

# 2010—2023 年秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀特征

刘凤<sup>1,2,3</sup>, 成玉祥<sup>4</sup>, 霍艾迪<sup>1,2,3</sup>, 王瑶<sup>5</sup>, 雒晨旭<sup>5</sup>, 申艳军<sup>4</sup>, 彭建兵<sup>4</sup>

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西西安 710064; 2. 自然资源部矿山地质

灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西西安 710054; 3. 长安大学旱区地下水文与

生态效应教育部重点实验室和水利部旱区生态水文与水安全重点实验室, 陕西西安 710064;

4. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710064; 5. 自然资源部第一地理信息制图院, 陕西西安 710000)

**摘要:** [目的] 探究秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀空间分布特征, 精准定位侵蚀调控治理重点, 为区域水土流失综合治理与生态系统修复工程提供科学依据和决策支持。[方法] 基于 RUSLE 模型和 GIS 空间分析技术, 系统评估 2010—2023 年秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀时空演变特征及其驱动机制。[结果] ①区域土壤侵蚀以微度和轻度为主; 时序变化上, 侵蚀强度轻度以下面积比例增大, 中度以上侵蚀面积减小, 并向微度及轻度转变; ②2010—2023 年, 草地和耕地主要转为林地; 平均土壤侵蚀模数在不同土地利用类型条件下均呈下降趋势; 林地和建设用地面积增加, 耕地和草地面积减少; ③降雨侵蚀力与土壤侵蚀分布基本一致; 侵蚀强度受高程和坡度影响程度排序为: 强烈 > 中度 > 极强烈 > 剧烈 > 微度 > 轻度。[结论] 秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀在空间和时间尺度上均呈下降趋势, 但由于地质环境脆弱、人类活动强烈及气候变化的影响, 局部地区仍需加强治理。植被恢复、植物篱、地埂和秸秆覆盖等综合治理手段可作为土壤侵蚀治理的重要措施。

**关键词:** 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 土地利用转移; 时空分布特征; 秦岭北麓(西安段)

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0326-10

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 刘凤, 成玉祥, 霍艾迪, 等. 2010—2023 年秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 326-335. Liu Feng, Cheng Yuxiang, Huo Aidi, et al. Soil erosion in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) from 2010 to 2023 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 326-335. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.025; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.025.

## Soil erosion in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) from 2010 to 2023

Liu Feng<sup>1,2,3</sup>, Cheng Yuxiang<sup>4</sup>, Huo Aidi<sup>1,2,3</sup>, Wang Yao<sup>5</sup>, Luo Chenxu<sup>5</sup>, Shen Yanjun<sup>4</sup>, Peng Jianbing<sup>4</sup>

(1. College of Water Resources and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi

710064, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Disaster Mechanism and Prevention, Ministry of

Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and

Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education and Key Laboratory of Eco-hydrology

and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an,

Shaanxi 710064, China; 4. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064,

China; 5. First Institute of Geographic Information Cartography, Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial distribution of soil erosion in the northern foothills of the Qinling Mountains (Xi'an section) was examined to identify the key areas requiring erosion control and management. The aim was to provide a scientific basis and decision support for controlling regional water and soil loss and implementing ecosystem restoration projects. [Methods] The spatiotemporal evolution of and mechanisms driving soil erosion in the in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) from 2010 to 2023 were systematically evaluated

收稿日期: 2025-04-09

修回日期: 2025-06-23

采用日期: 2025-06-27

资助项目: 国家外国专家个人类项目“气候变化和多时空尺度下的固沟保塬工程对径流和侵蚀的影响研究”(H20240400); 国家自然科学基金项目(42261144749; 42377158); 陕西省国际科技合作计划项目(2024GH-ZDXM-24)

第一作者: 刘凤(1999—), 女(汉族), 甘肃省庆阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水文生态与水安全。Email: 13279226091@163.com。

通信作者: 成玉祥(1978—), 男(汉族), 甘肃省灵台县人, 博士, 副教授, 主要从事生态地质与地质灾害方面的研究。Email: chengyx@chd.edu.cn。

using the RUSLE model and geographic information system spatial analysis technology. [Results] ① The soil erosion in the region was mainly mild or slight; the proportion of the area experiencing mild erosion intensity or below increased over time, whereas that of the areas with moderate or more serious erosion decreased, shifting toward mild and slight soil erosion. ② The grassland and farmland was mainly converted into forest land from 2010 to 2023. The average soil erosion modulus decreased for different land use types: the forest and construction land areas increased, and the farmland and grassland areas decreased. ③ The rainfall erosion force and soil erosion distribution were consistent; the erosion intensity with elevation and slope ranked as follows: strong > moderate > extremely strong > intense > slight > mild. [Conclusion] Soil erosion on the northern foothills of the Qinling Mountains (Xi'an section) has spatially and temporally become less severe. However, the management of the soil in certain areas still needs to be strengthened due to the fragile geological environment, intense human activities and the impact of climate change. Various management measures, such as vegetation restoration, hedgerows, field ridges, and straw mulching, should be implemented for controlling soil erosion.

**Keywords: soil erosion; RUSLE model; landuse transfer; spatiotemporal distribution; northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section)**

土壤侵蚀作为主要生态致灾因子,易导致土壤退化、土地生产力下降,侵蚀泥沙及其流失养分对水土生态环境造成严重污染,从而对区域土地利用,水土资源管理及人类社会的可持续发展产生深远影响<sup>[1-4]</sup>。秦岭北麓作为中国重要的生态屏障和“中华龙脉”核心区域,其土壤侵蚀治理具有重要的生态、经济和社会必要性。受特殊的地质条件影响,秦岭北麓地区红黏土广泛分布,且红黏土区域植被覆盖率低,水源涵养能力差,在降雨冲刷下极易剥蚀,导致严重的水土流失<sup>[5-6]</sup>。近年来,国家针对秦岭地区水土流失和土壤侵蚀问题,实施了一系列综合治理措施,包括退耕还林<sup>[7]</sup>与梯田建设、山水田林路村一体化治理<sup>[8]</sup>,结合生态工程措施,如水平阶、鱼鳞坑、生态挡墙等措施实现固土治沙。此外还包括相关政策法规,如《陕西省秦岭生态环境保护条例》、黄河流域生态保护战略等宏观调控措施。因此定量评估土壤侵蚀变化规律,识别区域土壤侵蚀敏感区域,为科学制定水土流失整治规划,开展生态经济建设提供科学依据。

当前国内外研究主要集中在:①侵蚀机理与模型建构。经验模型体系已较为成熟,包括通用土壤流失模型(USLE)<sup>[9]</sup>及其修正版(RUSLE)<sup>[10]</sup>广泛应用于区域侵蚀评估与机理探究,针对中国特殊地理环境而开发的中国土壤流失模型(CSLE)<sup>[11]</sup>也备受研究学者关注;模型建构已从单一侵蚀估算发展为多方法耦合分析,如结合GIS空间分析技术量化侵蚀时空分异<sup>[12]</sup>和引入机器学习算法提升预测精度等<sup>[13]</sup>。②区域侵蚀特征研究。典型区域研究较为深入,如研究<sup>[14]</sup>表明针对黄土高原自实施退耕还林(草)以来,水土保持量呈明显的改善趋势;东北黑土典型水蚀区土壤侵蚀显著加剧黑土养分流失和土层硬化,黑土农田“变薄”“变瘦”“变硬”之间相互影

响<sup>[15]</sup>;南方典型红壤区土壤侵蚀程度降低,生态脆弱性减轻,土壤侵蚀强度指数随脆弱性等级表现出规律性变化区间等<sup>[16]</sup>。③驱动机制分析与区域土壤侵蚀治理:自然与人为因素交互作用,如气候与土地利用<sup>[17]</sup>、气候与生态恢复<sup>[17-18]</sup>对土壤侵蚀的影响较为强烈;治理措施效果评估,如油气管道工程坡面采用工程措施和植物措施可有效提升坡面水土保持能力<sup>[19]</sup>;“桩土-植被一体化”梯度治理方案可减轻土壤侵蚀状况,改善生态等<sup>[20]</sup>。近些年来,土壤侵蚀研究取得了显著进展,但仍存在以下局限:目前研究多集中于黄土高原、黑土区等热点区域,对于生态环境脆弱的典型区域报道不足,秦岭北麓作为中国南北重要生态过渡带,探讨其特殊地质-气候条件下的侵蚀特征具有重要意义,而针对秦岭北麓土壤侵蚀时空变化仍较缺乏系统性研究。此外,土壤侵蚀模型的适用性仍有待进一步探究,传统模型在复杂地形(如红黏土陡坡)的评估精度及识别重点调控区域的准确性也有待进一步提高。

为明晰秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀空间分布特征并精准定位侵蚀调控治理重点,本研究充分结合区域实际环境,系统计算土壤侵蚀模数并探究土壤侵蚀关键要素。借助ArcGIS空间分析技术,对2010—2023年秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀动态变化进行全面分析,实现时空转移与量化研究,以此揭示研究区土壤侵蚀的时空分异规律,以及土壤侵蚀与土地利用变化之间的耦合关系。通过探究降雨侵蚀力、土地利用类型、地形坡度及高程等主导因子对土壤侵蚀的作用机制,构建多因子驱动下的土壤侵蚀响应模型,为秦岭及类似生态脆弱区的水土保持工作提供理论支撑,其研究结论可为区域水土流失综合治理与生态系统修复工程提供科学依据和决策支持。

# 1 材料与方 法

## 1.1 研究区概况

秦岭北麓(西安段)(107.667°—109.808°N, 33.683°—34.444°E),东起蓝田县,西至周至县,南至秦岭25°坡度线,北至环山公路以北约1 km的平原区域,涵盖西安市临潼、灞桥、蓝田、长安、鄠邑、周至等区县,是关中平原的生态屏障,也是黄河水系(如渭河、灞河)与长江水系(如汉江支流)的分水岭。秦岭北麓(西安段)流域总面积为6 646.93 km<sup>2</sup>,植被覆盖率达69.24%;属暖温带湿润季风气候,冬季温暖,夏季降水充沛;水系发达,主要包括灞河、沔河、黑河等,是西安城市供水水源地;植被种类丰富,且具有明显的垂直地带性;是川金丝猴、朱鹮、大熊猫、羚牛

等120余种国家级保护动物栖息地。在水资源调节、生物多样性维护,气候调控,水土稳固及固碳释氧等方面具有重要的生态功能。

## 1.2 数据处理

通过ArcGIS 10.6对DEM、降雨、土壤、土地利用数据进行投影、栅格处理生成各相关因子图层,得到流域土壤侵蚀模数矢量图。利用Excel对土壤侵蚀模数与降雨、土地利用(综合精度95%)、坡度及高程因子进行相关性分析,最终得到不同高程和坡度下的侵蚀分布情况。土壤侵蚀分级图和侵蚀强度转移图分别由ArcGIS 10.6和Origin 2019绘制。地理坐标系采用WGS\_1984;其投影坐标为WGS\_1984\_UTM\_Zone\_49N。各数据分辨率、用途及来源详见表1。

表1 数据精度及来源

Table 1 Data Accuracy and Source

数据名称	分辨率	用途	数据来源
数字高程数据(DEM)	12.5 m×12.5 m	提取流域范围、河网数据 计算坡长坡度因子(LS)	NASA_12.5M_DEM( <a href="http://www.rivermap.cn">http://www.rivermap.cn</a> )
遥感影像	30 m×30 m	计算植被归一化参数(NDVI) 植被覆盖度(VC)及作物管理因子(C)	地理空间数据云 <a href="http://www.gscloud.cn">www.gscloud.cn</a>
土地利用分布图	30 m×30 m	提取水土保持措施因子(P)	国家冰川冻土沙漠科学数据中心( <a href="http://www.ncdc.ac.cn/">http://www.ncdc.ac.cn/</a> )
降雨数据(P)	逐日降雨量	计算降雨侵蚀力因子(R)	中国气象科学数据共享服务网( <a href="http://Cdc.cma.gov.cn">http://Cdc.cma.gov.cn</a> )
土壤类型分布及理化性质	1 000 m×1 000 m	计算土壤可蚀性因子(K)	中国科学院地理科学与环境研究所资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )

## 1.3 RUSLE模型

本研究利用RUSLE模型对秦岭北麓(西安段)的土壤侵蚀进行量化分析,其计算公式为:

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

式中:A为平均土壤侵蚀模数[t/(km<sup>2</sup>·a)];R为降雨侵蚀因子[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(无量纲);C为植被覆盖与经营管理因子(无量纲);P为水土保持措施因子(无量纲)。

### 1.3.1 降雨侵蚀力R因子

R因子表征降雨强度、历时和分布对土壤的潜在

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ 0.025 6 S_d \times (1 - S_i / 100) \right] \right\} \times \left( \frac{S_i}{S_i + CL} \right)^{0.3} \times \left[ 1.0 - \frac{0.25 C_0}{C_0 + \exp(3.72 - 2.95 C_0)} \right] \times \left[ 1.0 - \frac{0.7 S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9 S_n)} \right] \quad (2)$$

$$S_n = 1 - S_i / 100 \quad (3)$$

式中:S<sub>d</sub>, S<sub>i</sub>, CL分别为砂粒、粉粒和黏粒百分含量;C<sub>0</sub>为有机碳质量分数。

侵蚀能力。本文采取Wischmeier等<sup>[21-22]</sup>提出的方法,基于月、年降雨量估算R值,计算公式为

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \cdot 10^{(1.5 \lg \frac{P_i}{p} - 0.8188)} \quad (2)$$

式中:R为降雨侵蚀因子[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)];p<sub>i</sub>为月降雨量(mm);p为年降雨量(mm)。

### 1.3.2 土壤可蚀性K因子

K因子用于表征土壤受降雨径流作用时抵抗侵蚀的能力。

本文采用Sharpley等<sup>[23]</sup>基于EPIC模型计算土壤可蚀性K因子。

### 1.3.3 坡长坡度LS因子

本文采用刘宝元等<sup>[24]</sup>、史培军等<sup>[25]</sup>的方法计算坡长、坡度LS值。具体计算公式为:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & (5^\circ \leq \theta < 14^\circ) \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 14^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^a \quad (6)$$

$$a = \frac{b}{b + 1} \quad (7)$$

$$b = \frac{\sin \theta}{[3.0 \times (\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \times 0.0896} \quad (8)$$

式中:  $\theta$  为在 DEM 数据中提取的坡度值( $^\circ$ );  $\lambda$  为水平投影坡长(m);  $a$  为坡长指数;  $b$  为细沟侵蚀与细沟间侵蚀量的比值。

1.3.4 植被覆盖  $C$  因子 本文采用蔡崇法等<sup>[26]</sup>研究方法计算  $C$  值, 计算公式为:

$$f_c = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (9)$$

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

式中:  $f_c$  为植被覆盖度;  $\text{NDVI}_{\text{soil}}$  为裸岩、土壤等植被覆盖像元的归一化指数;  $\text{NDVI}_{\text{veg}}$  为纯植被覆盖像元的归一化指数。

1.3.5 水土保持措施  $P$  因子

本文结合陕西省水土保持措施实际情况及前人研究成果, 参考郭思琪等<sup>[27]</sup>、赵茜茜等<sup>[28]</sup>的方法对  $P$  因子赋值, 具体赋值情况详见表 2。

表 2 不同土地利用类型的对应  $P$  值

土地利用类型	草地	林地	耕地	水域	居民用地	未利用土地
$P$ 值	1	1	0.7	0	0	1

## 2 结果与分析

### 2.1 模型精度评价

为验证 RUSLE 模型在秦岭北麓(西安段)的可靠性和适用性, 本研究以《2022 年陕西省水土保持公报》作为土壤侵蚀反演精度检验的参照标准。通过实测数据与多年模拟结果对比分析, 对模型预测准确评估。实测数据显示, 流域侵蚀以微度和轻度为主, 其中微度侵蚀面积占 25.00%, 轻度侵蚀面积占 65.00%, 中度侵蚀面积占 5.00%, 强烈侵蚀面积占 3.00%, 极强烈侵蚀面积占 2.00%, 不存在剧烈侵蚀。多年模拟结果显示, 微度侵蚀占 29.47%, 轻度侵蚀占 64.79%, 中度侵蚀占 4.90%, 强烈侵蚀占 0.69%, 极强烈 0.14%, 剧烈侵蚀比例极小。经精度检验发现,

模型预测与实际值的相对误差分别为微度 +4.47%, 轻度 -0.21%, 中度 -0.10%, 强烈 +2.31% 和极强烈 +1.86%。模型相关系数 0.995, 表明 RUSLE 模型预测结果与实际侵蚀规律高度契合, 充分验证 RUSLE 模型在秦岭北麓(西安段)的可靠性和适用性。

### 2.2 土壤侵蚀空间格局变化

根据水利部《土壤侵蚀分级分类标准(SL 190—2007)》将土壤侵蚀模数分为 6 个等级。2010—2023 年, 流域侵蚀强度以微度和轻度为主, 中度及以上侵蚀面积减小, 向微度和轻度转化(图 1)。2010, 2015 和 2023 年轻度以下侵蚀面积分别占流域总面积的 85.71%, 98.08% 和 97.97%, 各年平均土壤侵蚀模数分别为 1 228.80, 624.19, 561.00 [t/(km<sup>2</sup>·a)]。2010 年强烈侵蚀主要分布在流域西部边缘小范围区域, 中度侵蚀则广泛分布于流域中部, 呈带状分布; 与 2010 年相比, 2015 年全流域侵蚀模数整体降低, 以微度和轻度为主, 中度侵蚀面积显著减小, 强烈侵蚀仅于中部以零星点状分布; 至 2023 年, 流域侵蚀以轻度及微度为主, 微度侵蚀面积较 2015 年进一步增加, 中度侵蚀仅零星分布。

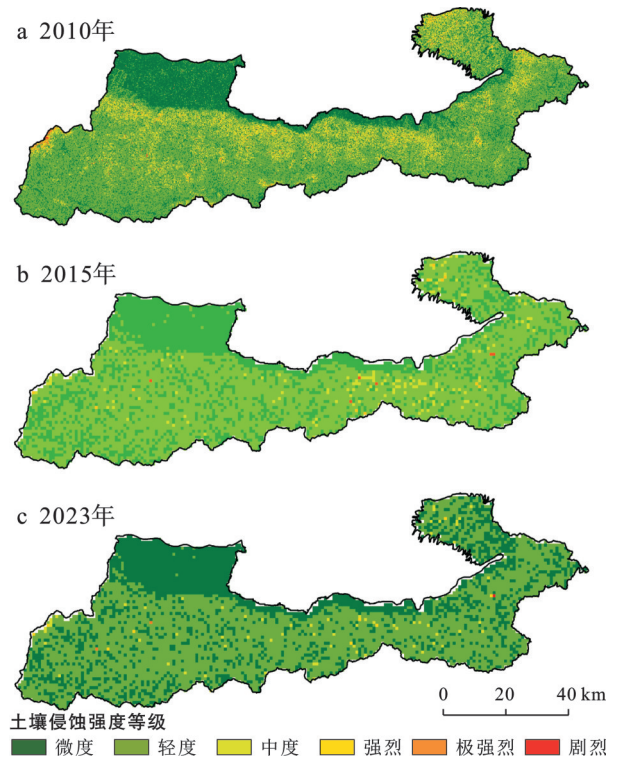


图 1 秦岭北麓(西安段)2010—2023 年土壤侵蚀分布

Fig.1 Distribution of soil erosion in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) from 2010 to 2023

### 2.3 土壤侵蚀时序变化

2010—2023 年, 秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀强度以微度及轻度为主, 强烈以上侵蚀面积所占比例

极小(表3)。轻度以下侵蚀面积呈逐年增大,而中度以上侵蚀面积显著减小,面积变化率超90%。这表明在自然和人为因素共同作用下,研究区土壤侵蚀从中度以上向微度和轻度转变,研究区侵蚀状况明显改善。

2010—2015年,轻度及微度侵蚀强度面积增幅最大(图2),分别增加1 266.16,1 360.68 km<sup>2</sup>。其中微度和中度侵蚀向轻度转变的面积分别为588.16和589.20 km<sup>2</sup>,分别占轻度面积变化的46.45%和46.53%;轻度和中度侵蚀向微度转变的面积分别为

1 159.20和117.52 km<sup>2</sup>,分别占微度面积变化的85.19%和13.05%。2015—2023年,轻度及微度侵蚀面积继续增大(图2),其中微度侵蚀向轻度转变的面积为337.00 km<sup>2</sup>,占轻度面积变化的81.80%;轻度侵蚀向微度转变的面积为201.00 km<sup>2</sup>,占微度面积变化的97.57%。尽管2010—2023年,微度和轻度侵蚀面积不同程度扩张,但受自然波动和人类活动短暂失衡,2023年微度侵蚀出现了短暂回退。总体来看,秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀状况在时间和空间尺度上均显著改善,侵蚀强度以微度和轻度为主。

表3 秦岭北麓(西安段)不同年份各侵蚀强度面积比例及变化率  
Table 3 Proportions and change rates of areas with different erosion intensities in different years in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section)

年份	侵蚀等级面积比例/%						平均侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
2010	22.96	62.75	12.19	1.74	0.30	0.06	1 288.80
2015	33.99	64.09	1.63	0.21	0.08	—	624.19
2023	31.45	67.52	0.87	0.11	0.03	0.02	561.00
2010—2023年变化率/%	36.98	7.60	-92.86	-93.68	-90	-66.67	56.47

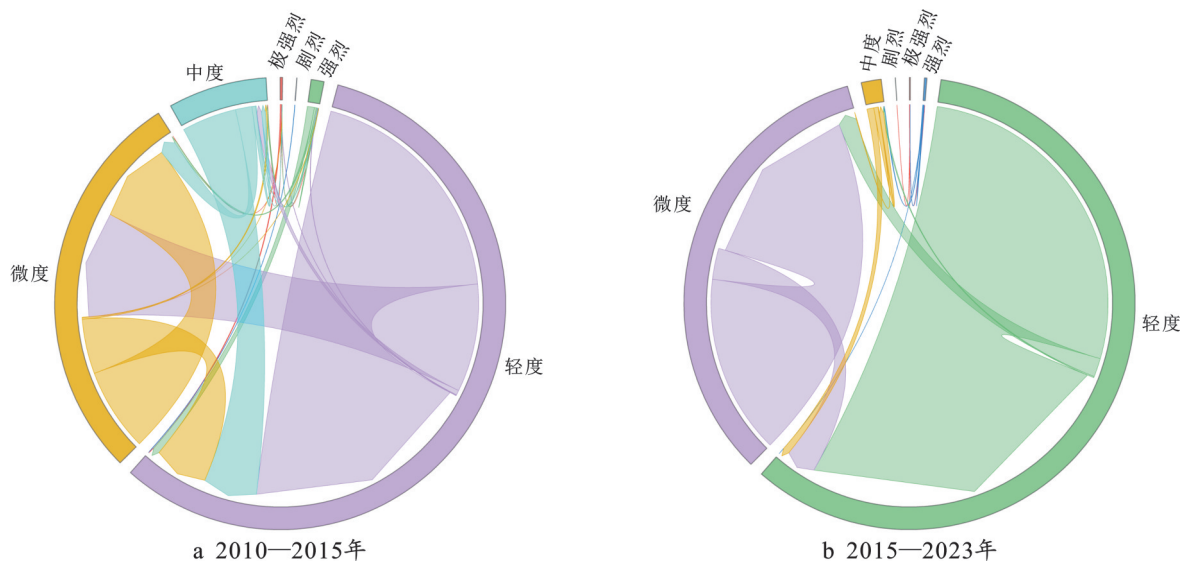


图2 秦岭北麓(西安段)2010—2023年侵蚀强度转移图解

Fig.2 Transfer diagram of erosion intensity in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) from 2010 to 2023

#### 2.4 土地利用变化

2010—2015年期间,草地和耕地面积分别减少13.42,70.53 km<sup>2</sup>,主要向林地和耕地转移(图3)。其中,草地向林地转移18.38 km<sup>2</sup>(转化率15.45%),向耕地转移12.03 km<sup>2</sup>(转化率10.10%);耕地向林地转移55.95 km<sup>2</sup>(转化率3.70%)。林地、水域和建设用地区面积分别增加54.80,0.71和28.44 km<sup>2</sup>,林地主要来源于耕地和草地,水域主要来源于建设用地,建设用地主要来源于耕地。林地向耕地转移18.06 km<sup>2</sup>(转化率0.37%);水域向耕地转移1.11 km<sup>2</sup>(转化率17.20%)。各地类变化程度排序为:建设用地>草地>水域>耕地>林地。

2015—2023年,草地和耕地面积分别减少49.92和117.44 km<sup>2</sup>,主要向林地和耕地转移(图3)。其中,草地向林地转移40.24 km<sup>2</sup>(转化率38.25%),向耕地转移20.78 km<sup>2</sup>(转化率19.70%);耕地向林地转移156.42 km<sup>2</sup>(转化率10.92%)。林地、水域和建设用地区面积分别增加155.51和1.35,10.50 km<sup>2</sup>,均主要来源于耕地。林地向耕地转移34.50 km<sup>2</sup>(转化率0.70%);建设用地向耕地转移17.62 km<sup>2</sup>(转化率11.25%);水域向耕地转移1.10 km<sup>2</sup>(转化率15.44%)。各地类变化程度排序为:草地>水域>耕地>建设用地>林地。

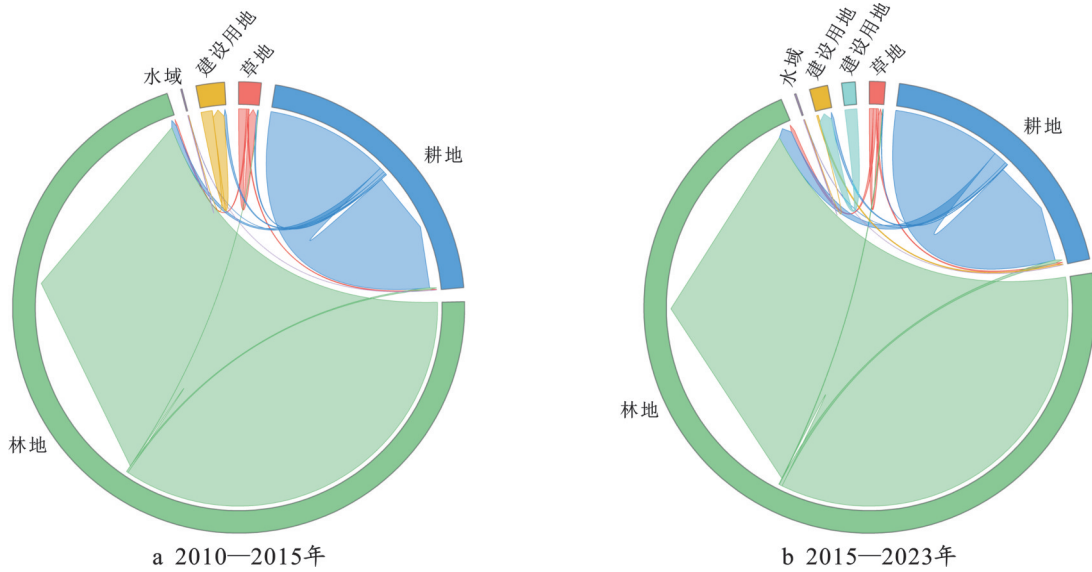


图3 秦岭北麓(西安段)2010—2015年 2015—2023年土地利用转移矩阵图解  
 Fig.3 Land use transfer matrix diagram of northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) from 2010 to 2015 and from 2015 to 2023

### 2.5 土壤侵蚀模数分布特征分析

#### 2.5.1 降雨侵蚀力因子R分布特征

2010—2023年,研究区域内降雨侵蚀力R因子整体呈下降趋势(图4),降幅达38.25%,表明土壤侵蚀受降雨影响的潜在破坏力显著减弱。3期的R因子均值分别为4 591.64,3 567.53,2 835.13 [MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)]。2010—2015年,研究区东南部受降雨侵蚀风险较高,降雨侵蚀力较大;2015—2020年,全流域R值显著下降,低值区域面积扩大,高值区域主要集中于东北和西北区域;至2023年,整体降雨侵蚀力较2010年显著降低,高值东移,西部区域普遍处于较低水平。这一变化趋势表明,降雨侵蚀力的减弱可能是研究区域侵蚀状况改善的重要原因之一,特别是高值减少的区域,土壤侵蚀风险得到有效改善。

#### 2.5.2 土壤侵蚀在不同土地利用类型下的分布特征

2010—2023年,不同土地利用类型对应的平均土壤侵蚀模数均减小(图5)。其中,草地的平均土壤侵蚀模数由2 506.76 [t/(km<sup>2</sup>·a)]降至903.92 [t/(km<sup>2</sup>·a)],强度由中度转为轻度;耕地、林地及水域始终保持轻度侵蚀水平,但侵蚀模数分别减少487.86,805.50,1 528.58 [t/(km<sup>2</sup>·a)];建设用地平均侵蚀模数从225.93 [t/(km<sup>2</sup>·a)]降至49.32 [t/(km<sup>2</sup>·a)],侵蚀由轻度向微度转化。不同用地类型之间土壤模数大小存在明显差异性表明土壤侵蚀受土地利用影响显著。此外,林地面积增长4.32%,建设用地的扩张更为显著,达30.23%;而耕地与草地面积分别减少12.56%和53.33%。这一现象可能归因于城市化进程中地表硬化减少了径流侵蚀,退耕还

林/草等生态工程使得植被覆盖面积扩大,从而增强了植被截留效应。

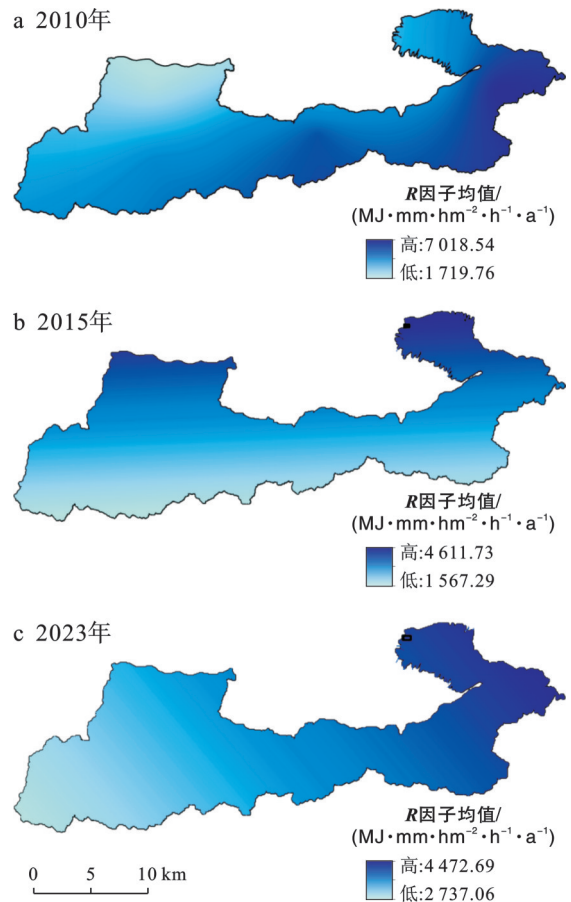


图4 秦岭北麓(西安段)2010—2023年降雨侵蚀力因子R空间分布

Fig.4 Spatial distribution of rainfall erosion force factor R in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) from 2010 to 2023

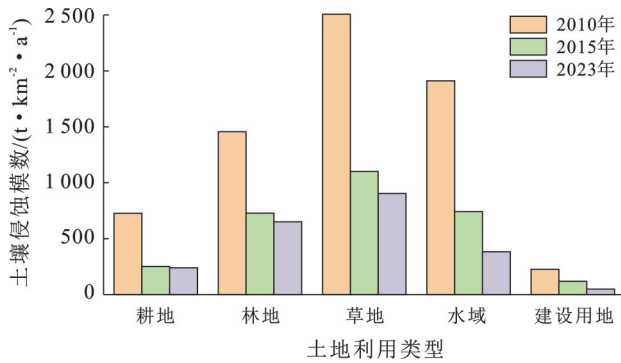


图5 秦岭北麓(西安段)不同土地利用的对应土壤侵蚀模数  
Fig.5 Soil erosion index corresponding to different land use in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section)

### 2.5.3 土壤侵蚀在不同高程下的分布特征

2010—2023年侵蚀强度呈现明显的海拔梯度特

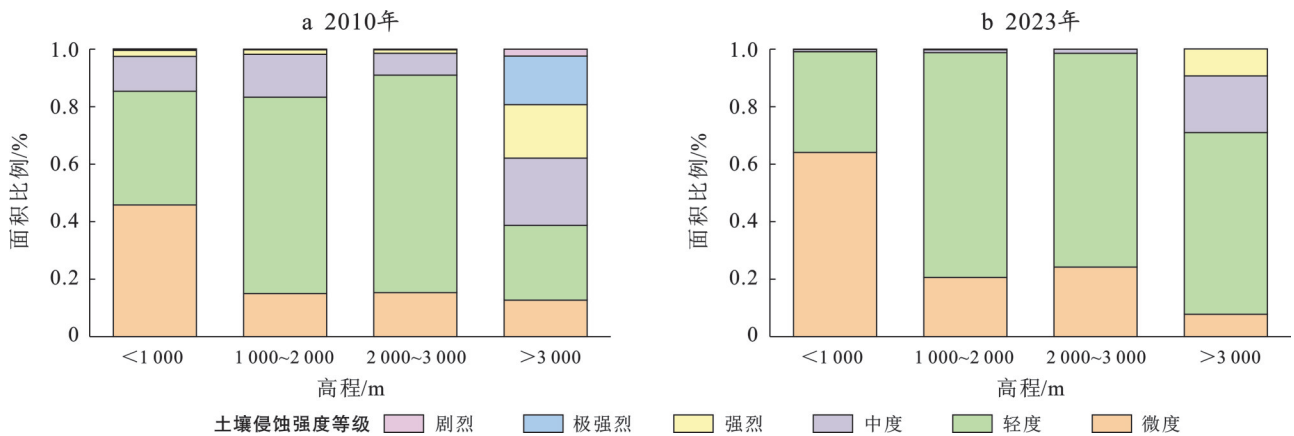


图6 秦岭北麓(西安段)2010和2023年不同高程下的侵蚀面积比例分布

Fig.6 Proportional distribution of erosion areas at different elevations in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) in 2010 and 2023

### 2.5.4 土壤侵蚀在不同坡度下的分布特征

根据秦岭北麓(西安段)坡度将其划分为4个等级,分别为 $<6^\circ$ ,  $6^\circ\sim 15^\circ$ ,  $15^\circ\sim 25^\circ$ 及 $>25^\circ$ 。2010—2023年,秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀强度与坡度存在明显协同作用。2010年流域以中度以下侵蚀为主(图7a),分别占流域总面积的24.60%(微度),60.24%(轻度)和12.99%(中度)。侵蚀现象的空间特征表现出明显的坡度关联性,超70%的侵蚀面积主要集中于 $<6^\circ$ 坡度带,20%以上分布于 $>25^\circ$ 坡度带,轻度侵蚀面积分布最广,侵蚀面积比例分别为58.69%( $<6^\circ$ ),48.61%( $6^\circ\sim 15^\circ$ ),60.41%( $15^\circ\sim 25^\circ$ )和66.51%( $>25^\circ$ )。侵蚀强度面积比例顺序为:轻度 $>$ 微度 $>$ 中度 $>$ 强烈,其中 $>25^\circ$ 坡度区的中度侵蚀比例显著高于其他区域。至2023年,侵蚀动态呈现稳定特征,同时呈现出积极改善态势(图7b)。其中,中度侵蚀面积减少767.07 km<sup>2</sup>,动态度为92.16%;强烈侵蚀面积减少106.24 km<sup>2</sup>,动态度为92.19%;极强

烈和剧烈侵蚀面积分别减少17.63和3.16 km<sup>2</sup>,动态度分别为89.81%和75.96%。坡度敏感性分析显示,侵蚀改善程度排序为:强烈 $>$ 中度 $>$ 极强烈 $>$ 剧烈 $>$ 微度 $>$ 轻度。总体来看,坡度通过影响地表径流速度、土壤稳定性及人类活动强度,直接或间接地调控了土壤侵蚀的分布和强度。

## 3 讨论

### 3.1 秦岭北麓(西安段)侵蚀治理调控重点

根据上文研究结果,秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀主要以微度和轻度侵蚀为主,因此将其列为水土流失预防重点区域,中度及以上强度区域则需重点落实治理措施。

为了抑制侵蚀阶段性回滞效应,确保侵蚀系统的长效稳定,本文依据侵蚀模数对微度(S)和轻度侵蚀(M)进行细分(表4),并将其划分为以下8个等级: $S_I$  [ $<500$  t/(km<sup>2</sup>·a)],  $S_{II}$  [500~1 000 t/(km<sup>2</sup>·a)],  $S_{III}$

[1 000~1 500 t/(km<sup>2</sup>·a)], S<sub>IV</sub>[1 500~2 000 t/(km<sup>2</sup>·a)], S<sub>V</sub>[2 000~2 500 t/(km<sup>2</sup>·a)], M<sub>I</sub>[2 500~3 000 t/(km<sup>2</sup>·a)], M<sub>II</sub>[3 000~3 500 t/(km<sup>2</sup>·a)], M<sub>III</sub>[3 500~4 000 t/(km<sup>2</sup>·a)], M<sub>IV</sub>[4 000~5 000 t/(km<sup>2</sup>·a)]。自2010—2023年, S<sub>III</sub>以上高强度区域持续减少,而S<sub>I</sub>和S<sub>II</sub>级别的中低强度区域则呈现

出扩张趋势。表明2010—2023年,秦岭北麓(西安段)的整体土壤侵蚀趋势正由沟道侵蚀向浅层侵蚀转变,其状态与自然背景下的侵蚀速率趋于一致,实现了侵蚀-生态系统的和谐平衡。因此,治理重点应从强度管控转向质量优化,如促进土壤肥力的恢复等。

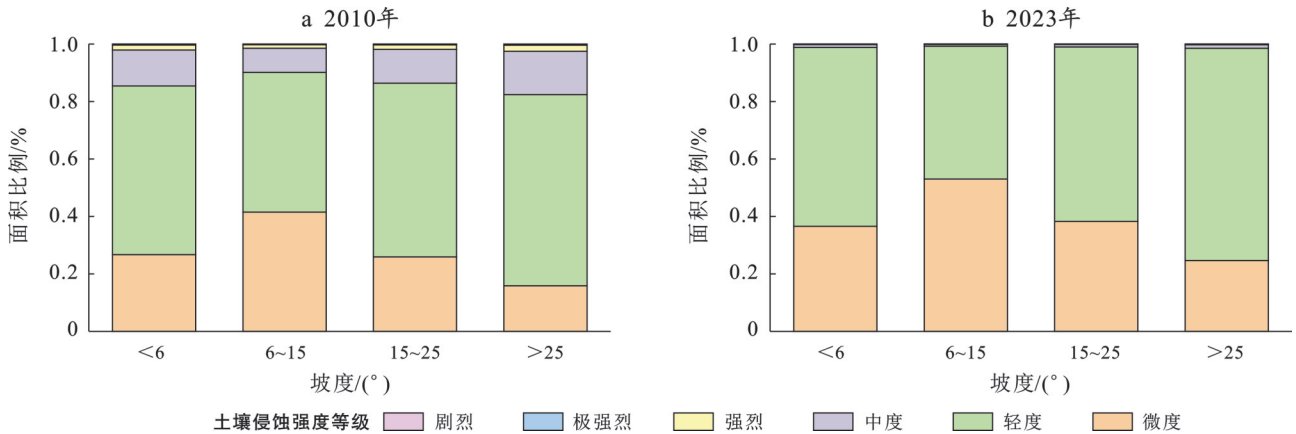


图7 秦岭北麓(西安段)2010和2023年不同坡度下的侵蚀面积比例分布

Fig.7 Proportional distribution of erosion areas at different slopes in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) in 2010 and 2023

表4 秦岭北麓(西安段)各年份细化后不同侵蚀强度面积  
Table 4 Detailed areas of different erosion intensities in northern foothills of Qinling Mountains (Xi'an section) for each year

侵蚀等级/[t·(km <sup>2</sup> ·a)]	侵蚀面积/km <sup>2</sup>		
	2010年	2015年	2023年
S <sub>I</sub> (<500)	2 316.62	3 677.18	3 779.67
微度侵蚀(S)			
S <sub>II</sub> (500~1 000)	1 178.05	1 545.33	1 777.53
S <sub>III</sub> (1 000~1 500)	973.76	747.74	736.16
S <sub>IV</sub> (1 500~2 000)	696.73	353.19	292.31
轻度侵蚀(M)			
M <sub>I</sub> (2 500~3 000)	475.36	169.70	84.90
M <sub>II</sub> (3 000~3 500)	331.73	66.82	44.06
M <sub>III</sub> (3 500~4 000)	217.07	33.94	13.97
M <sub>IV</sub> (4 000~5 000)	149.96	14.85	7.52

### 3.2 土壤侵蚀多维度分异特征及其对生态治理的启示

通过对2010—2023年秦岭北麓的土壤侵蚀状况进行深入的系统性研究,发现其演变规律由降雨侵蚀力、土地利用、高程和坡度等多因子共同驱动。研究区降雨侵蚀力R因子下降了38.25%,且具有高度显著性(p<0.01),揭示了区域气候正向干旱化方向转变。这一自然过程与退耕还林(即林地面积扩大4.32%)等生态工程产生积极的相互作用。这一发现为理解全球变化背景下“人地关系再平衡”提供了有价值的参考,充分证明生态工程在缓解气候波动导

致的侵蚀风险方面的有效性。从空间分布分析,土壤侵蚀呈现明显的非线性特征:①在垂直地带规律性表明,在低海拔(<1 000 m)人类扰动区与高海拔(>2 000 m)自然恢复区分别形成“压力-响应”的两极格局,同时中海拔带(1 000~2 000 m)的侵蚀敏感性与植被恢复潜力并存,提示此为生态修复的优先区域;②在坡度临界阈值效应方面,25°陡坡区的侵蚀改善程度(动态度92.19%)明显优于缓坡区,证实“自然恢复为主、工程措施为辅”的治理策略在极端地形条件下的有效性。这一系列规律为后续构建“地貌单元-生态系统-社会经济”的协同管理框架奠定了理论基础。

秦岭北麓的实践表明,土壤侵蚀的治理已从灾害防治扩展为“山水林田湖草沙”生命共同体健康维护的核心环节。未来研究仍需重点关注:气候变化情景下R因子与植被恢复的耦合关系;微观尺度(如地块级)人类活动对侵蚀过程的扰动机制;基于AI技术的多源数据融合预警模型构建。本研究不仅加深了对土壤侵蚀系统理解,更为推进生态文明建设的“精准治理”提供了科学范例,其方法论可以推广至全球类似生态脆弱区。

## 4 结论

(1)空间格局上,区域土壤侵蚀以微度和轻度为主。两者占流域总面积分别为85.71%,98.08%和

97.97%。2010, 2015 和 2023 年平均土壤侵蚀模数分别为 1 228.80, 624.19, 561.00 t/(km<sup>2</sup>·a)。

(2) 时序变化上, 2010—2023 年微度和轻度侵蚀面积比例逐年增加, 中度以上面积减小, 向微度及轻度转变, 其中强烈及以上侵蚀强度变化率超过 90%。

(3) 土壤侵蚀是自然和人为因素共同作用的结果。受人类活动影响, 2010—2023 年草地和耕地面积减小, 主要向林地和耕地转移; 各土地利用类型的平均土壤侵蚀模数均呈下降趋势, 林地和建设用地的面积逐年增加, 水域面积稳定。受自然因素影响, 2010—2023 年流域降雨侵蚀力与土壤侵蚀分布基本一致, 均呈下降趋势; 侵蚀强度受高程和坡度影响程度排序为: 强烈 > 中度 > 极强烈 > 剧烈 > 微度 > 轻度。

(4) 秦岭北麓(西安段)土壤侵蚀在空间和时间尺度上均呈下降趋势, 但由于地质环境脆弱, 人类活动强烈及气候变化的影响, 局部地区仍需加强治理。植被恢复、植物篱、地埂和秸秆覆盖等综合治理手段可作为土壤侵蚀治理的重要措施。

#### 参考文献(References)

- [1] Eekhout J P C, de Vente J. Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 226:103921.
- [2] Cheng Yuxiang, Huo Aidi, Liu Feng, et al. Spatiotemporal variation of soil erosion in the northern foothills of the Qinling Mountains using the RUSLE model [J]. *Water*, 2024, 16(15):2187.
- [3] 王全九, 杨婷, 刘艳丽, 等. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6):67-82.  
Wang Quanjiu, Yang Ting, Liu Yanli, et al. Review of soil nutrient transport in runoff and its controlling measures [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6):67-82.
- [4] Yuan Shuang, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, et al. Dynamic analyses of soil erosion and improved potential combining topography and socio-economic factors on the Loess Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 160:111814.
- [5] 龚伟芳. 解锁红黏土变“绿”密钥 筑牢骊山生态屏障 [N]. *西安日报*, 2024/5/29(4).  
Gong Weifang. Unlocking the key to transform red clay into “green” to fortify Lishan ecological barrier [N]. *Daily Xi'an*, May 29, 2024(4).
- [6] 金钊, 彭建兵, 庄建琦, 等. 黄土塬沟道侵蚀扩张机理与固沟保塬工程的科学性 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(4):806-822.  
Jin Zhao, Peng Jianbing, Zhuang Jianqi, et al. Gully erosion and expansion mechanisms in loess tablelands and the scientific basis of gully consolidation and tableland protection [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2023, 53(4):806-822.
- [7] 赵杨, 危锋. 陕南秦巴山区退耕还林与可持续发展研究: 以汉中市为例 [J]. *水土保持研究*, 2006, 13(3):200-203.  
Zhao Yang, Wei Feng. Research of converting cropland to forest and grassland and sustainable development in Qingling-Bashan Mountains: An example from Hanzhong City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(3):200-203.
- [8] 王雁林, 马园园, 陈新建, 等. 秦岭陕西段山水林田湖草一体化生态保护修复探讨 [J]. *国土资源情报*, 2021(6):3-7.  
Wang Yanlin, Ma Yuanyuan, Chen Xinjian, et al. Discussion on integrated ecological protection and restoration of mountain-river-forest-field-lake-grass system in Shaanxi section of Qinling Mountains [J]. *Land and Resources Information*, 2021(6):3-7.
- [9] Yekti M I, Marsha N M V S, Hidayati A M, et al. Sedimentation evaluation of downstream reaches of river badung by applying HEC-GeoRAS and USLE method [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2025, 50(1):353-368.
- [10] Atiqur Rahman M, Molla M N, Paul A. Remote sensing and GIS integration for assessing soil erosion and landslide hazards in rohingya refugee camp areas of Bangladesh: A comprehensive study using RUSLE and MCA-AHP methods [M] // *Advanced GIScience in Hydro-Geological Hazards: Applications, Modelling and Management*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025:215-230.
- [11] Tian Zhiyuan, Zhao Yan, Cao Longxi, et al. Assessing the declining trend in soil erodibility across China: A comparison of conventional and digital K-factor maps [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2025, 13(1):15-26.
- [12] 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 Wanqing, Wang Keqin, Song Yali, 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.
- [13] 窦占宁, 王彬, 周金星. 基于机器学习的土壤侵蚀空间分布预报及影响因子分析: 以西南高山峡谷区云南省云龙县为例 [J]. *生态学报*, 2025, 45(14):6663-6677.  
Dou Zhanning, Wang Bin, Zhou Jinxing. Prediction of

- spatial distribution of soil erosion based on machine learning and analysis of its influencing factors; A case study of Yunlong County, Yunnan Province, southwest alpine valley area [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(14):6663-6677.
- [14] 常秀红, 欧巧明, 王方, 等. 黄土高原退耕还林(草)以来土壤保持功能与植被关系探究 [J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4):189-196.  
Chang Xiuhong, Ou Qiaoming, Wang Fang, et al. Exploration of the relationship between soil conservation function and vegetation since the return of farmland to forest(grassland) on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4):189-196.
- [15] 马瑞, 田芷源, 赵艳, 等. 东北黑土典型水蚀区农田侵蚀与退化特征 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5):71-81.  
Ma Rui, Tian Zhiyuan, Zhao Yan, et al. Characteristics of erosion and degradation for farmlands in the typical water erosion area of the black soil region, northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5):71-81.
- [16] 陈樟昊, 姚雄, 余坤勇, 等. 南方典型红壤区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)*, 2017, 37(4):82-90.  
Chen Zhanghao, Yao Xiong, Yu Kunyong, et al. Evolutionary relation between ecological vulnerability and soil erosion in the typical reddish soil region of southern China [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2017, 37(4):82-90.
- [17] 郎燕, 刘宁, 刘世荣. 气候和土地利用变化影响下生态屏障带水土流失趋势研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(13):5106-5117.  
Lang Yan, Liu Ning, Liu Shirong. Changes in soil erosion and its driving factors under climate change and land use scenarios in Sichuan-Yunnan-Loess Plateau region and the southern hilly mountain belt, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13):5106-5117.
- [18] Wang Zhao, Wang Junbang. Changes of soil erosion and possible impacts from ecosystem recovery in the three-river headwaters region, Qinghai, China from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(5):461-471.
- [19] 王孝兵, 赵杰, 田文杰, 等. 油气管道工程坡面工程措施和植物措施水土流失防控效应 [J]. *中国水土保持*, 2025(5):63-65.  
Wang Xiaobing, Zhao Jie, Tian Wenjie, et al. The effects of soil erosion and water loss prevention and control of slope engineering measures and vegetation measures in oil and gas pipeline projects [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2025(5):63-65.
- [20] 郑楠炯, 周买春, 譙雯, 等. 华南地区水库消落带侵蚀状况与生态治理:以高州水库为例 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(34):142-153.  
Zheng Nanjiong, Zhou Maichun, Qiao Wen, et al. Erosion states of water-affected reservoir bank in south China and vegetation recovery, in case of Gaozhou Reservoir [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(34):142-153.
- [21] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains [M]//*Agricultural Handbook*. Washington: US Department of Agriculture, 1965.
- [22] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]//*Agriculture Handbook*. Washington: US Department of Agriculture, 1978.
- [23] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Determination [M]. Washington: US Department of Agriculture, 1990.
- [24] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.  
Liu Baoyuan, Xie Yun, Zhang Keli. Soil Loss Prediction Model [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.
- [25] 史培军, 刘宝元, 张科利, 等. 土壤侵蚀过程与模型研究 [J]. *资源科学*, 1999, 21(5):9-18.  
Shi Peijun, Liu Baoyuan, Zhang Keli, et al. Soil erosion process and model studies [J]. *Resources Science*, 1999, 21(5):9-18.
- [26] 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 Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(2):19-24.
- [27] 郭思琪, 韩磊, 赵永华, 等. 秦岭地区土壤侵蚀时空变化及景观格局 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(7):2167-2176.  
Guo Siqi, Han Lei, Zhao Yonghua, et al. Spatiotemporal variation and landscape pattern of soil erosion in Qinling Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(7):2167-2176.
- [28] 赵茜茜, 赵永华. 秦岭地区土壤侵蚀时空格局分析研究 [J]. *农业与技术*, 2023, 43(21):103-106.  
Zhao Qianqian, Zhao Yonghua. Spatial pattern analysis of soil erosion in Qinling area [J]. *Agriculture and Technology*, 2023, 43(21):103-106.