

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.015

杨严攀, 田培, 沈晨竹, 等. 基于 RUSLE 模型和地理探测器的鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 91-103.

YANG Yanpan, TIAN Pei, SHEN Chenzhu, et al. Vulnerability assessment of soil erosion in southwestern Hubei Province based on RUSLE model and geographic detector[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 91-103.

基于 RUSLE 模型和地理探测器的鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价

杨严攀^{1,2}, 田培^{1,2}, 沈晨竹^{1,2}, 平耀东^{1,2}, 贾婷惠^{1,2}, 乐雪^{1,2}, 黄建武^{1,2}

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要: [目的] 水土流失是鄂西南突出的生态问题, 合理评估该区域的土壤侵蚀脆弱性, 并探究其驱动机制是采取有效水土保持措施的前提。[方法] 从人地耦合系统视角分析自然和社会经济因素对鄂西南土壤侵蚀的影响, 从暴露度、敏感性和适应能力 3 个方面构建了鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价指标体系, 并采用综合赋权法确定指标权重。[结果] (1) 2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀脆弱性总体上呈现先降低后升高的趋势, 强烈及以上强度的土壤侵蚀脆弱性呈现零星的碎片化分布格局, 且主要集中在鄂西南的中南部和东部宜昌市辖区的西部地区; (2) 研究区敏感性最高的区域集中在海拔 800~1 500 m, 敏感性在坡度 25°~35° 最大, 并呈现出向两侧递减的趋势, 当坡度 > 15° 时, 较高及以上敏感性面积急剧增加; (3) 较高及以上土壤侵蚀脆弱性高于土壤侵蚀强度, 较低及以下土壤侵蚀脆弱性低于土壤侵蚀强度, 土壤侵蚀脆弱性与土壤侵蚀强度存在协同变化趋势; (4) 土壤侵蚀脆弱性的分布格局是多因素协同作用造成的, 地理探测器的分析表明坡度、植被覆盖度、教育质量和城镇化率对土壤侵蚀脆弱性的解释力较强。[结论] 未来需要高度重视对坡度 > 15° 地区植被覆盖的保护, 并通过提高当地的教育质量, 加强水土保持的宣传力度, 提升当地居民的水土保持意识。

关键词: 鄂西南; 土壤侵蚀脆弱性; RUSLE 模型; 地理探测器; 时空变化

中图分类号: X825

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0091-13

Vulnerability Assessment of Soil Erosion in Southwestern Hubei Province Based on RUSLE Model and Geographic Detector

YANG Yanpan^{1,2}, TIAN Pei^{1,2}, SHEN Chenzhu^{1,2}, PING Yaodong^{1,2}, JIA Tinghui^{1,2},

YUE Xue^{1,2}, HUANG Jianwu^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: [Objective] Soil erosion is a prominent ecological problem in southwestern Hubei Province. A reasonable assessment of the vulnerability of soil erosion in this area and exploration of its driving mechanisms are prerequisites for effective soil and water conservation measures. [Methods] The effects of natural and socio-economic factors on soil erosion in southwest Hubei were analyzed from the perspective of the human-land coupling system. The evaluation index system of soil erosion vulnerability in southwest Hubei was constructed from three aspects: exposure, sensitivity, and adaptability. The comprehensive weighting method was used to determine the index weight. [Results] (1) From 2010 to 2020, the vulnerability of soil erosion in southwest Hubei generally showed a trend of decreasing first and then increasing. The vulnerability of soil erosion with strong and above intensity showed a fragmented distribution pattern, which was mainly concentrated in the central and southern parts of southwest Hubei and the

收稿日期: 2023-06-29

修回日期: 2023-07-27

录用日期: 2023-08-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-09-15

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42377354); 湖北省自然科学基金面上项目 (2021CFB550); 长江科学院开放研究基金项目 (CKWV20221038/KY)

第一作者: 杨严攀 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 1481140237@qq.com

通信作者: 田培 (1988—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文水资源研究。E-mail: tianpei@ccnu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

western part of Yichang municipal district in the east. (2) The area with the highest sensitivity in the study area was concentrated at an altitude of 800 ~ 1 500 m, and the sensitivity was the largest at a slope of $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$, and showed a decreasing trend to both sides. When the slope was greater than 15° , the area with higher and higher sensitivity increased sharply; (3) Soil erosion vulnerability was higher than soil erosion intensity at higher and above soil erosion levels, and lower than soil erosion intensity at lower and below soil erosion levels. There was a synergistic trend between soil erosion vulnerability and soil erosion intensity. (4) The distribution pattern of soil erosion vulnerability was caused by a multi-factor synergy. The analysis of the geographical detector showed that slope, vegetation coverage, education quality, and urbanization rate have strong explanatory power for soil erosion vulnerability. [Conclusion] In the future, it is necessary to attach great importance to the protection of vegetation coverage in areas with a slope $> 15^{\circ}$, and to enhance the awareness of local residents about soil and water conservation by improving the quality of local education and strengthening the publicity of soil and water conservation.

Keywords: southwest Hubei; soil erosion vulnerability; RUSLE model; geographical detector; temporal and spatial changes

Received: 2023-06-29

Revised: 2023-07-27

Accepted: 2023-08-18

Online(www.cnki.net): 2023-09-15

脆弱性的概念最早源于自然灾害领域的研究^[1],但在社会科学的研究中,脆弱性的应用已有数十年的历史^[2]。随着生态环境的不断恶化,脆弱性的概念逐渐在生态学、气候变化和土地利用等领域得到应用^[3]。由于研究领域和学科属性的差异,学术界对脆弱性概念的定义也不尽相同。如 TIMMERMAN 在 1981 年定义其为系统受到不利影响或损害程度^[4];1996 年,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)^[5]认为,脆弱性是指生态环境系统受破坏或伤害的程度,并首次明确提出脆弱性的影响因子是暴露度、敏感性和适应能力;望元庆等^[6]提出脆弱性是在一定的区域中,生态环境遭受外界干扰或破坏的程度。总之,脆弱性是基于自然和社会经济耦合作用的结果,评价要素包含暴露度、敏感性和适应能力等,目前的脆弱性研究多集中在对突发性自然灾害如山体滑坡、泥石流等的研究,而对常规性自然灾害如荒漠化和水土流失等研究较少。

我国对土壤侵蚀脆弱性的研究主要集中在生态脆弱区,如 WU 等^[7]采用空间主成分分析法对福建省长汀县红壤侵蚀区生态脆弱性进行评价发现,地形地貌、气象、经济社会变量是生态脆弱性的首要驱动因素;刘慧等^[8]基于人为—自然因素综合作用体系,探究了影响山西省静乐县生态脆弱性的主要因素是地形起伏度、土壤侵蚀程度和人均耕地面积;王志杰等^[9]采用“PSR”评价模型框架,利用空间主成分分析方法对陕西省汉中市生态脆弱性进行定量评价,表明年均气温、年均降水量和人均 GDP 为生态脆弱性的主要驱动因子。总体来说,目前对生态脆弱区的研究

已经非常广泛,但对湖北省土壤侵蚀脆弱性的研究鲜见报道,有限研究主要集中在三峡库区和丹江口流域等水土保持重点区域^[10-11],鄂西南作为三峡工程库坝区和武陵山山地丘陵水源涵养区,在保障防洪安全、水质安全、生态可持续发展、工农业生产等方面发挥着重要作用,作为国家重点生态功能区,鄂西南的生态区位十分重要。近年来,由于不合理的开发建设、过度利用自然资源、环境人口容量严重超载等因素导致鄂西南水土流失加剧^[10]。《2021 年湖北省水土保持公报》^[12]表明,鄂西南水土流失面积约为 7 237 km²,占湖北省水土流失面积的 23.28%。因此构建合理的评价体系识别鄂西南水土流失严重区尤为重要。分析土壤侵蚀脆弱性的常见模型包括“RH 模型”“PSR 模型”和“VSD 模型”等,其中 VSD 模型在区域尺度的脆弱性评估中更有优势。

鉴于此,本文采用暴露度、敏感性和适应能力为评价指标基于组合赋权法构建了鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价体系,旨在识别鄂西南土壤侵蚀脆弱性严重区,并分析影响土壤侵蚀脆弱性的驱动因子,进而为区域水土流失治理提供依据,同时为政府制定水土保持措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄂西南地处湖北省西南部,主要包括恩施州大部分区域(不包含巴东县)以及宜昌市的宜都市、五峰土家族自治县和长阳土家族自治县,面积约为 27 900 km²,作为云贵高原的东延部分,地形以山地为主(图

1)。区内为亚热带季风性湿润气候,光热充足,降水充沛,雨热同季,无霜期长,是湖北省多年平均降水量最多的区域,多年平均降水量约为 1 400~1 600 mm,集中在每年 6—8 月,约占全年总降水量的 40%。

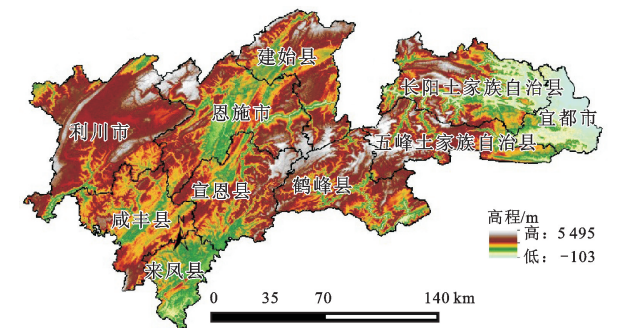


图 1 鄂西南高程与地理位置

Fig.1 Elevation and geographical location diagram of southwest Hubei

1.2 数据来源

本研究数据来源见表 1。

表 1 研究区数据源

Table 1 Data source of study area

数据类型	分辨率	来源
降水数据	1 000 m	国家地球系统科学数据中心—地理资源分中心 (http://gre.geodata.cn)
土壤数据	1:100 万	世界土壤数据库 (HWSD) (http://www.trade.gov/harmonized-system-hs-codes)
土地利用数据	1 000 m	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
DEM 数据	30 m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)
NDVI 数据	1 000 m	谷歌地球引擎 (GEE) (http://www.earthengine.google.com)
路网数据	1:25 万	OpenStreetMap (OSM) (http://www.openstreetmap.org)
社会经济数据		研究区各县市统计年鉴、人口普查数据

1.3 土壤侵蚀脆弱性评价指标体系

暴露度是系统经历外界压力或冲击的程度^[13];土壤侵蚀敏感性是为了识别容易形成土壤侵蚀的区域,反映土壤侵蚀对人类活动的敏感程度^[14];适应能力是指系统在面对干扰时的自我调节能力和系统在接受人为作用干扰后自我恢复的能力^[15]。

1.3.1 暴露度

(1) 人类活动强度

道路的建设与分布格局影响土地利用的变化,对土壤侵蚀等过程产生直接或间接的影响^[16],也是土壤侵蚀风险等级变化的原因。受自然资源条件、区位和劳动力等因素的影响,湖北省各地级市城镇化发展水平差异显著,城镇化率反映人类在城市建设中的活动强度^[17],城镇化的快速发展使得用地需求急剧增大,加剧区域的水土流失。

(2) 土地利用和覆盖

世界范围内由于土地覆盖变化而引起的土壤损失已经出现巨大增长^[18]。坡耕地是南方红壤区重要的耕作用地,坡耕地易形成较为严重的土壤侵蚀造成土壤养分降低、肥力缺失以及农业效益低下,在南方坡耕地的研究中一般将坡度>5°的坡耕地视为研究区^[19]。

(3) 人口和产业分布

人口密度和经济密度是土壤侵蚀变化的人口和产业分布方面的驱动力因素^[20-21]。在广大农村地区,侵蚀产沙量随着人口密度的增加而增加^[22],因此人口密度和经济密度可以作为土壤侵蚀脆弱性的指标之一。

1.3.2 敏感性 土壤侵蚀敏感性的计算依据土壤侵蚀模数^[23-24]。

1.3.3 适应能力

(1) 社会经济发展水平

区域的经济水平越高,人类活动无序度越小^[25],在政府的干预下,财政收入的增加能够为生态环境保护和治理提供更多经济和政策支持,人们在进行工农业生产时对生态环境尤其是土壤的破坏会减小。农业和工业生产直接作用于土壤和植被,往往对自然环境产生更为直接和强烈的影响,服务业由于其非实物性、低耗能性等特点,在实际生产生活中并不直接作用于土壤和生态环境,因而造成的水土流失远小于工农业生产。

(2) 社会保障能力

土壤侵蚀治理需要技术、物力持续的投入^[26],一般公共预算支出的增加可以增加土壤侵蚀治理的人力和物力,使土壤侵蚀治理保持良好的发展态势。教育质量的提升可以提高居民的水土保持意识,进而减少日常生活中不恰当的人为活动对水土流失的影响。师生比反映一所学校和地区的师资配置情况,提高师生比可提升教育质量^[27],教育质量的优劣一定程度上影响学生未来的职业选择和环保意识^[28],因而选择普通高中师生比能够较好地反映区域的教育质量。

1.4 土壤侵蚀模型及计算

本文采用修正的通用土壤流失方程来计算鄂西南土壤侵蚀模数,其计算公式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中:A 为土壤侵蚀模数[t/(hm²·a)];R 为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)];K 为土壤可蚀性因子[(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)];L 为坡长因子,无量纲;S 为坡度因子,无量纲;C 为植被覆盖因

子,无量纲; P 为水土保持控制措施因子,无量纲。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)

降雨侵蚀力反映降雨引起水土流失的能力,本文采用《生产建设项目土壤流失量测算导则 SL 773—2018》^[29]中利用多年平均降雨量计算 R 值的方法:

$$R_d = 0.183 P_d^{1.627} \quad (2)$$

式中: R_d 为多年平均降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)]$; P_d 为多年平均降雨量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子(K)

土壤可蚀性因子反映土壤属性对土壤侵蚀的影响,由于研究区范围较大,对每一种土壤都实施小区试验确定其 K 因子的大小,从时间和人力上难度较大,因此本文借鉴李嘉麟等^[30]研究湖北省土壤侵蚀时空变化的研究成果,参考 WILLIAMS 等^[31]的计算公式获得 K 值:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 \frac{6 \text{SAN} (1 - \text{SIL})}{100} \right] \right\} \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \left(1 - \frac{0.7\text{SNI}}{\text{SNI} + \exp(-5.51 + 22.95\text{SNI})} \right) \times 0.1317 \quad (3)$$

式中: SIL 为土壤粉粒含量(%); CLA 土壤黏粒含量(%); SAN 为土壤砂粒含量(%); C 为土壤有机碳含量(%); SNI 为常数, $\text{SNI} = 1 - \text{SAN}/100$ 。

(3) 坡度因子(S)

坡长和坡度因子反映地形地貌对水土流失的影响,坡长和坡度通过提取研究区 DEM 数值,坡度的计算并依据 MC COOL 等^[32]和 LIU 等^[33]研究公式中提取坡度因子,计算公式为:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta + 0.05 & 5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & 10^\circ \leq \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为坡度($^\circ$)。

(4) 坡长因子(L)

借鉴刘宝元等^[34]的研究成果,采用坡长指数的方法提取坡长因子(L),利用 ArcGIS 软件依据 QIU 等^[35]的计算方法计算坡长因子:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (5)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 0.5^\circ \\ 0.3 & 0.5 \leq \theta < 1.5^\circ \\ 0.4 & 1.5^\circ \leq \theta < 3^\circ \\ 0.5 & 3^\circ \leq \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中: L 为坡长因子; λ 为坡长(m); m 为坡长指数; θ

为坡度($^\circ$)。

(5) 植被覆盖因子(C)

植被覆盖因子是指在相同的外界条件下有植被覆盖地区土壤流失量与裸地环境条件下的土壤侵蚀总量之比。本研究基于鄂西南 NDVI 数据,并根据蔡崇法等^[36]的方法计算 C 值:

$$C = \begin{cases} 1 & f_c = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f_c & 0 < f_c \leq 78.3\% \\ 0 & f_c > 78.3\% \end{cases} \quad (7)$$

植被覆盖度 f_c 计算公式为:

$$f_c = \frac{(\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}})}{(\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{soil}})} \quad (8)$$

式中: f_c 为植被覆盖度,依据 NDVI 数据基于像元二分法计算得到; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为纯裸土像元的 NDVI 值; NDVI_{max} 为纯植被像元的 NDVI 值。

(6) 水土保持措施因子(P)

水土保持措施因子是指在其他因素相同条件下,实施一定水土保持措施的土壤流失总量与未实施水土保持措施的土壤流失总量之比。本文参考杨凯祥等^[37]和高艳丽等^[38]对南方红壤区的研究成果确定鄂西南不同土地利用类型的 P 值,耕地、草地、水域、建设用地、未利用地和林地分别赋值为 0.2, 0.8, 0, 0.1, 1, 1。

1.5 权重确定方法

研究采用多决策层次分析法,将 10 个水土保持领域专家对各指标权重的相对重要性打分结果进行统计,运用算术平均法处理每个专家的打分结果,汇总结果见表 2。

参考张晨等^[39]提出来的运用距离函数描述两者的差异程度,运用组合加权的方式能够减小误差。组合赋权法计算过程为:

设层次分析法确定的权重为 w^a ,由熵权法计算得到的权重为 w^e ,同时设定两者之间的距离函数为 $d(w^a, w^e)$,其表达式为:

$$d(w^a, w^e) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (w^a - w^e)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

设组合权重为 w ,而组合权重的值为两者的线性加权,其表达式为:

$$w = \alpha w^a + \beta w^e \quad (10)$$

同时,为了使层次分析法和熵权法之间的差异程度和分配系数的差异程度一致,其表达式为:

$$d(w^a, w^e) = (\alpha - \beta)^2 \quad (11)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (12)$$

$$A\alpha + B\beta = C \quad (13)$$

表 2 鄂西南土壤侵蚀脆弱性各指标因素的比较矩阵、权重及一致性

Table 2 Comparison matrix, weight and consistency of each index factor of soil erosion vulnerability in Southwest Hubei		指标矩阵					权重
因素	指标	1	2	3	4	5	
人类活动强度	路网密度	1.000 0	1.242 6				0.554 1
	城镇化率	0.804 8	1.000 0		一致性:0		0.445 9
	坡耕地比例	1.000 0	1.550 0	2.612 5	1.611 1		0.373 3
土地利用和覆盖	林地比例	0.645 2	1.000 0	1.911 1	1.402 8		0.265 7
	草地比例	0.382 8	0.523 3	1.000 0	1.828 3		0.190 1
	建设用地比例	0.620 7	0.712 9	0.546 9	1.000 0		0.171 0
人口产业分布	人口密度	1.000 0	1.764 4				0.638 3
	经济密度	0.566 8	1.00 0		一致性:0		0.361 7
	降雨侵蚀力	1.000 0	1.679 2	2.125 0	1.966 7	1.778 3	0.304 8
土壤侵蚀	土壤 K 因子	0.595 5	1.000 0	2.078 3	2.233 3	1.800 0	0.252 3
	坡度坡长	0.470 6	0.481 2	1.000 0	2.078 3	1.750 0	0.179 7
	C 因子	0.508 5	0.447 8	0.481 2	1.000 0	2.245 0	0.147 6
	P 因子	0.562 3	0.555 6	0.571 4	0.445 4	1.000 0	0.115 7
社会经济发展水平	财政收入	1.000 0	2.033 3				0.670 3
	三产比重	0.491 8	1.000 0		一致性:0		0.329 7
社会保障能力	一般公共预算支出	1.000 0	3.002 5				0.750 2
	教育质量	0.333 1	1.000 0		一致性:0		0.249 8
暴露度	人类活动强度	1.000 0	2.727 8	2.411 1			0.553 6
	土地利用和覆盖	0.366 6	1.000 0	1.800 0	一致性:0.054 5		0.261 6
	人口产业分布	0.414 7	0.555 6	1.000 0			0.184 8
适应能力	社会经济发展水平	1.000 0	2.245 0				0.691 8
	社会保障能力	0.445 4	1.000 0		一致性:0		0.308 2
	敏感性	1.000 0	2.758 3	3.233 3			0.576 3
目标层	暴露度	0.362 5	1.000 0	2.783 3		一致性:0.081 1	0.285 5
	适应能力	0.309 3	0.359 3	1.000 0			0.138 3

1.6 地理探测器

地理探测器是一套用于检测空间异质性并评估影响因素和其他地理因素之间关系的空间统计模型,本文应用因子探测和交互探测研究鄂西南水土流失驱动因子并进行定量分析,根据地理探测器的要求,需要对探测因子进行离散化处理,将多年平均降水量与海拔高度在 ArcGIS 中按照自然断点法重分为 9 类,植被覆盖度分为 10 类($<0.1, 0.1\sim0.2, 0.2\sim0.3, 0.3\sim0.4, 0.4\sim0.5, 0.5\sim0.6, 0.6\sim0.7, 0.7\sim0.8, 0.8\sim0.9, >0.9$),将坡度分为 9 类($<5^{\circ}, 5^{\circ}\sim8^{\circ}, 8^{\circ}\sim15^{\circ}, 15^{\circ}\sim20^{\circ}, 20^{\circ}\sim25^{\circ}, 25^{\circ}\sim30^{\circ}, 30^{\circ}\sim35^{\circ}, 35^{\circ}\sim40^{\circ}, >40^{\circ}$),土地利用类型分为 6 类,分别是耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,社会经济数据分为 5 类。运用 ArcGIS 10.8 软件中的渔网工具,将研究区分割为 $1\text{ km}\times1\text{ km}$ 渔网点,基于渔网点提取了 27 821 个均匀分布的点。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀强度时空变化特征

采用 RUSLE 模型计算研究区的土壤侵蚀模数,

根据《SL190—2007 土壤侵蚀分类分级标准》^[40]将土壤侵蚀模数划分为微度、轻度、中度、强烈、极强和剧烈侵蚀 6 个等级。

由图 2 可知,鄂西南土壤侵蚀以微度为主,表明鄂西南土壤侵蚀取得了一定的效果,土壤流失得到改善。3 年中微度和轻度侵蚀占比均达到 70%以上,年均土壤侵蚀模数分别为 $1\ 672, 1\ 345, 1\ 692\ \text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,土壤侵蚀总体强度呈现先减小后增大的趋势。

由表 3 可知,2010—2020 年微度侵蚀面积净增长率为 2.96%,表明鄂西南土壤侵蚀治理效果显著;但强烈及以上侵蚀面积表现都表现为先减少后增加的趋势,净增加率分别为 4.52%,24.46%,27.27%,表明由于人类开发建设活动的影响,部分地区的土壤侵蚀状况加剧。从空间上来看,2010—2020 年强烈及以上侵蚀主要集中在鄂西南的中南部和西南部宜昌市辖区的西部地区,其中建始县东部、鹤峰县北部、五峰土家族自治县和长阳土家族自治县的西部地区土壤侵蚀最为严重。这些地区经济发展水平落后,政府在水土保持上的投入较少,加之教育质量相对落后,从事农业活动的人数较多,在不合理的生产生活中,土壤侵蚀加剧。

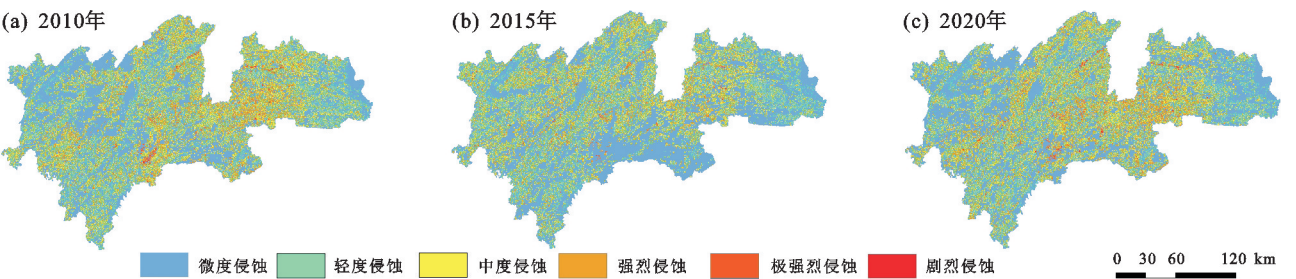


图 2 2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀强度分布

Fig.2 Distribution of soil erosion intensity in Southwest Hubei from 2010 to 2020

表 3 2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀变化率

Table 3 Change rate of soil erosion in Southwest Hubei from 2010 to 2020

土壤侵蚀 等级	2010 年		2015 年		2020 年		2010—2015 年变化		2015—2020 年变化		2010—2020 年变化	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
微度侵蚀	14 907	53.43	16 578	59.42	15 348	55.01	1 671	11.21	−1 230	−7.42	441	2.96
轻度侵蚀	5 214	18.69	5 025	18.01	4 886	17.51	−189	−3.62	−139	−2.77	−328	−6.29
中度侵蚀	4 746	17.01	4 103	14.70	4 397	15.76	−643	−13.55	294	7.17	−349	−7.35
强烈侵蚀	2 546	9.12	1 871	6.70	2 661	9.54	−675	−26.51	790	42.22	115	4.52
极强侵蚀	466	1.67	311	1.11	580	2.08	−155	−33.26	269	86.50	114	24.46
剧烈侵蚀	22	0.08	14	0.05	28	0.10	−8	−36.36	14	100	6	27.27

2.2 土壤侵蚀脆弱性因素分析 A 为层次分析法权重,B 为熵权法权重,C 为组合赋
运用综合赋权法得到的各指标权重(表 4),其中 权法权重。

表 4 鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价指标及权重

Table 4 Evaluation index and weight of soil erosion vulnerability in Southwest Hubei

目标层	准则层	因素层	指标层	层次分析 法权重(A)	熵值法权重(B)	组合权重(C)	指标属性
土壤侵蚀 脆弱性 评价	暴露度 A:0.286 B:0.439 C:0.308	人类活动强度 A:0.553; B:0.188; C:0.500	路网密度	0.554	0.632	0.565	正向
			城镇化率	0.446	0.368	0.435	正向
			坡耕地比例	0.373	0.117	0.336	正向
		土地利用和覆盖 A:0.262; B:0.452; C:0.290	林地比例	0.266	0.301	0.271	负向
			草地比例	0.190	0.118	0.180	负向
			建设用地比例	0.171	0.464	0.213	正向
		人口产业分布 A:0.185; B:0.360; C:0.210	人口密度	0.638	0.199	0.575	正向
			经济密度	0.362	0.801	0.425	正向
			降雨侵蚀				
		土壤侵蚀	土壤 K 因子		利用土壤侵蚀模型计算		正向
			坡度坡长				
	适应性 A:0.138 B:0.246 C:0.154	社会发展水平 A:0.692; B:0.498; C:0.664	C 因子				
			P 因子				
			财政收入	0.670	0.729	0.679	正向
			三产比重	0.330	0.271	0.321	正向
			一般公共预算支出	0.750	0.565	0.723	正向
		社会保障能力 A:0.308; B:0.502; C:0.336	教育质量	0.250	0.435	0.277	正向

2.2.1 土壤侵蚀暴露度分析 将鄂西南 2010—2020 年分区县的路网密度、城镇化率等暴露度评价指标的属性数据导入几何数据中,以自然断点法为依据,确定鄂西南土壤侵蚀暴露度因子分级(表 5),并对指标进行分级化处理,再分别乘以对应的权重,生成土壤侵蚀暴露度分布(图 3)。

表 5 鄂西南土壤侵蚀暴露度因子分级标准

Table 5 Grading standard of soil erosion exposure factor in Southwest Hubei

评价指标	低(1)	较低(2)	中度(3)	较高(4)	高(5)
路网密度	<0.75	0.75 ~ 0.98	0.98 ~ 1.28	1.28 ~ 1.77	>1.77
城镇化率	<0.260 9	0.260 9 ~ 0.330 7	0.330 7 ~ 0.404 1	0.404 1 ~ 0.458 2	>0.458 2
坡耕地比例	<0.045 8	0.045 8 ~ 0.063 6	0.063 6 ~ 0.075 1	0.075 1 ~ 0.092 9	>0.092 9
林地比例	<0.745 4	0.745 4 ~ 0.774 7	0.774 7 ~ 0.808 7	0.808 7 ~ 0.838 6	>0.838 6
草地比例	<0.012 4	0.012 4 ~ 0.039 2	0.039 2 ~ 0.072 8	0.072 8 ~ 0.088 5	>0.088 5
建设用地比例	<0.002 0	0.002 0 ~ 0.003 9	0.003 9 ~ 0.008 3	0.008 3 ~ 0.013 6	>0.013 6
人口密度	<87	87 ~ 125	126 ~ 163	164 ~ 211	>211
经济密度	<166	166 ~ 351	352 ~ 612	613 ~ 135 7	>135 7

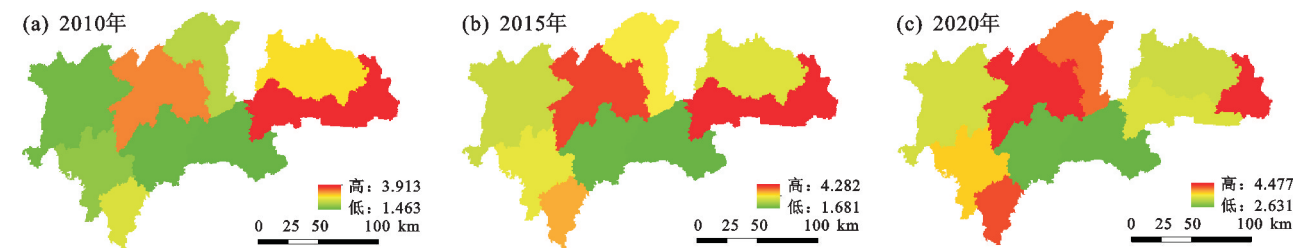


图 3 2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀暴露度分布

Fig.3 Distribution of soil erosion exposure in Southwest Hubei from 2010 to 2020

由图 3 可知,2010—2020 年鄂西南暴露度呈增长趋势,暴露度在东部和南部较大。东部和南部经济开发建设较快,在城镇化建设和路网布设中,土地の利用和配置方案会发生协同演化^[16-17],林地、草地面积缩减,建设用地面积增加,导致土地资源短缺、土地利用效率偏低等问题,并引发强烈的水土流失,使得土壤侵蚀暴露度增加。从暴露度的动态性来看,2020 年暴露度的最小值相较于 2015 年发生大幅度增加,受坡耕地面积大幅增加的影响,沟壑的数量增加,随着侵蚀沟的不断加深和伸长,在连续集流的影响下,上溯侵蚀和下切侵蚀不断发生^[19],沟壑进一步扩展并不断分割坡耕地使得暴露度增加。

2.2.2 土壤侵蚀敏感性分析 依据土壤侵蚀强度(图 2),在考虑土壤侵蚀强度和土壤侵蚀敏感性分布的级别后,依据表 6 对土壤侵蚀强度进行重分类得到土壤侵蚀敏感性分布(图 4)。

表 6 鄂西南土壤侵蚀敏感性因子分级标准

Table 6 Grading standard of soil erosion sensitivity factors in Southwest Hubei

侵蚀强度	土壤侵蚀敏感性因子
微度侵蚀	低(1)
轻度侵蚀	较低(2)
中度侵蚀	中度(3)
强烈侵蚀	较高(4)
极强烈或剧烈侵蚀	高(5)

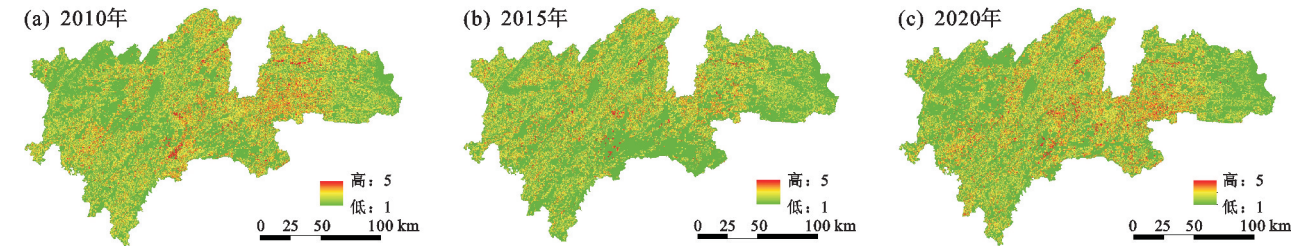


图 4 2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀敏感性分布

Fig. 4 Distribution map of soil erosion sensitivity in Southwest Hubei from 2010 to 2020

由图 4 可知,鄂西南高海拔区域敏感性较高,而低海拔区域主要以水田为主,敏感性较低。为了研究地形对土壤侵蚀敏感性的影响,将区域的敏感性和地形因子进行叠加分析,研究区敏感性最高的区域集中在海拔高度 800~1 500 m,而在海拔高度<800 m 和>1 500 m 的区域敏感性相对较小;敏感性在坡度 25°~35°最大,并呈现出向两侧递减的趋势,当坡度>15°时,较高和高敏感性面积急剧增加。从时间上

来看,2015 年土壤侵蚀敏感性最小,较高和高敏感性呈现碎片化分布。2020 年敏感性程度最大,且较高和高敏感性集中连片分布。随着水土保持措施的实施,植被覆盖度逐渐提升,土壤侵蚀程度降低,敏感性强烈的地区减少,敏感性的分布更加集中分布在植被覆盖度较低,坡度较大的宣恩县和鹤峰县的交接地带,该地区山地广布,地势起伏和坡度较大,土壤侵蚀在达到临界坡度前,随着坡度的增加,水土流失加

剧^[8],敏感性增强。此外,宣恩县和鹤峰县在脱贫攻坚中,开垦山地种植果木和茶园,破坏原有的地表植被,使得植被覆盖度下降,水土流失更加严重。

2.2.3 土壤侵蚀适应能力分析 将鄂西南财政收入

和三产比重等分区县数据导入几何数据中,基于自然间断法确定鄂西南土壤侵蚀适应能力的指标分级标准(表 7),对指标进行分级处理并乘以对应的权重生成鄂西南土壤侵蚀适应能力分布(图 5)。

表 7 鄂西南土壤侵蚀适应能力因子分级标准

Table 7 Grading standard of soil erosion adaptability factors in Southwest Hubei

评价指标	低(1)	较低(2)	中度(3)	较高(4)	高(5)
财政收入	<33 572	33 572~73 508	73 509~172 975	172 976~270 095	>270 095
三产比重	<0.327 1	0.327 1~0.405 9	0.405 9~0.472 6	0.472 6~0.543 7	>0.543 7
一般公共预算支出	<147 602	147 603~262 017	262 017~370 088	370 089~560 566	>560 566
教育质量	<0.048 4	0.048 4~0.055 1	0.055 1~0.070 3	0.070 3~0.084 2	>0.084 2

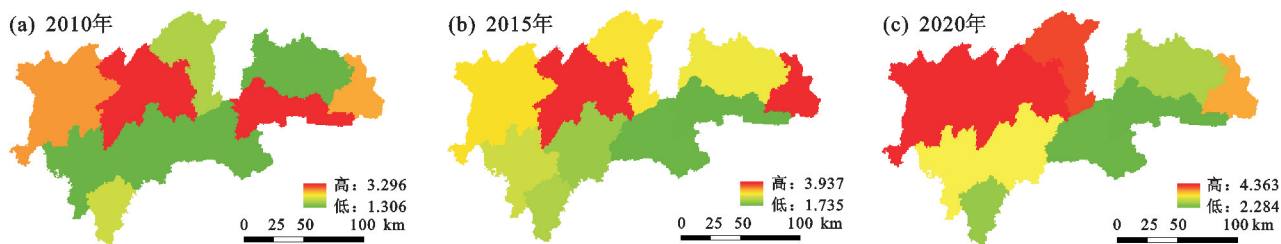


图 5 2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀适应能力分布

Fig.5 Distribution map of soil erosion adaptability in Southwest Hubei from 2010 to 2020

由图 5 可知,2010—2020 年鄂西南适应能力总体上呈现增长趋势,北部适应能力较南部强。鄂西南北部地区的财政收入和一般公共预算支出较大,这为治理举措的实施提供了坚实的物质基础,政府能够有更加充沛的人力和物力投入到水土保持治理中。同时,更多的教育经费投入使得北部地区具有更高的教育质量,学生未来的生计更加多样化,对农业的依赖程度降低^[28],适应能力增强。从动态变化上看,2010—2020 年鄂西南适应能力逐步增强,适应能力最小值的年际变化率比较稳定,2010—2015 年、2015—2020 年最小值的年际变化率分别为 32.84%

和 31.64%。适应能力最大值的年际变化率分别为 19.44%和 10.82%,变化率逐渐减小,这是由于在社会发展初期,经济发展速度较快导致适应能力最大值出现较大幅度增长,而随着社会经济水平和社会保障能力的快速发展,越来越多的区县经济发展和社会投入的增速下降并逐步趋于稳定,使得适应能力变化趋于平稳。

2.2.4 土壤侵蚀脆弱性评价 土壤侵蚀脆弱性的计算方法为:暴露度+敏感性-适应能力,在 Arcgis 10.8 中,利用栅格计算器的功能进行运算,得到鄂西南土壤侵蚀脆弱性分布(图 6)。

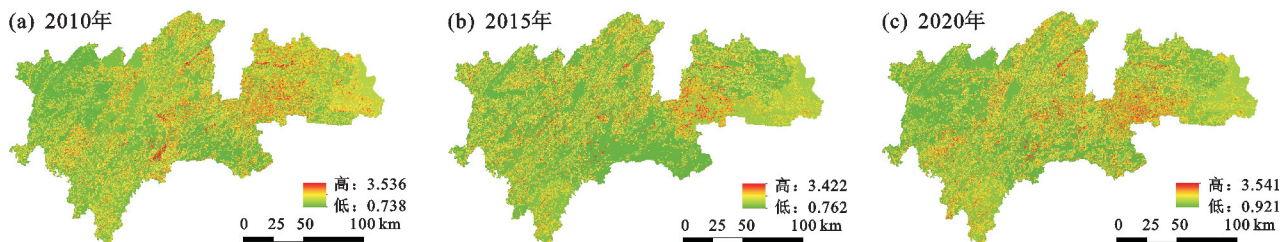


图 6 2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀脆弱性分布

Fig.6 Distribution of soil erosion vulnerability in Southwest Hubei from 2010 to 2020

由图 6 可知,2010—2020 土壤侵蚀脆弱性总体上呈现先降低后升高的趋势,中度及以下脆弱性呈现集中连片分布,分布范围广泛。强烈及以上脆弱性呈现零星的碎片化分布格局。2010—2020 年脆弱性的最大值基本不变,这与鄂西南暴露度升高幅度不大,敏感性先降低后升高,适应能力较大幅度升高有关;由于适应能力在脆弱性中权重最小,敏感性权重最大

抵消了适应能力在降低脆弱性中的贡献使得 2020 年土壤侵蚀脆弱性最大值基本不变。但区域内脆弱性最小值在逐年上升,随着经济社会的发展,城镇化和道路建设加快,伴随着人类在生产建设活动中过度地开垦、填挖土壤,地被植被遭到破坏,植被覆盖度下降,水土流失加剧,暴露度和敏感性增大,最终使得脆弱性最小值上升。

为直观了解不同等级土壤侵蚀脆弱性的动态变化过程,在综合分析脆弱性的变化幅度和自然断点法的划分范围标准后,将脆弱性以 1.1,1.6,2.2,2.7 为断点进行分级,分别对应脆弱性程度的低、较低、中等、较高和高 5 级,生成土壤侵蚀脆弱性分级(图 7)。

由图 7 可知,2010 年高脆弱性呈零星分布,而 2020 年高脆弱性呈明显的集中片状分布,主要集中

分布在鄂西南东南部五峰土家族自治县的广大西部地区。该地区以山地地形为主,广泛发育喀斯特地貌,土壤自身持水性差、土体松弛,加上土层浅薄,营养物质贫瘠,导致植被稀疏,物种丰富度较低,同时该地区降水丰富,水土流失严重,暴露度和敏感性较强。加之经济社会发展相对滞后,人们的水土保持意识薄弱,适应能力较低,表现出高脆弱性。

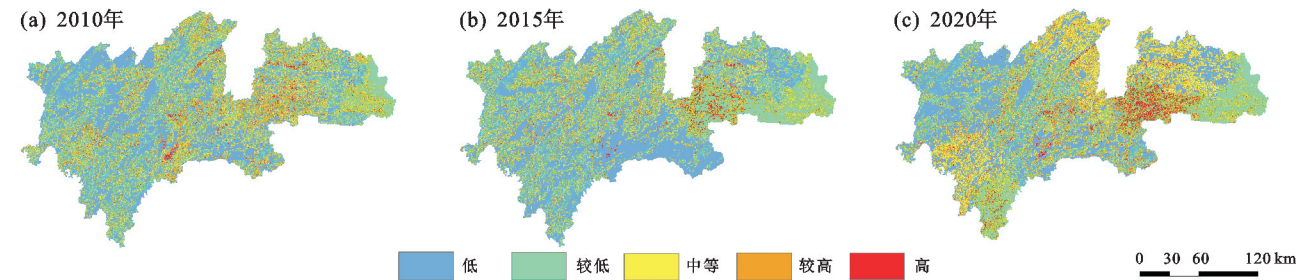


图 7 2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀脆弱性分级

Fig.7 Grading map of soil erosion vulnerability in Southwest Hubei from 2010 to 2020

2.3 土壤侵蚀强度与土壤侵蚀脆弱性的关系

由表 8 可知,2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀脆弱性较高及以上等级的侵蚀面积占比由 2010 年的 11.48%增加到 2020 年的 14.40%,同期土壤侵蚀强度面积占比由 10.87%增加到 12.34%,表明较高及以上等级脆弱性高于侵蚀强度;土壤侵蚀脆弱性轻度及以下等级的侵蚀面积占比由 2010 年的 70.81%减少到 2020 年的 63.29%,同期土壤侵蚀强度面积占比由

72.12%增加到 72.52%,表明较低及以下脆弱性低于侵蚀强度。这是由于脆弱性是自然和社会经济因素耦合的结果,一方面,脆弱性的自然因子还包含土地利用和覆盖,而植被能够涵养水土降低土壤流失速率和流失量,使得脆弱性减小;另一方面,社会经济指标的加入使脆弱性在增加的过程中受到适应能力增强的阻碍作用,最终导致脆弱性的降低速度明显快于侵蚀强度。

表 8 2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀强度和土壤侵蚀脆弱性各等级分布面积和比例

等级	2010 年				2015 年				2020 年			
	土壤侵蚀强度		土壤侵蚀脆弱性		土壤侵蚀强度		土壤侵蚀脆弱性		土壤侵蚀强度		土壤侵蚀脆弱性	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
微度侵蚀/低脆弱性	14 907	53.43	13 992	50.15	16 578	59.42	14 132	50.65	15 348	55.01	12 480	44.73
轻度侵蚀/较低脆弱	5 214	18.69	5 764	20.66	5 025	18.01	6 806	24.39	4 886	17.51	5 178	18.56
中度侵蚀/中度脆弱	4 746	17.01	4 940	17.71	4 103	14.70	4 309	15.44	4 397	15.76	6 223	22.30
强烈侵蚀/较高脆弱	2 546	9.12	2 690	9.64	1 871	6.70	2 102	7.53	2 661	9.54	2 897	10.38
极强烈与剧烈侵蚀/高脆弱性	488	1.75	514	1.84	325	1.16	552	1.98	608	2.18	1 123	4.02

为了更加清楚地了解土壤侵蚀强度和土壤侵蚀脆弱性的关系,将不同年份不同等级的侵蚀强度和脆弱性比例进行相关性分析,结果表明,两者的相关系数为0.984,并通过显著性检验($p<0.01$),表明两者呈现显著正相关关系,说明土壤侵蚀强度和土壤侵蚀脆弱性存在协同变化趋势。

2.4 土壤侵蚀脆弱性主导因子分析

利用因子探测器探究土壤侵蚀脆弱性的驱动力,结果表明,土壤侵蚀脆弱性的主导因子包含自然因子

和社会经济因子,坡度、植被覆盖度、教育质量和城镇化率对土壤侵蚀脆弱性的解释力较强,解释力最强的影响因子为坡度($q=0.154\ 6$),其次为植被覆盖度($q=0.096\ 7$)和教育质量($q=0.069\ 7$),这进一步验证坡度、植被覆盖度和教育质量是影响脆弱性的主导因子。

3 讨论

本研究表明,2010—2020 年鄂西南土壤侵蚀的总体强度呈现先减小后增大的趋势,这与李嘉麟

等^[30]对湖北省土壤侵蚀强度时空变化的研究结果较为一致。据《恩施州水土规划(2018—2030年)》^[41]的数据显示,2010—2020年,恩施州逐步加大对水土保持治理的资金投入,通过实施坡改梯、经果林、水保林、保土耕作等水土保持工程措施,使得水土流失强度逐渐减轻;据《宜昌市水土规划(2016—2030年)》^[42]的数据显示,2010—2015年,宜昌市采取优化种植模式,积极植树造林,土壤侵蚀状况逐渐好转。2015—2020年,五峰土家族自治县和长阳土家族自治县积极响应国家脱贫攻坚的号召,在实施县城搬迁、道路建设和生物产业园建设中,加重了区域的水土流失,使得鄂西南整体侵蚀强度出现先减小后增大的趋势。

本研究基于地理探测器探究了土壤侵蚀脆弱性的主要驱动力为坡度、植被覆盖度、教育质量和城镇化率,这与CHEN等^[23]研究发现,降雨、土壤、植被、坡度等自然因素和开发建设工程等人为干扰是造成竹溪流域水土流失脆弱性的主要原因,与谢人栋等^[43]研究认为的植被覆盖、人口密度、坡度、人类活动以及生态环保意识是喀斯特槽谷区生态环境脆弱的主导因子具有相似性。坡度和植被覆盖度是影响土壤侵蚀的主要自然要素,鄂西南山地丘陵广布,坡度的变化改变坡面产流条件,进而影响土壤流失量,在达到临界坡度值之前,随着坡度的增加,土壤侵蚀量增大。这与姚雄等^[44]得出坡度是影响土壤侵蚀脆弱性的主要原因结论类似。植被覆盖度是影响土壤侵蚀脆弱性的主要下垫面条件^[45],当陡坡的植被覆盖度低时,遇到降雨,地表植被的拦截能力有限,超过限度的降雨形成细沟侵蚀,同时由于植被稀疏,根系不发达,涵养能力不足,此时出现更严重的下切和溯源侵蚀,使得脆弱性增加。土壤侵蚀脆弱性受人地相互作用的影响,教育质量和城镇化率是影响脆弱性的主要社会因子。人们受教育的程度影响水土保持的配置方案,是影响土壤侵蚀脆弱性的重要社会因素^[46]。学生受教育水平越高,生计越稳定,对农业依赖程度较低,适应能力强。受教育水平较低的学生,未来多以单一的农业为生计,对农业依赖程度高,适应能力差,其生计行为易形成土壤侵蚀,具有脆弱性。区域城镇化所带来的人口聚集及对生态环境的干扰,是导致土壤侵蚀脆弱的重要原因^[25]。城镇化使人口和产业活动由分散到聚集,导致城市用地紧张,原先的农业用地逐步演化为建设用地,在建设初期,由于地表植被的破坏、土壤的大规模开挖和随意堆放,易发生土壤侵蚀。

本文还探讨了土壤侵蚀脆弱性与土壤侵蚀强度的关系,研究表明二者呈显著正相关,具有协同演化

的趋势,这与陈樟昊等^[24]在长汀县的研究证实生态脆弱性与土壤侵蚀二者演化呈现高度一致性的研究结果一致。2010—2020年,鄂西南水土保持的资金投入不断加大,建立起了科学、系统的水土保持工程和监测体系,使得坡耕地的水土流失得到有效治理,土壤侵蚀强度下降。同时,地方政府鼓励积极植树造林,区域的森林覆盖率得到提高,森林涵养水源、保持水土的能力增强^[18],生态环境得到改善,生态环境遭受破坏的程度降低,土壤侵蚀脆弱性因而也不断减弱。

4 结论

(1)2010—2020年鄂西南土壤侵蚀强度总体呈现先减小后增大的趋势,2020年侵蚀强度较2010年基本保持不变,但水土流失现状不容乐观,极强烈侵蚀和剧烈侵蚀都出现增长趋势,净增加率分别为24.46%和27.27%,今后仍需加强对该区域的水土保持防治。

(2)利用叠加分析2010—2020年鄂西南地形因素对敏感性的影响,表明研究区敏感性最高的区域集中在海拔高度800~1500m,敏感性在坡度25°~35°最大,并呈现出向两侧递减的趋势,坡度15°为敏感性强烈变化的阈值,当坡度>15°时,较高及以上敏感性面积急剧增加。

(3)通过构建基于自然和社会经济耦合的评价系统评估土壤侵蚀脆弱性,利用暴露度、敏感性和适应能力等评价指标能够有效识别区域水土流失严重区,2010—2020年鄂西南土壤侵蚀脆弱性总体上呈现先降低后升高的趋势,高程度的土壤侵蚀脆弱性呈明显的集中片状分布,主要集中在鄂西南东部五峰土家族自治县的广大西部地区。

(4)鄂西南土壤侵蚀强度和土壤侵蚀脆弱性呈显著正相关,并存在协同变化趋势。利用地理探测器对土壤侵蚀脆弱性的主要驱动力进行归因分析,结果表明解释力最强的前4个因子为坡度、植被覆盖度、教育质量和城镇化率,未来需要高度重视对坡度>15°地区植被覆盖的保护,并通过提高当地的教育质量,加强水土保持的宣传力度,提升当地居民的水土保持意识。

参考文献:

- [1] JANSSENA M A, SCHOON, M L, KE W. Scholarly net works on resilience, vulnerability and adaptation with in the human dimensions of global environmental change[J]. Goba l Environmental Change, 2006, 16 (3) 240-252.
- [2] SHACHI P, PARMANAND K, MIODRAG Z, et al. Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(3):305-318.

- [3] GARCIN Y, SCHEUFB E, DARGIE C G, et al. Publisher Correction: Hydroclimatic vulnerability of peat carbon in the central Congo Basin[J]. *Nature*, 2022, 612 (7938): E9.
- [4] TIMMERMAN P. Vulnerability, resilience and the collapse of society: A review of models and possible climatic applications [D]. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [5] IPCC. Climate change 1995: The science of climate change by IPCC WG I [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 571.
- [6] 望元庆, 宋书愉, 王杰, 等. 2000—2018 年内蒙古沙区“生态-经济-社会”复合系统脆弱性演变及关键影响因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(6): 2271-2286.
- WANG Y Q, SONG S Y, WANG J, et al. Vulnerability evolution and key influencing factors of ecology-economy-society composite system in sandy area of Inner Mongolia from 2000 to 2018 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2271-2286.
- [7] WU X Y, ZHU C L, YU J B, et al. Ecological vulnerability in the red soil erosion area of Changting under continuous ecological restoration: Spatiotemporal dynamic evolution and prediction [J]. *Forests*, 2022, 13(12): e2136.
- [8] 刘慧, 师学义. 静乐县生态脆弱性时空演变与分区研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 34-43.
- LIU H, SHI X Y. Spatio-temporal evolution and zoning of ecological vulnerability in Jinglu County [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(1): 34-43.
- [9] 王志杰, 苏嫄. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 432-442.
- WANG Z J, SU Y. Ecological vulnerability assessment and characteristics analysis of water sources in Hanzhong City, Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 432-442.
- [10] 何丽华, 李建松, 王熙, 等. 水源保护区的生态脆弱性及生态修复成效分析[J]. *测绘科学*, 2022, 47(8): 59-69.
- HE L H, LI J S, WANG X, et al. Analysis of ecological vulnerability and ecological restoration effect of water source protection area [J]. *Surveying and Mapping Science*, 2022, 47(8): 59-69.
- [11] 王兆林, 张露洋, 钟激懿, 等. 三峡库区生态空间脆弱性时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 348-355.
- WANG Z L, ZHANG L Y, ZHONG W Y, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of ecological space vulnerability in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 348-355.
- [12] 湖北省水利厅. 2021 年湖北省水土保持公报 [Z]. 武汉, 2021.
- Hubei Provincial Department of Water Resources. Hubei Provincial Soil and Water Conservation Bulletin in 2021 [Z]. Wuhan, 2021.
- [13] 蔡兴冉, 李忠勤, 张慧, 等. 中国天山冰川变化脆弱性研究[J]. *地理学报*, 2021, 76(9): 2253-2268.
- CAI X R, LI Z Q, ZHANG H, et al. Study on the vulnerability of glacier change in Tianshan Mountains, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(9): 2253-2268.
- [14] 杨青林, 丁鹏凯, 仙巍, 等. 川西北地区土壤侵蚀敏感性评价[J]. *人民长江*, 2018, 49(10): 30-35.
- YANG Q L, DING P K, XIAN W, et al. Evaluation of soil erosion sensitivity in Northwest Sichuan [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(10): 30-35.
- [15] 陈枫, 李泽红, 董锁成, 等. 基于 VSD 模型的黄土高原丘陵沟壑区县域生态脆弱性评价: 以甘肃省临洮县为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(11): 74-80.
- CHEN F, LI Z H, DONG S C, et al. Ecological vulnerability assessment of counties in hilly and gully regions of the Loess Plateau based on VSD model: A case study of Lintao County, Gansu Province [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(11): 74-80.
- [16] 徐倩, 焦菊英, 严晰芹, 等. 道路侵蚀研究的进展与展望[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 357-367.
- XU Q, JIAO J Y, YAN X Q, et al. Progress and prospect of road erosion research [J]. *Bulletin Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4): 357-367.
- [17] WEI H J, XUE D, HUANG J C, et al. Identification of coupling relationship between ecosystem services and urbanization for supporting ecological management: A case study on areas along the Yellow River of Henan Province [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(9): e2277.
- [18] 魏艳红, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 96-103.
- WEI Y H, JIAO J Y. Characteristics of erosion and sediment yield in small watersheds under different land use patterns in loess hilly and gully region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 96-103.
- [19] 李志刚, 梁心蓝, 黄洪粮, 等. 坡耕地地表起伏对坡面漫流的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 71-77, 85.
- LI Z G, LIANG X L, HUANG H L, et al. Effects of surface relief on overland flow on sloping farmland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 71-77, 85.
- [20] 林金煌, 胡国建, 祁新华, 等. 闽三角城市群生态环境脆弱性及其驱动力 [J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4155-4166.
- LIN J H, HU G J, QI X H, et al. Eco-environmental

- vulnerability and its driving forces in the urban agglomeration of the Fujian Triangle[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4155-4166.
- [21] 奥勇, 蒋岭峰, 白召弟, 等. 基于格网 GIS 的黄河流域土地生态质量综合评价[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 164-175.
- AO Y, JIANG L F, BAI Z D, et al. Comprehensive evaluation of land ecological quality in the Yellow River Basin based on grid GIS[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1): 164-175.
- [22] 杜梅, 赵健赞, 杨静, 等. 基于 MODIS 和 Landsat 数据的湟水河流域土壤侵蚀时空变化研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 131-138.
- DU M, ZHAO J Y, YANG J, et al. Spatio-temporal variation of soil erosion in Huangshui River Basin based on MODIS and Landsat data[J]. *Bulletin Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 131-138.
- [23] CHEN S F, ZHA X, BAI Y H, et al. Evaluation of soil erosion vulnerability on the basis of exposure, sensitivity, and adaptive capacity: A case study in the Zhuxi watershed, Changting, Fujian Province, Southern China[J]. *Catena*, 2019, 177: 57-69.
- [24] 陈樟昊, 姚雄, 余坤勇, 等. 生态脆弱性与土壤侵蚀的演化关系[J]. *西南林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(4): 82-90.
- CHEN Z H, YAO X, YU K Y, et al. The evolutionary relationship between ecological vulnerability and soil erosion in typical red soil regions of southern China[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Science Edition)*, 2017, 37(4): 82-90.
- [25] 张斯源, 樊逸飞, 颜礼, 等. 基于长时序 MODIS 的陕西省近 20 年生态质量时空变化及其驱动力研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 111-119, 198.
- ZHANG S Y, FAN Y F, YAN L, et al. Study on the spatial and temporal changes of ecological quality and its driving forces in Shaanxi Province in the past 20 years based on long-term MODIS[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 111-119, 198.
- [26] 魏云洁, 甄霖, 胡云锋, 等. 黄土高原典型区水土保持技术评估与需求分析: 以安塞为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5809-5819.
- WEI Y J, ZHEN L, HU Y F, et al. Evaluation and demand analysis of soil and water conservation technology in typical areas of the Loess Plateau: Taking Ansai as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5809-5819.
- [27] de SOUZA A C, BARBOSA L F E, DINIZ S F, et al. Methodology for understanding soil erosion[J]. *Journal of Sustainable Development*, 2022, 15(4): e43.
- [28] PANTA B, BHANDARI T, PAUDEL B. Soil erosion vulnerability and adaptation strategies in maize field of Sindhukhola sub-watershed region, Nepal[J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2: e1940.
- [29] 水利部. 生产建设项目土壤流失量测算导则: SL 773—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018: 12.
- Ministry of Water Resources. Soil loss measurement guidelines for production and construction projects: SL 773—2018[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2018: 12.
- [30] 李嘉麟, 陈家慧, 华丽, 等. 基于 CSLE 的湖北省土壤侵蚀时空变化特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 43-52, 62.
- LI J L, CHEN J H, HUA L, et al. Spatio-temporal variation characteristics of soil erosion in Hubei Province based on CSLE[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 43-52, 62.
- [31] WILLIAMS J R, JONES C A, KINIRY J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(2): 497-511.
- [32] MC COOL D K, BROWN L C, FOSTER G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [33] LIU B Y, NEARING M A, RISSE L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [34] 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 B Y, ZHANG L K, JIAO J Y. Soil erodibility and its application in erosion prediction[J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4): 345-350.
- [35] QIU H, CUI P, REGMI A D, et al. The effects of slope length and slope gradient on the size distributions of loess slides: Field observations and simulations[J]. *Geomorphology*, 2018, 300: 69-76.
- [36] 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 C F, DING S W, SHI Z H, et al. Application of USLE model and geographic information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [37] 杨凯祥, 刘强, 李秀红, 等. 三峡库区土壤侵蚀和植被覆盖变化分析[J]. *北京师范大学学报*, 2021, 57(5): 631-638.
- YANG K X, LIU Q, LI X H, et al. Analysis of soil erosion and vegetation cover change in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Beijing Normal University*, 2021, 57(5): 631-638.
- [38] 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 Y L, LI H B. Impact of landscape pattern change on soil erosion in Hanjiang River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6): 2248-2260.
- [39] 张晨,王清,陈剑平,等.金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 831-836.
- ZHANG C, WANG Q, CHEN J P, et al. Risk assessment of debris flow in Jinsha River Basin by combination weighting method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 831-836.
- [40] 水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL 190-2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- Ministry of Water Resources. Soil erosion classification standard: SL190-2007 [S] Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.
- [41] 恩施土家族苗族自治州水利和湖泊局,恩施州水土规划(2018—2030年)[Z]. 湖北 恩施, 2018.
- Enshi Tujia and Miao autonomous prefecture water conservancy and lakes bureau. Enshi water and soil planning (2018—2030) [Z]. Enshi Prefecture, Hubei, 2018.
- [42] 宜昌市水利和湖泊局,宜昌市水土规划(2016—2030年)[Z]. 湖北 宜昌, 2016.
- Yichang water and lakes bureau. Yichang water and soil planning (2016-2030)[Z]. Yichang, Hubei, 2016.
- [43] 谢人栋,赵翠薇.基于栅格尺度的喀斯特槽谷区生态环境脆弱性时空分异研究[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(4): 48-53.
- XIE R D, ZHAO C W. Spatio-temporal differentiation of ecological environment vulnerability in karst trough valley area based on grid scale[J]. *Journal of Yangtze River Academy of Sciences*, 2018, 35(4): 48-53.
- [44] 姚雄,余坤勇,刘健,等.南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 735-745.
- YAO X, YU K Y, LIU J, et al. Spatio-temporal evolution of ecological vulnerability in severe soil erosion areas in southern China[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2016, 27(3): 735-745.
- [45] 徐超璇,鲁春霞,黄绍琳.张家口地区生态脆弱性及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1288-1300.
- XU C X, LU C X, HUANG S L. Ecological vulnerability and its influencing factors in Zhangjiakou area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1288-1300.
- [46] 郭婧,魏珍,任君,等.基于熵权灰色关联法的高寒贫困山区生态脆弱性分析:以青海省海东市为例[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(3): 191-199.
- GUO J, WEI Z, REN J, et al. Analysis of ecological vulnerability in alpine poverty-stricken mountainous areas based on entropy weight grey correlation method: Taking Haidong City, Qinghai Province as an example [J]. *Bulletin Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3): 191-199.
- (上接第 90 页)
- [25] 青海省统计局.青海统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2022.
- Qinghai Provincial Bureau of Statistics. Qinghai Statistical Yearbook-2022 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2023.
- [26] HE L, GUO J B, YANG W B, et al. Multifaceted responses of vegetation to average and extreme climate change over global drylands [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 858(2): e159942.
- [27] ZUO Y F, LI Y H, HE K N, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000—2020 [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: e109429.
- [28] VENKATESH K, JOHN R, CHEN J Q, et al. Optimal ranges of social-environmental drivers and their impacts on vegetation dynamics in Kazakhstan [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 847: e157562.
- [29] 杨达,易桂花,张廷斌,等.青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1361-1372.
- YANG D, YI G H, ZHANG T B, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of growing season NDVI in the Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1361-1372.
- [30] 江原,郝媛媛,黄祎宸.基于夜间灯光数据的甘青宁城市扩展及其建成区植被变化特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 3974-3988.
- JIANG Y, HAO Y Y, HUANG Y C. Characteristics of urban expansion and vegetation change in built-up areas of Gan-Qing-Ning based on nighttime light data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 3974-3988.