要性测度值,括号内数据为重要性排名。

3 讨论

该研究基于碳排放水平和污染物排放数据,通过权重组合构建减污降碳强度指标,并通过 GTWR 和 RF 方法分析了经济发展、产业结构、土地利用结构、人口以及气候变化对减污降碳强度指标的时空驱动特征以及驱动因素的重要性变迁,尝试探究长三角城市群减污降碳的驱动机制和空间模式。可以发现,建设用地面积和园林绿地面积的重要性不断上升。HAN 等^[22]认为,长三角建设用地的空间净碳强度显示出显著的跳跃性,碳排放的增长速度快于城市土地扩张。笔者与其结论相吻合,这说明土地利用结构对于减污降碳强度的影响力在迅速上升,一方面建设用地中污染物排放强度在不断增加,另一方面园林绿地在碳汇和污染物净化方面的功能效用更加显著。笔者研究发现,2003—2017 年长三角城市群减污降碳强度存在空间聚集性,人均 GDP 和人口密度对减污降碳强度具有负向驱动作用,这与 QIN 等^[10]的结论相吻合。但上海、嘉兴、宁波、台州、绍兴、舟山和温州的减污降碳强度随着第二产业增加值占 GDP 比例的增加而增加,这与 QIN 等^[10]全国尺度第二产业占比与 CO₂ 排放量呈正相关的结论并不完全吻合,这可能源于减污降碳强度是一个综合碳减排和污染物排放效率的指标,上述城市在污染物排放效率层面与其他城市有不同的轨迹。从污染物排放驱动来看,WANG 等^[8]认为,在省级尺度人均 GDP、技术、城市化和人口对环境污染有显著影响。笔者与其结论相符,但进一步研究发现,不同时期这种重要性在发生变化,如人均 GDP 的驱动重要性呈下降趋势,即驱动因素的重要

性在发生时空变迁,这与研究尺度相关,在更细分的尺度上可以捕捉更为细微的减污降碳驱动特征。无锡与滁州等城市的减污降碳强度处于同一梯队,但通过分析统计资料可知,2003 年无锡和滁州的工业增加值分别为 992.74 亿和 105.5 亿元,工业发展差距较大。因此,减污降碳强度值相对较低不一定是由于经济清洁发展所致,也有可能是因为经济发展水平低、工业化程度较低。

技术进步不仅能提高经济发展效率,而且对于减少碳排放和降低污染物排放有较大的促进作用^[23]。长三角地区的进出口贸易非常发达,这其中隐含了一定程度的碳排放和污染物转移^[24],该研究对此还未能有效测度,后期应逐渐完善。另一方面,为了更好地开展减污降碳考核评估工作^[25],在后期应考虑纳入其他污染物排放效率以及其他温室气体的排放强度指标。

4 结论与建议

(1)2003—2017 年,长三角地区 27 个城市的平均减污降碳强度由 2003 年的 0.23 下降到 2017 年的 0.05,表明长三角城市群减污降碳整体呈向好趋势。长三角城市群减污降碳强度存在较强的空间聚集特征,在考虑时间效应后 GTWR 模型对减污降碳强度的拟合能力迅速提升,减污降碳强度指标时空分异特征显著。

(2)人均 GDP、园林绿地面积、人口密度、常住人口数量的 GTWR 模型回归系数整体呈负值,说明其增加可促使减污降碳强度降低。建议长三角城市群在推进减污降碳工作时注重人均 GDP、园林绿地面积和人口因素的协同提升。

(3)能源消费总量始终是减污降碳强度最重要的影响因素,同时地区产业结构和土地利用结构等影响因素的重要性也不可忽视。建议长三角城市群提升能源利用效率,大力发展第三产业,优化土地利用结构。

参考文献:

[1] SHAN Y L, FANG S, CAI B F, *et al.* Chinese Cities Exhibit Varying Degrees of Decoupling of Economic Growth and CO₂ Emissions between 2005 and 2015 [J]. *One Earth*, 2021, 4 (1): 124–134.
[2] 国家统计局.国务院第七次全国人口普查领导小组办公室第七次全国人口普查公报[EB/OL].[2021-05-11].<http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/rkpcgb/>.
[3] DONG F, YU B L, PAN Y L. Examining the Synergistic Effect of CO₂ Emissions on PM_{2.5} Emissions Reduction: Evidence from

- China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223: 759–771.
- [4] JIANG P, KHISHGEE S, ALIMUJIANG A, *et al.* Cost-effective Approaches for Reducing Carbon and Air Pollution Emissions in the Power Industry in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 264: 110452.
- [5] 《中国空气质量评估报告 2016》发布: 大气污染物与温室气体同根同源 大气污染防治产生减碳效应[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10): 2929.
- [6] XU Q, DONG Y X, YANG R. Urbanization Impact on Carbon Emissions in the Pearl River Delta Region: Kuznets Curve Relationships [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 180: 514–523.
- [7] WANG S J, LI C F. The Impact of Urbanization on CO₂ Emissions in China: An Empirical Study Using 1980–2014 Provincial Data [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3): 2457–2465.
- [8] WANG H, LIU G F, SHI K F. What Are the Driving Forces of Urban CO₂ Emissions in China? A Refined Scale Analysis between National and Urban Agglomeration Levels [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(19): 3692.
- [9] 高庆先, 高文欧, 马占云, 等. 大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(3): 268–278. [GAO Qing-xian, GAO Wen-ou, MA Zhan-yun, *et al.* The Synergy Effect Assessment Method and Its Application for Air Pollutants and Greenhouse Gases Reduction [J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(3): 268–278.]
- [10] QIN H T, HUANG Q H, ZHANG Z W, *et al.* Carbon Dioxide Emission Driving Factors Analysis and Policy Implications of Chinese Cities: Combining Geographically Weighted Regression with Two-Step Cluster [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 684: 413–424.
- [11] 丁宝根, 杨树旺, 赵玉. 长江经济带种植业碳排放时空特征及驱动因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(10): 1252–1258. [DING Bao-gen, YANG Shu-wang, ZHAO Yu. Study on Spatial-Temporal Characteristics and Driving Factors of Carbon Emission from Planting Industry in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(10): 1252–1258.]
- [12] 李涛, 杨知建, 甘德欣, 等. 长株潭城市群土地利用/覆被变化对碳效应的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(4): 539–545. [LI Tao, YANG Zhi-jian, GAN De-xin, *et al.* Influence of Changes in Land Use/Cover on Carbon Effect in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(4): 539–545.]
- [13] 新华社. 中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见 [EB/OL]. (2021–11–07) [2021–11–02]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content_5649656.htm.
- [14] 新华社. 中共中央国务院印发《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》[EB/OL]. (2019–12–01) [2019–12–01]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/01/content_5457442.htm.
- [15] 国家发展和改革委员会, 住房和城乡建设部. 《长江三角洲城市群发展规划》(发改规划[2016]1176号) [EB/OL]. (2016–06–03) [2016–06–01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201606/t20160603_962187.html?code=&state=123.
- [16] CHEN J D, GAO M, CHENG S L, *et al.* County-Level CO₂ Emissions and Sequestration in China during 1997–2017 [J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 391.
- [17] BREIMAN L. Random Forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5–32.
- [18] HUANG B, WU B, BARRY M. Geographically and Temporally Weighted Regression for Modeling Spatio-Temporal Variation in House Prices [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3): 383–401.
- [19] MCMILLEN D P. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2004, 86(2): 554–556.
- [20] LIAW A, WIENER M. Classification and Regression by Random Forest [J]. *R News*, 2002, 2(3): 18–22.
- [21] BREIMAN L, FRIEDMAN J H, OLSHEN R A, *et al.* Classification and Regression Trees [R]. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2017.
- [22] HAN J, MENG X, ZHOU X, *et al.* A Long-Term Analysis of Urbanization Process, Landscape Change, and Carbon Sources and Sinks: A Case Study in China's Yangtze River Delta Region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 1040–1050.
- [23] KANG Z Y, LI K, QU J Y. The Path of Technological Progress for China's Low-Carbon Development: Evidence from Three Urban Agglomerations [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 644–654.
- [24] LU Q L, FANG K, HEIJUNGS R, *et al.* Imbalance and Drivers of Carbon Emissions Embodied in Trade along the Belt and Road Initiative [J]. *Applied Energy*, 2020, 280: 115934.
- [25] 刘强, 陈怡, 滕飞, 等. 中国深度脱碳路径及政策分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(9): 162–170. [LIU Qiang, CHEN Yi, TENG Fei, *et al.* Pathway and Policy Analysis to China's Deep Decarbonization [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(9): 162–170.]

作者简介: 马伟波 (1991—), 男, 陕西宝鸡人, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为城市生态与矿山生态保护修复。E-mail: maweibo@nies.org

(责任编辑: 许 素)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0142

仇宽彪, 杜涵蓓, 张龙江, 等. 基于降温效应的长三角核心城市城区绿地节能减碳价值研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1282–1289.
QIU Kuan-biao, DU Han-bei, ZHANG Long-jiang, et al. Study on the Carbon Saving Value of Urban Greenspace Patches in the Main Cities of Yangtze River Delta Based on the Cooling Effect[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1282–1289.

基于降温效应的长三角核心城市 城区绿地节能减碳价值研究

仇宽彪^①, 杜涵蓓, 张龙江, 张卫东^①, 李海东 (生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 基于城市绿地的降温效应这一重要的生态功能, 结合遥感影像, 采用缓冲区分析及统计分析方法, 对长三角一体化中心区 27 个核心城市的城区绿地的节能减碳量进行估算研究。结果显示, 研究区各大城市的中心城区绿地均具有显著的降温效应。城区绿地斑块的平均地表温度(LST)较城区平均低 2.18 K, 降温幅度在 2.9~8.3 K 之间, 绿地斑块的降温距离则在 270~450 m 之间。长三角一体化核心区 27 个核心城市绿地节能减碳量为 267 656.12 t·d⁻¹, 每个城市绿地平均节能减碳量约 9 913.19 t·d⁻¹。各大城市中, 上海市城市绿地节能减碳量最大, 达 47 374.83 t·d⁻¹, 其余依次为温州、宁波、南京、杭州、台州、苏州、无锡和合肥, 宣城、绍兴、嘉兴、池州、马鞍山和安庆等市城市绿地节能减碳量均在 2 000 t·d⁻¹ 以下。此外, 随着到绿地距离增加, 城区绿地节能减碳量从 0~90 m 范围内的 3 562.54 t·d⁻¹ 逐渐减少到 >180~270 m 范围内的 54.20 t·d⁻¹。研究结论可为城市生态建设、城市碳达峰碳中和研究提供科学参考。

关键词: 降温效应; 节能减碳; 城市绿地; 长三角

中图分类号: X24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1282-08

Study on the Carbon Saving Value of Urban Greenspace Patches in the Main Cities of Yangtze River Delta Based on the Cooling Effect. QIU Kuan-biao¹, DU Han-bei¹, ZHANG Long-jiang¹, ZHANG Wei-dong^{1①}, LI Hai-dong¹ (Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: The vegetation carbon sink has been estimated from the absorption and storage of CO₂ through photosynthesis. However, due to its ecological functions such as the local cool island effect of the urban greenspace, little attention has been paid to the energy saving and carbon reduction, and there is a lack of estimation of carbon saving amount in regional cities. Based on the important ecological function of cooling effect of urban green space, this study used buffer analysis and statistical analysis methods to analyze the carbon saving of urban greenspace in 27 core cities in the integrated central area of the Yangtze River Delta (CCICAYRD). Results show that the urban greenspace in the downtown of CCICAYRD had a significant cooling effect. The average LST of urban greenspace was 2.18 K, lower than that of the downtown, and the cooling range was between 2.9 and 8.3 K, and the cooling distance of greenspace patches was between 270 and 450 m. The carbon saving estimation show that the total carbon saving of the 27 core cities in the CCICAYRD was approximately 267 656.12 t·d⁻¹, with an average carbon saving of 9 913.19 t·d⁻¹ per city. Among the major cities, the carbon saving of urban greenspace in Shanghai downtown was the largest, reached to 47 374.83 t·d⁻¹, followed by Wenzhou, Ningbo, Nanjing, Hangzhou, Taizhou, Suzhou, Wuxi and Hefei, while the carbon saving of urban greenspace patches was small in Xuancheng, Shaoxing, Jiaxing, Chizhou, Ma'anshan and Anqing, all below 2 000 t·d⁻¹. In addition, as the distance to the greenspace patches increased, the carbon saving of the urban greenspace gradually decreased from 3 562.54 t·d⁻¹ in the cooling distance of 0–90 m to 54.20 t·d⁻¹ in the cooling distance of >180–270 m. This conclusion can provide a scientific reference for the urban ecological construction and the researches on urban carbon peaking and neutrality.

Key words: cooling effect; energy saving and carbon reduction; urban greenspace patches; Yangtze-River Delta

收稿日期: 2022-02-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX210101)

① 通信作者 E-mail: zwd@nies.org

以全球变暖为主要特征的气候变化已成为人类社会面临的严峻挑战,减少温室气体排放和践行低碳发展已成为世界各国共识^[1]。作为碳排放高居全球首位的国家,中国宣布“将采取更加有力的政策和措施,使 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。”碳减排与碳固定是实现碳净零排放的 2 条重要途径。其中,对于碳减排而言,节能管理是碳达峰与碳中和的重要因素^[2];对于碳固定而言,植被则是公认的碳汇类型。因此,揭示植被碳汇及其在节能管理中的作用具有重要意义。

传统的植被碳汇,多从植被通过光合作用吸收利用 CO₂ 从而实现碳固定方面开展研究^[3-5]。同样,对于城市绿地的碳汇功能的研究也多从吸储 CO₂ 方面展开。如张彪等^[6]基于光合速率法和生物量法测算了上海市 8 万 hm² 城市森林的固碳功能;周健等^[7]采用材积源生物量方程与净初级生产力方法对广州市城市森林固碳量进行测算;TRILICA 等^[8]采用树木生产模型和异速生长方程对波士顿城市森林的固碳量进行测算。尽管这些研究均显示城市植被碳汇年均抵消化学能源碳排放的比例较低,但城市植被可通过蒸散发作用增大地表潜热输送量,且改变地表粗糙度,对局地大气环流产生影响,因此可形成局地的冷岛^[9-11],而且在其周边一定范围内也受到该降温效应的影响^[12]。当前对城市绿地由于局地降温效应所导致的节能减碳价值的估算研究还不多见。KO 等^[13]和 ZHANG 等^[14]基于城市绿化林木的遮荫降温以及蒸散发功能,对其节能作用进行了核算;贾宝全等^[15]结合降温距离和降温幅度,对北京市平原大造林工程的节能量进行了测算;LIN 等^[16]基于冷岛效应对北京市六环内的城市森林斑块本身及其外围区域的节能减碳量进行了估算。不过,以上研究仅针对单个城市的城市森林或某项城市绿化工程开展节能减碳核算,鲜见区域城市植被节能减碳量估算方面的研究报道。

城市绿地的降温效应研究一般采用气象站实测和遥感反演 2 种方法,通过降温距离与降温幅度进行分析。气象站实测是指在绿地及其周边布设多个样点,通过实测各样点的温湿度开展降温效应分析^[17]。遥感反演方法是指基于遥感影像反演得到地表温度,通过在绿地外围设置一系列缓冲区,根据各缓冲区的地表温度量化城市绿地的降温效应^[18]。相比于气象站实测方法,遥感方法可以获取更大时空范围内城市绿地的降温信息。

该研究以长三角核心区 27 个核心城市的城区

绿地为研究对象,采用遥感方法,基于降温效应,结合降温距离与降温幅度,重点对其外围降温距离内的节能减碳量进行了估算,研究结果对于厘清城市植被在碳达峰碳中和中的作用,建立绿色低碳生活方式具有重要的指示意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

长三角一体化中心区核心城市涉及沪苏浙皖 27 个省(市),具体包括上海,江苏南京、无锡、常州、苏州、南通、扬州、镇江、盐城、泰州,浙江杭州、宁波、温州、湖州、嘉兴、绍兴、金华、舟山、台州,安徽合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城,总面积 22.5 万 km²。研究区位于 33°27'~27°41' N, 117°00'~122°19' E,属亚热带气候区,年降水量在 1 000 mm 以上,年均温约为 15 ℃,四季分明,雨热同期。北部地处江淮平原、太湖平原和沿江平原,南部处于东南丘陵地区。区域水系发达,城区大多依水而建,分布有长江、淮河、钱塘江、椒江及甌江等水系。土壤以水稻土为主,亚热带常绿阔叶林为该地区典型的地带性植被,但由于区域农业开发历史悠久,地带性植被大多为人工植被所取代,现城区绿化植被主要有女贞、香樟、白玉兰等。研究区社会经济发展水平较高,人口密度较大。该研究主要针对上述核心城市的中心城区,总面积为 14 313 km²。

1.2 数据源及数据处理

研究数据主要包括 Landsat 影像数据、土地利用数据及基础地理数据等。其中,Landsat 影像数据主要用于 LST 反演,数据来源于美国地质调查局的 Landsat 8 数据,成像时间为 10:00—11:00;土地利用/覆盖数据主要用于城区绿地提取,来源于清华大学发布的 2017 年全球土地利用数据(http://data.ess.tsinghua.edu.cn/fromgle10_2017v01.html),数据总体精度为 72.76%^[19];基础地理数据则主要用于各市边界及中心城区边界绘制等。研究所用土地利用与遥感影像数据见表 1。

1.3 LST 反演

根据 Landsat 8 影像数据进行长三角一体化核心城市地表温度(LST)反演,Landsat 8 影像包括 Landsat OLI 和 Landsat TIRS 传感器,分别可侦测可见光谱和近红外部分的信息。其中,TIRS 包括第 10 和第 11 波段。已有研究多采用第 10 波段进行 LST 反演,该研究采用大气校正法进行 LST 反演,具体方法参照文献[20]。

表 1 土地利用与遥感影像信息

Table 1 Summary of the land use data and the remote sensing imageries used in this study

土地利用数据		Landsat 8 遥感影像		
北纬/(°)	东经/(°)	条带号	行编号	成像时间
26	120	118	038	2017-08-24
26	118	118	039	2017-08-24
28	120	118	040	2016-07-20
28	122	118	041	2016-07-20
30	116	119	038	2016-07-27
30	118	119	039	2016-07-27
30	120	119	040	2016-07-27
30	122	120	038	2017-07-21
32	116	120	038	2018-06-06
32	118	120	039	2017-07-21
32	120	121	038	2017-07-28
		121	039	2017-07-28

1.4 绿地信息提取

针对各市城区范围内的绿地进行降温效应研究。数据集将土地覆盖分为农地、林地、草地、灌木林地、水体、不透水地表、裸地、积雪等类型,空间分辨率为 10 m^[19]。考虑到近年来城市扩张以及房地产迅速发展,市中心部分地段虽有规划但实际尚未开工建设,致使该地段存在草本与灌木覆盖,这部分土地覆盖亦能发挥一定的降温功能,选取城区林地、草地与灌木林地作为城市植被类型,选取面积在 1 hm²以上的斑块进行降温效应分析。

1.5 缓冲区分析

研究采取缓冲区分析法对各市中心城区绿地的降温效应进行分析。首先,选取面积在 1 hm² 以上的绿地斑块,统计各城市绿地斑块的平均 LST;其次,自绿地斑块边界向外建立 11 个环形缓冲区,环形缓冲区间隔 90 m,缓冲区总宽度 990 m;再次,分别统计各缓冲区平均 LST,并以各缓冲区平均 LST 为纵坐标,以缓冲区距离为横坐标,采用局部加权回归方法(locally weighted regression, LOESS)进行拟合;最后,根据 LST 变化曲线第 1 个极大值点出现的位置,确定城市绿地的降温距离,并以该拐点与绿地 LST 的差值作为绿地的最大降温幅度。

1.6 节能减碳量计算

根据热量计算公式,结合城市绿地的降温距离和降温幅度,计算各市中心城区绿地的节能减碳量。将绿地外围降温范围视为绿地斑块边界、降温距离以及特定高度三者组成的空气柱,根据热量计算公式,即物体在温度发生一定变化时释放或吸收的热量,可通过物体比热容、物体质量和温度变化幅度计算得到。该研究采用空气比热容,以绿地斑块及

外围降温范围内、高约 70 m 的空气柱质量和降温幅度分别表征物体比热容、物体质量和温度变化幅度,计算城市绿地降温效应的节能减碳量。

$$Q = C_p \times \rho \times P \times L \times H \times \Delta T。$$

式(1)中, Q 为降温范围内的热量, J ; L 为降温距离, m ; P 为绿地斑块周长, m ; H 为绿地与周边温度混合的高度,取值 70 m; C_p 为空气比热容,取值 1 004.68 J · kg⁻¹ · K⁻¹; ρ 为空气密度,取值 1.292 3 kg · m⁻³。参照文献[16],按照单位发电量的耗煤量 863 g · (kW · h)⁻¹计算城市绿地的减碳量。

2 结果与分析

2.1 林地斑块与 LST 整体情况

长三角一体化中心区 27 个城市的绿地面积占比在 3%~42%之间。台州、温州、金华、盐城和铜陵等市绿地占比均在 30%以上,而绍兴、泰州、宣城和嘉兴等市绿地占比则在 15%以内(图 1)。受制于各地地形地貌条件,各市中心城区平均高程也具有一定程度的变化。温州与金华两市城区高程超过 40 m,而上海、盐城和绍兴等市中心城区平均高程则不足 10 m。各市中心城区绿地面积占比受到地形地貌的影响。相关分析结果显示,各市中心城区绿地面积占比与平均高程之间存在极显著相关关系($r = 0.53, P < 0.01$),随着高程增加,中心城区绿地占比也逐渐增大。

2.2 林地斑块降温效应空间分布

27 个中心城市,有 15 个城市的中心城区 LST 在 317.35~320.50 K 之间;有 8 个城市其中心城区 LST 超过 321.00 K,其中马鞍山市 LST 最高,达 325.11 K;有 4 个城市其中心城区 LST 不足 317 K,其中温州 LST 仅 313.50 K(见图 2)。由于研究区范围较大,Landsat 影像来自于多个时段,造成各市 LST 绝对值有一定差异。该研究尽量使用同一景 LST 影像数据,因研究目的在于绿色开敞空间的降温幅度,因此 LST 的相对差值可消除由于成像时间不同而造成的 LST 系统差异。

27 个地级市的城市绿地平均 LST 比城区低 2.18 K。各市中心城区绿地平均 LST 均低于城区平均 LST。其中,南京、苏州与安庆的城区绿地平均 LST 仅比城区低 1 K 以内;宁波、杭州、舟山与台州等沿海城市城市绿地平均 LST 比城区低 3.5 K 以上。对降温幅度与绿地面积占比的回归分析显示,降温幅度与绿地面积占比大致呈显著线性相关关系($r = 0.52, P < 0.01$),随着绿地面积占比增大,降温幅度也逐渐增大。

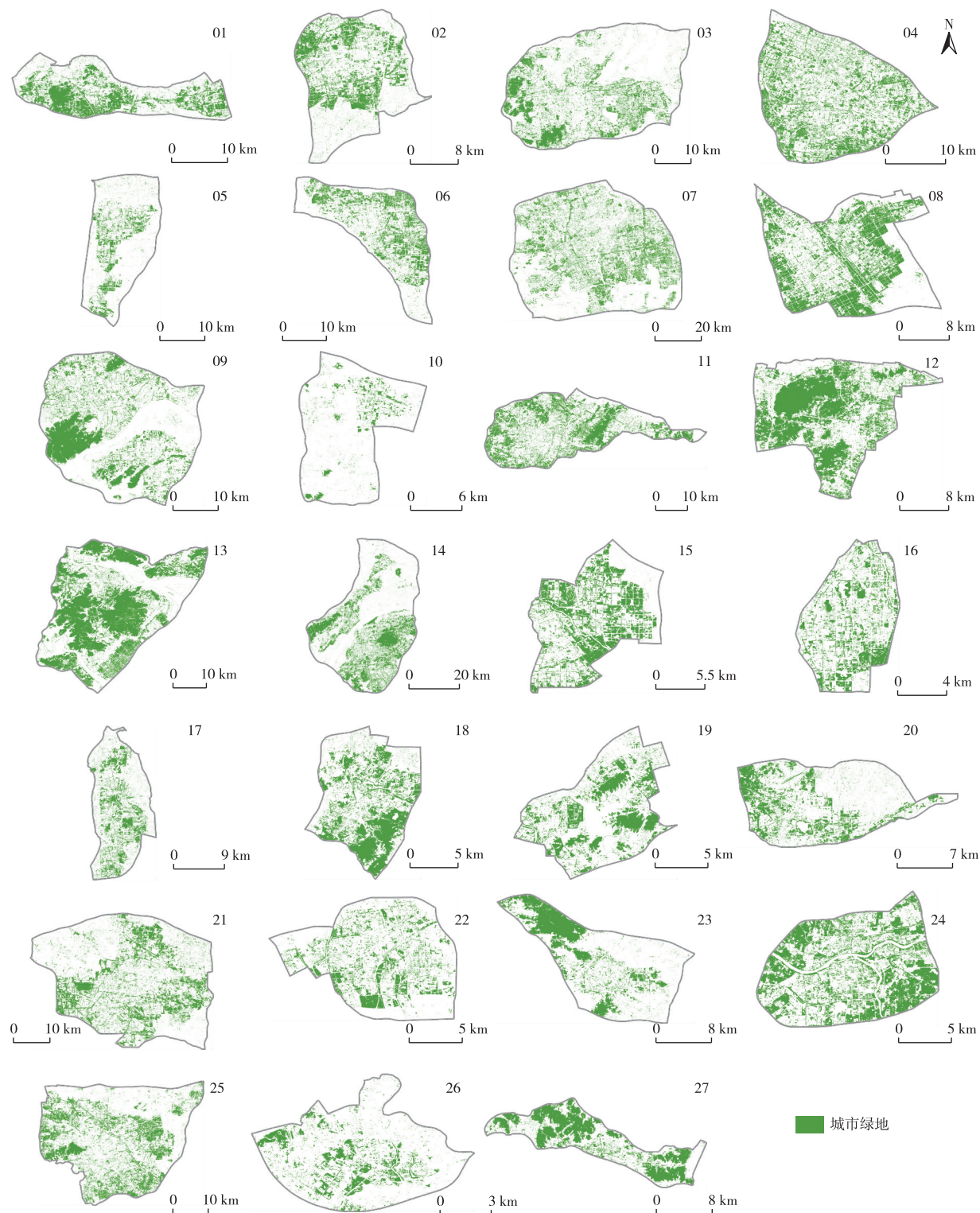
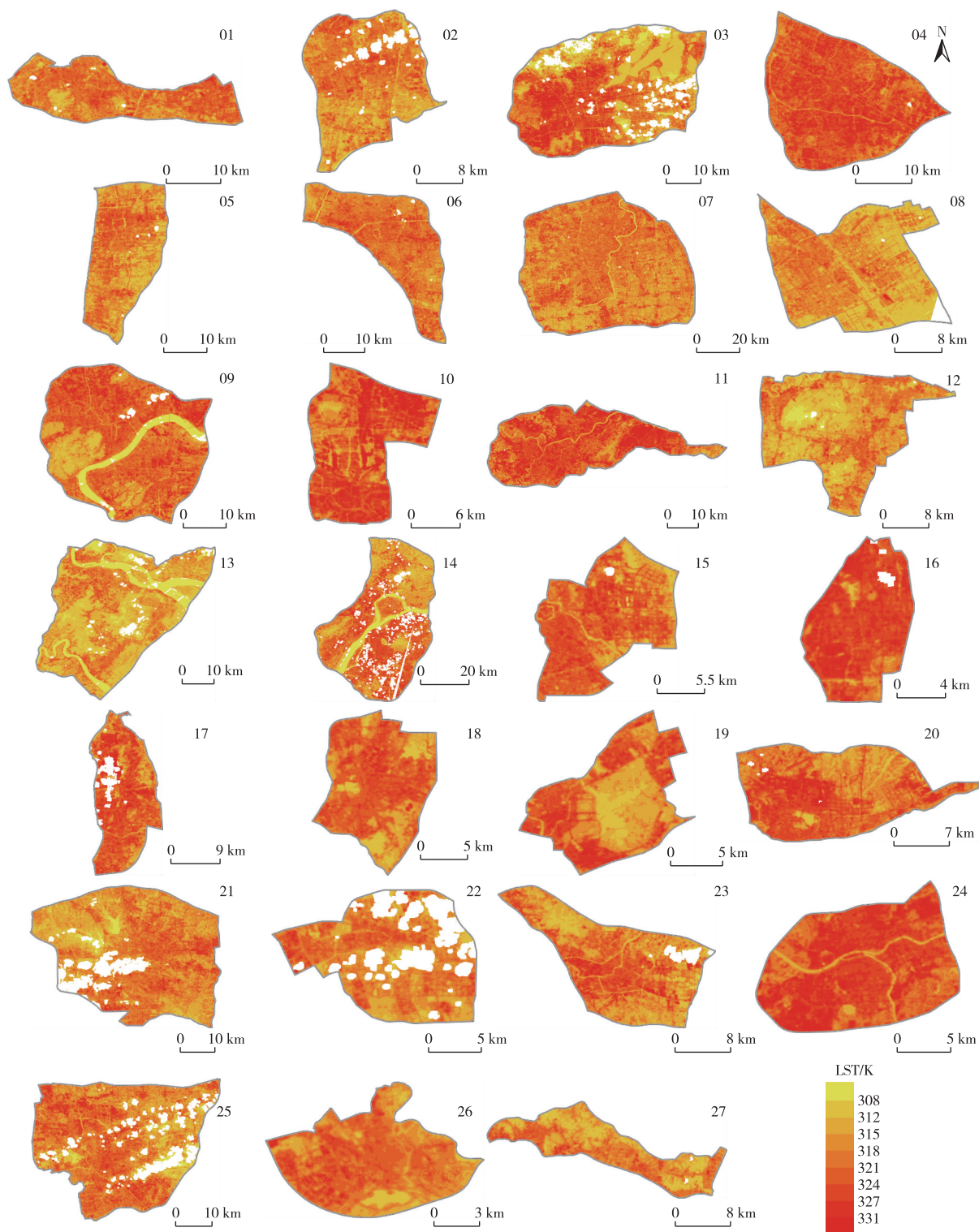


图 1 2017 年长三角一体化核心城市中心城区绿地分布

Fig. 1 Distribution of urban greenspace in the downtown of integrated core cities in the Yangtze River Delta in 2017

缓冲区分析及回归拟合结果显示,各市城区绿地均有显著的降温幅度,降温幅度在 2.47 ~ 7.62 K 之间。各地级市中,宁波和台州城区绿地降温幅度

最大,均在 7.0 K 以上;而宣城、池州、安庆与合肥等市城区绿地降温幅度仅在 3.0 K 以下。



空白区域表示云层覆盖。01—镇江市; 02—扬州市; 03—苏州市; 04—常州市; 05—泰州市; 06—南通市; 07—上海市; 08—盐城市; 09—杭州市; 10—绍兴市; 11—宁波市; 12—台州市; 13—温州市; 14—南京市; 15—滁州市; 16—马鞍山市; 17—芜湖市; 18—铜陵市; 19—池州市; 20—安庆市; 21—合肥市; 22—嘉兴市; 23—湖州市; 24—金华市; 25—无锡市; 26—宣城市; 27—舟山市。

图 2 2017 年长三角一体化核心城市中心城区地表温度 (LST) 分布

Fig. 2 Distribution of the land surface temperature in the downtown of integrated core cities in the Yangtze River Delta in 2017

27 个城市中,有 19 个城市的城区绿地降温距离在 270 m 以内,有 7 个城市的城区绿地降温距离

在 360 m 以内,仅有 1 个城市的城区绿地降温距离超过 360 m。由此可见,城区绿地的降温距离多在

400 m 以内。

2.3 城市绿地斑块降温效应节能减碳量

由表 2 可知,长三角一体化核心区各大城市绿地节能减碳量为 267 656. 12 t · d⁻¹,每个城市绿地平均节能减碳量约 9 913. 19 t · d⁻¹。若按每年高温 90 d 计算,则整个夏季研究区各城市绿地节能减碳量约为 2 408. 91 万 t。结合中国城市统计年鉴资料,2017 年研究区中心城区绿地降温效应的节能减碳量占全年电力消费碳排放的 5%左右。这表明,若城区没有植被,则仅局地降温一项功能,就需多排放约 5%的碳以缓解高温。而各大城市中,上海市城市绿地节能减碳量最大,达 47 374. 83 t · d⁻¹,

其余依次为温州、宁波、南京、杭州、台州、苏州、无锡和合肥,其城市绿地节能减碳量在 10 000 t · d⁻¹以上,而宣城、绍兴、嘉兴、池州、马鞍山和安庆等市城市绿地节能减碳量均在 2 000 t · d⁻¹以下。

绿地斑块外围降温范围内节能减碳量与斑块自身的节能减碳量大体相似。研究区各城市中,外围降温范围内节能减碳量在节能减碳总量中的占比在 31. 31%~73. 85%之间,平均占比为 47. 32%。从各市城区绿地外围不同距离节能减碳量来看,随着到绿地距离增加,城区绿地节能减碳量从 0~90 m 范围内的 3 562. 54 t · d⁻¹逐渐减少到>180~270 m 范围内的 54. 20 t · d⁻¹。

表 2 2017 年长三角一体化核心城市绿地降温减碳核算结果

Table 2 Summary of the cooling effect and carbon saving for the core cities in the central area of the Yangtze River Delta in 2017

城市	斑块	外围不同距离区域节能减碳量/(t · d ⁻¹)					节能减碳总量/ (t · d ⁻¹)
		0~90 m	>90~180 m	>180~270 m	>270~360 m	>360~450 m	
镇江市	2 461. 68	1 251. 77	147. 46	0. 00	0. 00	0. 00	3 860. 92
扬州市	2 146. 33	1 401. 62	202. 70	0. 00	0. 00	0. 00	3 750. 64
苏州市	6 776. 94	5 513. 25	1 368. 80	0. 00	0. 00	0. 00	13 658. 99
常州市	3 650. 70	4 277. 35	1 364. 68	184. 19	0. 00	0. 00	9 476. 92
泰州市	1 243. 45	1 171. 29	267. 70	0. 00	0. 00	0. 00	2 682. 45
南通市	2 720. 82	2 403. 53	662. 60	9. 03	0. 00	0. 00	5 795. 98
上海市	18 671. 85	21 108. 92	7 337. 74	256. 31	0. 00	0. 00	47 374. 83
盐城市	4 568. 37	2 622. 82	415. 85	0. 00	0. 00	0. 00	7 607. 04
杭州市	9 449. 90	6 114. 61	2 111. 10	0. 00	0. 00	0. 00	17 675. 61
绍兴市	193. 12	252. 02	99. 71	0. 00	0. 00	0. 00	544. 85
宁波市	15 980. 96	11 586. 29	3 615. 03	743. 01	0. 00	0. 00	31 925. 29
台州市	10 416. 14	4 615. 84	1 173. 33	152. 04	0. 00	0. 00	16 357. 37
温州市	27 408. 15	8 142. 48	1 562. 29	0. 00	0. 00	0. 00	37 112. 91
南京市	12 302. 58	6 908. 70	549. 25	0. 00	0. 00	0. 00	19 760. 53
滁州市	1 583. 73	976. 51	80. 44	0. 00	0. 00	0. 00	2 640. 68
马鞍山市	524. 60	705. 21	249. 68	34. 05	0. 00	0. 00	1 513. 54
芜湖市	989. 44	956. 10	224. 95	0. 00	0. 00	0. 00	2 170. 50
铜陵市	1 493. 36	760. 55	59. 98	0. 00	0. 00	0. 00	2 313. 89
池州市	771. 88	462. 27	31. 48	0. 00	0. 00	0. 00	1 265. 64
安庆市	1 017. 92	635. 10	33. 12	0. 00	0. 00	0. 00	1 686. 14
合肥市	5 712. 54	4 441. 94	944. 88	0. 00	0. 00	0. 00	11 099. 36
嘉兴市	373. 85	511. 41	252. 12	56. 74	0. 00	0. 00	1 194. 13
湖州市	2 839. 91	1 167. 23	346. 29	0. 00	0. 00	0. 00	4 353. 43
金华市	2 803. 18	2 201. 14	487. 92	0. 00	0. 00	0. 00	5 492. 24
无锡市	6 815. 05	5 216. 47	1131. 07	0. 00	0. 00	0. 00	13 162. 59
宣城市	120. 49	159. 46	63. 69	0. 00	0. 00	0. 00	343. 63
舟山市	1 978. 04	624. 68	196. 43	28. 00	7. 61	1. 29	2 836. 04
平均	5 370. 93	3 562. 54	925. 20	54. 20	0. 28	0. 05	9 913. 19
总计	145 014. 99	96 188. 53	24 980. 31	1 463. 39	7. 61	1. 29	267 656. 12

3 讨论

由于树冠遮荫以及蒸散发作用,城市绿地具有明显的降温效应。笔者研究发现,长三角一体化中

心区各核心城市内绿地斑块均具有降温效应。而且,绿地斑块的降温距离多在 270~450 m 之间,这与多个城市的研究结果相似^[12,15,18]。城市绿地的降温效应可通过热量交换对斑块周边温度产生一

定影响,从而形成局地微气候。城市绿地面积是影响其降温幅度的重要因素^[12,21],城市绿地面积越大,越容易形成稳定的内部环境,从而具有更大的降温幅度。

城市植被的降温效应在生态服务功能的相关研究中有所涉及,但在城市节能减碳中的作用却未被足够重视。城市绿地的降温效应可通过 2 种途径形成:一类为植被通过光合作用固定大气中的 CO₂,另一类则为城市植被所具有的局地小气候调节等服务功能所能起到的减碳作用。如果将前一类称为直接固碳,则后一类则可称为间接固碳。该研究聚焦于城市植被的间接固碳,研究结果说明,如果城市绿地消失,那么相应生态服务消失必然会导致城市碳排放量增大。而且,随着城市森林渐趋成熟,其所具有的直接固碳功能逐渐减弱,但其所具有的间接固碳功能则逐渐增强。由此可见,尽管植被的直接固碳效应可能较小,但不能忽视其间接固碳价值,而间接固碳价值的相关研究结果势必也有助于厘清城市生态建设在碳达峰碳中和方面的作用。

目前,尚缺少对上述城市市区范围内绿地降温节能减碳量的核算研究。但通过与其他城市的比较,可发现笔者所得核算结果大体在同一量级。如 LIN 等^[16]研究显示,北京市六环内城市绿地的节能减碳量约为 14 315.37 t · d⁻¹。以上海市为例,笔者研究的核算结果高于北京市,其中原因在于如下几点:第一,笔者研究采用的是市区所有面积在 1 hm² 以上的绿地,而北京的研究是结合城市总体规划提取出的绿地,绿地数量可能少于笔者的研究;第二,由于不同立地条件^[22]、植被覆盖^[23]以及几何特征^[24]等因素的影响,各地绿地降温效应也存在差异。

4 结论

该研究主要针对城市绿地的降温效应所导致的节能减碳量进行核算研究。相对于植被通过光合作用吸储 CO₂ 这一直接减碳作用而言,通过降温效应等生态服务功能而引起的节能减碳不容忽视。尤其是在强调碳达峰碳中和的当下,城市植被所具有的降温效应在节能减碳方面的贡献应得到更多的重视。基于城市绿地的降温效应,采用遥感方法,对长三角一体化中心区 27 个核心城市的城区绿地所具有的节能减碳量进行估算研究,主要结论包括:

(1) 各核心城市中心城区绿地均具有显著的降

温效应,绿地斑块平均 LST 比城区低 2.18 K,降温幅度在 2.9~8.3 K 之间,而绿地斑块的降温距离在 270~450 m 之间。

(2) 长三角一体化核心区各大城市绿地节能减碳量为 267 656.12 t · d⁻¹,每个城市绿地平均节能减碳量约 9 913.19 t · d⁻¹。各大城市中,上海市城市绿地节能减碳量最大,达 47 374.83 t · d⁻¹,其余依次为温州、宁波、南京、杭州、台州、苏州、无锡和合肥,宣城、绍兴、嘉兴、池州、马鞍山和安庆等城市绿地节能减碳量均在 2 000 t · d⁻¹ 以下。

(3) 绿地斑块外围与斑块自身具有近似的节能减碳量,且随着到绿地距离的增加,节能减碳量逐渐减少。

上述研究结果可表征夏季晴朗天气下中心城区由于降温效应而产生的节能减碳量,但由于不同气象条件下降温效应存在差异,今后有待开展更为细致的研究,以精确核算高温季节城区绿地的节能减碳价值。此外,由于绿地斑块外围的景观组成及结构对绿地降温效应有一定影响,因此今后尚需对节能减碳量的影响因素进行深入分析。

参考文献:

- [1] 程叶青,王哲野,张守志,等.中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J].地理学报,2013,68(10):1418-1431. [CHENG Ye-qing, WANG Zhe-ye, ZHANG Shou-zhi, et al. Spatial Econometric Analysis of Carbon Emission Intensity and Its Driving Factors from Energy Consumption in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(10): 1418-1431.]
- [2] 向俊杰.碳达峰碳中和中节能管理要素分析[J].上海节能,2021(12):1323-1327. [XIANG Jun-jie. Analysis on Energy Conservation Management Elements for Carbon Peak and Carbon Neutrality[J]. Shanghai Energy Conservation, 2021(12): 1323-1327.]
- [3] 郑德凤,刘晓星,王燕燕,等.中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局[J].生态学报,2020,40(2):447-458. [ZHENG De-feng, LIU Xiao-xing, WANG Yan-yan, et al. Assessment of Carbon Footprint Size, Depth and Its Spatial-Temporal Pattern at the Provincial Level in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 447-458.]
- [4] BAYAT A T, VAN GILS H, WEIR M. Carbon Stock of European Beech Forest: A Case at M. Pizzalto, Italy[J]. APCBEE Procedia, 2012, 1: 159-168.
- [5] DEVI N B, LEPCHA N T, MAHALIK S S, et al. Urban Sacred Grove Forests are Potential Carbon Stores: A Case Study from Sikkim Himalaya[J]. Environmental Challenges, 2021, 4: 100072.
- [6] 张彪,谢紫霞,高吉喜.上海城市森林植被固碳功能及其抵消能源碳排放效果评估[J].生态学报,2021,41(22):8906-8920. [ZHANG Biao, XIE Zi-xia, GAO Ji-xi. Assessment on the Carbon Fixation of Urban Forests and Their Efficacy on Offsetting Energy Carbon Emissions in Shanghai[J]. Acta Ecologica Sinica,

- 2021, 41(22): 8906–8920.]
- [7] 周健, 肖荣波, 庄长伟, 等. 城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果: 以广州为例[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5865–5873. [ZHOU Jian, XIAO Rong-bo, ZHUANG Chang-wei, *et al.* The Carbon Sink of Urban Forests and Efficacy on Offsetting Energy Carbon Emissions from City in Guangzhou[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5865–5873.]
- [8] TRILICA A, HUTYRA L R, MORREALE L L, *et al.* Current and Future Biomass Carbon Uptake in Boston's Urban Forest[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136196.
- [9] GHOSH S, DAS A. Modelling Urban Cooling Island Impact of Green Space and Water Bodies on Surface Urban Heat Island in a Continuously Developing Urban Area[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2018, 4(2): 501–515.
- [10] KONG F H, YIN H W, JAMES P, *et al.* Effects of Spatial Pattern of Greenspace on Urban Cooling in a Large Metropolitan Area of Eastern China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 128: 35–47.
- [11] ZHANG Z, LÜ Y M, PAN H T. Cooling and Humidifying Effect of Plant Communities in Subtropical Urban Parks[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(3): 323–329.
- [12] QIU KB, JIA B Q. The Roles of Landscape both Inside the Park and the Surroundings in Park Cooling Effect[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 52: 101864.
- [13] KO Y, LEE J H, MCPHERSON E G, *et al.* Long-Term Monitoring of Sacramento Shade Program Trees: Tree Survival, Growth and Energy-Saving Performance[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 183–191.
- [14] ZHANG B, XIE G D, GAO J X, *et al.* The Cooling Effect of Urban Green Spaces as a Contribution to Energy-Saving and Emission-Reduction: A Case Study in Beijing, China[J]. *Building and Environment*, 2014, 76: 37–43.
- [15] 贾宝全, 仇宽彪. 北京市平原百万亩大造林工程降温效应及其价值的遥感分析[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 726–735. [JIA Bao-quan, QIU Kuan-biao. The Cooling Effect of Plain Afforestation in the Beijing Project and Its Remote Sensing-based Valuation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(3): 726–735.]
- [16] LIN W Q, WU T H, ZHANG C G, *et al.* Carbon Savings Resulting from the Cooling Effect of Green Areas: A Case Study in Beijing[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 2148–2154.
- [17] CHANG C R, LI M H, CHANG S D. A Preliminary Study on the Local Cool-island Intensity of Taipei City Parks[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 386–395.
- [18] DU H Y, CAI W B, XU Y Q, *et al.* Quantifying the Cool Island Effects of Urban Green Spaces Using Remote Sensing Data[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 24–31.
- [19] GONG P, LIU H, ZHANG M N, *et al.* Stable Classification with Limited Sample: Transferring a 30-m Resolution Sample Set Collected in 2015 to Mapping 10-m Resolution Global Land Cover in 2017[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370–373.
- [20] Landsat Missions. Landsat 8 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide, Version 2.0[R]. [s. l.]: Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2020.
- [21] PENG J, XIE P, LIU Y X, *et al.* Urban Thermal Environment Dynamics and Associated Landscape Pattern Factors: A Case Study in the Beijing Metropolitan Region[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145–155.
- [22] LI X M, ZHOU W Q, OUYANG Z Y, *et al.* Spatial Pattern of Greenspace Affects Land Surface Temperature: Evidence from the Heavily Urbanized Beijing Metropolitan Area, China[J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(6): 887–898.
- [23] GILL S E, RAHMAN M A, HANDLEY J F, *et al.* Modelling Water Stress to Urban Amenity Grass in Manchester UK under Climate Change and Its Potential Impacts in Reducing Urban Cooling[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(3): 350–358.
- [24] 李凤仪, 李宗慧, 杨金明. 青岛滨海绿地降温效应及其影响因素: 以市南区与市北区为例[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2021, 38(3): 209–217. [LI Feng-yi, LI Zong-hui, YANG Jin-ming. Study on the Cooling Effect and Influencing Factors of Green Space in Qingdao Coastal Area: Shi'nan and Shibe Districts as an Example[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2021, 38(3): 209–217.]

作者简介: 仇宽彪(1986—), 男, 江苏镇江人, 高级工程师, 博士, 主要从事城市景观生态研究。E-mail: qiukuanbiao@126.com

(责任编辑: 许 素)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0491

赵一行, 高润艺, 李海东, 等. 江阴市土地利用对碳储量的影响及优化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1290–1298.

ZHAO Yi-xing, GAO Run-yi, LI Hai-dong, et al. Study on Carbon Storage Change and Optimization of Land Use in Jiangyin City[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1290–1298.

江阴市土地利用对碳储量的影响及优化研究

赵一行¹, 高润艺^{2①}, 李海东³, 揣小伟^{2,4}, 郭晓敏⁵ (1. 河北省地矿局国土资源勘查中心, 河北 石家庄 050081; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 3. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 4. 自然资源部碳中和与国土空间优化重点实验室, 江苏 南京 210023; 5. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 20 世纪 90 年代以来, 土地利用变化的碳效应及其对气候变化的影响一直是国内外学术界关注的热点。在碳中和目标下, 如何通过优化土地利用来达到增碳减排的目的, 是当前学术界和相关部门面临的机遇和挑战。以江阴市为例, 分析 2000—2015 年土地利用变化及其对应的植被碳储量和土壤碳储量变化, 并对未来的土地利用结构提出优化建议, 主要结论如下: 江阴市 2000—2015 年耕地面积逐年减少, 主要转化为建设用地, 建设用地面积逐年增加, 其余土地利用类型变化幅度较小。由于土地利用变化, 江阴市植被碳储量减少 7.50 万 t, 土壤碳储量减少 0.76 万 t。其中, 耕地、林地转出导致的碳储量损失最大。根据江阴市历史土地利用变化, 基于碳储量最大化目标提出土地利用结构优化建议。优化模式下, 2030 年江阴市生态系统碳储量将达 445.25 万 t, 较自然增长模式增加 0.29 万 t。

关键词: 碳储量; 土地利用变化; 优化研究; 江阴市

中图分类号: X22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1290-09

Study on Carbon Storage Change and Optimization of Land Use in Jiangyin City. ZHAO Yi-xing¹, GAO Run-yi^{2①}, LI Hai-dong³, CHUAI Xiao-wei^{2,4}, GUO Xiao-min⁵ (1. Land and Resources Exploration Center, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Shijiazhuang 050081, China; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 4. Laboratory of Carbon Neutralization and Territory Space Planning, Ministry of Natural Resources Nanjing 210046, China; 5. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The carbon effect of land use change and its impact on climate change have been the focus of academic circles at home and abroad since the 1990s. Under the goal of carbon neutralization, how to achieve the purpose of carbon increase and emission reduction by optimizing land use is a new opportunity and challenge for the current academic research and natural resources authorities. Taking Jiangyin City as an example, this paper analyzes land use change of the city from 2000 to 2015 and its corresponding changes of vegetation carbon and soil carbon storage, and puts forward optimization suggestions for the future land use structure. The main conclusions are as follows: (1) From 2000 to 2015, the cultivated land area in Jiangyin City decreased year by year, mainly transformed into construction land, and the change range of other land use types is small. (2) Due to land use change, the carbon storage of vegetation in Jiangyin City decreased by 75 009.49 t and the carbon storage of soil decreased by 7 641.56 t. Among them, the transfer out of cultivated land and forest land led to the largest loss of carbon storage. (3) According to the historical land use change of Jiangyin City, based on the goal of maximizing carbon reserves, this paper puts forward suggestions on the optimization of land use structure in Jiangyin City. The results show that under the optimization mode, the carbon reserves of Jiangyin ecosystem will reach to 4.55 million t in 2030, an increase of 2 900 t compared with the natural growth mode.

Key words: carbon storage; land use change; optimization research; Jiangyin City

收稿日期: 2022-05-17

基金项目: 关键地球物质循环前沿科学中心科研基金(DLTDYP2101)

① 通信作者 E-mail: gry9826@163.com

全球变暖对生态环境产生一系列负面影响,低碳减排已成为国际科学界和各国政府关注的焦点^[1]。由于经济快速发展和历史遗留的能源结构问题等原因,我国碳排放量位居世界首位^[2]。2020 年 9 月,国家主席习近平在第 75 届联合国大会一般性辩论上宣布中国二氧化碳排放量力争于 2030 年前达到峰值,2060 年前实现碳中和,此后又在多个重大国际场合反复重申,并强调要坚决落实。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》将“碳排放达峰后稳中有降”列入中国 2035 年远景目标。中央经济工作会议把做好碳达峰碳中和工作列为 2021 年重点任务之一,对应对气候变化工作做出明确部署^[3]。

土地利用变化对碳排放具有重要影响^[4]。植被和土壤在调节全球碳平衡和缓解气候变化方面发挥了重要作用,土地利用变化会导致生态系统植被和土壤的变化,高生物量用地类型如林地、草地等生态用地向低生物量用地类型的转变往往伴随着生态系统碳储量的释放^[5]。具体来看,土地利用变化、毁林等活动已经导致了陆地生态系统碳储量向大气的释放。目前,土地利用的碳排放约占全球碳排放总量的 10%,是地球系统重要的碳排放来源,而国土空间格局优化是推进碳中和的重要手段之一^[6-10]。20 世纪 90 年代以来,土地利用变化及其对气候变化的影响一直是国内外的学术热点^[11-15]。目前已有多位学者对此展开研究,如杨庆媛^[16]对我国 1996—2005 年土地利用变化与碳排放的研究表明,土地非农化利用和开发会增加碳排放;赫晓慧等^[17]采用灰色预测模型,动态评估了我国中原城市群在不同情景下的碳储量变化趋势,结果显示合理的土地管理政策有助于区域碳蓄积;GAO 等^[18]发现,造成长江三角洲城市群碳储量损失的主要原因是耕地城市化,且在未来 4 种城市扩张方式下碳储量都将进一步损失。总体而言,土地利用变化制约着生态系统植被和土壤碳排放,土地利用造成的碳排放占全球碳排放总量的 10%,而国土空间格局优化是推进碳减排的重要手段之一。

以土地利用为切入点开展碳源碳汇效应研究,探索低碳用地发展路径与策略,将对碳中和的实现起到积极的推进作用,符合国家绿色发展和生态文明建设战略需求。江阴市作为中国经济最发达的县级市之一,近年来建设用地扩张剧烈,给当地的土地供应和区域低碳发展带来了巨大压力。该研究以江阴市为例,对 2000—2015 年土地利用变化情

况及其对应的碳储量释放展开研究,并以 2015 年土地利用碳储量为基准,为未来江阴市土地利用优化方案提出相关政策建议。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

江阴市为江苏省省辖县级市,由无锡市代管,位于无锡市北侧,介于北纬 31°40′34″~31°57′36″,东经 119°59′~120°34′30″之间,区位优势优越,长期位居全国百强县前列。2020 年江阴市实现地区生产总值 4 113.75 亿元,人均地区生产总值达 24.88 万元。2022 年江阴成为我国 GDP 十强县,排名第 2 位。

1.2 数据来源

研究使用的土地利用数据来自于中科院地理科学与自然资源研究所,数据精度为 30 m,一级土地利用分类的综合准确率高于 93%,二级土地利用分类的综合准确率高于 90%。笔者仅使用土地利用一级分类,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类。植被碳密度数据主要基于笔者所在课题组近年来的 800 多个研究项目,几乎涵盖了所有的植被类型,最终形成了全国植被碳密度图^[19-20],笔者从中截取了江阴市的植被碳密度图,在 ArcGIS 10.5 平台将江阴市植被碳密度图与土地利用类型图进行交叉分析后,对江阴市各用地类型的植被碳密度进行了测算。江苏省地质调查院和中科院南京土壤研究所提供了江阴市 140 个不同深度土壤剖面的样点数据,包括每个样点的土壤类型、土壤有机碳(TOC)含量、容重、经纬度、土地利用类型、地表景观等信息。

由于研究数据主要来源于 2005 年左右,为了使数据具有一定的代表性,提高土地结构优化的准确性,故选取 2000—2015 年作为历史研究期。

1.3 土壤有机碳估算方法

土壤有机碳密度是指单位面积(1 m²)一定厚度土层中的有机碳含量,由于排除了面积因素的影响而以土体体积为基础来计量,土壤碳密度已成为评价土壤有机碳的重要指标。该研究分别计算表层(0~20 cm)土壤碳密度和碳储量,具体计算方法如下:

(1)首先计算每个样点的碳密度。对于具有一定剖面深度(D)的土壤样点而言,其有机碳密度(C_D)计算公式为

$$C_D = T_D \times \rho \quad (1)$$

式(1)中, C_D 为深度 D 处土壤样点的碳密度,kg·

m^{-3} ; T_D 为深度 D 处土壤有机质含量, %; ρ 为土壤容重, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(2) 利用 ArcGIS 10.5 软件将 140 个土壤样点信息导入数字化后的江阴市土壤图, 该图共包含 44 个土壤亚类, 每个土壤斑块包含了数量不等的土壤样点, 采取空间插值的方法生成不同时期的全境土壤有机碳密度图。

(3) 得到碳密度及各类型土壤面积数据后, 即可求出江阴市总土壤碳储量 (C_{total}), 其计算公式为

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \times D。 \quad (2)$$

式(2)中, C_i 为不同土壤亚类的碳密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; S_i 为不同土壤亚类的面积, m^2 。

2 结果与分析

2.1 江阴市土地利用变化

由表 1 可知, 2000—2015 年, 江阴市土地利用发生较大变化, 耕地面积逐年增加, 建设用地面积逐年减少; 林地和水域面积变化较小, 但总体而言有所增加; 未利用地面积几乎没有变化; 草地面积

在 2000—2010 年期间变化不大, 但在 2015 年有所减少。2000 年江阴市耕地占比达 67.25%, 为江阴市最主要的土地利用类型, 建设用地次之, 但与耕地面积相比差距较大, 仅占 22.63%, 林地、草地、水域等占比很小, 总共只占 10% 左右。2000—2015 年江阴市耕地面积占比持续下降, 同时建设用地占比增加。2015 年江阴市主要土地利用类型仍然是耕地和建设用地, 但两者之间的差距缩小了许多, 耕地占比减少到 51.71%, 建设用地占比则增加到 37.46%。2000—2015 年林地、草地、水域以及未利用地占比几乎没有变化。

根据 2000—2015 年江阴市土地利用转移矩阵 (表 2), 建设用地的扩张主要是通过占用耕地的方式实现, 建设用地转入面积 221.20 km^2 , 其中有 149.43 km^2 来自耕地。从空间分布来看, 耕地向建设用地的转移主要是在原有建设用地的基础上向外扩张。耕地由于建设用地的扩张大量减少, 还有部分耕地转化为林地、水域以及未利用地, 转出面积为 157.75 km^2 , 转入面积仅为 5.84 km^2 。

表 1 2000—2015 年江阴市土地利用类型分布

Table 1 Distribution of land use types in Jiangyin City from 2000 to 2015

土地利用类型	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%
耕地	657.45	67.25	602.55	61.63	550.70	56.33	505.54	51.71
林地	26.26	2.69	27.42	2.80	27.39	2.80	29.54	3.02
草地	2.04	0.21	2.04	0.21	2.04	0.21	1.70	0.17
水域	70.58	7.22	69.14	7.07	69.14	7.07	72.58	7.42
建设用地	221.20	22.63	276.38	28.27	328.26	33.58	366.27	37.46
未利用地	0.15	0.02	0.15	0.02	0.15	0.02	2.05	0.21

表 2 2000—2015 年江阴市土地利用转移矩阵

Table 2 Land use transfer matrix of Jiangyin City from 2000 to 2015

土地利用类型							km^2
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
耕地	499.70	3.74	0.00	2.95	149.43	1.64	657.45
林地	0.01	25.63	0.00	0.00	0.44	0.18	26.26
草地	0.00	0.00	1.69	0.00	0.35	0.00	2.04
水域	1.05	0.00	0.00	68.98	0.55	0.00	70.58
建设用地	4.78	0.17	0.00	0.66	215.51	0.08	221.20
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.15
总计	505.54	29.54	1.70	72.58	366.27	2.05	977.68

从空间分布 (图 1) 来看, 2000—2015 年面积增长最为明显的是建设用地, 主要是在江阴北部以及东部原本的建设用地基础上大面积增加, 南部和西部原有的建设用地也向周边扩张。林地和草地仅在江阴中部小面积分布, 2000—2010 年其空间分布

和占地面积基本无变化, 但到 2015 年江阴南部有较明显的一块区域从建设用地和耕地转化为林地。未利用地在 2000—2010 年间仅在江阴西部有小面积分布, 2015 年则在北部和东部的建设用地中出现了新的未利用地。

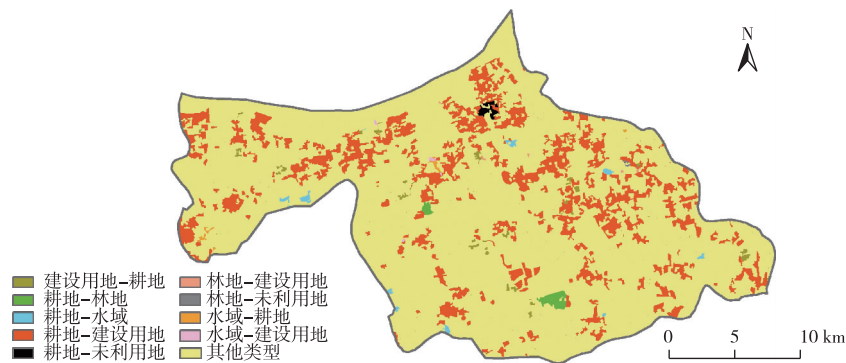


图 1 江阴市主要土地利用转移类型的空间分布
Fig. 1 Main land transfer types in Jiangyin City

2.2 土地利用变化对植被碳储量的影响

对江阴市植被碳密度数据及土地利用数据进行叠加分析,得出江阴市各土地利用类型的植被有机碳密度。耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地的植被有机碳密度分别为 0.55、1.94、0.21、0.35、0.01、0.01 kg·m⁻²,平均碳密度值为 1.79 kg·m⁻²。各土地利用类型的植被有机碳密度大小依次为林地>耕地>水域>草地>未利用地>建设用地。

根据江阴市土地利用变化转移矩阵以及不同土地利用类型的植被碳储量特征,测算出江阴市土地利用变化对植被碳储量的影响。需要说明的是,对每一类土地利用类型来说,这里计算的碳储量变化值仅代表各类用地增量部分的植被碳储量,并没有考虑土地利用转化前后的碳储量增减(土壤碳储量计算同理),2000—2015 年土地利用变化带来的

植被碳储量变化见表 3。

如果不考虑土地利用转化前后的植被碳储量增减,由于土地利用变化,2000—2015 年江阴市植被有机碳储量减少 75 009.49 t,土地利用变化造成了植被有机碳的损失。各土地利用类型转出类型汇总分析结果显示,耕地转出类型合计使植被有机碳储量减少最多,达 76 963.41 t,其中耕地转变为建设用地导致植被碳储量减少 80 693.98 t,林地、草地的转出使植被有机碳储量分别减少 1 206.01、69.30 t。建设用地的转出使植被有机碳储量分别增加 3 137.57、24.91 t。其中耕地向建设用地和水域、林地向建设用地和未利用地、草地向建设用地、水域向建设用地的转化使植被有机碳减少,其中建设用地对其他土地利用类型的占用使植被有机碳损失最为严重,应该引起重视。

表 3 江阴市土地利用变化对植被碳储量的影响

Table 3 Impact of land use change on vegetation carbon storage in Jiangyin City							t
土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
耕地		5 192.90	-0.31	-578.47	-80 693.98	-883.55	-76 963.41
林地	-11.26		0.00	-1.43	-840.71	-352.61	-1 206.01
草地	0.00	0.00		0.00	-69.30	0.00	-69.30
水域	210.78	0.00	-0.13		-185.74	0.00	24.91
建设用地	2 582.12	331.77	0.00	223.69		0.00	3 137.58
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	66.74		66.74

2.3 土地利用变化对土壤碳储量的影响

将江阴市土壤碳密度数据在 ArcGIS 10.5 平台进行克里金插值,得到江阴市土壤碳密度分布图(图 2)。再利用 ArcGIS 10.5 软件将土壤碳密度图与土地利用类型图进行叠加分析,分区统计不同土地利用类型表层(0~20 cm)土壤平均碳密度,得到江阴市土壤碳储量(表 4)。

根据江阴市土地利用转移矩阵以及不同土地

利用类型土壤碳密度差异,测算出江阴市土地利用变化对土壤碳储量的影响(表 5)。表 5 显示,如果不考虑土地利用转化前后的土壤碳储量增减,由于土地利用变化,2000—2015 年江阴市土壤有机碳储量减少 7 641.56 t。各土地利用转出类型汇总分析结果显示,耕地转出类型合计使土壤有机碳储量减少最多,达 8 188.48 t,草地转出类型使土壤有机碳储量减少 225.28 t,建设用地转出类型使土壤有机

碳储量减少 60.99 t,未利用地转出类型使土壤有机碳储量减少 0.47 t。林地、水域的转出合计使土壤有机碳储量分别增加 36.62、797.03 t。其中耕地向林地、水域、建设用地,林地向水域、建设用地,草地

向建设用地,建设用地向水域,未利用地向建设用地的转化使土壤有机碳减少,不利于碳汇的形成,其中建设用地对耕地的占用使土壤有机碳损失最为严重,占减少总量的 90.50%,应该引起重视。

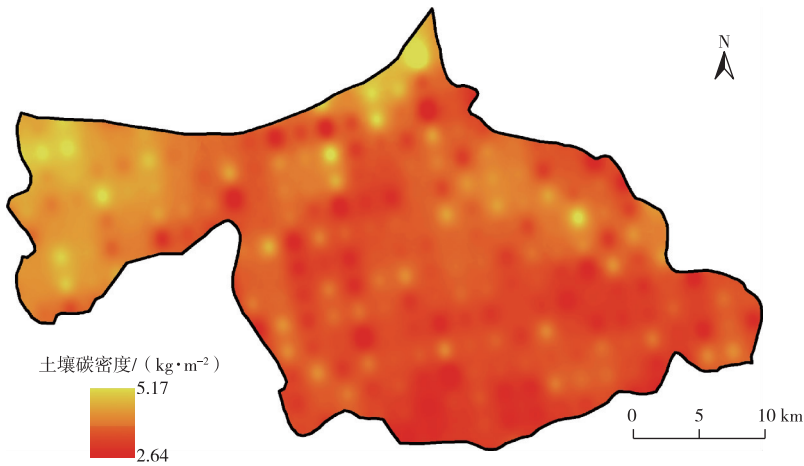


图 2 江阴市土壤碳密度分布图

Fig. 2 Distribution map of soil carbon density in Jiangyin City

2.4 土地利用变化对生态系统碳储量的影响

基于上述研究结果,整理 2000—2015 年江阴市土地利用变化及其碳储量变化,汇总得到江阴市整体的生态系统碳储量变化(表 6)。2000—2015 年江阴市生态系统碳储量整体减少 8.3 万 t,其中植被碳储量减少 7.5 万 t,占生态系统碳储量损失的 90.75%。耕地是变化最为剧烈的土地利用类型,主要是向建设用地的转出,这也导致了最大的碳储量损失,约 8.8 万 t。虽然仅有 0.63 km² 的林地发生了变化,但其导致了 0.12 万 t 的生态系统碳储量损失。这表明在未来对土地利用管理的过程中,应当进一步重视对林地资源的保护,控制其转出。同

时,草地的转出也导致了生态系统碳储量的损失,而其他地类的转出则有助于碳储量的有效蓄积。

表 4 江阴市土壤碳储量变化

Table 4 Change of soil carbon storage in Jiangyin City

万 t

土地利用类型	2000 年	2015 年
耕地	283.72	218.17
林地	11.26	12.66
草地	1.00	0.84
水域	26.84	27.60
建设用地	94.43	156.37
未利用地	0.07	0.93

表 5 江阴市土地利用变化对土壤碳储量的影响

Table 5 Effect of land use change on soil carbon storage in Jiangyin City

t

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
耕地		-108.94	0.54	-1 511.90	-6 917.00	348.82	-8 188.48
林地	0.24		0	-0.44	-7.46	44.28	36.62
草地	0	0		0	-225.28	0	-225.28
水域	540.92	0	1.01		255.10	0	797.03
建设用地	221.34	2.94	0	-307.22		21.95	-60.99
未利用地	0	0	0	0	-0.47		-0.47

3 基于碳储量最大化的土地利用结构优化

3.1 土地利用结构优化模型构建

土地利用结构优化是指通过土地利用类型、土

地管理方式等人为因素改变地表植被类型,间接改变土壤物理结构、土壤微生物、土壤团聚体等性质,从而影响土壤有机碳的含量和稳定性,以期提高土地生态系统有机碳储量。该研究采用线性规划方

法,建立土地利用结构优化模型,并提出优化措施。模型将土地利用的碳储量或者碳排放量作为目标函数,将不同土地利用类型的面积作为决策变量,模型的一般表达公式为

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij}X_j = b_j \\ X_j \geqslant 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, X_j 为决策变量,即土地利用类型面积,

km^2 ; a_{ij} 为约束系数; b_j 为约束常数。

求取使目标函数 $F(x) = \sum_{j=1}^n C_j X_j = \max$ 的一组解 $\{X_j\}$,这组解称为最优解。其中, C_j 为土地利用类型 j 的碳密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $F(x)$ 为土地利用碳储量,万 t;max 表示此处是在碳储量目标最大化基础上建立的目标函数。

表 6 江阴市土地利用变化及其对生态系统碳储量的影响

Table 6 Land use change and its impact on ecosystem carbon storage in Jiangyin City

土地利用转移类型	面积/ km^2	植被碳储量变化/t	土壤碳储量变化/t	生态系统碳储量变化/t
耕地-林地	3.74	5 192.90	-108.94	5 083.96
耕地-草地	0	-0.31	0.54	0.23
耕地-水域	2.95	-578.47	-1 511.90	-2 090.37
耕地-建设用地	149.43	-80 693.98	-6 917.00	-87 611.00
耕地-未利用地	1.64	-883.55	348.82	-534.73
小计	157.75	-76 963.41	-8 188.48	-85 151.90
林地-耕地	0.01	-11.26	0.24	-11.02
林地-草地	0	0	0	0
林地-水域	0	-1.43	-0.44	-1.87
林地-建设用地	0.44	-840.71	-7.46	-848.17
林地-未利用地	0.18	-352.61	44.28	-308.33
小计	0.63	-1 206.01	36.62	-1 169.39
草地-耕地	0	0	0	0
草地-林地	0	0	0	0
草地-水域	0	0	0	0
草地-建设用地	0.35	-69.30	-225.28	-294.58
草地-未利用地	0	0	0	0
小计	0.35	-69.30	-225.28	-294.58
水域-耕地	1.05	210.78	540.92	751.70
水域-林地	0	0	0	0
水域-草地	0	-0.13	1.01	0.88
水域-建设用地	0.55	-185.74	255.10	69.36
水域-未利用地	0	0	0	0
小计	1.60	24.91	797.03	821.94
建设用地-耕地	4.78	2 582.12	221.34	2 803.46
建设用地-林地	0.17	331.77	2.94	334.71
建设用地-草地	0	0	0	0
建设用地-水域	0.66	223.69	-307.22	-83.53
建设用地-未利用地	0.08	0	21.95	21.95
小计	5.70	3 137.57	-60.99	3 076.58
未利用地-耕地	0	0	0	0
未利用地-林地	0	0	0	0
未利用地-草地	0	0	0	0
未利用地-水域	0	0	0	0
未利用地-建设用地	0	66.74	-0.47	66.27
小计	0	66.74	-0.47	66.27
合计	166.02	-75 009.49	-7 641.56	-82 651.10

土地利用结构优化的目的是使土地利用结构趋于合理,该研究选取碳储量为目标效益函数,选

择不同土地利用类型的面积作为决策变量,根据当地的自然和社会经济状况建立约束条件,进行土地

利用结构优化设计。依据前文中确定的主要土地利用类型,选取以下 6 个决策变量:耕地 X_1 、林地 X_2 、草地 X_3 、水域 X_4 、建设用地 X_5 、未利用地 X_6 。

考虑到生态环境建设的需要,对 2030 年土地利用结构进行重新调整。

(1) 总面积:江阴市为滨港口花园城市,在不发生行政区划变化的前提下,总面积基本保持不变。将江阴市 2030 年总面积确定为 977.60 km^2 。

(2) 耕地:在低碳情景下应强化耕地资源保护,实施严格的耕地保护政策。一方面建设用地的外延扩展必然占用大量的耕地资源,耕地数量保持下降趋势。随着农村人口的下降,农村居民点用地需求从理论上是减少的,可以通过土地复垦将其整理为耕地,所以耕地的减少速度会得到遏制。以基本农田保护为原则并结合 2000 年以后的耕地变化速度,将 2030 年江阴市的耕地保有量确定为 351.55 km^2 ,此保有量主要是根据粮食需求进行的预测,笔者将其作为耕地的下限,将现有的耕地面积 503.39 km^2 作为 2030 年耕地面积的上限,据此建立耕地的约束条件方程: $351.55 \leq X_1 \leq 505.54$ 。

(3) 林地:考虑到生态环境建设要求,森林覆盖率要不断提高,2030 年林地面积至少应不低于现有水平 (29.54 km^2),将此作为林地面积的下限。根据 2000 年以后林地面积的平均变化速度,将增加 3.27 km^2 后的林地面积作为 2030 年林地面积的上限,即 32.82 km^2 ,据此建立林地的约束条件方程: $29.54 \leq X_2 \leq 32.82$ 。

(4) 草地:江阴市的草地面积较少,且变化缓慢。鉴于草地面积已所剩有限以及政府对生态环境保护的重视,未来草地面积减少的趋势会得到遏制。据此假设 2030 年草地面积会有所增加,面积不低于 1.70 km^2 。但考虑到经济发展的需要,且依据 2000 年以后草地面积的平均增长速度,预计 2030 年草地面积可增加 0.34 km^2 ,将增加后的草地面积作为 2030 年面积的上限,即 2.04 km^2 。据此建立草地的约束条件方程: $1.70 \leq X_3 \leq 2.04$ 。

(5) 水域:2000—2015 年水域面积发生少量的变化,期间有增有减,变化不显著。水域的扩张主要是受近年来水产养殖业发展的影响,许多草地被挖成坑塘;而水域转为耕地是由于随着江苏滨海海岸线的东移,水产养殖用地(尤其是海水养殖用地)转为水田用地。结合 2015 年实际水域面积,预计 2030 年水域面积不少于 72.58 km^2 。且根据水域面积的历年变化情况,预计 2030 年水域面积将增加

2.00 km^2 ,将增加后的面积作为上限值 74.44 km^2 ,建立水域的约束条件方程: $72.58 \leq X_4 \leq 74.58$ 。

(6) 建设用地:未来经济增长对城镇用地的需求强劲,城镇用地将保持快速增长的趋势,按照 2000 年以后建设用地的平均增长趋势预测,2030 年建设用地将达到 511.34 km^2 。按照 2005—2010 年的增长速度,2030 年建设用地为 521.82 km^2 。据此建立建设用地的约束条件方程: $511.34 \leq X_5 \leq 521.82$ 。

(7) 未利用地:江阴市未利用地面积较小,考虑土地利用的高效集约化趋势,江阴市 2030 年未利用地面积会减少,至少会小于现有未利用地面积,据此建立未利用地的约束条件方程: $0 \leq X_6 \leq 2.05$ 。

3.2 基于碳储量最大化的土地利用结果优化

根据对各地类有机碳密度的计算结果,建立陆地生态系统碳储量最大化的目标函数: $\max(Z) = 4.87X_1 + 6.23X_2 + 5.13X_3 + 4.15X_4 + 4.28X_5 + 4.54X_6$ 。根据以上目标函数和各变量的约束条件,采用 Lingo 14.0 软件对以上方程进行求解,得到 2030 年江阴市碳储量最大化的土地利用结构优化方案(表 7)。

表 7 2030 年碳储量最大化的土地利用优化方案

Table 7 Land use optimization structure to maximize carbon reserves in 2030

土地利用类型	面积/ km^2	碳储量/万 t
耕地	358.90	174.78
林地	32.82	20.45
草地	2.04	1.05
水域	72.58	30.12
建设用地	511.34	218.85
未利用地	0	0
合计	977.68	445.25

由表 7 可知,在碳储量最大化的目标函数下,碳储量最大为 445.25 万 t。2030 年耕地面积减少,林地、草地、建设用地面积均增加,水域用地面积保持不变,未利用面积减少至 0。其中,建设用地的碳储量最大,为 218.85 万 t;其次为耕地,碳储量为 174.78 万 t;林地和水域的碳储量分别为 20.45 万和 30.12 万 t;草地碳储量最少,为 1.05 万 t。

3.3 减排效果评价

将 2030 年江阴市低碳土地利用结构优化方案分别与 2015 年土地利用结构、自然增长模式下确定的 2030 年土地利用结构进行比较,分析优化方案的减排效果(表 8)。

表 8 基于碳储量最大化的土地利用结构优化减排效果

Table 8 Optimization of land use structure and emission reduction effect based on maximization of carbon reserves

土地利用类型	土地利用结构/km ²			碳储量/万 t		
	2015 年现状	2030 年自然增长模式	2030 年优化模式	2015 年现状	2030 年自然增长模式	2030 年优化模式
耕地	505.54	353.63	358.90	246.20	172.22	174.78
林地	29.54	32.82	32.82	18.40	20.45	20.45
草地	1.70	1.36	2.04	0.87	0.70	1.05
水域	72.58	74.58	72.58	30.12	30.95	30.12
建设用地	366.27	511.34	511.34	156.76	218.85	218.85
未利用地	2.05	3.95	0.00	0.93	1.79	0.00
合计	977.68	977.68	977.68	453.29	444.96	445.25

表 8 显示,基于碳储量最大化的土地利用结构方案能提高江阴市的碳储量水平,到 2030 年其碳储量比自然增长模式下增加 0.29 万 t,说明优化模式下江阴市陆地生态系统碳储量明显增加。

4 结论

对江阴市 2000—2015 年的土地利用变化及陆地生态系统土壤和植被的碳储量进行了估算,同时对未来江阴市土地利用提出了优化方案。结果显示:

- (1) 2000—2015 年江阴市 16.98% 的土地面积发生变化,其中耕地向建设用地的转变最为显著。
- (2) 江阴市土地利用变化共造成生态系统碳储量减少 82 651.10 t,主要来自于耕地、林地向外转出,尤其是耕地向建设用地的转变造成碳储量损失 87 611.00 t。
- (3) 基于历史土地利用变化,碳储量最大化目标下的土地结构优化方案可使 2030 年江阴市生态系统碳储量较自然增长模式增加 0.29 万 t。

5 建议

为进一步减少人类活动对碳排放的影响,未来需继续重视土地管理从而减少生态系统碳储量的释放,具体可考虑如下对策:

- (1) 加强自然林地生态保护,严格控制林地转出,加强农田林网建设;同时,针对江阴市草地的下降趋势,要减少对草地的人为破坏,保护原生草地。
- (2) 改善耕作制度,采取合理的农作物轮作方式,提高土壤有机碳含量。
- (3) 加强对建设用地的总量控制,确定江阴市各城镇的蔓延边界,规范建设用地占用耕地的行为,防止建设用地扩张破坏原有自然生态系统。
- (4) 江阴市旅游资源种类丰富,独占性旅游资源有“徐霞客”“要塞”“华西”等,然而目前优势不明显,未来应进一步优化产业结构,大力发展旅

游业。

参考文献:

[1] DENNIS B,JOSEP P.The Physics and Ecology of Mining Carbon Dioxide from the Atmosphere by Ecosystems[J].Global Change Biology,2018,25(4):1191-1197.

[2] WANG B,HE L T,YUAN X C,*et al.*Carbon Emissions of Coal Supply Chain: An Innovative Perspective from Physical to Economic[J].Journal of Cleaner Production,2021,295:126377.

[3] MA X J,WANG C X,DONG B Y,*et al.*Carbon Emissions from Energy Consumption in China:Its Measurement and Driving Factors[J].Science of the Total Environment,2019,648:1411-1420.

[4] HONG C P,BURNEY J A,PONGRATZ J,*et al.*Global and Regional Drivers of Land-Use Emissions in 1961-2017[J].Nature,2021,589(7843):554-561.

[5] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].生态学报,2015,35(17):5898-5907.[MA Xiao-zhe,WANG Zheng.Progress in the Study on the Impact of Land-Use Change on Regional Carbon Sources and Sinks[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(17):5898-5907.]

[6] 荆文龙.面向低碳发展的郑州市土地利用优化模拟[D].开封:河南大学,2014.[JING Wen-long.Low-Carbon-Oriented Land Use Optimization of Zhengzhou[D].Kaifeng:Henan University,2014.]

[7] 李亚丽,秦耀辰.基于遥感和 GIS 的郑州市区土地利用时空变化研究[J].山西建筑,2013,39(12):194-196.[LI Ya-li,QIN Yao-chen.Study on Temporal and Spatial Variation of Land Use in Zhengzhou Based on RS and GIS[J].Shanxi Architecture,2013,39(12):194-196.]

[8] 於冉.基于碳排放峰值的城市建设用地扩展边界研究:以皖江城市带核心城市合肥市为例[D].南京:南京大学,2015.[YU Ran.Urban Construction Land Expansion Boundary Research Based on Carbon Emission Peak:A Case of Hefei City,the Core of Wan-jiang City Belt[D].Nanjing:Nanjing University,2015.]

[9] 王慧敏,曾永年.青海高原东部土地利用的低碳优化模拟:以海东市为例[J].地理研究,2015,34(7):1270-1284.[WANG Hui-min,ZENG Yong-nian.Land Use Optimization Simulation Based on Low-Carbon Emissions in Eastern Part of Qinghai Plateau[J].Geographical Research,2015,34(7):1270-1284.]

[10] ZHANG Y,LIU Y F,WANG Y H,*et al.*Urban Expansion Simulation towards Low-Carbon Development:A Case Study of Wu-han,China[J].Sustainable Cities and Society,2020,63:102455.

- [11] ZHAO R Q, HUANG X J, ZHONG T Y, *et al.* Carbon Footprint of Different Industrial Spaces Based on Energy Consumption in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 285–300.
- [12] ZHANG X, LI M, LI Q, *et al.* Spatial Threshold Effect of Industrial Land Use Efficiency on Industrial Carbon Emissions: A Case Study in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(17): 9368.
- [13] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 152–156. [SU Ya-li, ZHANG Yan-fang. Study on Effects of Carbon Emission by Land Use Patterns of Shaanxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 152–156.]
- [14] 单福征, 於家, 赵军, 等. 上海郊区快速工业化的土地利用及碳排放响应: 以张江高科技园区为例 [J]. *资源科学*, 2011, 33(8): 1600–1607. [SHAN Fu-zheng, YU Jia, ZHAO Jun, *et al.* Land Use Change in the Suburb Area and Its Impacts on Carbon Emissions in the Process of Industrialization: A Case Study of Zhangjiang Hi-Tech Park, Shanghai [J]. *Resources Science*, 2011, 33(8): 1600–1607.]
- [15] ZHANG R S, MATSUSHIMA K, KOBAYASHI K. Can Land Use Planning Help Mitigate Transport-Related Carbon Emissions? A Case of Changzhou [J]. *Land Use Policy*, 2018, 74: 32–40.
- [16] 杨庆媛. 土地利用变化与碳循环 [J]. *中国土地科学*, 2010, 24(10): 7–12. [YANG Qing-yuan. Land Use Changes and the Carbon Cycling [J]. *China Land Science*, 2010, 24(10): 7–12.]
- [17] 赫晓慧, 徐雅婷, 范学峰, 等. 中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2965–2976. [HE Xiao-hui, XU Ya-ting, FAN Xue-feng, *et al.* Temporal and Spatial Variation and Prediction of Regional Carbon Storage in Zhongyuan Urban Agglomeration [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2965–2976.]
- [18] GAO J, WANG L C. Embedding Spatio-temporal Changes in Carbon Storage into Urban Agglomeration Ecosystem Management: A Case Study of the Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117764.
- [19] LAI L, HUANG X J, YANG H, *et al.* Carbon Emissions from Land-Use Change and Management in China between 1990 and 2010 [J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601063.
- [20] ZHANG M, HUANG X J, CHUAI X W, *et al.* Impact of Land Use Type Conversion on Carbon Storage in Terrestrial Ecosystems of China: A Spatial-Temporal Perspective [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10233.

作者简介: 赵一行 (1982—), 男, 河北沙河人, 高级工程师, 硕士, 主要从事自然资源和国土空间规划研究。E-mail: hb-shzyx@sina.com

(责任编辑: 许 素)

录用定稿网络首发启事

为了以规范的网络期刊出版方式更快更好地确立作者的科研成果首发权, 全面提高学术论文的传播效率和利用价值, 本刊已与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司(简称电子杂志社)签署《CAJ-N 网络首发学术期刊合作出版协议》, 通过《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)正式出版本刊网络版。凡经本刊审定录用的稿件(录用定稿)均将首先以本刊网络版形式首发, 后视编排情况发布排版定稿和整期汇编定稿, 最后以本刊印刷版形式出版。

录用定稿网络首发之后, 在后续的排版定稿、整期汇编定稿网络版和印刷版中, 不得修改论文题目、作者署名、作者单位以及学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字修改。本刊郑重承诺, 对于录用定稿网络首发论文, 本刊印刷版将刊出最终稿。

为了辅助同行专家对稿件的评审以及帮助读者对论文内容的理解, 本刊建议作者投稿时提交因印刷版篇幅和载体限制未能刊发的, 能够进一步说明文中实验设计、案例分析、理论推导、观点论证等的补充材料, 包括文字资料(.doc, .docx)、数据表格(.xls, .xlsx)、图形文件(.jpg, .gif, .png, .tif, .bmp, .ai, .eps 等)、音频文件(.mp3, .wma, .avi 等)、视频文件(.mp4, .avi, .wmv 等)、程序代码(.txt)等。这些补充材料将与原文内容进行组织和封装, 形成一个有内在联系的增强论文, 通过网刊发布。

CAJ-N 是国家新闻出版广电总局批准创办、国家教育部主管、清华控股有限公司主办、《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司出版的由我国各类学术期刊组成的连续型网络出版物, 每篇网络首发论文将被赋予一个唯一的国际 DOI 编码, 而且在版本变动中, 其 DOI 维持不变。按国家有关网络连续型出版物管理规定, 网络首发论文视为正式出版论文, 本刊编辑部与电子杂志社共同为论文作者颁发论文网络首发证书。论文作者可以从中国知网下载或打印论文和证书, 作为正式发表的论文提交人事、科研管理等有关部门。

本刊编辑部

10 月 18 日

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0072

陈妍,王楠,赵立君,等.大娄山区水源涵养与生物多样性保护重要区村镇生态建设模式研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(10): 1299–1308.

CHEN Yan, WANG Nan, ZHAO Li-jun, et al. Research on Ecological Construction Model of Villages and Townships in the Important Area of Water Conservation and Biodiversity Conservation in Daloushan Mountains[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1299–1308.

大娄山区水源涵养与生物多样性保护重要区 村镇生态建设模式研究

陈妍¹, 王楠^{2①}, 赵立君², 冯阳¹, 李海东² (1. 南京工业大学建筑学院, 江苏 南京 211816; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 村镇生态建设是实现乡村振兴的关键步骤。村镇生态建设过程中的模式总结和影响因素研究,对促进区域生态、社会和经济系统协调发展具有重要理论和现实意义。以大娄山区水源涵养与生物多样性保护重要区(以下简称“大娄山区”)为研究对象,应用主成分分析(PCA)研究了村镇生态建设的影响因素,并通过“以面束点”和“以点带面”的思路进行了大娄山区村镇生态建设模式研究。结果表明:大娄山区村镇生态建设受人居环境因子(A1)、经济发展因子(A2)和生态环境因子(A3)综合影响,其中经济发展因子(A2)对村镇生态建设影响最显著;选取的大娄山区16个典型村镇中,娄山关街道(T5)、丙安镇(T8)、天台镇(T9)、茅台镇(T13)、黑树镇(T14)、以勒镇(T15)和水田镇(T16)的村镇建设受生态环境因子(A3)的影响显著。人居环境因子(A1)和经济发展因子(A2)也对娄山关街道(T5)、茅台镇(T13)具有显著影响;大娄山区村镇生态建设包括发展生态经济助推乡村振兴(L1)、恢复绿水青山激活乡村振兴(L2)、改善人居环境赋能乡村振兴(L3)和创新体制机制巩固乡村振兴(L4)4条路径及12种模式。研究结果对促进大娄山区生态建设和乡村振兴具有重要意义,也可为全国美丽乡村建设提供示范案例。

关键词: 村镇生态建设; 乡村振兴; 典型路径; 建设模式; 美丽宜居村镇

中图分类号: X826 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2022)10-1299-10

Research on Ecological Construction Model of Villages and Townships in the Important Area of Water Conservation and Biodiversity Conservation in Daloushan Mountains. CHEN Yan¹, WANG Nan^{2①}, ZHAO Li-jun², FENG Yang¹, LI Hai-dong² (1. College of Architecture, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: Ecological construction of villages and townships is a key step to realize rural revitalization. The study on the summarizing of models and influencing factors in the process of village ecological construction is of great theoretical and practical significance to promote the coordinated development of regional ecological, social and economic systems. In this study, the important area of water conservation and biodiversity protection in Daloushan mountains (hereinafter referred to as “Daloushan area”) was taken as the research object, and the Principal Component Analysis (PCA) was applied to study the influencing factors of its villages and townships’ ecological construction, and its villages and townships’ ecological construction mode was studied through the ideas of “binding points with area” and “from point to area”. The results show that: 1) The ecological construction of villages and townships in the Daloushan area is influenced by the combination of human settlements factors (A1), economic development factors (A2) and ecological environment factors (A3), of which the role of A2 is the most significant, among the 16 typical villages and townships selected in the Daloushan area, the villages construction of Loushanguan subdistrict (T5), Bing’an Township (T8), Tiantai Township (T9), Maotai Township (T13), Heishu Township (T14), Yile Township (T15) and Shuitian Township (T16) is more significantly in-

收稿日期: 2022-01-26

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1100104); 生态环境部部门预算项目(FPZY2022-03); 江苏省社会科学基金(20SHC006)

① 通信作者 E-mail: wnan926@qq.com

fluenced by the ecological environment factor (A3), the human settlement environment factor (A1) and economic development factor (A2) also have significantly effects on Loushanguan subdistrict (T5) and Maotai Township (T13); 2) The ecological construction of villages and townships in the Daloushan area includes four paths and twelve modes, which are developing ecological economy to boost rural revitalization (L1), restoring lucid waters and lush mountains to activate rural revitalization (L2), improving human living environment to empower rural revitalization (L3), and innovating institutional mechanism to consolidate rural revitalization (L4). The above research results are of great significance to promote ecological construction and rural revitalization in the Daloushan area, and also provide demonstration cases for the construction of beautiful villages nationwide.

Key words: ecological construction of rural and townships; rural revitalization; typical path; construction mode; beautiful and livable rural and townships

村镇生态建设和绿色转型发展过程中可能会面临严峻的资源供给紧张、生产环境恶化、生态环境污染与功能退化等问题^[1]。基于村镇生态安全评价和资源环境承载力研究,探索特色生态建设模式及其主要影响因素,可为巩固脱贫攻坚成果和支撑乡村振兴的环境管理提供决策支撑,对实现村镇可持续发展和美丽宜居村镇建设目标具有重要意义^[2-3]。村镇生态建设模式是指在不同村镇生态建设过程中,对具有鲜明区域特征的生态产业发展方式、经济发展和生态环境保护相协调的发展路径的理论性概括^[4]。村镇生态建设模式的形成受区域主导生态功能、产业发展适宜性等诸多因素的影响和制约,是多种因素综合作用的结果^[5]。从资源禀赋、制度厚度、产业发展等角度探讨村镇生态建设机理,重构村镇的生态空间、生产空间和生活空间,能够有效解决村镇绿色发展问题,实现村镇生态-社会-经济系统协调发展。

已有学者以典型村镇发展模式^[6-7]、村镇生态建设和环境治理^[8-10]、村镇转型发展与机理^[11-12]等为主题探讨重点生态区村镇建设的发展问题。例如,张龙江等^[7]通过“以点带面”和“以面束点”的研究思路,探究了村镇建设生态安全约束下的产业适宜性评价方法,并初步提出了茶产业模式、酒产业模式、特色农业模式、生态旅游模式、防灾减灾模式等不同的生态建设模式。张跃虎^[9]以太原村镇生态园林化发展为例,构建了生态绿化型、生态经济型、生态园林型和园林游憩型 4 种发展模式以及小康生态园林化村、镇 2 个标准。王习明等^[10]以海南省白沙县的美丽乡村建设为例,提出为推进国家重点生态功能区的新农村建设,必须完善生态补偿机制、优先安排资金、改造贫困村庄的住房、完善公共服务体系。然而,上述研究大多通过质性研究进行村镇生态发展的理论构建和案例剖析,从定量角度剖析典型重点生态功能区村镇生态建设的影响因素并构建发展模式的系统研究相对较少。

以大娄山区水源涵养与生物多样性保护重要区(以下简称“大娄山区”)为例,基于主成分分析法(PCA),定量研究大娄山区村镇生态建设的影响因素,并结合数据资料与实地调研,剖析区域村镇生态建设路径与模式,以期为促进区域经济、社会、生态系统协调演进提供理论参考。大娄山区位于川滇黔交界处,是赤水河与乌江水系、横江水系的分水岭以及重要的水源涵养区^[13],受过度垦殖和无序开发的影响,局部地区水土流失和水环境污染突出、生态系统退化。研究结果对于如何根据村镇建设的现状和特点,与当地资源承载能力和环境容量相平衡^[14],推动实现大娄山区村镇生态建设的新局面,促进大娄山区生态环境保护和可持续发展具有重要意义,也可为全国美丽乡村建设提供示范案例。

1 材料与方法

1.1 大娄山区及典型村镇概况

大娄山区位于川、滇、黔、渝三省一市接壤地带,地理位置为 26°35′~28°10′ N, 104°60′~107°12′ E,总面积 3.29 万 km²,属西南季风气候区,降水主要集中在北部,年均降水量为 1 080 mm。大娄山区地势南高北低,海拔介于 198~2 865 m 之间,水热条件较好,生物资源丰富,土地利用类型以林地为主,耕地和草地次之。大娄山区人均耕地少,可利用的土地极其稀缺,再加上长期对土地资源的不合理开发利用,村镇地区土地集约利用程度不高^[15],在区域经济发展水平、社会公共事业发展、基础设施等方面明显低于全国平均水平^[16],部分地区属于我国集中连片特困区,区域生态开发与生态环境保护及其他影响要素之间的矛盾较突出^[17]。行政区主要涉及重庆市的江津、綦江,贵州省的毕节、遵义,云南省的昭通,以及四川省泸州市,包括 17 个县市、357 个村镇。在大娄山区选择 16 个在经济水平、生态资源、文化背景以及产业模式上具有差异性的典型村镇(表 1、图 1),开展村镇生态建设模式研究。

表 1 16 个典型村镇基本情况

Table 1 Basic information of the sixteen typical townships

省份	县(市)	编号	村镇	区位及简介	面积/km ²
四川省	古蔺县	T1	二郎镇	位于古蔺县境东北部赤水河西岸、四川省盆地南部,与遵义市习水县接壤,因当地为郎酒起源地而得名,下辖 32 个行政村	92.94
		T2	茅溪镇	位于四川省古蔺县境内,距离古蔺县城 93 km、茅台镇 25 km,辖 1 个社区、15 个行政村,坐拥“中国白酒金三角”和“中国酱香酒谷”双重黄金位置	190.08
		T3	土城镇	地处古蔺县城东南部,下辖 1 个社区和 7 个行政村。截至 2019 年末,土城镇户籍人口有 28 649 人,拥有“长征文化艺术之乡”称号,是革命传统教育基地	71.40
		T4	太平镇	位于古蔺河与赤水河交汇处,太平古镇是国家 AAAA 级旅游景区、国家历史文化名镇、全国爱国主义教育示范基地	104.00
贵州省	桐梓县	T5	娄山关街道	位于遵义市西北部,截至 2020 年 6 月,辖区常住人口 94 935 人,下辖 6 个社区和 4 个行政村,有丰富的文物古迹和长征文化遗址	73.51
	习水县	T6	土城镇	地处赤水河中游河畔,辖 3 个居委会、16 个行政村,具有红军四渡赤水文化资源	307.00
		T7	习酒镇	地处习水县南部,辖 1 个社区、10 个行政村,截至 2019 年末,习酒镇户籍人口 40 802 人,为世界酱香型白酒核心产区	81.28
	赤水市	T8	丙安镇	位于赤水市中南部,是中国历史文化名村、贵州省历史文化名镇,为全国 100 个红色旅游经典地之一	134.20
		T9	天台镇	地处赤水市中部,天台镇辖 2 个社区、7 个行政村,因境内天台山而得名	99.44
		T10	长岗镇	地处仁怀市东南部,辖 1 个社区、10 个行政村,富含磷、锰等矿产资源	115.75
	仁怀市	T11	五马镇	地处仁怀市南部,东与长岗镇接壤,下辖 1 个社区、6 个行政村,含有丰富的木材和矿产资源	155.50
		T12	茅坝镇	地处仁怀市西南部,东与五马镇毗邻,辖 1 个社区、12 个行政村,属典型的农业大镇	139.70
		T13	茅台镇	2016 年之前,城区面积为 4.20 km ² ,辖 5 个居委会 8 个行政村。2016 年之后设置新的茅台镇,面积为 224.80 km ² ,辖 6 个社区 22 个行政村,集古盐文化、长征文化和酒文化于一体	87.20
云南省	镇雄县	T14	黑树镇	地处镇雄县东南部,黑树镇下辖 5 个行政村,有丰富的矿产资源	88.35
		T15	以勒镇	地处镇雄县东北部,截至 2019 年末,户籍人口 87 540 人。截至 2020 年 6 月,以勒镇下辖 2 个社区和 10 个行政村,境内多葡萄泉(冒沙井)	175.75
	威信县	T16	水田镇	地处威信县东南部,水田镇下辖 1 个社区和 3 个行政村,截至 2019 年末,户籍人口 18 602 人,是国家级爱国主义教育示范基地、省级民族文化生态保护村	45.00



图 1 研究区域典型村镇
Fig. 1 Typical townships in the study area

1.2 研究方法

由于村镇生态建设涉及社会、经济、文化、自然资源、产业等多重因素,受对象规模和复杂性的限制,难以将诸多因素共同纳入数学建模进行分析。采用 PCA 法可实现数据“降维”,将多个指标转化为少数几个综合指标,进而利于对生态建设影响因素进行科学有效的评价^[18]。研究首先通过多重数据,建立基于村镇建设复合生态系统承载力评价指标体系,在此基础上运用 PCA 分析,判别村镇生态建设的主要影响因子,并结合地理空间分析和资料收集,总结大娄山区村镇生态建设实践基础,提炼村镇生态建设和绿色发展的路径与模式。

1.2.1 村镇生态建设影响因素识别

结合《乡村振兴战略规划(2018—2022 年)》和 GB/T 32000—2015《美丽乡村建设指南》等,基于村

镇建设复合生态系统承载力评价指标体系^[19],并根据大娄山村镇发展的现状特征,构建了大娄山区村镇生态建设的影响因素指标体系(表 2)。一级指标为人居环境因子(A1)、经济发展因子(A2)和生态

环境因子(A3),二级指标共 14 个,其中 X1~X4 属于人居环境因子(A1),X5~X9 属于经济发展因子(A2),X10~X14 属于生态环境因子(A3)。

表 2 村镇生态建设的影响因素识别指标体系

Table 2 Influence factor identification index system for ecological construction of beautiful and livable rural and townships

一级指标	二级指标	编号	单位	指标解释
人居环境因子(A1)	居民(村民)委员会数量	X1	个	居民委员会和村民委员会数量总和
	人口密度	X2	人·hm ⁻²	常住人口数量/总面积
	城镇建成区面积	X3	hm ²	指城镇内已成片开发建设、市政公用设施和公共设施基本具备的区域面积
	综合商店或超市数量	X4	个	营业面积 50 m ² 以上的商店或超市数量
经济发展因子(A2)	工业总产值	X5	万元	反映村镇工业生产的总规模和总水平
	从业人员数量	X6	人	村镇参加工作的全部人员数
	绿色、有机农产品产值	X7	万元	反映村镇生态农业发展水平
	生态旅游收入	X8	万元	反映村镇生态旅游收入水平
	与县城之间的距离	X9	km	百度地图中显示的最短行车距离
生态环境因子(A3)	人均耕地面积	X10	hm ² ·人 ⁻¹	耕地总面积/总人口
	林草覆盖率	X11	%	林草面积/镇域总面积×100%
	土地石漠化状况	X12		非常严重赋值为 1;严重赋值为 0.6;轻微赋值为 0.2;没有赋值为 0
	建成区海拔	X13	m	村镇建成区的海拔平均值
	生态系统服务价值	X14	亿元·km ⁻²	镇域生态系统服务价值,包括供给服务、调解服务、支持服务和文化服务

基于 R 和 SPSS 20.0 软件,运用 PCA 模型定量揭示大娄山区典型村镇生态建设影响因素与生态建设水平之间的关系。基于 SPSS 20.0 软件进行主成分分析,KMO 检验值为 0.530,且巴特利特球形检验值为 204.07,表明研究数据满足 PCA 分析的显著性要求。其次,按特征根值大于 0.9 的标准提取 4 个主成分,其方差贡献率分别为 39.882%、22.850%、1.999% 和 1.288%,累计方差贡献率为 86.214%(表 3),表明提取的 4 个主成分能够较好地解释村镇生态建设的主要影响因素。在此基础上,进一步计算主成分载荷,并基于 R 软件,通过主成分分析散点图(biplot)实现分析结果的可视化。

表 3 主成分累计贡献率

Table 3 Cumulative contribution rate of principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	5.584	39.882	39.882
2	3.199	22.850	62.732
3	1.999	14.281	77.013
4	1.288	9.201	86.214

1.2.2 村镇生态建设模式筛选

采用“以点带面”和“以面束点”的思路进行大娄山区村镇生态建设模式研究^[7](图 2)。

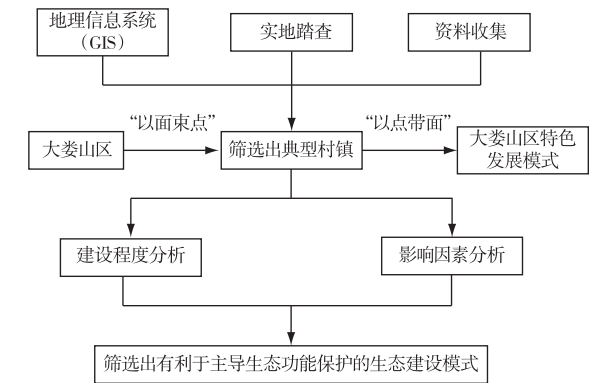


图 2 生态建设模式研究技术路线
Fig. 2 Roadmap of ecological construction model

“面”即为大娄山区,“点”为具有村镇绿色生态建设模式的典型村镇。通过“面”上的大娄山区确定主导生态功能和区域本底优势,作为开展村镇生态建设的基础和先天条件;“点”上通过实践形成的典型村镇的生态建设成效和模式,共同组成具有大娄山区特色的发展模式,促进大娄山区全面可持续发展。通过地理信息系统(GIS)空间分析、实地踏查和资料收集相结合的方法,总结大娄山区村镇生态建设实践基础^[21-22],初步筛选典型村镇,基于村镇生态建设主要影响因子的差异性,提炼村镇生态建设和绿色发展的路径与模式。

1.2.3 数据来源

研究数据资料主要包括社会经济统计数据与生态环境数据。社会经济统计数据主要来源于 2020 年县域统计年鉴(乡镇卷),生态环境数据主要来源于实地调查、各县(市)环境质量公报数据等,其中 DEM 数据采用 航天飞机雷达地形测绘使命

(Shuttle Radar Topographic Mission,SRTM)任务项目 90 m 的数字高程模型 DEM,通过 SRTM 官网(<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata>)下载,生态系统服务价值数据由姜栋栋等^[19]计算得到。16 个典型村镇的影响因素识别指标值见表 4。

表 4 16 个典型村镇的影响因素识别指标值

Table 4 Cumulative contribution rate of principal components

村镇 编号	X1	X2/ (人· km ⁻²)	X3/ hm ²	X4	X5/ 亿元	X6/ 万人	X7/ 万元	X8/ 万元	X9/ km	X10 (hm ² · 人 ⁻¹)	X11/ %	X12	X13/ m	X14/ (亿元· km ⁻²)
T1	17	78.77	121	18	150.90	1.68	6	67	51	0.045	25.8	0.2	325.0	3.90
T2	16	53.60	146	68	3.00	2.14	35	22	93	0.038	51.0	0.6	480.0	1.78
T3	8	27.04	39	40	0.55	0.57	6	17	58	0.059	42.0	0.2	400.0	5.75
T4	11	54.22	150	186	43.61	16.12	23	25	35	0.066	56.9	0.6	300.7	6.18
T5	17	507.77	800	120	26.08	5.51	70	182	3	0.005	26.1	0.8	1638.7	7.56
T6	19	72.15	650	34	4.87	1.20	18	168	30	0.063	34.7	0.2	325.1	5.97
T7	11	134.15	192	21	59.35	2.68	49	135	26	0.051	48.9	0.2	800.6	4.65
T8	4	7.10	56	11	0.71	4.22	7	80	28	0.202	89.6	0.6	228.0	4.66
T9	9	7.93	34	25	6.72	1.27	35	123	8	0.140	76.0	0.2	200.9	12.52
T10	11	9.31	11	6	0.80	1.53	20	102	35	0.097	52.1	0.6	710.5	6.18
T11	7	45.96	36	29	4.40	2.16	7	77	28	0.068	46.0	0.2	602.8	5.72
T12	13	76.80	60	9	1.18	2.64	0	6	32	0.062	36.1	0.2	440.6	5.73
T13	28	148.86	570	250	490.00	6.00	233	2575	13	0.092	44.8	0.2	400.4	4.61
T14	15	53.43	200	55	0.05	1.44	19	2	46	0.087	47.0	0.8	1380.9	2.73
T15	12	45.78	260	68	0.46	4.28	5	3	53	0.067	15.5	0.8	850.9	2.53
T16	4	13.94	100	10	3.60	8.65	2	10	43	0.073	25.0	0.6	1127.9	2.13

T1~T16 代表的典型村镇见表 1,X1~X14 代表的指标含义见表 2。

2 结果与分析

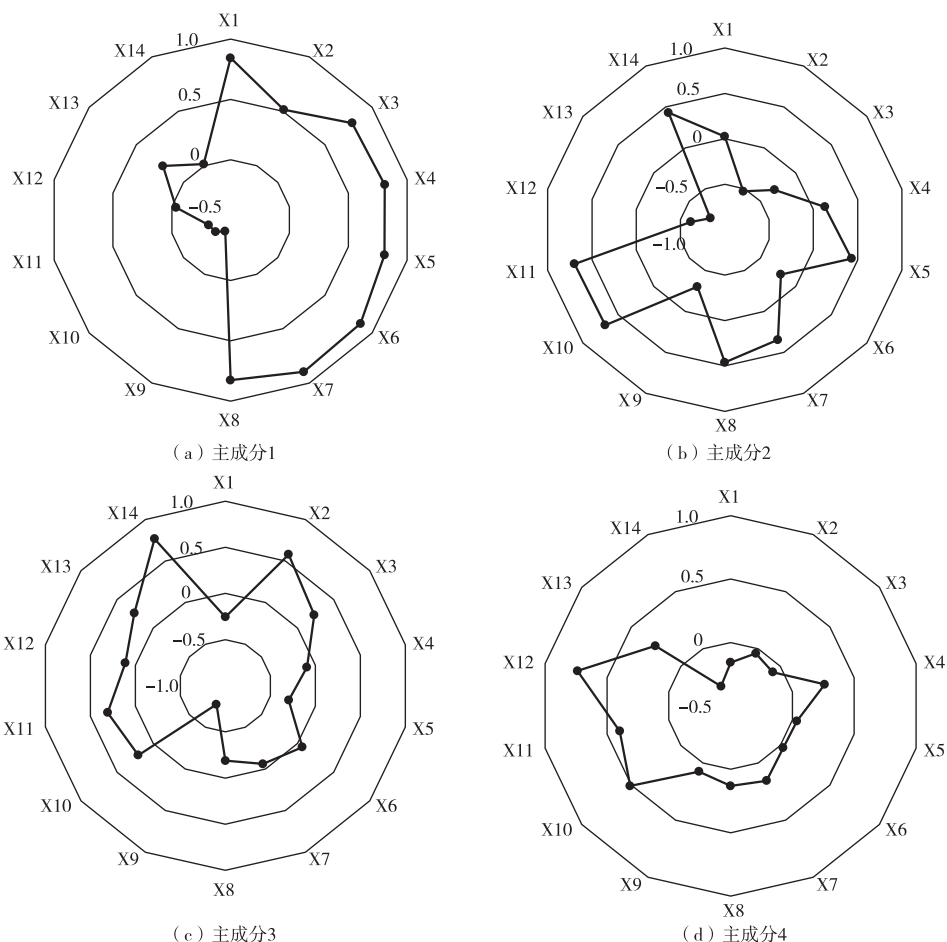
2.1 村镇生态建设的关键影响因子

由图 3 可见,居民(村民)委员会数量(X1)、城镇建成区面积(X3)、综合商店或超市数量(X4)等人居环境因子(A1)及工业产值(X5)、从业人员数量(X6)、绿色有机农产品产值(X7)、生态旅游收入(X8)等经济发展因子(A2)对村镇生态建设具有显著影响。其次是生态环境因子(A3),研究区属水源涵养与生物多样性保护功能区,人均耕地面积(X10)、林草覆盖率(X11)、土地石漠化状况(X12)等影响着区域生态系统服务(X14)。随着区域特色农林产业的发展,退耕还林、退耕还竹工作的推进,大娄山区石漠化治理成效不断显现,林草覆盖率逐渐增加,区域生态效益将逐步凸显。

由图 4 可见,人居环境因子(A1)、经济发展因子(A2)和生态环境因子(A3)均是影响村域发展的主要动力因子。其中经济发展因子(A2)对村域发展的影响最大,生态环境因子(A3)次之。可以看出,主成分 1 代表的是人居环境因子(A1)和经济发

展因子(A2),主成分 2 代表的是生态环境因子(A3)。指标 X1~X8 均与主成分 1 呈正相关关系,与县城之间的距离(X9)与主成分 2 呈负相关关系,即与县城之间的距离越近,人居环境越好、经济发展水平越高。人均耕地面积(X10)、林草覆盖率(X11)和区域生态系统服务价值(X14)与主成分 2 代表的生态环境因子(A3)呈正相关关系,土地石漠化状况(X12)和建成区海拔(X13)与主成分 2 呈负相关关系。

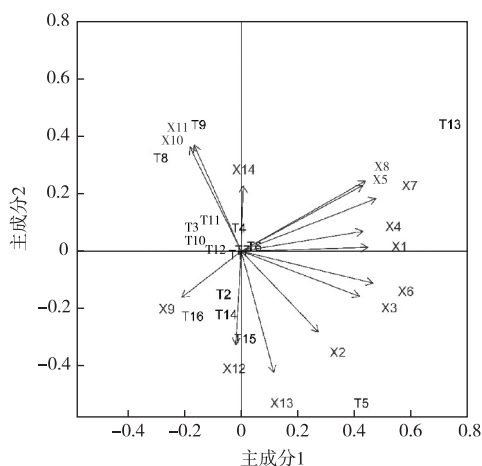
娄山关街道(T5)、丙安镇(T8)、天台镇(T9)、茅台镇(T13)、黑树镇(T14)、以勒镇(T15)和水田镇(T16)的村镇建设受生态环境因子(A3)的影响更显著,人居环境因子(A1)、经济发展因子(A2)也对娄山关街道(T5)、茅台镇(T13)具有显著影响。其中,丙安镇(T8)、天台镇(T9)的生态建设程度主要受人均耕地面积(X10)和林草覆盖率(X11)影响,黑树镇(T14)、以勒镇(T15)的生态建设程度主要受土地石漠化状况(X12)影响,水田镇(T16)的生态建设程度主要受与县城之间的距离(X9)影响。



X1~X14 代表的指标含义见表 2。

图 3 4 个主成分的载荷量分析

Fig. 3 Load analysis of 4 principal components



T1~T16 代表的典型村镇见表 1, X1~X14 代表的指标含义见表 2。

图 4 村镇生态建设影响因素的主成分分析散点图

Fig. 4 Principal component analysis of influencing factors of ecological construction of rural and townships

2.2 美丽宜居村镇生态建设模式

依据典型村镇的主要影响因子,将大娄山区村

镇生态建设路径划分为生态环境驱动型(P1)、生态环境和经济发展双向驱动型(P2)、人居环境驱动型(P3)3个一级路径;其次,依据村镇发挥的生产、生态、文化等多种功能,在一级路径的基础上,从村镇主导功能视角,将村镇生态建设模式进一步划分为恢复绿水青山激活乡村振兴(L1)、发展生态经济助推乡村振兴(L2)、改善人居环境赋能乡村振兴(L3)和创新体制机制巩固乡村振兴(L4)4个二级路径(表5)。路径1中,恢复绿水青山激活乡村振兴(L1)的主要影响因子是生态环境因子(A3),包含的典型村镇为娄山关街道(T5)和黑树镇(T14);路径2中,发展生态经济助推乡村振兴(L2)的主要影响因子是经济发展因子(A2)、生态环境因子(A3),包含的典型村镇为土城镇(T6)、丙安镇(T8)、茅坝镇(T12)、茅台镇(T13)、以勒镇(T15);路径3中,改善人居环境赋能乡村振兴(L3)的主要影响因子是人居环境因子(A1),典型村镇有长岗镇(T10)、水田镇(T16);路径4中,创新生态体制巩固乡村振

兴(L4)的主要影响因子为人居环境因子(A1),典型村镇有二郎镇(T1)、土城镇(T6)。

表 5 大娄山区村镇生态建设路径及其特征描述

Table 5 Ecological construction path and characteristic description of rural and townships in Daloushan Mountain Area

一级路径	二级路径	影响因子	典型村镇	基本特征
生态环境驱动型(P1)	恢复绿水青山激活乡村振兴(L1)	A3	T5、T14	以生态修复、改善生态环境质量为核心,打造以生态环境良性循环和环境风险有效防控为重点的生态安全体系,以“先污染后治理”倒逼绿色重振
生态环境和经济发展双向驱动型(P2)	发展生态经济助推乡村振兴(L2)	A2、A3	T6、T8、T12、T13、T15	依托生态环境优势,重在构建以产业生态化和生态产业化为主体的生态经济体系,打造“生态+”产业,促进生态产品价值实现,实现“绿水青山”向“金山银山”转化
人居环境驱动型(P3)	改善人居环境赋能乡村振兴(L3)	A1	T10、T16	重在通过自上而下开展人居环境综合整治,改善生态、生产和生活环境,实现生态利民、生态惠民
	创新生态体制巩固乡村振兴(L4)	A1	T1、T6	重在健全村镇政策与机制,加快推进村镇治理体系和治理能力的现代化,完善生态文明制度体系 ^[23]

T1~T16 代表的典型村镇见表 1,A1~A3 及 X1~X14 代表的指标含义见表 2。

由表 6 可见,大娄山区村镇生态建设模式有 12 种(M1~M12)。其中,L1 包括以生态复绿为前提的“荒山变花园”模式(M1)、以生态增绿为导向的“石山变绿洲”模式(M2)和以矿山生态治理为重点的赤水河流“碧水”模式(M3);L2 包括以产城融合促脱贫为动力的“生态旅游+”模式(M4)、以发展特色生态农业促减贫为目标的“田园牧歌”模式(M5)和以打造全产业链体系为手段的生态工业型模式(M6);L3 包括以全面提升人居环境为导向的“全民参与”模式(M7)和以完善基础设施为骨架的美丽乡村建设模式(M8);L4 涵盖以协同推进“省内补偿”和“区域合作”为支撑的赤水河生态补偿模式(M9),以农户致富为目标的“合作社+基地+农户+贫困户”的产业发展模式(M10),以增添乡村振兴新动能为主体的“引凤还巢”模式(M11)及以实现生态保护与脱贫增收为效益的“生态员制”模式(M12)。

3 讨论与结论

3.1 讨论

村镇生态建设模式首先建立在区域的社会经济条件上,村镇的基础设施建设、产业发展状况是影响村镇建设成效的主要因素。这与宋永永等^[24]的研究结果一致,研究发现,在村镇尺度,村镇产业发展越好、基础设施建设水平越高,村镇的发展水平往往越高。同时,生态环境因子对村镇生态建设产生显著影响且表现出一定的特殊性。村镇建设和扩张过程中,一方面,会挤压自然资源和生态空

间,加剧生态安全格局的破碎化程度,直接破坏地区村镇建设的综合承载力^[25];另一方面,对生态系统的保护举措客观上也约束了城镇扩张过程的规模与速度,环境质量的下降则限制了城镇的发展潜能,增大了城镇发展的风险^[26],区域生态安全约束和影响着村镇生态建设的潜能和空间。

污染问题和生态系统退化等生态安全问题增加了大娄山区村镇生态建设的压力,构成了村镇发展与区域全局的生态安全之间的冲突^[27-28],成为大娄山区村镇生态建设和可持续发展的重要障碍。随着城镇化的快速发展,不少村镇出现非农化、老弱化、空废化、污损化、贫困化(“五化”)现象^[29],村镇产业发展与生态环境保护之间的矛盾日益激烈^[30]。如何引导绿色村镇生态建设,挖掘村镇生态建设模式,实现“三生”空间协调和生态宜居,是实现乡村振兴的关键。大娄山区形成的 4 条路径 12 种模式是立足村镇实际,在多重动力综合驱动下的发展路径。在村镇生态建设过程中,应牢固树立“绿水青山就是金山银山”的理念,发挥好生态保护与建设对村镇发展的基础性动力作用,不断优化村镇人居环境和社会经济条件,激发村镇发展内生动力,实现村镇生态-社会-经济系统的协调发展。

该研究仅对村镇生态建设的主要影响因素和发展模式进行初步分析,未来研究需因地制宜,根据各村镇的发展现状与不足,进一步提升美丽宜居村镇的可持续发展模式。例如,丙安镇(T8)和天台镇(T9)的生态建设主要受耕地面积和林草覆盖率影响,应不断加大生态复绿的力度,提升耕地安全

利用率水平;黑树镇(T14)和以勒镇(T15)需采取科学有效措施推进石漠化防治,提升区域生态安全,改善区域生态环境;水田镇(T16)应继续完善基础设施建设,加强村庄道路建设助推乡村全面振兴。

表 6 大娄山区村镇生态建设模式与典型案例

Table 6 Models and typical cases of ecological construction of rural and townships in Daloushan Mountain Area

二级路径	模式	典型案例
L1	以生态复绿为前提的“荒山变花园”模式(M1)	贵州省遵义市赤水市天台镇凤凰村:大力实施生态复绿,开启了“荒山变花园,田园变花园,农村变成了社区,农民成园丁”的生态模式
	以生态增绿为导向的“石山变绿洲”模式(M2)	贵州省遵义市桐梓县娄山关街道:通过石漠化综合治理,改善区域生态环境,实现高质量发展
	以矿山生态治理为重点的赤水河流“碧水”模式(M3)	云南省昭通市镇雄县黑树镇:通过赤水河源头的废弃矿山综合治理,解决历史遗留问题
L2	以产城融合促脱贫为动力的“生态旅游+”模式(M4)	“酒旅融合”促“产城融合”:贵州省仁怀市茅台镇开创了以酒带旅、以酒促旅、工农旅一体、产城景融合的全域旅游发展新模式,旅游业“井喷式”增长 “农旅融合”促“产城融合”:贵州省遵义市习水县土城镇狠抓农业产业化和乡村旅游业,打造农旅融合扶贫新的亮点,实现贫困村脱贫出列 “文旅融合”促“产城融合”:贵州省赤水市丙安镇依托丰富的红色旅游资源打造红色产业,同时紧盯生态优势,将“红”与“绿”相融合,发展“文旅活镇”
	以发展特色生态农业促减贫为目标的“田园牧歌”模式(M5)	云南省昭通市镇雄县以勒镇:通过特色烤烟种植,成为云南省昭通卷烟厂的优质烤烟供应基地 贵州省仁怀市茅坝镇:依托土地资源和传统高粱种植优势,着力打造有机高粱标准化示范基地
	以打造全产业链体系为手段的生态工业型模式(M6)	贵州省仁怀市茅台镇:以酱香酒生产为核心实现全产业链发展
L3	以全面提升人居环境为导向的“全民参与”模式(M7)	云南省昭通市威信县水田镇:施行“全民参与”,抓源头治理,实行“逢三大扫除”制度,实现人居环境整治和赤水河流域生态环境保护有机结合
	以完善基础设施为骨架的美丽乡村建设模式(M8)	贵州省仁怀市长岗镇蔺田村:依托便捷的交通条件和优质的环境配套,景区实现了跨越式发展
L4	以协同推进“省内补偿”和“区域合作”为支撑的赤水河生态补偿模式(M9)	云南、贵州、四川三省:建立赤水河流域跨省生态补偿机制,率先在长江流域建立第一个跨省生态补偿机制
	以农户致富为目的的“合作社+基地+农户+贫困户”的产业发展模式(M10)	四川省泸州市古蔺县二郎镇:成立柏杨坝农业旅游专合社,大力发展花椒特色产业,从根本上实现脱贫
	以增添乡村振兴新动能为主体的“引凤还巢”模式(M11)	云南省昭通市威信县:返乡创业已经成为经济增长新的动力源
	以实现生态保护与脱贫增收为效益的“生态员制”模式(M12)	贵州省遵义市:创新实施坝长制,帮助贫困人口实现了山上就业、家门口脱贫

3.2 结论

以大娄山区为例,综合利用主成分分析法、地理信息系统、数据资料等方法,分析影响村镇生态建设的相关因素,并通过“以面束点”和“以点带面”的思路,提出了大娄山区村镇生态建设模式,结果显示:

(1)大娄山区村镇生态建设的受经济发展因子(A2)影响最显著。娄山关街道(T5)、丙安镇(T8)、天台镇(T9)、茅台镇(T13)、黑树镇(T14)、以勒镇(T15)和水田镇(T16)的村镇建设受生态环境因子(A3)的影响显著。人居环境因子(A1)、经济发展因子(A2)影响也对娄山关街道(P5)、茅台镇(P13)具有显著影响。未来研究应根据各典型村镇生态建设的主要影响因子,继续探讨不同类型村镇建设生态空间布局与承载力提升技术,增强村镇复合生

态系统的承载力。

(2)大娄山区村镇生态建设包含 4 条路径、12 种模式。4 条路径分别为恢复绿水青山激活乡村振兴(L1)、发展生态经济助推乡村振兴(L2)、改善人居环境赋能乡村振兴(L3)和创新体制机制巩固乡村振兴(L4)。12 种模式中,M1~M3 属于恢复绿水青山激活乡村振兴(L1),M4~M6 属于发展生态经济助推乡村振兴(L2),M7、M8 属于改善人居环境赋能乡村振兴(L3),M9~M12 属于发展创新生态体制巩固乡村振兴(L4)。

构建多重动力驱动下的村镇发展合力是实现村域生态-社会-经济系统协调发展的有效途径。该研究分析村镇生态建设模式的影响因素和生态安全制约因子,揭示村镇建设的生态安全调控机制,提出美丽宜居村镇的“三生”空间优化布局 and 绿

色生态建设模式,进而利于支撑重点生态功能区的典型村镇建设和可持续发展,对促进大娄山区生态建设和乡村振兴具有重要意义,也为全国美丽乡村建设提供示范案例。

参考文献:

- [1] 王永生,施琳娜,刘彦随.乡村地域系统环境污染演化过程及驱动机制研究[J].农业环境科学学报,2020,39(11):2495-2503.[WANG Yong-sheng, SHI Lin-na, LIU Yan-sui. Evolution Process of Environmental Pollution and Its Driving Mechanisms in Rural Areal Systems[J]. Journal of Agro-environment Science, 2020, 39(11): 2495-2503.]
- [2] 李海东,赵立君,张龙江,等.村镇建设生态承载力:内涵、对象测算和提升路径[J].生态与农村环境学报,2021,37(7):834-842.[LI Hai-dong, ZHAO Li-jun, ZHANG Long-jiang, et al. Carrying Capacity of Complex Ecosystem for Rural and Township Development: Connotation, Carrying Objects Calculation and Improvement Path[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(7): 834-842.]
- [3] 国务院.中共中央国务院印发《乡村振兴战略规划(2018—2022年)》[EB/OL].[2022-01-08].http://www.gov.cn/zhengce/2018-09/26/content_5325534.htm.
- [4] 李伯华,曾菊新,胡娟.乡村人居环境研究进展与展望[J].地理与地理信息科学,2008,24(5):70-74.[LI Bo-hua, ZENG Ju-xin, HU Juan. Progress and Prospects on the Research of Rural Human Settlement Environment[J]. Geography and Geo-information Science, 2008, 24(5): 70-74.]
- [5] 张占录,杨庆媛.北京市顺义区农村居民点整理的推动力分析[J].农业工程学报,2005,21(11):49-53.[ZHANG Zhan-lu, YANG Qing-yuan. Driving Force Analysis of the Consolidation of Country Residential Areas in Shunyi District[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 49-53.]
- [6] 张富刚,刘彦随.中国区域农村发展动力机制及其发展模式[J].地理学报,2008,63(2):115-122.[ZHANG Fu-gang, LIU Yan-sui. Dynamic Mechanism and Models of Regional Rural Development in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(2): 115-122.]
- [7] 张龙江,纪荣婷,李辉,等.基于主导生态功能保护的美丽宜居村镇生态建设模式研究[J].生态与农村环境学报,2021,37(7):827-833.[ZHANG Long-jiang, JI Rong-ting, LI Hui, et al. Research on Ecological Construction Pattern of Beautiful and Livable Rural and Townships under the Constrains of Eco-functions Protection[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(7): 827-833.]
- [8] 杨建中.基于生态建设和环境治理的村镇建设分析[J].乡村科技,2020(4):113-114.
- [9] 张跃虎.太原市生态园林村镇建设探讨[J].山西林业科技,2007(1):62-64.
- [10] 王习明,周聪敏,王睿,等.新型城镇化视野下的重点生态功能区的新农村建设:关于海南白沙美丽乡村建设的调研[J].琼州学院学报,2013,20(6):20-27.[WANG Xi-ming, ZHOU Cong-min, WANG Rui, et al. New Countryside Construction of the Key Ecological Functional Areas in the Perspective of New Urbanization: A Survey on Beautiful Village Construction in Baisha Hainan[J]. Journal of Qiongzhou University, 2013, 20(6): 20-27.]
- [11] 李裕瑞,刘彦随,龙花楼.黄淮海典型地区村域转型发展的特征与机理[J].地理学报,2012,67(6):771-782.[LI Yu-rui, LIU Yan-sui, LONG Hua-lou. Characteristics and Mechanism of Village Transformation Development in Typical Regions of Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(6): 771-782.]
- [12] 李裕瑞,刘彦随,龙花楼,等.大城市郊区村域转型发展的资源环境效应与优化调控研究:以北京市顺义区北村为例[J].地理学报,2013,68(6):825-838.[LI Yu-rui, LIU Yan-sui, LONG Hua-lou, et al. Village Transformation Development, Resources and Environment Effects and Their Optimal Regulation in the Metropolitan Suburbs: The Case of Beicun in Shunyi District, Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(6): 825-838.]
- [13] 杨昕,汤国安,刘学军,等.数字地形分析的理论、方法与应用[J].地理学报,2009,64(9):1058-1070.[YANG Xin, TANG Guo-an, LIU Xue-jun, et al. Digital Terrain Analysis: Theory, Method and Application[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(9): 1058-1070.]
- [14] 段学军,王雅竹,康珈瑜,等.村镇建设资源环境承载力的理论基础与测算体系[J].资源科学,2020,42(7):1236-1248.[DUAN Xue-jun, WANG Ya-zhu, KANG Jia-yu, et al. Theoretical Foundations and Measurement System of Resource and Environmental Carrying Capacity for Village and Town Development[J]. Resources Science, 2020, 42(7): 1236-1248.]
- [15] 刘传琦,赵翠薇,王涵.贵州省贫困县土地集约利用评价体系构建[J].济南大学学报(自然科学版),2020,34(6):603-613,622.[LIU Chuan-qi, ZHAO Cui-wei, WANG Han. System Construction of Land Intensive Use Evaluation in Poverty-stricken Counties of Guizhou Province[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2020, 34(6): 603-613, 622.]
- [16] 梁晨霞,王艳慧,徐海涛,等.贫困村空间分布及影响因素分析:以乌蒙山连片特困区为例[J].地理研究,2019,38(6):1389-1402.[LIANG Chen-xia, WANG Yan-hui, XU Hai-tao, et al. Analyzing Spatial Distribution of Poor Villages and Their Poverty Contributing Factors: A Case Study from Wumeng Mountain Area[J]. Geographical Research, 2019, 38(6): 1389-1402.]
- [17] 张玉韩,张寿庭.基于地理探测器的相对贫困地区矿产资源开发影响要素分析:以乌蒙山片区为例[J].地学前缘,2021,28(3):403-411.[ZHANG Yu-han, ZHANG Shou-ting. Influencing Factors of Mineral Resources Development in the Economically Under Developed Regions of China: Assessment of the Wumeng Mountain Area Using the Geodetector Tool[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 403-411.]
- [18] 李艳双,曾珍香,张闽,等.主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用[J].河北工业大学学报,1999,28(1):94-97.[LI Yan-shuang, ZENG Zhen-xiang, ZHANG Min, et al. Application of Primary Component Analysis in the Methods of Comprehensive Evaluation for many Indexes[J]. Journal of Hebei University of Technology, 1999, 28(1): 94-97.]

- [19] 姜栋栋,马伟波,邹凤丽,等.乡镇尺度大娄山区生态系统服务价值时空变化研究[J].环境科学研究,2020,33(12):2713-2723.[JIANG Dong-dong, MA Wei-bo, ZOU Feng-li, *et al.* Spatio-temporal Changes of Ecosystem Service Value in Dalou Mountain Area at Township Scale[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(12): 2713-2723.]
- [20] 燕守广,沈渭寿,邹长新,等.长江三角洲地区复合生态系统生态承载力研究[J].生态与农村环境学报,2010,26(6):529-533.[YAN Shou-guang, SHEN Wei-shou, ZOU Chang-xin, *et al.* Ecological Carrying Capacity of Complex Ecosystem: A Case Study of the Yangtze River Delta[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(6): 529-533.]
- [21] 于江浩,田莉.基于承载力提升视角的村镇资源环境承载力评价研究:以北京大兴区采育镇为例[J].生态与农村环境学报,2021,37(7):843-851.[YU Jiang-hao, TIAN Li. Evaluation of Resources and Environment Carrying Capacity of Villages and Townships from the Perspective of Carrying Capacity Enhancement: A Case of Caiyu Township, Daxing District, Beijing[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(7): 843-851.]
- [22] 仁怀市“赤水河流域区域性中心城市”建设目标与路径研究[M].北京:中国发展出版社,2017:150-158.
- [23] 激活“三农”发展新动能:代表委员热议“乡村振兴”[N/OL].太原日报,2019-02-27[2022-01-01].<https://mp.weixin.qq.com/s/J8HHmHW5a49C6wghSmhnfA>.
- [24] 宋永永,薛东前,米文宝,等.宁夏限制开发生态区村域发展的模式与机理[J].经济地理,2017,37(4):167-175,189.[SONG Yong-yong, XUE Dong-qian, MI Wen-bao, *et al.* Village Development Mode and Mechanism of Limited Development Ecological Zones in Ningxia[J]. Economic Geography, 2017, 37(4): 167-175, 189.]
- [25] 戴均良,高晓路,杜守帅.城镇化进程中的空间扩张和土地利用控制[J].地理研究,2010,29(10):1822-1832.[DAI Jun-liang, GAO Xiao-lu, DU Shou-shuai. Expansion of Urban Space and Land Use Control in the Process of Urbanization[J]. Geographic Research, 2010, 29(10): 1822-1832.]
- [26] LI G D, SUN S A, FANG C L. The Varying Driving Forces of Urban Expansion in China: Insights from a Spatial-temporal Analysis[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 174: 63-77.
- [27] 张永荐.基于生态安全的山地村镇区域发展建设用地适宜性评价[D].重庆:重庆大学,2014.
- [28] 张瑾青,罗涛,徐敏,等.闽三角地区城镇空间扩张对区域生态安全格局的影响[J].生态学报,2020,40(15):5113-5123.[ZHANG Jin-qing, LUO Tao, XU Min, *et al.* Influence of Urban Spatial Expansion on the Regionally Ecological Security Pattern in Min-Delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5113-5123.]
- [29] 段学军,王传胜,李恒鹏,等.村镇建设资源环境承载力测算的基本逻辑与框架[J].生态与农村环境学报,2021,37(7):817-826.[DUAN Xue-jun, WANG Chuan-sheng, LI Heng-peng, *et al.* Basic Logic and Framework of the Calculation of Resources and Environment Carrying Capacity of Rural and Township Development[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(7): 817-826.]
- [30] 于光玉,李勤,程伟.乡村振兴视角下宜居村镇建设策略研究:以山东省淄博市双杨镇为例[J].西安建筑科技大学学报(社会科学版),2019,38(4):44-49.[YU Guang-yu, LI Qin, CHENG Wei. A Research on the Construction Strategy of Livable Villages under the Background of Rural Revitalization: A Case of Shuangyang Town in Zibo City of Shandong Province[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Social Science Edition), 2019, 38(4): 44-49.]

作者简介: 陈妍(1978—),女,山东济宁人,讲师,博士,主要从事风景园林规划设计研究。E-mail: chenyan@njtech.edu.cn

(责任编辑:许素)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0774

李雪梅, 刘倩. 大都市边缘区农村居民点时空演变及驱动因素研究: 以天津市为例[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1309–1317.

LI Xue-mei, LIU Qian. Analysis of the Spatial-temporal Evolution and Driving Factors of Rural Residential Areas in Metropolitan Fringe: A Case Study of Tianjin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1309–1317.

大都市边缘区农村居民点时空演变及驱动因素研究： 以天津市为例

李雪梅¹, 刘倩² (1. 天津城建大学经济与管理学院, 天津 300384; 2. 中智广州经济技术合作有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 深入挖掘大都市边缘地区农村居民点时空演变特征及影响因素, 对城镇化过程中农村居民点空间结构布局优化以及土地资源的节约集约利用具有重要的实践意义。基于 Landsat TM 遥感影像, 利用 ArcGIS 软件获取研究区 1980、2000 和 2019 年 450 个村的农村居民点用地信息, 采用空间叠置分析、核密度分析、结构方程模型等揭示近 40 a 农村居民点的时空演变规律及影响因素。研究发现: (1) 研究区农村居民点数量由 1980 年的 426 个减少到 2019 年的 127 个。1980—2000 年未变化型村庄 355 个, 2000—2019 年逐渐减少型村庄达 322 个, 未变化型 81 个; (2) 农村居民点空间分布呈集聚性特征, 但 1980—2019 年间农村居民点核密度估计值逐渐降低, 高密度区域较少, 距离中心城区较近区域基本无农村居民点分布; (3) 区位优势、农户行为对农村居民点变化具有直接影响效应, 家庭禀赋和政府政策通过经济发展间接推动农村居民点的变化。

关键词: 农村居民点; 时空特征; 驱动因素; 结构方程模型; 大都市边缘区

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1309-09

Analysis of the Spatial-temporal Evolution and Driving Factors of Rural Residential Areas in Metropolitan Fringe: A Case Study of Tianjin. LI Xue-mei¹, LIU Qian² (1. School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. CIIC Guangzhou Economic and Technical Cooperation Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Excavate thoroughly and fully the spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of rural settlements in metropolis fringe is of great practical significance for the spatial optimization of rural settlements, economical promotion and intensive use of land resources during the urbanization process. Based on Landsat TM remote sensing, the land use information of 450 rural settlements in Tianjin in 1980, 2000 and 2019 were obtained by using ArcGIS software. The spatial overlap analysis, kernel density analysis and structural equation model were used to reveal the spatial and temporal evolution and influencing factors of rural settlements in the past 40 years. The results show that the number of rural settlements decreased from 426 in 1980 to 127 in 2019. There were 355 unchanged villages from 1980 to 2000, while there were 322 decreasing villages and 81 unchanged villages from 2000 to 2019. The spatial distribution of rural settlements showed the characteristics of agglomeration. However, the estimated core density of rural settlements gradually decreased from 1980 to 2019, which showed fewer high-density areas and almost no rural settlements near the central urban area. Regional economy and household behavior have direct impact on the change of rural settlements, while family endowment and government policy indirectly promoted the change of rural settlements through economic development.

Key words: rural settlement; spatial-temporal characteristics; driving factors; structural equation model; metropolis fringe

农村具有生产、生活和生态等多重功能, 与城镇互融、互通, 共同构成人类社会活动的主要空间^[1]。我国农村居民点作为农村居民的重要生活场所^[2], 随着城市化的深入和发展, 空间变化明显, 城乡之间的边际界限也变得越来越模糊。在党的

十九大报告中, 明确提出要尽快建立一套健全的城乡统筹发展体系^[3], 积极落实乡村振兴战略。

收稿日期: 2021-12-08

基金项目: 天津市艺术科学规划项目(D16007)

我国大都市的扩张趋势明显,城市与乡村之间呈现出相互交叉和融合之势,特别是边缘区正逐步成为城市中一定时期内变化最为敏感活跃的地带,边缘区农村居民点也逐渐成为土地、城市、地理、经济等多门类专业学科研究的热点。

大都市边缘区农村居民点与外郊区的其他农村居民点不同,地理位置独特,拥有巨大的市场和资本优势,并且通常在大城市的中心地区或某些功能区的转移中担负着产业转移的功能。近年来,数学模型和 GIS 分析相结合的方法将农村居民点研究提升到一个新的高度。国内对农村居民点的研究起步较晚,但发展迅速^[4-5]。众多学者从市域^[6]、区县^[7]、乡镇^[8]和典型村庄等尺度,采取土地利用动态度^[9]、土地利用转移矩阵、景观分析^[10]、核密度^[11]、空间热点探测法^[12]、自相关模型^[13]、加权 Voronoi 图^[14]、引力模型^[15]等,从不同区域、不同尺度和多学科融合的角度挖掘农村居民点时空演变规律^[16-19]。

大都市边缘区作为中心城区向外围农村扩张的主要区域,存在着城乡发展不平衡、村庄类型演变复杂等特征,目前大都市边缘区的研究关注更细致的微观变化,如边缘区空间扩展机制、土地利用、产业发展、乡村类型划分、乡村重构、农村居民点优化布局等^[20-23]。《乡村振兴战略规划(2018—2022 年)》顺应村庄发展规律和演变趋势,将乡村分为集聚提升类村庄、城郊融合类村庄、特色保护类村庄、搬迁撤并类村庄 4 类。研究大都市边缘区农村居民点时空演变特征,深入揭示其内在的变化规律,有助于精确识别都市边缘区乡村类型,优化乡村空间格局,促进乡村合理利用自身资源,制定乡村振兴战略计划,明确乡村发展方向。因此,选择北方重要的沿海开放城市和经济中心天津市作为研究对象,对天津都市边缘区环城四区 450 个农村居民点用地开展研究,揭示农村居民点时空演变规律,探究影响农村居民点变化的主要因素,以期缓解都市边缘区城乡用地矛盾、科学制定国土空间规划以及合理的乡村发展规划、推动城乡融合与乡村振兴提供理论与数据支撑。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

天津地处华北平原北部,地势以平原和洼地为主,海拔由北向南逐渐下降,地跨海河两岸,是北京通往东北、华东地区铁路的交通咽喉和远洋航运的港口^[24]。天津市属于京津冀一体化城市群之一,现

辖 16 个行政区,其中西青区、北辰区、东丽区和津南区位于中心城区的边缘,受中心城镇辐射的影响较大。截至 2019 年,环城四区规模以上工业企业总计达 1 665 个,建筑业总产值 883.27 亿元。受城市扩张和农村新型城镇化、乡村振兴政策的影响,边缘区农村逐渐城镇化,农村居民纷纷涌入城市,农村居民点发生了显著变化。天津市都市边缘区即中心城区周边用地分属西青区、东丽区、北辰区和津南区,都市边缘区用地变化分别受到所属环城四区的土地管理与发展规划限制。为对比反映边缘区不同行政区的农村居民点变化特征,笔者将研究范围扩大为天津市中心城区的环城四区。

1.2 研究方法

1.2.1 农村居民点变化幅度及强度

为进一步反映天津市边缘区农村居民点的数量及规模变化情况,采用农村居民点变化幅度计算农村居民点的数量变化情况,采用单一动态度表征农村居民点的变化强度。计算公式为

$$\Delta N = (N_b - N_a) / N_a \times 100\%, \quad (1)$$

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%。 \quad (2)$$

式(1)~(2)中, ΔN 为研究期内农村居民点数量的变化幅度,%; N_a 为前期农村居民点数量,个; N_b 为后期农村居民点数量,个; K 为研究时段内农村居民点的单一动态度,%; U_a 、 U_b 分别为农村居民点在研究期初和研究期末的面积, hm^2 ; T 为研究时段的长度,a。 K 值大于 0,表明农村居民点处于增加状态;反之,则处于减少状态。 K 的绝对值越大,表示变化越剧烈。

1.2.2 核密度分析

核密度分析是 GIS 空间分析中的一种非参数表面密度估计法^[25],被广泛运用于农村居民点空间分布的特征研究^[26]。村级尺度下,将大都市边缘区的农村居民点抽象为点状地物,运用核密度分析法对不同时期的农村居民点进行密度分析,以便于揭示农村居民点的空间结构分布及演变趋势特征。其计算公式^[27]为

$$F_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k \frac{x - x_i}{h}。 \quad (3)$$

式(3)中, $F_n(x)$ 为农村居民点的核密度估计值; h 为搜索半径,km; k 为核密度函数; n 为农村居民点的样本数; $x - x_i$ 为 2 个农村居民点之间的估算距离,km。核密度的估计中,搜索半径大小的选取是重点。在 ArcGIS 软件中运用 Kernel Density 工具,经过多次反复试验,最终确定搜索半径为 2 km,该

半径能使研究区域内农村居民点核密度分布图达到较好的效果。

1.2.3 结构方程模型

结构方程模型(structural equation model, SEM)主要包括测量模型和结构模型 2 种基本模型^[28]。测量模型由潜在变量与观察变量共同组成,构建农村居民点变化、农户行为、家庭禀赋、区位经济和政府政策 5 个潜变量,农村居民点规模、农村居民点布局及建设情况等 20 个观察变量,来探讨天津市边缘区农村居民点的影响因素。

1.3 数据来源与处理

采用天津市 1980、2000 与 2019 年的 Landsat TM 影像,通过监督分类、目视解译与实地调研相结合的方法,在获得土地利用数据的基础上,从中提取农村居民点用地数据。农村居民点变化的影响因素数据主要是采用面对面的结构式访谈方法获取。依据距市中心距离^[29]、数据获取真实快捷以及样本覆盖全面的原则,在每个区分别选取 5~6 个乡镇开展研究。每个乡镇中农村居民点发展程度不同,现场实际调研发现,农村居民点集体搬迁现象明显,因此结合土地利用数据,选取村干部、农户等不同人群作为调研对象,进行面对面结构式访谈。调研共回收问卷 386 份,剔除无效问卷和相关变量缺失的问卷,最终得到可利用问卷 360 份。其中,西

青区 98 份,北辰区 91 份,津南区 81 份,东丽区 90 份。42.22%的受访者在 51 岁以上,其中男性占 56.11%,女性占 43.89%。从职业类型看,打工者人数占 24.72%,经商人数占 11.11%,务农人数仅占 9.72%。调研发现,由于宅基地搬迁,都市边缘区农户涌入城市工作,导致农村居民点用地发生明显变化。

2 结果与分析

2.1 农村居民点时空特征

2.1.1 总体分布

从 1980 和 2000 年天津市边缘区农村居民点现状(图 1)可以看出,除紧邻中心城区的农村居民点比较稀疏外,边缘区农村居民点分布相对均匀,且由于天津市多坑塘的自然条件,居民点大多邻水而居,尤其是津南区海河沿岸,农村居民点沿河呈带状分布。而 2019 年农村居民点大幅减少,其中西青区农村居民点数量从 2000 年的 136 减少至 32 个;北辰区、津南区分别从 122、153 减少至 50、42 个;东丽区以街道划分,据实地调查,农村居民点已减少至个位数。郊区城镇化凸显,农村居民仅分布于远离中心城区的地带。2000 年以后,随着天津市对新农村和示范小城镇建设的深入推动,天津市边缘地区的农村居民点已经承接了中心城区的大量工业、商业发展功能,土地与人口城镇化进程明显加快。

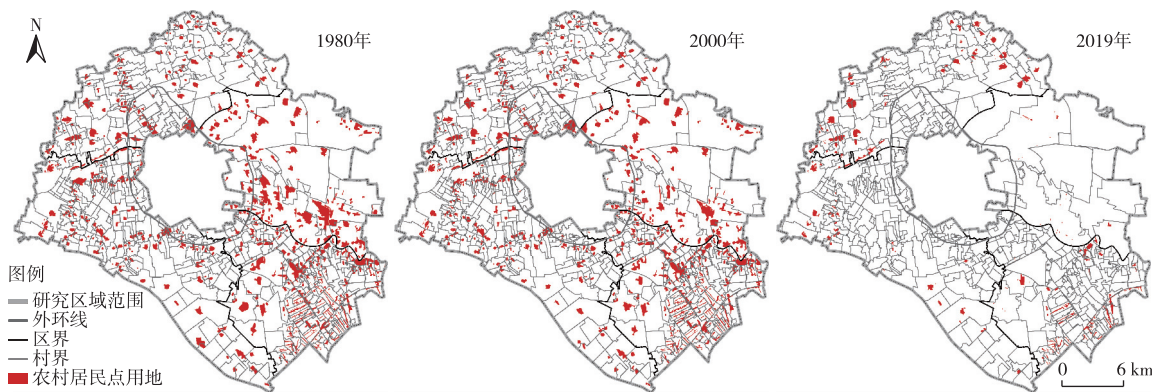


图 1 1980、2000、2019 年研究区农村居民点现状

Fig. 1 The characteristics of rural settlements in Tianjin in 1980, 2000 and 2019

2.1.2 时间特征

天津市 1980—2019 年农村居民点数量整体呈下降趋势,1980 年农村居民点为 426 个,2000 年农村居民点总数为 423 个,下降 0.70%。2019 年农村居民点减少至 127 个,下降幅度达 69.98%。农村居民点面积由 1980 年的 18 883.64 hm²减少至 2019 年的 3 737.25 hm²。1980—2000 和 2000—2019 年

2 个阶段的单一动态度均为负值,天津市边缘区农村居民点面积处于不断下降过程中。1980—2000 年变化强度为-17.49%,而 2000—2019 年变化强度达-76.01%,变化强度逐渐剧烈(表 1)。这表明随着边缘区城镇规模扩张加快,以中心城区和镇区为中心的 双重辐射导致 1980—2000 年天津市边缘区农村向城镇化发展,而 2000 年以后边缘区城镇化加

快,农村居民点逐渐向城镇化发展。

通过 ArcGIS 软件中的空间叠置分析统计农村居民点的斑块面积发现,农村居民点的变化存在 3 种类型。(1)未变化型,即农村居民点的面积相对于前期变化不大;(2)减少型,即农村居民点的面积相对于前期逐渐减少甚至消失;(3)增加型,即农村居民点的面积相对于前期逐渐扩张。如表 2 所示,1980—2000 年间天津市边缘区农村居民点变化不大,其中 355 个村属于未变化型,69 个属于减少型。2000—2019 年 322 个村属于减少型,仅有 81 个村属于未变化型,20 个村属于增加型。同时,从图 1 可知,农村居民点逐渐减少甚至消失的区域主要集中在中心区附近,其中西青区分布较多,表明 2000 年以来天津市边缘区大部分村庄逐渐城镇化,农村居民点的数量逐步减少甚至完全消失,尤其是西青区居住、教育、工业等城市用地的开发吞没了大量农村居民点用地。

2.1.3 空间特征

通过 ArcGIS 软件计算 1980、2000 和 2019 年农村居民点核密度值(图 2),1980—2019 年农村居民点核密度值逐渐减小,其中 2000—2019 年降幅较大。1980 年核密度最高值为 $1.79\text{ 个}\cdot\text{km}^{-2}$,2000 年核密度最高值为 $1.71\text{ 个}\cdot\text{km}^{-2}$,2019 年核密度

最高值仅为 $1.09\text{ 个}\cdot\text{km}^{-2}$ 。

在空间结构分布上,农村居民点密度整体表现为西北及东南密,东北及西南疏,呈现多点中高值集中分布的态势。1980 和 2000 年核密度估计值分布大体相似,西北和东南部较为密集。而 2019 年农村居民点的密集分布区域大幅减少,且基本呈多核破碎化分布,只有西北部呈现出明显的点状聚集。3 个时段内天津市边缘区农村居民点核密度值均较低,且呈不断下降趋势。研究区内农村居民点较为稀疏,农村居民点高密度区的减少和空间分布变化与城镇化发展息息相关。

表 1 农村居民点变化幅度及强度

Table 1 The magnitude and intensity of rural settlements change

年份	农村居民点数量/个	变化幅度/%	单一动态度/%
1980	426		
2000	423	-0.70	-17.49
2019	127	-69.98	-76.01

表 2 农村居民点变化类型

Table 2 The types of rural settlements change

年份	未变化型/个	减少型/个	增加型/个
1980—2000	355	69	2
2000—2019	81	322	20

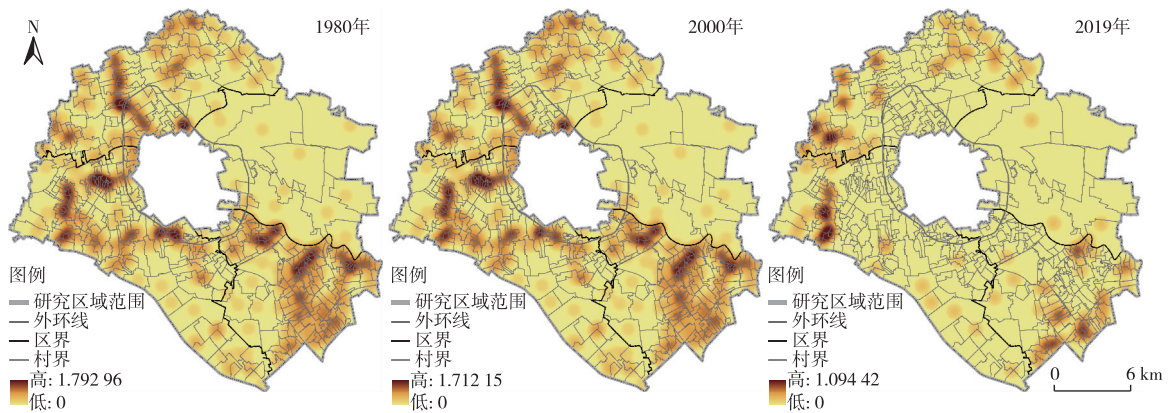


图 2 1980、2000、2019 年农村居民点核密度分布图

Fig. 2 The core density distribution of rural settlements in 1980, 2000 and 2019

2.2 农村居民点变化影响因素分析

2.2.1 模型指标构建

结合研究区自然与经济发展特点、农村与农民生活特征,并借鉴已有研究成果,构建农村居民点变化、农户行为、家庭禀赋、区位经济和政府政策 5 个潜变量以及 20 个观察变量。选取农村居民点核密度值、农村居民点规模、农村居民点布局及建设

情况、宅基地利用状况等指标反映农村居民点变化;选取受教育程度、生活成本、消费需求、特色文化保护力度 4 个农户主观感知指标反映农户行为与居民点变化之间的关系;选取家庭非农务工人数、家庭非农总收入、家庭住宅面积 3 个因素作为评判农村居民点变化的家庭禀赋指标;选取城镇辐射度、交通系统完善度、城镇化进程、经济发展水平和

教育条件 5 个指标反映研究区区位经济状况;选取土地制度变迁、搬迁住房满意度、养老保险政策、医疗卫生政策 4 个指标揭示政策对农村居民点变化的影响(表 3)。

表 3 农村居民点变化影响因素指标体系
Table 3 The index system of influencing factors of rural settlements change

潜在变量		观察变量	
名称	代码	名称	代码
农村居民点变化	RC	农村居民点核密度值	RC1
		农村居民点规模	RC2
		农村居民点布局及建设情况	RC3
		宅基地利用状况	RC4
农户行为	FB	受教育程度	FB1
		生活成本	FB2
		消费需求	FB3
		特色文化保护满意度	FB4
家庭禀赋	FE	家庭非农务工人数	FE1
		家庭非农总收入	FE2
		家庭住宅面积	FE3
区位经济	SE	城镇辐射度	SE1
		交通系统完善度	SE2
		城镇化进程	SE3
		经济发展水平	SE4
		教育条件	SE5
政府政策	GP	土地制度变迁	GP1
		搬迁住房满意度	GP2
		养老保险政策	GP3
		医疗卫生政策	GP4

2.2.2 问卷信度和效度分析

运用 SPSS 软件对样本数据的准确性进行信度检验核和效度分析,得到数据总体量表的克朗巴哈系数值为 0.857,分量表中农村居民点变化、农户行为、家庭禀赋、区位经济、政府政策的克朗巴哈系数(Cronbach's alpha)值分别为 0.697、0.782、0.658、0.835、0.765。KMO 值为 0.835>0.8, Bartlett 球形检验卡方值较大,且统计显著(sig.值=0.000<0.01),说明问卷设计质量较好,研究所选变量的精确度较高,可进行分析。

2.2.3 研究假设与理论模型

农村居民点的变化受到外部经济、政策以及居民自身行为、家庭禀赋等多方面的影响。20 世纪 80 年代以来,天津市边缘区城镇化速度明显加快。再加上国家新农村建设、乡村振兴战略的提出,天津市实行宅基地转让、宅基地换房补偿政策以及相应的社会福利保障政策,对农村居民点变化产生重要影响。随着农户非农收入的增加,工作地以及子女就学等因素的影响,使得居民纷纷远离原居住地,

对农村居民点的变化产生了积极影响。居民自身的受教育程度、生活需求与自我感知,也使得居民越来越追求较好的居住条件与生活水平。基于上述研究的支撑理论,结合调查地的实际情况,建立了农村居民点变化的影响因素路径理论模型,并提出以下假设。H1:农户行为直接影响农村居民点变化;H2:区位经济直接影响农村居民点变化;H3:家庭禀赋通过农户行为间接影响农村居民点变化;H4:家庭禀赋通过区位经济间接影响农村居民点变化;H5:政府政策通过农户行为间接影响农村居民点变化;H6:政府政策通过区位经济间接影响农村居民点变化;H7:家庭禀赋和政府政策之间互相直接影响。

2.2.4 路径分析

将处理好的数据直接导入 Amos 软件,采用极大似然估计法并进行模型优化后,得到标准化路径分析结果(图 3)。

(1)测量模型路径分析

Amos 软件输出结果见表 4。由表 4 可知,观测变量农村居民点核密度值在 0.05 水平显著,其他 19 个观测变量在 0.001 水平显著。

(2)结构模型路径分析

同理,根据 Amos 软件的输出结果,对结构模型进行路径分析,其中农村居民点变化影响因素中各潜变量之间的标准化载荷系数及其显著性水平见表 5。由农村居民点变化影响因素结构模型路径分析结果可知,政府政策和家庭禀赋对农户行为的显著性水平 P 值分别为 0.309、0.406,远大于显著性临界值,因而这 2 条路径不显著,其余 5 条标准化路径系数值均达到显著水平,说明前文的研究假设得到了验证。

农户行为与农村居民点变化之间的标准化路径系数为 0.369,且在 0.001 水平下显著,表明农户行为对农村居民点变化具有直接影响效应,即农户自身的积极行为会直接影响农村居民点的变化。区位经济与农村居民点变化之间的标准化路径系数为 0.483,且在 0.001 水平下显著,表明区位经济对农村居民点变化具有直接影响效应,即农村居民点的地理区位以及经济发展水平会直接影响农村居民点变化。政府政策与家庭禀赋之间的互动影响系数为 0.215,且通过了 0.001 水平的显著性检验,表明政府政策和家庭禀赋两者之间存在显著正向直接影响效应。

政府政策与区位经济之间的标准化路径系数为 0.636,区位经济与农村居民点变化之间的标准

化路径系数为 0.483,均在 0.001 水平下显著,政府政策与农村居民点变化的间接效应系数为 0.307,即政府政策通过区位经济对农村居民点变化产生显著正向的间接影响效应。家庭禀赋与区位经济的标准化路径系数为 0.151,区位经济与农村居民点变化之间的标准化路径系数为 0.483,分别在 0.05 和 0.001 水平下显著,家庭禀赋与农村居民点

变化的间接效应系数为 0.073,即家庭禀赋通过区位经济对农村居民点变化起正向间接影响效应。而政府政策和家庭禀赋与农户行为的标准化路径系数均未通过显著性检验,表明政府政策和家庭禀赋特征主要依靠区位经济作为桥梁间接推动农村居民点的变化。

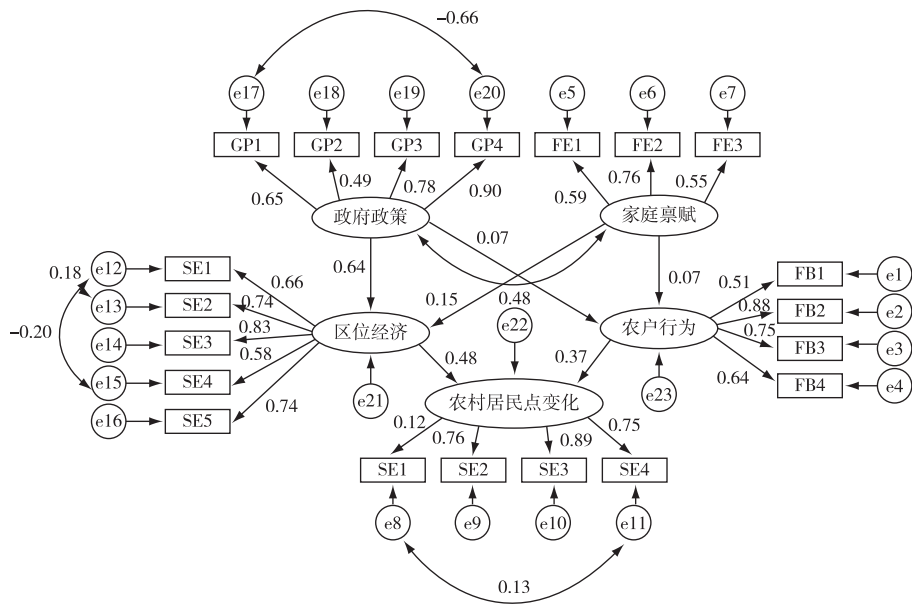


图 3 结构方程模型标准化路径系数图

Fig. 3 The normalized path coefficient diagram of the structural equation model

表 4 测量模型标准化路径系数及其显著性

Table 4 Measurement model normalized path coefficient and its significance

路径	标准化系数	系数估计值	标准误 (S.E.)	临界比 (C.R.)	显著性 <i>P</i> 值
受教育程度 (FB1)→农户行为	0.508	1			
生活成本 (FB2)→农户行为	0.885	2.049	0.220	9.329	***
消费需求 (FB3)→农户行为	0.754	1.554	0.172	9.059	***
特色文化保护满意度 (FB4)→农户行为	0.637	1.672	0.201	8.334	***
家庭非农务工人数 (FE1)→家庭禀赋	0.585	1			
家庭非农总收入 (FE2)→家庭禀赋	0.764	1.138	0.145	7.843	***
家庭住宅面积 (FE3)→家庭禀赋	0.554	0.788	0.107	7.383	***
经济发展水平 (SE4)→区位经济	0.581	1			
城镇化进程 (SE3)→区位经济	0.832	1.623	0.145	11.196	***
交通系统的完善度 (SE2)→区位经济	0.740	1.555	0.149	10.416	***
城镇辐射度 (SE1)→区位经济	0.661	1.243	0.131	9.496	***
教育条件 (SE5)→区位经济	0.741	1.506	0.144	10.419	***
土地制度变迁 (GP1)→政府政策	0.649	1			
搬迁住房满意度 (GP2)→政府政策	0.493	0.742	0.093	8.009	***
养老保险政策 (GP3)→政府政策	0.779	1.194	0.110	10.848	***
医疗卫生政策 (GP4)→政府政策	0.899	1.344	0.128	10.535	***
农村居民点布局及建设情况 (RC3)→农村居民点变化	0.888	1			
农村居民点规模 (RC2)→农村居民点变化	0.763	0.910	0.059	15.513	***
农村居民点核密度值 (RC1)→农村居民点变化	0.121	0.157	0.074	2.122	*
宅基地利用状况 (RC4)→农村居民点变化	0.752	0.763	0.050	15.255	***

*、*** 分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.001$ 。

表 5 结构模型标准化路径系数及其显著性

Table 5 The normalized path coefficients of structural models and their significance

标准模型假设	标准化系数	系数估计值	标准误(S.E.)	临界比(C.R.)	P 值
H1 农户行为→农村居民点变化	0.369	0.797	0.136	5.872	***
H2 区位经济→农村居民点变化	0.483	1.013	0.135	7.529	***
H3 政府政策→区位经济	0.636	0.474	0.067	7.030	***
H4 政府政策→农户行为	0.073	0.053	0.052	1.018	0.309
H5 家庭禀赋→农户行为	0.068	0.053	0.064	0.831	0.406
H6 家庭禀赋→区位经济	0.151	0.123	0.053	2.304	*
H7 家庭禀赋↔政府政策		0.215	0.040	5.397	***

*、*** 分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.001$ 。

2.2.5 假设验证结果

从前文可知,经过修正之后模型达到了较好的拟合效果。在此基础上,分别对农村居民点变化影响因素的测量模型和结构模型进行了路径分析,最终对前文提出的农村居民点变化影响因素的 7 个假设进行验证,结果表明 5 个理论假设成立。即农户行为、区位经济直接影响农村居民点变化,政府政策和家庭禀赋通过区位经济间接影响农村居民点变化,家庭禀赋和政府政策之间相互直接影响,假设 1、假设 2、假设 4、假设 6 和假设 7 成立;家庭禀赋、政府政策通过农户行为间接影响农村居民点变化不成立,假设 3 和假设 5 未通过检验。

3 讨论

(1)研究期内天津市都市边缘区农村居民点数量与用地规模大量减少,与中心城区相邻的农村居民点已基本转化为城镇用地。随着城乡统筹和国家乡村振兴战略的推进,应正确发挥政策驱动力,顺应农村居民点变化趋势,制定优惠的搬迁政策,编制科学有效的村庄规划,实现农村居民点科学有序变迁,为政府对都市边缘区乡村发展做出精准决策提供支持。

(2)区位经济和农户行为是促进农村居民点变化的直接影响因素,同时家庭禀赋和经济的发展也间接影响着农村居民点的变化。天津市都市边缘区农村居民点的变迁应以增进农民福祉为主要出发点和落脚点,紧抓政策契机和国家发展的战略契机,结合新型城镇化、农业现代转型、基础设施建设等政策措施,进一步优化农村居民点空间结构,推动乡村振兴战略的实施。

(3)都市边缘区作为中心城市扩张的热点区域,承载着产业转移等多重功能。以中心城区为核心的建设用地不断向周围扩张的同时,也暴露出土地利用不集约的问题。因此在推动城镇化的同时,应该充分提高和改善农村居民点的用地效率,注重

对农村居民点用地的合理开发利用。

4 结论

(1)研究期内天津市环城四区农村居民点数量逐渐减少,2000 年之后研究区进入快速发展阶段,农村居民点个数由 2000 年的 423 个减少到 2019 年的 127 个,2000—2019 年农村居民点面积减少 1 143.14 hm²,表明研究期内研究区农村城镇化发展迅速,大部分农村居民点消失或搬迁,且农村居民点空间分布呈现集聚性特征。

(2)农户行为直接影响农村居民点的变化。在农户行为对农村居民点变化的观测变量中影响程度排序为生活成本(0.885)>消费需求(0.754)>特色文化保护满意度(0.637)>受教育程度(0.508),表明生活成本与消费需求越大,农户对改变居住地点的主观行为越积极,农户希望得到较高的薪资水平以满足自身及家庭的生活与消费需求,都市边缘区的特殊地理位置便于周边居民转向城市,进而促使农村居民点发生变化。

(3)区位经济对农村居民点变化具有直接影响效应。区位经济对农村居民点变化的观测变量中其影响程度表现为城镇化进程(0.832)>教育条件(0.741)>交通系统的完善度(0.740)>城镇辐射度(0.661)>经济发展水平(0.581),快速城镇化进程促进天津市边缘区大部分农村居民逐渐融入城市,改变了传统的农业生产方式,农村土地利用方式和农村居民点亦相应发生显著变化。

参考文献:

[1] LIU Y S. Introduction to Land Use and Rural Sustainability in China[J]. Land Use Policy, 2018, 74: 1-4.
[2] 商冉,曲衍波,姜怀龙.人地关系视角下农村居民点转型的时空特征与形成机理[J].资源科学, 2020, 42(4): 672-684.
[SHANG Ran, QU Yan-bo, JIANG Huai-long. Spatiotemporal Characteristics and Formation Mechanism of Rural Residential Land Transition from the Perspective of Human-Land Relationship

- [J].Resources Science,2020,42(4):672-684.]
- [3] 文琦,郑殿元,施琳娜.1949—2019 年中国乡村振兴主题演化过程与研究展望[J].地理科学进展,2019,38(9):1272-1281. [WEN Qi,ZHENG Dian-yuan,SHI Lin-na.Themes Evolution of Rural Revitalization and Its Research Prospect in China from 1949 to 2019[J].Progress in Geography,2019,38(9):1272-1281.]
- [4] QU Y B,JIANG G H,YANG Y T,*et al.* Multi-Scale Analysis on Spatial Morphology Differentiation and Formation Mechanism of Rural Residential Land:A Case Study in Shandong Province, China [J].Habitat International,2018,71:135-146.
- [5] MA W Q,JIANG G H,WANG D Q,*et al.* Rural Settlements Transition (RST) in a Suburban Area of Metropolis: Internal Structure Perspectives[J]. Science of the Total Environment,2018,615:672-680.
- [6] 杜国明,刘彦随.黑龙江省垦区居民点体系优化分析:以建三江管理局为例[J].中国土地科学,2015,29(4):65-71,97. [DU Guo-ming,LIU Yan-sui.Analyzing Optimization of Settlement System in the Reclamation Region of Heilongjiang Province: A Case Study of Jiansanjiang Authority [J].China Land Sciences,2015,29(4):65-71,97.]
- [7] 朱彬,尹旭,张小林.县域农村居民点空间格局与可达性:以江苏省射阳县为例[J].地理科学,2015,35(12):1560-1567. [ZHU Bin,YIN Xu,ZHANG Xiao-lin.Spatial Pattern and Accessibility of Rural Settlements: A Case Study on Sheyang County in Jiangsu Province[J].Scientia Geographica Sinica,2015,35(12):1560-1567.]
- [8] 舒帮荣,李永乐,曲艺,等.经济发达地区镇域农村居民点演变驱动力空间差异研究:以太仓市陆渡镇和浏河镇为例[J].长江流域资源与环境,2014,23(6):759-766. [SHU Bang-rong,LI Yong-le,QU Yi,*et al.* Spatial Heterogeneity of Driving Forces of Rural Residential Land Evolution in Township of Developed Regions: A Case Study of Ludu and Liuhe in Taicang[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(6):759-766.]
- [9] 李冬梅,王冬艳,李红,等.吉中低山丘陵区农村居民点时空演变[J].经济地理,2016,36(5):143-151. [LI Dong-mei,WANG Dong-yan,LI Hong,*et al.* Analysis of Spatial-Temporal Evolution of Rural Settlements in the Low-Hilly Area of Central Jilin Province [J].Economic Geography,2016,36(5):143-151.]
- [10] 郑先迪,郑华伟,刘友兆.基于 GIS 的农村居民点空间分布及影响因素分析:以盱眙县为例[J].土壤通报,2019,50(3):550-554. [ZHENG Xian-di,ZHENG Hua-wei,LIU You-zhao. Spatial Distribution and Influencing Factors of Rural Residential Areas Based on GIS: A Case Study of Xuyi County[J].Chinese Journal of Soil Science,2019,50(3):550-554.]
- [11] QU Y B,JIANG G H,ZHAO Q L,*et al.* Geographic Identification, Spatial Differentiation, and Formation Mechanism of Multifunction of Rural Settlements: A Case Study of 804 Typical Villages in Shandong Province, China [J]. Journal of Cleaner Production,2017,166:1202-1215.
- [12] 鄂施璇,雷国平,宋戈.松嫩平原粮食主产区农村居民点格局及影响因素分析[J].农业工程学报,2016,32(18):234-240. [E Shi-xuan,LEI Guo-ping,SONG Ge. Analysis on Pattern and Influence Factors of Rural Settlements in Grain Main Production Area of Songnen Plain [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(18):234-240.]
- [13] 胡鑫,谭雪兰,朱红梅,等.长沙市农村居民点空间格局特征研究[J].地域研究与开发,2015,34(1):138-143. [HU Xin,TAN Xue-lan,ZHU Hong-mei,*et al.* Spatial Pattern Characteristics of Rural Settlements in Changsha City [J].Areal Research and Development,2015,34(1):138-143.]
- [14] 卢德彬,杨建,毛婉柳,等.山区农村居民点空间分布特征与空间重构研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(2):238-246. [LU De-bin,YANG Jian,MAO Wan-liu,*et al.* Research on Spatial Distribution Characteristics and Space Reconstruction of Rural Settlements in Mountainous Areas [J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2017,26(2):238-246.]
- [15] 叶函予.基于引力模型的瓦房店市农村居民点空间布局优化研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2018. [YE Han-yu. Research on Optimizing Distribution of Rural Settlements in Wafangdian Based on Gravity Model [D].Shenyang:Shenyang Jianzhu University,2018.]
- [16] LI N J,JIANG S H. Study on Spatial Pattern of Rural Settlements in Wuling Mountainous Area Based on GIS [J]. Wireless Personal Communications,2018,102(4):2745-2757.
- [17] ZHAO Q L,JIANG G H,MA W Q,*et al.* Social Security or Profitability? Understanding Multifunction of Rural Housing Land from Farmers' Needs: Spatial Differentiation and Formation Mechanism: Based on a Survey of 613 Typical Farmers in Pinggu District [J]. Land Use Policy,2019,86:91-103.
- [18] 姜转芳,颜耀文,李汝嫣,等.基于 GIS 的干旱区绿洲农村居民点格局演变研究:以甘肃河西地区为例[J].生态与农村环境学报,2019,35(3):324-331. [JIANG Zhuan-fang,XIE Yao-wen,LI Ru-yan,*et al.* A Study on Evolution of Rural Settlements Pattern of Oasis in Arid Area Based on GIS: A Case of Hexi Area in Gansu Province [J].Journal of Ecology and Rural Environment,2019,35(3):324-331.]
- [19] 徐羽,钟业喜,徐丽婷,等.江西省农村居民点时空特征及其影响因素研究[J].生态与农村环境学报,2018,34(6):504-511. [XU Yu,ZHONG Ye-xi,XU Li-ting,*et al.* Research on Spatial-Temporal Characteristics and Driving Forces of Rural Settlements in Jiangxi Province [J].Journal of Ecology and Rural Environment,2018,34(6):504-511.]
- [20] 马晓冬,李鑫,胡睿,等.基于乡村多功能评价的城市边缘区“三生”空间划分研究[J].地理科学进展,2019,38(9):1382-1392. [MA Xiao-dong,LI Xin,HU Rui,*et al.* Delineation of “Production-Living-Ecological” Space for Urban Fringe Based on Rural Multifunction Evaluation [J].Progress in Geography,2019,38(9):1382-1392.]
- [21] 魏超,戈大专,龙花楼,等.大城市边缘区旅游开发引导的乡村转型发展模式:以武汉市为例[J].经济地理,2018,38(10):211-217. [WEI Chao,GE Da-zhuan,LONG Hua-lou,*et al.* The Tourism-Led Rural Transformation Development Mode in the Metropolitan Fringe Region: The Case of Wuhan City [J].Economic Geography,2018,38(10):211-217.]
- [22] 周小驰,刘咏梅,杨海娟.西安市城市边缘区空间识别与边界划分[J].地球信息科学学报,2017,19(10):1327-1335. [ZHOU Xiao-chi,LIU Yong-mei,YANG Hai-juan. Spatial Recog-

- nition and Boundary Region Division of Urban Fringe Area in Xi'an City[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(10): 1327-1335.]
- [23] 张越,叶高斌,姚士谋.开发区新城建设与城市空间扩展互动研究:以上海、杭州、南京为例[J]. *经济地理*, 2015, 35(2): 84-91. [ZHANG Yue, YE Gao-bin, YAO Shi-mou. The Interactive Study on New Town Construction of Development Zone and Urban Expansion: Taking Shanghai, Hangzhou and Nanjing as an Example [J]. *Economic Geography*, 2015, 35(2): 84-91.]
- [24] LI X M, LIU Q, HAN J, *et al.* Analysis of the Spatio-Temporal Evolution of Land Intensive Use and Land Ecological Security in Tianjin from 1980 to 2019[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12: 367-375.
- [25] 李璐瑜,靳诚,徐慧琳.南京市旅行社空间演化特征及其影响因素[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2017, 40(2): 124-132. [LI Lu-yu, JIN Cheng, XU Hui-lin. Spatial Evolution and Its Influencing Factors of Travel Agencies in Nanjing [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 40(2): 124-132.]
- [26] 丁华,梁婷,薛艳青,等.基于 ArcGIS 的陕西省乡村旅游空间分布与发展特色研究:以 231 个省级乡村旅游示范村为例[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(3): 110-117. [DING Hua, LIANG Ting, XUE Yan-qing, *et al.* Research on Spatial Distribution and Development Characteristics of Rural Tourism Based on ArcGIS in Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(3): 110-117.]
- [27] 白如山,胡森林,庄良,等.基于细分行业的安徽省创新型企业集聚研究[J]. *世界地理研究*, 2020, 29(6): 1190-1201. [BAI Ru-shan, HU Sen-lin, ZHUANG Liang, *et al.* Spatial Patterns and Influencing Factors of Innovative Enterprises in Anhui Province Based on Subdivision Industry[J]. *World Regional Studies*, 2020, 29(6): 1190-1201.]
- [28] 陈旭,赵鹏鹏,郭海东,等.基于 SEM 的旧工业建筑再生利用主体行为驱动因素分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(3): 212-218. [CHEN Xu, ZHAO Peng-peng, GUO Hai-dong, *et al.* Analysis of Driving Factors for Main Body Behavior of Regeneration and Utilization of Old Industrial Buildings Based on SEM[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(3): 212-218.]
- [29] 周翼虎,方婷婷,李丽.基于 TAM-TPB 框架的农户宅基地退出决策机理研究[J]. *资源科学*, 2021, 43(1): 148-160. [ZHOU Yi-hu, FANG Ting-ting, LI Li. Decision-Making Mechanism of Farmers' Homestead Exit Based on the TAM-TPB Framework[J]. *Resources Science*, 2021, 43(1): 148-160.]
- 作者简介:** 李雪梅(1976—),女,吉林蛟河人,副教授,博士,主要从事土地利用变化与碳排放研究。E-mail: xuemei_321@163.com
- (责任编辑:许素)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0540

李星,周京春,金婷婷,等.滇中城市群土地利用/覆盖变化(LUCC)空间模拟研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(10):1318–1329.

LI Xing,ZHOU Jing-chun,JIN Ting-ting,et al.LUCC Spatial Simulation of Urban Agglomeration in Central Yunnan[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2022,38(10):1318–1329.

滇中城市群土地利用/覆盖变化(LUCC)空间模拟研究

李 星^{1,2,3}, 周京春^{1,2,3①}, 金婷婷^{1,2,3}, 王金亮^{1,2,3} (1. 云南师范大学地理学部, 云南 昆明 650500; 2. 云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 云南 昆明 650500; 3. 云南省地理信息工程技术研究中心, 云南 昆明 650500)

摘要: 以云南省滇中城市群为研究区域,以 2000、2010 和 2020 年的土地利用/覆盖变化(LUCC)数据为基础,结合相关性分析选择潜在的 LUCC 驱动因子,构建 FLUS 模型,模拟研究区内 2035 年的 LUCC,在此基础上分析 2000—2035 年不同时间段内 LUCC 时空演变特征和空间格局效应。结果表明:(1)研究区内土地利用类型由耕地、林地和草地主导,整体格局较为稳定,2000—2020 年建设用地主要来源于对耕地的大量侵占,2010—2020 年变化速率明显比 2000—2010 年快;(2)根据预测,2020—2035 年建设用地主要来源于对林地的侵占,城市扩张有明显的方向性;(3)大部分县(市、区)土地综合利用程度呈上升趋势,部分地区由于退耕还林还草政策的实施,存在着土地利用综合程度下降的现象;利用程度变化热点地区主要集中于中部和东部的县(市、区),呈现出多中心发展的趋势;(4)各地区的景观格局指数变化各有不同,总体来看,景观破碎程度增加、多样性降低。该研究在西部大开发战略和城市化进程加快的背景下,探讨了滇中山地城市群的土地利用特征,模拟了未来的土地利用模式,定量分析了空间格局及其变化效应,对于制定国土空间规划、实现“多规合一”、明确国土空间开发保护目标具有重要意义。

关键词: 滇中城市群; 土地利用/覆盖变化(LUCC); 预测模拟; 时空演化; 地学信息图谱; 景观格局

中图分类号: X87; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1318-12

LUCC Spatial Simulation of Urban Agglomeration in Central Yunnan. LI Xing^{1,2,3}, ZHOU Jing-chun^{1,2,3①}, JIN Ting-ting^{1,2,3}, WANG Jin-liang^{1,2,3} (1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities in Yunnan, Kunming 650500, China; 3. Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province, Kunming 650500, China)

Abstract: Taking the urban agglomeration in Central Yunnan Province as the research area, based on the LUCC data in 2000, 2010 and 2020, combined with correlation analysis, the potential LUCC driving factors were selected to construct the flu model to simulate the LUCC in the study area in 2035. On this basis, the temporal and spatial evolution characteristics and spatial pattern effects of LUCC in different time periods from 2000 to 2035 are analyzed. The results show that (1) the land use types in the study area are mainly dominated by cultivated land, forest land and grassland, and the overall pattern is relatively stable. From 2000 to 2020, the construction land mainly came from a large amount of occupation of cultivated land, and the change rate from 2010 to 2020 was significantly faster than that from 2000 to 2010; (2) According to the prediction, in the next 15 years from 2020 to 2035, the construction land will mainly come from the occupation of forest land, and the urban expansion has obvious direction; (3) The comprehensive degree of land use in most counties and cities shows an upward trend, and there is a decline in the comprehensive degree of land use in some counties and cities due to the implementation of the policy of returning farmland to forest and grassland; The hot spots of utilization degree change are mainly concentrated in the counties and cities in the middle and east, showing a trend of multi-center development; (4) The changes of landscape pattern index in each region are different. On the whole, the degree of landscape fragmentation increases and the diversity decreases. Under the background of western development strategy and accelerated urbanization process, this study discusses the land use characteristics of mountainous urban agglomeration in central Yun-

收稿日期: 2021-09-06

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0184300)

① 通信作者 E-mail: 1325539082@qq.com

nan, simulates the future land use, and quantitatively analyzes the spatial pattern and its change effect, which is of great significance to formulate land space planning, realize "multiple compliance", and clarify the objectives of land space development and protection.

Key words: Central Yunnan Urban Agglomeration; LUCC; prediction; spatio-temporal evolution; spatial transfer maps; spatial pattern

自 1995 年国际地圈生物圈计划(IGBP)和全球环境变化的人文因素计划(IHDP)共同联合发起并提出“土地利用/覆盖变化(LUCC)科学研究计划”以来,LUCC 研究进入了快速发展阶段。LUCC 变化可以引起区域水文、大气、土壤等要素的相应变化^[1-3],从而引起区域空间格局的变化,进而改变生态系统和生态环境的服务功能和价值^[4]。通过建模对土地利用空间格局的精细刻画已成为监测 LUCC 对生态环境的影响、景观格局演变、识别土地利用强度变化的关键^[5-8]。掌握土地利用变化格局、土地利用强度特征及其对生态环境的影响,是当前实现生态-经济-社会系统协调与可持续发展所面临的重要任务^[9]。

自“十三五”规划以来,云南省经济进入快速发展阶段。2017 和 2018 年云南省经济总量位居全国第 18 位,GDP 增速分别为 9.5%和 8.9%,位居全国第 3 位,滇中城市群作为云南省核心经济区正受到外界更多的关注。2020 年 7 月云南省政府印发了《滇中城市群发展规划(2019—2035 年)》,2021 年 5 月公开了《云南省国土空间规划征求意见稿(2021—2035 年)》,要求到 2025 年,滇中城市群功能区要基本划分完善,绿色生态格局稳步提升,城乡空间格局大幅度优化;到 2035 年,要将滇中城市群打造成为全省高质量发展的核心支撑平台,强调要推进昆明、玉溪同城化发展,积极培育曲靖、红河、楚雄都市圈。

地处高原地区的滇中山地城市群生态环境脆弱、地形破碎,在共抓大保护、不搞大开发、守住国家西南生态屏障的前提下,如何打造集约高效的城镇空间土地利用格局和构筑区域生态安全格局是当前迫切的任务。因此,探究当前和模拟预测未来一定时间段内滇中城市群土地利用格局演化模式,揭示土地利用发展规律和探究不同用地类型间的数量和空间结构关系,对优化土地利用格局、稳定生态屏障有着重要的意义,可为山地城市群的国土空间布局优化提供科学的参考依据。

对于 LUCC 空间模拟分析,将数量预测与空间分布模拟相结合是重要的方法。许多国内外学者做了大量的研究,主要包括 LUCC 的预测模拟和空

间表达^[10-12]、LUCC 驱动力分析^[13-15]、LUCC 对生态环境及景观格局变化^[16-17]及对国土空间布局优化的研究^[18-19]等。例如,俞龙生等^[16]采用景观格局与梯度分析相结合的方法,以城市中心为缓冲区设立不同的缓冲带,研究了广州市番禺区在快速城市化背景下土地利用格局的梯度变化及城乡融合区的特征;郎文婧等^[18]对徐州市进行了土地利用格局分析和空间扩张模拟,结果表明徐州市土地利用向着聚集演变,在城市扩张的同时用地结构也同步调整,城市土地利用景观复杂程度降低,扩张有着明显的方向性;WANG 等^[19]以陕西省汉中市汉台区为研究区域,揭示其土地利用的景观形态从自然随机发展为锯齿状,空间格局从规则扩展演变为破碎化扩展,反映出区域发展中的人类干预作用在不断加强;FIROZJAEI 等^[20]采用基于不同方向的 CA-Markov 模型并结合皮尔逊卡方统计、优度指数等方法对伊朗巴博尔市 1985、2001 和 2015 年 3 个时间段内的 LUCC 进行分析,讨论了城市空间结构的扩张方向,并提出相关规划意见;LUO 等^[21]研究表明,在不同的社会经济发展阶段,LUCC 景观演化的速率、模式会有很大差异,在初始阶段远高于后期,而城市化过程对景观的影响并不一定都是负面的,这一认识有助于在区域尺度上减缓景观破碎化的速度;MANSOUR 等^[22]研究了阿曼苏丹国山区城市的 LUCC 变化,模拟了阿曼山区未来城市的发展性质和趋势,解释了阿曼山区城市的发展对山地景观的影响程度和时空变化趋势,表明在被山脉所环绕的山区城市群中,城市通常沿着市中心平坦的土地扩张,应避免城市的无序蔓延。

在经济较为落后、生境脆弱、土地利用破碎的滇中山地城市群,相关研究主要集中于土地利用时空特征分析模拟与生境耦合^[23-25]、土地利用空间优化^[26]等方面,大多以构建未来土地利用空间格局为目的,而较少定量评估 LUCC 格局变化所带来的空间演变效应。鉴于此,笔者利用当前土地利用数据,结合相关驱动因子,在模拟预测滇中城市群 2035 年 LUCC 的基础上,从数量特征、综合程度演化、空间转移变化和景观格局变化几大方面分析其空间结构特征和效应变化。从现实需求来看,可促

进滇中城市群国土空间合理利用和有效保护,有利于落实生态文明建设排头兵的要求,为政府决策提供有益数据参考和科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

滇中城市群地处云南省中部,长江、珠江和红河上游,位于北纬 24°58′~25°09′,东经 100°43′~104°49′之间,以昆明市为中心,包含曲靖、玉溪和楚雄以及红河州北部 7 个县(市),土地总面积约 114 600 km²。研究区地形以山地和山间盆地为主,总体地势呈东南低、西北高,海拔在 130~4 300 m 之间,平均海拔约 1 848 m,属于低纬度高原山地季风气候区。区内高山、湖泊、盆地相互交错,包括滇

池、抚仙湖、星云湖、阳宗海和杞麓湖 5 大高原湖泊,水资源环境较好。整体土地利用开发程度较低,利用潜力大。《滇中城市群发展规划(2019—2035 年)》中明确构建了“一主四副、通道对接、点轴联动”的空间发展格局,强调要建设我国面向南亚、东南亚交往的重要门户城市群。截至 2019 年底,滇中城市群共有人口约 2 304 万人,占全省人口的 47.44%,地区生产总值约 1.41 万亿元,占全省的 60.7%,是云南省的经济增长极。近些年来随着内部交通网络的完善、产业联系度的加强、城镇化水平的提高,经济条件得以快速发展,同时对自然资源的需求压力也逐渐上涨,经济建设的需求和生态环境保护之间的矛盾越来越突出。

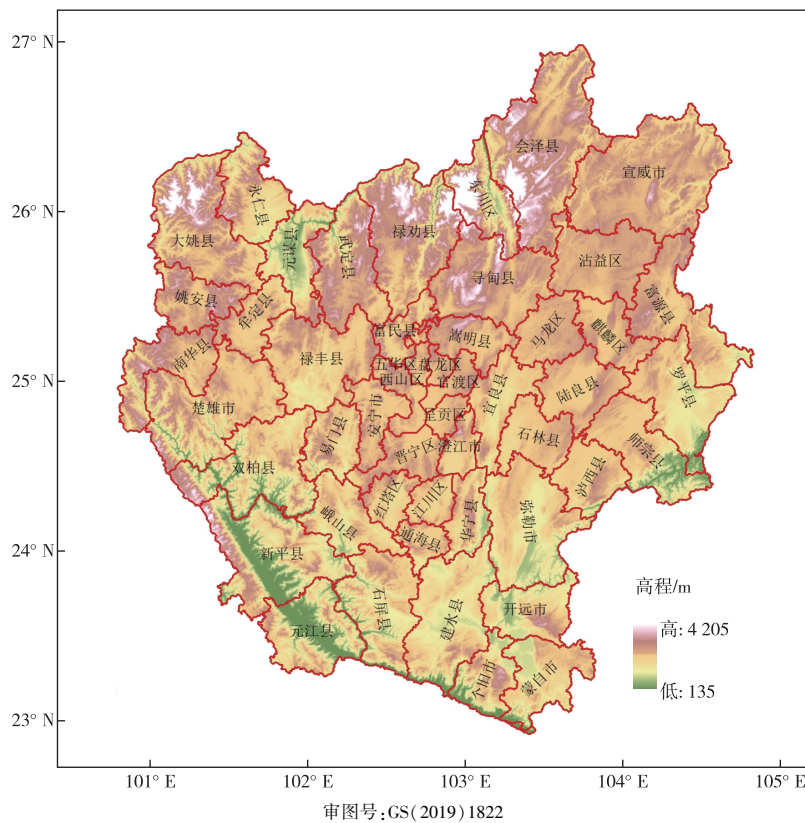


图 1 研究区示意

Fig. 1 Schematic diagram of study area

1.2 数据源及处理

研究涉及的数据如表 1 所示。其中 LUC 数据包含 2000、2010 和 2020 年共 3 期,经重分类后分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类,经验证,各期 kappa 系数均在 0.8 以上。结合相关研究,选择社会经济、自然和交通等类型的 11 个潜在驱动因子,采用欧式距离法计算得到研究区范

围内各个像元到达铁路、高速公路、城镇中心点、河流的距离,劳动力数量以县(市、区)为单位,使用克里金插值法处理为栅格数据,坡度、坡向由数字高程模型(DEM)计算得到。为保证试验区域数据的一致性,采用统一的 UTM 投影系统,并将所有变量因子进行归一化处理,以消除不同量纲的影响。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据类型	数据名称	数据属性 ¹⁾	数据来源
土地利用	土地利用数据	栅格 (30 m)	文献 [27]
社会经济	人口密度	栅格 (1 km)	文献 [27]
	GDP 分布	栅格 (1 km)	文献 [27]
	城镇分布	矢量	OpenStreetMap
	劳动力数量	栅格插值	统计年鉴
交通条件	铁路分布	矢量	OpenStreetMap
	高速公路分布	矢量	文献 [27]
自然条件	土壤类型	栅格 (1 km)	文献 [27]
	DEM、坡度、坡向	栅格 (30 m)	地理空间数据云
	河流分布	矢量	OpenStreetMap

1) 括号内数据为空间分辨率。

2 研究方法

2.1 土地利用变化驱动因子选择

为避免所选取驱动因子的主观性,消除空间自相关影响,通过 Cramer's V 指数分析所选取驱动力因子与 LUCC 的相关性,通过皮尔逊相关系数 r 检测各因子之间的相关性,以消除空间自相关的影响^[28]。

$$\text{Cramer's } V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n \times \min [(r-1)(s-1)]}}, \quad (1)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}。 \quad (2)$$

式(1)~(2)中, χ^2 为卡方检验结果; r 、 s 为行列数; n 为样本数。当 $0.4 \leq \text{Cramer's } V \leq 1$ 时,为较强相关;当 $0.15 \leq \text{Cramer's } V < 0.4$ 时,为弱相关,当 $0 \leq \text{Cramer's } V < 0.15$ 时,表示无相关性。 (X_i, Y_i) 为第 i 个样本值; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 为 n 个样本的均值; r 取值范围为 $[-1, 1]$,越接近1,表示 X 与 Y 的相关性越强。最终选取海拔、坡度、GDP、劳动力数量、距铁路距离、距公路距离、距城镇中心距离、距河流距离8个因子作为驱动力输入模型。

2.2 Markov 与 FLUS 模型构建

通常采用马尔可夫链 (Markov) 来预测未来一定时间段内各土地利用类型的像元总量,假设基于无后效性,即后一个时刻的土地利用状态仅取决于前一个时刻的利用状态^[29]。利用 Markov 过程,结合土地利用转移矩阵,可以计算未来一定时间段内土地利用在数量上的变化,可表示为

$$s_{t+1} = p_{ij} \times s_t, \quad (3)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}。 \quad (4)$$

式(3)~(4)中, p_{ij} 为 i 类土地利用类型转换为 j 类的概率, $0 \leq p_{ij} < 1$ 且 $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, 3, \cdots, n)$; P 为各地类转移概率矩阵; s_{t+1} 和 s_t 分别对应前后时刻土地利用类型。

FLUS 模型建立在系统动力学模型和元胞自动机模型的基础上,融合了人工神经网络算法 (ANN) 和轮盘赌选择机制,ANN 能够整合不同驱动力因素,轮盘赌机制能有效处理不同土地利用类型在自然作用与人类活动共同影响下发生相互转化时的不确定性与复杂性^[30-32]。FLUS 模型能够通过 ANN 整合各类非线性驱动力因子,建立不同土地利用类型与驱动因子之间的关系来模拟不同土地利用类型出现的适宜性概率及空间分布。ANN 包括输入层、隐藏层和输出层,每个 CA 中的一个变量都分别对应一个神经元。

$$p(p, k, t) = \sum_j w_{j,k} \times \text{sigmoid}[\text{net}_j(p, t)] = \sum_j w_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(p, t)}}, \quad (5)$$

$$\text{sigmoid} = \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(p, t)}}, \quad (6)$$

$$\text{net}_j(p, t) = \sum_i w_{i,j} \times x_i(p, t)。 \quad (7)$$

式(5)~(7)中, $\text{net}_j(p, t)$ 为隐藏层神经元 j 收到的信号,即 t 时刻第 j 类土地中的栅格 p 发生的变化; $x_i(p, t)$ 为训练时间 t 内元胞 p 上输入神经元 i 相关联的第 i 个变量; $w_{i,j}$ 与 $w_{j,k}$ 分别为输入层和隐含层与隐藏层和输出层之间的自适应权值;sigmoid为隐藏层和输出层间的激活函数。利用训练数据集对 $w_{j,k}$ 和 $w_{i,j}$ 进行训练,建立人工神经网络模型,可以用于计算栅格 p 在 t 时间出现土地类型 k 的概率。

以滇中城市群 2010 年 LUCC 为基期,在不设置土地利用情景模式的情况下,以随机采样方式选取 5% 的像元为 ANN 训练样本,隐藏层设置为 6 层,得到各类型土地利用适宜性概率分布,采用 5×5 摩尔邻域,设置最大迭代次数为 300,得到 2020 年土地利用模拟数据。经过多次实验,将栅格重采样到 360 m 空间分辨率时,模拟精度最高,并与 2020 年实际 LUCC 对比验证,其 kappa 系数为 0.81,达到模拟要求。在此基础上,结合 Markov,计算出 2035 年

各类用地总像元数量,不设置土地利用情景模式,进行滇中城市群 2035 年土地利用空间分布模拟。

2.3 LUCC 空间格局分析

结合模拟的 2035 年 LUCC,分别从用地数量特

征、综合利用程度演化、空间转移变化和景观变化几个方面讨论研究区 2000—2035 年土地利用格局变化特征,具体方法如表 2 所示。

表 2 空间格局研究方法

Table 2 Research methods of spatial pattern

分析类型	分析方法	分析意义
用地数量特征分析 ^[33]	单一土地利用动态度 综合土地利用动态度	描述研究时间段内不同土地利用类型数量变化情况 描述研究时间段内土地利用数量综合变化情况
综合利用程度演化 ^[34] 空间转移变化 ^[10]	土地利用综合程度 土地利用转移矩阵 土地利用信息图谱	描述土地的综合利用程度 描述时间段内不同土地利用类型的数量相互转换关系 描述时间段内不同土地利用类型的空间相互转换关系
景观变化 ^[23]	景观格局指数	描述景观结构组成特征及景观格局变化

3 结果分析

3.1 2035 年滇中城市群土地利用空间模拟分析

空间模拟结果如图 2 所示。2020—2035 年滇

中城市群各土地利用类型延续了 2000—2020 年的变化趋势,相较于 2020 年,耕地、草地分别减少 386.51 和 650.84 km²,林地、建设用地分别增加 262.21 和 860.41 km²。

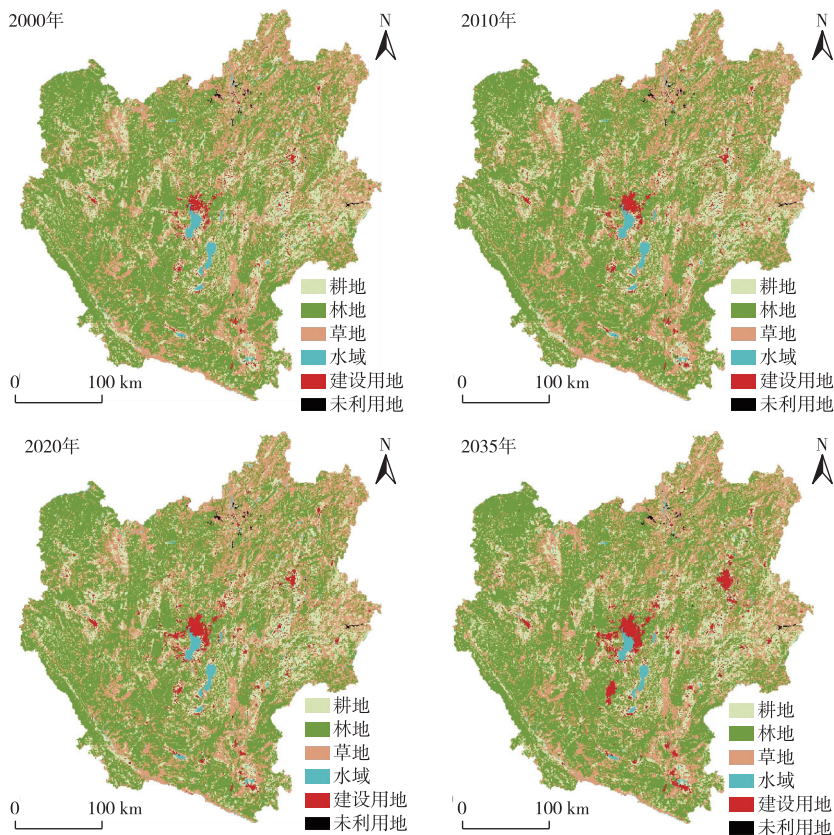


图 2 2000—2035 年滇中城市群土地利用类型空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use types in Central Yunnan Urban Agglomeration from 2000 to 2035

从城市扩张方向来看,昆明市主要变化区域集中在安宁市、呈贡区、晋宁区和宜良县等周边县(区、市),而主城区的五华区、盘龙区、官渡区、西山

区由于三面环山、一面临水的特殊地形,难以再向外扩展,所以发展方向主要是向南面扩展;曲靖市主城区麒麟区、沾益区扩张显著,具有明显的空间

聚集效应,而周边县(市、区)扩张较为缓慢;楚雄州建设用地变化较大的是楚雄市区、元谋县和禄丰县,但从整体上看楚雄州各县(市、区)变化不大;玉溪市发生较大变化的有红塔区、通海县和江川区;红河州扩张较为明显的是蒙自市和开远市。

3.2 2035 年滇中城市群土地利用数量模拟分析

统计分析 2000—2035 年滇中城市群不同土地利用类型所占比例,如表 3~4 所示。从整体情况来看,研究区维持着以耕地、林地和草地主导的土地利用格局,面积占比超过 90%,各类用地面积占比变化较为稳定。从单一动态度看来,耕地面积在各时间段内以 0.10% 的速率减少;林地除 2010—2020 年动态度为负值外,总体为正,而草地在各个时间段内均为负值。耕地和草地的单一动态度均为负值,说明耕地和草地的面积在减少,主要原因为自 2000 年实行西部大开发战略以来,滇中城市群经济发展迅速,城镇化进程加快,使得以建设用地为主的生产生活用地快速扩张,对耕地和草地的侵占加剧。从综合动态度看来,2010—2020 年明显高于 2000—2010 年,说明在此时间段内土地利用变化程

度较为明显,处于城市快速发展时期。滇中城市群 35 a 间各土地利用类型变化存在着明显的空间差异。对建设用地而言,2000—2020 年每个县(市、区)面积均为增长态势,增长显著的地区主要集中在昆明市和曲靖市以及南部的蒙自市,其中官渡区、呈贡区、晋宁区、西山区、蒙自市、麒麟区增长面积均超过 30 km²。对于耕地而言,面积显著增加的地区为沾益区、宣威市、开远市和谋定县,而官渡区、安宁市、晋宁区、呈贡区、麒麟区、蒙自市、楚雄市面积显著减少,均超过 20 km²。林地面积有所增加的县(市、区)有 24 个,草地面积有所增加的有 9 个。根据预测,2020—2035 年建设用地面积显著增加的地区有麒麟区、沾益区、呈贡区、个旧市、安宁市,均超过 40 km²。耕地面积增加的县(市、区)有 19 个,其中增加较多的是弥勒县、陆良县、罗平县、富源县、沾益区等。林地面积显著减少的是安宁市、呈贡区、盘龙区、个旧市,均超过 50 km²。2000—2010、2010—2020、2000—2020、2020—2035 年面积变化的综合动态度分别为 0.02%、0.07%、0.04% 和 0.05%。

表 3 滇中城市群不同时期土地利用面积变化

Table 3 Quantitative change of land use area in different periods of urban agglomeration in Central Yunnan

用地类型	2000 年		2010 年		2020 年		2035 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	23 056.23	20.70	22 819.89	20.49	22 599.21	20.29	22 212.71	19.94
林地	54 747.96	49.15	54 838.64	49.24	54 681.71	49.10	54 943.92	49.33
草地	30 316.18	27.22	30 275.88	27.18	29 920.61	26.86	29 269.77	26.28
水域	1 311.03	1.18	1 318.68	1.18	1 462.20	1.31	1 391.91	1.25
建设用地	1 785.36	1.60	1 963.64	1.76	2 553.43	2.29	3 413.84	3.07
未利用地	162.73	0.15	162.76	0.15	160.67	0.14	147.35	0.13

表 4 滇中城市群不同时期土地利用面积的年度变化率

Table 4 Annual change of land use area in different periods of urban agglomeration in Central Yunnan

用地类型	年度变化率/%			
	2000—2010	2010—2020	2000—2020	2020—2035
耕地	-0.10	-0.10	-0.10	-0.11
林地	0.02	-0.03	-0.01	0.03
草地	-0.01	-0.12	-0.07	-0.15
水域	0.06	1.09	0.58	-0.32
建设用地	1.01	3.00	2.15	2.25
未利用地	0.01	-0.13	-0.06	-0.55

综上可知,建设用地面积增加较多的地区则是林地、草地减少较多的地区。地处山地的呈贡区、红塔区、蒙自市、个旧市建设用地快速增加,其原因是云南省推行山地城镇模式,推进建设用地向着山地发展,使得地处山地的县(市、区)得到快速发展,

而处于昆明主城区的五华区、盘龙区、官渡区建设用地开发程度较高,增加幅度较少。

3.3 滇中城市群土地利用程度模拟分析

土地利用综合程度反映了人类社会活动与自然环境综合效应,是土地利用开发程度的综合体现。以县(市、区)为单位分别统计研究区范围内 4 个时间段的土地利用综合程度指数和其变化量,结果如图 3~4 所示。

结果表明,大部分县(市、区)的土地利用综合指数呈上升趋势,说明建设用地的增加使得利用程度不断提高。2000—2020 年,以五华区、官渡区、呈贡区、安宁市、盘龙区、西山区、麒麟区增长最为明显,变化热点主要集中在以昆明市为中心的中部地区。2020—2035 年,以呈贡区、晋宁区、安宁市、麒麟区、沾益区、红塔区、个旧市、蒙自市等地增长最

为显著,变化的热点区域主要集中在中部和东部的部分地区。而在南华、大姚、双柏、永仁等县(市、

区),由于退耕还林还草政策的影响,林地和草地面积增加导致土地利用综合程度有所下降。

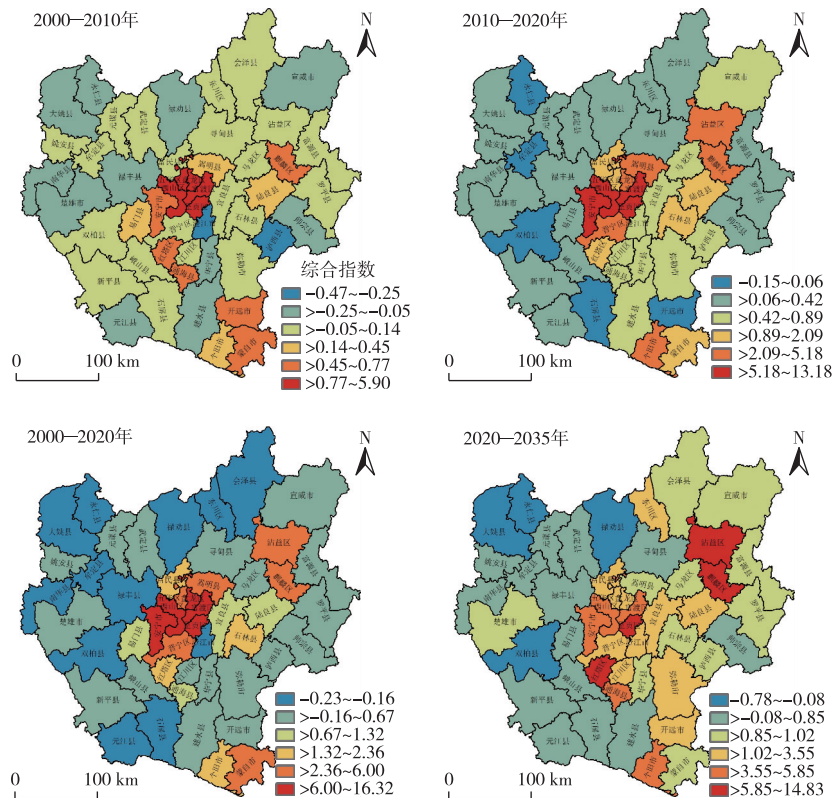


图 3 2000—2035 年滇中城市群各县(市、区)土地利用综合程度变化热点图
Fig. 3 Hot spots of comprehensive land use change in counties and cities of Central Yunnan Urban Agglomeration from 2000 to 2035

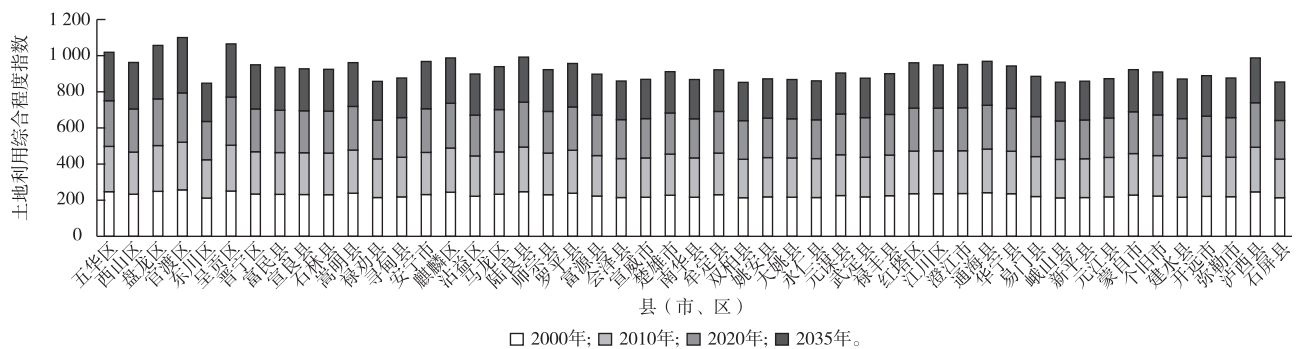


图 4 2000—2035 年滇中城市群各县(市、区)土地利用综合程度指数变化
Fig. 4 Change of comprehensive land use degree of counties and cities in Central Yunnan Urban Agglomeration from 2000 to 2035

3.4 滇中城市群土地利用空间转移变化模拟分析

通过不同时期的土地利用演化信息图谱(图 5)可以统计出土地利用类型的空间转移特征。从整个范围来看,2000—2020 年滇中城市群土地利用主要以耕地、林地、草地、建设用地相互转换为特征。从表 5 来看,2000—2020 年建设用地转入了 840.97

km²,主要来源于耕地、林地和草地,其中耕地转入占比超过 50%。耕地、林地和草地分别转出了 1 119.06、920.33 和 1 158.86 km²,主要转换为草地和建设用地。从表 6 来看,后 10 a 中,建设用地转入了 666.07 km²,主要来源于耕地和草地。耕地转出最多的地方主要集中在麒麟区、官渡区、蒙自市、

楚雄市、安宁区、呈贡区、罗平县,转为林地和草地的地方主要集中在峨山县、元江县、姚安县、罗平县、宣威市,说明这几个县(市)退耕还林还草政策的实施取得较大的成效。转为建设用地的地区主要集中在呈贡区、晋宁区、安宁市、麒麟区、楚雄市,说明中心城区和周边地区仍然是耕地占用的活跃区域,具有明显的聚集效应。从表 7 来看,2000—

2010 年间土地利用变化不明显,发展较为缓慢,大部分土地保持着原有利用类型。2010 年以后,城镇化进程加快,建设用地快速扩张,土地利用变化速率有所加快。从表 8 来看,2020—2035 年建设用地将会转入 903.14 km²,其中林地贡献率将会达到 80%以上,而耕地的贡献率减少,演化特征发生转变,表明城市扩展方向将会有所改变。

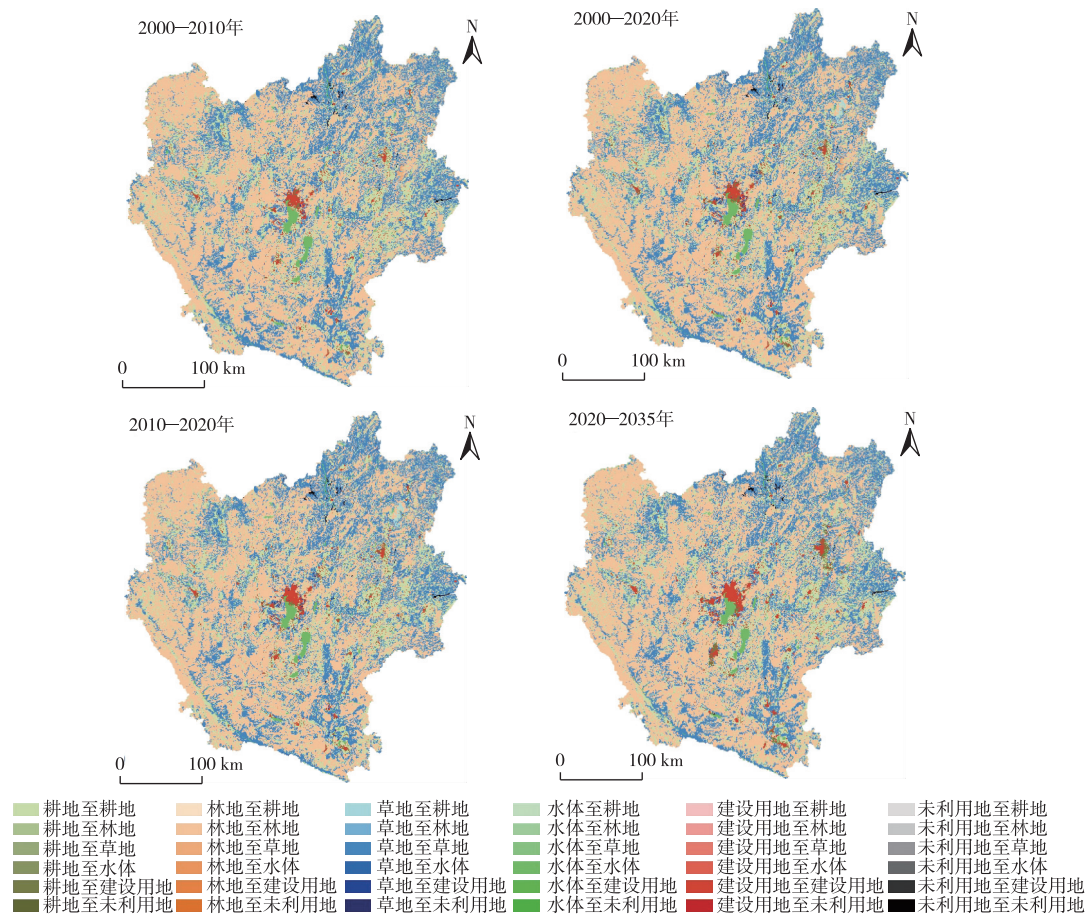


图 5 2000—2035 年滇中城市群土地利用演化信息图谱

Fig. 5 Land use evolution information map of urban agglomeration in Central Yunnan from 2000 to 2035

表 5 2000—2020 年滇中城市群土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transfer matrix of urban agglomeration in Central Yunnan from 2000 to 2020		km ²					
2000 年	2020 年						合计
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
耕地	21 936. 89	286. 90	263. 12	67. 95	497. 25	3. 84	1 119. 06
林地	267. 02	53 826. 54	469. 22	69. 74	113. 55	0. 79	920. 33
草地	319. 51	548. 56	29 155. 42	75. 62	212. 73	2. 44	1 158. 86
水域	23. 35	12. 28	19. 00	1 239. 98	15. 82	0. 55	71. 00
建设用地	49. 51	6. 11	10. 42	6. 30	1 712. 45	0. 57	72. 91
未利用地	2. 79	0. 83	2. 65	2. 36	1. 61	152. 47	10. 24
合计	662. 19	854. 68	764. 41	221. 96	840. 97	8. 19	

表 6 2010—2020 年滇中城市群土地利用转移矩阵

Table 6 Land use transfer matrix of urban agglomeration in Central Yunnan from 2010 to 2020								km ²
2010 年	2020 年							
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计	
耕地	21 955.06	235.11	198.86	67.62	359.13	3.85	864.56	
林地	262.93	54 088.18	317.08	63.53	105.04	0.79	749.37	
草地	305.38	337.88	29 369.50	73.98	185.01	2.23	904.47	
水域	21.68	12.69	20.33	1 248.07	15.31	0.55	70.56	
建设用地	51.25	6.54	11.53	6.38	1 887.36	0.57	76.28	
未利用地	2.78	0.83	2.53	2.36	1.57	152.67	10.07	
合计	644.02	593.04	550.33	213.86	666.07	7.99		

表 7 2000—2010 年滇中城市群土地利用转移矩阵

Table 7 Land use transfer matrix of urban agglomeration in Central Yunnan from 2000 to 2010								km ²
2000 年	2010 年							
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计	
耕地	22 795.73	52.87	65.98	3.32	138.31	0.01	260.50	
林地	4.77	54 570.88	153.83	8.70	9.79	0.00	177.08	
草地	14.71	214.72	30 054.04	3.10	29.42	0.21	262.15	
水域	4.68	0.17	1.91	1 303.57	0.71	0.00	7.47	
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	1 785.36	0.00	0.00	
未利用地	0.01	0.00	0.12	0.00	0.05	162.55	0.18	
合计	24.17	267.76	221.85	15.12	178.28	0.21		

表 8 2020—2035 年滇中城市群土地利用转移矩阵

Table 8 Land use transfer matrix of urban agglomeration in Central Yunnan from 2020 to 2035								km ²
2020 年	2035 年							
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计	
耕地	21 446.21	100.44	654.52	11.66	95.43	1.64	863.69	
林地	615.65	52 942.03	94.61	3.62	735.65	0	1 449.53	
草地	846.55	1 891.47	27 149.43	0.65	65.84	0	2 804.50	
水域	49.90	7.52	14.90	1 378.81	5.31	0	77.63	
建设用地	3.92	1.43	19.05	0.78	2 516.88	0	25.17	
未利用地	3.76	1.04	5.83	0	0.91	147.36	11.53	
合计	1 519.77	2 001.89	788.92	16.71	903.14	1.64		

3.5 滇中城市群土地利用景观格局演化模拟分析

借鉴相关研究,选取最大斑块指数(LPI)、形状指数(LSI)、蔓延度(CONTAG)、聚合度(AI)、香农均匀度(SHEI)、香农多样性指数(SHDI)共计6个景观格局指数分析滇中城市群土地利用格局的变化特征,计算结果如图6所示。2000—2035年,各州(市)的景观格局指数在不同时间段表现出不同的变化趋势。从LPI指数来看,各州(市)均呈现为缓慢上升的趋势,且楚雄州和玉溪市明显高于其他3个州(市),2035年两地的林地LPI指数分别为57.84和56.38,明显高于其他土地利用类型,表明林地优势度越来越明显。从LSI指数来看,各个州(市)均表现为持续下降,表明空间景观斑块形状越来越规则。从CONTAG和AI指数来看,各州(市)呈现出递增趋势,且2020—2035年明显上升,说明

空间斑块破碎度降低,连片效应越来越明显。从SHEI和SHDI指数来看,均呈现出下降的趋势,2020—2035年减少较为明显,说明单一优势类型越来越明显,景观多样性有所下降。总体而言,景观格局演变存在着明显的空间分异。

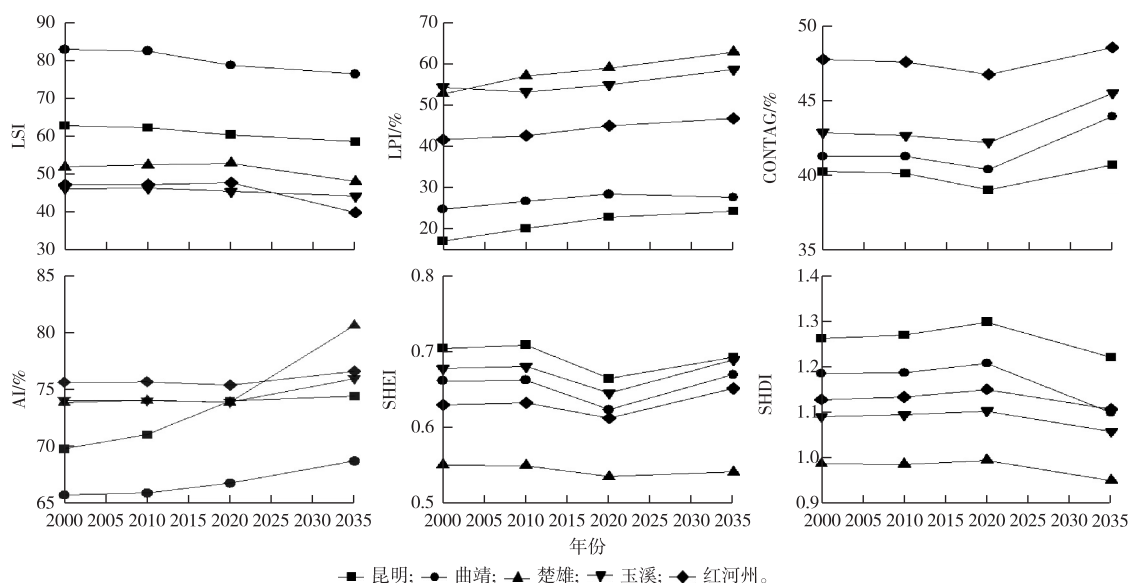
4 讨论与结论

4.1 讨论

以滇中城市群2000、2010和2020年的LUCC数据为基础,首先根据滇中城市群的土地利用数量变化构建Markov模型,预测2035年的土地利用数量特征,然后选择相应的土地利用驱动力因子构建FLUS模型,获得2035年的土地利用空间分布特征,最后结合预测的土地利用数据,从用地数量特征、利用程度变化、空间转移变化和景观指数几个方面

分别探讨了 2000—2020 和 2020—2035 年 2 个时段的土地利用数量和空间变化特征及规律。从整体上看,滇中城市群土地利用格局变化较为稳定,但从各州(市)看来,局部地区有着剧烈的变化,这与相应的退耕还林还草政策、不同州(市)的城市规划和开发程度有关。现阶段处于快速发展期,在生态文明示范建设和生态战略行动的背景下,如何平

衡发展建设和生态平衡两大问题是当前的迫切任务。因此,滇中城市群未来土地利用空间布局需要制定城市扩张边界控制线、生态保护红线、基本农田保护界线等空间控制区和相应的政策措施,继续执行退耕还林还草政策,协调滇中城市群和生态环境的平衡发展。



LSI—形状指数, LPI—最大斑块指数, CONTAG—蔓延度, AI—聚合度, SHEI—香农均匀度, SHDI—香农多样性指数。

图 6 2000—2035 年滇中城市群土地利用景观格局指数变化

Fig. 6 change of land use landscape pattern index of urban agglomeration in Central Yunnan from 2000 to 2035

在研究过程中,一方面由于数据获取的局限性,共选择了 8 个驱动因子进行模型构建,但是驱动和制约 LUCC 的因素众多且复杂,在未来的研究中若能从客观的政策方面以及定量的规划红线方面选取更多的驱动因子,则可使模拟精度得到更大提高。另一方面,在土地利用空间格局分析中,尺度是影响研究结果的重要因素,后续加入尺度的变化也是一个重要的研究方向。

4.2 结论

(1) 从数量和空间变化上探讨了滇中城市群的过去、当前和未来土地利用数量和空间变化所带来的效应,发现在不同时间段内各地区的变化存在着明显的空间差异性。昆明市、曲靖市等在滇中城市群中经济发展较为迅速的地区,土地利用格局变化明显,特别是根据预测得到的 2035 年土地利用空间分布状况来看,建设用地扩张的方向性明显,快速城市化仍然是当前发展的主要特征,在保证经济建设的同时,也要防止城市的无序性扩展。

(2) 从各地类占比来看,2000—2020 年,建设用

地面积增加了 43%, 2000—2010 年增加了 10%, 发展较为滞后,而 2010—2020 年增加了 30% 左右,后 10 a 明显处于快速发展期。到了 2035 年,相比于 2020 年,林地面积占比略微有所提升,建设用地面积增长了 34% 左右,其他各类土地利用类型变化幅度不大,将会形成一个较为稳定的以耕地、林地和草地主导的空间格局。滇中城市群大部分县(市、区)的土地利用综合程度均在逐渐上升,利用程度变化热点区域集中在以昆明市为中心的中部和以曲靖市为中心的东部部分地区以及红河州的蒙自市和个旧市等地区,同时热点地区周围县(市、区)的土地利用综合程度增长也较快。2010 年后综合利用程度热点地区的变化明显受到云南省“城镇山上”政策的影响,滇中城市群正朝着曲靖、红河都市圈的多中心方向发展。

(3) 从景观变化方面来看,土地利用景观格局指数有着明显的规律性。AI、LPI、CONTAG 指数逐年上升,LSI、SHEI、SHDI 呈下降趋势,且 2020—2035 年间的变化幅度明显大于 2000—2020 年间。

空间破碎度增加、联通性下降、斑块形状越来越规则,主要原因是由于建设用地的扩张对自然景观进行有规划的切割,使得优势景观类型对总体景观格局的影响力不断减弱。因此,在今后的发展建设中,需要明确区域内的功能分区,积极构建以林地和草地为主的生态屏障,确保景观多样性。

参考文献:

- [1] GARRITY S R, ALLEN C D, BRUMBY S P, *et al.* Quantifying Tree Mortality in a Mixed Species Woodland Using Multitemporal High Spatial Resolution Satellite Imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 129: 54–65.
- [2] AVILA F B, PITMAN A J, DONAT M G, *et al.* Climate Model Simulated Changes in Temperature Extremes Due to Land Cover Change[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(4): D04108.
- [3] 周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 138–143. [ZHOU Tao, SHI Pei-jun. Indirect Impacts of Land Use Change on Soil Organic Carbon Change in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 138–143.]
- [4] 张凤太, 苏维词, 赵卫权. 基于土地利用/覆被变化的重庆城市生态系统服务价值研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3): 21–25, 50. [ZHANG Feng-tai, SU Wei-ci, ZHAO Wei-quan. Urban Ecosystem Service Values Based on Land Use Change/Cover (LUCC) in Chongqing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(3): 21–25, 50.]
- [5] 刘纪远, 张增祥, 张树文, 等. 中国土地利用变化遥感研究的回顾与展望: 基于陈述彭学术思想的引领[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(4): 680–687. [LIU Ji-yuan, ZHANG Zeng-xiang, ZHANG Shu-wen, *et al.* Innovation and Development of Remote Sensing-Based Land Use Change Studies Based on Shupeng Chen's Academic Thoughts[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(4): 680–687.]
- [6] 刘纪远, 刘文超, 匡文慧, 等. 基于主体功能区规划的中国城乡建设用地扩张时空特征遥感分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(3): 355–369. [LIU Ji-yuan, LIU Wen-chao, KUANG Wen-hui, *et al.* Remote Sensing-Based Analysis of the Spatiotemporal Characteristics of Built-up Area across China Based on the Plan for Major Function-Oriented Zones[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 355–369.]
- [7] DAS S, ANGADI D P. Land Use Land Cover Change Detection and Monitoring of Urban Growth Using Remote Sensing and GIS Techniques: A Micro-Level Study[J]. *GeoJournal*, 2022, 87(3): 2101–2123.
- [8] 刘芳, 闫慧敏, 刘纪远, 等. 21 世纪初中国土地利用强度的空间分布格局[J]. *地理学报*, 2016, 71(7): 1130–1143. [LIU Fang, YAN Hui-min, LIU Ji-yuan, *et al.* Spatial Pattern of Land Use Intensity in China in 2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1130–1143.]
- [9] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441–446. [FU Bo-jie, ZHANG Li-wei. Land-Use Change and Ecosystem Services: Concepts, Methods and Progress[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(4): 441–446.]
- [10] 张文慧, 吕晓, 史洋洋, 等. 黄河流域土地利用转型图谱特征[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(8): 80–88. [ZHANG Wen-hui, LÜ Xiao, SHI Yang-yang, *et al.* Graphic Characteristics of Land Use Transition in the Yellow River Basin[J]. *China Land Science*, 2020, 34(8): 80–88.]
- [11] PICKARD B, GRAY J, MEENTEMEYER R. Comparing Quantity, Allocation and Configuration Accuracy of Multiple Land Change Models[J]. *Land*, 2017, 6(3): 52.
- [12] LIU X P, LIANG X, LI X, *et al.* A Future Land Use Simulation Model (FLUS) for Simulating Multiple Land Use Scenarios by Coupling Human and Natural Effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94–116.
- [13] WU D, HOU W, ZHANG S W, *et al.* Processes and Prediction of Land Use/Land Cover Changes (LUCC) Driven by Farm Construction: The Case of Naoli River Basin in Sanjiang Plain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(8): 4841–4851.
- [14] 郭燕滨, 徐涵秋, 张灿, 等. 闽南金三角地区城市扩展及其驱动分析: 以漳州市主城区为例[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(8): 927–936. [GUO Yan-bin, XU Han-qiu, ZHANG Can, *et al.* Analysis of Spatio-Temporal Expansion for the Golden Triangle Region in South Fujian Province, China: A Case Study of Zhangzhou Urban Area[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(8): 927–936.]
- [15] 韩海青, 王旭红, 牛林芝, 等. 1992—2015 年中亚五国 LUCC 特征及耕地驱动力研究[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(2): 325–339. [HAN Hai-qing, WANG Xu-hong, NIU Lin-zhi, *et al.* The Land-Use and Land-Cover Change Characteristics and Driving Forces of Cultivated Land in Central Asian Countries from 1992 to 2015[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(2): 325–339.]
- [16] 俞龙生, 符以福, 喻怀义, 等. 快速城市化地区景观格局梯度动态及其城乡融合区特征: 以广州市番禺区为例[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 171–180. [YU Long-sheng, FU Yi-fu, YU Huai-yi, *et al.* Landscape Pattern Gradient Dynamics and Desakota Features in Rapid Urbanization Area: A Case Study in Panyu of Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 171–180.]
- [17] MACIEL A M, CAMARA G, VINHAS L, *et al.* A Spatiotemporal Calculus for Reasoning about Land-Use Trajectories[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(1): 176–192.
- [18] 郎文婧, 李效顺, 卞正富, 等. 徐州市区土地利用格局变化分析及其空间扩张模拟[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(7): 592–599. [LANG Wen-jing, LI Xiao-shun, BIAN Zheng-fu, *et al.* Analysis of Changes in Land Use Pattern in Xuzhou City and Simulation of Its Spatial Expansion[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(7): 592–599.]
- [19] WANG L, WU L, ZHANG W. Impacts of Land Use Change on Landscape Patterns in Mountain Human Settlement: The Case Study of Hantai District (Shaanxi, China)[J]. *Journal of Mountain*

- Science, 2021, 18(3): 749–763.
- [20] FIROZJAEI M K, SEDIGHI A, ARGANY M, *et al.* A Geographical Direction-Based Approach for Capturing the Local Variation of Urban Expansion in the Application of CA-Markov Model[J]. Cities, 2019, 93: 120–135.
- [21] LUO T, ZHANG T H, WANG Z F, *et al.* Driving Forces of Landscape Fragmentation Due to Urban Transportation Networks: Lessons from Fujian, China[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2016, 142(2):
- [22] MANSOUR S, AL-BELUSHI M, AL-AWADHI T. Monitoring Land Use and Land Cover Changes in the Mountainous Cities of Oman Using GIS and CA-Markov Modelling Techniques[J]. Land Use Policy, 2020, 91: 104414.
- [23] 林伊琳, 赵俊三, 张萌, 等. 滇中城市群国土空间格局识别与时空演化特征分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 176–191. [LIN Yi-lin, ZHAO Jun-san, ZHANG Meng, *et al.* Identification of Territory Space Pattern and Spatio-Temporal Evolution Analysis of Urban Agglomeration in Central Yunnan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 176–191.]
- [24] 农兰萍, 王金亮, 玉院和. 基于改进型遥感生态指数(MRSEI)模型的滇中地区生态环境质量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(8): 972–982. [NONG Lan-ping, WANG Jin-liang, YU Yuan-he. Research on Ecological Environment Quality in Central Yunnan Based on MRSEI Model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(8): 972–982.]
- [25] 陈仙春. 基于 CLUE-S 模型的滇中城市群土地利用变化模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020. [CHEN Xian-chun. Simulation of Land Use Change in Central Yunnan Urban Agglomeration Based on CLUE-S Model[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.]
- [26] 林伊琳, 赵俊三, 陈国平, 等. 基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 159–170, 207. [LIN Yi-lin, ZHAO Jun-san, CHEN Guo-ping, *et al.* Optimization of Regional Territory Space Pattern Based on MCR-FLUS-Markov Model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 159–170, 207.]
- [27] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL]//中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统.[2021-08-20]. <http://www.resdc.cn/DOI;10.12078/2018070201>.
- [28] 林丽, 樊辉, 金缘. 山区县域土地利用/覆被变化多尺度多模型模拟对比: 以云南省勐腊县为例[J]. 山地学报, 2020, 38(4): 630–642. [LIN Li, FAN Hui, JIN Yuan. Multi-Scale and Multi-Model Simulation of Land Use/Land Cover Change in the Mountainous County: A Case Study of Mengla County in Yunnan Province, China[J]. Mountain Research, 2020, 38(4): 630–642.]
- [29] GAO T, HUANG J J, ZHOU H, *et al.* Prediction of Land-Use Change along the Urban Rail Transit Based on Markov Model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556/557/558/559/560/561/562: 894–898.
- [30] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 19–27. [LI Xia, YE Jia-an, *et al.* Cellular Automata for Simulating Complex Land Use Systems Using Neural Networks[J]. Geographical Research, 2005, 24(1): 19–27.]
- [31] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 等. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(4): 532–542. [WU Xin-xin, LIU Xiao-ping, LIANG Xun, *et al.* Multi-Scenarios Simulation of Urban Growth Boundaries in Pearl River Delta Based on FLUS-UGB[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(4): 532–542.]
- [32] LI X, LAO C H, LIU Y L, *et al.* Early Warning of Illegal Development for Protected Areas by Integrating Cellular Automata with Neural Networks[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 130: 106–116.
- [33] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用变化特征及驱动机制[J]. 经济地理, 2015, 35(5): 148–154, 197. [HAN Hui-ran, YANG Cheng-feng, SONG Jin-ping. The Spatial-Temporal Characteristic of Land Use Change in Beijing and Its Driving Mechanism[J]. Economic Geography, 2015, 35(5): 148–154, 197.]
- [34] 吴滢滢, 吴绍华, 周生路, 等. 昆山市土地生态质量空间分异及其对土地利用程度的响应[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 201–205, 209. [WU Ying-ying, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, *et al.* Spatial Differentiation of Land Ecological Quality and Its Response to Land Use Degree in Kunshan City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(4): 201–205, 209.]

作者简介: 李星(1997—), 男, 贵州贵阳人, 主要研究方向为资源环境遥感。E-mail: 954392641@qq.com

(责任编辑: 陈 昕)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0521

边振兴, 关明昊, 佟昊轩, 等. 辽宁省昌图县非耕地斑块对耕地系统景观异质性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1330–1337.

BIAN Zhen-xing, GUAN Ming-hao, TONG Hao-xuan, et al. Effects of Non-cultivated Patch on Landscape Heterogeneity of Cultivated Land System in Changtu County, Liaoning Province. [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1330–1337.

辽宁省昌图县非耕地斑块对耕地系统景观异质性的影响

边振兴¹, 关明昊¹, 佟昊轩¹, 杨玉静¹, 初琢明¹, 于 淼^{2①} (1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学理学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 景观异质性是维持耕地系统生物多样性及多种生态系统服务功能的基础。为探明非耕地对耕地系统景观异质性的作用,以辽宁省昌图县为研究区,在划定网格单元的基础上,采用 Rao 二次熵指数(Q)表征其景观异质性,通过冗余分析、独立样本 t 检验及回归分析等方法探讨非耕地斑块对景观异质性及影响。结果表明:当不同网格单元非耕地比例相近时,景观异质性存在明显差异;当非耕地比例为 8% 时,景观异质性差异最大。林地、草地、农村道路、水域及沟渠 5 种非耕地类型对景观异质性均有极显著正向影响($P < 0.01$),其中林地对景观异质性的影响程度最大。景观异质性不同的网格单元中非耕地斑块的平均最近邻体距离指数(ENN_MN)存在显著性差异($P < 0.05$)。非耕地斑块连通性越强,景观异质性也越强。研究结果可为严守耕地红线背景下的耕地生态管护提供参考借鉴。

关键词: 耕地系统; 景观异质性; 非耕地比例; 连通性

中图分类号: X87; P901 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1330-08

Effects of Non-cultivated Patch on Landscape Heterogeneity of Cultivated Land System in Changtu County, Liaoning Province. BIAN Zhen-xing¹, GUAN Ming-hao¹, TONG Hao-xuan¹, YANG Yu-jing¹, CHU Zhuo-ming¹, YU Miao^{2①} (1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. College of Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Landscape heterogeneity is the basis for maintaining biodiversity and ecosystem services in cultivated land system. To explore the effect of non-cultivated land on landscape heterogeneity of cultivated land system, taking Changtu county of Liaoning Province as the study area, Rao quadratic entropy index (Q) was used to characterize landscape heterogeneity based on grid units, and the effect of non-arable patches on landscape heterogeneity was investigated by redundancy analysis, independent sample T test, regression analysis and other methods. The results indicate that: (1) when the proportion of non-arable land of the sample grid units was similar, there was a significant difference in landscape heterogeneity. When the proportion of non-arable land of the sample grid units was 8%, the difference of landscape heterogeneity between the units was the largest. (2) Forest land, grassland, rural road, water area and ditch had significant positive effects on landscape heterogeneity ($P < 0.01$), and forest land had the greatest effect. (3) The mean nearest neighbor distance index (ENN-MN) of non-arable land patches in grid units with different landscape heterogeneity was significantly different ($P < 0.05$). The stronger the non-arable patch connectivity was, the stronger the landscape heterogeneity was. This paper can provide reference for the ecological management and protection of cultivated land in the context of strictly protecting the red line of cultivated land.

Key words: cultivated land system; landscape heterogeneity; proportion of non-cultivated land; connectivity

耕地系统是以耕地资源为主体的自然生态系统和以人类活动(包括技术、耕作制度等)为主体的社会经济系统共同形成的复合系统^[1-2]。从土地利用的角度出发,可将耕地系统视为一个具有一定长、宽、高的有机立体空间,其长和宽通常由耕地规模决定,高度则由耕层厚度及种植的作物决定^[2]。

从景观生态学的角度出发,耕地系统由耕地要素与其周边和内部的林地、草地、沟渠等自然和半自然

收稿日期: 2021-08-25

基金项目: 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0709)

① 通信作者 E-mail: yumiao77@163.com

非耕地要素共同组成,非耕地是动植物栖息的主要场所,为农业生态系统的健康与可持续发展奠定了坚实的基础^[3]。然而随着现代农业的高速发展,大量非耕地斑块从耕地周边消失,结构简单、类型单一的耕地系统使得景观异质性受到严重制约^[4]。景观异质性是指在一个景观系统中景观要素类型、组合及属性在空间或时间上的变异性^[5],异质性强对维持耕地系统中的生物多样性、维护耕地生态安全具有重要意义^[6-7]。景观异质性一般通过多个指数表达,如 Shannon 多样性指数、最大斑块指数及连接度指数等^[8-9]。通过多个指数表征景观异质性较为繁琐,缺乏综合性,采用单一指数表征景观异质性如 Rao 二次熵指数^[10]、基于高分辨率 NDVI 数据的变异函数模型等^[11]更为简洁,易于表达景观异质性特征。

景观异质性与研究尺度有关,尺度问题一直是景观生态学关注的重点^[12-13]。区域不同,研究尺度也不同,如李莹莹等^[14]比较了多种尺度的网格,得出 3 km×3 km 的网格在兼顾环巢湖多水塘地区空间特征与运算效率方面取得了较好的平衡;杨庚等^[15]在综合考虑平朔矿区大小及斑块平均面积等因素的基础上,采用 0.5 km×0.5 km 的规则网格划分样区;梁佳欣等^[16]借助半变异函数理论,得到南四湖湿地适宜的研究尺度为 1 km。以上研究均表明,不同区域的适宜研究尺度不具有普适性。在景观生态学中,耕地系统尚无明确的空间范围定义,因此需综合考虑研究区面积及斑块平均大小等多种因素来确定研究尺度。

已有研究表明,通过构建一定比例的非耕地能够提高景观异质性,然而提高非耕地比例,景观异质性并非持续增强,高比例的非耕地仍会出现景观异质性弱的现象,且非耕地比例相近时,因其斑块数量、结构及类型不同,景观异质性存在明显差异^[17-18]。基于此,该研究以辽宁省内典型玉米种植区——铁岭市昌图县为研究区,探讨不同非耕地比例下耕地系统景观异质性的差异,明确各类非耕地对景观异质性的影响程度,探明景观异质性强弱差异最大时对应的非耕地比例及显著影响景观异质性的非耕地斑块特征,以期定量分析非耕地斑块与景观异质性之间的关系,为昌图县低非耕地比例营造强景观异质性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

辽宁省铁岭市昌图县(42°33′~43°29′N,

123°32′~124°26′E)位于辽宁省最北部,松辽平原南端,辽、吉、蒙交界处,属中温带大陆性季风气候区,四季分明,雨热同期。地貌自东向西由低山丘陵向辽河平原过渡,主要分布的土壤类型为暗棕壤、黑土、草甸土、风沙土,种植作物以玉米为主,是东北典型玉米种植区。昌图县耕地集中连片分布,田块形状较为规整,周边仅存在少量以阔叶林为主的防护林体系及其他非耕地,景观结构相对单一,亟需调整各类景观要素,提升景观异质性。

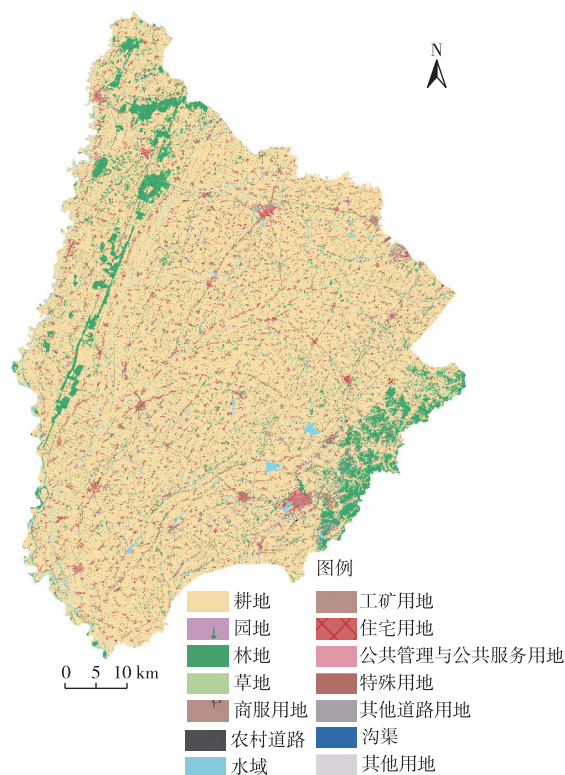


图 1 研究区区位图

Fig. 1 Land use map of the study area

1.2 研究尺度及非耕地类型划定

以昌图县 1:5 000 精度的土地利用数据为数据源,采用 ArcMap 10.3 软件中的渔网工具设定边长 0.5、1、1.5、2 km 这 4 种尺度的网格划分研究区。昌图县非耕地斑块面积较小且分布零散,景观生态学研究认为,景观样本面积为斑块平均面积的 2~5 倍时能综合反映景观格局信息^[19-20]。为保证研究尺度既不丢失细碎非耕地斑块信息,又能综合反映样本景观格局,且避免样本数量过多,综合比较 4 种尺度网格后,选取 1 km 为研究尺度,将研究区划分成 4 093 个网格,并根据研究区土地利用类型将非耕地景观划分为林地、草地、水域、沟渠及农村道路 5 种类型,其中林地包括乔木林地、灌木林地及其他

林地,水域包括河流水面、水库水面及坑塘水面。5 种景观类型涵盖了研究区内所有的非耕地类型,具有一定代表性^[21-22]。计算每个网格单元的非耕地总面积比例及不同非耕地类型的面积比例,昌图县 4 093 个网格单元中,仅有 867 个网格非耕地比例在 15% 以上,非耕地比例不足 15% 的网格有 3 226 个,约占网格总数的 79%。为保证样本数量充足,避免各非耕地比例区间样本数量差异过大,选取 0~15% 为主要研究区间,探寻低非耕地比例营造强景观异质性的方法。

1.3 Rao 二次熵指数计算

Rao 二次熵指数(quadratic entropy)是一种通过单一指标综合表征景观异质性的方法,其计算分为 2 个步骤:首先将每个网格等分成 4 个区域,建立质量维度-描述符,采用语义相异法计算网格内 4 个区域之间的语义距离。语义相异法是一种不确定空间的参数化表达方法,在早年间已经得到应用^[23-24],其计算公式为

$$d(C_A, C_B) = \sqrt{\sum_i^{[U]} W_i (S_{A_i} - S_{B_i})^2} \quad (1)$$

式(1)中, $d(C_A, C_B)$ 为区域 A 与区域 B 之间的语义距离; U 为每个网格等分的区域数量; W 为描述符的权重,由于各描述符变化范围不同,景观异质性涉及的角度较多,难以比较各描述符的重要程度,选择层次分析法及熵权法等主、客观赋权法均存在较大困难,因此笔者采用均权法赋值,更能体现公正性与客观性^[25]; S 为每个概念空间中经计算指标得到的具体分值。计算得到 4 个区域之间的语义距离后,即可计算二次熵指数 Q ,用于表示每个网格的景观异质性,其计算公式为

$$Q = \sum_A^U \sum_B^U d(C_A, C_B) p_A p_B \quad (2)$$

式(2)中, p_A 与 p_B 分别为区域 A 与区域 B 的面积占比。计算过程均在 Fragstats 4.2、ArcGIS 10.2 及 Excel 2019 软件中完成。计算得到二次熵指数后,将其划分为强(>2~2.5)、较强(>1.5~2)、中等(>1~1.5)、较弱(>0.5~1)及弱(0~0.5)5 个等级,再进行后续特征分析。

1.4 景观指数的选取与计算

景观指数包括景观单元特征指数和景观整体特征指数 2 个部分,前者用于描述斑块面积、数量、周长等基本特征,后者则包括反映景观整体特征的构型指数及多样性指数等^[26-27]。笔者将土地利用矢量数据转换为分辨率 5 m 的栅格数据进行景观指数计算,选取景观形状指数(LSI)表征景观的形状

特征,选取聚集度指数(AI)表征景观中不同斑块之间的粘合程度,选取景观分离度指数(DIVISION)、蔓延度指数(CONTAG)表征景观的破碎程度,选取香农多样性指数(SHDI)表征景观的多样性,以上 5 个指数分别从不同方面反映景观异质性;另选取斑块密度(PD)、景观分割指数(SPLIT)表征耕地系统中非耕地斑块的破碎程度,选取平均形状指数(SHAPE_MN)表征非耕地斑块的形状特征,选取景观结合度指数(COHESION)、聚集度指数(AI)表征非耕地斑块的粘合程度,选取斑块平均最近邻体距离指数(ENN_MN)表征不同非耕地斑块之间的连通性。整个计算过程均在 Fragstats 4.2 及 ArcGIS 10.2 软件中完成。

1.5 数据分析

首先对不同非耕地比例下景观异质性差异最大的样本网格进行回归分析,通过 2 个拟合模型得出景观异质性差异最大时所对应的非耕地比例;其次采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)定量研究不同非耕地类型对景观异质性的影响;最后通过独立样本 t 检验探讨异质性差异较大的网格单元中非耕地的结构特征是否存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 景观异质性特征分析

通过绘制箱线图(图 2)分析昌图县 5 个景观异质性强弱等级中非耕地比例的特征。在景观异质性弱的网格单元中,非耕地比例平均值约为 5.90%;在景观异质性强的网格单元中,非耕地比例平均约为 9.10%;异质性较弱及中等的网格单元中非耕地比例平均值较为接近,分别为 7.16% 及 7.48%;景观异质性较强的网格单元中非耕地比例略大于异质性较弱及中等的网格单元,约为 8.10%。不同网格单元景观异质性最低值约为 0.14,非耕地比例为 1.67%;最高值约为 2.47,非耕地比例为 5.42%。

在 5 个景观异质性强弱等级中,非耕地比例的最大值均在 14.5% 左右,但非耕地比例的最小值存在差异,景观异质性强的网格非耕地比例最小值为 4.02%,明显高于其他 4 个等级,说明强景观异质性需要较高比例的非耕地作为支撑。整体来看,景观异质性越强,非耕地比例平均值越高。景观异质性相同时,非耕地比例的高低存在明显差异。低比例的非耕地可以营造较强的景观异质性,非耕地比例较高时,也存在景观异质性弱的情况,因此两者之间并不存在明显的线性关系。

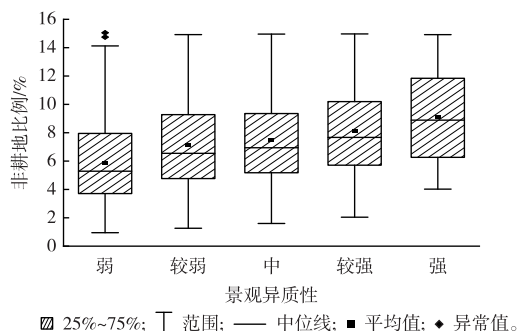


图 2 不同景观异质性强弱等级下非耕地比例箱线图

Fig. 2 Boxplot of non-cultivated land proportion under different landscape heterogeneity levels

2.2 景观异质性强弱差异及变化幅度分析

从研究区 0~15% 非耕地比例区间中提取出异质性强及异质性弱的样本网格(图 3), 由于样本网格的非耕地比例并不连续, 为探究 1 km 尺度下任意且相同非耕地比例景观异质性差异的一般规律, 采用回归分析得到非耕地比例与景观异质性的拟合模型, 通过 2 个拟合模型得出相同非耕地比例下景观异质性差异的最大值。异质性强的样本网格共 239 个, 拟合模型为 $y = 2.2 \times [1 - e^{-68.74(x-0.01)}]$, 其中 y 表示 Rao 二次熵指数, x 表示非耕地比例, 模型拟合优度约为 0.857 9, 表明非耕地比例对景观异质性的解释程度达到 85.79%, 具有较好的拟合性。异质性弱的样本网格共 104 个, 拟合模型为 $y = 1.35x + 0.23$, 模型拟合优度约为 0.491 2。

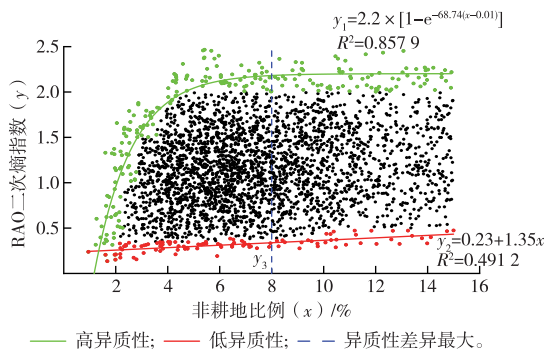


图 3 不同非耕地比例的景观异质性差异

Fig. 3 Landscape heterogeneity of different proportions of non-cultivated land

由图 4 可知, 在任意非耕地比例下, 景观异质性值都不确定, 均存在强弱差异。非耕地比例在 0~5% 区间时, 相同比例下景观异质性差异随非耕地比例的增加逐渐增大, 在 5%~8% 区间内景观异质性差异随非耕地比例增加而缓慢增大。非耕地比例

为 8% 时, 景观异质性相差最大, Rao 二次熵指数约为 1.84, 表明在此比例下, 景观异质性的提升空间最大, 不增加非耕地面积比例, 通过优化配置非耕地的组成及结构, 景观异质性提升效果最为显著。非耕地比例超过 8% 后, 景观异质性差异又逐渐缩小, 因此在 0~15% 的比例区间内, 非耕地比例为 5%~8% 时在生产及生态空间上效益最高。

2.3 非耕地组成对景观异质性的影响分析

对二次熵指数、5 个景观指数与非耕地景观的相关性进行 RDA 排序, 结果见表 1。RDA 前 4 个排序轴的特征值之和为 0.48, 第 1、第 2 排序轴的特征值分别为 0.477 2 和 0.002 7, 2 个排序轴共计解释了 47.99% 的景观异质性差异和 99.97% 的非耕地类型与景观异质性差异的关系, 说明第 1、第 2 排序轴较好地反映了两者之间的关系。在第 1、第 2 排序轴上, 景观异质性差异与非耕地类型比例的相关系数分别为 0.702 0 和 0.335 8, 进一步说明不同非耕地类型与景观异质性差异的关系较为密切。冗余分析表明, 4 个排序轴对不同非耕地类型组成与景观异质性差异关系的解释程度达 48%; 蒙特卡洛 (Monte Carlo) 检验显示, 第 1 轴与前 4 轴代表的不同非耕地类型和景观异质性之间呈极显著相关 (第 1 轴 $F = 300.0$, $P = 0.002$; 前 4 轴 $F = 60.8$, $P = 0.002$), 表明排序结果可以较好地解释不同非耕地类型与景观异质性之间的关系。

表 1 RDA 排序轴的特征值、异质性与非耕地景观的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of eigenvalue, heterogeneity and non-cultivated landscape of RDA ordering axis

排序轴	特征值	累计解释 异质性变异/ %	异质性与 非耕地景观的 相关系数	累计解释异质 性与非耕地景观 关系变异/%
1	0.477 2	47.72	0.702 0	99.42
2	0.002 7	47.99	0.335 8	99.97
3	0.000 1	48.00	0.130 6	99.99
4	0	48.01	0.163 9	100.00

偏冗余分析 (partial RDA) 结果 (表 2) 显示, 林地、农村道路、水域、草地及沟渠 5 种非耕地类型对景观异质性强弱的影响达极显著水平 ($P < 0.01$), 5 种非耕地类型共同解释了 48% 的景观异质性差异。其中林地的单独解释率最高, 达 28.3%; 沟渠的解释率最低, 为 1.2%。

选择这 5 种非耕地景观类型绘制 RDA 二维排序图, 结果见图 4。图 4 中带箭头的线段表示景观异质性及不同非耕地类型, 箭头所处的象限表示与

排序轴的正负相关性,线段间的夹角表示两变量间的相关性,线段的长度表示各变量间的解释或被解释程度^[28]。林地、草地、水域、农村道路及沟渠 5 种非耕地类型比例均与第 1 排序轴正相关,其中林地比例与第 1 排序轴相关性最强;草地与农村道路比例与第 2 排序轴呈正相关,且农村道路与第 2 排序轴的正相关性强于草地,林地、沟渠及水域与第 2 排序轴呈负相关,且水域比例与第 2 排序轴的负相关性最强。由此说明,第 1 排序轴主要反映林地、草地比例的综合变化情况,第 2 排序轴主要反映农村道路及水域比例的综合变化情况。从因子之间的关系来看,5 种非耕地类型与二次熵指数的夹角均为锐角,表明 5 种非耕地类型比例与景观异质性均呈显著正相关。二次熵指数与第 1 排序轴的夹角极小,表明两者的相关性最强,景观异质性的差异可以通过第 1 排序轴较好地说明。

表 2 不同非耕地景观类型对景观异质性独立影响作用的偏 RDA 分析

Table 2 Partial RDA analysis of the independent effects of different non-cultivated landscape types on landscape heterogeneity

非耕地景观类型	解释率/%	伪 F 统计量	P 值
林地	28.3	131.0	0.002
农村道路	8.5	44.6	0.002
水域	8.4	50.6	0.002
草地	1.6	9.9	0.006
沟渠	1.2	7.8	0.006

表 3 景观异质性强弱差异较大的样本网格中非耕地的独立样本 t 检验

Table 3 Independent sample t test for non-cultivated land in sample grids with large differences in landscape heterogeneity

景观指数	方差类型	莱文方差等同性检验			平均值等同性 t 检验		
		F 值	P 值	t 值	自由度	sig. 值(双尾)	标准误差
斑块平均最近邻体距离指数	假定等方差	3.475	0.063	2.471	327.000	0.014	0.598
	不假定等方差			2.977	311.352	0.003	0.496
斑块密度	假定等方差	0.963	0.327	-1.154	333.000	0.249	6.332
	不假定等方差			-1.122	185.790	0.263	6.515
平均形状指数	假定等方差	1.125	0.290	1.075	330.000	0.283	0.067
	不假定等方差			1.411	327.403	0.159	0.051
粘合度指数	假定等方差	0.744	0.389	-0.793	330.000	0.428	1.030
	不假定等方差			-0.780	191.900	0.436	1.048
分割度指数	假定等方差	1.664	0.198	-0.372	333.000	0.710	5 079.415
	不假定等方差			-0.331	153.965	0.741	5 714.477
聚集度指数	假定等方差	1.837	0.176	-0.223	333.000	0.824	1.909
	不假定等方差			-0.225	202.254	0.822	1.895

莱文方差等同性检验 $P>0.05$, 可认为景观异质性强弱不同的网格单元中,非耕地斑块的 ENN_MN 方差相等,双尾显著性概率 sig. 值 = 0.014 < 0.05, 即

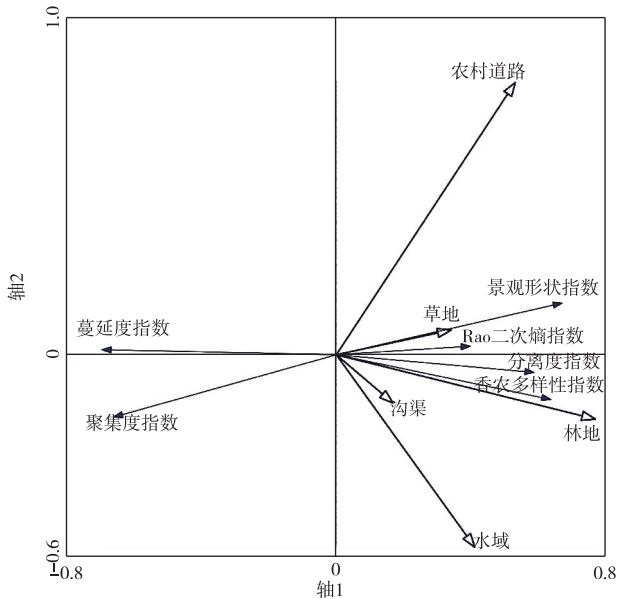


图 4 4 景观异质性-非耕地类型-耕地系统整体水平上景观指数的 RDA 二维排序图

Fig. 4 A two-dimensional RDA sorting plot of landscape index at the whole level of landscape heterogeneity-non-cultivated land type-cultivated land system

2.4 非耕地结构对景观异质性的影响分析

对景观异质性差异较大的网格单元中表征非耕地斑块结构特征的 6 个景观指数进行独立样本 t 检验,结果(表 3)显示,除斑块平均最近邻体距离指数(ENN_MN)外,其他景观指数并无显著性差异。

不同景观异质性的网格单元中,非耕地斑块的 ENN_MN 存在显著性差异。ENN_MN 表示的是非耕地斑块之间最近的平均距离,是非耕地连通性的

一种度量^[29],非耕地斑块之间的连通性越强,景观异质性就越强。

3 讨论与结论

3.1 讨论

景观异质性是许多基本生态过程和物理环境过程在空间和时间尺度连续系统上共同作用的产物,会直接影响生态系统的多种属性^[30]。该研究采用 Rao 二次熵指数表征景观异质性,相比于常用的景观格局指数,其对景观异质性的定量表征具有综合性的特点,是一个潜在的景观设计、规划和管理程序的支持工具^[31]。研究表明,昌图县 0~15% 非耕地比例区间内,景观异质性最高值约为 2.47,最低值约为 0.14,在任意非耕地比例下,景观异质性均为不确定值,非耕地比例相近时,景观异质性存在明显差异。PENKO 等^[32]研究表明,因非耕地斑块数量及类型不同,景观异质性强弱也不同;WEISSTEINER 等^[33]研究也指出,以自然或半自然的小斑块为主的景观异质性较强。因此不增加非耕地的比例,也可通过改善其结构,使景观异质性达到较强水平。独立样本 t 检验结果表明,景观异质性不同的网格单元,非耕地斑块的 ENN_MN 指数存在显著性差异($P<0.05$),即可以通过提升非耕地斑块之间的连通性来提升景观异质性。张永生等^[34]的研究也表明,非耕地斑块越集中,越有利于麦田中生物多样性的增加。由于昌图县农民有意识地将耕地集中耕作,使耕地斑块相互镶嵌,在空间上成连续性分布的形态,而非耕地斑块受到耕地集中连片经营的影响,破碎化严重,不同非耕地类型之间连通度低,难以形成整体系统发挥其生态效益,因此景观异质性受到严重制约。高度连通的非耕地可以促进资源、物种、物质及能量的流动与传播,通过提升非耕地斑块的连通度来提升景观异质性,既能维护生态系统健康稳定,又能保障粮食产量,是符合我国国情的新思路、新方法。

在调整非耕地时,不仅要提升其连通性,也要注重提升其多样性。研究采用冗余分析得出林地、草地、农村道路、水域及沟渠 5 种非耕地类型均对景观异质性有显著的正向影响($P<0.05$),其中林地对景观异质性的解释率最高,达 28.3%,因此增加林地的比例,增强景观异质性的效率最高。这可能是由于林地边界并不规则,各类生物可以与外界进行频繁的物质交流,因此景观异质性增强幅度较大。MARACAHPES 等^[35]研究也表明,保存和保护河岸林地对于可持续发展至关重要,河岸边的林地可以

提供遮荫并调节区域小气候,是维持生物多样性和涵养水源的基础。提升林地的比例虽然经济成本高且树木生长缓慢,但长久来看可使景观异质性显著提升,具有极高的生态价值,进而充分保护耕地中的生物多样性,对于维持耕地生态系统稳定具有积极意义。农村道路虽对增强景观异质性有积极作用,但作用程度不及林地,甚至会对耕地生态系统会造成负面影响。费炯等^[36]研究指出,道路附近的节肢动物数量及多样性均高于远离道路处,因此道路边缘会吸引节肢动天敌,由于车辆行驶形成“生态陷阱”,造成动物的非正常死亡。

保障耕地面积是设计规划耕地系统景观格局的前提。该研究通过回归分析得出,当网格单元的非耕地比例超过 5% 后,相同非耕地比例景观异质性差异增加较为缓慢,可以实现低比例营造强异质性。当非耕地比例达 8% 时,景观异质性差异最大,在此比例下提升非耕地斑块连通性、增加林地比例,景观异质性提升效果最为明显。为反映昌图县的特点,笔者选取 0~15% 非耕地比例研究区间及 1 km 的研究尺度,为保证研究结论及方法的普适性,在今后对于其他地区的研究中,适宜的研究区间及尺度有待进一步探索。

3.2 结论

(1) 非耕地比例在 0~15% 区间内,昌图县不同网格单元景观异质性最低值约为 0.14,最高值约为 2.47,非耕地比例相近时,景观异质性存在明显差异。8% 是 1 km 网格尺度下景观异质性差异最大时对应的非耕地比例,在 5%~8% 的非耕地比例区间内优化布局非耕地的组成及结构,景观异质性提升效果最为明显。

(2) 林地、农村道路、水域、草地及沟渠 5 种非耕地类型对景观异质性有极显著的正向影响($P<0.01$),5 种非耕地类型共同解释了 48% 的景观异质性强弱差异,其中林地的单独解释率最高,达 28.3%。

(3) 景观异质性不同的网格单元中非耕地斑块的 ENN_MN 存在显著性差异($P<0.05$)。非耕地斑块连通性越强,景观异质性越强。

参考文献:

- [1] 宋戈,陈黎黎,邹朝晖.黑龙江省耕地系统安全预警及其驱动因素空间分异[J].农业工程学报,2018,34(3):1-9.[SONG Ge, CHEN Li-li, ZOU Chao-hui. Spatial Heterogeneity of Early-Warning Status of Cultivated Land System Security and Its Driving Factors in Heilongjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(3): 1-9.]

- [2] 苏浩, 吴次芳. 东北黑土区耕地系统变化机理[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 243–251. [SU Hao, WU Ci-fang. Mechanism of Cultivated Land System Change in Black Soil Areas of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(6): 243–251.]
- [3] MARCACCI G, GREMION J, MAZENAUER J, *et al.* Large-Scale Versus Small-Scale Agriculture: Disentangling the Relative Effects of the Farming System and Semi-Natural Habitats on Birds' Habitat Preferences in the Ethiopian Highlands[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 289: 106737.
- [4] 王润, 丁圣彦, 卢训令, 等. 黄河中下游农业景观中景观简化对传粉昆虫多样性的影响: 以巩义市为例[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2225–2236. [WANG Run, DING Sheng-yan, LU Xun-ling, *et al.* Effects of Landscape Simplification on Pollinator Diversity in Agricultural Areas near the Lower Reaches of the Yellow River: A Case Study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2225–2236.]
- [5] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011: 73–74.
- [6] HARLIO A, KUUSSAARI M, HEIKKINEN R K, *et al.* Incorporating Landscape Heterogeneity into Multi-Objective Spatial Planning Improves Biodiversity Conservation of Semi-Natural Grasslands[J]. Journal for Nature Conservation, 2019, 49: 37–44.
- [7] MARTIN A E, COLLINS S J, CROWE S, *et al.* Effects of Farmland Heterogeneity on Biodiversity are Similar to or even Larger than the Effects of Farming Practices[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 288: 106698.
- [8] 高艳丽, 李红波. 汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2248–2260. [GAO Yan-li, LI Hong-bo. Influence of Landscape Pattern Change on Soil Erosion in Han River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2248–2260.]
- [9] 梁国付, 卢训令, 贾振宇, 等. 林地面积比例梯度下景观组成和构型对生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2896–2904. [LIANG Guo-fu, LU Xun-ling, JIA Zhen-yu, *et al.* Effects of Woodland Composition and Configuration along a Woodland Area Ratio Gradient on Biodiversity Conservation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 2896–2904.]
- [10] DOXA A, PRASTACOS P. Using Rao's Quadratic Entropy to Define Environmental Heterogeneity Priority Areas in the European Mediterranean Biome [J]. Biological Conservation, 2020, 241: 108366.
- [11] GARRIGUES S, ALLARD D, BARET F, *et al.* Quantifying Spatial Heterogeneity at the Landscape Scale Using Variogram Models[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(1): 81–96.
- [12] 杨馥, 信桂新, 蒋好雨, 等. 基于最佳尺度的景观生态风险时空变化研究: 以重庆市江津区为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 576–586. [YANG Kui, XIN Gui-xin, JIANG Hao-yu, *et al.* Study on Spatiotemporal Changes of Landscape Ecological Risk Based on the Optimal Spatial Scale: A Case Study of Jiangjin District, Chongqing City[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(5): 576–586.]
- [13] 王璐, 袁艳斌, 董恒, 等. 土地利用景观格局空间尺度效应研究: 以武汉市为例[J]. 世界地理研究, 2020, 29(1): 96–103. [WANG Lu, YUAN Yan-bin, DONG Heng, *et al.* Research on Spatial Scale Effect of Landscape Pattern of Land Use in Wuhan City [J]. World Regional Studies, 2020, 29(1): 96–103.]
- [14] 李莹莹, 尤罗利, 陈永生, 等. 环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6280–6291. [LI Ying-ying, YOU Luo-li, CHEN Yong-sheng, *et al.* Spatial-Temporal Characteristics of Multi-Pond Landscape Change and Their Driving Factors in the Chaohu Basin, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): 6280–6291.]
- [15] 杨庚, 张振佳, 曹银贵, 等. 晋北大型露天矿区景观生态风险时空异质性[J]. 生态学杂志, 2021, 40(1): 187–198. [YANG Geng, ZHANG Zhen-jia, CAO Yin-gui, *et al.* Spatial-Temporal Heterogeneity of Landscape Ecological Risk of Large-Scale Open-Pit Mining Area in North Shanxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(1): 187–198.]
- [16] 梁佳欣, 李新举. 南四湖湿地景观格局脆弱度的时空分异特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 626–634. [LIANG Jia-xin, LI Xin-ju. Characteristics of Temporal-Spatial Differentiation in Landscape Pattern Vulnerability in Nansihu Lake Wetland, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 626–634.]
- [17] POSCHLOD P, BRAUN-REICHERT R. Small Natural Features with Large Ecological Roles in Ancient Agricultural Landscapes of Central Europe—History, Value, Status, and Conservation[J]. Biological Conservation, 2017, 211: 60–68.
- [18] SANTANA J, REINO L, STOATE C, *et al.* Combined Effects of Landscape Composition and Heterogeneity on Farmland Avian Diversity[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(4): 1212–1223.
- [19] 巩杰, 赵彩霞, 谢余初, 等. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2041–2048. [GONG Jie, ZHAO Cai-xia, XIE Yu-chu, *et al.* Ecological Risk Assessment and Its Management of Bailongjiang Watershed, Southern Gansu Based on Landscape Pattern [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 2041–2048.]
- [20] O'NEILL R V, HUNSAKER C T, TIMMINS S P, *et al.* Scale Problems in Reporting Landscape Pattern at the Regional Scale[J]. Landscape Ecology, 1996, 11(3): 169–180.
- [21] 冯舒, 汤茜, 卢训令, 等. 农业景观中非农业景观要素结构特征对植物物种多样性的影响: 以封丘县为例[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1549–1560. [FENG Shu, TANG Qian, LU Xun-ling, *et al.* Non-Agricultural Landscape Structure and the Effect on Plant Species Diversity in Agricultural Landscapes: A Case Study in Fengqiu County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1549–1560.]
- [22] 冯舒, 汤茜, 丁圣彦. 农业景观农地和非农绿地斑块属性特征及其结构优化研究: 以河南省封丘县为例[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 733–740. [FENG Shu, TANG Qian, DING Sheng-yan. Structural Attribute and Optimization of Farmland and Non-Cropped Green-Land Patches of Agricultural Landscape: A Case Study of Fengqiu County, Henan Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6): 733–740.]
- [23] AHLQVIST O. A Parameterized Representation of Uncertain Conceptual Spaces[J]. Transactions in GIS, 2004, 8(4): 493–514.
- [24] AHLQVIST O, SHORTRIDGE A. Spatial and Semantic Dimensions

- of Landscape Heterogeneity[J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(4): 573–590.
- [25] 丁辉. 管理定量分析[M]. 北京: 经济管理出版社, 2009: 189–204.
- [26] 姜坤, 戴文远, 胡秋凤, 等. 浙闽山地丘陵区地形因子对土地利用格局的影响分析: 以福建省永泰县为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(6): 707–715. [JIANG Kun, DAI Wen-yuan, HU Qiu-feng, *et al.* Analysis on the Influence of Terrain Factors on Land Use Pattern in the Hilly Area of Zhejiang and Fujian Provinces: A Case Study of Yongtai County, Fujian Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(6): 707–715.]
- [27] 陶蕴之, 吕一河, 李凤全, 等. 西南天然林保护工程区生态成效评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(5): 716–723. [TAO Yun-zhi, LÜ Yi-he, LI Feng-quan, *et al.* Assessment of Ecological Effect of the Natural Forest Protection Project in Southwest China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(5): 716–723.]
- [28] 于小彦, 杨艳芳, 张平究, 等. 不同水分条件下生物质炭添加对湿地土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(9): 1163–1171. [YU Xiao-yan, YANG Yan-fang, ZHANG Ping-jiu, *et al.* Effects of Biochar Addition on Soil Microbial Community Structure under Different Water Conditions [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(9): 1163–1171.]
- [29] 韩建平. 基于 GIS 的汾河源头森林景观格局分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(11): 152–158. [HAN Jian-ping. GIS-Based Landscapes Patterns of Forests in the Source of Fenhe River Watershed [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(11): 152–158.]
- [30] 卢训令, 刘俊玲, 丁圣彦. 农业景观异质性对生物多样性与生态系统服务的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(13): 4602–4614. [LU Xun-ling, LIU Jun-ling, DING Sheng-yan. Impact of Agricultural Landscape Heterogeneity on Biodiversity and Ecosystem Services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 4602–4614.]
- [31] DÍAZ-VARELA E, ROCES-DÍAZ J V, ÁLVAREZ-ÁLVAREZ P. Detection of Landscape Heterogeneity at Multiple Scales: Use of the Quadratic Entropy Index [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 153: 149–159.
- [32] PENKO S N, GOLOBIČ M. Quantitative Assessment of Agricultural Landscape Heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106115.
- [33] WEISSTEINER C J, GARCÍA-FECED C, PARACCHINI M L. A New View on EU Agricultural Landscapes: Quantifying Patchiness to Assess Farmland Heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 317–327.
- [34] 张永生, 欧阳芳, 门兴元, 等. 区域农田景观格局对麦田天敌瓢虫群落的影响[J]. *昆虫学报*, 2018, 61(4): 468–476. [ZHANG Yong-sheng, OUYANG Fang, MEN Xing-yuan, *et al.* Effects of Regional Agricultural Landscape Pattern on the Community of Ladybeetles in Wheat Fields [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2018, 61(4): 468–476.]
- [35] MARACAHIPES S L, SILVÉRIO D V, MACEDO M N, *et al.* Agricultural Land-Use Change Alters the Structure and Diversity of Amazon Riparian Forests [J]. *Biological Conservation*, 2020, 252: 108862.
- [36] 费炯, 华咏乐, 冯思念, 等. 天目山国家级自然保护区旅游公路对节肢动物群落的影响及其动物致死特征[J]. *生态科学*, 2019, 38(1): 87–91. [FEI Xian, HUA Yong-le, FENG Si-nian, *et al.* Effects of Tianmushan National Nature Reserve Scenic Highway on Arthropod Communities and Its Road Mortality Characteristic [J]. *Ecological Science*, 2019, 38(1): 87–91.]

作者简介: 边振兴(1974—), 男, 辽宁朝阳人, 教授, 博士, 主要研究方向为农业景观生态学。E-mail: zhx-bian@syau.edu.cn

(责任编辑: 许 素)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0701

王理德, 何洪盛, 韩福贵, 等. 民勤绿洲不同退耕年限土壤微生物量的变化特性[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1338–1346.

WANG Li-de, HE Hong-sheng, HAN Fu-gui, et al. Characteristics of Dynamic Changes of Soil Microbial Biomass on Fallow Farmland of Different Years in Minqin Oasis[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1338–1346.

民勤绿洲不同退耕年限土壤微生物量的变化特性

王理德^{1,2,3,4}, 何洪盛⁴, 韩福贵^{1,2,3①}, 陈思航¹, 宋达成^{1,2,3}, 王梓璇^{1,2,3}, 闫沛迎¹ (1. 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 武威 733000; 3. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外观测研究站, 甘肃 民勤 733300; 4. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探讨不同退耕年限对土壤微生物特性的影响,以民勤绿洲不同年代退耕地(1、2、3、4、5、8、15、24及31 a) 9个样地为研究对象,采用空间尺度代替时间尺度的方法,对民勤绿洲不同年限(1~31 a)退耕地土壤微生物生物量的变化特征及季节动态变化规律进行系统分析与研究。结果表明:(1)同一年限退耕地的土壤微生物量变化规律均为表层高于深层。表层土壤微生物生物量碳含量最高可达 979.13 mg·kg⁻¹,而 10~20、>20~30 和>30~40 cm 土层土壤最高只有 610、480 和 327.74 mg·kg⁻¹,分别占表层含量的 62%、49%和 33%。土壤微生物生物量氮和生物量磷具有类似的规律,土壤微生物量表聚现象明显。(2)土壤微生物生物量碳与生物量氮总体上随着退耕年限的增加呈波动减小的状态,土壤微生物生物量磷呈波动式上升的趋势。(3)土壤微生物生物量碳含量随季节的动态变化规律比较明显:冬季最小,秋季最大,夏季与春季居中,表层(0~10 cm)土壤变化幅度较大。(4)微生物生物量氮的季节动态呈现出倒“V”型分布的状态,总体变化规律与微生物生物量碳相似。(5)土壤微生物生物量磷含量基本为秋季、夏季较大,春季居中,冬季最小。3月土壤微生物生物量磷居中,6或9月达到峰值,12月下降到最低值。(6)通过研究可以推断,退耕 5 a 左右是民勤绿洲退耕地恢复治理过程中的关键时期。

关键词: 民勤绿洲; 退耕地; 微生物生物量; 变化特征; 季节动态变化

中图分类号: X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1338-09

Characteristics of Dynamic Changes of Soil Microbial Biomass on Fallow Farmland of Different Years in Minqin Oasis. WANG Li-de^{1,2,3,4}, HE Hong-sheng⁴, HAN Fu-gui^{1,2,3①}, CHEN Si-hang¹, SONG Da-cheng^{1,2,3}, WANG Zi-xuan^{1,2,3}, YAN Pei-ying¹ (1. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Research Station, Wuwei 733000, China; 3. Minqin National Station for Desert Steppe Ecosystem Studies, Mingqin 733300, China; 4. Forestry College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different years of fallowed farmland on soil microbial characteristics, different ages of fallowed farmland (1, 2, 3, 5, 8, 15, 24, 31 a) in Minqin Oasis were used for the study. The spatial scale instead of the temporal scale was used to study the characteristics of soil microbial biomass and its seasonal dynamics in the secondary grassland of Minqin Oasis for different years (1–31 a). The results show that (1) soil microorganisms were higher in the surface layer than in the deep layers of the secondary grassland in the same years of fallowing. The highest soil microbial carbon content of the surface layer was 979.13 mg·kg⁻¹, while the highest soil microbial carbon content was 610, 480 and 327.74 mg·kg⁻¹ with the soil depth of 10–20, >20–30 and >30–40 cm, respectively, accounting for 62%, 49%, 33% of the contents in the surface layer, respectively. Soil microbial biomass nitrogen and soil microbial biomass phosphorus had the same results, indicating that the soil microbial biomass clustering was obvious; (2) soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen generally showed a fluctuating decrease with the increase of fallowing years, and soil microbial biomass phosphorus showed a trend of undulating increase with the increase of fallowing years; (3) the dynamic change of soil microbial biomass carbon content with different seasons was obvious, with the minimum in winter, the maximum in autumn, and the medium in summer and spring, and the range of soil microbial biomass carbon

收稿日期: 2021-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(31760709); 甘肃省重点研发计划(21YF5FA038); 甘肃省自然科学基金(21JR7RA732)

① 通信作者 E-mail: hanfugui2008@126.com

content in the surface layer (0–10 cm) was large; (4) the seasonal dynamics of microbial biomass nitrogen showed an inverted V-shaped distribution, and the dynamic change of it was the same as that of microbial biomass carbon. (5) the seasonal dynamics of soil microbial biomass phosphorus content were larger in autumn and summer, intermediate in spring and minimal in winter. From March onwards, soil microbial biomass phosphorus gradually increased as the month increases, reaching a peak in June or September, and then decreased continuously, falling to a minimum in December. (6) According to the research, it can be concluded that the first five years was the key period for the restoration process of fallowed farmland in Minqin Oasis.

Key words: Minqin oasis; fallowed farmland; soil microbial biomass; characteristics; seasonal dynamic change

民勤是我国典型的干旱沙区,这里曾经是一片植被茂盛、水源充足的天然绿洲^[1]。然而,随着民勤绿洲经济规模、人口数量和人工绿洲的增加,用水量增加,地下水严重超采、矿化度逐渐增加,严重影响了该地区自然植被的生长,加剧了土地沙漠化与盐渍化^[2–3],再加上关井压田导致大片土地弃耕而撂荒,这些退耕地如果没有科学、合理、有效的保护方式,就会被风蚀沙化从而形成新的沙尘源,造成恶性循环,严重破坏民勤绿洲土壤生态系统^[4],因此,如何合理保护和恢复民勤绿洲退耕地是亟待解决的生态问题。

土壤是生态系统中许多生态过程的载体和植物生长的基质^[5],其生物学性质是反映土壤生态系统恢复程度的重要指标^[6]。在营养库中虽然只占一小部分,但它既是养分的“库”,同时又是养分的“源”,是土壤生态系统的核心,直接或间接参与调节土壤有机质转换^[7]、能量流动^[8]、土壤肥力形成^[9]、养分循环^[10]及污染物的降解^[11]等,特别是在生态系统物质循环和能量流动中占据主导作用,具有复杂的生物化学活性^[12]。同时对土壤的演化具有重要的影响,在土壤生态环境恢复中极具影响力^[13]。土壤微生物生物量是活的土壤有机质,是土壤活性大小的标志^[14],虽然在土壤有机质中仅占 1%~5%,但是它不仅是调节其他养分的关键,而且还是有机质与土壤养分转化的动力,可以快速反映土壤质量的变化情况^[15],土壤微生物生物量是评价土壤肥力和质量状态的重要参数^[16]。

目前,土壤微生物特性对土壤生态系统演变所起的作用越来越受到广大科研工作者的关注^[17–19],并成为该领域研究的前沿和热点^[20–21]。国内外对土壤微生物的研究主要集中在微生物与植物群落的关系^[22–23]、与土壤条件的关系^[24–26]、与不同施肥方式的关系^[27–28]、与不同土壤管理方式的关系^[29–30]、与土壤酶的相互关系^[31]。但是对于干旱绿洲退耕区土壤微生物量较少进行系统研究,特别是干旱区退弃耕地土壤微生物量季节变化规律的研究较少,更没有把微生物量的研究与退弃耕地修

复紧密结合起来。

基于此,笔者采用空间尺度代替时间尺度的方法,对民勤不同年限(1~31 a)退耕地土壤微生物量的变化特征和季节动态变化规律进行了系统研究,探讨民勤绿洲退耕地土壤微生物量的变化规律,旨在为民勤绿洲退耕地土壤修复提供实践参考,为该区域的生态恢复、管理及可持续发展提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

试验样地选在甘肃省民勤县北部的西渠镇黄辉村与白云村,地理坐标为北纬 39°01′30″~39°03′28″,东经 103°35′57″~103°37′56″。年降水量大约 110 mm,主要集中在秋季,年平均蒸发量为 2 644 mm 左右,年均温度 7.4 ℃,主要土壤类型是灰棕漠土。样地中主要草本植物有:蒙古猪毛菜(*Salsola ikonnikovii*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、田旋花(*Convolvulus arvensis*)、白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、藜(*Chenopodium album*);灌木植物有:盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、白刺(*Nitraria schoberi*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、小果白刺(*Nitraria sibirica*)、枸杞(*Lycium chinense*)等。

1.2 样地设置及土样采集

2011 年 11 月,通过对民勤县相关政府部门和当地居民走访和查阅,明确研究区土地退耕时间,采用时空替代法,选择没有因自然因素变化而改变地形,或者微地形变化较小、植物均匀生长、没有人为因素干扰引起土壤物质再分配的退耕地为研究样地。在保证样地沙土母质相同的情况下,选择退耕时间(离 2012 年检测时间)为 1、2、3、4、5、8、15、24 及 31 a 的 9 个样地,每个试验样地面积为 1 hm²(表 1)。使用 GPS 定位,在每个样地内按“S”形方法选取 5 个土样采集点,并做好标记^[32]。

2012 年 3、6、9 及 12 月,在试验样地中已固定的“S”形 5 个样点上挖土壤剖面,土壤样品分别从

0~10、>10~20、>20~30、>30~40 cm 土层采集,为了更加具有代表性,把同一个试验样地所取的 5 个土样按照相同土层分别均匀混合,在每个样点上取 3 个重复土样。将 1~2 kg 混合均匀的土样装进恒温采样箱的无菌袋中,带回实验室进行土壤微生物生物量的测定和系统分析。

表 1 样地基本状况

Table 1 Basic condition of sample sites

退耕年限/a	海拔/m	经纬度	群落优势种	伴生种
1	1 304	39°03'28" N, 103°36'03" E	藜、田旋花、五星蒿 (<i>Echinopilon divaricatum</i>)、骆驼蓬	骆驼蒿 (<i>Peganum nigellastrum</i>)、虎尾草 (<i>Chloris virgata</i>)、虫实 (<i>Corispermum hysopifolium</i>)、蒺藜 (<i>Polygonum aviculare</i>) 等
2	1 303	39°03'25" N, 103°36'09" E	苦苣菜 (<i>Sonchus oleraceus</i>)、骆驼蒿、白茎盐生草、宽叶独行菜 (<i>Lepidium latifolium</i>)	西伯利亚滨藜 (<i>Atriplex sibirica</i>)、藜、虎尾草、大戟 (<i>Euphorbia pekinensis</i>) 等
3	1 297	39°02'36" N, 103°36'09" E	骆驼蒿、白茎盐生草、宽叶独行菜、顶羽菊 (<i>Acroptilon repens</i>)	黄花矶松 (<i>Limonium aureum</i>)、芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)、骆驼蓬、画眉草 (<i>Eragrostis pilosa</i>) 等
4	1 305	39°02'34" N, 103°36'13" E	骆驼蓬、顶羽菊、骆驼蒿、碱蓬	芦苇、虎尾草、白茎盐生草等
5	1 304	39°02'09" N, 103°35'58" E	黑果枸杞 (<i>Lycium ruthenicum</i>)、白茎盐生草、宽叶独行菜、骆驼蓬	群心菜 (<i>Cardaria draba</i>)、铁线莲 (<i>Clematis florida</i>)、骆驼蒿、虎尾草等
8	1 304	39°02'54" N, 103°07'54" E	黑果枸杞、白茎盐生草、骆驼蓬、骆驼蒿	芦苇、顶羽菊、黄花矶松、芨芨草 (<i>Achnatherum splendens</i>) 等
15	1 304	39°01'45" N, 103°37'02" E	黑果枸杞、白茎盐生草、骆驼蒿、黄花矶松	西伯利亚滨藜、蒙古猪毛菜、宽叶独行菜、五星蒿等
24	1 306	39°02'34" N, 103°36'24" E	黑果枸杞、盐爪爪、红砂、芦苇	白茎盐生草、白刺、骆驼蒿、画眉草等
31	1 306	39°02'34" N, 103°36'13" E	黑果枸杞、盐爪爪、红砂、骆驼蒿	白刺、雅葱 (<i>Scorzonera hispanica</i>)、白茎盐生草、骆驼蓬等

2011 年的退耕年限为离检测时间 1 a, 余类推。

1.3 土壤微生物生物量测定

土壤微生物生物量用氯仿熏蒸法^[33]测定。先将试验样地内取回的土样进行 7 d 预培养,然后取出 3 份,每份土样 10 g,分别装进 3 个 50 mL 烧杯中,另外准备 2 个装有 1 mol · L⁻¹ NaOH 溶液和无乙醇氯仿的烧杯,将这 5 个烧杯装入底部放有水浸过滤纸的干燥器中,将干燥器用凡士林密封,用真空泵抽气,直到三氯甲烷沸腾 2 min 以上。确保干燥器不漏气的情况下,将阀门关闭,在 25 ℃ 无光情况下,搁置 24 h,再用真空泵抽气,直至三氯甲烷气味消失。

1.3.1 土壤微生物生物量碳(MBC)测定^[33]

土壤试验样品经氯仿熏蒸后,用 0.5 mol · L⁻¹ K₂SO₄ 和 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 外加热法测定微生物生物量碳(MBC, *B_{MC}*)。

$$B_{MC} = (E_c - E_{c0}) / 0.38. \tag{1}$$

式(1)中, *E_c* 为熏蒸土样液体中有机碳量, mg · kg⁻¹; *E_{c0}* 为没有熏蒸土样液体中有机碳量, mg · kg⁻¹; 0.38 为校正系数。

1.3.2 土壤微生物生物量氮(MBN)测定^[33]

土样经三氯甲烷熏蒸后,用 0.5 mol · L⁻¹ K₂SO₄ 溶液萃取,应用凯氏定氮法测定微生物生物量氮

(MBN, *B_{MN}*)。

$$B_{MN} = (E_N - E_{N0}) / 0.54. \tag{2}$$

式(2)中, *E_N* 为熏蒸土样液体中有机氮量, mg · kg⁻¹; *E_{N0}* 为没有熏蒸土样液体中有机氮量, mg · kg⁻¹; 0.54 为校正系数。

1.3.3 土壤微生物生物量磷(MBP)测定^[33]

土壤样品经过三氯甲烷熏蒸后,采用 0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃ (pH 值 = 8.5) 溶液进行萃取,然后采取钼锑抗显色法,对微生物生物量磷测定(MBP, *B_{MP}*)。

$$B_{MP} = (E_P - E_{P0}) / 0.54. \tag{3}$$

式(3)中, *E_P* 为熏蒸土样液体中有机磷量, mg · kg⁻¹; *E_{P0}* 为没有熏蒸土样液体中有机磷量, mg · kg⁻¹; 0.54 为校正系数。

1.4 土壤微生物生物量的加权平均值计算

$$G_m = \sum_{k=1}^n V_{ik} \times \omega_{ik}, \tag{4}$$

$$\omega_{ik} = \frac{V_{ik}}{\sum ik}. \tag{5}$$

式(4)~(5)中, *G_m* 为土壤微生物量加权平均值; *V_{ik}* 为土壤微生物量; *ω_{ik}* 为权重系数; *i* = 1, 2, ..., *n*, 其中

n 为处理个数; k 为土层深度, $k=1, 2, 3, 4$, 分别表示 $0 \sim 10$ 、 $>10 \sim 20$ 、 $>20 \sim 30$ 、 $>30 \sim 40$ cm 土层。

1.5 数据分析与处理

采用 SPSS 19.0、Microsoft Excel 2007 软件统计整理和分析数据, 不同年代退耕地微生物生物量采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行差异显著性检验。

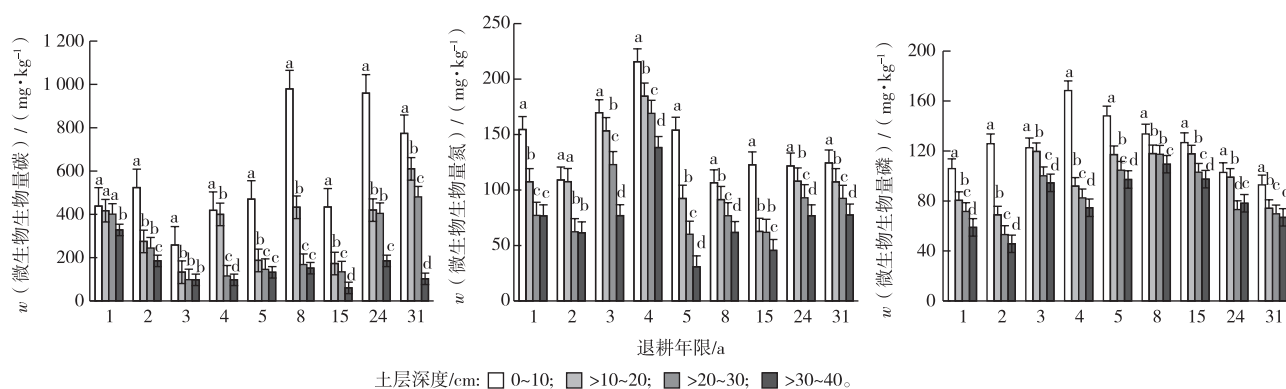
2 结果与分析

2.1 不同退耕年限土壤微生物生物量沿剖面分布规律

由图 1 可以看出, 相同退耕年限的土壤 MBC、MBN 及 MBP 含量均随土层的加深而减小, $0 \sim 10$ cm 土层的土壤 MBC、MBN 及 MBP 含量高于或者显著高于其他 3 层($>10 \sim 20$ 、 $>20 \sim 30$ 、 $>30 \sim 40$ cm), 可见民勤绿洲退耕地土壤微生物生物量随着土壤深度的增加, 其含量逐渐降低, 在总生物量中, 表层生

物量占比最大, 表聚现象突出。

图 1 表明, 在 $0 \sim 30$ cm 土层, 随着退耕年限的不断增加, 土壤 MBC 含量在退耕前期逐渐减小, 在 $8 \sim 31$ a 内逐渐增大, 在退耕 $8 \sim 31$ a 期间, $0 \sim 10$ 、 $>10 \sim 20$ 及 $>20 \sim 30$ cm 土层的土壤 SMC 最大值分别为 979.13 、 610.00 和 $480.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 在 $>30 \sim 40$ cm 土层中, MBC 含量随退耕年限的增大而逐渐减小, 第 1 年时最高, 为 $327.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; MBN 含量的变化趋势表现为在退耕前 4 a 先增大, 在 $4 \sim 8$ a 慢慢减小, 到退耕 $8 \sim 31$ a 期间逐渐稳定。在退耕第 4 年时样地内各土层 SMN 含量达到最高值, 从上到下分别为 215.50 、 184.49 、 169.00 和 $138.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤 MBP 含量在 $0 \sim 10$ cm 土层呈先增大($1 \sim 4$ a)后减小($4 \sim 31$ a)的变化规律, 退耕第 4 年含量最高, 最大值为 $168.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 随着退耕年限的增加, $>10 \sim 40$ cm 土层土壤 MBP 含量的变化表现为退耕前 2 a 先减小, 随后逐渐升高, 最后趋于降低。



同一组直方柱上方英文小写字母不同表示不同土层间某指标差异显著($P < 0.05$)。2011 年的退耕年限为离检测时间 1 a, 其余类推。

图 1 不同土层不同退耕年限的土壤微生物量分布

Fig. 1 The soil microbial biomass distribution in different soil layers at different ages since restoration

为了更加准确地研究土壤微生物生物量在不同年限退耕地及不同土层深度中的变化, 同时各土层土壤微生物生物量的平均数能包含长期变动趋势, 采用加权平均值来分析研究不同年限退耕地土壤微生物生物量的变化规律(表 2), 不同年限退耕地相同土层中的土壤 MBC 含量成波动式变化, 加权平均的最大值出现在退耕 24 a($629.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 最小值出现在退耕 3 a($177.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。退耕 $1 \sim 3$ a 逐渐减小, 然后再逐渐增大, 到 24 a 趋于平稳。土壤 MBN 含量的变化表现为: 随着退耕年限的增加, 土壤 MBN 含量呈先波动式减小, 再波动式增大, 最后再波动式减小的趋势, 直到退耕 24 a 趋于稳定。

在退耕 $1 \sim 2$ a 时, 土壤 MBN 含量逐渐减小, 随

后大幅度增加, 到退耕 4 a 时, 加权平均值达到最大值 $183.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 然后相对趋于平稳再下降, 到退耕 15 a 前后, 加权平均值降低到最小值 $79.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤 MBP 含量总体表现为: 随着退耕年限的增加, MBP 含量呈波动式增大、再波动式减小的趋势。退耕 $5 \sim 8$ a 时, 加权平均值达到了最大值 $121.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 然后随着退耕年限的增大, 土壤 MBP 含量逐渐减小, 最后逐渐稳定。总体来讲, 民勤绿洲退耕地土壤 MBP 含量随着自然演变年限的增加呈现出上升的趋势。MBC/MBN 含量比呈先上升后下降的趋势, 退耕 8 a 时比值最大(6.74)。

2.2 不同退耕年限土壤微生物生物量的季节性变化特征

从图 2 可以看出, 民勤绿洲不同年限退耕地土

壤 MBC 含量的季节动态变化规律大致相似,秋季最大,夏季与春季居中,冬季最小。大致呈现出从 3 月开始土壤 MBC 含量呈升高趋势,到 9 月达到峰值,然后又持续降低,12 月下降到最低值。0~10 cm 土层土壤 MBC 含量变化幅度较大,>30~40 cm 土层的土壤 MBC 含量变化幅度逐渐变小。土壤 MBN 含量的季节动态变化表现为:在不同年限退耕地变化趋势均呈现为倒“V”型分布格局,3—9 月逐渐增大,9 月达到峰值,然后又持续减小,12 月下降到最低值。

在整个生长季,样地表层土壤 MBN 含量变幅较大。不同年限退耕地 MBP 含量的季节动态大致相似,秋季与夏季较大,春季居中,冬季最小。总体呈从 3 月开始土壤 MBP 含量逐渐升高,到 6 月或者 9 月达到峰值,然后又持续降低,12 月下降到最低值。退耕初期季节变化幅度逐渐增大,退耕 5 a 时 0~20 cm 土层 6 月变化幅度达到最大值,然后逐渐减小,

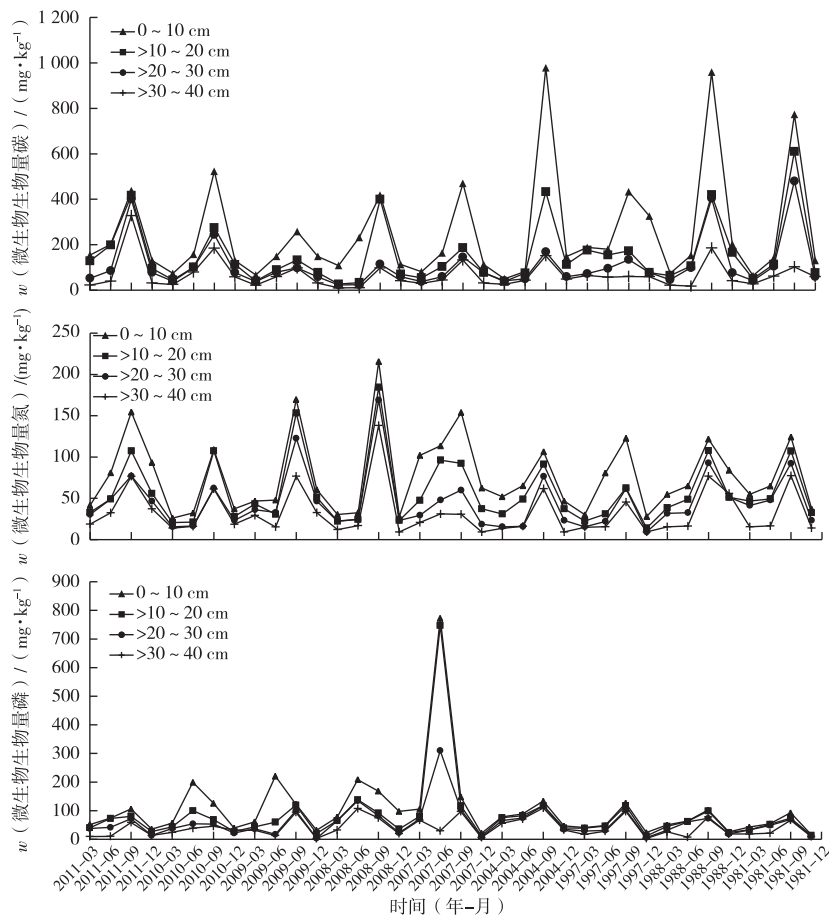
退耕 15 a 后土壤 MBP 含量季节变化极小。

表 2 不同年限退耕地土壤微生物生物量

Table 2 The soil microbial biomass in the sample sites at different ages since restoration

退耕年限/ a	w(微生物生 物量碳)/ (mg·kg ⁻¹)	w(微生物生 物量氮)/ (mg·kg ⁻¹)	w(微生物生 物量磷)/ (mg·kg ⁻¹)	微生物生 物量碳/ 氮比
1	412.76	111.55	82.23	3.7
2	369.23	90.24	78.94	4.09
3	177.79	139.07	111.14	1.28
4	320.79	183.73	110.8	1.75
5	298.67	95.66	120.22	3.12
8	594.51	88.17	121.12	6.74
15	268.49	79.92	113.19	3.36
24	629.88	103.97	90.23	6.06
31	600.97	104.72	77.68	5.74

表中数据均为不同土层(0~10、>10~20、>20~30 及>30~40 cm)各指标的加权平均值。2011 年的退耕年限为离检测时间 1 a,其余类推。



3、6、9、12 月代表实际检测时间。2011 年的退耕年限为离检测时间 1 a,其余类推。

图 2 土壤微生物生物量随季节动态变化

Fig. 2 Soil microbial biomass changes dynamically with season

3 讨论

土壤微生物的功能可通过微生物生物量来反映^[34],同时微生物生物量与其所处土壤环境密不可分^[35]。在民勤绿洲退耕地恢复过程中,土壤微生物生物量随着土层的加深而逐渐减小。由图 1 可以看出,在 4 个土层中,土壤微生物生物量占比较大的是 0~10 cm 土层。方差分析显示,各土层对 MBC、MBN、MBP 含量的影响显著 ($P < 0.05$)。马文文等^[36]、文都日乐等^[37]研究结果也呈现出类似的规律。这主要是由于土壤表层有少量的枯枝落叶凋落物及其所产生的腐殖质,有机质含量高^[38],再加上表层温度条件和通气状况良好,微生物生长旺盛,代谢活跃^[39]。另外,好氧菌大多居于土壤表层,活性较强,随着土层的加深,生境条件越来越差,好氧菌逐渐减少,代谢活动较弱的厌氧菌逐渐占主导地位,使深层的土壤微生物生物量减少,微生物生物量的分布发生变化,出现了明显的表聚性^[40]。

随着退耕地恢复时间的增加,土壤 MBC 与 MBN 含量呈先波动下降,最终走向平衡的态势,MBP 含量总体上呈波动上升的趋势。在退耕地恢复的前几年,物种丰富度和物种多样性指数都比较大^[41-42],土壤 MBC、MBN、MBP 含量也较高,随恢复年限的增加,物种丰富度和多样性指数下降^[42],MBC、MBN、MBP 含量也逐渐减小。比较研究区 9 个样地发现,MBC 含量的最大值在退耕后 24 a 左右出现,为 $629.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而这个时候,MBN、MBP 含量居中;退耕 4 a 的土层中,MBN 含量达到最大值 ($183.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),MBC、MBP 含量居中;退耕 8 a 的样地中 MBP 含量最大 ($121.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),MBC、MBP 含量居中。微生物生物量是土壤养分的重要来源,是土壤中活的有机质^[43]。在退耕后的 24 a 期间出现土壤 MBC 含量的最大值,可见 MBC 的积累是一个极其缓慢的过程;在退耕后的 4 a 内,土壤 MBN 含量的加权平均值达到最大值,这说明土壤肥力水平最好的时间是退耕 4 a,到退耕 5 a 时又恢复到退耕 3 a 时的状况,可见退耕 5 a 左右是土地修复的关键时期,为了防止土地的沙漠化及其盐渍化,在土地退耕 5 a 左右要进行合理的人工干预,这与项目组前期研究结果相似^[41];土壤 MBP 含量的最大值出现在退耕后的 5~8 a,但波动范围较小,退耕中期 (3~15 a) 土壤 MBP 含量的加权平均值在 $110 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,由此可见,退耕年限的延长对 MBP 的影响较小,这可能与磷在土壤中的存在形态较为复杂有关,而且土壤磷分布受成土母质中矿

物成分、地貌、土地使用程度等多种条件的影响,几乎不受自然环境和植被的影响^[36,44]。土壤 MBC、MBN、MBP 是土壤活性养分的库,能敏锐地反映环境因子的变化^[45]。

土壤 SMBC/SMBN 比 ≥ 30 和 SMBC/SMBN 比 ≤ 20 分别表示土壤微生物生长受到氮源和碳源的限制,当 SMBC/SMBN 比 = 25 时对土壤微生物生长最有利^[46],在不同年限退耕地土壤中,SMBC/SMBN 比介于 1.28~6.74,说明碳源供给数量是土壤微生物生长的主要限制因子。相关性分析也显示,土壤微生物量与土壤养分呈不同程度的相关性^[47],其中与土壤有机质呈极显著相关。然而土壤是较为复杂的生态系统,土壤微生物量还会受温度、气温、土壤容重等因素的影响,应综合考虑。

土壤微生物生物量随着季节的变化而改变,这主要是由于气温、凋落物以及土壤微生物与植物对养分的竞争等原因造成的,在不同的生态系统中,土壤 MBC、MBN、MBP 含量的季节变化规律也不同^[48]。就是在相同的生态系统中,不同生境的土壤中 MBC、MBN、MBP 含量的季节变化规律也不一样^[49]。民勤绿洲退耕地土壤 MBC、MBN、MBP 含量的季节变化规律具有较大差异。不同年限退耕地 MBC 含量的季节动态大致相似,秋季最大,夏季、春季居中,冬季最小。从 3 月开始随月份的增大 MBC 含量逐渐增大,到 8—9 月达到峰值,然后随月份的增大又逐渐减小,12 月降为最低值。这是因为进入春季,地温回升,土壤微生物数量增加、活性提高,解冻后土壤中原有的可溶性有机碳利用分解加强,较多的营养物质被微生物固定^[50],土壤 MBC 含量逐渐升高。不同年限退耕地土壤 MBN 含量的季节动态变化显现出倒“V”型分布状况,从 3 月开始随月份的增大 MBN 含量逐渐增大,到 6 或者 9 月到达峰值,后又连续减小,12 月减小到最低值。这一结果与 GARCIA 等^[51]的研究结果相似。从 3 月开始土壤 MBP 含量逐渐升高,到 6 或 9 月达到峰值,然后随着月份的增加又持续降低,12 月下降到最低值。退耕初期季节变化幅度逐渐增大,退耕 5 a 的时候,0~20 cm 土层 6 月变化幅度达到最大值,然后变化幅度减小,尤其在退耕 15 a 后,MBP 含量季节波动幅度很小。这是由于 3 月植被快速萌发,摄取了土壤中大量的营养物质,所以土壤可溶解有机碳、氮、磷含量急剧减小。在某一水平上造成了与微生物间的营养需求竞争局面,减少了微生物的营养可获取量,抑制其生存和繁殖,因此 MBC、MBN、MBP 含量均降低。进入 5—6 月,由于气温升高、大

量植物根系活动能力的变强,致使有机质矿化作用变大,养分富裕,根系分泌物丰富,微生物生物量增大。土壤取样时间为 2012 年 9 月下旬,正好是研究区降水量增加的时候,此时又有大量的植物枯枝落叶积累,中午温度较高,所以研究区大量的植物枯枝落叶、地表湿润、温度较高等自然现象都有利于增强土壤微生物活性,促进土壤中营养物质的输入以及碳水化合物从地上逐渐向地下转移,土壤中微生物可使用的有机质逐渐增加,故土壤微生物生物量出现峰值^[40]。冬季土壤温度比较低,低温抑制了土壤微生物的活性,其代谢随之变缓,因此土壤微生物生物量下降。在退耕的初期,不同年限退耕地土壤 MBP 含量的季节变化幅度逐渐增加,然后季节变化幅度逐渐减小,尤其是退耕 15 a 后,土层 MBP 含量波动较小,基本无季节变化。这可能是由于退耕后期,土壤的盐碱化程度加重,pH 值明显升高^[52],在一定程度上抑制了土壤 MBP 含量对季节变化的敏感性,使土壤 MBP 含量在退耕后期随着季节的不同几乎没有变化。

4 结论

在甘肃民勤绿洲退耕地自然恢复过程中,相同年限退耕地表层土壤微生物生物量显著高于深层土壤;土壤 MBC 与 MBN 含量随着退耕年限的增加,逐渐减小,土壤 MBP 含量则表现为波动式上升的趋势,土壤微生物生长的主要限制因子是碳源。不同年限退耕地土壤 MBC 含量的季节动态变化大致相似,冬季最小,夏季与春季居中,秋季最大。MBN 含量的季节动态呈现出倒“V”型分布的状态,从 3 月开始随月份的增大 MBC 含量逐渐升高,到 6 或者 9 月到达峰值,然后随月份的增大又连续减小,12 月减小到最低值。土壤 MBP 含量基本表现为秋季、夏季较大,春季居中,冬季最小。在不同的生境中,各类生态因子的共同作用以及关键生态因子的主导位置的不同,土壤 MBC、MBP 含量的季节变化可能存在着一定的差别。

目前影响干旱沙区退耕地土壤微生物生物量变化因子的研究还相对薄弱,今后还需加强这方面的研究。但是,从土壤微生物特性来看,退耕 4 a 时,土壤的熟化程度和土壤肥力水平达到了最好状态。退耕 5 a 后,土壤的肥力呈相对下降的趋势。因此,退耕 5 a 左右是土地修复、利用及荒漠化治理的关键时期。

参考文献:

[1] 冯绳武.民勤绿洲的水系演变[J].地理学报,1963,29(3):

241-249.[FENG Sheng-wu.The Evolution of the Drainage System of the Minchin Oasis[J].Acta Geographica Sinica,1963,29(3): 241-249.]

- [2] 张莹花,刘世增,纪永福,等.石羊河中游河岸芦苇(*Phragmites australis*)群落空间格局[J].中国沙漠,2016,36(2):342-348. [ZHANG Ying-hua,LIU Shi-zeng,JI Yong-fu,et al.Spatial Distribution Pattern and Spatial Association of *Phragmites australis* in the Middle Reaches of Shiyanghe River [J]. Journal of Desert Research,2016,36(2):342-348.]
- [3] 常跟应,王鹭,张文侠.民勤县农民对石羊河流域节水政策及节水效果认知[J].干旱区资源与环境,2016,30(2):13-19. [CHANG Gen-ying,WANG Lu,ZHANG Wen-xia.Perceptions of Peasants in Minqin County for the Water Conservation Policies of Shiyang River Basin and Their Effects[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2016,30(2):13-19.]
- [4] 宋达成,王理德,吴昊,等.民勤退耕区次生草地土壤特性研究[J].草业学报,2021,30(2):59-68.[SONG Da-cheng,WANG Li-de,WU Hao,et al.A Study of Change in Soil Characteristics with Recovery Time in Degraded Grassland in Minqin [J]. Acta Prataculturae Sinica,2021,30(2):59-68.]
- [5] 张翠萍,李淑英,王蓓,等.六氯苯胁迫下 2 种湿地植物根际土壤微生物数量与酶活性变化[J].生态与农村环境学报,2018,34(2):177-183.[ZHANG Cui-ping,LI Shu-ying,WANG Bei,et al.Changes in Population of Soil Microbe and Activity of Soil Enzyme in Rhizospheres of Two Wetland Plants under Stress of Hexachlorobenzene [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018,34(2):177-183.]
- [6] 胡婵娟,郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报,2012,21(9):1640-1646.[HU Chan-juan,GUO Lei.Advances in the Research of Ecological Effects of Vegetation Restoration[J]. Ecology and Environmental Sciences,2012,21(9):1640-1646.]
- [7] JACKSON L E, BOWLES T M, HODSON A K, et al. Soil Microbial-Root and Microbial-Rhizosphere Processes to Increase Nitrogen Availability and Retention in Agroecosystems[J].Current Opinion in Environmental Sustainability,2012,4(5):517-522.
- [8] PRATSCHER J,DUMONT M G,CONRAD R.Ammonia Oxidation Coupled to CO₂ Fixation by Archaea and Bacteria in an Agricultural Soil[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108 (10): 4170-4175.
- [9] HADAR Y,PAPADOPOULOU K K.Suppressive Composts: Microbial Ecology Links between Abiotic Environments and Healthy Plants[J].Annual Review of Phytopathology,2012,50:133-153.
- [10] PETERSEN D G,BLAZEWCZ S J,FIRESTONE M,et al.Abundance of Microbial Genes Associated with Nitrogen Cycling as Indices of Biogeochemical Process Rates across a Vegetation Gradient in Alaska [J]. Environmental Microbiology, 2012, 14 (4): 993-1008.
- [11] KUZUYAKOV Y,XU X L.Competition between Roots and Microorganisms for Nitrogen: Mechanisms and Ecological Relevance [J]. The New Phytologist,2013,198(3):656-669.
- [12] 张营,李法云,孙婷婷,等.化学融雪剂对土壤微生物活性及氮转化的影响[J].生态与农村环境学报,2021,37(2):249-256.

- [ZHANG Ying, LI Fa-yun, SUN Ting-ting, *et al.* Effect of Deicing Salts on Microbial Activity and Nitrogen Transformation in Roadside Soil [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(2): 249–256.]
- [13] 马源, 杨洁, 张德罡, 等. 高寒草甸退化对祁连山土壤微生物生物量和氮矿化速率的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(8): 2680–2690. [MA Yuan, YANG Jie, ZHANG De-gang, *et al.* Effects of Alpine Meadow Degradation on Soil Microbial Biomass and Nitrogen Mineralization Rate in the Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2680–2690.]
- [14] 刘放, 吴明辉, 魏培洁, 等. 疏勒河源高寒草甸土壤微生物生物量碳氮变化特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6416–6426. [LIU Fang, WU Ming-hui, WEI Pei-jie, *et al.* Variations of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Alpine Meadow of the Shule River Headwater Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6416–6426.]
- [15] 付勇, 庄丽, 王仲科, 等. 新疆野生多伞阿魏生境土壤理化性质和土壤微生物[J]. *生态学报*, 2012, 32(10): 3279–3287. [FU Yong, ZHUANG Li, WANG Zhong-ke, *et al.* On the Physical Chemical and Soil Microbial Properties of Soils in the Habitat of Wild *Ferula* in Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(10): 3279–3287.]
- [16] 雷隆举, 赵锦梅, 张雪, 等. 祁连山东段不同植物群落的特征及生物量分配[J]. *草业科学*, 2020, 37(5): 853–863. [LEI Long-ju, ZHAO Jin-mei, ZHANG Xue, *et al.* Study on the Community Characteristics and Biomass Allocation of Different Vegetation in the Eastern Qilian Mountains [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(5): 853–863.]
- [17] KLUGE B, PETERS A, KRÜGER J, *et al.* Detection of Soil Microbial Activity by Infrared Thermography (IRT) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 383–389.
- [18] 杜美琪, 张恒硕, 彭栋, 等. 冀西北中低山区灌草群落生物量分配及其与土壤因子的关系[J]. *草业科学*, 2020, 37(1): 1–9. [DU Mei-qi, ZHANG Heng-shuo, PENG Dong, *et al.* Distribution of Shrub-Herb Community Biomass and Its Relationship with Soil Factors in Middle and Low Mountainous Areas of Northwest Hebei Province [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1): 1–9.]
- [19] POURREZA M, HOSSEINI S M, SAFARI S A A, *et al.* Soil Microbial Activity in Response to Fire Severity in Zagros Oak (*Quercus Brantii* Lindl.) Forests, Iran, after one Year [J]. *Geoderma*, 2014, 213: 95–102.
- [20] 康宝天, 侯扶江, BOWATTE S. 祁连山高寒草甸和荒漠草原土壤细菌群落的结构特征[J]. *草业科学*, 2020, 37(1): 10–19. [KANG Bao-tian, HOU Fu-jiang, BOWATTE S. Characterization of Soil Bacterial Communities in Alpine and Desert Grasslands in the Qilian Mountain Range [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1): 10–19.]
- [21] WARDLE D A, BARDGETT R D, KLIRONOMOS J N, *et al.* Ecological Linkages between Aboveground and Belowground Biota [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1629–1633.
- [22] TSCHERKO D, HAMMESFAHR U, ZELTNER G, *et al.* Plant Succession and Rhizosphere Microbial Communities in a Recently Deglaciated Alpine Terrain [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2005, 6(4): 367–383.
- [23] CHABRERIE O, LAVAL K, PUGET P, *et al.* Relationship between Plant and Soil Microbial Communities along a Successional Gradient in a Chalk Grassland in North-Western France [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24(1): 43–56.
- [24] 郭万庆, 徐小逊, 鲁兰, 等. 增温和生物炭添加对麦田土壤养分和微生物生物量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 611–618. [GUO Wan-qing, XU Xiao-xun, LU Lan, *et al.* Effects of Warming and Biochar Addition on Soil Nutrients and Microbial Biomass in Wheat Fields [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5): 611–618.]
- [25] GRAYSTON S J, CAMPBELL C D, BARDGETT R D, *et al.* Assessing Shifts in Microbial Community Structure across a Range of Grasslands of Differing Management Intensity Using CLPP, PLFA and Community DNA Techniques [J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 25(1): 63–84.
- [26] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, *et al.* Significant Acidification in Major Chinese Croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [27] 王翰琨, 吴永波, 刘俊萍, 等. 生物炭对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(6): 689–701. WANG Han-kun, WU Yong-bo, LIU Jun-ping, *et al.* A Review of Research Advances in the Effects of Biochar on Soil Nitrogen Cycling and Its Functional Microorganisms [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(6): 689–701.
- [28] 王静, 王磊, 张爱君, 等. 长期增施有机肥对土壤不同组分有机磷含量及微生物丰度的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(9): 1161–1168. [WANG Jing, WANG Lei, ZHANG Ai-jun, *et al.* Effects of Long-Term Organic Fertilization on the Content of Soil Organic Phosphorus Fractions and Abundance of Soil Microorganism [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(9): 1161–1168.]
- [29] TIAN Y Q, LIU J, WANG X H, *et al.* Carbon Mineralization in the Soils under Different Cover Crops and Residue Management in an Intensive Protected Vegetable Cultivation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 127(3): 198–206.
- [30] 魏静, 郭树芳, 孙本华, 等. 冬季覆盖作物对潮褐土土壤肥力和微生物学性状的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(5): 426–432. [WEI Jing, GUO Shu-fang, SUN Ben-hua, *et al.* Effects of Winter Cover Crops on Soil Nutrients and Microbial Properties of Cinnamon Soil [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(5): 426–432.]
- [31] STARK S, MÄNNISTÖ M K, ESKELINEN A. Nutrient Availability and pH Jointly Constrain Microbial Extracellular Enzyme Activities in Nutrient-Poor Tundra Soils [J]. *Plant and Soil*, 2014, 383(1): 373–385.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14–22. [BAO Shi-dan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 14–22.]
- [33] SPARLING G P. Soil Microbial Biomass, Activity and Nutrient Cycling as Indicators of Soil Health [C] // PANKHURST C, DOUBE B M, GUPTA V V S R. *Biological Indicators of Soil Health*. Walling-

- ford, UK: CAB International, 1997.
- [34] 李雪萍, 李建宏, 刘永刚, 等. 甘南草原不同退化草地植被和土壤微生物特性[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1252–1259. [LI Xue-ping, LI Jian-hong, LIU Yong-gang, *et al.* The Vegetation and Soil Microorganism Characteristics of Different Degraded Grassland in Gannan Steppe [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5): 1252–1259.]
- [35] 顾继雄, 郭天斗, 王红梅, 等. 宁夏东部荒漠草原向灌丛地转变过程土壤微生物响应[J]. 草业学报, 2021, 30(4): 46–57. [GU Ji-xiong, GUO Tian-dou, WANG Hong-mei, *et al.* Responses of Soil Microbes across an Anthropogenic Transition from Desert Steppe Grassland to Shrubland in Eastern Ningxia [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(4): 46–57.]
- [36] 马文文, 姚拓, 靳鹏, 等. 荒漠草原 2 种植物群落土壤微生物及土壤酶特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 176–183. [MA Wen-wen, YAO Tuo, JIN Peng, *et al.* Characteristics of Microorganisms and Enzyme Activity under Two Plant Communities in Desert Steppe [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(1): 176–183.]
- [37] 文都日乐, 张静妮, 李刚, 等. 放牧干扰对贝加尔针茅草原土壤微生物与土壤酶活性的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(4): 517–522. [WEN Durile, ZHANG Jing-ni, LI Gang, *et al.* Effect of Grazing Disturbance on Soil Microorganisms and Soil Enzyme Activities of *Stipa Baicalensis* Rosev. Steppe [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(4): 517–522.]
- [38] HAWKES C V, KIVLIN S N, ROCCA J D, *et al.* Fungal Community Responses to Precipitation [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(4): 1637–1645.
- [39] ENGELHARDT I C, WELTY A, BLAZEWCZ S J, *et al.* Depth Matters: Effects of Precipitation Regime on Soil Microbial Activity Upon Rewetting of a Plant-Soil System [J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(4): 1061–1071.
- [40] 许华, 何明珠, 唐亮, 等. 荒漠土壤微生物量碳、氮变化对降水的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1295–1304. [XU Hua, HE Ming-zhu, TANG Liang, *et al.* Response of Changes of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen to Precipitation in Desert Soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1295–1304.]
- [41] 王理德, 田青, 郭春秀, 等. 不同退耕年限干旱绿洲植被群落及灰棕漠土特性变化[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1436–1447. [WANG Li-de, TIAN Qing, GUO Chun-xiu, *et al.* Variation of Oasis Vegetation Communities and Properties of Grey Brown Desert Soil Relative to History of "Grain for Green" in Arid Regions [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1436–1447.]
- [42] 何洪盛, 田青, 王理德, 等. 青土湖退耕地植被群落特征与土壤理化性质分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 223–232. [HE Hong-sheng, TIAN Qing, WANG Li-de, *et al.* Study on Vegetation Community Characteristics and Soil Physical and Chemical Properties of Abandoned Land in Qingtu Lake [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(1): 223–232.]
- [43] WEI Y, YU L F, ZHANG J C, *et al.* Relationship between Vegetation Restoration and Soil Microbial Characteristics in Degraded Karst Regions: A Case Study [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(1): 132–138.
- [44] 王丰. 武夷山不同海拔植被带土壤微生物量碳、氮、磷研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2008. [WANG Feng. Variations of Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Phosphorus along Elevation Gradients in Subtropical Area in Wuyi Mountain [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.]
- [45] 王学娟, 周玉梅, 王秀秀, 等. 长白山苔原生态系统土壤酶活性及微生物生物量对增温的响应[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 166–175. [WANG Xue-juan, ZHOU Yu-mei, WANG Xiu-xiu, *et al.* Responses of Soil Enzymes in Activity and Soil Microbes in Biomass to Warming in Tundra Ecosystem on Changbai Mountains [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 166–175.]
- [46] 张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等. 云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2056–2065. [ZHANG Li-qing, PENG Wan-xia, SONG Tong-qing, *et al.* Spatial Heterogeneity of Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sloping Farmland in a Karst Region on the Yunnan-Guizhou Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2056–2065.]
- [47] 牛世全, 杨婷婷, 李君锋, 等. 盐碱土微生物功能群季节动态与土壤理化因子的关系[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 328–334. [NIU Shi-quan, YANG Ting-ting, LI Jun-feng, *et al.* Seasonal Trends of Microbial Functional Groups in Saline-Alkali Soil and Their Relationship with Soil Physicochemical Factors in the East Hexi Corridor [J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(2): 328–334.]
- [48] 杨成德, 龙瑞军, 陈秀蓉, 等. 东祁连山高寒灌丛草地土壤微生物量及土壤酶季节性动态特征[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 135–142. [YANG Cheng-de, LONG Rui-jun, CHEN Xiu-rong, *et al.* Seasonal Dynamics in Soil Microbial Biomass and Enzymatic Activities under Different Alpine Brushlands of the Eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(6): 135–142.]
- [49] 刘纯, 刘延坤, 金光泽. 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 451–459. [LIU Chun, LIU Yan-kun, JIN Guang-ze. Seasonal Dynamics of Soil Microbial Biomass in Six Forest Types in Xiaoxing'an Mountains, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 451–459.]
- [50] 许华, 何明珠, 孙岩. 不同降水控制对荒漠土壤中可溶性碳、氮组分的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 798–803. [XU Hua, HE Ming-zhu, SUN Yan. Effects of Different Precipitation Controls on Soil Dissolved Carbon and Nitrogen Fractions in Desert Region [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2018, 54(6): 798–803.]
- [51] GARCIA F O, RICE C W. Microbial Biomass Dynamics in Tallgrass Prairie [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(3): 816–823.
- [52] WANG L D. Soil Properties in Different Years of Cultivation Abandonment in the Midstream and Downstream of Shiyang River Area [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(4): 7561–7572.

作者简介: 王理德(1969—), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 博士, 主要从事生物多样性及水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: wldzy69@163.net

(责任编辑: 陈 昕)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0800

谷原,郭仕禹,赵文涛,等.基于絮凝强化的微气泡气浮技术应急高效处理富营养化地表水[J].生态与农村环境学报,2022,38(10):1347–1353.

GU Yuan, GUO Shi-yu, ZHAO Wen-tao, et al. High-efficiency Treatment of Eutrophic Surface Water by Flocculation-microbubble Air Flotation[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1347–1353.

基于絮凝强化的微气泡气浮技术应急 高效处理富营养化地表水

谷原¹, 郭仕禹², 赵文涛², 宛勇², 隋倩^{1①} (1. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对富营养化地表水突发水华及磷污染问题,研发了一种用于应急除藻除磷的基于絮凝强化的微气泡气浮技术,利用高速摄像技术揭示了装置内的微气泡尺寸和空间分布规律,对混凝剂种类、有效物质含量和投加量进行优化,实现了在投加单一混凝剂条件下对富营养化地表水藻类、总磷和浊度的高效去除。结果表明:所开发的气浮装置在溶气压力为 0.32 MPa 条件下可稳定产生微气泡,气泡在上升和水平流动过程中尺寸逐渐变大,但平均直径仍在适用于气浮除藻的最优范围(21.6~34.4 μm)。采用聚合氯化铝(PAC)为混凝剂(氧化铝含量 w 为 29%、投加量为 40 mg·L⁻¹)进行强化后,在该技术条件下,气浮时间设置为 11.8 min,对富营养化地表水中藻、浊度、总磷、叶绿素 a、COD 的去除率分别达(93.2±1.7)%、(85.3±0.7)%、(79.4±2.0)%、(78.5±1.5)%和(58.9±13.5)%,实现了同步高效除藻除磷。

关键词: 高效混凝剂; 微气泡气浮; 富营养化; 地表水; 应急

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1347-07

High-efficiency Treatment of Eutrophic Surface Water by Flocculation-microbubble Air Flotation. GU Yuan¹, GUO Shi-yu², ZHAO Wen-tao², WAN Yong², SUI Qian^{1①} (1. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at algae blooms and phosphorus pollution in eutrophic surface water, a microbubble flotation device on basis of enhanced flocculation was developed for algae and phosphorus removal for emergency pollution control. The size and spatial distribution of microbubbles in the air flotation device were measured using a high-speed camera. The type, substance content and dosage of the coagulant were optimized to realize the efficient removal of algae and total phosphorus and reduction of turbidity. The results show that the developed air flotation device can generate stable microbubbles at the pressure of 0.32 MPa. The size of microbubbles increased gradually with the flow in ascending and horizontal directions, yet the mean diameter was within the optimal range of air bubbles for removal of algae (21.6–34.4 μm). When polyaluminum chloride (PAC) (alumina content: 29%, dosage: 40 mg·L⁻¹) was used as the coagulant, the removal efficiencies of algae, turbidity, total phosphorus, chlorophyll a, and COD in the eutrophic surface water reached 93.2±1.7%, 85.3±0.7%, 79.4±2.0%, 78.5±1.5% and 58.9±13.5%, respectively, after a flocculation time of 11.8 min, demonstrating the simultaneous effective removal of algae and phosphorus by the developed microbubble flotation device.

Key words: high-efficiency coagulant; microbubble air flotation; eutrophication; surface water; emergency

近年来,全国监测营养化状况的湖泊(水库)中,富营养湖泊(水库)占比由 23%增加至 29%^[1],整体形势依旧严峻。富营养化水体中藻类大量繁殖、暴发,不仅破坏水质生态平衡,影响旅游、水产养殖等行业,藻细胞破裂释放的藻毒素对人体健康有极大的威胁,影响饮用水安全^[2]。因此,开发能

高效除藻的应急处理技术,对保护生态环境与人体

收稿日期: 2021-12-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-004)

① 通信作者 E-mail: suiqian@ecust.edu.cn

健康均具有重要的意义。

目前,针对水华暴发的应急处理技术主要包括机械打捞、超声、气浮、膜过滤等物理方法^[3-4]以及混凝、化学药剂、水力空化等化学方法^[5-6]。微气泡气浮技术因可产生与藻细胞接近甚至更小的微米气泡,具有水中停留时间长、传质效率高、能产生自由基等特点^[7],表现出较好的除藻效果。例如,叶建锋等^[8]采用微气泡气浮工艺处理淀山湖蓝藻暴发期水样,叶绿素 a 的去除率可保持在 62%~73%。王建等^[9]研究表明,与传统加压溶气气浮相比,微纳米气泡法对巢湖含藻水中总磷(TP)、总氮(TN)、化学需氧量(COD)和悬浮固体(SS)的去除效果更好。相对于单一的气浮除藻工艺,气浮与混凝联用可强化同步除藻除磷,获得更好的处理效果^[10]。研究表明,投加多种混凝剂和助凝剂可以达到较好的处理效果^[11],然而多种类大剂量地投加混凝剂可能造成二次污染,不适用于地表水尤其是水源水处理。因此,筛选高效低毒的单一混凝剂,开发基于絮凝强化的微气泡气浮技术,高效处理富营养化地表水,具有重要的意义和应用前景。此外,目前针对微气泡气浮处理地表水的研究大多数集中于对藻类的处理效果,如何进一步强化工艺实现同步除藻除磷,并评价其去除高风险痕量污染物的能力,是亟待解决的重要问题。

该研究采用基于集成溶气系统的微气泡气浮技术,并利用高速摄像技术测量所研制气浮装置内微气泡尺寸和空间分布规律,从混凝剂种类、有效物质含量和投加量 3 个方面对絮凝强化过程进行优化,并在最优条件下考察其对富营养化地表水中藻

类、总磷、浊度等及高风险痕量污染物的处理效果,对富营养化地表水中应急除藻除磷具有重要的参考价值。

1 材料与方法

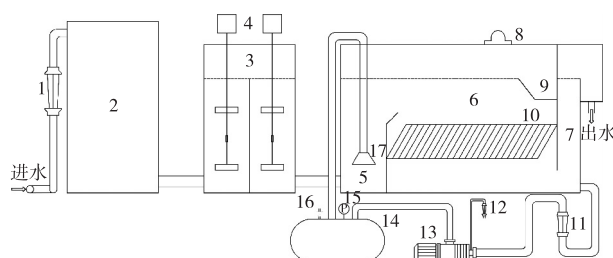
1.1 实验装置与方法

1.1.1 微气泡气浮装置

微气泡气浮装置主要由水箱、混凝池、气浮池和溶气系统组成(图 1)。该装置设计处理水量为 $1\,000\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,总停留时间为 13.8 min。其中,混凝池分为 2 级,内设 2 台搅拌器,总停留时间为 1.9 min;气浮池由接触区、分离区和出水区组成,总停留时间为 11.8 min。分离区内装有可拆卸斜板,斜板高 15 cm,板间距为 2 cm,与水平方向夹角为 60° ;集成溶气系统主要由溶气泵、溶气包和溶气释放器组成,溶气释放器位于接触区高 15 cm 处。

实验所用原水取自实际河道。原水从水箱进入混凝池后通过加药泵投加混凝剂,经混凝后的水从底部流入气浮池接触区,与溶气释放器释出的溶气水相遇。絮体与微气泡碰撞、黏附后在气浮池分离区进行分离,浮渣通过刮渣机刮入排渣槽,部分清水经溶气泵加压与吸入的空气充分溶解达到高压饱和,通过溶气释放器减压释放,供气浮使用,其余出水则通过大孔槽进入气浮池出水区后经溢流堰流出。

实验开始后,向装置中注入原水,启动装置,在实验工况下稳定运行一段时间后,观察气浮池内微气泡尺寸及分布,采集原水和出水测定各项水质指标。每个实验组设置 2 组平行实验。



1—进水流量计,2—水箱,3—混凝池,4—搅拌器,5—气浮池接触区,6—气浮池分离区,7—气浮池出水区,8—刮渣机,9—排渣槽,10—斜板,11—回流水流量计,12—气体流量计,13—溶气泵,14—溶气包,15—压力表,16—排气阀,17—溶气释放器。

图 1 微气泡气浮装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultra-microbubble air flotation device

1.1.2 混凝气浮药剂性能评价装置

混凝气浮性能评价装置由混凝系统、溶气系统和气浮柱组成。混凝系统采用六联搅拌仪(MY3000-6M,武汉梅宇仪器公司)控制搅拌强度

和搅拌时间。溶气系统由空气压缩机、压力溶气罐、水泵等组成。气浮柱有效容积为 1 L。

向搅拌杯中加入原水(pH 中性),启动运行程序,其中快速混合阶段搅拌速度为 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,时

间为 1 min;絮凝阶段搅拌速度为 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,时间为 4 min。结束后立即取 500 mL 混凝后的水倒入气浮柱,迅速打开溶气水释放阀,向气浮柱中注入 200 mL 溶气水(溶气压力为 0.4~0.6 MPa),气浮反应时间为 2 min,完成后取中部清液测定各项水质指标。每个实验组设置 2 组平行实验。

1.2 实验试剂

为尽可能减少混凝剂投加对地表水可能造成的二次污染,以高效低毒的铁系和铝系混凝剂为筛选对象。具体包括:聚氯化铝(PAC), Al_2O_3 含量 w 分别为 22%、24%、26%和 29%,河南爱尔福克化学股份有限公司;聚合硫酸铁(PFS),全铁含量 $w \geq 14\%$,深圳市长隆科技有限公司;聚合硫酸铝铁(PAFS),密度 $\geq 1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,深圳市长隆科技有限公司;硫酸亚铁(FS), $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 含量 $w \geq 98\%$,Fe 含量 $w \geq 19.7\%$,深圳市长隆科技有限公司;硫酸铝(AS)和三氯化铁(FC)为分析纯化学试剂,国药集团化学试剂有限公司。其他实验试剂还包括鲁哥氏液、碳酸镁、乙二胺四乙酸二钠、丙酮、甲醇和氮气。

1.3 检测内容与分析方法

1.3.1 常规污染物

(1) 浊度:采用浊度仪(2100N,哈希)直接测定。

(2) COD:依据 HJ/T 399—2007《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》,采用哈希 COD 试剂,在快速消解仪(DRB200,哈希)和分光光度计(DR5000,哈希)中对未经过滤的水样直接测定。

(3) 总磷:采用哈希总磷试剂,在快速消解仪和分光光度计中对未经过滤的水样直接测定。

(4) 藻数量:依据 CJJ 32—2011《含藻水给水处理设计规范》中藻数量的测定方法,采用显微镜视野计数法,水样加入鲁哥氏液固定静沉 24 h,浓缩后用 0.1 mL 浮游藻类计数框在光学显微镜(CX31,奥林巴斯)下放大 400 倍进行计数。

(5) 叶绿素 a:依据文献[12]中的测定方法,水样经乙酸纤维滤膜($0.45 \mu\text{m}$,沃特曼)过滤后,将滤膜在冰箱内干燥 6~8 h,加入少量碳酸镁粉末和 $\varphi = 90\%$ 的丙酮充分研磨后放入离心机,离心后的上清液在分光光度计中读取 750、663、645 和 630 nm 波长处的吸光度。

1.3.2 高风险痕量污染物

采用固相萃取-液相色谱/串联质谱联用法分析。加入 $\varphi = 5\%$ 的甲醇后的水样经玻璃纤维滤纸过滤,加入 $100 \mu\text{L}$ ($1000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 的内标溶液和 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{EDTA}$,调节 pH 值为 3。依次使用 10 mL

甲醇和 10 mL 高纯水通过 SPE 小柱进行活化和平衡。水样以 $3 \sim 5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速通过 SPE 小柱后,用 $50 \text{ mL} \varphi = 5\%$ 的甲醇水混合液淋洗 SPE 小柱 2 次并继续抽真空 2 h,除去柱中水分。最后用 9 mL 甲醇溶液进行洗脱,收集洗脱液于 10 mL 具塞玻璃刻度离心管,由高纯氮吹扫洗脱液定容至 1 mL,过尼龙滤膜后移至自动进样瓶中,待色谱分析。

采用液相色谱串联质谱联用仪(LCMS-8050,岛津)对样品进行测定。色谱柱为 Shim-pack GIST C18 型超高效液相色谱柱。采用梯度洗脱,流动相分别为 A 相(含 $\varphi = 0.1\%$ 的甲酸和 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵的高纯水)、B 相(甲醇),样品分析时间为 10 min。通过多反应选择监测(MRM)模式对目标化合物定量分析。程序控制、数据采集和处理均在 Lab-solution 软件中进行。具体色谱和质谱参数参见文献[13]。65 种物质的方法检出限分布在 $0.04 \sim 4.70 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,方法定量限分布在 $0.14 \sim 15.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。

1.3.3 微气泡尺寸及分布

采用高速摄像机(1F005M,千眼狼)和变倍镜头记录微气泡的上浮过程,使用计算机中的高速视频目标跟踪测量软件,将拍摄的视频按照 30 s 的时间间隔提取图片,然后使用 Nano Measurer 软件对气泡数量和直径进行统计,并采用对数正态分布函数描述微气泡尺寸的分布,采用算术平均直径 d_{10} 作为微气泡尺寸的平均直径。拍摄时高速摄像机分辨率为 800×600 ,曝光时间为 $500 \mu\text{s}$,变倍镜头工作距离为 90 mm,放大倍率为 100。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 软件对数据进行初步分析与处理,并在 OriginPro 2020 软件中绘图。

2 结果与讨论

2.1 微气泡气浮装置内微气泡尺寸分布规律

微气泡尺寸直接影响着气泡与絮体的碰撞、黏附概率和上升速度^[14],进而影响对污染物的去除效果^[15],研究装置内微气泡尺寸及分布的变化规律对理解微气泡气浮过程具有重要意义。在溶气压力为 0.32 MPa 条件下,分别测量微气泡气浮装置内接触区高度 H 为 15(溶气释放器附近)、30 和 45 cm,分离区水平距离 L 为 0、15、30、45 和 60 cm(垂直高度为 45 cm)处微气泡尺寸及分布的变化情况,结果如图 2 所示。接触区内微气泡随着高度的增加尺寸分布范围逐渐增加,分离区内微气泡随着水平距离的增加尺寸分布范围逐渐增加。曲线峰值整

体上呈下降且向右移动的趋势,但总体上仍集中在相对较窄的尺寸范围。

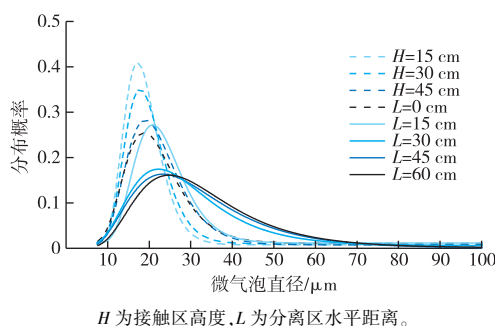


图 2 接触区和分离区不同位置下微气泡直径分布变化

Fig. 2 Size distribution of microbubbles at different positions in contact and separation zone

不同位置下微气泡平均直径的变化情况显示,接触区高度为 15、30、45 cm 时,微气泡平均直径分别为 21.6、23.9、25.7 μm,这与张义科等^[16]气浮池接触区内微气泡粒径随高度升高而增大的结论一致。装置内的静水压力随深度增加而变大,高度的增加使微气泡受到的静水压力变小,且微气泡在上浮过程中相互碰撞而发生聚并,导致微气泡尺寸变大。分离区水平距离为 0、15、30、45、60 cm 时,微气泡平均直径分别为 27.1、28.5、32.3、33.4、34.4 μm。

一般而言,气泡越小,浮速越小,对水体扰动也较小,但气泡也不是越小越好。气浮过程中的分离效率高度依赖于藻细胞与气泡之间的碰撞和黏附效率^[17],当气泡尺寸与藻细胞直径(3~30 μm)相当时,能更好地与藻细胞发生黏附,实现气浮的去除^[8]。也有研究指出,控制微气泡直径在 10~100 μm 内(平均直径 40 μm 左右)能取得更好的净水效果^[18]。综上,在所研制微气泡气浮装置中,气泡在上升和水平流动过程中尺寸虽然略增加,但平均直径仍处于适宜范围内(3~100 μm,且主要分布在 30~40 μm),有利于藻类及其他污染物的去除。

2.2 高效混凝剂的筛选和性能评价

尽管在高藻浓度下直接采用微气泡气浮技术能实现良好的除藻效果,但也可能存在因藻细胞尺寸过小、受藻类有机物(AOM)干扰、与气泡同性电荷静电相互作用使其碰撞和黏附作用下降等原因,最终影响微气泡气浮技术对富营养地表水应急除磷除藻的稳定性。因此,以高效低毒的单一混凝剂为对象,从混凝剂种类、有效物质含量和投加量 3 个方面进行优化,通过絮凝强化作用提升微气泡气浮

技术处理富营养地表水的有效性。

2.2.1 不同混凝剂种类对处理效果的影响

分别以 PAC、PFS、PAFS、AS、FS 和 FC 为混凝剂,考察混凝-气浮系统对富营养地表水中藻、总磷和浊度的去除效果,实验结果如图 3 所示。

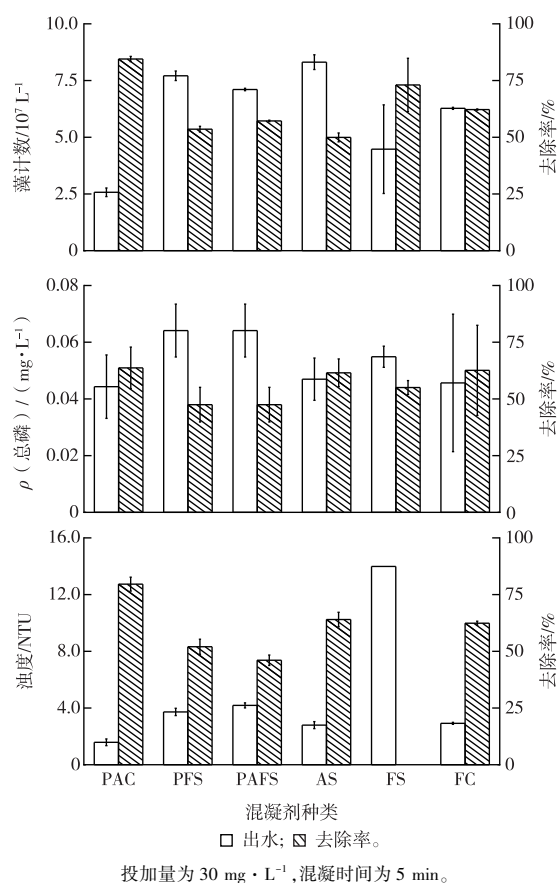


图 3 不同混凝剂种类对藻、总磷浓度和浊度处理效果的影响

Fig. 3 Effluent concentrations and removal efficiencies of algae, total phosphorus and turbidity when different coagulants were employed

相比于其余 5 种混凝剂,PAC 去除效果最优,对藻、总磷和浊度的平均去除率分别达 84.5%、63.7%和 79.6%。FS、FC 对藻的去除效果也较好,但由于出水存在一定的余铁量,造成色度高、出水不清,对浊度的去除效果较差。AS 对总磷和浊度的去除较好,但对藻的去除率仅 50%。袁俊等^[18]研究表明,在 PAC(Al_2O_3 含量 w 为 28%)、AS、FC 这 3 种混凝剂中,AS 对富藻水的去除效果最佳,但投药量较大($400 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),远高于该研究的投加量($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),可能是其去除效果较好的原因之一。但 AS 投加量大可能导致药剂使用成本增加,且可能影响水体的酸碱性等。因此,选择 PAC 作为该研

究絮凝强化工艺的混凝剂。

2.2.2 不同氧化铝含量对处理效果的影响

混凝剂中有效物质的含量是表征混凝剂产品性能的重要参数。在相同投加量的条件下,考察氧化铝含量分别为 22%、24%、26% 和 29% 时,混凝-气浮系统对富营养化地表水中藻、总磷和浊度的去除效果,结果如图 4 所示。

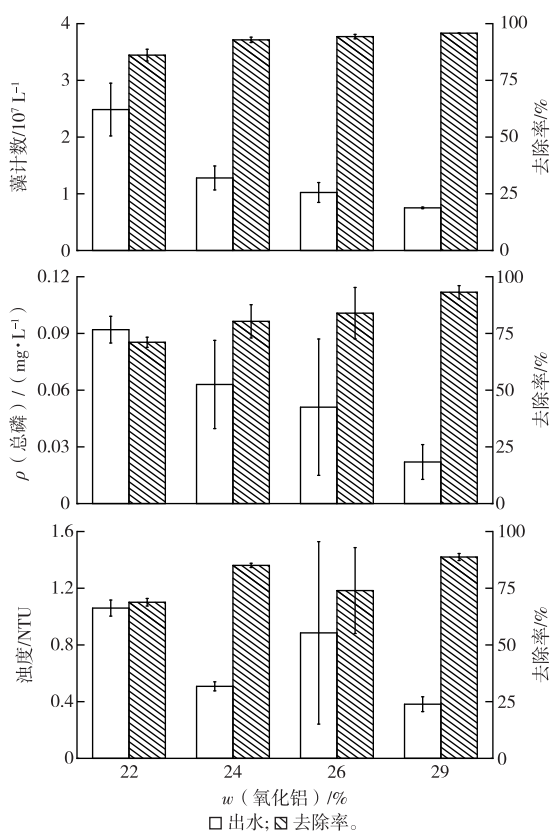


图 4 不同氧化铝含量对藻、总磷和浊度处理效果的影响

Fig. 4 Effluent concentrations and removal efficiencies of algae, total phosphorus and turbidity using coagulant with different Al_2O_3 contents

随着氧化铝含量的增加,藻、总磷和浊度的去除率逐渐增加,当氧化铝含量为 29% 时去除效果最好,去除率分别为 95.8%、93.2% 和 88.8%。这与柳怡等^[19]研究中氧化铝含量越高的 PAC 除浊效果越好的结论一致。此外,氧化铝含量高的 PAC 可以在一定程度上减少投加量,同时其他杂质成分更少,有利于减少二次污染。

2.2.3 不同混凝剂投加量对处理效果的影响

选用氧化铝含量为 29% 的 PAC 为混凝剂,在 PAC 投加量为 10~60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下考察混凝-气浮系统对富营养化地表水中藻、总磷和浊度的去

除效果,结果如图 5 所示。当投加量由 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,藻去除率由 72.5% 增加至 89.2%,总磷去除率由 21.5% 增加至 85.3%,浊度去除率由 44.4% 增加至 70% 以上;当投加量由 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 进一步增加至 60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,除藻率变化不明显,总磷和浊度的去除率有所下降。

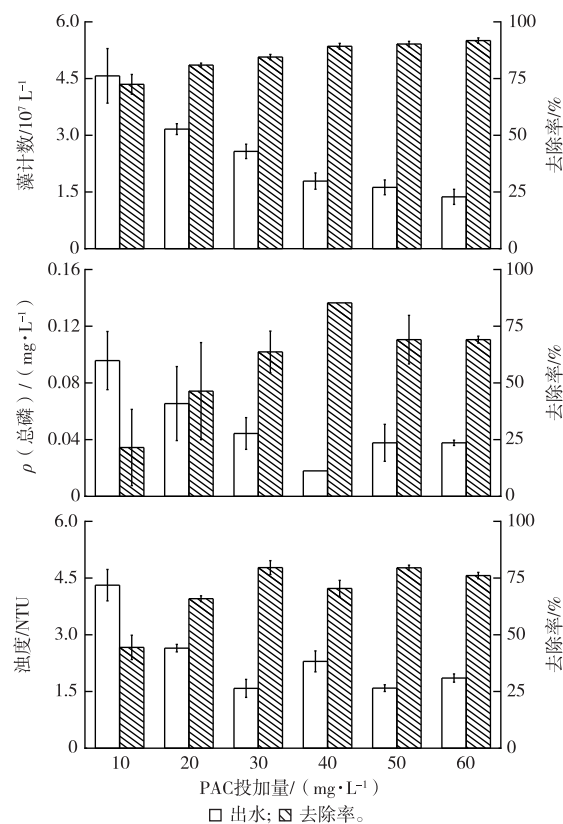


图 5 不同 PAC 投加量对藻、总磷和浊度处理效果的影响

Fig. 5 Effluent concentrations and removal efficiencies of algae, total phosphorus and turbidity under different PAC dosage

天然水体中的藻和悬浮颗粒一般带负电荷, PAC 的加入使藻和悬浮颗粒所带电荷降低,双电层受压缩,从而形成絮体。PAC 在絮体表面进一步水解生成多核羟基配合物,具有较强的吸附架桥性能,使污染物的去除效果进一步增加。而 PAC 投加量过大会造成胶体颗粒电荷性改变,发生再稳现象^[20]。同时,混凝剂吸附在胶体颗粒周围会导致胶体颗粒表面出现空位饱和,也会导致再稳现象的发生。因此,适当增加投加量可明显改善出水效果,但过量投加反而会影响出水水质。

2.3 对富营养化地表水的处理效果

当进水流量为 1 000 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$,混凝过程投加 40

mg · L⁻¹氧化铝含量 w 为 29% 的 PAC, 气浮过程回流水流量为 1 000 L · h⁻¹、溶气压力为 0.32 MPa 时, 对原水和出水水质进行分析, 结果见表 1。浊度、总磷、COD、藻和叶绿素 a 的平均去除率分别为 85.3%、79.4%、58.9%、93.2% 和 78.5%, 显著优于不投加混凝剂的微气泡气浮除藻效果。当采用微气泡气浮工艺处理淀山湖蓝藻暴发期水样时, 在溶

气压力 (0.65 ~ 0.70 MPa) 远高于该研究 (0.32 MPa) 条件下, 叶绿素 a 去除率为 62% ~ 73%^[8], 低于该研究去除效果。贾伟建等^[21]探究了混凝-气浮对低浊高藻水库水的处理, 在最优条件下, 其对藻类的平均去除率为 93.7%, 笔者的研究与其相似, 但其对 COD 的平均去除率仅为 43%。

表 1 絮凝强化微气泡气浮技术对浊度、总磷、COD、藻和叶绿素 a 的处理效果
Table 1 Removal of turbidity, TP, COD, algae and chlorophyll a by the flocculation-microbubble air flotation technique under the optimized condition

项目	浊度/NTU	ρ (总磷)/(mg · L ⁻¹)	COD/(mg · L ⁻¹)	藻计数/10 ⁸ L ⁻¹	ρ (叶绿素 a)/(ng · L ⁻¹)
原水	7.6±0.4	0.08±0.01	27.1±2.3	2.00±0.02	104.5±1.7
出水	1.1±0.1	0.02±0.00	11.1±3.7	0.14±0.03	22.5±1.6
去除率	(85.3±0.7)%	(79.4±2.0)%	(58.9±13.5)%	(93.2±1.7)%	(78.5±1.5)%

研究表明, 气浮产生的微气泡在收缩并发生破裂时, 气液界面的消失会引发剧烈变化, 导致界面上能量释放, 生成羟基自由基, 可能促进水中有机污染物的氧化降解^[22]。因此, 选择 65 种高风险痕量污染物, 比较其在微气泡气浮前后的浓度水平, 评价工艺对痕量有机污染物的去除性能。在原水中共检出 13 种目标高风险痕量污染物, 浓度范围为 0.67 ~ 11.7 ng · L⁻¹ (图 6), 而其余 52 种目标高风险痕量污染物浓度低于方法定量限。

去除作用。

3 结论

(1) 采用基于集成溶气系统的微气泡气浮技术, 该技术在低溶气压力下, 产生分布均匀的微气泡, 利用高速摄像技术测量了气浮装置内微气泡尺寸和空间分布规律, 尽管在气泡上升和水平流动过程中微气泡尺寸分布范围逐渐变大, 平均直径由 21.6 增加至 34.4 μm, 但仍处于适宜藻类和其他污染物去除的气泡尺寸范围。

(2) 相比其他常用的低毒铁系和铝系混凝剂, PAC 对富营养化地表水中藻、总磷和浊度去除效果最佳。氧化铝含量越高, 去除效果越好。在 10 ~ 60 mg · L⁻¹ 投加量范围内, PAC 最佳投加量为 40 mg · L⁻¹。

(3) 在最佳混凝剂条件下, 絮凝强化的微气泡气浮装置在溶气压力为 0.32 MPa、气浮时间 11.8 min 的操作条件下对富营养化地表水中藻、叶绿素 a、浊度、总磷、COD 的平均去除率分别达 93.2%、78.5%、85.3%、79.4% 和 58.9%, 可实现同步高效除藻除磷, 但对原水中检出的 13 种高风险痕量污染物去除作用不明显。

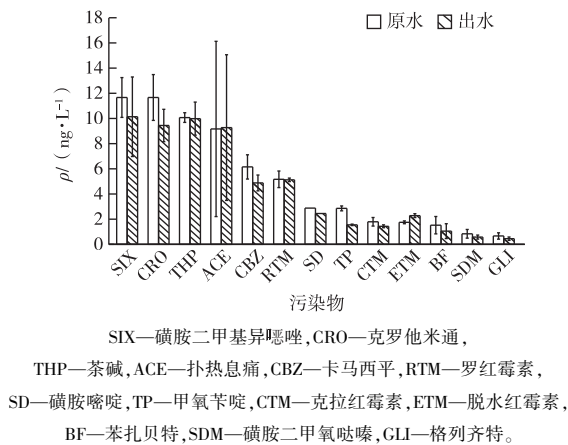


图 6 原水和出水中高风险痕量污染物的质量浓度
Fig. 6 Concentration of trace pollutants in raw and treated water

经过处理后, 大多数目标高风险痕量污染物出水浓度与原水浓度接近。考虑到原水中高风险痕量污染物浓度较低, 现有分析方法的误差范围一般在 20% 左右, 低于 20% 的浓度变化有可能是分析误差所致。因此, 该装置对高风险痕量污染物无明显

参考文献:
[1] 生态环境部. 中国生态环境状况公报 [R/OL]. [2021-12-01]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/>.
[2] VU H P, NGUYEN L N, ZDARTA J, et al. Blue-Green Algae in Surface Water: Problems and Opportunities [J]. Current Pollution Reports, 2020, 6(2): 105-122.
[3] HUANG H C, WU G, SHENG C W, et al. Improved Cyanobacteria Removal from Harmful Algae Blooms by Two-Cycle, Low-

- Frequency, Low-Density, and Short-Duration Ultrasonic Radiation [J]. *Water*, 2020, 12(9): 2431.
- [4] YOONHO C, DAEIK K, JINHO K, *et al.* Scale-up Testing of a Novel Cleaning Method for Low-Pressure Hollow Fiber Membranes Treating High Algae Surface Waters [J]. *Environmental Engineering Science*, 2017, 34(11): 835–843.
- [5] 繆柳, 洪俊明, 林冰. 络合硫酸铜除藻剂应急治理水华对水质及鱼类的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(5): 63–66. [MIAO Liu, HONG Jun-ming, LIN Bing. Effects on Water Quality and Fishes of Copper Sulfate Complex Applied as Algaecide for Emergency Control of Algae Bloom [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(5): 63–66.]
- [6] 武志林, 王伟民, 李维新, 等. 水力空化联合臭氧氧化灭藻技术的实际应用[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(3): 500–506. [WU Zhi-lin, WANG Wei-min, LI Wei-xin, *et al.* Practical Application of Technology Combining Ozonation with Hydrodynamic Cavitation to Algae Removal from Water [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(3): 500–506.]
- [7] 熊永磊, 杨小丽, 宋海亮. 微纳米气泡在水处理中的应用及其发生装置研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(6): 23–27. [XIONG Yong-lei, YANG Xiao-li, SONG Hai-liang. Review on Application of micro-Nano Bubble in Water Treatment and Its Generator [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(6): 23–27.]
- [8] 叶建锋, 钟晓春, 宋召凤, 等. 微气泡气浮清除水体中暴发藻类的试验研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(5): 18–21, 26. [YE Jian-feng, ZHONG Xiao-chun, SONG Zhao-feng, *et al.* Experimental Study on Removal of Bloom Algae in Water by Microbubble Flotation [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(5): 18–21, 26.]
- [9] 王建, 胡淑恒, 卓胜君, 等. 微纳米气泡藻水分离试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(4): 20–23. [WANG Jian, HU Shu-heng, ZHUO Sheng-jun, *et al.* Experimental Investigation on Separating Algae from Water Using Micro-Nano Bubble Air Flotation Process [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(4): 20–23.]
- [10] 李亚男, 田立平, 王丰科, 等. 强化气浮除藻及其联用工艺研究进展[J]. *净水技术*, 2020, 39(10): 102–108. [LI Ya-nan, TIAN Li-ping, WANG Feng-ke, *et al.* Research Progress of Enhanced Dissolved Air Flotation and the Combined Processes for Algae Removal [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(10): 102–108.]
- [11] 林英姿, 张亮. PAC 与 PAC/PAM 对藻类的去除效果研究[J]. *辽宁化工*, 2014, 43(4): 365–368. [LIN Ying-zi, ZHANG Liang. Removal Effects of Algal Toxins by Using PAC Process and PAC/PAM Process [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2014, 43(4): 365–368.]
- [12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 722–723.
- [13] WU D Q, SUI Q, YU X, *et al.* Identification of Indicator PPCPS in Landfill Leachates and Livestock Wastewaters Using Multi-Residue Analysis of 70 PPCPS: Analytical Method Development and Application in Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 141653.
- [14] 王静超, 马军, 刘芳. 气浮接触区气泡-颗粒碰撞效率影响因素分析[J]. *工业水处理*, 2008, 28(9): 66–69. [WANG Jing-chao, MA Jun, LIU Fang. Influential Factor Analysis of the Bubble-Particle Collision Efficiency in the Contact Zone of Dissolved Air Flotation [J]. *Industrial Water Treatment*, 2008, 28(9): 66–69.]
- [15] 王振波, 陈阿强, 杨文三, 等. 溶气气浮分离乳化油的影响因素及其作用机制[J]. *水处理技术*, 2017, 43(4): 27–30. [WANG Zhen-bo, CHEN A-qiang, YANG Wen-san, *et al.* The Influence Factors and Mechanisms of Emulsified Oil Separation by Dissolved Air Flotation [J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(4): 27–30.]
- [16] 张义科, 陈阿强, 王振波. 气浮池接触区微气泡粒径及气含率分布实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(1): 73–78. [ZHANG Yi-ke, CHEN A-qiang, WANG Zhen-bo. The Experiment Research on the Distribution of Micro Bubble Size and Gas Content at the Contact Zone of Dissolved Air Flotation Tank [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(1): 73–78.]
- [17] 李国平, 戚菁, 兰华春. 水厂除藻技术的研究进展综述[J]. *净水技术*, 2018, 37(11): 32–39. [LI Guo-ping, QI Jing, LAN Hua-chun. Review on Research Progress of Algae Removal Technology in Water Treatment Plant [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(11): 32–39.]
- [18] 袁俊, 朱光灿, 吕锡武. 气浮除藻工艺的比较及影响因素[J]. *净水技术*, 2012, 31(6): 25–28, 76. [YUAN Jun, ZHU Guang-can, LÜ Xi-wu. Comparison and Influence Factors of Algae Removal with Air-Flotation Processes [J]. *Water Purification Technology*, 2012, 31(6): 25–28, 76.]
- [19] 柳怡, 赵梦颖, 邱凤仙. 聚合氯化铝的制备及处理污水的研究[J]. *化工时刊*, 2009, 23(11): 6–8. [LIU Yi, ZHAO Meng-ying, QIU Feng-xian. Preparation of Polyaluminum Chloride and the Treatment of Sewage Water [J]. *Chemical Industry Times*, 2009, 23(11): 6–8.]
- [20] 梁梓庆, 柯水洲, 袁辉洲, 等. 三种典型混凝剂处理带正电胶粒絮体性能的影响因素[J]. *环境工程*, 2018, 36(9): 36–40, 45. [LIANG Zi-qing, KE Shui-zhou, YUAN Hui-zhou, *et al.* Influencing Factors of Flocculation Properties of Three Typical Coagulants in Treating Positively Charged Particles [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(9): 36–40, 45.]
- [21] 贾伟建, 张克峰, 王永磊, 等. 混凝-气浮处理低浊高藻水库水的试验研究[J]. *山东建筑大学学报*, 2015, 30(1): 41–46. [JIA Wei-jian, ZHANG Ke-feng, WANG Yong-lei, *et al.* Study on the Treatment of Low Turbidity and High Algal Reservoir Water by Coagulation-Flotation Process [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2015, 30(1): 41–46.]
- [22] LI P, TAKAHASHI M, CHIBA K. Degradation of Phenol by the Collapse of Microbubbles [J]. *Chemosphere*, 2009, 75(10): 1371–1375.

作者简介: 谷原(1996—), 男, 吉林长春人, 主要研究方向为气浮水处理技术。E-mail: guyuan220@163.com

(责任编辑: 许 素)

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0559

韦茜佳, 周若昕, 李娜英, 等. 生活污泥-厨余-存量垃圾多元物料蚯蚓堆肥工艺及应用环境风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1354–1364.

WEI Qian-jia, ZHOU Ruo-xin, LI Na-ying, et al. Process Optimization and Environmental Risk Assessment of Vermicomposting Co-composted from Sludge, Kitchen Waste and Stored Waste[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1354–1364.

生活污泥-厨余-存量垃圾多元物料蚯蚓堆肥工艺及应用环境风险评估

韦茜佳^{1,2,3}, 周若昕^{1,2,3}, 李娜英^{1,2,3}, 李浩^{1,2,3}, 韩智勇^{1,2,3①} (1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 成都理工大学生态环境学院, 四川 成都 610059)

摘要: 在垃圾分类背景下, 污泥、厨余和存量垃圾资源化利用成为城市有机固体废物管理的重要环节。通过正交试验研究污泥-厨余-存量垃圾多元物料蚯蚓堆肥的最佳工艺, 并利用堆肥的植物生长试验和潜在生态风险模型评价堆肥肥效以及堆肥应用的环境风险。结果表明, 污泥、厨余垃圾和存量垃圾混合堆肥可以显著改善物料理化性质和蚯蚓生长状况, 但厨余垃圾的添加比例超过 50% 时会影响蚯蚓生长繁殖。多元物料蚯蚓堆肥最佳工艺组合如下: 污泥和厨余垃圾质量比为 7 : 3, 存量垃圾添加比例为 5%, 蚯蚓接种数量为 33 条 · kg⁻¹。蚯蚓堆肥及其混合土的 pH 值、种子发芽指数、有机质、总养分及重金属含量均满足 NY/T 525—2021《有机肥料》和 CJ/T 340—2016《绿化种植土壤》标准要求, 其施加比例为 20% 时, 黑麦草的生长状况最佳; 施加比例为 50% 时, 有机质、总氮、总磷和速效钾含量增量最大, 分别为 107.00 g · kg⁻¹、6.69 mg · g⁻¹、5.96 mg · g⁻¹ 和 0.42 mg · g⁻¹。施加比例从 0 增至 50%, 单一重金属潜在生态风险系数随之升高, 综合潜在生态风险系数从 17.42 升至 33.82, 环境风险程度均为轻微生态危害; Cu 是土壤中最主要的潜在风险重金属单体(潜在生态风险指数 $E_r = 17.69$), 以堆肥施加比例 20% 连续施用 30 季, 会使 Cu 的生态风险指数由 10.69 升至 35.04, 之后积累效应不明显($E_r = 35.09$)。由此可见, 污泥-厨余-存量垃圾多元物料蚯蚓堆肥可成为城市有机固体废物管理中安全、有效的资源化利用途径。

关键词: 蚯蚓堆肥; 污泥; 厨余; 存量垃圾; 风险评价

中图分类号: X799.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1354-11

Process Optimization and Environmental Risk Assessment of Vermicomposting Co-composted from Sludge, Kitchen Waste and Stored Waste. WEI Qian-jia^{1,2,3}, ZHOU Ruo-xin^{1,2,3}, LI Na-ying^{1,2,3}, LI Hao^{1,2,3}, HAN Zhi-yong^{1,2,3①} (1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint Remediation for Soil & Water Pollution, Chengdu 610059, China; 3. College of Environment and Ecology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The resource of sludge, kitchen waste and stock waste play an important role on the organic solid waste management in the city based on the waste classification. In this study, the process optimization and environmental risk assessment of vermicomposting co-composted from sludge, kitchen waste and stock waste (VCSKS) were studied by the orthogonal test, the plant growth experiment and potential ecological risk model. The results indicate that the VCSKS could significantly improve physical and chemical properties of composting and the growth of earthworms. However, the addition with more than 50% kitchen waste could restrain the growth and reproduction of earthworms. The best parameters of the VCSKS is 7 : 3 mass ratio of sludge and kitchen waste, 5% addition of stock waste and 33 pieces per kilogram earthworms inoculation rate. Both the quality of vermicomposting and its mixed soil met with both the requirements of the organic fertilizer and

收稿日期: 2021-09-13

基金项目: 四川省重大科技专项课题(2019YFS0509); 四川省科技计划项目(杰出青年科技人才)(2020JDJQ0053)

① 通信作者 E-mail: hanzhiyong13@cdut.edu.cn

the planting soil for greening. When the vermicomposting addition proportion was 20%, the growth of ryegrass was the best. When the vermicomposting addition proportion reached to 50%, the organic matter, total nitrogen, total phosphorus and available potassium were the largest, which increased to 107.00 g/kg, 6.69 mg/g, 5.96 mg/g and 0.42 mg/g, respectively. As the vermicomposting addition proportion increased from 0 to 50%, the potential ecological risk index of single heavy metal increased in soil, and the combined potential ecological risk factor increased from 17.42 to 33.82, with the environmental risk all to be at low ecological hazard level. Cu had the greatest potential ecological hazard ($Er=17.69$). With thirty times addition of vermicomposting at 20% proportion, of the fertilizer the ecological risk index of Cu could be increased from 10.69 to 35.04, and after then the accumulation effect would become non-obvious ($Er=35.09$). Therefore, vermicomposting co-composted from sludge, kitchen waste and stock waste will be a safe and effective route for the municipal organic solid waste management in cities.

Key words: vermicomposting; sludge; kitchen waste; stock waste; risk assessment

在垃圾分类大背景下,如何有效利用各种新型处理技术和工艺,加强对城市有机固体废物包括生活污水、生活垃圾、存量垃圾等的资源化利用,已受到广大科研人员关注。污泥作为城镇污水处理的终端副产物,N、P 含量丰富,含水率、有机质含量以及微生物活性均较高,年产量高达 6 000 万 t,且年均增速超过 10%^[1-2]。但由于污泥存在大量病原菌、难降解有机物及重金属等有毒有害物质而被禁止农用,目前主要的处置方式仍是填埋,因此如何实现污泥高效资源化利用面临着巨大挑战^[3-4]。截至 2019 年底,我国 45.59%的城市垃圾以卫生填埋的方式进行处理,其在今后很长一段时间仍将是我国城市垃圾的主要处置手段^[5-6],对老旧垃圾填埋场的整治、开采及填埋场中存量垃圾的处理处置也是目前城市固体废物亟需解决的问题。存量垃圾筛下物(类土物质)是填埋场开采的主要成分之一,其粒径较小、持水能力强、孔隙率高、容重低,不含高浓度、高风险的有毒物质,是一种极具价值的生物资源,但利用难度较高^[7-8]。同时,厨余垃圾作为城市生活垃圾的重要组成部分,年产量约为 9 000 万 t^[9],由于其具有高含水率、丰富的有机物以及易腐烂等特点,处理处置难度较高。

目前,国内外主要采用回收、填埋、堆肥和焚烧 4 种方式处理有机垃圾,4 种方式均有一定的优势,但存在的问题也不容忽视^[10-12]。好氧堆肥工艺成熟且产品肥效稳定,但降解环节耗能较高,占地面积大,肥料易导致土壤碱化^[13]。大量文献表明,蚯蚓堆肥是一种高效可行且具有良好经济效益的有机固废处理技术。也有研究指出,有机垃圾不宜单独堆肥,进行多元物料混合堆肥可弥补单一物料存在的缺陷^[14-16]。GARG 等^[17]利用污泥、牛粪、和沼气厂泥浆混合后进行蚯蚓堆肥,加速了堆肥腐熟,且堆肥产品矿化程度高、稳定性好。DAS 等^[18]研究了污泥、牛粪和土壤进行蚯蚓堆肥的可行性,结果

表明 3 种物料混合基质适宜蚯蚓生长,且富含植物营养元素。BHAT 等^[19]研究证明,牛粪与污泥进行混合堆肥,可消除有毒气体,有效提高蚯蚓存活率和生长状况。YADAV 等^[20]的研究结果同样证明,在控制好物料配比的前提下,多元物料混合可以显著提升蚯蚓堆肥过程中酶和微生物的活性。现有研究中,污泥常与畜禽粪便、植物废弃物组合进行蚯蚓堆肥,而污泥、厨余垃圾、存量垃圾 3 种物料混合蚯蚓堆肥鲜有研究报道,其堆肥产品的风险也尚不清楚。

综上,目前对于城市有机固体废物的资源化利用技术还有待探索,研究有效、经济、可行的有机固体废弃物处理方法,对于有机肥生产、能源回收利用都具有重要意义。污泥、存量垃圾和厨余垃圾分别是目前主要的城市有机固体废物,研究污泥-厨余-存量垃圾多元物料蚯蚓堆肥工艺及其应用效果和风险,可为城市有机固体废物管理提供更多安全、有效的资源化利用途径。

1 材料与方法

1.1 供试材料

污泥取自成都市某污水处理公司,试验前进行预堆肥,将含水率降至 70%左右。厨余垃圾取自某大学中央厨房,主要为菜皮、菜叶、菜头及果皮,堆肥前利用破碎机粉碎;存量垃圾取自成都市某垃圾填埋场,现场粗筛后过 0.35 mm 孔径筛,取筛下物(类土物质)备用。原料理化性质见表 1。

蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),取自成都市某污水处理公司。选用两侧开孔(孔径 5 mm)的长方形黑色透明塑料饲养箱(22.6 cm×15.1 cm×11.0 cm)作为蚯蚓堆肥反应器。蚯蚓堆肥产品风干后研磨过 2 mm 孔径筛备用;供试土壤取自某大学周边的农田土,风干后研磨过 2 mm 孔径筛。黑麦草(*Lolium perenne*)为美利达多年生品种,购于青

县盛辉农业技术推广中心。

1.2 试验方法

1.2.1 蚯蚓堆肥

研究采用正交试验,对污泥和厨余垃圾混合质量比(A)、存量垃圾添加比例(B)、蚯蚓接种数量(C)分别设置 4 个水平并进行堆肥试验(表 2)。堆

肥期间温度控制在(23±2)℃,含水率维持在 70%左右,堆肥周期为 45 d。试验期间每 15 d 取 1 次样,观察蚯蚓的生长状况,统计蚯蚓数量并称重记录。堆肥物料采用多点混合采样,样品用于测定物料的有机质含量及种子发芽指数。

表 1 堆肥原料理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of compost raw materials

供试材料	含水率 $w/\%$	pH 值	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	种子发芽 指数/%	$w/\%$			$w/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$			
					有机质	总氮	总磷	Cr	Cu	Ni	Zn
污泥	71.79	7.70	799	75.31	40.81	2.52	1.31	65.41	196.22	11.39	469.96
厨余垃圾	80.67	6.52	933	28.85	88.29	2.47	0.30	19.18	20.66	ND	70.82
存量垃圾	—	7.80	890	88.19	18.82	0.40	0.15	130.94	203.69	55.77	441.32

ND 为未检出;“—”表示无数据。

表 2 各处理对应的因素及水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal test experiment

处理	污泥质量与厨余 垃圾质量比 A	存量垃圾添加 比例 B/%	接种蚯蚓数量 C/ (条·kg ⁻¹)
A1B1C1	1 500 : 0	0	0
A1B2C2	1 500 : 0	5	25
A1B3C3	1 500 : 0	10	50
A1B4C4	1 500 : 0	20	75
A2B1C2	1 350 : 150	0	25
A2B2C1	1 350 : 150	5	0
A2B3C4	1 350 : 150	10	75
A2B4C3	1 350 : 150	20	50
A3B1C3	1 050 : 450	0	50
A3B2C4	1 050 : 450	5	75
A3B3C1	1 050 : 450	10	0
A3B4C2	1 050 : 450	20	25
A4B1C4	750 : 750	0	75
A4B2C3	750 : 750	5	50
A4B3C2	750 : 750	10	25
A4B4C1	750 : 750	20	0

1.2.2 蚯蚓堆肥的林业应用

盆栽实验采用直径 16.5 cm、高 10.5 cm 的花盆,每盆装 1 kg 土壤和最佳工艺所得堆肥产品的混合物,堆肥施加比例分别为 0、5%、10%、20%、30%、40%和 50%,每个比例设 1 个盆栽试验和 1 个平行试验,分别播撒 50 粒黑麦草种子。将盆栽置于冷光源植物生长箱中培养,定期浇水,使持水量保持在最大田间持水量的 70%。50 d 后收获黑麦草,测定其生长状况,并采集各盆栽土样测定土壤性质。

1.3 测定指标及方法

蚯蚓生长指标为蚯蚓日增重倍数(M_a),计算公式为

$$W_{\text{avg},t} = \frac{W_t}{n}, \quad (1)$$

$$M_a = \frac{W_{\text{avg},t} - W_{\text{avg}}}{t}。 \quad (2)$$

式(1)~(2)中, $W_{\text{avg},t}$ 为堆肥 t 天的蚯蚓平均体重,g; W_t 为堆肥 t 天的蚯蚓总重,g; n 为蚯蚓总条数,条; W_{avg} 为蚯蚓初始平均体重; t 为堆肥天数,d。

堆肥及土壤样品有机质含量参照 HJ 761—2015《固体废物有机质的测定 灼烧减量法》测定,总氮含量参照 HJ 717—2014《土壤质量 全氮的测定 凯氏法》测定,总磷含量参照 HJ 632—2011《土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法》测定,速效钾含量采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定;种子发芽指数参照 CJJ 52—2014《生活垃圾堆肥处理技术规范》中萝卜种子培养法测定。

植物收获后,用直尺测量得到株高和根长,杀青烘干后采用硝酸-高氯酸消解法进行消解;堆肥、土壤和植物样品重金属含量采用高压密闭消解-火焰光度法测定^[21]。

1.4 评价方法

1.4.1 综合评分法

采用综合评分法对正交试验堆肥结束时的蚯蚓日增重倍数、种子发芽指数(GI, I_G)及有机质降解率 3 个指标进行综合分析^[22-24],综合评分公式为

$$S = \frac{M_a}{M_{a,\text{max}}} + \frac{I_G}{I_{G,\text{max}}} + \frac{C}{C_{\text{max}}}。 \quad (3)$$

式(3)中, S 为综合得分; M_a 为蚯蚓日增重倍数; $M_{a,\text{max}}$ 为蚯蚓日增重最大倍数; I_G 为种子发芽指数; $I_{G,\text{max}}$ 为种子发芽指数最大值; C 为有机质降解率,%; C_{max} 为有机质最大降解率,%。

1.4.2 潜在生态风险评价

采用潜在生态风险指数法对土壤重金属进行生态风险评价^[25],其计算公式为

$$I_R = \sum E_r^i, \tag{4}$$
$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i, \tag{5}$$
$$C_f^i = C_i/C_n^i. \tag{6}$$

式(4)~(6)中, I_R 为综合潜在生态风险指数(RI); E_r^i 为单一重金属*i*的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属*i*的毒性响应系数,Zn、Cr、Cu、Ni、As 分别为 1、2、5、5、10^[26]; C_f^i 为重金属*i*的污染指数; C_i 为土壤中重金属*i*的含量实测值,mg·kg⁻¹; C_n^i 为某重金属土壤背景参考值,mg·kg⁻¹,采用四川省土壤背景值作为参考。

根据 E_r^i 和 I_R 值的不同,可将单因子潜在生态风险和综合潜在生态风险进行分级,分级标准如表 3 所示。

表 3 生态风险评价指数与分级标准
Table 3 Ecological risk index and grades

生态风险程度	单因子潜在生态风险指数 E_r^i	综合潜在生态风险指数 RI
轻微	<40	<150
中等	40~<80	150~<300
较重	80~<160	
重度	160~<320	300~<600
严重	≥320	≥600

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行试验数据处理和极差分析,采用 Origin 2018 绘图,采用 SPSS 25.0 对数据进行方差分析和显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 蚯蚓日增重倍数

蚯蚓日增重倍数如图 1 所示。A4 处理组的蚯蚓生长状况较差,除 A4B3C2 在前 15 d 的蚯蚓日增重倍数为正数外,其余 A4 处理组在 0~45 d 均为负

数。堆肥结束时,A4B1C4、A4B2C3 和 A4B3C2 的蚯蚓日增重倍数分别为 -5.35×10^{-3} 、 -4.02×10^{-3} 和 -1.13×10^{-3} ,表明添加 50% 厨余垃圾的 A4 处理组中蚯蚓生长状况较差,存活率较低。这是因为厨余垃圾含量过高,导致堆体的电导率及氨氮含量过高,堆体中氧含量下降,有机物质发生了厌氧降解,产生了甲烷、氨、乙酸等易导致蚯蚓死亡的气体^[27]。GARG 等^[28]研究表明,适宜蚯蚓堆肥的 pH 值为 7.5 左右,而 A4 处理组堆肥期间 pH 值在前 30 d 均低于 7,之后缓慢上升并稳定在 7.3 左右,偏低的 pH 值也可能是蚯蚓生长状况不良的原因之一。

A1 处理组的蚯蚓日增重倍数在前 30 d 达最大值,范围为 $8.80 \times 10^{-3} \sim 9.59 \times 10^{-3}$,随后降低;A2、A3 处理组的蚯蚓日增重倍数在前 15 d 达最大值,范围分别为 $9.10 \times 10^{-3} \sim 1.37 \times 10^{-2}$ 、 $1.20 \times 10^{-2} \sim 1.76 \times 10^{-2}$,随后降低,30 d 后又逐渐增加。这可能是由于堆肥物料中加入蚯蚓后,前期营养物质充足,蚯蚓适应环境后快速生长繁殖,体重明显增加,随着蚯蚓堆肥的进行,堆肥底物中的营养物质逐渐被消耗,蚯蚓的食物以及可利用的营养元素减少^[29],导致蚯蚓体重下降及部分死亡;A2 和 A3 之后又上升可能是因为一些不易被降解利用的营养物质经微生物降解后被蚯蚓吸收,从而促进了蚯蚓的生长。

除 A4 处理组外,C4 各处理日增重倍数均值(8.26×10^{-3})大于 C3 (8.23×10^{-3}) 和 C2 (6.76×10^{-3}),表明在堆肥前期,蚯蚓接种数量越多,蚯蚓日增重倍数越大。蚯蚓堆肥结束时,A2B3C4、A2B4C3、A3B1C3 和 A3B2C4 的蚯蚓日增重倍数分别为 9.06×10^{-3} 、 9.37×10^{-3} 、 9.72×10^{-3} 和 9.79×10^{-3} ,均大于 9×10^{-3} ,表明这几组处理更有利于蚯蚓生长。

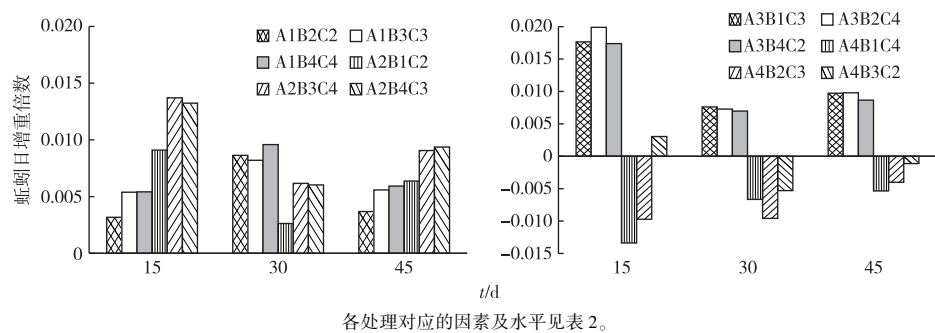


图 1 不同处理组蚯蚓日增重倍数变化
Fig. 1 Trend of earthworm's daily weight gain in different treatments

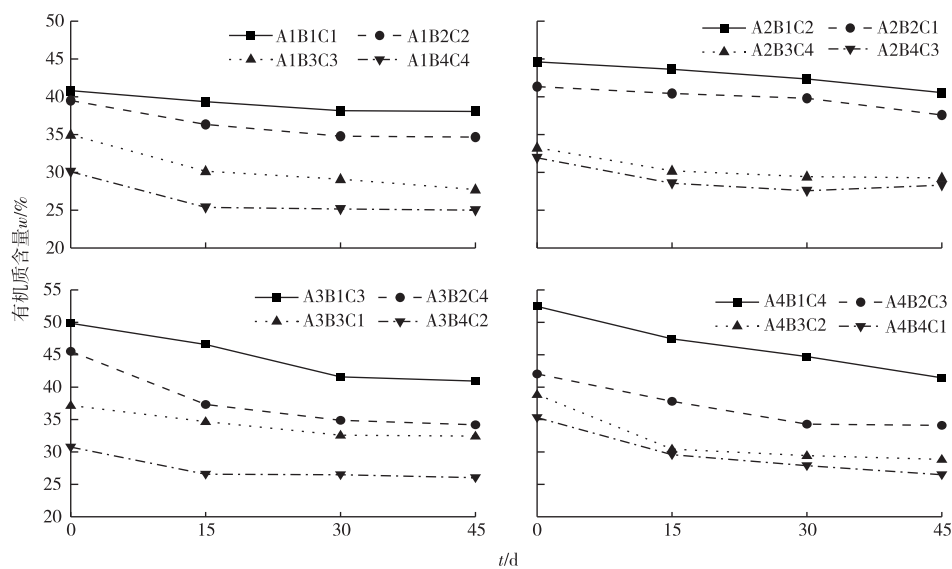
2.2 堆肥过程中理化指标变化

2.2.1 有机质

有机质含量变化如图 2 所示。整个堆肥过程中有机质含量均呈下降趋势,在堆肥后期下降较为缓慢并逐渐趋于稳定。在堆肥初期,初始物料中有机质含量最高的是 A4B1C4 (52.46%),最低的是 A1B4C4 (30.09%)。不同有机质含量物料的比例直接影响了堆肥物料有机质含量,物料有机质含量随厨余垃圾添加量的增加而增高,随存量垃圾添加量增加而降低。堆肥结束时,各处理有机质含量都有明显下降。其中 A3 (19.38%)、A4 (22.65%) 处理组的有机质平均降解速率明显高于 A1 (14.14%)、A2 (10.37%);未添加蚯蚓处理 C1 (13.38%) 的有

机质平均降解速率明显低于投加蚯蚓的 C2 (15.60%)、C3 (18.86%)、C4 (18.69%) 处理,说明向堆肥中投加蚯蚓能加速有机质的降解,且初始物料比例直接影响蚯蚓对有机物的降解速率^[30]。

有机质的降解主要发生在堆肥前期和中期,蚯蚓肠道能调节微生物的生物活性以及群落结构,加快微生物的生长及繁殖,强化微生物对有机物的降解作用^[31-32]。因此,一方面是由于蚯蚓和微生物迅速将污泥中的易降解有机物转化为自身生长所需的营养物质,另一方面是因为蚯蚓活动增大了物料的孔隙度以及物料和微生物的接触面积,提高了微生物对有机物的降解速率。



各处理对应的因素及水平见表 2。

图 2 不同处理组堆肥过程中有机质含量变化

Fig. 2 Trend of content of organic matter in different treatments

2.2.2 种子发芽指数

如图 3 所示,在初始堆肥物料中,各处理 GI 平均值表现为 A1>A2>A3>A4、B1>B2>B3>B4,表明随着厨余垃圾和存量垃圾的增加,种子发芽指数均有所下降,初始物料的 GI 值为 49%~75%,随着堆肥的进行,各处理 GI 值均有明显上升。

在堆肥前 15 d, A1、A2 处理 GI 值增长速率较慢,主要是因为堆肥初期有机质快速降解产生的有机酸使堆肥物料具有植物毒性^[33]。在 15~45 d,各处理 GI 值均有明显增长,这归因于有毒化合物(盐、重金属、有机酸等)的分解和转化^[34]。堆肥结束时,各处理 GI 值均达 80%以上,其中 A4B1C4 的 GI 值最低,为 86%;A3B2C4 的 GI 值最高,为 136%,说明堆肥产品不具备植物毒性,且基本达到腐

熟^[35]。A4 处理组初始及堆肥全过程的平均 GI 值 (96.83%) 均明显低于其他处理,这可能跟物料中厨余垃圾含量过高有关。在相同的厨余垃圾和污泥配比下,未加蚯蚓的 C1 处理组明显低于添加蚯蚓的处理组,说明添加蚯蚓能明显提高物料的种子发芽指数,减少植物毒性,可能是蚯蚓的活动协调了氨氮和硝酸盐氮含量,调节了堆体 pH 值^[36]。

2.3 堆肥工艺分析

2.3.1 最佳工艺筛选

由图 1、3 可知,未加蚯蚓的 C1 处理组有机质降解率均值最低,且污泥和厨余垃圾质量比为 1:1 的 A4 处理组蚯蚓日增重倍数为负数,故 C1 处理组、A4 处理组不参与蚯蚓堆肥最佳工艺优化。用综合评分法对试验进行极差分析和方差分析(表 4~5),

各因素对蚯蚓堆肥的影响次序依次为污泥和厨余垃圾配比(2.758)>蚯蚓接种比(2.433)>存量垃圾添加比(2.381), 蚯蚓堆肥最优工艺组合为 A3B2C3, 即污泥和厨余垃圾质量比为 7 : 3, 存量垃

圾添加比例为 5%, 蚯蚓接种数量为 33 条 · kg⁻¹。污泥和厨余垃圾配比会显著影响蚯蚓堆肥效果, 存量垃圾添加比和蚯蚓接种量对蚯蚓堆肥无显著影响。

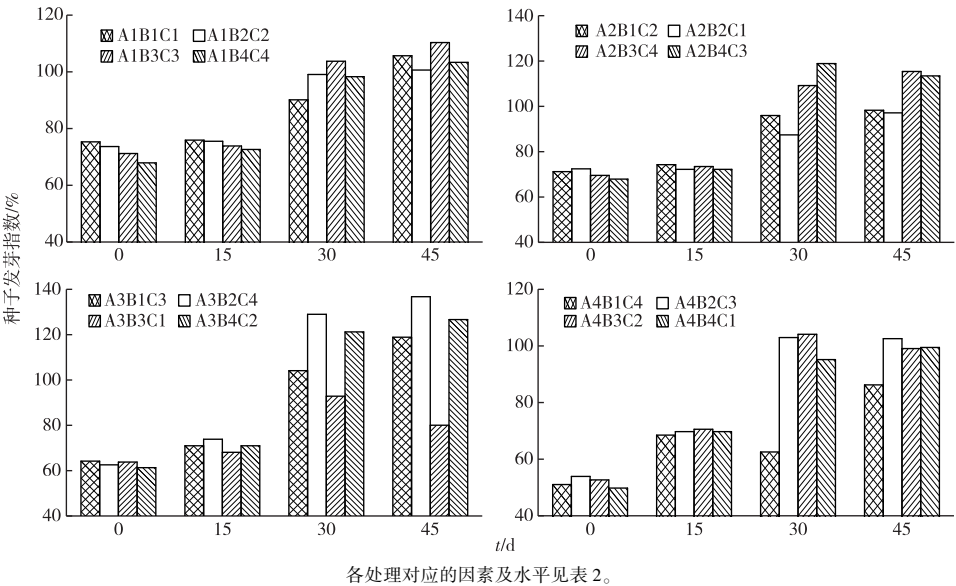


图 3 不同处理组堆肥过程中种子发芽指数变化
Fig. 3 Trend of GI value in different treatments

表 4 正交试验极差分析结果
Table 4 Range analysis of orthogonal test

处理	污泥与厨余垃圾 质量比 A	存量垃圾添加 比例 B / %	蚯蚓接种数量 C / (条 · kg ⁻¹)	日增重倍数	种子发芽 指数	有机质 降解率	综合 评分
A1B2C2	1 500 : 0	75	25	0.536	0.736	0.491	1.763
A1B3C3	1 500 : 0	150	50	0.570	0.807	0.831	2.209
A1B4C4	1 500 : 0	300	75	0.606	0.756	0.678	2.039
A2B1C2	1 350 : 150	0	25	0.651	0.719	0.366	1.735
A2B3C4	1 350 : 150	150	75	0.925	0.844	0.481	2.250
A2B4C3	1 350 : 150	300	50	0.957	0.830	0.455	2.241
A3B1C3	1 050 : 450	0	50	0.993	0.869	0.985	2.848
A3B2C4	1 050 : 450	75	75	1.000	1.000	1.000	3.000
A3B4C2	1 050 : 450	300	25	0.885	0.926	0.616	2.427
T ₁	6.011	4.583					
T ₂	6.227	4.763	5.925				
T ₃	8.275	4.459	7.298				
T ₄		6.707	7.290				
X ₁	2.004	2.292					
X ₂	2.076	2.381	1.975				
X ₃	2.758	2.229	2.433				
X ₄		2.236	2.430				
R	0.754	0.152	0.458				
最优方案	A3	B2	C3				

T₁~T₄ 为因素 A、B、C 的第 1~4 水平对应的综合评分之和; X₁~X₄ 为因素 A、B、C 的第 1~4 水平对应的综合评分均值; R 为 X₁~X₄ 的极差。

2.3.2 最佳工艺验证

根据上述得到的最佳工艺进行蚯蚓堆肥, 45 d 后测定蚯蚓日增重倍数、种子发芽指数及堆肥前后

的有机质降解率, 结果如表 6 所示, 最佳工艺 A3B2C3 的蚯蚓日增重倍数、有机质降解率及种子发芽指数均高于正交试验中效果最好的 A3B2C4。

表 5 试验数据方差分析结果

Table 5 Verification of ANOVA of experimental data

方差来源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F 值	P 值
污泥与厨余垃圾比 A	0.873	2.000	0.437	207.346	0.049
存量垃圾添加比例 B	0.036	3.000	0.012	5.762	0.295
蚯蚓接种数量 C	0.323	2.000	0.161	76.602	0.081
误差	0.002	1.000	0.002		
总计	48.375				

表 6 蚯蚓堆肥最佳工艺效果验证

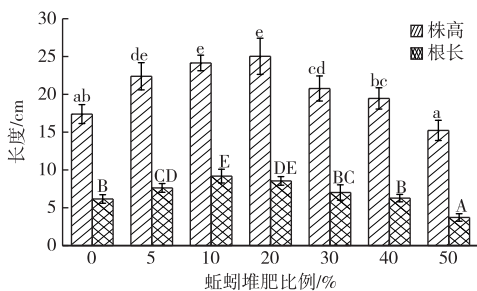
Table 6 Verification of the best vermicomposting process

处理	蚯蚓日增重倍数	有机质降解率/%	种子发芽指数/%
A3B2C3	1.02×10^{-2}	27.01	139.47
A3B2C3 平行	0.99×10^{-2}	28.47	138.31
A3B2C4	0.98×10^{-2}	24.90	136.75

2.4 蚯蚓堆肥对黑麦草生长的影响

2.4.1 黑麦草株高和根长

黑麦草收获后其生长形态、株高及根长如图 4 所示。



小写字母不同表示处理间株高差异显著 ($P < 0.05$) ;
大写字母不同表示处理间根长差异显著 ($P < 0.05$) 。

图 4 不同堆肥施加比例对黑麦草生长的影响
Fig. 4 Effects of the proportion of addition of vermicomposting on the ryegrass growth

与对照组相比,施加比例为 5%~40%堆肥产品处理黑麦草株高显著增加,增幅为 11%~39%,施加比例为 50%处理株高降低 12%,说明适当施用蚯蚓堆肥能促进黑麦草的生长,但施用过多则会抑制生长,这与 JOSHI 等^[37]的研究一致。根长变化情况和株高类似,与对照组相比,施加比例为 10%和 20%处理根长最长,分别增加 49%和 39%,施加比例为 50%处理根长则降低 40%,这是因为土壤中添加过多的蚯蚓堆肥导致营养物质和重金属含量过高,从而影响了黑麦草的正常生长。有研究表明,施用蚯蚓堆肥可提高土壤有机质、氮、磷含量,促进植物根系的发育和活性,并促进植物对水分和养分的吸

收^[38-39]。此外,蚯蚓堆肥还具有类似激素的作用,可促进根的生长,增加根长及根生物量,促进植物生长发育^[40]。

2.4.2 黑麦草重金属含量

如表 7 所示,随着蚯蚓堆肥施加比例的增加,黑麦草茎叶 Cr、Cu、Zn、Ni、As 含量均呈上升趋势,Cr、Cu、Zn、Ni、As 含量分别由 0.27、1.84、9.23、0.50、0.020 mg·kg⁻¹ 上升至 0.50、3.51、14.39、0.81、0.038 mg·kg⁻¹。其中,Zn 含量最高,As 含量最低,可能是由于栽培用土中 Zn 的土壤背景值(86.5 mg·kg⁻¹)较高,作为堆肥原料的污泥中 Zn 含量也最高,不稳定态占比较大(30%~65%)^[41],导致其更易被植物吸收利用。

表 7 黑麦草茎叶重金属含量

Table 7 Heavy metal content of ryegrass stems and leaves

施加比例/ %	w/(mg·kg ⁻¹)				
	Cr	Cu	Zn	Ni	As
0	0.27	1.84	9.23	0.50	0.020
5	0.33	2.14	9.58	0.51	0.024
10	0.32	2.49	10.59	0.61	0.026
20	0.36	2.89	12.77	0.72	0.031
30	0.42	3.03	14.25	0.77	0.034
40	0.41	3.34	13.45	0.72	0.033
50	0.50	3.51	14.39	0.81	0.038

2.5 蚯蚓堆肥对土壤的影响

2.5.1 蚯蚓堆肥及土壤特性

由表 8 可知,污泥-厨余-存量垃圾多元物料蚯蚓堆肥的 pH 值、种子发芽指数、有机质、总养分及重金属含量符合 GB/T 23486—2009《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》相关要求,施加 10%堆肥的土壤各项指标符合 CJ/T 340—2016《绿化种植土壤》中Ⅱ级标准,说明蚯蚓堆肥可用于园林绿化,提高土壤肥效。同时,尽管污泥被禁止作为农用有机肥的原料,但其部分指标仍满足 NY/T 525—2021《有机肥料》要求。

2.5.2 土壤有机质及营养物质含量

施加蚯蚓堆肥能明显提高土壤有机质含量,随着施加比例的增加,有机质含量也相应提高。添加 5%、10%、20%、30%、40%、50%蚯蚓堆肥处理土壤有机质含量分别增加 1.07%、2.34%、4.34%、7.11%、8.56%、10.70%,相比对照组提高 0.17~1.72 倍。黑麦草收获后,土壤的有机质含量相比种植前均有所下降,各处理的有机质含量分别下降 3.16%、4.68%、4.83%、4.39%、4.48%、4.73%、2.85%,其中对照组有机质含量降幅最低(图 5)。

土壤中施加蚯蚓堆肥后,总氮、总磷以及速效钾含量均随施加比例的增加有不同程度升高(图 5)。施加比例为 50%处理总氮、总磷和速效钾含量增幅最大,分别达 6.69、5.96 和 0.42 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。收获黑麦草后,各处理的土壤总氮、总磷及速效钾含

量均有所降低,总氮含量降幅为 5.48%~25.92%,总磷含量降幅为 2.29%~13.00%,速效钾含量降幅为 1.93%~9.65%。其中,施加比例为 20%处理总氮、总磷和速效钾含量降幅最为明显。

表 8 蚯蚓堆肥指标与肥料施用标准的比较

Table 8 Comparison of vermicompost and the state standard for application of fertilizers

处理	pH 值	种子发芽 指数/%	有机质 含量/%	总养分 含量/%	$w/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$							
					Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	Pb	As	Hg
土壤	8.76	84.0	6.22	0.22	ND	74.29	50.10	91.40	7.43	ND	5.50	ND
10%堆肥混合土	8.20	92.0	8.56	0.45	ND	77.28	66.50	129.40	10.06	ND	5.97	ND
蚯蚓堆肥	7.53	106.2	33.46	5.34	ND	99.21	218.25	549.60	41.17	ND	6.65	ND
GB/T 23486—2009	5.5~7.8	>70	≥25	≥3.00	<20	<1 000	<1 500	<4 000	<200	<1 000	<75	<15
NY/T 525—2021	5.5~8.5	≥70	≥30	≥4.00	≤3	≤150				≤50	≤15	≤2
CJ/T 340—2016	5.0~8.3		1.2~8.0		≤0.8	≤200	≤300	≤350	≤80	≤300	≤30	≤1.2

ND 表示未检出。

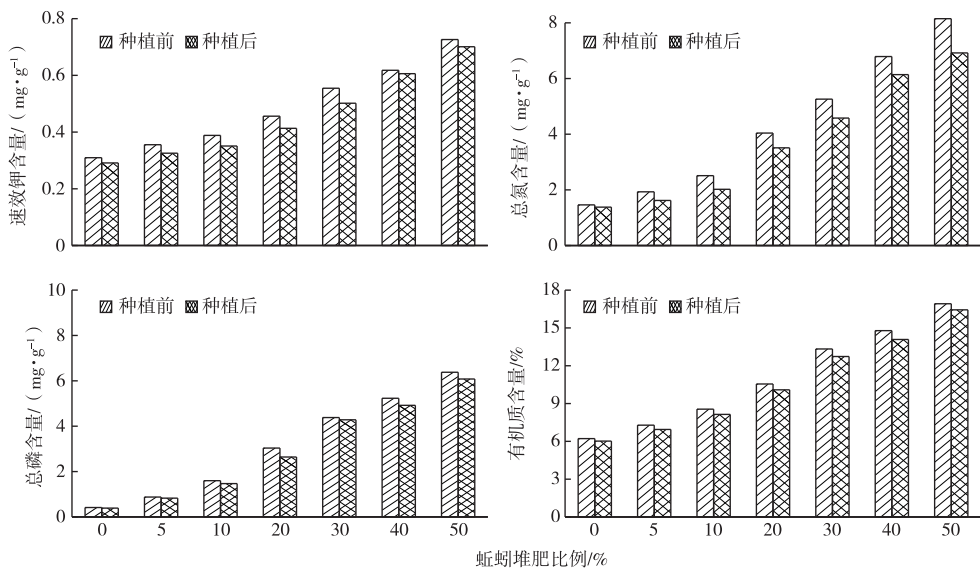


图 5 黑麦草种植前后土壤养分含量的变化

Fig. 5 Change of content of soil nutrient elements before and after ryegrass planting

2.5.3 土壤重金属含量

随着蚯蚓堆肥施加比例的增加,Cr、Cu、Zn、Ni、As 含量均明显增加。5 种重金属中,含量最高的是 Zn,其次是 Cr 和 Cu(表 9)。黑麦草收获后,与种植前相比,各处理土壤重金属含量均有所下降,且各处理土壤重金属含量随蚯蚓堆肥施加比例的增加而上升的趋势不变。

2.6 潜在生态风险评价

如表 10 所示,各处理各重金属潜在生态风险指数 E_r 均小于 40,综合潜在生态风险指数 RI 均小于 150,风险程度均为轻微生态危害。5 种重金属中,Cu 对土壤环境的潜在生态风险最大($E_r = 17.69$),

其次是 As($E_r = 6.45$),Cr、Zn、Ni 的潜在生态风险指数较低, E_r 为 1.06~4.18。随蚯蚓堆肥施加比例的增加,潜在生态风险指数均有所升高,单一重金属潜在生态风险指数和综合潜在生态风险指数最高的均是施加 50%蚯蚓堆肥的处理,与未施加蚯蚓堆肥的土壤相比,Cr、Cu、Zn、Ni、As 的潜在生态风险指数分别上升 16.58%、119.58%、213.23%、265.50%、21.97%,综合潜在生态风险指数上升 94.10%。

蚯蚓堆肥施用次数的增加会导致重金属潜在生态风险上升,但由于堆肥本身重金属含量相对较低,其 Cu 潜在生态风险指数最大值为 35.09,蚯蚓

堆肥施加比例为 20% 时, Cu 对土壤环境的生态风险前期随着施加次数增加迅速升高, 累计施加 30 次后趋于稳定 ($E_r=35.04$), 此后生态风险将不再随施用次数增加产生明显变化, 并最终维持在轻微水平

($E_r=35.09$); 当施加比例为 10% 时, 风险程度也均为轻微生态危害。鉴于黑麦草的生长状况在施加比例为 10% 和 20% 时无显著差异 (图 4), 实际应用以蚯蚓堆肥施加比例 10% 为宜。

表 9 种植黑麦草前后土壤重金属含量

Table 9 Heavy metal contents in the soil before and after ryegrass planting

重金属	种植前后	不同施加比例处理的重金属含量/(mg·kg ⁻¹)						
		0	5%	10%	20%	30%	40%	50%
Cr	前	74.29	76.49	77.28	78.06	79.98	83.11	86.61
	后	70.28	72.12	72.89	73.17	74.93	76.34	79.60
Cu	前	50.10	56.82	66.50	78.06	86.84	94.05	110.02
	后	49.16	52.88	59.47	76.92	83.99	100.00	113.86
Zn	前	91.40	105.11	129.40	171.94	208.41	241.69	286.28
	后	85.34	100.48	119.53	146.83	175.32	208.49	235.82
Ni	前	7.43	8.96	10.06	15.81	18.74	22.97	27.15
	后	7.37	8.17	9.61	12.02	14.33	19.00	23.27
As	前	5.50	5.52	5.97	6.16	6.37	6.44	6.71
	后	4.89	5.02	5.35	5.57	5.67	5.86	6.04

表 10 施加不同比例蚯蚓堆肥的土壤重金属潜在生态风险指数 (E_r) 评价结果

Table 10 Results of potential ecological risk assessment on soil heavy metals in treatments with different addition proportion of vermicompost

重金属	毒性响应系数 T_r	土壤背景值 C_n /(mg·kg ⁻¹)	不同施加比例处理的 E_r						
			0	5%	10%	20%	30%	40%	50%
Cr	2	79.00	1.88	1.94	1.96	1.98	2.02	2.10	2.19
Cu	5	31.10	8.06	9.13	10.69	12.55	13.96	15.12	17.69
Zn	1	86.50	1.06	1.22	1.50	1.99	2.41	2.79	3.31
Ni	5	32.60	1.14	1.38	1.55	2.43	2.88	3.53	4.18
As	10	10.40	5.29	5.46	5.74	5.93	6.13	6.20	6.45
RI			17.42	19.12	21.43	24.87	27.41	29.75	33.82

3 结论

(1) 污泥中添加厨余垃圾和存量垃圾能够有效改善物料的理化性质, 提高其肥料价值, 并促进蚯蚓生长。蚯蚓堆肥能够加速有机质的降解速率, 提高种子发芽指数, 加速堆肥的腐熟。

(2) 污泥和厨余垃圾配比会显著影响多元物料蚯蚓堆肥效果, 堆肥最佳工艺组合如下: 污泥和厨余垃圾质量比为 7 : 3, 存量垃圾添加比例为 5%, 蚯蚓接种数量为 33 条·kg⁻¹。

(3) 污泥-厨余-存量垃圾多元物料蚯蚓堆肥各指标满足 GB/T 23486—2009 和 NY/T 525—2021 标准的相关要求, 施加 10% 堆肥的混合土壤各项指标符合 CJ/T 340—2016 中 II 级标准。

(4) 施用蚯蚓堆肥能有效提高土壤有机质、总磷、总氮和速效钾含量, 施加比例为 20% 时黑麦草生长状况最佳, 但施加比例大于 40% 时会对植物生

长起抑制作用。

(5) 土壤和黑麦草中重金属含量均随蚯蚓堆肥施加比例的上升而明显增加, 其潜在生态风险均为轻微水平, 堆肥按 20% 比例多季施用, 不会使生态风险超过轻微水平; 综合肥效和生态风险, 堆肥施加比例宜设定为 10%。

参考文献:

[1] 郭思晓.城市污水处理厂污泥资源化利用途径探讨[J].资源节约与环保,2021(1):90-91.

[2] 杨金康,朱利楠,杨秋云,等.硅钙镁肥和改性腐殖酸对土壤镉形态和小麦镉积累的影响[J].生态与农村环境学报,2021,37(6):808-816.[YANG Jin-kang,ZHU Li-nan,YANG Qiu-yun,et al.Effects of Silicon-Calcium-Magnesium Fertilizer and Modified Humic Acid on Soil Cadmium Chemical Fractions and Accumulation in Wheat[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2021,37(6):808-816.]

[3] 孙杰.城市污泥的特性及资源化利用技术分析[J].江西建材,2021(8):232-233.

- [4] 王宗华,张唯佳,任慧莹,等.污水处理厂污泥制备园林用土壤改良剂进行资源化利用[J].发明与创新(职业教育),2021(4):126-127.
- [5] 住房和城乡建设部.中国城乡建设统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.
- [6] KAARTINEN T, SORMUNEN K, RINTALA J. Case Study on Sampling, Processing and Characterization of Landfilled Municipal Solid Waste in the View of Landfill Mining[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 55: 56-66.
- [7] SOMANI M, DATTA M, RAMANA G V, *et al.* Leachate Characteristics of Aged Soil-Like Material from MSW Dumps: Sustainability of Landfill Mining [J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2019, 23(4): 04019014.
- [8] 汤云榕,赵庆良,王维业,等.高含固厨余垃圾垂直流厌氧处理系统的构建与启动[J].环境科学学报,2020,40(10):3629-3638. [TANG Yun-rong, ZHAO Qing-liang, WANG Wei-ye, *et al.* Construction and Start-up of a Vertical-Flow Anaerobic Treatment System for High-Solid Kitchen Waste [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10): 3629-3638.]
- [9] 曾文俊,李冰峰,李惠斌,等.埋地式沼气工程资源化利用农村有机垃圾技术模式探析[J].中国沼气,2020,38(6):74-78. [ZENG Wen-jun, LI Bing-feng, LI Hui-bin, *et al.* Analysis on the Technical Model of Utilizing Rural Organic Waste by Using Buried Biogas Project [J]. China Biogas, 2020, 38(6): 74-78.]
- [10] 戴晓虎,张辰,章林伟,等.碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J].给水排水,2021,57(3):1-5. [DAI Xiao-hu, ZHANG Chen, ZHANG Lin-wei, *et al.* Thoughts on the Development Direction of Sludge Treatment and Resource Recovery under the Background of Carbon Neutrality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(3): 1-5.]
- [11] 闵超,安达,王月,等.我国农村固体废弃物资源化研究进展[J].农业资源与环境学报,2020,37(2):151-160. [MIN Chao, AN Da, WANG Yue, *et al.* Progress of Rural Solid Waste Resource Utilization in China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(2): 151-160.]
- [12] 李龙涛,李万明,孙继民,等.城乡有机废弃物资源化利用现状及展望[J].农业资源与环境学报,2019,36(3):264-271. [LI Long-tao, LI Wan-ming, SUN Ji-min, *et al.* Research Status and Prospects of the Resource Utilization of Organic Waste in Urban and Rural Areas [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(3): 264-271.]
- [13] FERNÁNDEZ-GÓMEZ M J, ROMERO E, NOGALES R. Feasibility of Vermicomposting for Vegetable Greenhouse Waste Recycling [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(24): 9654-9660.
- [14] SONG C H, LI M X, JIA X, *et al.* Comparison of Bacterial Community Structure and Dynamics during the Thermophilic Composting of Different Types of Solid Wastes: Anaerobic Digestion Residue, Pig Manure and Chicken Manure [J]. Microbial Biotechnology, 2014, 7(5): 424-433.
- [15] 姜蒙.厨余垃圾沼渣特性及资源化利用[J].能源与节能,2021(5):74-77. [JIANG Meng. Characteristics and Resource Utilization of Food Waste Biogas Residues [J]. Energy and Energy Conservation, 2021(5): 74-77.]
- [16] FU X Y, CUI G Y, HUANG K, *et al.* Earthworms Facilitate the Stabilization of Pelletized Dewatered Sludge through Shaping Microbial Biomass and Activity and Community [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(5): 4522-4530.
- [17] GARG V K, SUTHAR S, YADAV A. Management of Food Industry Waste Employing Vermicomposting Technology [J]. Bioresource Technology, 2012, 126: 437-443.
- [18] DAS V, SATYANARAYAN S. Value Added Product Recovery from Sludge Generated during Gum Arabic Refining Process by Vermicomposting [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(9): 523.
- [19] BHAT S A, SINGH J, VIG A P. Vermiremediation of Dyeing Sludge from Textile Mill with the Help of Exotic Earthworm *Eisenia Fetida* Savigny [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(9): 5975-5982.
- [20] YADAV A, SUTHAR S, GARG V K. Dynamics of Microbiological Parameters, Enzymatic Activities and Worm Biomass Production during Vermicomposting of Effluent Treatment Plant Sludge of Bakery Industry [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(19): 14702-14709.
- [21] 李红叶,梁祖顺,许海娥,等.高压密闭消解 ICP-AES 法测土壤中的 10 种重金属元素 [J]. 中国新技术新产品, 2018(6): 141-142.
- [22] 钱宏兵,于倩倩.鸡粪生产商品有机肥腐熟度评价指标研究 [J]. 现代农业科技, 2015(23): 228-229, 231. [QIAN Hong-bing, YU Qian-qian. Research on Rotten Maturity Degree Evaluation Index of Commercial Organic Fertilizer Produced by Chicken Manure [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(23): 228-229, 231.]
- [23] 张淑娟,孟小春,旭兰.城市污泥与餐厨垃圾好氧堆肥腐熟度快速评价指标研究 [J]. 现代农业, 2014(4): 204-206.
- [24] 李红霞,蔡禄,季祥,等.羊粪好氧堆肥最佳工艺参数的优化研究 [J]. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 215-220. [LI Hong-xia, CAI Lu, JI Xiang, *et al.* Optimization of Optimum Process Parameters for Aerobic Composting of Sheep Manure [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(6): 215-220.]
- [25] HAKANSON L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: a Sedimentological Approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [26] WANG S C, SHI R, LI H, *et al.* Effect of Terminal Temperature on the Morphology and Potentially Toxic Metals Concentrations of Biochars Derived from Paper and Kitchen Waste [J]. Waste Management, 2020, 118: 445-451.
- [27] 孟志国,徐晓晨,靳文尧,等.农业固体有机废物综合治理与资源化 [J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(5): 62-65. [MENG Zhi-guo, XU Xiao-chen, JIN Wen-yao, *et al.* Comprehensive Treatment and Resource Utilization of Agricultural Solid Organic Waste [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(5): 62-65.]
- [28] GARG V K, GUPTA R. Optimization of Cow Dung Spiked Pre-Consumer Processing Vegetable Waste for Vermicomposting Using *Eisenia Fetida* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, 74

- (1):19-24.
- [29] GUPTA R, GARG V K. Stabilization of Primary Sewage Sludge during Vermicomposting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(3):1023-1030.
- [30] SUTHAR S. Vermistabilization of Municipal Sewage Sludge Amended with Sugarcane Trash Using Epigeic *Eisenia fetida* (Oligochaeta) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(1):199-206.
- [31] 郭一令, 孟斌, 王森, 等. 蚯蚓生物滤池对小城镇污泥处理效果 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(2):729-734. [GUO Yi-ling, MENG Bin, WANG Sen, *et al.* Treatment Efficiency of Small Town Sludge by Earthworm Biofilters [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(2):729-734.]
- [32] SONOWAL P, KHWAIRAKPAM M, KALAMDHAD A S. Stability Analysis of Dewatered Sludge of Pulp and Paper Mill during Vermicomposting [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2014, 5(1):19-26.
- [33] BHAT S A, SINGH J, VIG A P. Potential Utilization of Bagasse as Feed Material for Earthworm *Eisenia fetida* and Production of Vermicompost [J]. *Springer Plus*, 2015, 4:11.
- [34] JIANG T, MA X G, YANG J, *et al.* Effect of Different Struvite Crystallization Methods on Gaseous Emission and the Comprehensive Comparison during the Composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217:219-226.
- [35] 黄光群, 黄晶, 张阳, 等. 沼渣好氧堆肥种子发芽指数快速预测可行性分析 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5):177-182. [HUANG Guang-qun, HUANG Jing, ZHANG Yang, *et al.* Feasibility Analysis of Rapid Prediction of Seed Germination Index during Digestate Aerobic Composting [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):177-182.]
- [36] 刘忠华, 赵帅翔, 刘会芳, 等. 条垛堆肥-蚯蚓堆肥联合处理对堆肥产品性状的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019(4):200-207. [LIU Zhong-hua, ZHAO Shuai-xiang, LIU Hui-fang, *et al.* The Effect of Combined Pre-Composting and Vermicomposting of Dairy Manure on Properties of Compost Products [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(4):200-207.]
- [37] JOSHI R, SINGH J, VIG A P. Vermicompost as an Effective Organic Fertilizer and Biocontrol Agent: Effect on Growth, Yield and Quality of Plants [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2015, 14(1):137-159.
- [38] SOOBHANY N, MOHEE R, GARG V K. A Comparative Analysis of Composts and Vermicomposts Derived from Municipal Solid Waste for the Growth and Yield of Green Bean (*Phaseolus vulgaris*) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(12):11228-11239.
- [39] 赵娜娜, 潘潇涵, 陈清, 等. 蚯蚓粪和活性污泥浸提液对马铃薯致病菌的抑制作用 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12):230-236. [ZHAO Na-na, PAN Xiao-han, CHEN Qing, *et al.* Inhibition Effects of Vermicomposting Products and Activated Sludge Extraction on Strains of Pathogenic Bacteria of Potato [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12):230-236.]
- [40] 殷庆霏, 郭建斌, 倪肖卫, 等. 不同堆肥对南方屋顶绿化植物生长特性的影响 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(11):6205-6213. [YIN Qing-fei, GUO Jian-bin, NI Xiao-wei, *et al.* Effects of Different Composts on Growth Characteristics of Green Roof Plants in South China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(11):6205-6213.]
- [41] 陈宣, 孙长顺, 王丽香, 等. 陕西省典型城市污泥养分与重金属含量调查 [J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(3):364-370, 399. [CHEN Xuan, SUN Chang-shun, WANG Li-xiang, *et al.* Major Nutrients and Heavy Metals of Municipal Sludge in Shaanxi Province [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(3):364-370, 399.]

作者简介: 韦茜佳(1997—), 女(壮族), 广西柳州人, 主要从事固体废物处理处置与二次污染防治研究。E-mail: 1361226394@qq.com

(责任编辑: 许素)

Contents

Experience and Optimisation of the Traditional Industrial Development and Transformation in Protected Areas:

A Case Study of Tea Industries in Wuyishan National Park WANG Bo-jie, HE Si-yuan, MIN Qing-wen (1229)

Research on the Influencing Factors of Coupling Development of the Fuzhou Jasmine Tea Culture System and the

Tourism Industry LAI Ge-ying, DENG Ming-ming, MA Yun-meng, LAI Yi-tian (1239)

The Transition of the Food System for A Nature-positive World: A GIAHS-based Solution

..... HE Si-yuan, JIAO Wen-jun, MIN Qing-wen (1249)

Diversity of Resource Plants and Associated Traditional Knowledge in the Honghe Hani Terraced Ecosystem of

Yunnan ZHANG Qing, CHENG Zhuo, LIU Bo, YANG Jun, LI Jian-qin,

ZHANG Hong-zhen, ZHANG Xin-bo, MA Li-juan, LONG Chun-lin (1258)

Application of MaxEnt and Remote Sensing Technology in Grassland Locust Disaster Risk Monitoring:

An Example from the Agricultural Heritage Systems of East Ujimqin Banner

..... SUN Zhong-xiang, HU Ze-xue, YE Hui-chun, HUANG Wen-jiang, Erden Qimuge, ZHANG Ying (1265)

Study on Driving Factors of Pollution and Carbon Reduction in the Yangtze River Delta Urban Agglomerations

..... MA Wei-bo, ZHAO Li-jun, WANG Nan, ZHANG Long-jiang, LI Hai-dong (1273)

Study on the Carbon Saving Value of Urban Greenspace Patches in the Main Cities of Yangtze River Delta Based

on the Cooling Effect ... QIU Kuan-biao, DU Han-bei, ZHANG Long-jiang, ZHANG Wei-dong, LI Hai-dong (1282)

Study on Carbon Storage Change and Optimization of Land Use in Jiangyin City

..... ZHAO Yi-xing, GAO Run-yi, LI Hai-dong, CHUAI Xiao-wei, GUO Xiao-min (1290)

Research on Ecological Construction Model of Villages and Townships in the Important Area of

Water Conservation and Biodiversity Conservation in Daloushan Mountains

..... CHEN Yan, WANG Nan, ZHAO Li-jun, FENG Yang, LI Hai-dong (1299)

Analysis of the Spatial-temporal Evolution and Driving Factors of Rural Residential Areas in Metropolitan Fringe:

A Case Study of Tianjin LI Xue-mei, LIU Qian (1309)

LUCC Spatial Simulation of Urban Agglomeration in Central Yunnan

..... LI Xing, ZHOU Jing-chun, JIN Ting-ting, WANG Jin-liang (1318)

Effects of Non-cultivated Patch on Landscape Heterogeneity of Cultivated Land System in Changtu County,

Liaoning Province BIAN Zhen-xing, GUAN Ming-hao, TONG Hao-xuan,

YANG Yu-jing, CHU Zhuo-ming, YU Miao (1330)

Characteristics of Dynamic Changes of Soil Microbial Biomass on Fallowed Farmland of Different Years in

Minqin Oasis WANG Li-de, HE Hong-sheng, HAN Fu-gui, CHEN Si-hang,

SONG Da-cheng, WANG Zi-xuan, YAN Pei-ying (1338)

High-efficiency Treatment of Eutrophic Surface Water by Flocculation-microbubble Air Flotation

..... GU Yuan, GUO Shi-yu, ZHAO Wen-tao, WAN Yong, SUI Qian (1347)

Process Optimization and Environmental Risk Assessment of Vermicomposting Co-composted from Sludge,

Kitchen Waste and Stored Waste WEI Qian-jia, ZHOU Ruo-xin, LI Na-ying, LI Hao, HAN Zhi-yong (1354)

编辑委员会

主任委员

赵克强

副主任委员

刘鸿亮 李文华 蒋有绪 刘国才 徐海根

主 编

蔡道基

副主编

吴孔明 吴丰昌 张福锁 高吉喜

执行副主编

唐晓燕

编 委 (按姓氏音序排列)

蔡祖聪 常志州 陈利顶 陈同斌 党 志 邓良伟 董世魁 冯玉龙 高士祥 胡正义 贾仲君
蒋明康 李德波 李迪强 李建龙 李培军 李维新 李 周 林玉锁 刘红玉 刘 燕 龙 涛
卢宝荣 吕家珑 骆世明 马克平 闵庆文 潘根兴 彭少麟 濮励杰 仇荣亮 单正军 沈渭寿
施卫明 石利利 石毓岷 (美国) 史 舟 孙勤芳 王长永 王国祥 王让会 王学军 武志林
席北斗 肖兴基 徐海根 徐会连 (日本) 徐明岗 许崇育 (挪威) 薛建辉 阎百兴 颜晓元
杨林章 杨柳燕 杨庆文 尹大强 翟保平 张 慧 张金池 张毅敏 赵克强 郑元润 周东美
周军英 周启星 周泽江 朱 波 朱永官 邹长新

生态与农村环境学报

SHENGTAI YU NONGCUN HUANJING XUEBAO

(月刊,1985年2月创刊)

第38卷 第10期(总第214期)2022年10月25日出版

JOURNAL OF ECOLOGY AND RURAL ENVIRONMENT

(Monthly, Founded in February 1985)

Vol. 38 No. 10 Oct. 25, 2022

主 管 中华人民共和国生态环境部
主 办 生态环境部南京环境科学研究所
主 编 蔡道基
编辑出版 《生态与农村环境学报》编辑部

地址: 南京市蒋王庙街8号
邮编: 210042
电话: 025-85287052, 85287053, 85287036
网址: <http://www.ere.ac.cn>
E-mail: ere@vip.163.com; bjb@nies.org

印刷装订 江苏省地质测绘院
总发行处 江苏省邮政局
订 购 处 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司(北京399信箱)

Superintended by Ministry of Ecology and Environment, P. R. China
Sponsored by Nanjing Institute of Environmental Sciences,
Ministry of Ecology and Environment
Editor-in-chief CAI Dao-ji
Edited and Published by

Editorial Office of
Journal of Ecology and Rural Environment
P. O. Box 4202, Nanjing 210042, China
E-mail: ere@vip.163.com; bjb@nies.org
Tel: +86-25-85287052, 85287053, 85287036
Printed by Jiangsu Geologic Surveying and Mapping Institute
Distributed by Domestic: All Local Post Offices in China
Foreign: China International Book Trading Corporation
P. O. Box 399, Beijing 100044, China



中国标准连续出版物号: ISSN 1673-4831
CN 32-1766/X

国内邮发代号: 28-114
国外发行代号: Q5688 定价: 30.00元

