

1990—2022年宜昌市土壤侵蚀时空演变及其驱动因素变化特征

徐圣暄¹, 魏冲^{1,2,3}, 董晓华^{1,2}, 喻丹^{1,2}, 彭涛^{1,2}

(1.三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002; 2.三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北宜昌 443002; 3.长江科学院水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 武汉 430010)

摘要: [目的] 深入研究宜昌市土壤侵蚀时空变化特征, 为宜昌市生态保护、农业可持续发展及水土保持规划提供科学依据。[方法] 使用RUSLE模型计算宜昌市逐年土壤侵蚀强度及程度, 分析了土壤侵蚀时空演变特征; 结合地理探测器, 分析了宜昌市土壤侵蚀主要影响因素及其演变特征。[结果] 宜昌市土壤侵蚀强度多年平均值及多年平均最大值分别为 $22.72 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $3114.06 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 均值呈增长趋势, 而最大值呈下降趋势。空间上来看, 西北部地区土壤侵蚀强度较高, 东北部平原地区土壤侵蚀强度较低。选取的影响因子中, 覆盖与管理(C)因子和坡度(S)因子对土壤侵蚀的影响最大, 且大部分因子之间对土壤侵蚀的影响呈非线性增强的特点; 其中, C因子与降雨侵蚀力(R)因子和C因子与坡长坡度(LS)因子对土壤侵蚀的交互影响最为显著。随着时间推移, C因子与坡度因子对土壤侵蚀的交互影响有所减弱, 水土保持措施(P)因子和R因子对土壤侵蚀的影响有所增强。[结论] 宜昌市1990—2022年间土壤侵蚀主要受人类活动影响, 整体土壤侵蚀强度有所增加, 但高风险区土壤侵蚀有所改善, 需进一步提高植被覆盖率, 增加工程措施, 以降低土壤侵蚀恶化风险。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE模型; 时空变化; 地理探测器; 宜昌市

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0071-11

Spatiotemporal evolution of soil erosion and variation characteristics of its driving factors in Yichang City from 1990 to 2022

Xu Shengxuan¹, Wei Chong^{1,2,3}, Dong Xiaohua^{1,2}, Yu Dan^{1,2}, Peng Tao^{1,2}

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-Environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Key Laboratory of River and Lake Regulation and Flood Control in Middle and Lower Reaches of Changjiang River of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: [Objective] This study aims to conduct an in-depth investigation of the spatiotemporal variation characteristics of soil erosion in Yichang City, thereby providing a scientific basis for ecological protection, sustainable agricultural development, and soil and water conservation planning in the city. [Methods] The RUSLE model was used to calculate the annual soil erosion intensity and level in Yichang City, and the spatiotemporal evolutionary characteristics of soil erosion were analyzed. Using geodetector, the main influencing factors of soil erosion in Yichang City and their evolutionary characteristics were analyzed. [Results] The annual

收稿日期: 2025-07-04

修回日期: 2025-08-06

接受日期: 2025-09-14

资助项目: 国家自然科学基金(202401030, 52109058); 长江科学院水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室开放基金(CKWV20241170/KY); 湖北省自然科学基金(2024AFD212); 三峡大学科研启动基金(2023RCKJ0025)

第一作者: 徐圣暄(2003—), 女, 山东滨州人, 主要从事土壤侵蚀归因分析研究。E-mail: 2121686588@qq.com

通信作者: 魏冲(1994—), 男, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 主要从事全球气候变化及景观格局演变对流域水沙过程的影响研究。E-mail: chong.wei@ctgu.edu.cn;

董晓华(1972—), 男, 湖北宜昌人, 博士, 教授, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: xhdong@ctgu.edu.cn

<https://stbcyj.publish.founderss.cn>

average and maximum values of soil erosion intensity in Yichang City were 22.72 and 3 114.06 t/(hm² · a), respectively. The average value showed an increasing trend, while the maximum value showed a decreasing trend. Spatially, the soil erosion intensity was higher in the northwest region and lower in the northeastern plain region. Among the selected influencing factors, the cover-and-management (*C*) factor and the slope factor had the greatest influence on soil erosion, and the influence of most factors on soil erosion exhibited characteristics of nonlinear enhancement. Among them, the interactions between *C* factor and rainfall erosivity (*R*) factor, as well as between *C* factor and slope length and steepness (*LS*) factor, on soil erosion were the most significant. Over time, the interaction effect of *C* factor and slope (*S*) factor on soil erosion weakened, and the influence of soil and water conservation (*P*) factor and *R* factor on soil erosion increased. [Conclusion] Soil erosion in Yichang City from 1990 to 2022 was mainly influenced by human activities. The overall intensity of soil erosion increases, but soil erosion in high-risk areas improves. It is necessary to further increase vegetation cover and implement more engineering measures to reduce the risk of soil erosion deterioration.

Keywords: soil erosion; RUSLE model; spatiotemporal change; geodetector; Yichang City

土壤侵蚀会造成土地退化,降低土地生产力,进而对农业生产和粮食安全产生不利影响^[1]。侵蚀过程中产生的泥沙,随着径流被带到下游地区,将引发一系列生态问题,进而直接影响到区域的生态文明建设和社会经济的可持续发展。因此,土壤侵蚀已经成为世界各国普遍关注的重要环境问题之一^[2]。中国土壤侵蚀问题较为普遍,《2024年中国水土保持公报》^[3]显示,全国水土流失总面积为260.19万km²,占全国面积的27.1%,其中,水力侵蚀为主要的侵蚀类型之一。评价土壤侵蚀的时空变化特征,厘清土壤侵蚀的主导因素,对改善水土流失现状及防治措施的制定具有重要意义。

目前,常用的土壤侵蚀估算方法有USLE(Universal Soil Loss Equation)、RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)和CSLE(Chinese Soil Loss Equation)方程模型^[4]。Wischmeier等^[5]在1965年开发了USLE模型,并被广泛应用,成为美国和世界其他国家主要的水土保持规划工具。随着研究技术和资料的改进,研究人员基于USLE发展了RUSLE模型,使其能够更准确地估算土壤侵蚀量,为土壤侵蚀的研究和水土保持工作提供了更有力的工具^[6]。目前,RUSLE模型在国内土壤侵蚀研究中得到了较为广泛的应用,并取得了不错的土壤侵蚀估算效果。熊微微等^[7]基于RUSLE模型和空间自相关性,计算了滇中地区2000—2022年的土壤侵蚀强度,发现受人类活动影响较大的耕地和草地是主要的侵蚀区域;涂怡等^[8]探究了清江流域2005—2020年的土壤侵蚀变化特征及其主要驱动因素,研究结果显示该地区的土壤侵蚀呈“升—降—升”的变化趋势,主要受植被覆盖度及土地利用类型的影响;何宇琛等^[9]分析了晋西北黄土区的土壤侵蚀动态变化特征,发现该地区土壤侵蚀

情况较好,主要驱动因素为植被覆盖度和坡度。

现有研究表明,土壤侵蚀的主要驱动因素包括降水变化、地形地貌特征、植被覆盖和人类活动^[10-11]。降雨侵蚀力是唯一一个人类活动难以改变的驱动因子,全球气候变化导致降水发生变化,改变了降雨侵蚀力特征,从而影响土壤侵蚀。坡度作为关键的地形因素之一,较大的坡度会加快径流流速,增加泥沙输移量,从而加剧土壤侵蚀^[12]。丰富的植被可以减小降雨对土壤的冲刷,且有一定的保水作用,从而达到减小侵蚀的效果^[13]。也有研究表明,过度放牧、森林砍伐、不合理的土地利用等人类活动会加速土壤侵蚀^[14-15],水土保持措施的修建可以缓解土壤侵蚀^[16]。然而,现有研究大多以少数年份的土壤侵蚀数据来分析侵蚀的时空演变特征,研究结果难以捕捉降水变化导致的侵蚀变化特征。此外,在不同地区和不同年份,由于降水、植被、土地利用特征的差异,其土壤侵蚀主导因素可能会存在差异,少有探究土壤侵蚀因素的年际变化特征。

宜昌市地处鄂西山区与江汉平原交汇带,地形复杂,主要以山区、丘陵为主,其特殊的地形地貌特征导致土壤侵蚀敏感性急剧升高。宜昌市经济高速发展带来了土地利用的显著变化,可能会对土壤侵蚀带来影响。就目前研究现状而言,宜昌市土壤侵蚀的时空演变特征及其主要影响因素仍尚未被清晰揭示。本文以宜昌市为研究对象,收集1990—2022年期间逐年的降水、下垫面数据,使用RUSLE模型计算逐年的土壤侵蚀强度和程度,分析其时空演变特征;结合地理探测器,厘清宜昌市土壤侵蚀的主要因素,并揭示其变化特征。研究结果可为宜昌市生态环境的治理、土地资源优化利用及水土保持政策制定提供科学支持。

1 研究区概况

宜昌市位于湖北省西南部、长江上中游分界处,地跨北纬 $29^{\circ}56'$ — $31^{\circ}34'$ 、东经 $110^{\circ}15'$ — $112^{\circ}04'$,地处鄂西武陵山脉和秦巴山脉向江汉平原的过渡地带,地形复杂多样,境内有山地、丘陵、平原等多种地貌。全市共辖5个市辖区、3个代管县级市、3个县、2个自治县,总面积 2.1 万 km^2 。主要河道有清江、香溪河、沮漳河、黄柏河、柏临河、九畹溪等。宜昌市地形复杂多样,高低相差悬殊,山地和丘陵分别占全市总面积的 69% 和 21% ;平原属江汉平原的西侧组成部分,占全市总面积的 10% 。宜昌市地势自西向东逐级下降,平均坡降 14.5% 。主要有两大山系,西北部属于大巴山山脉,西南部属于武陵山脉。河流均属长江流域,以长江干流为主脉,河流多、密度大、水量丰富。宜昌市属于亚热带季风性湿润气候,具有四季分明,水热同季,寒旱同季的特点,受地势影响,气候垂直差异很大。年平均气温约 $16\sim 17^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量约为 $1\ 100$ mm,降雨较集中。无霜期 $250\sim 300$ d,全年积温较高,适宜农作物的生长。土壤类型多样,主要有黄壤、黄棕壤、山地棕壤、石灰土等类型。

2 数据及方法

2.1 数据来源

本研究的数据主要有:降水数据、数字高程模型(DEM)、土壤类型图和土地利用图。其中,DEM数据来源于地理空间数据云平台,空间分辨率为 30 m;土壤类型图来自联合国粮食及农业组织(FAO)开发的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD),空间分辨率约为 0.083° ;土地利用数据选用武汉大学发布的中国 30 m年度土地覆盖产品(CLCD)^[17],空间分辨率为 30 m,共 33 期(1990—2022年);降水数据来源于缪驰远等^[18]发布的中国逐日降水数据集,空间分辨率为 0.1° ,时间分辨率为 1 d,时段为1990—2022年。

2.2 RUSLE模型

本研究选用RUSLE模型计算宜昌市土壤侵蚀强度。首先需要计算降雨侵蚀力(R)因子、土壤可蚀性(K)因子、坡长坡度(LS)因子、覆盖与管理(C)因子和水土保持措施(P)因子,其中, R 因子基于日降水数据进行计算, C 因子和 P 因子将根据土地利用数据进行计算。最后,根据RUSLE模型定量计算宜昌市1990—2022年逐年的土壤侵蚀强度。RUSLE方程的表达式见式(1):

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; K 为土壤可蚀性因子 $[\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; LS 为坡长坡度因子; C 为覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子,其中 L, S, C, P 因子无量纲。

(1) R 因子。本研究采用Xie等^[19]提出的降雨侵蚀力模型计算 R 因子,该模型基于日降雨数据进行计算,并将一年的时间划分为冷季和暖季,选用不同的参数值表征不同时段降雨的侵蚀潜力。此模型在国内得到了较为广泛的应用,并取得了较好的计算精度。其表达式见式(2):

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k P_d^{1.7265} \quad (2)$$

式中: R_i 表示1年中第 i 个月的降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; k 表示第 i 个月中日降雨量达到 10 mm的天数; P_d 表示第 i 个月中降雨量达到 10 mm的第 j 天的日降雨量,mm; α 取值为 $0.393\ 7$ (暖季:5—9月)和 $0.310\ 1$ (冷季:10月—次年4月)。

(2) K 因子。土壤可蚀性因子 K 是反映土壤对降雨和径流剥蚀、搬运敏感程度的一个重要指标,是影响土壤流失的重要内在因素。 K 值大小主要与土壤质地及有机质含量有关,本研究采用黄庆丽等^[20]使用的方法计算 K 因子。其计算公式见式(3):

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_a \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{S_i}{C_i + S_i} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right] \quad (3)$$

式中: S_a, S_i, C_i 分别为土壤的砂粒($0.05\sim 2$ mm)、粉粒($0.002\sim 0.05$ mm)、黏粒(< 0.002 mm)的含量百分比(%); S_n 为常数, $S_n = 1 - S_a/100$; C 为土壤有机碳含量(%).

最后,将 K 因子的计算结果转换为国际单位,转换方法见式(4):

$$K_{\text{final}} = 0.1317 \times K \quad (4)$$

式中: K_{final} 为矫正后的 K 因子; K 为矫正前的 K 因子。

(3) LS 因子。坡长坡度因子是RUSLE模型估算土壤侵蚀量的重要地形参数,本研究采用兰泽凡等^[21]在雅鲁藏布江流域土壤侵蚀评价中使用的方法计算 LS 因子,其计算公式见式(5—7):

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

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & 5^\circ < \theta \end{cases} \quad (6)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & 10^\circ \leq \theta \end{cases} \quad (7)$$

式中： L 为坡长因子； λ 从流域DEM中提取的坡长； m 为坡长指数； S 为坡度因子； θ 为坡度($^\circ$)。

(4) C 因子。 C 因子的主要影响因素为土地利用类型或者植被覆盖度,本研究结合程先富^[22]和Sakinatu^[23]等提出的经验取值法,根据不同的土地利用类型对 C 因子进行赋值,具体分类情况见表1。

表1 不同土地利用类型覆盖与管理因子赋值
Table 1 Values of the C factor for different land use type

土地利用类型	C因子取值	土地用途
水体	0.000	水域
有岩石露头的裸土	1.000	荒地
城镇区域	0.010	建筑环境
草地	0.045	草地
茂密森林	0.006	林地
农业用地	0.245	农业

(5) P 因子。 P 因子能够反映水土保持措施对土壤侵蚀的影响,其值一般在0~1之间。无任何水土保持措施的土地利用类型取值为1,几乎不发生土壤侵蚀的土地利用类型取值为0。结合宜昌市土地利用状况及前人研究^[21],确定了宜昌市不同土地利用条件下的 p 值,其中建设用地、水体、水田、旱地及其他林地分别为0,0,0.01,0.4,0.7,其余土地利用类型均为1。

2.3 土壤侵蚀程度分级标准

宜昌市属于南方红壤区,根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),根据土壤侵蚀模数(t/hm^2)将土壤侵蚀程度分为6个等级:微度侵蚀($A < 5$)、轻度侵蚀($5 \leq A < 25$)、中度侵蚀($25 \leq A < 50$)、强烈侵蚀($50 \leq A < 80$)、极强烈侵蚀($80 \leq A < 150$)和剧烈侵蚀($A \geq 150$)。

2.4 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[24]创新提出的一种统计模型,旨在深入探索地理现象在空间上的分异特性,并揭示其内在驱动机制。本文主要使用因子探测器和交互探测器对各土壤侵蚀因子对宜昌市土壤侵蚀强度的影响程度进行定量分析。因子探测器可以检测因变量 Y 的空间差异,还可以比较某一因素对因变量空间差异的解释力。计算公式见式(8):

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中: q 是因子解释力, q 取值范围为 $[0, 1]$,其数值越大,说明 X 因子对因变量 Y 的空间分异解释力越强; N 和 N_h 分别是全区和层的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 的方差; L 表示探测分区数。

交互探测的作用是计算因素 X_1, X_2 对于因变量 Y 的解释力,因素 X_1, X_2 的结合对于 Y 是起增强还是减弱作用,二者关系可分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强5种类型。判别依据如表2所示。

表2 因子交互类型及其判定依据
Table 2 Factor interaction types and their determination basis

判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = \max[q(X_1), q(X_2)]$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

土壤侵蚀受植被、降雨、地形、坡度、海拔等多因素的共同影响^[10~12~15],本研究在RUSLE模型的侵蚀因子(R 因子、 K 因子、 LS 因子、 C 因子和 P 因子)的基础之上,补充坡度(S)和高程(E)作为土壤侵蚀的主要影响因素。相比基于坡度和坡长计算得到的 LS 因子,直接以坡度值作为影响因子之一,对实际的水土流失防治工作及对策制定有一定指导意义。总的来说,本研究所选因子有: R, K, LS, C, P, S 和 E 因子,旨在厘清上述因子在不同时期对宜昌市土壤侵蚀的影响程度及其变化特征。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀因子变化特征

3.1.1 R 因子时空变化特征 图1为宜昌市1990—2022年期间 R 因子的时程变化及空间分布特征。由图1可知, R 因子多年平均空间最大值为 $7\,538\text{ MJ} \cdot t/(hm^2 \cdot h)$,多年平均值为 $3\,875\text{ MJ} \cdot t/(hm^2 \cdot h)$ 。其中,研究区空间上的 R 因子最大值呈减小趋势,减小速率为 $8.5\text{ MJ} \cdot t/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; R 因子区域平均值呈增长趋势,增长速率为 $17.2\text{ MJ} \cdot t/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ 。该结果说明宜昌市侵蚀性降水的空间差异有所减小,但整体呈不显著上升趋势。除少数年份 R 因子的区域最大值显著高于区域平均值,大部分时段 R 因子的区域最大值与区域平均值变化趋势较一致。宜昌市 R 因子的空间差异也较为明显,研究时段内,该区域 R 因子的多年平均值约为 $2\,360.3 \sim 6\,872.1\text{ MJ} \cdot t/(hm^2 \cdot h)$,最大值约为最小值的2.9倍。空间上, R 因子高值区主要集中于西北地区,低值区主要集中于西南、东部地区。

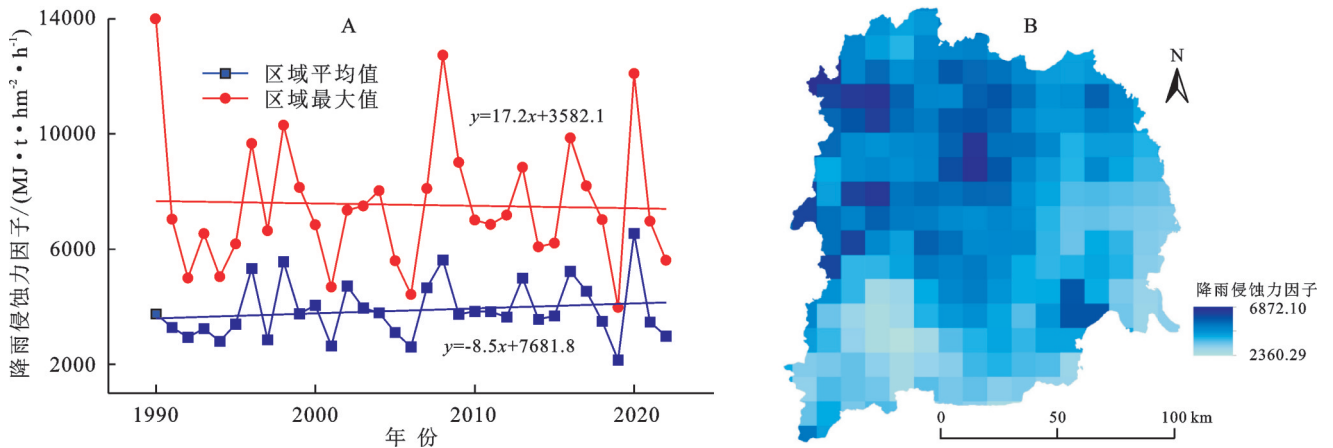


图1 宜昌市1990—2022年R因子区域最大值及平均值时程变化和空间分布特征

Fig. 1 Temporal variations of the spatial highest and average values and spatial distribution characteristics of R factor within the Yichang City during 1990—2022

3.1.2 C因子时空变化特征 图2为C因子时程变化和空间分布特征。1990—2022年宜昌市的C因子多年年均值约为0.065,整体呈显著增长($p < 0.001$)趋势,增长速率为0.000 1/a。但在2000—2005年C因子呈急剧减小趋势,降至0.062;随后,在2005—2022年C因子呈增长趋势,至2022年达

到历史最高值(0.068)。

研究时段内,C因子的多年平均值介于0~0.33,且有明显的空间分异特征。C因子高值区主要集中于东南部平原地区,少部分零散分布区西部及东北部地区,全域主要以低值区为主,说明宜昌市整体植被覆盖度较好。

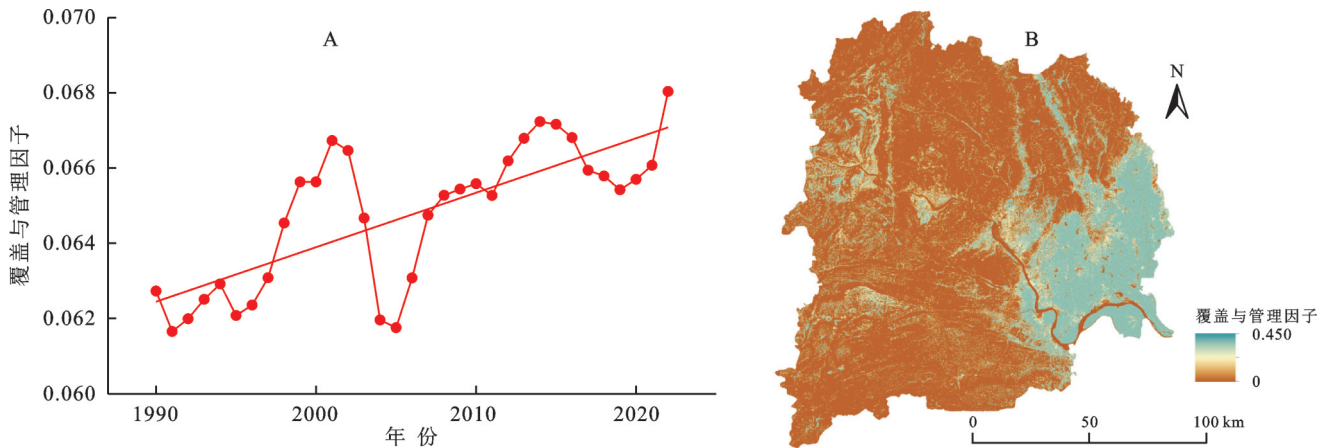


图2 宜昌市1990—2022年C因子时程变化及空间分布特征

Fig. 2 Temporal variations of the annual average values and spatial distribution characteristics of C factor within the Yichang City during 1990—2022

3.1.3 P因子时空变化特征 图3为P因子的时程变化特征和空间分布特征。宜昌市P因子的多年年均值约为0.556,整体呈显著减小趋势($p < 0.001$),减小速率约为0.000 7/a。1990—2022年虽然P因子整体呈减小趋势,但在2000—2005年P因子有回升的趋势。P因子呈下降趋势,表示土地利用方式更为合理,降低了土壤侵蚀的风险。宜昌市P因子的多年年均值最大为0.7,最小为0,东部地区相比其他地区而言P值较低。

3.1.4 K和LS因子空间变化特征 图4为宜昌市K和LS因子的空间分布特征。整体而言,东南部和西南部的K因子值相对较高,东北部相对较低,最小值为0 [$t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$],最大值为0.17

[$t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$],各地区的平均值为0.12 [$t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$]。LS因子值较高的区域主要集中于西部地区,低值主要集中于东部地区,平均值为6.05,最小值为0.03,最大值为241.13。LS因子主要受地形影响,当坡度较大时,坡长会增加,从而导致LS因子增加,提高泥沙的输送效率,增加土壤侵蚀风险。

3.2 土壤侵蚀时空变化特征

3.2.1 土壤侵蚀强度 图5为宜昌市1990—2022年土壤侵蚀强度的时程变化特征及空间分布特征。总体来说,宜昌市多年平均土壤侵蚀模数为22.72 t/hm^2 ,呈不显著增长趋势,增长率为0.14 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;宜昌市多年平均最大土壤侵蚀模数为3 114.06 t/hm^2 ,呈

不显著减小趋势,减小率为 $25.93 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。说明宜昌市整体的土壤侵蚀有轻微加剧,但是极端土壤侵蚀有所改善。值得注意的是,近30年土壤侵蚀的峰值出现在2020年,年均土壤侵蚀模数为 $39.20 \text{ t}/\text{hm}^2$,需进一步关注宜昌市的土壤侵蚀防治问题,

以降低土壤侵蚀风险。由图5B可知,宜昌市土壤侵蚀的空间差异较为显著。各区域的年平均土壤侵蚀强度约为 $0 \sim 3144.06 \text{ t}/\text{hm}^2$,高值区主要集中于宜昌市西部地区,东部平原地区的年均土壤侵蚀强度则相对较低。

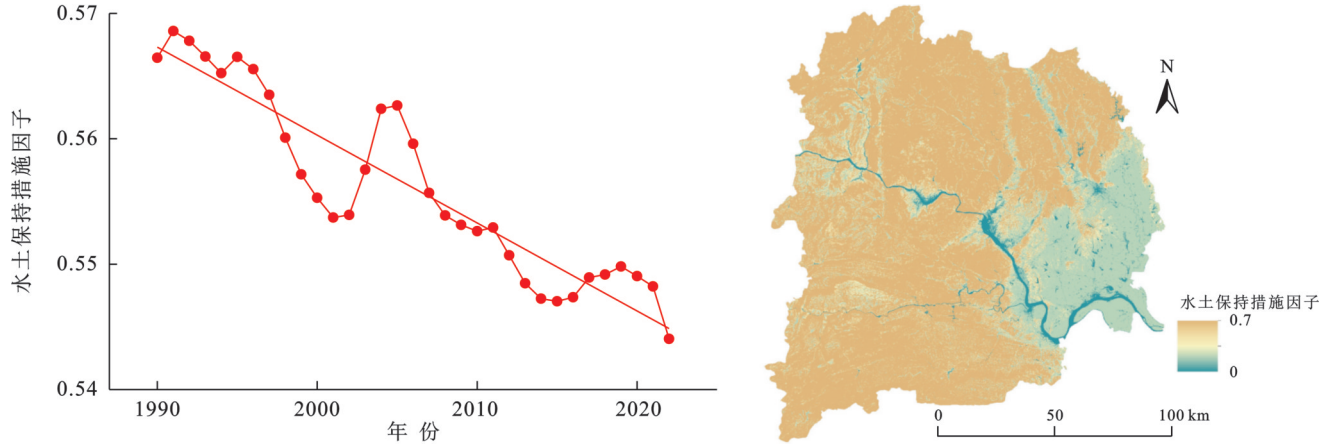


图3 宜昌市1990—2022年P因子时程变化及空间分布特征

Fig. 3 Temporal variations of the annual average values and spatial distribution characteristics of P factor within the Yichang City during 1990—2022

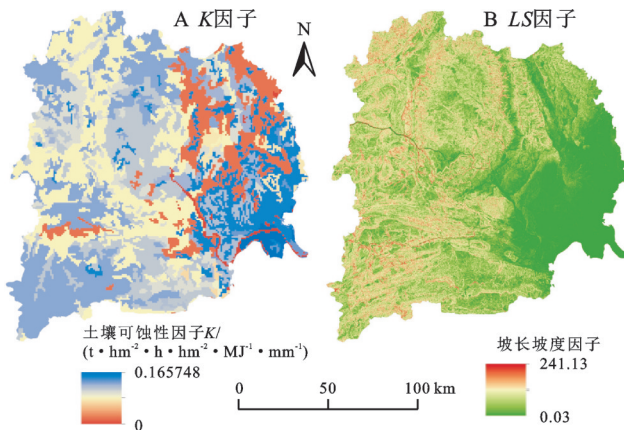


图4 宜昌市K因子和LS因子空间分布特征

Fig. 4 The distribution characteristics of the K and LS factor within the Yichang City

3.2.2 土壤侵蚀程度 表3为宜昌市1990—2022年不同土壤侵蚀程度的面积及其占比情况。结果显示,宜昌市主要以轻度侵蚀为主,占全市面积的 63.19% (13415.32 km^2);其次为微度侵蚀,占全市面积的 15.44% (3278.64 km^2)。值得注意的是,全市约 6.51% 的区域受到强烈及以上程度的侵蚀。具体而言,强烈、极强烈和剧烈侵蚀的面积分别为 $775.03, 448.72, 158.85 \text{ km}^2$ 。

图6为1990—2022年各土壤侵蚀程度的面积占比的时程变化特征。总体来说,微度侵蚀和轻度侵蚀的面积占比呈减小趋势,中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的面积占比呈增长趋势。值得注意的是,强烈侵蚀和剧烈侵蚀的面积占比均呈显著增长趋势($p < 0.05$),增长速率均为 $0.02\%/a$ 。从变化趋

势来看,当面积比例发生明显变化时,微度侵蚀和轻度侵蚀的面积比例变化趋势基本是相反的。如1997年、2001年、2006年、2019年微度侵蚀的面积比例较上一年度明显增加,而同年份轻度侵蚀的面积比例较上一年度明显减小。此外,强烈侵蚀和极强烈侵蚀的面积占比呈轻度波动增长趋势,而剧烈侵蚀的面积占比的年际波动较大。1990—2022年剧烈侵蚀的面积占比最大为 4.78% ,出现在2020年;剧烈侵蚀的面积占比最小为 0.33% ,出现在2019年。该现象可能说明宜昌市极端的土壤侵蚀主要由极端降水所导致,且极端降水主要在部分易侵蚀的区域导致剧烈侵蚀。

图7为宜昌市1990—2022年期间多年平均土壤侵蚀程度的空间分布特征。宜昌市的土壤侵蚀程度存在明显的空间差异,主要以微度侵蚀和轻度侵蚀为主。中度侵蚀主要集中于宜昌市中东部地区,主要位于长江干流两岸;强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀主要集中于宜昌市西北部,围绕长江干流狭窄河道两岸,以山地地形为主。该结果说明宜昌市的土壤侵蚀高风险区主要集中于山区,主要受陡峭的地形所影响。

3.3 土壤侵蚀影响因素分析

3.3.1 单因子分析 表4为1990—2022年各土壤侵蚀影响因子基于地理探测器的单因子分析结果 q_i 值的统计值。 q_i 指用于量化单个影响因素或因子组合对因变量空间异质性的解释程度,取值范围为 $[0, 1]$, q_i 值越接近1,说明该因素对地理现象空间分异的影响越显著。总体来说,宜昌市所有土壤侵蚀影响因子

中,多年平均 q_v 值最高的为C因子(0.075 2),其次为LS因子(0.049 2),R, K, S, E和P因子的多年平均 q_v 值分别为0.013 4,0.007 8,0.006 3,0.005 2,0.003 6。该结果表明,宜昌市土壤侵蚀的主控因子为C因子、

LS因子和R因子。不同时间段,各影响因子最大值与最小值的差值存在较大差异。其中,C因子和LS因子的 q_v 值年际差异最大,分别为0.073 1,0.076 1;S因子、E因子和P因子的 q_v 值年际差异相对较小。

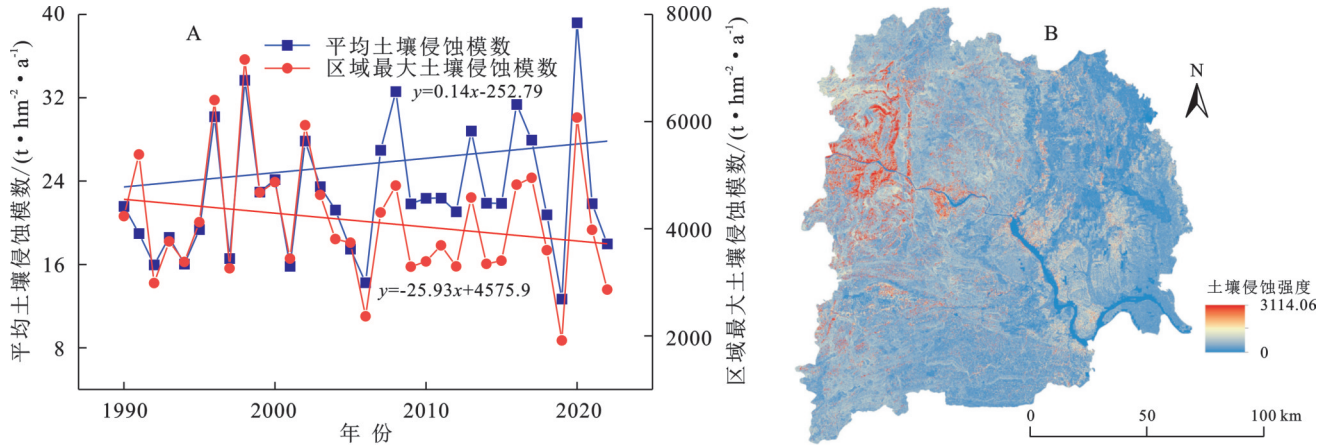


图 5 1990—2022年宜昌市年平均土壤侵蚀模数时程变化和年均土壤侵蚀模数空间分布特征
 Fig. 5 The temporal variations and spatial distribution characteristics of annual average soil erosion modulus within the Yichang City during 1990—2022

表 3 1990—2022年不同土壤侵蚀程度面积及占比
 Table 3 Statistics of the area and percentage of different soil erosion grade during 1990—2022

土壤侵蚀程度	面积/ km^2	占比/%
微度	3278.64	15.44
轻度	13415.32	63.19
中度	3152.22	14.85
强烈	775.03	3.65
极强烈	448.72	2.11
剧烈	158.85	0.76

图 8 为 1990—2022 年各土壤侵蚀影响因子的 q_v 值时程变化特征。整体来看,C 因子、LS 因子、P 因子

和 S 因子的 q_v 值呈显著增长趋势 ($p < 0.01$), 其增长率分别为 0.001/a, 0.001 8/a, 0.000 1/a 和 0.000 2/a; E 因子和 K 因子的 q_v 呈不显著增长趋势, 增长率分别为 0.000 5/a 和 0.003/a。R 因子的 q_v 值呈不显著减小趋势, 其减小率为 0.001/a。由图 8 可以看出, C 因子和 LS 因子 q_v 值的变化趋势具有一致性, 说明植被及地形对宜昌市土壤侵蚀的贡献均有显著提高。此外, 对部分年份而言, LS 因子和 P 因子的变化趋势呈相反势态, 说明当水土保持措施有所增强时, 坡长和坡度对土壤侵蚀的贡献有所降低。总的来说, 宜昌市土壤侵蚀受侵蚀性降雨的影响有所减小, 受植被覆盖、坡度和土壤可蚀性的影响有所增加。

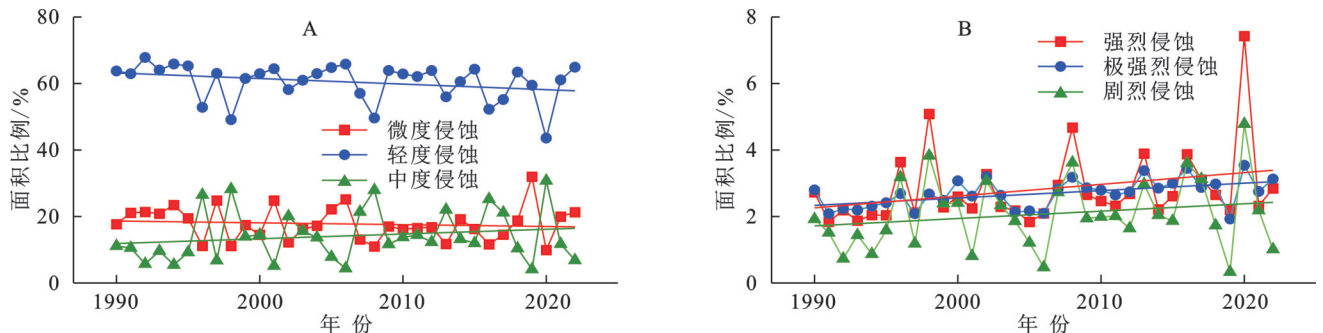


图 6 宜昌市 1990—2022 年不同土壤侵蚀程度面积占比时程变化特征
 Fig. 6 The temporal variations characteristics of the area percentage of different soil erosion grade within the Yichang City during 1990—2022

3.3.2 交互影响分析 本研究使用地理探测器的交互探测器分析了典型年各土壤侵蚀因子之间对土壤侵蚀的交互影响, 结果见图 9 和图 10。结果显示, 土壤侵蚀的各影响因子之间的交互作用较为复杂, 双

因子交互作用对土壤侵蚀的解释力明显高于单一因子, 且存在非线性增强、独立和单因子非线性减弱 3 种交互作用方式。因此, 宜昌市的土壤侵蚀主要受多因子共同作用的影响, 而非单一因子的驱动。具体而

言, C 因子和 R 因子的交互作用对土壤侵蚀的影响最大, 平均值为 0.120; 其次为 C 因子和 LS 因子的交互作用对土壤侵蚀的影响, 平均值为 0.117。此外, K 因子、 E 因子和 P 因子与其他所有因子的交互作用对土壤侵蚀的影响均较小, 可能与单因子 q_v 值较小有关。

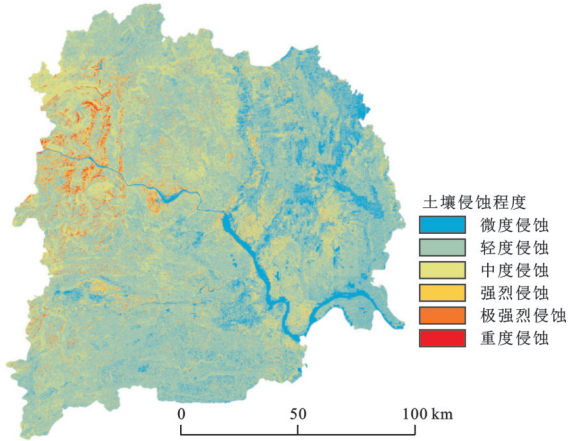


图 7 宜昌市多年平均土壤侵蚀程度空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of the annual average soil erosion grade within the Yichang City

表 4 1990—2022 年各土壤侵蚀影响因子 q_v 值

Table 4 Statistics of the q_v values for different influence factors during 1990—2022

影响因子	最大值	最小值	平均值
C 因子	0.1028	0.0297	0.0752
LS 因子	0.0808	0.0047	0.0492
R 因子	0.0284	0.0043	0.0134
K 因子	0.0138	0.0026	0.0078
S 因子	0.0143	0.0034	0.0063
E 因子	0.0098	0.0032	0.0052
P 因子	0.0093	0.0001	0.0036

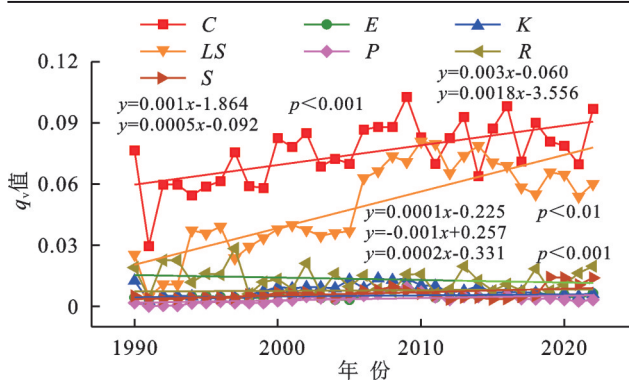


图 8 1990—2022 年各土壤侵蚀影响因子 q_v 值时程变化特征

Fig. 8 Temporal variations of the q_v values of different soil erosion influence factors during 1990—2022

如图 10 所示, 不同年份各土壤侵蚀影响因子之间的交互作用存在一定的差异。总体来说, 大部分影响因子之间的交互作用为非线性增强, 说明大多数影响因子之间的交互作用对土壤侵蚀的影响都较单一因子的影响更大。具体而言, K 因子与 P 因子、 E

因子与 LS 因子、 LS 因子与 S 因子在典型年的交互作用均为非线性减弱; C 因子与其他所有因子在 2015 及以前的典型年的交互作用均为非线性增强, 2020—2022 年与 S 因子的关系变为相互独立; 1990—2000 年期间, P 因子与 R 因子之间不存在交互作用, 但 2005 年后二者交互作用变为非线性增强。以上现象说明在同一地区, 不同时间里相同影响因子之间对土壤侵蚀的交互作用会发生一定的变化。

4 讨论

宜昌市的地形有明显的梯度特征, 东部以低海拔的平原为主, 西部以高海拔的山地地形为主, 地形的差异也直接导致该地区土壤侵蚀存在较为明显的空间分异性。本研究发现, 宜昌市多年平均土壤侵蚀模数约为 $22.72 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 属于轻度侵蚀, 呈不显著增长趋势; 但该地区多年平均最大土壤侵蚀模数约为 $3114.06 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 属于剧烈侵蚀, 呈不显著减小趋势。空间上, 宜昌市的土壤侵蚀重点区域主要集中于西北部山区, 部分中度侵蚀地区分布于东部平原地区。全市以轻度侵蚀和微度侵蚀为主, 占全市面积的 78.64%, 强烈、极强烈和剧烈侵蚀区域占全市面积的 6.51%, 现有研究^[25]显示: 湖北省主要为轻度侵蚀, 中度侵蚀及以上等级侵蚀所占面积较小, 2000—2005 年土壤侵蚀等级降低集中在神农架林区和宜昌市秭归县周边, 这与本研究的结果相近。

R 因子作为土壤侵蚀的重要驱动力之一, 其在宜昌市西北部的空间分异性比东南部更为显著(图 1)。已有研究表明, 在海拔变化较大的山地区域, 其降水的空间变化特征更为复杂^[26]。相较于平原地区, 山区更容易形成地形雨, 从而提高降雨侵蚀风险。本研究发现宜昌市整体的 R 因子呈增长趋势, 但区域最大值呈减小趋势。说明气候变化背景下, 宜昌市的侵蚀性降水整体有所增加, 但极端值有所下降。 C 因子呈波动增长趋势, 且东部区域明显高于其他地区, 可能是由于东部地区城镇更为集中, 近几十年人类活动显著, 相对密集的耕地及开发用地所导致。其次, P 因子整体呈显著减小趋势, 可以看出宜昌市的土地利用方式更趋于合理, 对土壤侵蚀有一定的改善作用。

本研究基于地理探测器进一步探究宜昌市土壤侵蚀影响因素的年际变化特征。研究结果发现, 单一因子中, 宜昌市土壤侵蚀主要受 C 因子、 P 因子、 K 因子和 R 因子影响; 大多数双因子之间交互作用对土壤侵蚀的解释力明显高于单因子。总的来说, 宜昌市的土壤侵蚀主要受多因子之间的复杂交互作用所导致。相比前人研究, 本研究创新地分析了近 33 年宜昌市土

壤侵蚀影响因子对土壤侵蚀影响的年际变化特征。研究发现,随着社会的发展, P 、 C 、 LS 和 S 因子对土壤侵蚀的影响呈显著增长趋势($p < 0.05$),而 R 因子对土壤侵蚀的影响呈显著减小趋势($p < 0.001$)(图 8)。该结果说明侵蚀性降雨在土壤侵蚀过程中的贡献呈减小趋势,其他因子的影响逐渐增加,宜昌市土壤侵

蚀更容易受人类活动影响。同时,随着水土保持措施的加强,土壤条件得到有效的改善,从而减小土壤性质对土壤侵蚀的贡献^[27]。该现象说明土壤侵蚀受人类活动干预的影响逐渐加强,而自然因子的影响则逐渐减小,极端的土壤侵蚀有望得到有效缓解,但整体上仍需进一步加强防范(图 5)。

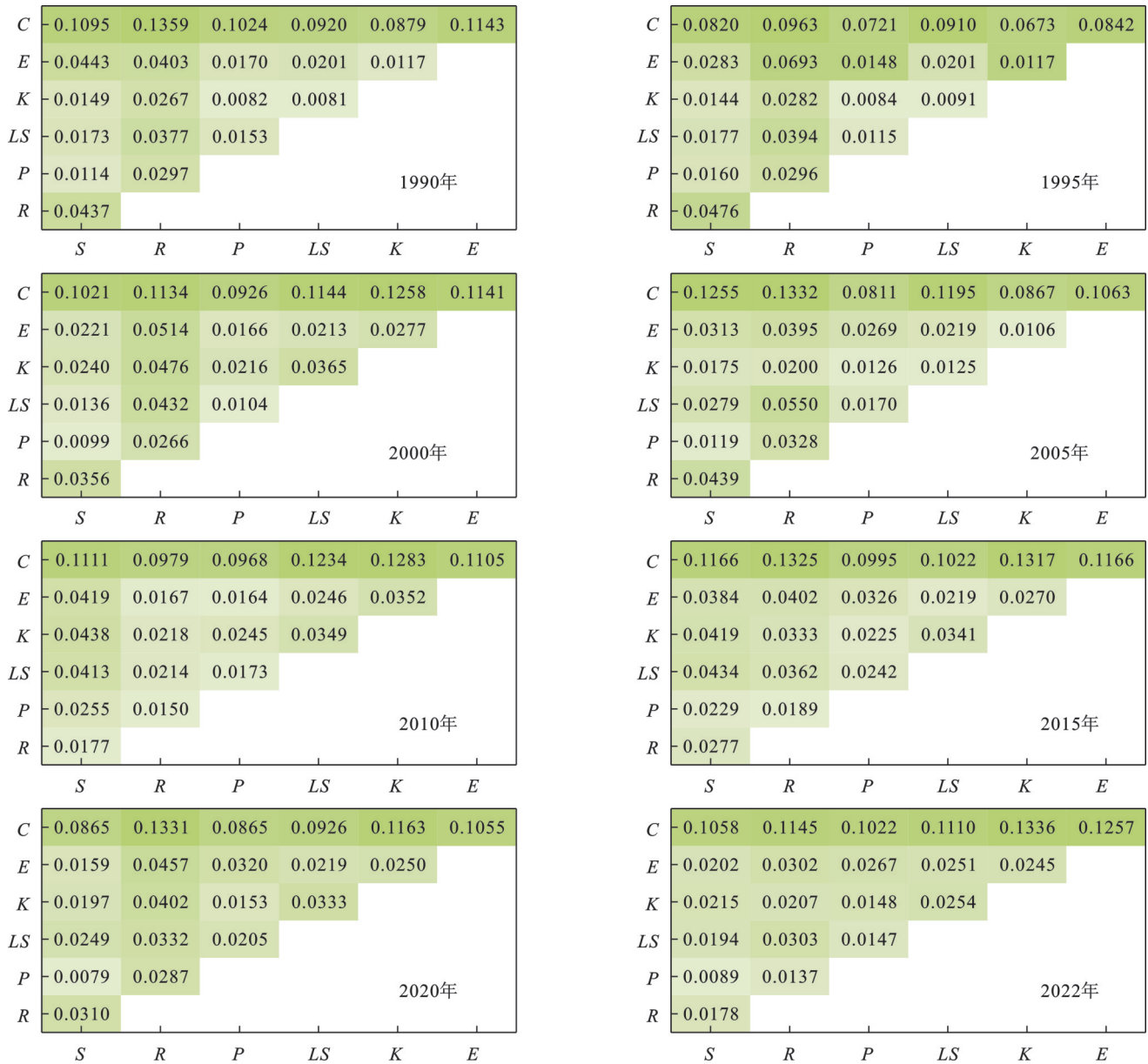
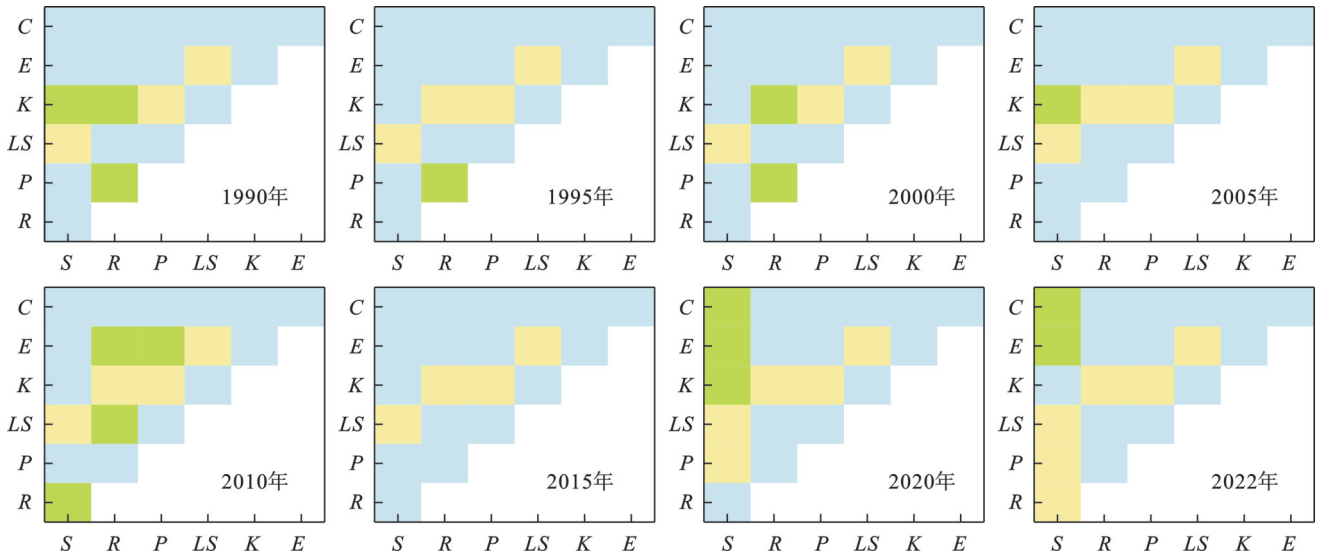


图 9 各典型年各土壤侵蚀因子交互分析结果

Fig. 9 Interaction analysis results of various soil erosion influence factors in typical years

综上所述,宜昌市的土壤侵蚀高风险区主要集中于西北山区,以及东南部农耕区域。为进一步缓解当地土壤侵蚀现状,应主要关注宜昌市西北山区(秭归县和远安县南部)的土壤侵蚀防治工作。由于受地形限制,应加强该部分地区的水土保持工程的建设,通过减小泥沙输送来缓解当地的水土流失。值得注意的是,秭归县地处三峡库区水土保持生态功能区,应更为注重该地区的水土流失防治。为进

一步有针对性地开发适用于当地的水土保持措施,可针对秭归县的土壤侵蚀开展更为精细的模拟分析,并结合更为详细的土壤侵蚀因子,分析该地区土壤侵蚀的主控因子,从而更有针对性地开展相关水土流失防治工作。其次,气候变化背景下,各地降水条件发生了显著变化^[28],应加强分析未来气候变化对该地区土壤侵蚀的影响,为未来土壤侵蚀防治工作提供一定的科学依据。



注:蓝色代表非线性增强,绿色代表独立,黄色代表单因子非线性减弱。

图10 各典型年各土壤侵蚀影响因子交互作用类型示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the interaction types of various soil erosion influence factors in a typical year

5 结论

(1) 宜昌市 R 因子的多年平均值为 $3\ 875\ \text{MJ} \cdot \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, K 因子的多年平均值 $0.12\ (\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{mm})$, C 因子、 P 因子和 LS 因子的年平均值分别为 0.065 、 0.556 、 6.05 。总体而言, R 因子呈不显著增长趋势, C 因子和 P 因子分别呈显著增长和显著减小趋势 ($p < 0.001$); 各因子的空间分布特征受地形影响较为明显, 存在空间分异特征。

(2) 研究时段内, 宜昌市多年平均土壤侵蚀模数为 $22.72\ \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 呈不显著增长趋势; 但区域最大土壤侵蚀模数呈减小趋势, 多年均值为 $3\ 114.06\ \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。整体上, 宜昌市的土壤侵蚀有轻微加剧, 但是针对部分地区的极端土壤侵蚀则有所改善。空间上, 宜昌市土壤侵蚀强度较高的区域主要集中于西北山区, 其他地区土壤侵蚀情况相对较好。根据分级标准, 宜昌市土壤侵蚀以轻度侵蚀和微度侵蚀为主, 占全市面积的 78.64% , 但强烈、极强烈和剧烈侵蚀区域仍占全市面积的 6.51% , 需进一步加强土壤侵蚀防治, 尤其是西北部秭归县地区。

(3) 地理探测器结果显示, 宜昌市土壤侵蚀的主控影响因子为 C 因子和 LS 因子, 且其对土壤侵蚀的影响随时间呈显著增长趋势 ($p < 0.001$); 相反, R 因子对土壤侵蚀的影响随时间呈显著减小趋势。多因子耦合分析结果显示, 大多数影响因子之间的交互作用对土壤侵蚀的解释力明显高于单一因子, 该地区土壤侵蚀主要受多因素协同作用的影响。 C 因子和 R 因子的交互作用对土壤侵蚀的影响最大, 其次为 C 因子和 LS 因子。随着水土流失防治工作的开展,

植被覆盖和水土保持措施逐渐成为土壤侵蚀的主控因子, 未来需针对植被覆盖率低的区域及陡坡区域开展水土保持工作, 缓解高风险区的土壤侵蚀。

参考文献 (References):

- [1] Wei C, Dong X H, Yu D, et al. An alternative to the Grain for Green Program for soil and water conservation in the upper Huaihe River basin, China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 43: 101180.
- [2] Zhang F, Liu B Y, Zhu L P, et al. Call for joint international actions to improve scientific understanding and address soil erosion and riverine sediment issues in mountainous regions [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(3): 586-588.
- [3] 中华人民共和国水利部. 2024年中国水土保持公报 [EB/OL]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb>, 2025-03-21.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Soil and Water Conservation Bulletin of China in 2015 [EB/OL]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb>, 2025-03-21.
- [4] 廖瑞恩, 齐实, 赖金林, 等. 西南高山峡谷区水力侵蚀时空变化及其驱动力 [J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 139-147.
Liao R E, Qi S, Lai J L, et al. Spatial-temporal variation and driving mechanism of water erosion in southwest alpine-canyon area of China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 139-147.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [6] 王世豪, 徐新良, 曹巍. 2000—2020年东北黑土地土壤侵蚀时空演化特征 [J]. 资源科学, 2023, 45(5): 951-965.

- Wang S H, Xu X L, Cao W. Spatial and temporal changes of erosion in the black soil region of Northeast China from 2000 to 2020[J]. *Resources Science*, 2023, 45(5):951-965.
- [7] 熊微微,杨浪浪,岳兴盛. 2000—2022年滇中地区土壤侵蚀时空变化研究[J]. *中国水土保持*, 2024(7):59-63.
Xiong W W, Yang L L, Yue X S. Temporal and spatial changes of soil erosion in central Yunnan from 2000 to 2022[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2024(7):59-63.
- [8] 涂怡,陈虎,尹雯,等. 湖北省清江流域土壤侵蚀时空变化及影响因子研究[J]. *湖北民族大学学报:自然科学版*, 2024(4):593-600.
Tu Y, Chen H, Yin W, et al. Study on spatial and temporal changes of soil erosion and influencing factors in Qingjiang River Basin of China's Hubei Province[J]. *Journal of Hubei Minzu University: Natural Science Edition*, 2024(4):593-600.
- [9] 何宇琛,晋华,朱博文,等. 晋西北黄土区土壤侵蚀动态变化及驱动力研究[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(8):201-204,136.
He Y C, Jin H, Zhu B W, et al. Study on dynamic change and driving force of soil erosion in loess area of northwest Shanxi Province[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(8):201-204,136.
- [10] Guo Y R, Peng C H, Zhu Q A, et al. Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: model applications, limitations and future challenges[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250:109403.
- [11] Weng X R, Zhang B E, Zhu J X, et al. Assessing land use and climate change impacts on soil erosion caused by water in China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(10):7865.
- [12] Zhang B, Fang H Y, Wu S F, et al. Soil erosion prediction and spatiotemporal heterogeneity in driving effects of precipitation and vegetation on the northern slope of Tianshan Mountain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 459:142561.
- [13] 李朋飞,张丽媛,胡晋飞,等. 基于 PESERA 的三江源土壤侵蚀时空分布及其驱动因素[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(3):41-52.
Li P F, Zhang L Y, Hu J F, et al. Spatiotemporal pattern of soil erosion rates and its driving factors in the three-river headwater region based on the PESERA model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(3):41-52.
- [14] Ali Asad Naqvi S, Tariq A, Shahzad M, et al. Predicting soil erosion risk using the revised universal soil loss equation(RUSLE) model and geo-spatial methods[J]. *Hydrological Processes*, 2024, 38(8): e15248.
- [15] Bovi R C, Moreira C A, Rosolen V S, et al. Piping process: genesis and network characterization through a pedological and geophysical approach[J]. *Geoderma*, 2020, 361:114101.
- [16] Li X W, Song Z Q, Lu Y F, et al. Evaluation of soil erosion in the Changhua River Basin on Hainan Island based on the Chinese soil loss equation model[J]. *Helvion*, 2024, 10(19): e38291.
- [17] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [18] Zhang Q, Miao C Y, Su J J, et al. A new high-resolution multi-drought-index dataset for mainland China[J]. *Earth System Science Data*, 2025, 17(3), 837 - 853.
- [19] Xie Y, Yin S Q, Liu B Y, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535:547-558.
- [20] 黄庆丽,史常青,赵廷宁,等. 基于RUSLE模型和最优地理探测器的兴安盟地区1985—2023年土壤侵蚀研究[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(6):1-10,20.
Huang Q L, Shi C Q, Zhao T N, et al. Study on soil erosion in Xing'an League from 1985 to 2023 based on RUSLE model and optimal parameter-based geodetector[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(6):1-10,20.
- [21] 兰泽凡,田小靖,牛祎凡,等. 基于RUSLE模型的雅鲁藏布江流域土壤侵蚀评价[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3):20-29.
Lan Z F, Tian X J, Niu Y F, et al. Evaluation on soil erosion based on RUSLE model in the Yarlung Zangbo river basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3):20-29.
- [22] 程先富,余芬. 安徽省土壤侵蚀空间分布及其与环境因子的关系[J]. *地理研究*, 2010, 29(8):1461-1470.
Cheng X F, Yu F. Spatial distribution of soil erosion and its relationship to environment factors in Anhui Province[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(8):1461-1470.
- [23] Issaka S, Ashraf M A, Laari P B, et al. RUSLE-GIS/RS based prediction of soil loss from Liangzi Lake watershed, Hubei, China[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2021, 242:203-213.
- [24] 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 J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [25] 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. Spatial and temporal characteristics of soil erosion in Hubei Province based on CSLE[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4):43-52,62.