

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0363

周璐红,王盼婷,曹瑞超.2000—2020年延安市土壤侵蚀驱动因素分析及生态安全评价[J].生态与农村环境学报,2022,38(4):511-520.

ZHOU Lu-hong, WANG Pan-ting, CAO Rui-chao. Soil Erosion Driving Factors and Ecological Security Evaluation for Yan'an City from 2000 to 2020[J].

Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(4): 511-520.

2000—2020年延安市土壤侵蚀驱动因素分析及生态安全评价

周璐红^{1,2①}, 王盼婷^{1,2}, 曹瑞超^{2,3} (1. 长安大学土地工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 作为典型的黄土丘陵沟壑区,延安市的土壤侵蚀严重影响了区域的生态环境安全。采用遥感影像、气象、土地利用以及土壤质地等数据,利用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)和地理探测器模型,定量模拟20 a来延安市土壤侵蚀的动态变化和空间格局,探究土壤侵蚀变化的驱动因素及因子间耦合作用程度。同时从生态服务能力、生态敏感性和生态组织结构3个方面构建生态安全综合评价体系进行评价。结果表明:(1)2000和2020年平均侵蚀量模数分别为9 790.40和4 249.82 t·km⁻²·a⁻¹,土壤侵蚀面积和强度呈双下降趋势,近20 a间退耕还林已显现成效,但子长县、延川县和延长县等东部地区还存在剧烈侵蚀,所以沿黄河流域的区县是目前防范治理的优先区域。(2)地理探测器结果显示,影响研究区土壤侵蚀空间格局分布的主控因素是植被覆盖度,土地利用类型和坡度仅次于主控因素,植被覆盖度与坡度因子的交互协同作用大于各单因子对土壤侵蚀的影响。因此,土壤侵蚀区要结合多种因素进行综合治理和防范。(3)相较于延安市2000年较不安全状态,2020年生态安全水平已经上升至安全状态。生态环境整体状况呈现“总体改善,局部好转”的向好趋势,但并没有达到很安全的理想状态,生态安全水平还有一定的提升潜力。基于上述研究,将延安市分为北部水土流失控制区、南部的水源涵养区和黄河沿岸土壤侵蚀敏感区进行分区防治,研究结果可为开展水土保持规划以及生态环境建设提供科学依据。

关键词: 修正的通用土壤流失方程; 退耕还林; 生态安全评价; 延安市

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)04-0511-10

Soil Erosion Driving Factors and Ecological Security Evaluation for Yan'an City from 2000 to 2020. ZHOU Lu-hong^{1,2①}, WANG Pan-ting^{1,2}, CAO Rui-chao^{2,3} (1. College of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Land Consolidation of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China; 3. College of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: As a typical loess hilly and gully region, the intensity of soil erosion in Yan'an seriously affects the ecological environment security of the region. Based on TM and Landsat images, meteorological data, land use and soil texture data, the dynamic changes and spatial patterns of soil erosion in Yan'an in the 20 years from 2000 to 2020 were quantitatively simulated by using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Geodetector model. At the same time, from the ecological service capacity, ecological sensitivity and ecological organizational structure, a comprehensive evaluation system for ecological security was built and an evaluation was conducted. The results show that: (1) The average modulus of soil erosion in 2000 and 2020 were 9 790.40 and 4 249.82 t·km⁻²·a⁻¹, respectively, and the area and intensity of soil erosion showed a double decline trend, and the policy of returning farmland to forest has been effective in the 20 years. However, severe erosion still exists in the eastern part of Zichang County, Yanchuan County and Yanchang County, so the area along the Yellow River basin is currently the priority areas for prevention and governance. (2) The results worked out by geographical detectors show that the main control factors that affect the spatial pattern distribution of soil erosion in the study area is vegetation coverage, followed by the factors of land use type and slope, and the interaction and synergy between vegetation coverage and slope factor is greater than the effect of each single factor on soil erosion. Therefore, the soil erosion area should be comprehensively controlled and prevented by combined consideration on various factors. (3) Com-

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 陕西省土地整治重点实验室开放基金(2019-JC02); 中央高校基本科研业务费专项(300102278113)

① 通信作者 E-mail: zylhzhou@chd.edu.cn

pared with the less safe ecological status of Yan'an in 2000, the level of ecological security had been improved to a safe status in 2020. The overall situation of ecological security is showing a trend of overall improvement, partial optimization, but it has not reached to the ideal status of very safe, and the level of ecological security still has a certain potential for improvement. Based on the above research, Yan'an City could be divided into soil erosion control area in the north, water conservation area in the south and the soil erosion sensitive area along the Yellow River, which can provide a scientific basis for soil and water conservation planning and ecological environment construction.

Key words: revised universal soil loss equation; returning farmland to forest; ecological security evaluation; Yan'an City

土壤侵蚀是地球表面物质运动的一种自然现象^[1],是在自然与人类共同作用下土壤发生迁移的动态过程。作为水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区之一^[2],黄土高原土壤侵蚀不仅影响当地农业生产和粮食安全,而且制约着社会经济的可持续发展,同时也对整个黄河流域生态安全构成威胁^[3]。基于土壤侵蚀和生态环境视角的研究已成为当前人类生存发展普遍关注的问题。因此,定量评估区域土壤侵蚀并分析其影响因素及其生态安全环境状况,对黄河流域沿线地区生态保护与高质量发展具有重要的意义。

多年来,国内外学者在土壤侵蚀过程与机理方面、影响因素和模型模拟方面等多领域进行研究。在此期间,研究工作者通过不断的实践建立了适宜当地的侵蚀预报模型,如通用土壤流失方程(USLE)^[4]、欧洲土壤侵蚀模型(EUROSEM)^[5]、美国水力侵蚀预报模型(WEPP)^[6]以及中国水土流失方程(CSLE)模型^[7]等。但是,由于土壤侵蚀过程的物理模型和分布式模型参数较多,结构较复杂,因此在使用以及推广方面受到一定的限制。随着修正版通用土壤流失方程(RUSLE)在我国的引入以及地理信息系统的迅猛发展,国内学者们在秦岭^[8]和黄土高原^[9]等典型区域进行了研究,证实了RUSLE模型与3S技术的融合成为区域尺度下土壤侵蚀定量估算的重要工具。此外,有关学者在土壤侵蚀驱动因素方面也开展了大量研究,如周自翔等^[10]通过空间叠加法进行相关性分析,结果显示土地利用强度是导致陕北黄土高原土壤侵蚀的重要驱动力;SOKSAMNANG等^[11]以黄土高原为对象分析了近50余a降雨侵蚀力变化对土壤侵蚀的影响,揭示出降雨侵蚀力变化对河流产沙有重要影响,但不是输沙变化的主导因素。从以往研究来看,土壤侵蚀驱动因素的定量研究主要采用传统相关性或回归统计方法^[12],且仅指出了单因子的作用,往往忽视了地理环境和人类活动因子及多因素之间交互作用对土壤侵蚀的影响。与此同时,土壤侵蚀与生态环境安全评价也有不少研究。荣联伟等^[13]以黄土高原山丘区为研究对象,通过构建生态安全的

压力-状态-响应模型进行生态安全评价,发现生态安全综合值总体呈上升趋势;李艳艳等^[14]运用物元模型和综合指数相对比的方法,评价了宁夏回族自治区的生态安全等级整体上呈不断好转的趋势。尽管上述研究均聚焦于生态安全状态变化的评估,但对于评价空间的尺度重视不够^[15],这些研究仅仅依据统计年鉴数据来评价区域生态安全水平,实效性较差。因此,利用遥感技术提供多要素的影像数据,能够动态监测区域生态安全趋势,为生态安全定量化分析提供基础数据支撑。

延安市地处黄土高原腹地,是黄河中游水土流失最严重的地区之一。当前有关延安市土壤侵蚀的研究集中体现在土地利用变化方向,对于土壤侵蚀空间分布与环境因子的关系和生态安全评价关注较少。因此,笔者以延安市为对象,基于RUSLE模型对延安市土壤侵蚀的时空动态变化情况进行定量分析,借助地理探测器模型探讨驱动因素对区域土壤侵蚀空间分布的影响程度,在此基础上评价研究区的生态安全状态,结果可为水土保持综合治理和生态环境保护政策提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

延安市位于黄土高原腹地(35°21'~37°31' N, 107°41'~110°31' E),北接榆林市,南连铜川、渭南、咸阳市,东西分别与山西省、甘肃省为邻。总面积约3.7万km²,主要为丘陵沟壑地貌,地表支离破碎,沟壑纵横,植被稀少,是我国退耕还林还草的重点区域。地势西北高东南低,平均海拔1200m左右,主要山脉有北部白于山、西部子午岭、东南部黄龙山及纵贯本区中部的崂山(图1);属温带大陆性季风气候区,北部为半干旱区,南部为半湿润区,夏季温热多雨,冬季寒冷干燥,年均降水量500mm左右;境内河流以北洛河、延河、清涧河及无定河为主。

1.2 数据来源

研究数据包括Landsat影像、数字高程模型(DEM)、气象、土地利用、植被净初级生产力、土壤

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m, \quad (9)$$

$$m = \begin{cases} 0.5, & \beta \geq 5\% \\ 0.4, & 3\% \leq \beta < 5\% \\ 0.3, & 1\% \leq \beta < 3\% \\ 0.2, & \beta < 1\% \end{cases} \quad (10)$$

式(8)~(10)中, θ 为坡度, $(^\circ)$; λ 为坡面的水平投影长度, m ; m 为坡长指数; β 为细沟侵蚀与面蚀的比值。

(4)植被覆盖因子(C):用来反映植被覆盖和管理措施对土壤侵蚀的影响,其值介于0~1之间。采用蔡崇法等^[20]建立的植被覆盖度与植被覆盖度因子之间的关系来估算研究区2000和2020年的植被覆盖度因子值。

$$C = \begin{cases} 1, & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f, & 0 < f \leq 78.3\% \\ 0, & f > 78.3\% \end{cases} \quad (11)$$

$$f = \frac{N_{\text{NDVI}} - N_{\text{min}}}{N_{\text{max}} - N_{\text{min}}} \quad (12)$$

式(11)~(12)中, f 为植被覆盖度, $\%$; N_{NDVI} 为归一化植被指数; N_{min} 和 N_{max} 分别为归一化植被指数的最大值和最小值。

(5)土壤保持工程措施因子(P):采用特定保持措施下的土壤流失量与相应未实施保持措施的顺坡耕作地块的土壤流失量之比。在应用RUSLE模型时, P 因子值是最难确定的因子,也是模型输入参数中可靠性最低的参数。 S 因子的取值参照了覃杰香等^[21]的研究成果,对研究区不同土地利用类型进行赋值,其中林地、草地、未利用地的 $S=1$;水域和建筑用地的 $P=0$;耕地的坡度不同, S 值不同,当坡度分别为 $\leq 5^\circ$ 、 $>5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $>10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $>15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $>20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $>25^\circ$ 时, S 值分别为0.100、0.221、0.305、0.575、0.705、0.800。

1.3.2 地理探测器模型

地理探测器是由王劲峰等^[22]开发的一种新型空间分析模型,利用统计学原理探测某地理属性与其解释因子之间的关系,主要包括风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互探测器。相比传统的相关性和主成分分析,它不仅可以分析各个驱动因子对地理要素的解释力,而且能够揭示驱动因子两两之间的交互作用对该地理要素的影响,已被应用于多地区的土壤侵蚀定量研究^[23]。

(1)因子探测:可以探测因变量的空间分异性,以及自变量对因变量的解释力,其大小用 q 值来

衡量。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^D N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{S_{\text{SW}}}{S_{\text{ST}}}, \quad (13)$$

$$S_{\text{SW}} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad (14)$$

$$S_{\text{ST}} = N \sigma^2. \quad (15)$$

式(13)~(15)中, D 为自变量或因变量的分层,即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值的方差。 S_{SW} 和 S_{ST} 分别为层内方差之和和全区总方差, q 的值域为 $[0,1]$ 。

(2)交互作用探测:判断风险因子 X 在共同作用时是否会增加或者减弱对因变量 Y 的解释力,或风险因子 X 对因变量 Y 的影响是相互独立的。

(3)风险探测:一般判断因子区域间的属性均值是否有显著的差别,以此识别土壤侵蚀高风险区。

(4)生态探测:可以比较影响因子 X 对属性 Y 的空间分布的影响是否有显著的差异。

地理探测器要求输入因变量为数值数据,自变量为类别数据。因此参照文献^[24],将降雨侵蚀力、人口密度、生产总值、高程等数据按自然断点法离散化为6类,土地利用和土壤数据按类别分类,植被覆盖度数据分为 ≤ 0.3 、 $>0.3 \sim 0.4$ 、 $>0.4 \sim 0.5$ 、 $>0.5 \sim 0.6$ 、 $>0.6 \sim 0.7$ 、 $>0.7 \sim 0.8$ 、 $>0.8 \sim 0.9$ 、 $>0.9 \sim 1$ 这8类,坡度分为 $\leq 5^\circ$ 、 $>5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $>10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $>15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $>20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $>25^\circ$ 这6类,并将土壤侵蚀量及驱动因子分类值赋予 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的网格点上,最终探测各因素的 q 值来分析驱动因子对土壤侵蚀的解释力。

1.3.3 生态安全综合评价

结合生态学中活力-组织力-恢复力-生态服务能力结构,参照文献^[25],依据综合性、科学性和实用性的原则,从生态服务能力-生态敏感性-生态组织结构3个维度构建评价指标体系(表1)。其中生态服务能力通过选取4项指标反映生态系统的能量以及满足人类需求的服务能力;生态敏感性通过选取7项指标体现出生态系统抵御人为干扰和自然灾害影响的能力;生态组织结构是从景观生态学角度出发,选取6项指标揭示区域生态系统的复杂性和连通性。生态安全的综合评价能够全面反映生态系统的完整性和健康性以及当地生态环境的现状水平。

生态安全评价的基本过程包括:(1)利用空间欧式距离法和景观指数移动窗口法预处理指标层

数据,用极差标准化法对所有指标进行归一化处理。(2)根据突变理论的互补准则,选用合适的突变模型(表2),按其均值计算生态安全综合评价指数。(3)参照文献[26-27],突变级数法对区域生态系统评估结果较为可靠,但突变级数法计算后的数值不能直接定义生态安全评价标准,故使用分数转换法将常规等级中的各级安全指数转换为突变级数法下的各级综合评价价值,最终得出延安市生态安全等级标准(表3)。

表1 延安市生态安全评价指标体系

Table 1 The index system of ecological security assessment for Yan'an City

总目标层	目标层	准则层	指标层		
生态安全指数	生态服务能力	活力	植被覆盖度		
			植被初级净生产力		
			生态服务价值		
	生态敏感性	社会经济压力	服务	土壤保持指数	
				全球夜光数据	距城市距离
					距道路距离
	自然生态	土地覆被	景观破碎度	土地覆被	
				降雨量	
				坡度	
	生态组织结构	景观连通性	景观破碎度	高程	
斑块密度				斑块密度	
				斑块边缘密度	
面积加权平均形状指数				香农多样性指数	
景观连通性	景观破碎度	景观破碎度	斑块平均距离		
			斑块连接度		

表3 延安市生态安全评价等级标准

Table 3 Grade standard of Yan'an City ecological security assessment

等级	等级名称	变级数法				对应的常规值
		综合隶属度	生态服务能力(A1)	生态敏感性(A2)	生态组织结构(A3)	
I	理想状态	>0.987 4	>0.962 1	>0.969 3	>0.967 3	>0.8
II	较安全	>0.971 5~0.987 4	>0.915 7~0.962 1	>0.931 5~0.969 3	>0.927 0~0.967 3	>0.6~0.8
III	安全	>0.949 8~0.971 5	>0.854 5~0.915 7	>0.881 3~0.931 5	>0.883 6~0.927 0	>0.4~0.6
IV	较不安全	>0.914 5~0.949 8	>0.750 4~0.854 5	>0.803 3~0.881 3	>0.790 5~0.873 6	>0.2~0.4
V	很不安全	<0.914 5	<0.750 4	<0.803 3	<0.790 5	<0.2

从土壤侵蚀面积(图2)来看,2020年土壤中度侵蚀及以上面积与2000年相比在不断减小,微度侵蚀面积却增加至57.54%。从土壤侵蚀等级转移变化(表4)来看,土壤侵蚀强度降级、升级和不变的面积占比分别为53.71%、7.19%和39.11%,其中轻度侵蚀、中度侵蚀和剧烈侵蚀向微度侵蚀转化的面积最大。

从土壤侵蚀的空间分布(图3)来看,延安市南

表2 突变模型及相关公式

Table 2 Catastrophe model and correlative formulas

模型名称	控制变量(X)数量	响应变量(Y)归一化公式
尖点突变模型	2	$Y = (\sqrt{X_1} + \sqrt[3]{X_2})/2$
燕尾突变模型	3	$Y = (\sqrt{X_1} + \sqrt[3]{X_2} + \sqrt[4]{X_3})/3$
蝴蝶突变模型	4	$Y = (\sqrt{X_1} + \sqrt[3]{X_2} + \sqrt[4]{X_3} + \sqrt[5]{X_4})/4$

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀的时空变化分析

采用RUSLE模型对延安市2000和2020年土壤侵蚀情况分别进行模拟,结果为9 790.40和4 249.82 t·km⁻²·a⁻¹,总降幅达56.59%,近20年间土壤侵蚀模数呈明显下降趋势。根据《中国河流泥沙公报》所提供的甘谷驿站和状头站集水流域的多年平均输沙模数(4 630 t·km⁻²·a⁻¹),与RUSLE模型计算的2020年土壤侵蚀模数进行对比,结果多了8%,说明利用RUSLE模型计算出的土壤侵蚀模数结果可以用于下一步强度分级分析^[28]。对计算的土壤侵蚀模数参照《土壤侵蚀分类分级标准》^[29],将土壤侵蚀级别划分为微度侵蚀(≤1 000)、轻度侵蚀(>1 000~2 500)、中度侵蚀(>2 500~5 000)、强度侵蚀(>5 000~8 000)、极强度侵蚀(>8 000~15 000)、剧烈侵蚀(>15 000),单位为t·km⁻²·a⁻¹。为了进一步分析研究区土壤侵蚀强度的变化,分别统计不同土壤侵蚀强度面积占比并制成土壤侵蚀强度转移矩阵。

北部土壤侵蚀空间分布差异较大。土壤侵蚀强度较高区域集中于北部的黄土丘陵沟壑区,梁峁起伏较大且植被覆盖稀疏;而南部地区土壤侵蚀强度较低,此区域由植被覆盖度较高的石质低山丘陵沟谷及平坦的黄土塬沟谷地貌组成,自然本底环境相对较好。2000年水土流失最严重的是吴起县、志丹县、安塞县、子长县、延长县和延川县等北部区域,主要以剧烈侵蚀为主。随着“退耕还林(草)”政策

的落实,2020 年研究区内土壤侵蚀强度均呈现大幅下降趋势,北部大面积连片分布的剧烈侵蚀区和南部沿洛河流域零星分布的剧烈侵蚀区已经相继消失。但东部区域还存在剧烈侵蚀的风险,所以沿黄河流域仍是目前优先治理的重要区域。总的来说,近 20 a 依托退耕还林、天然林保护、“三北”防护林等省市重点造林绿化工程,不断加速国土绿化进程,土壤侵蚀面积和强度实现双下降,说明在此期间水土保持能力有了很大提升,退耕还林已经显现成效,这与李宗善等^[30]在黄土高原水土流失治理现状得出的结果一致。

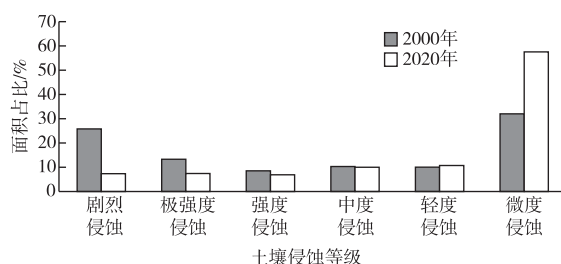


图 2 2000—2020 年延安市不同土壤侵蚀级别面积占比

Fig. 2 Proportion of the area of different soil erosion levels in Yan'an City in 2000-2020

表 4 2000—2020 年延安市土壤侵蚀面积占比转移矩阵

Table 4 The transfer matrix of proportion of soil erosion area in Yan'an City in 2000-2020 %

2000 年土壤侵蚀程度	2020 年土壤侵蚀程度					
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
微度	29.81	1.07	0.53	0.24	0.18	0.21
轻度	7.30	1.23	0.69	0.33	0.26	0.22
中度	6.22	1.65	1.10	0.53	0.43	0.38
强度	4.06	1.53	1.25	0.66	0.54	0.48
极强度	4.66	2.31	2.38	1.52	1.33	1.10
剧烈	5.49	2.95	4.04	3.63	4.70	4.97

2.2 土壤侵蚀驱动因素分析

通过因子探测器计算各驱动因子对土壤侵蚀程度影响的大小,结果表明驱动因子均通过显著性检验($P < 0.0001$)。2000 年土壤侵蚀驱动因子的 q 值按大小排列为降雨侵蚀(0.222 2) > 植被覆盖度(0.221 0) > 土地利用类型(0.201 7) > 坡度(0.181 1) > 生产总值(0.109 3) > 人口密度(0.046 2) > 土壤质地(0.032 5) > 高程(0.015 5)。2020 年土壤侵蚀驱动因子的 q 值按大小排列为植被覆盖度(0.232 3) > 土地利用类型(0.054 2) > 坡度(0.043 2) > 人口密度(0.038 1) > 生产总值(0.036 8) > 降雨侵蚀(0.033 1) > 高程(0.027 8) > 土壤质地(0.015 5)。结合生态探测器的显著性差

异,显示影响研究区土壤侵蚀空间格局分布的主控因素是植被覆盖度,土地利用类型和坡度仅次于主控因素。相较于 2000 年,2020 年的降雨侵蚀因子的 q 值解释力明显变小,原因是延安市属半干旱地区,年际间降水变化率大且集中,在退耕还林前期降雨因素对土壤侵蚀产沙产流有着严重的影响。但随着政策的落实和防治意识的提高,人为活动的驱动因子在不断增强,极大程度上通过植树育林的方法恢复植被,以此来遏制水土流失。因此,综合考虑人类活动在水土保持治理工程时的积极影响是必要的,这与王占礼^[31]的研究结果相符。

交互探测结果表明,各因子间对土壤侵蚀的协同影响程度远高于单因子解释力。其中,影响土壤侵蚀空间分布解释能力排在前列的为植被覆盖度与其他因子的协同作用,尤其与坡度之间的交互作用比单因子增强约 10 倍,两者之间非线性增强的交互影响力增强了对土壤侵蚀的抑制效果。风险探测结果显示,土地利用类型为未利用地、植被覆盖小于 40%、坡度大于 25° 、降雨侵蚀力为 $1\ 336 \sim 1\ 629\ \text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 的土壤侵蚀强度均值达到最大,即为土壤侵蚀高风险区。可以看出,各驱动因子内部的不同类别区间之间存在显著性差异。综上所述,土壤侵蚀是受多因素综合作用的复杂过程。因此,建议在防范和修复的过程中不仅要重视主导因素,更需要区域协调、综合治理,如针对坡度较大和未利用地等敏感区域,采取坡改梯和植树造林等措施来提高植被覆盖面积,加强当地涵养水源和水土保持能力。

2.3 生态安全评价

由图 4 和表 5 可知,2000—2020 年延安市生态安全指数由 0.93 上升到 0.95,从 IV 较不安全等级上升到 III 安全等级状态。延安市安全区域的面积由 9 321.20 扩张至 13 373.26 km^2 ,较不安全区域的面积从 22 078.80 下降至 19 551.30 km^2 。总体来看,生态安全状况呈整体改善,局部好转的向好趋势。从各区县计算的均值分布来看,2000 和 2020 年均没有很不安全状态区域,2000 年安全状态主要分布于黄陵县、黄龙县,其余县为较不安全状态。2020 年安全状态区域增加了富县、甘泉县和宜川县,其余县均为较不安全状态。各区县的生态安全均值整体处于上升趋势,但仍有区县处于较不安全状态,说明区域生态安全问题并未得到完全解决。为客观阐释延安市生态安全水平的变化特征,针对目标层的生态安全均值进行分析计算。结果表明,延安市的生态服务能力均值从 0.76 增加到 0.82,

上升的幅度变化最大。这是由于延安市开展了多种生态修复工程,在很大程度上提高了植被覆盖率,使生态系统的活力和土壤保持服务能力得以提升,维持了研究区的生态系统平衡,体现出生态服务能力对于提升区域生态安全水平的突出贡献。然而,随着城镇化的快速推进,社会经济发展和城市建设不断扩张,各类连通景观被分割,斑块破碎

化有所增加,加之生态安全的本底值较低,使得生态敏感能力和生态组织结构能力的生态安全指数有所波动,今后深度优化和改善生态环境的难度进一步加大。总之,延安市生态安全状况有了一定的改善,但没有达到理想状态,生态安全水平还有提升的空间。

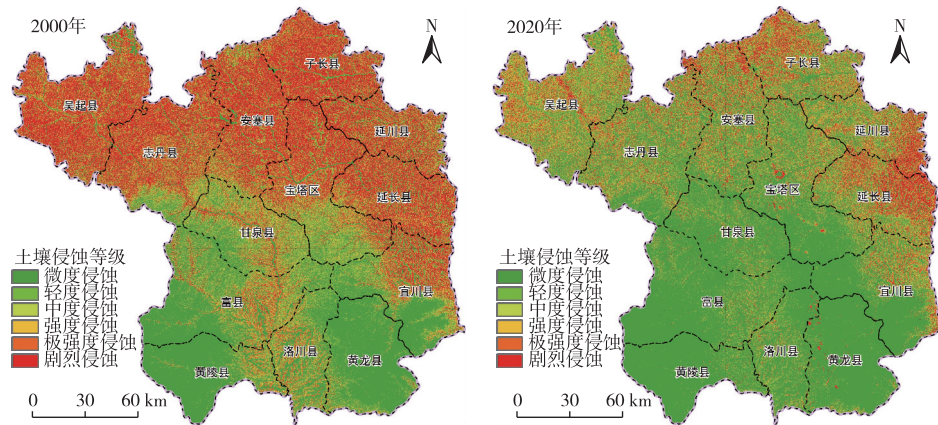


图 3 2000—2020 年延安市土壤侵蚀强度等级分布

Fig. 3 Distribution of soil erosion intensity grades in Yan'an City in 2000–2020

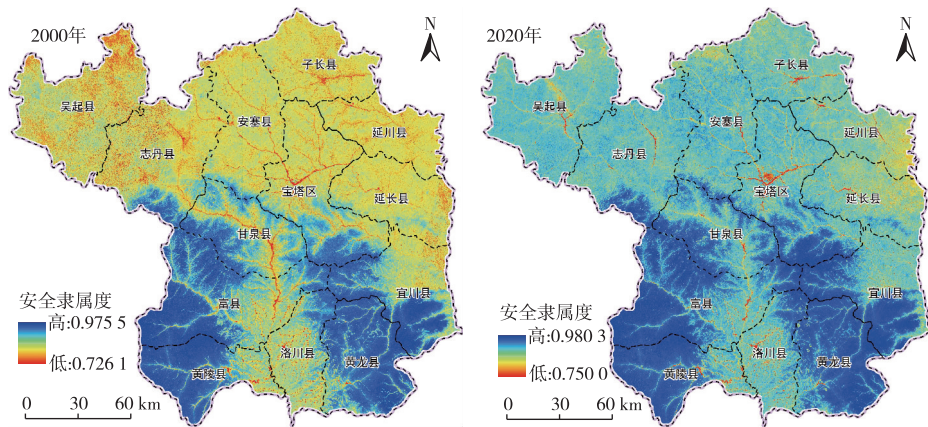


图 4 2000—2020 年延安市生态安全评价

Fig. 4 Ecological Security Evaluation of Yan'an City in 2000–2020

表 5 2000—2020 年延安市生态安全评价面积汇总

Table 5 Area grade of ecological security assessment in Yan'an City in 2000–2020

等级	2000 年		2020 年		增减量/ km ²
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	
理想状态 (I)	0	0	0	0	0
较安全 (II)	9.32	0.03	941.51	2.66	932.19
安全 (III)	9 321.20	26.31	13 373.26	37.75	4 052.06
较不安全 (IV)	22 078.80	62.32	19 551.30	55.19	-2 527.50
很不安全 (V)	4 018.38	11.34	1 561.16	4.41	-2 457.22

3 讨论

近几年,“3S”技术与 RUSLE 模型结合常应用于水土保持领域,极大地促进了大尺度区域土壤侵蚀的评估以及土地资源的合理配置。作为国内外最流行的土壤侵蚀模型,RUSLE 模型最先是应用并实现于小尺度(坡面、小流域)区域。为了宏观监测大尺度区域土壤侵蚀的总体变化情况,有学者提出采用数学模型和计算机模拟作为工具,通过转换空

间粒度和幅度来研究土壤侵蚀过程及其空间变异^[32]。笔者通过查阅大量文献,选取适合大尺度区域参数修正的研究成果^[33-34]和多源遥感数据来支持区域土壤侵蚀综合定量分析,并将研究结果与相关文献进行了对比讨论,与汪邦稳等^[35]在2000年延河流域计算的年均土壤侵蚀模数($8\ 894\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和段艺芳等^[36]在2000—2015年延安市计算的土壤侵蚀量($5\ 448.06\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)结果较一致,且分布规律与变化规律大致相似。但是,由于模型预测时未考虑每个单元侵蚀量在输移过程中的沉积作用以及淤地坝等工程措施的拦截作用^[37],所以计算的侵蚀量和观测站输沙量有一定的差距。在研究影响侵蚀过程的多个因子中,发现坡度作为控制侵蚀强度的重要因素却在研究中的解释力不大,这主要是因为土壤侵蚀是一个具有明显尺度效应的过程,不同尺度土壤侵蚀发生的过程以及主要影响因素都有所不同。在大尺度土壤侵蚀背景条件的协同效应下,宏观因子的控制作用逐渐突显,倪九派等^[32]认为某种因子的明显变化只发生在一定大小的空间尺度内,一旦空间尺度有所变化,那么原有的统计规律也会随之变化。最后,笔者研究还存在一些不足之处:在应用RUSLE模型进行定量分析时,虽然选出适合研究区侵蚀因子估算的方法,但仍有因子数据获取困难,采用了简易的算法来实现。所以,在之后研究中需要进一步优化区域土壤侵蚀的各个因子的计算方法,在保证数据精度的前提下,建立适合延安市的侵蚀模型。同时,有必要依托小区域径流的实测数据来检验模型结果,以确保研究结论的准确程度。

延安市的土壤侵蚀类型是以地表水为主要侵蚀力,从当地土壤侵蚀程度和生态安全环境两者之间的关系分析,发现水土流失是造成生态环境恶化的主要原因。因此,针对土壤侵蚀影响带来的问题,提出了以下建议:将延安市分为北部水土流失控制区、南部生态涵养区和东部黄河沿岸土壤侵蚀敏感区进行分区治理。水土流失控制区包括子长县、安塞县、志丹县、吴起县和宝塔区。此区域优先以小流域为单元进行综合治理,通过变缓坡为梯田,加大力度实施退耕还林以及采取生物和工程相结合等治理措施来加强对生态环境的保护和恢复。南部的生态涵养区包括黄陵县、黄龙县、富县、甘泉县和洛川县。此区域主要以封禁为主,人工乔灌树种补植为辅,严守生态保护红线,制订防止破坏植被的严格监督和管理措施。同时,注重发展特色种植业和旅游产业来提高农业生产的高效和环境的

可持续,实现区域“三生”协调发展。土壤侵蚀敏感区包括黄河流经的延川县、延长县和宜川县。此区域应坚持生态保护优先的理念,通过升级淤地坝等拦泥蓄水工程、沟造地工程以及建设沿黄生态廊道的景观修复和保护工程等途径来防范水土流失和改善区域的生态环境。

4 结论

(1)2000和2020年延安市土壤平均侵蚀模数分别为 $9\ 790.40$ 和 $4\ 249.82\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,土壤侵蚀强度下降面积占比为53.71%,延安市土壤侵蚀面积和强度呈双下降趋势。同时,延安市南北部土壤侵蚀空间分布差异较大,北部大面积连片分布的剧烈侵蚀区和南部沿洛河流域零星分布的剧烈侵蚀区已经相继消失,但子长县、延川县和延长县的东部仍是防范水土流失的重点区域。

(2)影响延安市土壤侵蚀空间分布格局的主控因素是植被覆盖度,土地利用类型和坡度仅次于主控因素。交互作用探测器表明植被覆盖与坡度因子的交互作用都大于各单因子对土壤侵蚀的影响。生态探测器结果显示,土地利用类型为未利用地,植被覆盖小于40%、坡度大于25°、降雨侵蚀力在 $1\ 336\sim 1\ 629\ \text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间的区域是土壤侵蚀高风险区。因此,针对土壤侵蚀高风险区的防范和治理要重视多种因素的综合影响。

(3)2000—2020年延安市生态安全评价由较不安全等级上升到安全等级,生态安全状况总体呈改善,局部好转的向好趋势。但是,延安市生态安全还未达到最安全的理想状态,还应注意景观破碎化的威胁。

(4)水土流失是造成生态环境恶化的主要原因。因此,土壤侵蚀区域通过采取因地制宜的治理是改善生态环境的关键。针对研究区主要生态问题,建议将延安市分为北部水土流失控制区,南部的水源涵养区和黄河沿岸土壤侵蚀敏感区进行分区防治。

参考文献:

- [1] 关君蔚.水土保持原理[M].北京:中国林业出版社,1996:122-126.
- [2] PHINZI K,NGETAR N S.The Assessment of Water-Borne Erosion at Catchment Level Using GIS-Based RUSLE and Remote Sensing: A Review[J].International Soil and Water Conservation Research,2019,7(1):27-46.
- [3] 王帅,傅伯杰,武旭同,等.黄土高原社会-生态系统变化及其可持续性[J].资源科学,2020,42(1):96-103.[WANG Shuai,

- FU Bo-jie, WU Xu-tong, *et al.* Dynamics and Sustainability of Social-Ecological Systems in the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2020, 42(1): 96-103.]
- [4] OLSON T C, WISCHMEIER W H. Soil-Erodibility Evaluations for Soils on the Runoff and Erosion Stations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1963, 27(5): 590-592.
- [5] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R E, *et al.* The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport from Fields and Small Catchments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(6): 527-544.
- [6] NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J, *et al.* A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology [J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [8] 郭思琪, 韩磊, 赵永华, 等. 秦岭地区土壤侵蚀时空变化及景观格局[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2167-2176. [GUO Si-qi, HAN Lei, ZHAO Yong-hua, *et al.* Spatio-temporal Variation and Landscape Pattern of Soil Erosion in Qinling Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(7): 2167-2176.]
- [9] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土壤侵蚀控制制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J]. *地理学报*, 2015, 70(9): 1503-1515. [GAO Hai-dong, LI Zhan-bin, LI Peng, *et al.* The Capacity of Soil Loss Control in the Loess Plateau Based on Soil Erosion Control Degree[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1503-1515.]
- [10] 周自翔, 任志远. GIS支持下的土地利用与土壤侵蚀强度相关性研究: 以陕北黄土高原为例[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(6): 629-634. [ZHOU Zi-xiang, REN Zhi-yuan. Correlation between Land Use and Soil Erosion Intensities Based on GIS: Taking Loess Plateau in North Shaanxi Province as an Example [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(6): 629-634.]
- [11] SOKSAMNANG K, 何洪鸣, 赵宏飞, 等. 黄土高原50余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 1-7. [SOKSAMNANG K, HE Hong-ming, ZHAO Hong-fei, *et al.* Analysis of Rainfall Erosivity Change and Its Impacts on Soil Erosion on the Loess Plateau over more than 50 Years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 1-7.]
- [12] WANG Huan, GAO Jiang-bo, HOU Wen-juan. Quantitative Attribution Analysis of Soil Erosion in Different Geomorphological Types in Karst Areas: Based on the Geodetector Method[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(2): 271-286.
- [13] 荣联伟, 师学义, 高奇, 等. 黄土高原山丘区土地生态安全动态评价及预测[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 210-216. [RONG Lian-wei, SHI Xue-yi, GAO Qi, *et al.* Dynamic Evaluation and Prediction on Land Ecological Security in Hilly Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 210-216.]
- [14] 李艳艳, 高敏华, 孜比布拉·司马义. 民族自治区土地生态安全时空动态评价: 以宁夏回族自治区为例[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(4): 107-117. [LI Yan-yan, GAO Min-hua, CUMINBIBRA Ismayil. Spatio-Temporal Dynamic Evaluation of Land Ecological Security in Ethnic Autonomous Regions: A Case Study in the Ningxia Hui Autonomous Region[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2019, 55(4): 107-117.]
- [15] 杨勤科, 李锐. 我国区域土壤侵蚀与环境研究述评[J]. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(6): 90-94. [YANG Qin-ke, LI Rui. A Review on the Research of Regional Soil Erosion and Environment in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2006, 16(6): 90-94.]
- [16] RENARD K G. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [R] // USDA Handbook. Washington DC, USA: US Department of Agriculture, 1997.
- [17] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711. [ZHANG Wen-bo, XIE Yun, LIU Bao-yuan. Rainfall Erosivity Estimation Using Daily Rainfall Amounts[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705-711.]
- [18] WILLIAMS J R. The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) Model: A Case History[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1990, 329(1255): 421-428.
- [19] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. *自然资源学报*, 1999, 14(4): 345-350. [LIU Bao-yuan, ZHANG Ke-li, JIAO Ju-ying. Soil Erodibility and Its Use in Soil Erosion Prediction Model[J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4): 345-350.]
- [20] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24. [CAI Chong-fa, DING Shu-wen, SHI Zhi-hua, *et al.* Study of Applying USLE and Geographical Information System IDRISI to Predict Soil Erosion in Small Watershed [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.]
- [21] 覃杰香, 王兆礼. 基于GIS和RUSLE的从化市土壤侵蚀量预测研究[J]. *人民珠江*, 2011, 32(2): 37-41.
- [22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. [WANG Jin-feng, XU Cheng-dong. Geodetector: Principle and Prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [23] 邹雅婧, 闫庆武, 谭学玲, 等. 渭北矿区土壤侵蚀评估及驱动因素分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(6): 1387-1394. [ZOU Ya-jing, YAN Qing-wu, TAN Xue-ling, *et al.* Evaluation of Soil Erosion and Driving Factors Analysis in Weiwei Mining Area[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(6): 1387-1394.]
- [24] 贾磊, 姚顺波, 邓元杰, 等. 渭河流域土壤侵蚀时空特征及其地理探测[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(3): 305-314. [JIA Lei, YAO Shun-bo, DENG Yuan-jie, *et al.* Temporal and Spatial Characteristics of Soil Erosion Risk in Weihe River Basin and Its Geographical Exploration [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(3): 305-314.]
- [25] 蔡忠亮, 魏媛, 徐智熙, 等. 面向生命共同体健康的生态安全评价研究: 以湖北省三峡库区为例[J]. *地理信息世界*, 2019, 26(4): 7-12. [CAI Zhong-liang, WEI Yuan, XU Zhi-xi, *et al.* An Ecological Security Assessment Method on Life Community Health: A Case Study of Three Gorges Reservoir Area in Hubei Province [J]. *Geomatics World*, 2019, 26(4): 7-12.]

- [26] 麻秋玲,林惠花.基于突变级数法的福州市生态安全评价[J].福建师范大学学报(自然科学版),2013,29(3):118-124.[MA Qiu-ling, LIN Hui-hua. Application of Catastrophe Progression Method in Assessing Urban Eco-Security of Fuzhou City [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2013,29(3):118-124.]
- [27] 李艳,陈晓宏,张鹏飞.突变级数法在区域生态系统健康评价中的应用[J].中国人口·资源与环境,2007,17(3):50-54.[LI Yan, CHEN Xiao-hong, ZHANG Peng-fei. Application of Catastrophe Progression Method to Evaluation of Regional Ecosystem Health [J]. China Population Resources and Environment, 2007, 17(3):50-54.]
- [28] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].地理学报,2019,74(9):1835-1852.[LIU Wen-chao, LIU Ji-yuan, KUANG Wen-hui. Spatiotemporal Patterns of Soil Protection Effect of the Grain for Green Project in Northern Shaanxi [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9):1835-1852.]
- [29] SL 190—2007,土壤侵蚀分类分级标准[S].
- [30] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.[LI Zong-shan, YANG Lei, WANG Guo-liang, et al. The Management of Soil and Water Conservation in the Loess Plateau of China: Present Situations, Problems, and Counter-Solutions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7398-7409.]
- [31] 王占礼.中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J].农业工程学报,2000,16(4):32-36.[WANG Zhan-li. Analyses of Affecting Factors of Soil Erosion and Its Harms in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4):32-36.]
- [32] 倪九派,魏朝富,谢德体.土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应[J].生态学报,2005,25(8):2061-2067.[NI Jiu-pa, WEI Chao-fu, XIE De-ti. Effects of Spatial Scale on the Quantitative Estimation of Soil Erosion [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8):2061-2067.]
- [33] 赵文武,傅伯杰,郭旭东.多尺度土壤侵蚀评价指数的技术与方法[J].地理科学进展,2008,27(2):47-52.[ZHAO Wen-wu, FU Bo-jie, GUO Xu-dong. The Methods and GIS Techniques for Calculating Multiscale Soil Loss Evaluation Index [J]. Progress in Geography, 2008, 27(2):47-52.]
- [34] 冯磊,孙保平,李锦荣,等.GIS方法和USLE模型在退耕还林区土壤侵蚀动态变化评价中的运用:以甘肃定西市安定区为例[J].湖南农业科学,2011(11):82-85,89.[FENG Lei, SUN Bao-ping, LI Jin-rong, et al. Application of GIS and USLE in Evaluation of Dynamic Changes of Dynamic Changes of Soil Erosion in Areas of Returning Farmland to Forest: A Case Study in Anding District, Dingxi City, Gansu Province [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(11):82-85, 89.]
- [35] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等.延河流域退耕前后土壤侵蚀强度的变化[J].中国水土保持科学,2007,5(4):27-33.[WANG Bang-wen, YANG Qin-ke, LIU Zhi-hong, et al. Changes of Soil Erosion Intensity Due to Conversion of Farmland to Forest and Grassland in Yanhe River Basin [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(4):27-33.]
- [36] 段艺芳,任志远,周晓,等.延安市土地生态风险时空格局演变研究[J].国土资源遥感,2020,32(1):120-129.[DUAN Yi-fang, REN Zhi-yuan, ZHOU Xiao, et al. Spatio-Temporal Variation in the Land Ecological Risk of Yan'an City [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(1):120-129.]
- [37] 翟睿洁,赵文武,贾立志.基于RUSLE、InVEST和USPED的土壤侵蚀量估算对比研究:以陕北延河流域为例[J].农业现代化研究,2020,41(6):1059-1068.[ZHAI Rui-jie, ZHAO Wen-wu, JIA Li-zhi. A Comparative Study of Soil Erosion Estimation Based on RUSLE, InVEST and USPED Models: A Case Study of the Yanhe River Basin in Northern Shaanxi [J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41(6):1059-1068.]

作者简介:周璐红(1975—),女,陕西宝鸡人,副教授,博士,研究方向为土地资源管理及评价。E-mail: zylhzhou@chd.edu.cn

(责任编辑:陈昕)