

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0306

杨正忠, 徐昔保, 李景宜, 等. 生态系统服务流研究进展与展望[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(7): 827-838.

YANG Zheng-zhong, XU Xi-bao, LI Jing-yi, et al. Progress and Prospects of Research on Ecosystem Service Flow[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(7): 827-838.

生态系统服务流研究进展与展望

杨正忠^{1,2}, 徐昔保^{2①}, 李景宜¹, 梁彩萍^{1,2} (1. 宝鸡文理学院地理与环境学院/ 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所/ 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要: 生态系统服务流是探讨生态系统服务供给和需求的有效方式, 在揭示生态系统服务从自然生态系统流向人类社会的动态过程中具有明晰服务质量、方向和分布特征的重要作用。从生态系统服务流的内涵、理论框架、模型和应用视角出发, 利用 CiteSpace 可视化软件对筛选的 183 篇 SCI 论文和 33 篇国内核心期刊论文进行系统梳理与分析, 总结相关模型与方法的适用性及案例应用, 探讨现有研究存在的不足与未来研究重点。目前, 在服务流概念探讨、模型方法应用、服务流量化、生态系统服务供需评估、生态补偿修复和安全格局优化等方面取得重要进展; 在通用框架探索、评估模型与指标体系选择、多尺度研究等方面存在较大不足。未来需加强生态系统服务流在生态保护实践与政策设计中的应用研究, 立足通用研究框架构建、模型开发与关键参数率定、重点区域和多时空尺度研究以及生态安全格局优化、生态补偿与生态修复等方面, 为区域生态保护与管控政策制定等提供重要的科学依据。

关键词: 生态系统服务流; 生态系统服务供需; 生态模型; 生态安全格局; CiteSpace

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)07-0827-12

Progress and Prospects of Research on Ecosystem Service Flow. YANG Zheng-zhong^{1,2}, XU Xi-bao^{2①}, LI Jing-yi¹, LIANG Cai-ping^{1,2} (1. College of Geographic and Environment, Baoji University of Arts and Sciences/ Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating, Baoji 721013, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences/ Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Ecosystem service flow is an effective way to explore the supply and demand of ecosystem services. It has played an important role not only in revealing the dynamic process of the flow of ecosystem services from natural ecosystems to human society, but also in clarifying the quality, direction and distribution characteristics of ecosystem services. From the perspective of connotation, theoretical framework, model and application of ecosystem service flow, this study systematically reviewed the research progress of ecosystem service flow, based on the selected 183 SCI papers and 33 domestic core journal papers by using CiteSpace visualization software. The applicability and applications research of relevant models and methods have been summarized, and the shortcomings of existing studies and future research directions are discussed. The results show that there have been some important progresses on the study of ecosystem service flow, mainly including the concept discussion of service flow, model applications, quantification of service flow, ecosystem service supply and demand assessment, ecological compensation, ecological restoration, and security pattern optimization. While there are much less progress on researches of general framework exploration, assessment model, index system selection and multi-scale study. In the future, it is necessary to strengthen the studies on the application of ecosystem service flow in ecological protection and policy design, the establishment of a general research framework of ecosystem service flow. The development and calibration of models, the study on ecosystem service flow in key regions with multi-temporal scales, the optimization of ecological security pattern, ecological compensation and ecological restoration, so as to provide important scientific basis for the formulation of regional ecological protection and management policies.

收稿日期: 2022-04-10

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA23020201); 国家自然科学基金面上项目(42171296)

① 通信作者 E-mail: xbxu@niglas.ac.cn

Key words: ecosystem service flow; ecosystem service supply and demand; ecological model; ecological security pattern; CiteSpace

生态系统服务不仅为人类提供食物和其他生产生活原料,还创造和维持了地球生命的支持系统,形成人类生存所必需的环境条件。目前,生态系统服务研究在价值评估、时空变化格局、权衡关系和驱动机制等方面取得较为显著的进展^[1-4],并在提高公众认知和构建理论框架方面不断完善,逐步进入管理决策和政策顶层设计与应用阶段^[5-8]。现有生态系统服务研究在供给需求匹配特征、服务传递数量与路径等方面仍存在很多不足。研究生态系统服务流有助于阐明服务供需匹配格局、耦合机制和服务动态流动过程,揭示服务传递的关键区位,是生态系统服务研究的热点,也是地理学、生态学和环境科学等学科交叉研究的重要内容。

生态系统服务流自 2011 年首次提出发展至今大体可划分为概念探讨(2011—2014 年)、理论框架构建(2014—2018 年)和应用分析(2018—至今)3 个阶段(表 1^[9-17])。国外生态系统服务流研究起步相对较早,研究重点由生态系统服务流概念探讨^[18]、理论框架构建^[9]逐步过渡到生态系统服务流模拟^[19]、生态系统服务安全格局调整^[20]、生态补偿政策制定等应用研究^[21-22];生态系统服务类型主要集中在水量供给^[23]、固碳^[24]、水质净化、沉积物调节和洪水调节^[25]等服务。国内生态系统服务流研究尚处于起步阶段,主要聚焦于理论框架^[26]、评估方法^[27]和服务流模拟等^[28-29]。

表 1 生态系统服务流研究阶段与研究内容^[9-17]

Table 1 Steps and contents of research on ecosystem service flow

时间	研究阶段	研究内容
2011—2014 年	生态系统服务流概念探索	生态系统服务流概念探讨 ^[9-10]
2014—2018 年	理论框架和评估方法构建	以 LIU 等 ^[11] 、FELIPE-LUCIA 等 ^[12] 为代表,开展服务流框架与评价方法的构建研究,以因果反馈等复杂关系为基础,提出研究框架;开展区域供给与需求服务的分布特征及传递过程机制研究 ^[13]
2018—至今	权衡分析、流动路径模型建立与政策结合	以傅伯杰等 ^[14] 、李双成等 ^[15] 为代表,关注流动过程中的供给方与受益方,进行权衡、服务流模拟研究;开展区域生态修复、服务流模拟动态过程研究 ^[16-17]

由于受生态系统服务流的复杂性与特殊性 & 研究方法缺乏等多因素限制,生态系统服务流尚未形成统一的研究框架与方法体系,难以有效揭示服务供给需求时空特征和传递过程。该文系统梳理了生态系统服务流在理论框架、模型、方法和应用案例等方面的进展,以内涵与模型进展为切入点,结合政策顶层设计应用的需求,探讨现有研究存在的主要不足,提出未来研究的重点方向,以期深化生态系统服务流的理论方法与应用研究。

1 研究进展

1.1 国内外研究概况

以 Web of Science 核心数据库和 CNKI 核心期刊为数据源,分别以“ecosystem service flow”和“生态系统服务流”为主题词进行检索,利用由 Web of Science 核心数据库检索得到的 SCI 英文文献分析国际生态系统服务研究趋势,利用 CNKI 核心期刊文献分析国内生态系统服务研究现状。通过对国内外文献进行严格筛选,最终保留与生态系统服务流研究密切相关的国内文献 33 篇,SCI 论文 183

篇,利用可视化软件 CiteSpace 进行分析。

国际生态系统服务流研究起步较早,发文数量居于前 5 位的研究机构为中国科学院、中国科学院大学、北京师范大学、美国地质勘探局 (US Geological Survey)、欧盟委员会 (European Commission); 发文数量居于前 5 位的作者为谢高地、Yanyang Wang、Kenneth J Bagstad、Yu Xiao 和 Jie Xu; 刊登论文数量居于前 5 位的期刊为 Ecosystem Services, Ecological Indicators, Science of the Total Environment, Sustainability, Journal of Environmental Management。基于国际生态系统服务流关键词共现与聚类网络分析表明,研究重点聚焦在区域服务流量化、模型的开发与使用、生态服务流的框架与指标构建、生态系统服务流视角下的生态保护和基于生态系统服务流视角的生态补偿与供需平衡研究。从演变趋势看,国际生态系统服务流研究始终都将淡水资源作为关注点,重点探索一条基于服务流视角下淡水资源保护路径。从 2013 年开始,服务流研究重点开始向服务流模型开发与利用、湖泊区域服务流模拟、服务流量化与调控等方向拓展。纵观生

生态系统服务流整个研究过程,现仍处于积极发展阶段,在不断探索新的方法来模拟与识别区域服务流及关键节点,实现区域供需平衡和优化。

国内生态系统服务流研究起步较晚,第1篇生态系统服务流研究论文于2014年发表在《林业经济》上,该文主要探讨识别森林生态系统所产生的碳流和水流问题。发文数量居于前3位的研究机构为中国科学院生态环境研究中心、北京大学和河南大学;发文数量居于前3位的作者为丁圣彦、刘慧敏和刘绿怡;发文数量居于前3位的期刊为《生态学报》《应用生态学报》和《环境保护科学》等。国内生态系统服务流关键词共现与聚类网络分析结果表明,研究重点聚焦在区域服务流量化、基于生态系统服务流评估区域服务供需平衡状况以及服务流基础上的生态补偿和权衡研究等。聚类网络分析结果表明国内研究仍处于起步探索阶段,研究之间彼此分离,内容相对单一,连续性也不强。从2017年开始,生态系统服务流研究一直以量化服务流、评估服务流的供需为主,在此基础上进行了少量的生态补偿和权衡研究,并采用构建矩阵的方法对单一服务(水流)进行模拟研究。虽然国内生态系统服务流研究很少,但仍在努力寻求突破,在最新的研究中,将生态系统服务流量化结果作为区域划分和标准核算的依据,以此作为实现区域可持续发展的基础。

1.2 内涵与理论框架

生态系统服务流作为连接服务供给和需求的纽带,其定义与内涵可归纳为两类:(1)关注过程。生态系统服务流是供给区与需求区之间的连接^[30-31],供给区所提供的生态系统服务依赖某种介质,在人为和自然要素的驱动下,顺着某一方向和路径传递到需求区。(2)关注受益。生态系统服务流是人类从生态系统服务中受益,这是生态系统服务的最终体现^[32-33]。两者均将生态系统服务供需作为关注点,但针对生态系统服务的供需匹配机制尚未完善,模型构建影响因素和生态系统服务流过程较复杂,需在厘清生态系统服务流动过程、数量和机制基础上,对生态系统服务供需进行量化分析。

现有生态系统服务流研究侧重服务的流动过程,即明晰生态系统服务供需匹配关系、消耗趋势以及转移动态过程^[27]。Kenneth对“汇”进行了阐述,生态系统服务由供给向需求区域传递过程中的障碍导致原本服务量减少,最终需求区无法获得生态系统服务^[34]。FISHER等^[35]依据传递空间位置将生态系统服务流分为原位服务流、全向服务流和

定向服务流。3者都是生态系统服务流研究的基础,对于明晰服务供给与需求量不可或缺。

生态系统服务流用于表征区域之间的时空连接,需阐明时空、载体和量化3个属性特征^[27,33]。其中,时空特征有利于精准评估生态系统服务流的空间关系;载体特征可表征服务由供给区向需求区的流动;量化属性自身具有流量、流向和流速3种特性。流量与流向成为重要内容,但难以定量化甄别与区分众多影响因素对流量和流向的叠加影响,是目前生态系统服务流研究的难点之一^[36]。流速因涉及因素较多(如城市间道路畅通程度、服务本身流动性和人工建筑等),导致服务供需区域出现错位^[37],目前相关研究较少涉及。

生态系统服务流理论框架研究主要集中在关键组分分析^[9]、服务流定量化研究框架构建^[27]和不同类型生态服务流定量化范式建立^[38]3个方面。(1)关键组分分析有利于厘清供给能力、生态压力、需求和服务流等涉及过程的成分和因子;(2)框架构建需阐明服务流涉及主体、产生的原因和流动状况。现有框架多侧重自然生态系统要素,较少涉及人类社会系统要素,不利于揭示供给需求内部运行机制双及评估区域生态系统服务流动及消耗情况;(3)不同类型服务流研究范式的建立。目前主要针对供给和调节服务,支持服务(如土壤保持)和文化服务(如旅游景观)因涉及因素较多、流动过程复杂而鲜有研究。在揭示服务流传递的相关性和复杂性时,需从服务流整体效益^[22]、权衡协同关系^[39]以及生态系统服务供给和需求方面考虑,建立服务生产与消耗的指标作为判定服务流整体效益和质量的依据。

针对不同的生态系统服务类型,可以将服务流框架研究分为两类:(1)基本生态系统服务流研究框架:如刘慧敏等^[33]总结了基本生态系统服务流定量化研究过程,分析了生态系统服务流过程和基本环节;SERNA-CHAVEZ等^[37]分析生态系统服务提供区域和受益区域之间的空间联系,以此模拟探究生态系统服务流。(2)特定生态系统服务流的研究框架:如LIU等^[11]将中国南水北调工程作为特定生态系统服务流模拟框架效用的基础,分析服务流动原因、影响因素和动态过程;BAGSTAD等^[34]建立了多种生态服务研究框架,包括碳固存、河流洪水调节、水库泥沙调节、城市开放空间和风景区5种生态系统服务流,有利于理解生态系统服务空间动态机制。基本服务流与特定服务流框架定量流程基本相同,区别在于所量化的生态系统服务类别,基本

服务流定量框架适用于多样服务,特定服务流定量框架则根据所要量化的服务流种类进行构建,例如粮食供给、洪水调节和风景区等服务。基本服务流定量框架是特定服务流定量框架构建的基础,且常作为特定服务流定量框架的躯干;特定服务流定量框架具有独特性,针对不同服务类型,其定量方式与流程不同。两类不同生态系统服务流框架的构建有助于深化服务流定量研究,针对不同生态系统服务类型选择特定的研究框架则有助于提升其适用性。

1.3 生态服务流模型

21 世纪初,在遥感和 GIS 技术支撑下生态系统服务评估模型快速发展,能较好地模拟生态系统服务流物质量和价值量的模型得到广泛应用。根据不同需求与建模方式,生态系统服务流模型可分为生态模型和统计模型,两者的区别在于是否模拟服务具体流向。其中,生态模型又可划分为机理过程模型和遥感模型。机理过程模型以 ARIES 和 InVEST 模型较为典型^[40],不仅可以模拟多种生态系统服务流,还可建立人类与生态系统服务流的空间链接。此外,SWAT 和 HSPF 模型^[41-42]虽然只能用于量化单一服务流,但其因组织结构较为完整而被学者广泛使用。统计模型结构较为简单,以流动比、WSI 指数和供需比模型为主,用来判断区域供给服务流动特征和供需特征。各类模型因结构不同而优势各异,生态模型优势集中在可模拟多种生态系统服务及其动态流动过程等,统计模型优势在于模型结构简单易操作、模拟过程简单和数据容量需求小等。不同模型在量化的生态系统服务类型、研究重点和适用范围等方面各具优缺点(表 2^[29,34,43-63]),并对相关重点模型进行讨论。

1.3.1 ARIES 和 InVEST 模型

ARIES 模型是一个模型整合平台,重点关注服务供需评估和服务流动模拟等方面,可用于模拟多种生态系统服务,并将源、汇和使用者等方面因素考虑在内,未来发展趋势较好^[64]。2020 年,CAPRI-OLO 等^[65]利用该模型评估了意大利洪水调节和动物授粉等 4 种生态系统服务流动情况,并将其作为动态评估当地生态系统服务的基础。目前,该模型的服务流应用案例研究集中在欧洲、美洲和非洲地区,国内鲜有涉及,无法起到借鉴和支撑作用,需进行推广与验证。InVEST 模型因具有数据要求少易获取、适用于各种研究尺度等优点,在生态系统服务评估方面的发展较为成熟^[66-67],在服务流模拟等方面也有些应用尝试^[68]。国内利用该模型对固碳

流^[29]和产水流^[69]进行研究,国外以模拟调节服务流和供给服务流为主。因 InVEST 模型结构和功能较为简单,国内在服务流模拟方面应用案例较少,评估精度仍需验证。

1.3.2 HSPF 模型

HSPF 模型是一种兼具分布式与集中式水文模型的综合式水文模型,涵盖透水面、不透水面和水库 3 个水文水质模拟模块,主要用于模拟流域流量、输沙和营养物质迁移等^[48]。NAYEB-YAZDI 等^[70]采用 HSPF 模型模拟了城市流域径流,发现其能较好地用于模拟径流过程。MISHRA 等^[71]对印度一个典型土地利用类型(包括农用地、灌木丛、森林、岩石和草地)小流域的径流过程进行模拟,发现在季节性情况下 HSPF 模型模拟的径流产沙量和 N、P、S 污染物均与实测值高度吻合。该模型对于平均径流模拟效果较好,能用于较高精度地模拟径流过程,适用于时间尺度较大的区域。但洪峰流量模拟结果略差,特别对于极端水文状况的模拟还有较大的提升空间;同时,关于空间的描述还有待完善,部分参数无法应用于数据缺乏的区域^[48]。

1.3.3 WSI 模型

WSI 模型为水安全指数统计模型,针对河段水资源服务量差异较大的状况,WSI 指数可用于增强服务流量的空间可见性和可比性。CHEN 等^[72]利用 WSI 指数判断了延河流域服务流模式,评估了流量区域面积与不同土地利用方式下的水资源安全状况。对于小流域、基础数据较齐全且精度较高的区域 WSI 指数具有较好的应用潜力,可作为判断水资源安全状况的重要指标。但该统计模型目前在生态系统服务流研究中较少涉及,可借鉴性不强,并对基础数据精度要求较高。

1.4 应用案例

生态系统服务流在明确生态系统服务过程、路径、数量和受益等方面具有明显优势,现已被较多地应用于区域生态系统服务供需评估、生态补偿、生态保护与修复规划及生态安全格局优化等方面。

1.4.1 服务流在生态系统服务供需评估方面的应用

生态系统服务流在生态系统服务供需评估应用研究中以探索区域生态系统服务供给和需求平衡状况为基础,明晰区域生态系统服务供需匹配特征^[73],揭示生态服务对人类福祉的影响程度^[68]并实现资源的合理配置^[74]。张欣蓉等^[68]利用 RUSLE、InVEST、CASA 等多种模型和方法定量评估了西南喀斯特地区 2000—2015 年土壤保持服务供

需,揭示了其供需空间盈余变化特征和传输路径;莫丽春等^[28]利用 HYSPLIT 模型量化北京湿地削减 PM_{2.5}服务的流量、流动路径和供给量,结果表明研究区域服务流量最高值均出现在冬季,最低值出现在夏季,气流轨迹运动的受益区为京津冀地区和山东省;XU 等^[75]利用 HYSPLIT 模型模拟盐池防风固

沙生态系统服务的流动,分析其从产生到消耗的时空关系;KLEEMANN 等^[76]提出采用空间显性模型评估德国地区物种迁徙、信息流动和贸易流动生态系统服务流动过程,揭示供给服务对本国自然资源的影响,提出解决本国与其他伙伴国家的依赖关系及实现全球生态可持续发展和环境公平的途径。

表 2 生态系统服务流量化模型统计^[29,34,43-63]

Table 2 Statistics of ecosystem service flow model

模型名称	服务功能	服务类型	适用范围	优点	缺点	案例	来源文献
ARIES	调节服务和支持服务等	洪水调节、固碳潜力和水源涵养等	全球、区域	适用于较大尺度,服务类型多样	模型复杂、参数修改困难	美国;拉丁美洲	[34,43]
InVEST	调节服务和供给服务等	生物多样性、土壤侵蚀等	区域	评估结果可视化,操作过程具有可重复性	基础数据要求严格,经济价值无法核对	白洋淀流域;云南	[44-47]
SPANs	调节服务和供给服务	固碳潜力和旅游服务等	区域	拓展了生态系统服务研究视角	覆盖的生态系统服务类型较少,国内可供参考研究少	引黄入晋南干线	[29]
HSPF	供给服务和调节服务	水源供给和水量调节	流域	持续模拟时间尺度大,拥有 BASINS 平台,使用方便	空间描述有待完善,参数无法应用于信息缺乏区域	东江流域;福建鳌江流域	[48-49]
RUSLE	调节服务	土壤侵蚀和降雨侵蚀	地区、流域	详细地揭示生态机理,适用空间尺度范围广	只能计算单一的生态系统服务,部分参数获取困难	雄安新区	[50-51]
SWAT	供给服务	水供给	流域	高效的计算能力、完整的模型结构和参数拓展性能	短期径流模拟效果差,需要大量气象和水文数据,对数据精度敏感	渭河流域	[52-53]
VIC	供给服务和调节服务	水供给和水量调节	区域、流域	考虑多种不同植被类型,弥补了对能量过程描述不足的缺陷	参数众多且依赖性强,产流过程模拟效果较差	西江流域;盐湖流域	[54-55]
HYSPLIT	调节服务	物种迁移和空气流动	区域	较好地用于模拟运动轨迹,季节性结果明显	无法证实轨迹落点来源,数据精度和尺度要求高	珠江三角洲;西安	[56-57]
SolVES	文化服务	娱乐、休闲和美学	城市	可结合大数据,实时性强,成果空间显性效果佳	数据要求严格,服务流类型单一	官厅水库流域	[58]
MRIO	调节服务和供给服务等	碳排放足迹和水供给等	全球、区域	可模拟服务种类多样,模拟效果好	数据要求高且处理标准难统一	京津冀地区;中国省市	[59-60]
WSI	供给服务和调节服务	水供给等	区域、流域	考虑了上游流入情况	数据要求严格,可供参考的研究较少	陕西延河	[61]
S/D	供给服务	水供给和水量调节	区域、流域	总结特定时间尺度内供给和需求的平衡,数据处理简单	数据要求严格,服务类型单一	埃布罗河流域	[62]
RI(流动比)	供给服务	固碳服务	区域	明确区域内部碳平衡,模拟简单过程	数据精度要求高,服务类型单一	京津冀	[63]

BETHWELL 等^[77]基于生态系统服务流视角构建模型,量化了农业生态系统服务流量与流向,以

此提出加强农业生态系统服务的建议。国内在黄河流域^[78]、太湖流域^[79]、渭干河流域^[80]、涟水流

域^[81]和白洋淀流域^[82]等相继开展了供给生态系统服务流评估研究,在流域尺度上阐明典型流域生态系统服务流动规律、匹配特征和生态系统服务价值流转情况。

另外,部分研究采用供需矩阵、空间制图和地统计等方法判定生态系统服务权衡/协同关系,将其作为评估区域供需特征和实现资源合理配置的依据。如林咏园等^[69]以安徽省宿州市为例,采用服务流矩阵分析不同用水类型和生态系统服务之间的影响程度。

传统的生态系统服务供需评估方法,如供需矩阵、ATAREM 水文模型等,大多忽略了生态系统服务供给与需求的不均匀性和空间转移性,侧重特定时期供需之间的空间和数量关系,较少涉及时空动态及内在的过程机制研究。现有的案例研究表明通过生态系统服务流评估供需关系,更有利于科学阐明内部机制和空间分布特征,揭示自然、人为和环境等因素对生态系统服务供需的影响。

1.4.2 服务流在生态补偿与生态修复方面的应用

目前,生态补偿标准核算采用的方法主要包括机会成本法、生态损害成本法、生态足迹法、生态系统功能价值法和意愿调查法等^[83]。现有生态补偿标准的建立缺乏区域特征的动态标准,仅针对现阶段的情况因素和具体的案例研究区域,政府补偿依赖性较高,并且对流域生态服务功能的量化补偿标准的制定较为简单片面,没有精准估算与覆盖各类重点生态系统服务类型和数量,限制了生态补偿标准的科学性与实施推进。基于生态系统服务流开展区域生态补偿,将利益相关者的诉求与生态系统服务相结合,融入多学科、跨尺度方式探讨生态服务功能动态过程,将其作为区域可持续发展方案制定的重要方式。如刘春芳等^[84]以石羊河流域为例,利用供需平衡模型和风沙扩散模型分别模拟流域主要生态系统服务的流动特征,据此确定受偿区、支付区范围以及补偿标准;MA 等^[85]利用服务流模型模拟了红树林和海草破坏造成的损失,并探讨了不同的沿海补偿选址规则是如何改变对生态系统服务供给的净影响的问题。

现有的生态修复以小尺度、单一生态修复工程和单一修复目标为主,基于多目标权衡的生态修复工程相对较少。因此,综合考虑多要素与多个生态修复目标,在揭示生态系统服务供需特征、流动过程与路径的基础上,制定区域生态系统修复方案,更有利于提升生态系统修复的综合效应。如 TANG 等^[86]模拟白洋淀水流服务最佳流动路径,并提出生

态修复措施;杨丽雯等^[29]通过分析太原市引黄入晋南干线供需平衡关系,绘制了固碳服务传输路径并评估其价值,进而提出生态修复路径。生态系统服务流在生态补偿、生态修复中作为重要的效应指标,随着生态系统服务流评估模型的不断完善,将提供更可靠的科学依据。

1.4.3 服务流在生态安全格局优化方面的应用

现有生态安全格局评价方法主要包括基于压力-状态-响应(PSR)框架模型、熵值法和灰色预测模型、生态系统服务价值与生态安全耦合模型、基于生态系统服务“供-流-需”的生态网络模型等^[87]。PSR 模型在指标的选取上不统一,过度强调人类的干扰;熵值法和灰色预测模型过度依赖统计学原理,生态学意义缺失;生态价值评估模型主观性较强;而生态系统服务流能够有效连接生态系统服务供需,明确供需的时空错位,量化表征生态安全格局现状,模拟其未来发展动态,具有较强的生态学意义,因此在生态安全格局优化中逐渐被采纳。

现有生态保护区和安全格局优化构建案例研究,在揭示生态系统服务流过程^[76]和明确区域服务流动规律^[81]基础上,构建生态安全格局^[88]。如 LI 等^[88]开发了淡水生态系统服务流模型,并将其应用于中国京津冀(BTH)地区,量化淡水生态系统服务流对下游地区的影响,提出京津冀水安全优化格局;如乔旭宁等^[80]基于场强理论和断裂点模型分析了2000—2010年渭干河流域生态系统服务价值空间流转状况及其对居民福祉的影响,阐明当地生态安全与健康格局;TIEMANN 等^[89]提出森林生态系统服务流量指标,并量化了5种森林生态系统服务,作为森林可持续管理和优化布局的依据。

2 问题与展望

国内外已在生态系统服务流的研究范式、影响机制及案例研究等方面开展了大量研究,但总体上仍处于发展起步阶段,存在诸多不足。该文重点从以下4个方面讨论未来研究的重点方向。

2.1 生态系统服务流通用研究框架

尽管学界对生态系统服务流探索的方向与重点保持高度一致,且均认可现有生态系统服务流的内涵与机制^[30-31,33],但因采用不同的生态系统服务流框架,其结果存在较大差异^[24,90]。当前生态系统服务流框架构建与应用多集中于流域^[11,79],因尺度、机制和体系等问题而无法直接套用于相似流域,造成区域研究难以推广与复制。另外,生态系

统服务流的研究框架差异较大^[32,91-92],缺乏统一的研究范式,导致服务流量化体系无法建立。现存服务流框架研究大多数按因地制宜原则进行构建,缺乏生态系统服务流定量框架的适用性和转移性,造成生态系统服务流研究框架混乱、认可度低、采纳度低和抉择难度大等局面,在一定程度上限制了生态系统服务流的应用发展。未来生态系统服务流研究框架的构建需在综合考虑各生态服务要素之间的相互作用和驱动机制的基础上,明晰生态供给与需求之间的作用机制、人与自然耦合机制系统,构建通用的生态系统服务流研究框架,以生态可持续发展作为其目标,提升生态系统服务流框架的适用性和认可度。

2.2 模型与方法

机理模型作为当前量化生态系统服务流的主要工具,以具有包含多个独立模型和模块、量化多种生态系统服务等优点而被广泛使用,如 ARIES、InVEST、SPANs 等^[93-96]。随着机理模型的不断开发与应用^[97-98],其存在的问题也逐渐显现,主要包括:(1)模型对生态系统服务的形成与变化机理无法清楚认知,造成模拟过程与实际不符,如 InVEST 模型用来模拟水土流失过程机理的公式是由经验公式转换得到的;(2)模型结构复杂程度过高,模拟的不确定性提升^[26]。如 ARIES 模型自身结构过于复杂且对数据和研究人员要求极高,致使模拟过程难以顺利进行,造成模拟效果无法达到预期;(3)部分关键参数缺失^[99]。如根系参数作为模型不可或缺的一部分,其缺失将导致结果无法模拟真实情况。(4)与其他模型耦合困难^[100]。模型在开发时期只用作解决当下问题,耦合关注较少,往往导致无法解决区域生态复合问题。生态系统服务从供给区传递至需求区的过程是一个整体,将整个过程作为研究对象才有意义^[101]。现有研究中将生态系统供给区域与需求区域剥离开进行单独描述,忽略了服务从产生到流动过程中被其他作用消耗,导致定量结果无法真实反映区域服务流量变化特征。

未来生态系统服务流模型构建应从整体思维出发,充分利用现有基础数据,如地形、气象、多源遥感卫星和土壤数据等,揭示生态系统服务形成过程与变化机理,提高生态过程模型模拟精度;优化与提高生态系统服务流模型的可操作性,提升技术与模型的耦合性,避免因结构复杂造成服务匹配特征不明显、服务流之间关系复杂、无法刻画服务流动态过程等问题;优化关键参数设置与率定,避免“多参降精”问题。

2.3 服务流类型与指标

现有生态系统服务流研究主要集中在针对供给服务和调节服务,对支持服务(养分循环等)和文化服务(娱乐和风景区等)鲜有涉及。支持和文化服务评估在判别区域生态系统服务供需平衡状况、生态产品及生态效益方面具有不可或缺的作用,仅依靠供给和调节服务无法达到全面评估区域生态系统服务状况和持续发展水平的目的。另外,生态系统服务流定量评估指标体系的缺失造成评估过程困难、特征差异明显和结果无法检验的问题,进而导致现有研究的横向可比性较差,评估结果的真实性无法进行有效验证。因此,未来研究需加强对支持和文化服务的研究,在明晰支持和文化服务供给与需求之间的传输路径、传输过程以及途中的消耗与剩余的基础上,梳理断流、截留等阻碍服务流流动的区域,辨析生态系统服务流传递过程中的重点保护区和一般保护区。

2.4 尺度效应

现有生态系统服务流研究主要集中在市县(区)和小流域尺度展开评估,全国和省级尺度较少涉及;时间尺度也以 1、5 和 10 年为主,没有长时间序列尺度研究。另外,对于供需矛盾突出的区域和城市案例研究较少,该类生态系统服务流研究对区域可持续发展和城市居民生活也具有重要意义,需要持续关注。

未来市县(区)尺度生态系统服务流的研究,需向城市内部进行细化与深入,揭示城市内部资源供给与分配,精准量化城市生态系统服务价值。同时,加强多尺度(如全国、省级尺度及 50 年等长时间尺度)评估区域生态系统服务流过程和供需特征研究,有助于更好地识别区域生态系统服务的时空演化与传递过程。

3 结论

生态系统服务流研究是实现区域生态系统服务流向和流量动态监测的重要手段。通过利用 CiteSpace 可视化软件对国际 SCI 论文和国内核心期刊论文的分析发现,国内外相关研究已在服务流概念探讨、生态系统服务供需评估、服务流量化、生态补偿修复和安全格局优化等方面取得了重要进展,同时在生态系统服务流通用研究框架、评估模型与指标体系、长时间序列和多尺度研究等方面存在较大不足。为更好地揭示生态系统服务的传递过程与质量,建议重点加强以下 3 个方面的研究:(1)明晰生态供给与需求之间的作用机制,构建区

域生态系统服务流研究通用框架与评估指标体系；(2)加强多学科交叉,增加紧密性,完善生态系统服务形成与变化机理、优化生态系统服务流模型的关键参数与模型结构,提高模型的可操作性与精度；(3)加强重点区域和时空尺度研究,提高生态系统服务流在生态安全格局优化、生态补偿与生态修复等生态保护实践与政策设计中的应用。

参考文献:

- [1] 高星,杨刘婉青,李晨曦,等.模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J].生态学报,2021,41(20):7974-7988.[GAO Xing, YANG Liu-wan-qing, LI Chen-xi, et al. Land Use Change and Ecosystem Service Value Measurement in Baiyangdian Basin under the Simulated Multiple Scenarios [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20):7974-7988.]
- [2] 陈旻坤,徐昔保.近30年来鄱阳湖生态系统服务变化[J].湖泊科学,2021,33(1):309-318.[CHEN Min-kun, XU Xi-bao. Lake Poyang Ecosystem Services Changes in the Last 30 Years [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(1):309-318.]
- [3] 张艳春,毛旭锋,魏晓燕,等.涅水国家湿地公园湿地价值及其辐射格局研究[J].生态学报,2022,42(2):569-580.[ZHANG Yan-chun, MAO Xu-feng, WEI Xiao-yan, et al. Wetland Value and Its Radiation Pattern of the Huangshui National Wetland Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2):569-580.]
- [4] 李晓晖,萧敬豪,王建军,等.面向生态修复的自然资源资产评估与应用研究:以广州市为例[J].生态学报,2022,42(3):1192-1202.[LI Xiao-hui, XIAO Jing-hao, WANG Jian-jun, et al. Research on the Evaluation and Application of Natural Resources Assets for Ecological Restoration: A Case Study of Guangzhou City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3):1192-1202.]
- [5] 白杨,王敏,李晖,等.生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J].生态学报,2017,37(17):5846-5852.[BAI Yang, WANG Min, LI Hui, et al. Ecosystem Service Supply and Demand: Theory and Management Application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17):5846-5852.]
- [6] LIU S, COSTANZA R, TROY A, et al. Valuing New Jersey's Ecosystem Services and Natural Capital: A Spatially Explicit Benefit Transfer Approach [J]. Environmental Management, 2010, 45(6):1271-1285.
- [7] MAES J, EGOH B, WILLEMEN L, et al. Mapping Ecosystem Services for Policy Support and Decision Making in the European Union [J]. Ecosystem Services, 2012, 1(1):31-39.
- [8] JIA X Q, FU B J, FENG X M, et al. The Tradeoff and Synergy between Ecosystem Services in the Grain-for-green Areas in Northern Shaanxi, China [J]. Ecological Indicators, 2014, 43:103-113.
- [9] VILLAMAGNA A M, ANGERMEIER P L, BENNETT E M. Capacity, Pressure, Demand, and Flow: A Conceptual Framework for Analyzing Ecosystem Service Provision and Delivery [J]. Ecological Complexity, 2013, 15:114-121.
- [10] ROBARDS M D, SCHOON M L, MEEK C L, et al. The Importance of Social Drivers in the Resilient Provision of Ecosystem Services [J]. Global Environmental Change, 2011, 21(2):522-529.
- [11] LIU J G, YANG W, LI S X. Framing Ecosystem Services in the Telecoupled Anthropocene [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2016, 14(1):27-36.
- [12] FELIPE-LUCIA M R, MARTÍN-LÓPEZ B, LAVOREL S, et al. Ecosystem Services Flows: Why Stakeholders' Power Relationships Matter [J]. PLoS One, 2015, 10(7):e0132232.
- [13] 刘晶晶,王静,戴建旺,等.黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异[J].自然资源学报,2021,36(1):148-161.[LIU Jing-jing, WANG Jing, DAI Jian-wang, et al. The Relationship between Supply and Demand of Ecosystem Services and Its Spatio-temporal Variation in the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1):148-161.]
- [14] 傅伯杰,吕一河,高光耀.中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展[J].自然杂志,2012,34(5):261-272.[FU Bo-jie, LÜ Yi-he, GAO Guang-yao. Major Research Progresses on the Ecosystem Service and Ecological Safety of Main Terrestrial Ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Nature, 2012, 34(5):261-272.]
- [15] 李双成,刘金龙,张才玉,等.生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J].地理学报,2011,66(12):1618-1630.[LI Shuang-cheng, LIU Jin-long, ZHANG Cai-yu, et al. The Research Trends of Ecosystem Services and the Paradigm in Geography [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(12):1618-1630.]
- [16] WANG C D, LI W Q, SUN M X, et al. Exploring the Formulation of Ecological Management Policies by Quantifying Interregional Primary Ecosystem Service Flows in Yangtze River Delta Region, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 284:112042.
- [17] 张城,李晶,周自翔.基于水供给服务空间流动模型的渭河流域水资源安全格局[J].地理科学,2021,41(2):350-359.[ZHANG Cheng, LI Jing, ZHOU Zi-xiang. Water Resources Security Pattern of the Weihe River Basin Based on Spatial Flow Model of Water Supply Service [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(2):350-359.]
- [18] BURKHARD B, KANDZIORA M, HOU Y, et al. Ecosystem Service Potentials, Flows and Demands-concepts for Spatial Localisation, Indication and Quantification [J]. Landscape Online, 2014, 34:1-32.
- [19] BHAVAN S G, RAKSHIT N, LAL D M, et al. Ecosystem Modelling to Understand the Trophic Dynamics and Ecosystem Health of a Small Tropical Indian Estuary [J]. Ecological Informatics, 2021, 66:101429.
- [20] WANG Y W, HONG S, WANG J Z, et al. Complex Regional Telecoupling between People and Nature Revealed via Quantification of Trans-boundary Ecosystem Service Flows [J]. People and Nature, 2022, 4(1):274-292.
- [21] GONZÁLEZ-GARCÍA A, PALOMO I, GONZÁLEZ J A, et al. Biodiversity and Ecosystem Services Mapping: Can It Reconcile Urban and Protected Area Planning? [J]. Science of the Total Environment, 2022, 803:150048.
- [22] VALATIN G, OVANDO P, ABILDTRUP J, et al. Approaches to Cost-effectiveness of Payments for Tree Planting and Forest Management for Water Quality Services [J]. Ecosystem Services, 2022,

- 53;101373.
- [23] DENG C X, ZHU D M, LIU Y J, *et al.* Spatial Matching and Flow in Supply and Demand of Water Provision Services: A Case Study in Xiangjiang River Basin[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(1): 228–240.
- [24] LIU R R, DONG X B, WANG X C, *et al.* Study on the Relationship among the Urbanization Process, Ecosystem Services and Human Well-being in an Arid Region in the Context of Carbon Flow: Taking the Manas River Basin as an Example[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108248.
- [25] HU C, XIA J, SHE D X, *et al.* A New Urban Hydrological Model Considering Various Land Covers for Flood Simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126833.
- [26] 易丹, 肖善才, 韩逸, 等. 生态系统服务供给和需求研究评述及框架体系构建[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3942–3952. [YI Dan, XIAO Shan-cai, HAN Yi, *et al.* Review on Supply and Demand of Ecosystem Service and Systematic Framework Construction [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3942–3952.]
- [27] 刘慧敏, 刘绿怡, 任嘉衍, 等. 生态系统服务流量化研究进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2723–2730. [LIU Hui-min, LIU Lü-yi, REN Jia-yan, *et al.* Progress of Quantitative Analysis of Ecosystem Service Flow [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2723–2730.]
- [28] 莫丽春, 马蕊, 谢屹, 等. 北京湿地削减大气 PM_{2.5} 的生态系统服务流研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5570–5577. [MO Li-chun, MA Rui, XIE Yi, *et al.* Ecosystem Service Flows of Wetlands Blocking Atmospheric PM_{2.5} in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5570–5577.]
- [29] 杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 等. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估: 以引黄入晋南干线为例[J]. *资源科学*, 2019, 41(3): 557–571. [YANG Li-wen, DONG Li-qing, ZHANG Li-wei, *et al.* Quantitative Assessment of Carbon Sequestration Service Supply and Demand and Service Flows: A Case Study of the Yellow River Diversion Project South Line [J]. *Resources Science*, 2019, 41(3): 557–571.]
- [30] 姚婧, 何兴元, 陈玮. 生态系统服务流研究方法最新进展[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 335–342. [YAO Jing, HE Xing-yuan, CHEN Wei. The Latest Progress in Ecosystem Service Flow Research Methods [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 335–342.]
- [31] BAGSTAD K J, JOHNSON G W, VOIGT B, *et al.* Spatial Dynamics of Ecosystem Service Flows: A Comprehensive Approach to Quantifying Actual Services [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117–125.
- [32] SCHRÖTER M, BARTON D N, REMME R P, *et al.* Accounting for Capacity and Flow of Ecosystem Services: A Conceptual Model and a Case Study for Telemark, Norway [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539–551.
- [33] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2161–2171. [LIU Hui-min, FAN Yu-long, DING Sheng-yan. Research Progress of Ecosystem Service Flow [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2161–2171.]
- [34] BAGSTAD K J, VILLA F, BATKER D, *et al.* From Theoretical to Actual Ecosystem Services: Mapping Beneficiaries and Spatial Flows in Ecosystem Service Assessments [J]. *Ecology and Society*, 2014, 19(2): art64.
- [35] FISHER B, TURNER R K, MORLING P. Defining and Classifying Ecosystem Services for Decision Making [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643–653.
- [36] 荣月静, 严岩, 王辰星, 等. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化[J]. *生态学报*, 2020, 40(20): 7197–7206. [RONG Yue-jing, YAN Yan, WANG Chen-xing, *et al.* Construction and Optimization of Ecological Network in Xiong'an New Area Based on the Supply and Demand of Ecosystem Services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7197–7206.]
- [37] SERNA-CHAVEZ H M, SCHULP C J E, VAN BODEGOM P M, *et al.* A Quantitative Framework for Assessing Spatial Flows of Ecosystem Services [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24–33.
- [38] ZHU Q, TRAN L T, WANG Y, *et al.* A Framework of Freshwater Services Flow Model into Assessment on Water Security and Quantification of Transboundary Flow: A Case Study in Northeast China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114318.
- [39] JOPKE C, KREYLING J, MAES J, *et al.* Interactions among Ecosystem Services across Europe: Bagplots and Cumulative Correlation Coefficients Reveal Synergies, Trade-offs, and Regional Patterns [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 46–52.
- [40] 徐昔保, 杨桂山, 江波. 湖泊湿地生态系统服务研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7149–7158. [XU Xi-bao, YANG Gui-shan, JIANG Bo. Progress in Lake-wetland Ecosystem Services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 7149–7158.]
- [41] 焦丽君, 刘瑞民, 王林芳, 等. 基于 SWAT 模型的汾河流域生态补水研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5778–5788. [JIAO Li-jun, LIU Rui-min, WANG Lin-fang, *et al.* Study on Ecological Water Supplement in Fenhe River Basin Based on SWAT Model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5778–5788.]
- [42] 桂晗亮, 张春萍, 武治国, 等. HSPF 在热带沿海流域水文模拟中的应用[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 115–120, 129. [GUI Han-liang, ZHANG Chun-ping, WU Zhi-guo, *et al.* Application of HSPF in Hydrological Simulation in Tropical Coastal Watershed [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 115–120, 129.]
- [43] MARTÍNEZ-LÓPEZ J, BAGSTAD K J, BALBI S, *et al.* Towards Globally Customizable Ecosystem Service Models [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2325–2336.
- [44] 陈骏宇, 王慧敏, 刘钢, 等. “水-能-粮”视角下杭嘉湖区域生态系统服务供需测度及政策研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 542–553. [CHEN Jun-yu, WANG Hui-min, LIU Gang, *et al.* Evaluation of Ecosystem Services and Its Adaptive Policies in the Hangjiahu Region under Water-energy-food Nexus [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3): 542–553.]
- [45] 马良, 金陶陶, 文一惠, 等. InVEST 模型研究进展[J]. *生态经济*, 2015, 31(10): 126–131, 179. [MA Liang, JIN Tao-tao, WEN Yi-hui, *et al.* The Research Progress of InVEST Model [J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(10): 126–131, 179.]

- [46] 董潇楠, 谢苗苗, 张覃雅, 等. 承灾脆弱性视角下的生态系统服务需求评估及供需空间匹配[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6422-6431. [DONG Xiao-nan, XIE Miao-miao, ZHANG Qin-ya, et al. Ecosystem Services Demand Assessment Regarding Disaster Vulnerability and Supply-demand Spatial Matching[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6422-6431.]
- [47] XU X B, YANG G S, TAN Y, et al. Ecosystem Services Trade-offs and Determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1601-1614.
- [48] 刘友存, 邹杰平, 尹小玲, 等. HSPF 模型在流域水文与水环境研究中的进展[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 225-232. [LIU You-cun, ZOU Jie-ping, YIN Xiao-ling, et al. Review on HSPF Model in Watershed Hydrology and Water Environment Research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 225-232.]
- [49] 白晓燕, 位帅, 时序, 等. 基于 HSPF 模型的东江流域降水对非点源污染的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 112-119. [BAI Xiao-yan, WEI Shuai, SHI Xu, et al. Using the HSPF Model to Study the Effects of Precipitation on Nonpoint Source Pollution in Dongjiang Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(7): 112-119.]
- [50] CASTILLO-EGUSKITZA N, MARTÍN-LÓPEZ B, ONAINDIA M. A Comprehensive Assessment of Ecosystem Services; Integrating Supply, Demand and Interest in the Urdaibai Biosphere Reserve[J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 1176-1189.
- [51] 张豆, 渠丽萍, 张桀滴. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化; 以长三角地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7525-7537. [ZHANG Dou, QU Li-ping, ZHANG Jie-hao. Ecological Security Pattern Construction Method Based on the Perspective of Ecological Supply and Demand; A Case Study of Yangtze River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7525-7537.]
- [52] NEDKOV S, BURKHARD B. Flood Regulating Ecosystem Services; Mapping Supply and Demand, in the Etropole Municipality, Bulgaria[J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 67-79.
- [53] 颜文涛, 黄欣, 王云才. 绿色基础设施的洪水调节服务供需测度研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1165-1177. [YAN Wen-tao, HUANG Xin, WANG Yun-cai. Measurements of the Supply and Demand for the Flood Regulation Ecosystem Services of Green Infrastructure: A Review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1165-1177.]
- [54] 李琳, 文雄飞, 谭德宝, 等. 盐湖流域空-天-地立体监测系统结合 VIC 模型径流模拟初探[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(8): 126-132. [LI Lin, WEN Xiong-fei, TAN De-bao, et al. A Preliminary Study on Runoff Simulation of Salt Lake Basin with the Air-space-ground Stereoscopic Monitoring System and VIC Model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(8): 126-132.]
- [55] 山红翠, 袁飞, 盛东, 等. VIC 模型在西江流域径流模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2016(4): 43-45, 49. [SHAN Hong-cui, YUAN Fei, SHENG Dong, et al. The Application of VIC Model to Runoff Simulation of Xijiang River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(4): 43-45, 49.]
- [56] 张涛, 王新明, 周炎, 等. 利用 HYSPLIT 模型研究珠三角地区 VOCs 时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4216-4223. [ZHANG Tao, WANG Xin-ming, ZHOU Yan, et al. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of VOCs in the Pearl River Delta Region Using HYSPLIT Model[J]. China Environmental Science, 2020, 40(10): 4216-4223.]
- [57] 蒋辉, 段克勤. 基于 HYSPLIT 模型的 2017 年西安市首要大气污染物变化特征及潜在源区分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 243-252. [JIANG Hui, DUAN Ke-qin. Analysis of Seasonal Primary Pollutants and Their Potential Source Areas of Xi'an in 2017 Based on HYSPLIT Model[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, 56(2): 243-252.]
- [58] MENG S T, HUANG Q X, ZHANG L, et al. Matches and Mismatches between the Supply of and Demand for Cultural Ecosystem Services in Rapidly Urbanizing Watersheds; A Case Study in the Guanting Reservoir Basin, China[J]. Ecosystem Services, 2020, 45: 101156.
- [59] 谭飞燕, 张力, 李孟刚. 基于 MRIO 模型的京津冀贸易隐含碳排放核算[J]. 统计与决策, 2018, 34(24): 30-34. [TAN Fei-yan, ZHANG Li, LI Meng-gang. Accounting of Embodied Carbon Emission in Beijing-Tianjin-Hebei Trade Based on MRIO Model[J]. Statistics & Decision, 2018, 34(24): 30-34.]
- [60] 孙才志, 郑靖伟. 基于 MRIO 与 SNA 的中国水资源空间转移网络分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 9-17. [SUN Cai-zhi, ZHENG Jing-wei. Analysis of China's Water Resources Spatial Transfer Network Based on MRIO and SNA[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 9-17.]
- [61] CHEN D S, LI J, YANG X N, et al. Quantifying Water Provision Service Supply, Demand and Spatial Flow for Land Use Optimization; A Case Study in the Yanhe Watershed[J]. Ecosystem Services, 2020, 43: 101117.
- [62] BOITHIAS L, TERRADO M, COROMINAS L, et al. Analysis of the Uncertainty in the Monetary Valuation of Ecosystem Services; A Case Study at the River Basin Scale[J]. Science of the Total Environment, 2016, 543: 683-690.
- [63] GAO Y, FENG Z, LI Y, et al. Freshwater Ecosystem Service Footprint Model: A Model to Evaluate Regional Freshwater Sustainable Development; A Case Study in Beijing-Tianjin-Hebei, China[J]. Ecological Indicators, 2014, 39: 1-9.
- [64] 郭朝琼, 徐昔保, 舒强. 生态系统服务供需评估方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2086-2096. [GUO Chao-qiong, XU Xi-bao, SHU Qiang. A Review on the Assessment Methods of Supply and Demand of Ecosystem Services[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(6): 2086-2096.]
- [65] CAPRIOLO A, BOSCHETTO R G, MASCOLO R A, et al. Biophysical and Economic Assessment of Four Ecosystem Services for Natural Capital Accounting in Italy[J]. Ecosystem Services, 2020, 46: 101207.
- [66] 高庆彦, 潘玉君, 刘化. 基于 InVEST 模型的大理州生境质量时空演化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(3): 402-408. [GAO Qing-yan, PAN Yu-jun, LIU Hua. Spatial-temporal Evolution of Habitat Quality in the Dali Bai Autonomous Prefecture Based on the InVEST Model[J]. Journal of Ecology and Rural En-

- vironment, 2021, 37(3): 402-408.]
- [67] 李瑾璞, 夏少霞, 于秀波, 等. 基于 InVEST 模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 854-861. [LI Jin-pu, XIA Shao-xia, YU Xiu-bo, et al. Evaluation of Carbon Storage on Terrestrial Ecosystem in Hebei Province Based on InVEST Model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(7): 854-861.]
- [68] 张欣蓉, 王晓峰, 程昌武, 等. 基于供需关系的西南喀斯特区生态系统服务空间流动研究[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3368-3380. [ZHANG Xin-rong, WANG Xiao-feng, CHENG Chang-wu, et al. Ecosystem Service Flows in Karst Area of China Based on the Relationship between Supply and Demand[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3368-3380.]
- [69] 林咏园, 税伟, 李志攀, 等. 基于水-粮食-能源级联关系的水服务流矩阵构建[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 646-652. [LIN Yong-yuan, SHUI Wei, LI Zhi-pan, et al. A Matrix Construction of Water Service Flow Based on Water-energy-food Nexus [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 646-652.]
- [70] NAYEB-YAZDI M, KETABCHY M, SAMPLE D J, et al. An Evaluation of HSPF and SWMM for Simulating Streamflow Regimes in an Urban Watershed [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 118: 211-225.
- [71] MISHRA A, KAR S, RAGHUWANSHI N S. Modeling Nonpoint Source Pollutant Losses from a Small Watershed Using HSPF Model[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(2): 92-100.
- [72] CHEN D S, LI J, YANG X N, et al. Quantifying Water Provision Service Supply, Demand and Spatial Flow for Land Use Optimization: A Case Study in the Yanhe Watershed [J]. Ecosystem Services, 2020, 43: 101117.
- [73] 刘頌, 杨莹, 王云才. 基于矩阵分析的水文调节服务供需关系时空分异研究: 以嘉兴市为例[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1189-1202. [LIU Song, YANG Ying, WANG Yun-cai. Mapping Supply and Demand Differentiation of Hydrological Regulation Service Based on Matrix Analysis: A Case Study of Jiaxing City, Zhejiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1189-1202.]
- [74] HUANG Z X, ZHANG Y L, WANG F F, et al. Advancing a Novel Large-scale Assessment Integrating Ecosystem Service Flows and Real Human Needs: A Comparison between China and the United States[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 128022.
- [75] XU J, XIAO Y, XIE G D, et al. Computing Payments for Wind Erosion Prevention Service Incorporating Ecosystem Services Flow and Regional Disparity in Yanchi County[J]. Science of the Total Environment, 2019, 674: 563-579.
- [76] KLEEMANN J, SCHRÖTER M, BAGSTAD K J, et al. Quantifying Interregional Flows of Multiple Ecosystem Services: A Case Study for Germany[J]. Global Environmental Change, 2020, 61: 102051.
- [77] BETHWELL C, BURKHARD B, DAEDLOW K, et al. Towards an Enhanced Indication of Provisioning Ecosystem[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(1): 269.
- [78] ZHAI T L, ZHANG D, ZHAO C C. How to Optimize Ecological Compensation to Alleviate Environmental Injustice in Different Cities in the Yellow River Basin? A Case of Integrating Ecosystem Service Supply, Demand and Flow[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 75: 103341.
- [79] SHEN J K, WANG Y C. Allocating and Mapping Ecosystem Service Demands with Spatial Flow from Built-up Areas to Natural Spaces [J]. Science of the Total Environment, 2021, 798: 149330.
- [80] 乔旭宁, 张婷, 杨永菊, 等. 渭干河流域生态系统服务的空间溢出及对居民福祉的影响[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 533-544. [QIAO Xu-ning, ZHANG Ting, YANG Yong-ju, et al. Spatial Flow of Ecosystem Services and Impacts on Human Well-being in the Weigan River Basin [J]. Resources Science, 2017, 39(3): 533-544.]
- [81] 任檬, 毛德华. 涟水流域水产出服务供需分析与服务流研究[J]. 生态科学, 2021, 40(2): 186-195. [REN Meng, MAO De-hua. Supply and Demand Analysis and Service Flow Research of Water Production Service in Lianshui River Basin [J]. Ecological Science, 2021, 40(2): 186-195.]
- [82] YANG W. Evaluation of Sustainable Environmental Flows Based on the Valuation of Ecosystem Services: A Case Study for the Baiyang-dian Wetland, China [J]. Journal of Environmental Informatics, 2014, 24(2): 90-100.
- [83] 刘桂环, 王夏晖, 文一惠, 等. 近 20 年我国生态补偿研究进展与实践模式[J]. 中国环境管理, 2021, 13(5): 109-118. [LIU Gui-huan, WANG Xia-hui, WEN Yi-hui, et al. Research Progress, Policy Evolution and Practice of Ecological Compensation in China in the Past 20 Years [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(5): 109-118.]
- [84] 刘春芳, 王佳雪, 许晓雨. 基于生态系统服务流视角的生态补偿区域划分与标准核算: 以石羊河流域为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(8): 157-165. [LIU Chun-fang, WANG Jia-xue, XU Xiao-yu. Regional Division and Standard Accounting of Ecological Compensation from the Perspective of Ecosystem Service Flow: A Case Study of Shiyang River Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(8): 157-165.]
- [85] MA D Q, RHODES J R, MARON M. The Consequences of Coastal Offsets for Fisheries [J]. Journal of Applied Ecology, 2022, 59(4): 1157-1167.
- [86] TANG C H, YI Y J, YANG Z F, et al. Effects of Ecological Flow Release Patterns on Water Quality and Ecological Restoration of a Large Shallow Lake [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 577-590.
- [87] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4121-4131. [JING Yong-cai, CHEN Li-ding, SUN Ran-hao. A Theoretical Research Framework for Ecological Security Pattern Construction Based on Ecosystem Services Supply and Demand [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4121-4131.]
- [88] LI D L, WU S Y, LIU L B, et al. Evaluating Regional Water Security through a Freshwater Ecosystem Service Flow Model: A Case Study in Beijing-Tianjian-Hebei Region, China [J]. Ecological Indicators, 2017, 81: 159-170.
- [89] TIEMANN A, RING I. Towards Ecosystem Service Assessment; De-

- veloping Biophysical Indicators for Forest Ecosystem Services [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108704.
- [90] XU Z H, FAN W G, WEI H J, *et al.* Evaluation and Simulation of the Impact of Land Use Change on Ecosystem Services Based on a Carbon Flow Model: A Case Study of the Manas River Basin of Xinjiang, China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 652: 117–133.
- [91] WU S, WU N, ZHONG B. What Ecosystem Services Flowing from Linpan System: A Cultural Landscape in Chengdu Plain, Southwest China [J]. *Sustainability*, 2020, 12(10): 4122.
- [92] FEURER M, RUEFF H, CELIO E, *et al.* Regional Scale Mapping of Ecosystem Services Supply, Demand, Flow and Mismatches in Southern Myanmar [J]. *Ecosystem Services*, 2021, 52: 101363.
- [93] LESLIE H M. Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services [J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(5): 1264–1265.
- [94] BAGSTAD K J, SEMMENS D J, WINTHROP R, *et al.* Ecosystem Services Valuation to Support Decision Making on Public Lands: A Case Study of the San Pedro River Watershed, Arizona [J]. *Geological Survey*, 2012: 1–105.
- [95] BAGSTAD K J, SEMMENS D J, WINTHROP R. Comparing Approaches to Spatially Explicit Ecosystem Service Modeling: A Case Study from the San Pedro River, Arizona [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 40–50.
- [96] WENDLAND K J, HONZÁK M, PORTELA R, *et al.* Targeting and Implementing Payments for Ecosystem Services: Opportunities for Bundling Biodiversity Conservation with Carbon and Water Services in Madagascar [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(11): 2093–2107.
- [97] 胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的夏漳泉地区生态网络空间优化 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 342–355. [HU Qi-yu, CHEN Song-lin. Optimizing the Ecological Networks Based on the Supply and Demand of Ecosystem Services in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 342–355.]
- [98] 朱文博, 李双成, 朱连奇. 中国省域生态系统服务足迹流动及其影响因素 [J]. *地理研究*, 2019, 38(2): 337–347. [ZHU Wen-bo, LI Shuang-cheng, ZHU Lian-qi. Ecosystem Service Footprint Flow and the Influencing Factors within Provinces, China [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(2): 337–347.]
- [99] 张潇, 路青. 城市尺度下生态系统服务流研究综述 [J]. *环境保护科学*, 2020, 46(6): 55–63. [ZHANG Xiao, LU Qing. Review of Ecosystem Service Flow in the Urban Scale [J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(6): 55–63.]
- [100] 王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展 [J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4213–4222. [WANG Jia-li, ZHOU Wei-qi. Ecosystem Service Flows: Recent Progress and Future Perspectives [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4213–4222.]
- [101] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策 [J]. *地理学报*, 2017, 72(6): 960–973. [PENG Jian, HU Xiao-xu, ZHAO Ming-yue, *et al.* Research Progress on Ecosystem Service Trade-offs: From Cognition to Decision-making [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(6): 960–973.]

作者简介: 杨正忠(1996—), 男, 宁夏银川人, 研究方向为生态系统服务评估。E-mail: 876662195@qq.com

(责任编辑: 李祥敏)