

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.037

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.037

斛如媛, 杨佳, 赵海平, 等. 三峡库区生态屏障区土壤侵蚀时空变化特征与驱动因素[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6):94-105.

HU Ruyuan, YANG Jia, ZHAO Haiping, et al. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of soil erosion in ecological barrier zone of Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):94-105.

## 三峡库区生态屏障区土壤侵蚀时空变化特征与驱动因素

斛如媛<sup>1,2</sup>, 杨佳<sup>3</sup>, 赵海平<sup>1,2</sup>, 勾蒙蒙<sup>1,2</sup>, 刘常富<sup>1,2</sup>, 肖文发<sup>1,2</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 湖北秭归三峡库区森林生态系统定位观测研究站, 湖北 秭归 443600;

3. 中南林业科技大学生态环境学院, 长沙 410004)

**摘要:** [目的] 研究三峡库区生态屏障区土壤侵蚀时空变化特征及其驱动因素有利于提升区域水土保持能力, 筑牢生态安全屏障。 [方法] 采用RUSLE模型, 结合Sen+MK趋势分析、Hurst指数分析、PLUS模型等研究三峡库区生态屏障区2000—2023年土壤侵蚀时空变化特征及未来土壤侵蚀格局, 并采用随机森林量化植被覆盖、降雨、人口密度等对土壤侵蚀的影响。 [结果] 1) 生态屏障区土壤侵蚀以微度(59.68%±5.59%)和轻度(38.86%±4.64%)侵蚀为主, 空间上表现为中部高东西低的趋势, 且邻近水系区域土壤侵蚀最明显。 2) 2000—2023年生态屏障区单位面积年均土壤侵蚀模数下降2 288.88 t/(km<sup>2</sup>·a), 整体呈显著下降趋势, 轻微退化区域面积(48.00%)最高, 但未来土壤侵蚀处于不断改善趋势, 且生态保护情景下微度侵蚀面积占比最高。 3) 随机森林结果表明植被覆盖(30.64%±10.88%)和降雨(23.43%±8.57%)为土壤侵蚀的主要驱动因子, 植被覆盖和人口密度的相对重要性随时间呈下降趋势, 降雨的相对重要性随时间呈先增长后下降趋势, 而坡度和高程的相对重要性随时间呈增长趋势。 [结论] 2000—2023年生态屏障区土壤侵蚀状况得到明显改善, 但城镇化地区土壤侵蚀进一步加剧, 未来应统筹植被覆盖、降雨及地形等因素综合制定水土保持措施以改善水土流失状况。

**关键词:** 三峡库区生态屏障区; 土壤侵蚀; 时空特征; 随机森林; 驱动因素

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0094-12

## Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Factors of Soil Erosion in Ecological Barrier Zone of Three Gorges Reservoir Area

HU Ruyuan<sup>1,2</sup>, YANG Jia<sup>3</sup>, ZHAO Haiping<sup>1,2</sup>, GOU Mengmeng<sup>1,2</sup>, LIU Changfu<sup>1,2</sup>, XIAO Wenfa<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Hubei Zigui Three Gorges Reservoir Area Forest Ecosystem Observation and Research Station, Zigui, Hubei 443600, China; 3. School of Ecology and Environment,

Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** [Objective] Investigating the spatiotemporal variation characteristics of soil erosion and its driving factors in the ecological barrier zone of the Three Gorges Reservoir area is beneficial to enhancing regional soil and water conservation capacity and strengthening the ecological security barriers. [Methods] The RUSLE model was employed, combined with Sen+MK trend analysis, Hurst index analysis, and PLUS model, to study the spatiotemporal variation characteristics of soil erosion from 2000 to 2023 and the future soil erosion patterns in the ecological barrier zone of the Three Gorges Reservoir area. In addition, the random forest model was used to quantify the influence of vegetation cover, rainfall, population density, and other factors on soil erosion. [Results] 1) Soil erosion in the ecological barrier zone was predominantly slight (59.68%±5.59%) and mild erosion (38.86±4.64%), exhibiting a spatial pattern of higher in the central part and lower in the east and west, with the most

收稿日期: 2025-06-12

修回日期: 2025-08-04

录用日期: 2025-08-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-15

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305205)

第一作者: 斛如媛(1997—), 女, 博士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: ruyuan1997@126.com

通信作者: 勾蒙蒙(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事生态系统服务与水土保持研究。E-mail: goumm0243@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

severe soil erosion occurring near water systems. 2) The annual average soil erosion modulus per unit area in the ecological barrier zone decreased by 2 288.88 t/(km<sup>2</sup>·a) from 2000 to 2023, demonstrating a significant declining trend. Although the area with slight degradation (48.00%) was the highest, future soil erosion was expected to continuously improve, with the highest proportion of slight soil erosion area under the ecological protection scenario. 3) The results of random forest model showed that vegetation cover (30.64%±10.88%) and rainfall (23.43%±8.57%) were the primary driving factors of soil erosion. The relative influence of vegetation cover and population density exhibited a declining trend over time, while relative influence of rainfall first increased and then decreased. In contrast, the relative importance of slope and elevation showed an increasing trend with time. [Conclusion] The soil erosion conditions in the ecological barrier zone have significantly improved from 2000 to 2023. However, soil erosion has further intensified in urbanized areas. In the future, comprehensive soil and water conservation measures should be formulated by coordinating factors such as vegetation cover, rainfall, and topography to mitigate soil erosion.

**Keywords:** ecological barrier zone of Three Gorges Reservoir area; soil erosion; spatiotemporal characteristics; random forest; driving factors

Received: 2025-06-12

Revised: 2025-08-04

Accepted: 2025-08-10

Online(www.cnki.net): 2025-09-15

土壤侵蚀是全球范围内最典型的土地退化形式之一<sup>[1-2]</sup>,不仅导致土壤功能退化、降低土地生产力,还造成江河湖库堵塞及水质污染,严重威胁区域经济和生态环境可持续发展<sup>[3-4]</sup>。三峡库区地质地貌复杂,地表土层贫瘠,保土保水能力差,生态本底先天脆弱,加之不合理的土地管理措施等使其成为我国水土流失最严重的地区之一<sup>[5-6]</sup>。三峡库区生态屏障区指《三峡后续工作规划》<sup>[7]</sup>中提出的土地淹没线至第1道山脊线之间的区域,是构建水库生态屏障的关键区域。但三峡水利枢纽工程建设、建设用地扩张、经济林不合理种植等人类活动干扰造成生态屏障区景观破碎、水土流失加剧,外加坡陡土薄、防护林结构简单等生态问题,导致生态屏障区面临较高的土壤侵蚀风险<sup>[8-9]</sup>。因此,准确分析生态屏障区土壤侵蚀时空变化及驱动因素,对生态屏障区水土流失防治政策制定和筑牢生态安全屏障具有重要意义。

定量评估土壤侵蚀的方法主要包括人工降雨模拟试验、径流小区定位观测及RUSLE模型等<sup>[10]</sup>。其中,RUSLE模型因其参数明确、结构简洁、适用性强、兼容地理信息系统(GIS),被广泛应用于探究区域尺度土壤侵蚀空间分布<sup>[4]</sup>。吴昌广等<sup>[11]</sup>基于RUSLE模型评估了三峡库区土壤侵蚀风险及其空间分布;罗志邦<sup>[12]</sup>采用其评估气候变化及土地利用变化背景下耦合区域植被恢复政策的三峡库区土壤侵蚀,说明利用RUSLE模型进行三峡库区土壤侵蚀研究具有良好的适用性。在土壤侵蚀时空变化评估中,传统方法多采用转移矩阵法,该方法局限于不同年份土壤侵蚀强度面积转移情况<sup>[2]</sup>,难以揭示土壤侵

蚀变化的趋势性与持续性。Sen+MK趋势分析和Hurst指数相结合的时间序列的趋势分析可通过降低异常数据的影响具有更高的稳定性,有效明确土壤侵蚀时空变化特征及预测时间序列数据的未来趋势<sup>[13]</sup>,如张卓佩等<sup>[10]</sup>通过该方法揭示黄河中游多沙粗沙区土壤水蚀时空变化特征。然而,目前关于三峡库区土壤侵蚀时空变化研究多集中于整个库区<sup>[14-15]</sup>或某个小流域<sup>[16-17]</sup>,对于生态屏障区这一关键生态功能区的土壤侵蚀时空动态缺乏系统研究。如何精准识别生态屏障区土壤侵蚀演变规律及未来预测,是当前亟须解决的问题。

定量识别土壤侵蚀驱动因素有助于揭示其发生机制<sup>[18]</sup>。传统方法如相关性分析、主成分分析、地理探测器等在识别驱动因素时,面对高维、多重共线性等复杂数据时,存在捕捉数据能力有限等缺点,进而忽略土壤侵蚀与各影响因素之间的非线性关系<sup>[18-19]</sup>。相比之下,机器学习算法在捕捉大型数据集中的复杂关系方面表现出色,为驱动因素分析提供新视角<sup>[20]</sup>。随机森林作为一种多功能的集成学习算法,相较传统方法能够高效处理高维数据,通过随机抽样构建并组合多个决策树,在训练过程中采用Bootstrap聚合与特征随机子集选择双重随机化策略,增强模型泛化能力并降低预测方差<sup>[21]</sup>。同时,通过衡量变量在分裂过程中的贡献度,定量评估各驱动因素的相对重要性,进而识别其与响应变量之间可能存在的非线性关系与多因子交互作用<sup>[18,21]</sup>,如朱婉菁等<sup>[2]</sup>和吴文贤等<sup>[18]</sup>采用随机森林分别明晰了滇西北云龙县和喀斯特地区安顺市土壤侵蚀均主要由植被覆盖因子驱动。因此,采用随机森林量

化生态屏障区土壤侵蚀驱动因素及各因素与土壤侵蚀之间的非线性关系,可为生态屏障区土壤侵蚀综合管理提供理论支撑。

基于三峡库区生态屏障区的重要战略地位及其面临的土壤侵蚀风险,本研究以三峡库区生态屏障区为研究对象,通过RUSLE模型和GIS量化土壤侵蚀时空分布,采用Sen+MK趋势分析探讨土壤侵蚀时空变化,结合Hurst指数预测未来土壤侵蚀状态,并利用PLUS模型模拟自然发展、经济发展优先、生态保护3种情景下土地利用,评估土地利用变化对土壤侵蚀的影响,最后利用随机森林分析影响土壤侵蚀的主要驱动因素,以为生态屏障区生态环境修复与水土保持工作防治提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

三峡库区生态屏障区(29°20′~31°60′N,106°05′~111°10′E)为库区土地淹没线(坝前正常蓄水位175 m接五年一遇洪水和11月五年一遇来水回水水面线)至第1道山脊线之间的区域<sup>[7]</sup>,涉及湖北

省及重庆市的20个区/县,总面积5 527.55 km<sup>2</sup>(图1)。该区域属亚热带湿润季风气候,年平均气温11.60~19.55℃,年平均降水量992.50~1 437.59 mm,超过80%的降雨主要集中在5—9月,土壤类型以黄壤、山地黄棕壤、紫色土、石灰土等为主。2000年起大力推广退耕还林工程后,屏障区自上而下逐渐发展为生态保护带、生态利用带、生态缓冲带,其中生态保护带以马尾松、杉木等人工防护林为主,生态利用带以柑橘、茶叶等经济林为主,生态缓冲带主要包括消落区、村庄及菜地等。到2023年,生态屏障区土地利用类型以耕地(24.51%)、林地(23.43%)和灌木林地(21.78%)为主。

### 1.2 数据来源及处理

本研究使用的数据主要包括土地利用、气象、地形、遥感、土壤和经济社会统计数据(表1)。其中,土地利用数据通过重分类划分为林地、灌木林地、耕地、园地、草地、水域、裸地、建设用地八大类。所有数据均经过裁剪、投影转换、栅格转换并重采样至30 m像素尺度。

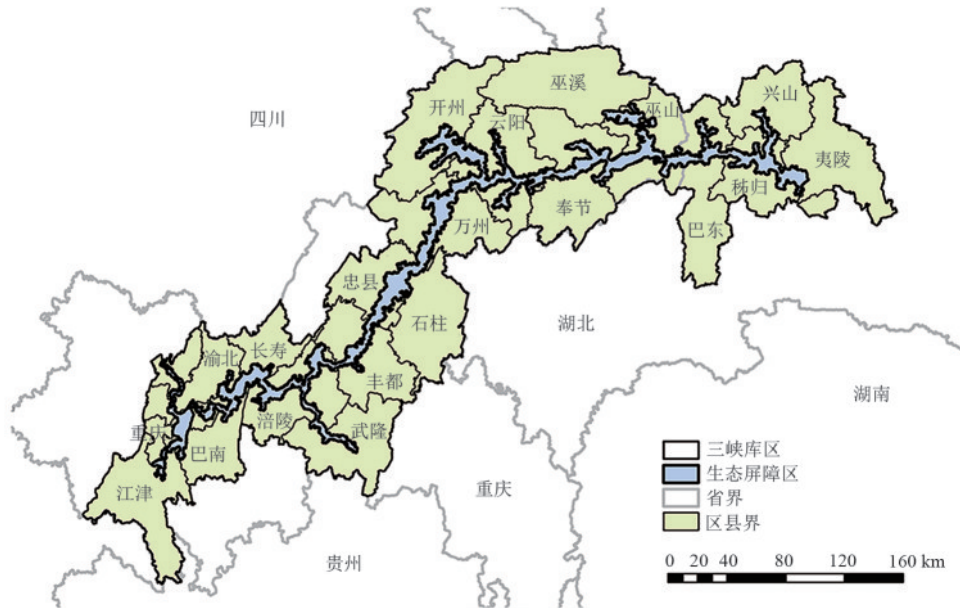


图1 生态屏障区地理位置

Fig. 1 Geographic location of ecological barrier zone

### 1.3 研究方法

1.3.1 RUSLE模型 RUSLE模型即修正的通用土壤流失方程模型,综合考虑降雨、土壤、地形、植被覆盖和水土保持措施等多种因素对土壤侵蚀的影响<sup>[4]</sup>。本研究采用其开展生态屏障区2000—2023年土壤侵蚀模数计算,其计算公式为:

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

式中:A为土壤侵蚀模数,t/(hm<sup>2</sup>·h);R为降雨侵蚀力因子,(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a);K为土壤可蚀性因

子,(t·hm<sup>2</sup>·h)/(MJ·hm<sup>2</sup>·mm);LS为坡长坡度因子;C为植被覆盖与管理因子;P为水土保持措施因子。

#### 1) 降雨侵蚀力因子(R)

降雨侵蚀力因子综合反映由降雨引起的土壤侵蚀的潜在能力<sup>[22]</sup>,本研究采用章文波等<sup>[23]</sup>提出的日降雨量侵蚀力模型计算,公式为:

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

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586 \times \beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式中: $R_i$ 为第*i*个半月的侵蚀力, $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$ ;  $P_j$ 为第*i*个半月第*j*日 $\geq 12$  mm的降雨量,mm; $k$ 为第*i*个半月降雨量 $\geq 12$  mm的天数,d; $P_{d12}$ 为日降雨量 $\geq 12$  mm的日平均降雨量,mm; $P_{y12}$ 为日雨量 12 mm

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \times \exp \left[ -0.0256 \times SAN \times (1 - SIL/100) \right] \right\} \times \left[ \frac{SIL}{CLA + SIL} \right]^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25 \times C}{C + \exp(3.72 - 2.95 \times C)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.7 \times SNI}{SNI + \exp(-5.51 + 22.9 \times SNI)} \right] \quad (5)$$

$$SNI = 1 - SAN/100 \quad (6)$$

式中:SAN、SIL、CLA和C分别为砂粒、粉粒、黏粒占比和有机质质量分数,%。

3) 坡长坡度因子(LS)

坡长坡度因子表示地形对土壤侵蚀强度的影响<sup>[18]</sup>,二者均从DEM数据中提取。对于坡度因子,在不同坡度下分别采用不同的公式计算坡度因子,公式为:

$$S = \begin{cases} 10.80 \times \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.80 \times \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ \\ 21.91 \times \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (7)$$

式中:S为坡度因子; $\theta$ 为坡度, $(^\circ)$ ;

以上的年平均降雨量,mm;将日降雨量 $\geq 12$  mm的降雨称为侵蚀性降雨<sup>[25]</sup>。

2) 土壤可蚀性因子(K)

土壤可蚀性因子反映土壤颗粒被水力分离和搬运的难易程度,采用EPIC模型计算<sup>[24]</sup>,公式为:

对于坡长因子,采用符素华等<sup>[25]</sup>提出的方法进行计算,当 $\lambda_{out} > \lambda_{in}$ 时,公式为:

$$L_i = \frac{\lambda_{out}^{m+1} - \lambda_{in}^{m+1}}{(\lambda_{out} - \lambda_{in}) \times 22.13^m} \quad (8)$$

式中: $L_i$ 为第*i*个栅格的坡长因子; $\lambda_{out}$ 、 $\lambda_{in}$ 分别为栅格出口及入口的坡长,m; $m$ 为坡长指数。

当 $\lambda_{out} = \lambda_{in}$ 时,公式为:

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 0.5^\circ \\ 0.3 & 0.5^\circ \leq \theta < 1.5^\circ \\ 0.4 & 1.5^\circ \leq \theta < 3^\circ \\ 0.5 & \theta \geq 3^\circ \end{cases} \quad (9)$$

表 1 数据来源与处理

Table 1 Data sources and processing

| 数据类型     | 数据名称                   | 年份                                  | 数据来源与处理   | 分辨率/m |
|----------|------------------------|-------------------------------------|---|-------|
| 土地利用     | —                      | 2000年、2005年、2010年、2015年、2020年、2023年 | 基于数据 Landsat-OLI/ETM、Sentinel-1、Sentinel-2等遥感数据为基础,依据《全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系》,结合随机森林分类和人工目视解译获得,总体精度均大于90%,Kappa系数>0.94            | 30    |
| 气象数据     | 温度                     | 2000年、2005年、2010年、2015年、2020年、2023年 | 来源于国家气象信息中心( <a href="https://data.cma.cn">https://data.cma.cn</a> ),各年份气象数据均通过普通克里金插值方法获得,将估算的降雨数据与气象站数据进行线性拟合, $R^2$ 均>0.96 | 30    |
|          | 降水                     | 2000年、2005年、2010年、2015年、2020年、2023年 |   |       |
| 地形数据     | 高程                     | —                                   | 国家青藏高原科学数据中心( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )   | 30    |
|          | 坡长<br>坡度               | —                                   |   |       |
|          | 距水系距离                  | 2021年                               | 全国地理信息资源目录服务系统( <a href="https://www.webmap.cn/">https://www.webmap.cn/</a> ),采用欧式距离计算  | 1 000 |
| 遥感数据     | 归一化植被指数(NDVI)          | 2000年、2005年、2010年、2015年、2020年、2023年 | 分辨率成像光谱仪传感器(MODIS/061/MOD13Q1)  | 250   |
| 土壤数据     | 土壤类型、质地、各粒径比例、有机质含量百分比 | —                                   | 1:100万中国土壤数据库( <a href="http://vdb3.soil.csdn.cn/">http://vdb3.soil.csdn.cn/</a> )  | 1 000 |
| 经济社会统计数据 | 人口密度                   | 2000年、2005年、2010年、2015年、2020年、2023年 | Land Scan人口密度数据集( <a href="https://landscan.orml.gov/">https://landscan.orml.gov/</a> )                                       | 1 000 |
|          | 夜间灯光指数                 | 2023年                               | 国家地球系统科学数据中心( <a href="https://www.geodata.cn/aboutus.html">https://www.geodata.cn/aboutus.html</a> )                         | 500   |
|          | 到一级、二级、三级道路、高速公路距离     | 2021年                               | 全国地理信息资源目录服务系统( <a href="https://www.webmap.cn/">https://www.webmap.cn/</a> ),采用欧式距离计算  | 1 000 |

4)植被覆盖与管理因子(C)

植被覆盖与管理因子反映植被和人为耕种模式对土壤侵蚀量的影响<sup>[2]</sup>。计算公式为:

$$c = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (10)$$

$$C = \begin{cases} 1 & 0 \leq c < 10\% \\ 0.6508 - 0.3436 \times \lg c & 10\% \leq c < 78.3\% \\ 0 & c \geq 78.3\% \end{cases} \quad (11)$$

式中:C为植被覆盖与管理因子;c为植被覆盖度;NDVI为归一化植被指数;NDVI<sub>max</sub>、NDVI<sub>min</sub>分别为归一化植被指数最大值和裸土的归一化植被指数,采用图像像元百分位法剔除>95百分位值与<5百分位值后确定。

5)水土保持措施因子(P)

水土保持因子表示在特定的土壤侵蚀控制措施下,土壤流失的相对比例<sup>[16]</sup>,根据生态屏障区土地利用类型与地形地貌等综合因素,参考相关研究<sup>[8,12,16]</sup>,对不同土地利用类型进行赋值(表2)。

表2 不同土地利用类型的P

| 土地利用类型 | P    | 土地利用类型 | P    |
|--------|------|--------|------|
| 林地     | 0.95 | 草地     | 0.85 |
| 灌木林地   | 0.95 | 水域     | 0    |
| 园地     | 0.85 | 裸地     | 0.80 |
| 耕地     | 0.65 | 建设用地   | 0    |

1.3.2 土壤侵蚀趋势分析

1)Sen+MK空间趋势分析

采用Sen+MK方法分析2000—2023年土壤侵蚀变化趋势,该方法结合Theil-Sen Median斜率估计器的稳健性和Mann-Kendall趋势检验的显著性,提高分析的准确性和可靠性<sup>[14]</sup>。计算公式为:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{X_i - X_j}{i - j} \right) \quad (12)$$

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / \sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S + 1) / \sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (14)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & X_j - X_i > 0 \\ 0 & X_j - X_i = 0 \\ -1 & X_j - X_i < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n \times (n - 1) (2n - 5)}{18} \quad (16)$$

式中:β为斜率;X<sub>i</sub>和X<sub>j</sub>分别为i时刻和j时刻变量特

征值;S服从正态分布;sgn为符号函数;n为时间序列的长度。β>0呈改善趋势,β<0呈退化趋势。|Z|>1.96,表明趋势通过95%的显著性检验。根据β和Z值,将Sen+MK趋势划分为5个类型(表3)。

表3 Sen+MK趋势分析分类标准

| β                    | Z         | 2000—2023年变化趋势 |
|----------------------|-----------|----------------|
| β ≥ 0.0005           | Z  > 1.96 | 显著改善           |
|                      | Z  < 1.96 | 轻微改善           |
| -0.0005 < β < 0.0005 | Z  > 1.96 | 稳定区域           |
|                      | Z  < 1.96 | 轻微退化           |
| β < -0.0005          | Z  > 1.96 | 显著退化           |
|                      | Z  < 1.96 | 稳定区域           |

2)Hurst未来指数

采用重标极差分析,通过不同时间尺度下极差与标准差的比值,拟合对数尺度下的线性回归斜率,即Hurst指数,该指数用于衡量时间序列的自相关性。将其与Sen+MK趋势分析结果叠加可以有效预测未来变化趋势<sup>[10]</sup>。计算公式为:

$$Y_i = \sum_{t=1}^i (X_t - \bar{X}_n), \bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \quad (17)$$

$$R = \max(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n) - \min(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n) \quad (18)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X}_n)^2} \quad (19)$$

$$(R/S)_n = \frac{R}{S} \quad (20)$$

$$\log(R/S)_n = H \times \log n + C \quad (21)$$

式中:Y<sub>i</sub>为累积离差序列;n为长度;X<sub>t</sub>为时间序列;R为极差;S为标准差;R/S为重标极差;(R/S)<sub>n</sub>为重标极差平均值;H为Hurst指数。当H=0.5,序列无长期记忆(如随机游走);H>0.5,序列具有持续性(未来趋势与过去同方向);H<0.5,序列具有反持续性(未来趋势与过去反方向)。分类标准见表4。

表4 未来趋势分析分类标准

| 2000—2023年变化趋势 | H>0.5 | H=0.5 | H<0.5   |
|----------------|-------|-------|---------|
| 显著改善           | 持续性改善 | 稳定区域  | 改善-反转退化 |
| 轻微改善           |       |       |         |
| 稳定区域           |       |       |         |
| 轻微退化           | 持续性退化 |       | 退化-反转改善 |
| 显著退化           |       |       |         |

1.3.3 PLUS 模型 PLUS 模型基于土地扩张分析策略 (LEAS) 和多类型随机种子的 CA 模型 (CARS), 结合空间约束和地理条件, 能更准确地模拟未来不同情景下土地利用动态变化<sup>[26]</sup>。本文参考前人<sup>[12, 26-27]</sup>研究, 根据生态屏障区现状和相关发展政策规划, 分别设置自然发展情景、经济发展优先情景和生态保护情景预测 2035 年土地利用。自然发展情景: 土地利用变化延续 2000—2023 年的土地转移速率, 土地类型之间的转变不受到外界因素的影响。经济发展优先情景: 降低建设用地、园地向林地、灌木林地、草地转移可能性的 30%, 林地、灌木林地、草地转移到建设用地、园地的概率增加 20%, 并限制建设用地、园地转化为其他用地。生态保护情景: 结合生态保护工程, 降低林地、灌木林地、草地向建设用地转化可能性的 20%, 建设用地、耕地、园地转移到林地、灌木林地、草地的概率增加 20%。

1.3.4 随机森林回归模型 随机森林回归模型作为一种机器学习方法, 通过对训练样本随机抽样构建多个决策回归树, 并通过对多个决策回归树的预测值进行平均确定最终输出结果<sup>[21]</sup>。该模型对数据噪声具有较强的鲁棒性, 同时多个决策树的构建降低单个决策树可能出现的过拟合风险, 显著提高模型的稳定性和预测精度<sup>[18, 21]</sup>。

本研究基于生态屏障区地理特征、数据可用性及相关研究<sup>[6, 14, 28]</sup>, 选取高程、坡度、植被覆盖、降雨、

人口密度 5 个因子作为解释变量并通过共线性检验 ( $VIF < 10$ ), 采用四分位间距方法剔除异常值并对数据进行标准化, 同时将数据集按 8:2 划分为训练集和测试集。采用 Python 构建随机森林回归模型, 通过随机搜索与网格搜索方法确定随机森林模型超参数  $N\_Estimators$ 、 $Min\_Samples\_Split$ 、 $Min\_Samples\_Leaf$  和  $Max\_Depth$ , 并通过五折交叉验证, 计算测试集  $R^2$ 、 $RMSE$ 、 $MAE$  对模型精度进行评估。利用 Gini 系数量化各因子的相对重要性, Gini 系数值越大, 表示相对重要性越高。在此基础上, 以 2023 年数据为例绘制 5 个驱动因子的偏依赖关系图, 并通过因子间交互作用对土壤侵蚀影响的相对重要性。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤侵蚀强度时空变化特征

参照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)<sup>[29]</sup>, 将生态屏障区 2000—2023 年单位面积土壤侵蚀强度划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀 6 个等级 (图 2)。由图 2 可知, 生态屏障区 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年和 2023 年土壤侵蚀强度呈显著的空间异质性, 东部和西部以微度侵蚀为主; 东西向中部过渡区域侵蚀强度逐渐增大, 以轻度和中度侵蚀为主。同时, 越临近水系区域土壤侵蚀越明显, 具体表现为在距河道 0~500 m 内以强烈侵蚀和中度侵蚀为主, 距河流 >500 m 以微度侵蚀和轻度侵蚀为主, 说明水力冲刷与河岸稳定性对侵蚀的协同作用。

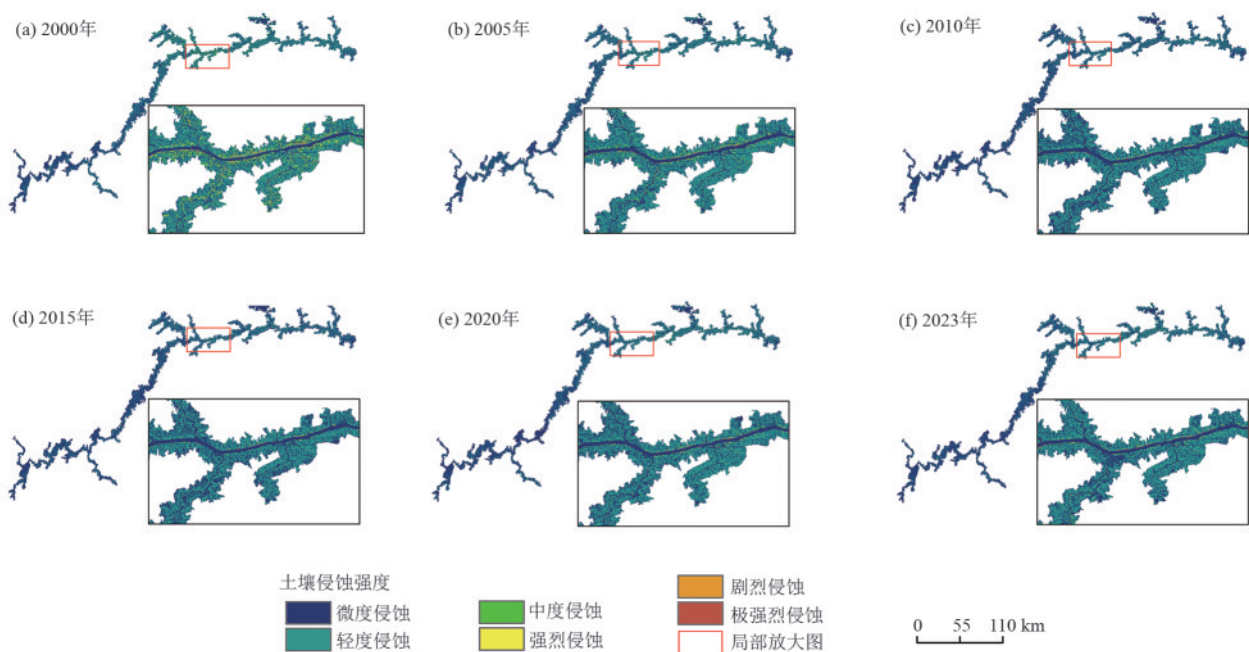
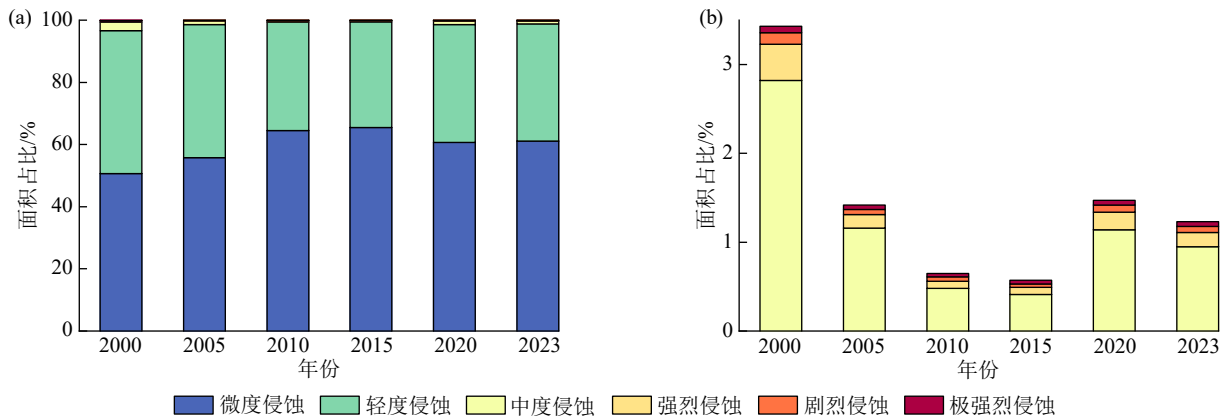


图 2 2000—2023 年土壤侵蚀强度空间分布  
 Fig. 2 Spatial distribution of soil erosion intensity from 2000 to 2023  
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

由图3可知,生态屏障区以微度(59.68%±5.59%)和轻度(38.86%±4.64%)侵蚀为主,占库区总面积的96.57%以上。微度侵蚀面积整体上随时间推移表现为增长趋势,其余侵蚀强度面积整体上随时间推移表现为下降趋势,说明生态保护和修复工程的实施改善屏障区土壤侵蚀状况。2015年微度侵蚀面积最大,占比65.43%,同时该年其余程度的侵蚀面积

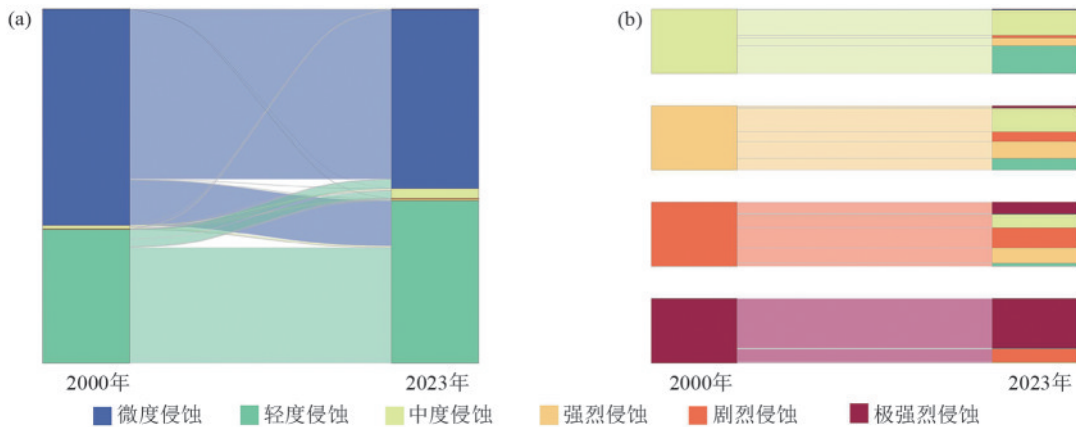
占比也最小,可能是2015年相比其余年份降雨量较小进而导致该结果。由图4可知,2000—2023年侵蚀等级保持不变的面积为4 480.65 km<sup>2</sup>,占全部面积的81.06%,转换面积前3的为轻度转微度、微度转轻度和中度转轻度,面积分别为713.03、145.82、123.77 km<sup>2</sup>,说明生态屏障区2000—2023年土壤侵蚀状况得到明显改善。



注:图b为图a局部放大图。

图3 2000—2023年各土壤侵蚀等级面积占比

Fig. 3 Area proportion of different soil erosion grades from 2000 to 2023



注:图b为图a中度、强烈、剧烈、极强烈侵蚀局部放大图。

图4 2000—2023年土壤侵蚀面积转移特征

Fig. 4 Transfer characteristics of soil erosion area from 2000 to 2023

## 2.2 土壤侵蚀模数时空变化特征

生态屏障区2000—2023年单位面积年均土壤侵蚀模数为3 771.29 t/(km<sup>2</sup>·a),年际波动显著(变异系数达32.50%),整体呈显著下降趋势( $p < 0.001$ )(图5)。其中,2000年、2005年、2010年、2015年、2020年、2023年单位面积侵蚀模数分别为5 988.88、4 233.33、2 988.88、2 744.44、3 877.77、3 700.00 t/(km<sup>2</sup>·a),总体而言,与2000年相比,2023年生态屏障区单位面积年均土壤侵蚀模数下降2 288.88 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀状况得到明显改善。

Sen+MK空间趋势分析结果显示,2000—2023年土壤侵蚀变化趋势分为显著退化、轻微退化、稳定、

轻微改善、显著改善5类(图6a)。轻微退化区域面积占比最高,达48.00%,且主要集中在西部城镇化地区和东部地区,说明快速城镇化导致土地利用发生改变进而加剧水土流失。土壤侵蚀改善区域面积占比次之,达46.80%,主要集中在森林资源丰富的东部和中部地区。根据Sen+MK空间趋势分析叠加Hurst指数对生态屏障区土壤侵蚀进行未来变化趋势预测,结果显示,改善区域占主导地位,面积达51.70%,分布在生境资源良好、植被覆盖度高的地区;退化区域仍占47.60%,城镇化地区土壤侵蚀将进一步加剧,尤其是中东部秭归和巴东、西部重庆市周边等地区(图6b)。

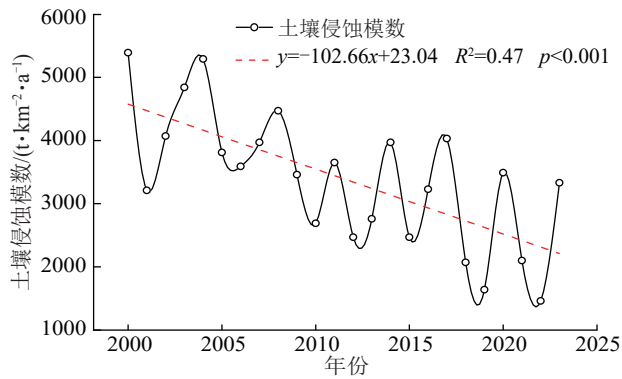


图 5 2000—2023 年单位面积年均土壤侵蚀模数时间变化  
Fig. 5 Temporal variation of annual average soil erosion modulus per unit area from 2000 to 2023

基于 2000—2023 年土地利用变化预测 2035 年不同情景下土地利用变化(图 7),相较于 2023 年,土

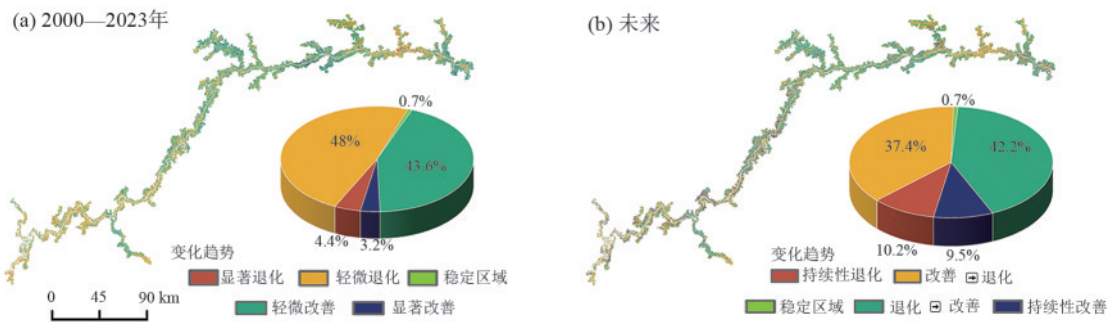


图 6 2000—2023 年及未来土壤侵蚀模数空间变化趋势

Fig. 6 Spatial variation trends of soil erosion modulus (2000—2023) and future projections

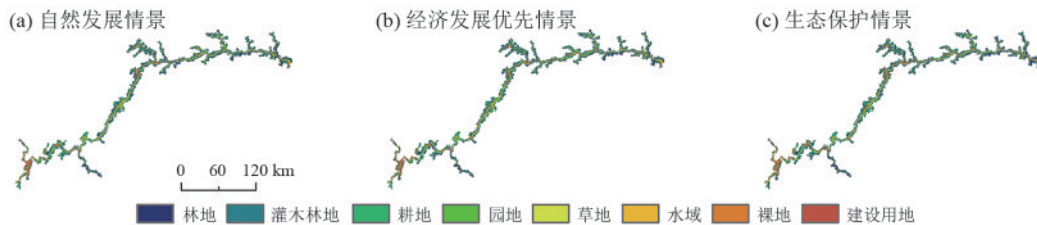


图 7 2035 年不同情景下土地利用类型

Fig. 7 Land use types under different scenarios in 2035

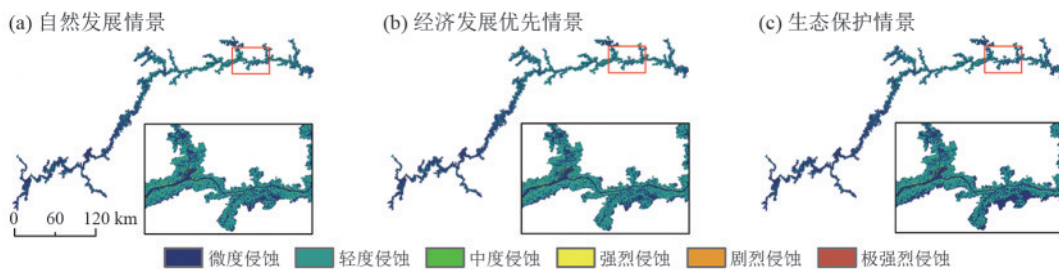


图 8 2035 年不同情景下土壤侵蚀空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of soil erosion under different scenarios in 2035

### 2.3 土壤侵蚀驱动因素及其交互作用

基于 Python 语言,构建随机森林回归模型分析影响土壤侵蚀的主要驱动因素。通过随机搜索与网格搜索方法确定 2000—2023 年随机森林模型超参数 N\_Estimators (300~800)、Min\_Samples\_Split (2~8)、Min\_Samples\_Leaf (1~15) 和 Max\_Depth (50~500),并对 2000—2023 年模型

土地利用变化最显著的特征是经济发展优先情景下,园地和建设用地分别增加 6.48% 和 10.77%,裸地减少 39.91%;生态保护情景下,林地和灌木林地分别增加 3.02% 和 6.00%,耕地减少 9.25%。基于 2035 年土地利用变化评估土壤侵蚀空间分布,结果表明,不同情景下土壤侵蚀分布格局与 2000—2023 年土壤侵蚀分布格局基本一致,且微度侵蚀面积占比表现为生态保护情景 > 经济发展优先情景 > 自然保护情景(图 8)。其中生态保护情景下微度侵蚀面积明显增加,微度和轻度侵蚀面积占屏障区总面积的 99.00%,与未来变化趋势中改善区域分布一致,且靠近水系区域中度、强烈、剧烈、极强烈侵蚀面积明显减少,说明水库周边绿化工程改善了靠近水系区域土壤侵蚀状况。

进度进行验证。结果显示,训练集  $R^2$  最大值为 0.63, RMSE 最小值为 0.89, MAE 最小值为 0.66(表 5)。

随机森林单因子相对重要性排序结果(图 9)显示,植被覆盖(30.64%±10.88%)和降雨(23.43%±8.57%)是 2000—2023 年生态屏障区土壤侵蚀的主要驱动因素,尤其在 2000 年,植被覆盖对土壤侵蚀的相对重要

性高达 52.64%，且植被覆盖越大，土壤侵蚀程度越小(图 10)。其次，是人口密度(18.68%±2.68%)、坡度(16.93%±6.33%)和高程(10.33%±2.60%)，说明自然因素和人为因素共同影响土壤侵蚀。随时间推移，植被覆盖和人口密度对土壤侵蚀的相对重要性整体上呈下降趋势，降雨对土壤侵蚀的相对重要性呈先增长后下降趋势，而坡度和高程对土壤侵蚀的相对重要性整体上呈增长趋势，尤其是坡度，且坡度越大，土壤侵蚀越强(图 10)。驱动因子两两交互作用结果显示(表 6)，植被覆盖-降雨(16.32%±5.67%)和坡度-降雨(12.82%±4.63%)对 2000—2023 年生态屏障区土壤

侵蚀具有较强的影响，植被覆盖-坡度(8.72%±1.66%)的驱动作用却不高，说明降雨对土壤侵蚀发挥着重要作用。此外，植被覆盖-降雨对土壤侵蚀的驱动作用随时间先增强后降低，说明随植被覆盖增加，降雨驱动作用减弱。

表 5 随机森林测试集回归模型精度检验

Table 5 Accuracy test of regression model of random forest test set

| 变量             | 2000年 | 2005年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 | 2023年 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R <sup>2</sup> | 0.47  | 0.56  | 0.45  | 0.56  | 0.63  | 0.57  |
| RMSE           | 2.48  | 1.51  | 1.06  | 0.89  | 1.39  | 1.30  |
| MAE            | 1.89  | 1.13  | 0.80  | 0.66  | 1.05  | 0.98  |

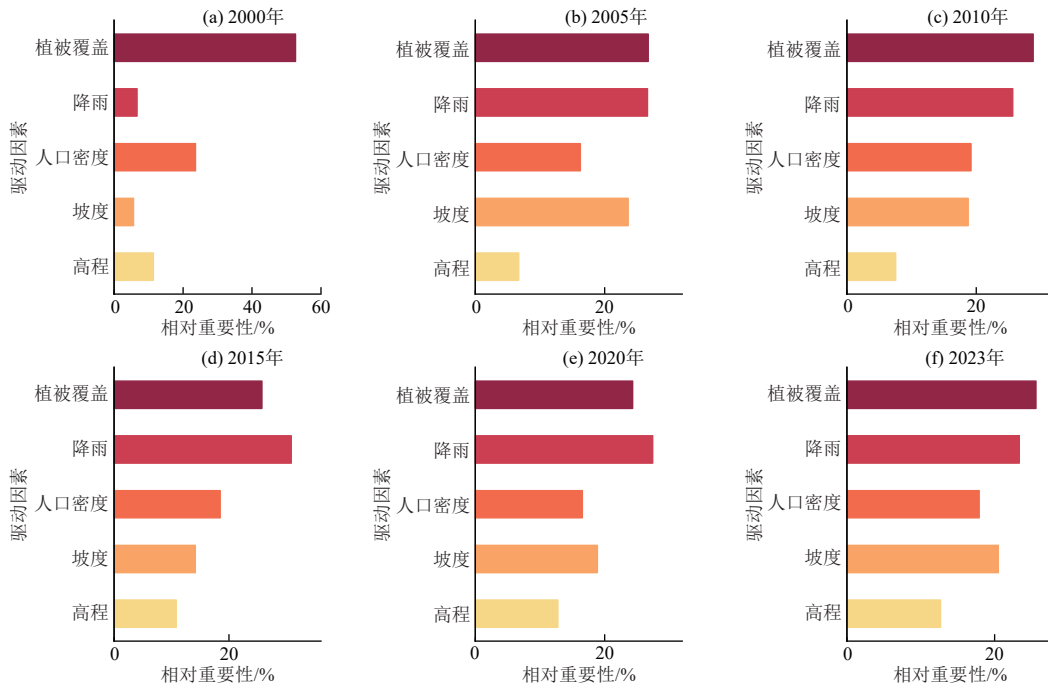


图 9 2000—2023 年土壤侵蚀驱动因素

Fig. 9 Driving factors of soil erosion from 2000 to 2023

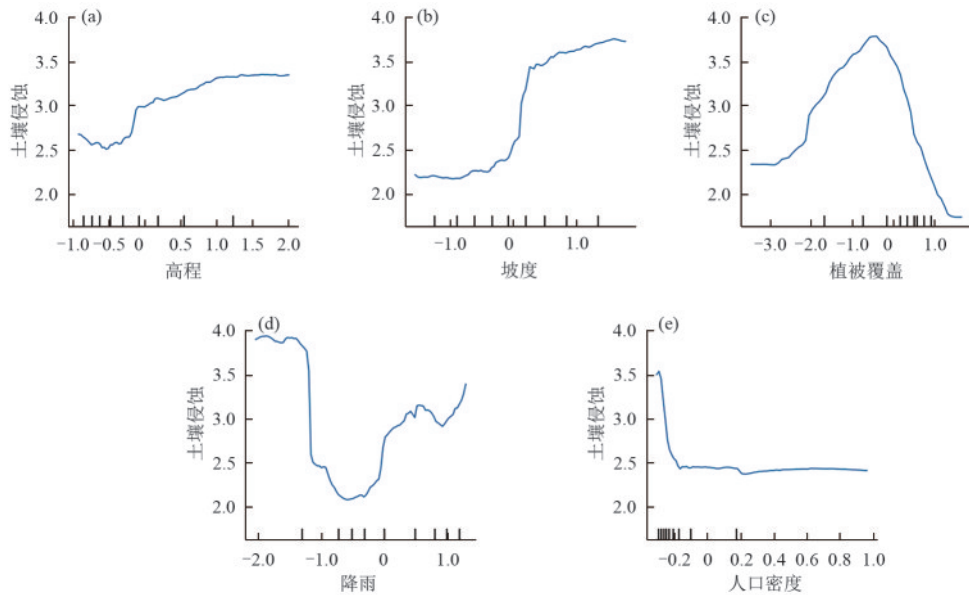


图 10 2023 年影响因子偏依赖关系

Fig. 10 Partial dependence relationships of influencing factors in 2023

表6 2000—2023年土壤侵蚀驱动因素交互作用  
Table 6 Interaction of soil erosion driving factors from 2000 to 2023

| 土壤侵蚀驱动因素  | 相对重要性/% |       |       |       |       |       |
|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | 2000年   | 2005年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 | 2023年 |
| 植被覆盖-降雨   | 7.05    | 15.91 | 17.24 | 24.90 | 16.41 | 16.43 |
| 坡度-降雨     | 5.21    | 15.69 | 16.44 | 9.03  | 16.20 | 14.32 |
| 坡度-人口密度   | 22.08   | 8.62  | 9.63  | 7.51  | 7.97  | 8.17  |
| 植被覆盖-人口密度 | 22.46   | 8.35  | 8.83  | 7.50  | 7.99  | 7.86  |
| 高程-坡度     | 8.58    | 9.64  | 8.73  | 9.14  | 9.36  | 9.81  |
| 高程-植被覆盖   | 5.46    | 9.33  | 9.14  | 9.18  | 9.73  | 9.51  |
| 坡度-植被覆盖   | 5.34    | 9.46  | 9.27  | 9.26  | 9.34  | 9.66  |
| 高程-降雨     | 5.49    | 8.36  | 6.50  | 9.20  | 8.93  | 9.49  |
| 降雨-人口密度   | 6.37    | 8.01  | 7.96  | 7.37  | 7.43  | 8.19  |
| 高程-人口密度   | 11.96   | 6.63  | 6.26  | 6.91  | 6.64  | 6.56  |

### 3 讨论

研究三峡库区生态屏障区土壤侵蚀时空变化特征对区域水土流失重点防治和可持续发展具有重要作用。生态屏障区2000—2023年土壤侵蚀状况整体得到改善,2023年单位面积年均土壤侵蚀模数较2000年下降61.86%,23 a内侵蚀等级相对稳定,以微度和轻度侵蚀为主,说明“退耕还林工程”“长江防护林工程”“天然林保护工程”“水库周边绿化工程”等一系列生态修复保护政策和岸线保护规划的实施使得植被覆盖度提高<sup>[15,30]</sup>,而植被覆盖度的提高有效拦截径流和泥沙,也提高下垫面的抗冲刷能力,保持水土资源,进而减缓土壤侵蚀的产生<sup>[28]</sup>。与罗志邦<sup>[12]</sup>对整个三峡库区土壤侵蚀的研究结果一致。土壤侵蚀MK空间趋势分析<sup>[31]</sup>显示,2000—2023年轻微退化区域占比最高,而1980—2015年三峡库区轻微改善面积占比最高,可能存在2个方面原因:一是生态屏障区消落区面积占比高,在降雨径流冲刷、波浪淘蚀等影响下消落带发生坡面侵蚀,加剧土壤侵蚀<sup>[32]</sup>,与结果中越临近水系土壤侵蚀越明显相对应;二是生态屏障区中经济林不合理种植、高化肥投入、建设用地增加、人口密度增加,导致大量泥沙和氮磷流失<sup>[33]</sup>,进而加剧土壤侵蚀,与偏依赖关系中随着人口密度增加,土壤侵蚀加剧相一致(图10)。未来城镇化地区土壤侵蚀将进一步加剧,生态情景下微度侵蚀面积最高。因此,在管理政策制定时,政府部门应重点加强对经济林、农田种植的监管力度,强化群众水土保持意识,减少因人为措施导致的水土流失。

土壤侵蚀是自然因素和人为因素等多种驱动因素共同作用的结果,定量确定各因素对土壤侵蚀的

影响有助于制定针对性区域管理政策。随机森林结果表明,植被覆盖是2000—2023年生态屏障区土壤侵蚀最重要的驱动因子,尤其是2000年未实施生态修复工程前,植被覆盖对土壤侵蚀的驱动作用尤为显著,随时间推移,植被覆盖相对重要性逐渐降低,但土壤侵蚀随植被覆盖增加而减小(图8),说明政府对生态屏障区实施的生态保护和恢复措施初见成效。随着植被覆盖度的增加,降雨对土壤侵蚀的相对重要性转为下降趋势,说明植被覆盖的增加导致林冠层对降雨的截留增加,枯落物层对降雨的蓄积增加,同时,植被覆盖增加导致土壤根系增加,疏松土质而增加土壤层对降雨的吸收,进而减少土壤侵蚀<sup>[34]</sup>。人口密度相对重要性高于坡度,主要由2000年人口密度相对重要性高造成,人类活动增强导致城镇扩张和基础建设造成水土流失加剧<sup>[8]</sup>。但随着时间的推移,降雨、坡度、高程的相对重要性增强,说明土壤侵蚀前期主要由植被覆盖调控,但植被覆盖达到一定阈值后,降雨、坡度等自然因素调控作用逐渐加强<sup>[35]</sup>。因此,生态屏障区水土流失治理需在优化土地利用格局时考虑降雨强度和注重坡度分布规律,从而科学调控土壤侵蚀。

### 4 结论

1)2000—2023年生态屏障区土壤侵蚀以微度和轻度侵蚀为主,且微度侵蚀面积整体上随时间表现为增长趋势;空间上呈中部高东西低的分布格局,且邻近水系区域土壤侵蚀最明显。

2)2000—2023年生态屏障区单位面积年均土壤侵蚀模数下降2 288.88 t/(km<sup>2</sup>·a),整体呈显著下降趋势,轻微退化区域面积最高,主要集中在西部城镇化地区和东部地区;未来土壤侵蚀整体上处于不断改善趋势,但城镇化地区土壤侵蚀进一步加剧。若按照生态保护情景发展,土壤侵蚀能够得到有效控制。

3)生态屏障区土壤侵蚀主要受植被覆盖和降雨影响,植被覆盖和人口密度的相对重要性随时间呈下降趋势,降雨的相对重要性随时间呈先增长后下降趋势,坡度和高程的相对重要性随时间呈增长趋势。未来应统筹植被覆盖、降雨及地形等因素制定水土保持措施以改善三峡库区生态屏障区水土流失状况。

#### 参考文献:

- [1] YAN J X, ZHANG K D, CHEN J Y, et al. Effects of different land-use types on soil detachment capacity in loess areas[J]. Catena, 2024, 247: e108523.
- [2] 朱婉菁,王克勤,宋娅丽,等.滇西北云龙县2000—2020年土壤侵蚀时空演变特征及影响因素[J].水土保持学报, 2025, 39(2): 378-389.

- ZHU W J, WANG K Q, SONG Y L, et al. Temporal and spatial dynamics of soil erosion and its influencing factors in Yunlong County, northwest Yunnan Province from 2000 to 2020[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 378-389.
- [3] HIPPE K, JANSEN J D, SKOV D S, et al. Cosmogenic in situ  $^{14}\text{C}$ - $^{10}\text{Be}$  reveals abrupt Late Holocene soil loss in the Andean Altiplano[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): e2546.
- [4] DELGADO D, SADAOUI M, LUDWIG W, et al. Assessment of soil erosion by RUSLE in the Ecuadorian basins (2001–2020) based on GIS and high-resolution satellite data: Main drivers and changes on soil erosion [J]. *Geomorphology*, 2025, 469: e109515.
- [5] LI F, ZHOU W Z, SHAO Z L, et al. Effects of ecological projects on vegetation in the Three Gorges area of Chongqing, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(1): 121-135.
- [6] GOU M M, LI L, OUYANG S, et al. Identifying and analyzing ecosystem service bundles and their socioecological drivers in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 307: e127208.
- [7] 朱烈夫, 袁航, 张志涛, 等. 三峡生态屏障区农林柑橘种植技术效率测度及影响因素分析[J]. *林业经济*, 2018, 40(3): 99-106.
- ZHU L F, YUAN H, ZHANG Z T, et al. Analysis on technical efficiency and influencing factors of citrus planting in the Three Gorges ecological barrier area [J]. *Forestry Economics*, 2018, 40(3): 99-106.
- [8] 王铭烽. 三峡库区水库运行前后土壤侵蚀动态变化及人为驱动机制[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2020.
- WANG M F. Dynamic changes and human drivers of soil erosion before and after reservoir operation in the Three Gorges Reservoir Area [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [9] 范语馨, 史志华. 基于模糊层次分析法的生态环境脆弱性评价: 以三峡水库生态屏障区湖北段为例[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 91-96.
- FAN Y X, SHI Z H. Eco-environmental vulnerability assessment based on fuzzy analytic hierarchy process: A case study in the ecological shelter zone of Three Gorges Reservoir area in Hubei Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 91-96.
- [10] 张卓佩, 牛健植, 樊登星, 等. 黄河中游多沙粗沙区土壤水蚀时空变化及动态驱动力分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 85-96.
- ZHANG Z P, NIU J Z, FAN D X, et al. Analysis of spatial and temporal evolution and dynamic driving force of soil water erosion in the middle reaches of the Yellow River in the rich and coarse sediment area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 85-96.
- [11] 吴昌广, 吕华丽, 周志翔, 等. 三峡库区土壤侵蚀空间分布特征[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(3): 15-21.
- WU C G, LÜ H L, ZHOU Z X, et al. Spatial distribution analysis of soil erosion in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(3): 15-21.
- [12] 罗志邦. 气候变化及土地利用变化背景下耦合区域植被恢复政策的三峡库区土壤侵蚀长时序模拟[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- LUO Z B. Long-term time series simulation of soil erosion in the Three Gorges Reservoir area coupled with regional vegetation restoration policy under the background of climate change and land use change [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [13] MA Y R, GUAN Q Y, SUN Y F, et al. Three-dimensional dynamic characteristics of vegetation and its response to climatic factors in the Qilian Mountains [J]. *Catena*, 2022, 208: e105694.
- [14] 李辉丹, 曹帮俊, 赵鹏, 等. 基于不同模型的三峡库区降雨侵蚀力时空变化分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024, 32(5): 1265-1281.
- LI H D, CAO B J, ZHAO P, et al. Spatial-temporal variation of rainfall erosivity in the Three Gorges Reservoir area based on different models [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32(5): 1265-1281.
- [15] TENG M J, HUANG C B, WANG P C, et al. Impacts of forest restoration on soil erosion in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: e134164.
- [16] 丁程秀, 肖强. 基于RUSLE模型的重庆市江津区土壤侵蚀时空变化特征研究[J/OL]. *西华师范大学学报(自然科学版)*, 2025; 1-9. (2025-03-19).
- DING C X, XIAO Q. Study on temporal and spatial variation characteristics of soil erosion in Jiangjin district city of Chongqing based on RUSLE model [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2025; 1-9. (2025-03-19).
- [17] LI R K, LI Y B. Spatio-temporal change of soil erosion intensity on the foothills of the Daba Mountains from 1988 to 2020: A case study from the hinterland of the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14: e1561.
- [18] 吴文贤, 李渊, 刘子琦. 喀斯特地区安顺市土壤侵蚀时空变化特征及驱动因素[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(1): 359-367.
- WU W X, LI Y, LIU Z Q. Characteristics and drivers of spatial and temporal soil erosion in Anshun City, karst Region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(1): 359-367.

- [19] 刘悦俊,程江浩,张燕杰.青藏高原土壤侵蚀对气候变化和生态政策的非线性响应[J].水土保持研究,2024,31(4):126-134.  
LIU Y J, CHENG J H, ZHANG Y J. Nonlinear response of soil erosion in the Tibetan Plateau to climate change and ecological policies [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4):126-134.
- [20] KNÜSEL B, BAUMBERGER C. Understanding climate phenomena with data-driven models [J]. Studies in History and Philosophy of Science, 2020, 84:46-56.
- [21] DENG Y, JIANG W G, LING Z Y, et al. Revealing the driving factors of urban wetland park cooling effects using Random Forest regression and SHAP algorithm [J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 120:e106151.
- [22] 邹玉霞,樊国中,刘淑婧,等.1960—2017年重庆市不同量级降雨侵蚀力R值的时空变化特征[J].水土保持学报,2022,36(6):41-48.  
ZOU Y X, FAN G Z, LIU S J, et al. Spatio-temporal variations of rainfall erosivity R values of different magnitudes in Chongqing from 1960 to 2017 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6):41-48.
- [23] 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 W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6):705-711.
- [24] 彭大力,张斌,吴林蓬,等.龙川江流域近20a土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析[J].水土保持学报,2024,38(4):29-37.  
PENG D L, ZHANG B, WU L P, et al. Spatial-temporal changes and driving factors of soil erosion in Longchuan River basin in recent 20 years [J]. China Industrial Economics, 2024:38(4):29-37.
- [25] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.  
FU S H, LIU B Y, ZHOU G Y, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5):105-110.
- [26] 王博.基于PLUS模型的鄱阳湖区土地利用冲突时空演变及多情景模拟[D].南昌:江西师范大学,2023.  
WANG B. Spatial-temporal pattern evolution and multi-scenario simulation of land use conflict in Poyang Lake area based on PLUS model [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2023.
- [27] 袁雪.基于PLUS模型的武汉市土地利用变化情景模拟与景观生态风险研究[D].南昌:东华理工大学,2022.  
YUAN X. Scenario simulation of land use change and landscape ecological risk research in Wuhan based on PLUS model [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2022.
- [28] LI R K, LI Y B. Spatio-temporal change of soil erosion intensity on the foothills of the Daba Mountains from 1988 to 2020: A case study from the hinterland of the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(16):e1561.
- [29] 中华人民共和国水利部.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 of the People's Republic of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water and Power Press, 2008.
- [30] 江小青,罗晓峰,李俊玲,等.三峡库区岸线利用与管理初步研究[J].人民长江,2011,42(S2):194-196.
- [31] XIAO Y, XIAO Q, XIONG Q L, et al. Effects of ecological restoration measures on soil erosion risk in the Three Gorges Reservoir area since the 1980s [J]. Geo-Health, 2020, 4:e2020GH000274.
- [32] 贺秀斌,鲍玉海.三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J].中国水土保持科学,2019,17(4):160-168.  
HE X B, BAO Y H. Research advances on soil erosion and ecological restoration in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4):160-168.
- [33] 王晓荣,唐万鹏,付甜,等.不同管理措施对三峡库区柑橘园土壤养分和径流氮磷流失的影响[J].中国农学通报,2021,37(11):95-102.  
WANG X R, TANG W P, FU T, et al. Effects of different management practices on soil nutrient and nitrogen and phosphorus losses with runoff of citrus orchard in the Three Gorges Reservoir area [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(11):95-102.
- [34] YANG Y B, JING L X, LI Q, et al. Big-sized trees and higher species diversity improve water holding capacities of forests in northeast China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 880:e163263.
- [35] LIU Z H, BI H X, ZHAO D Y, et al. Determination of fractional vegetation cover threshold based on the integrated synergy-supply capacity of ecosystem services [J]. Forests, 2025, 16(4):e587.