

DOI: 10.16843/j.sswc.2025098

刘晓钰, 张齐飞, 李俞霏, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的黄河中游水土流失敏感区土壤侵蚀时空格局变化 [J]. 中国水土保持科学, 2026, 24(1): 70–81.

LIU Xiaoyu, ZHANG Qifei, LI Yufei, et al. Spatiotemporal pattern changes of soil erosion in sensitive area of soil erosion in middle reaches of Yellow River Basin based on FLUS-InVEST model [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2026, 24(1): 70–81.

基于 FLUS-InVEST 模型的黄河中游水土流失敏感区土壤侵蚀时空格局变化

刘晓钰¹, 张齐飞^{1,3†}, 李俞霏¹, 雷雅惠¹, 向燕芸²

(1. 山西师范大学地理科学学院, 030031, 太原; 2. 山西财经大学公共管理学院, 030006, 太原;
3. 黄河中游生态环境研究中心, 030031, 太原)

摘要: 【目的】探究黄河中游水土流失敏感区土地利用变化及其对土壤侵蚀特征的影响, 有助于优化区域空间布局, 为支撑黄河流域生态环境保护与可持续发展提供科学依据。【方法】基于 FLUS-InVEST 模型, 以吕梁山区为研究靶区, 利用 2003—2023 年 5 期土地利用等多源数据分析过去并模拟 2033 年不同情景下土地利用变化及其对土壤侵蚀格局的影响。【结果】1) 2003—2023 年, 吕梁山区土地利用结构主要表现为“两减(耕地和草地)两增(林地和建设用地)”, “草地—耕地”间的双向转化及“草地”向“林地”的转化尤为明显。2) 2003—2023 年单位土壤侵蚀累积量降幅达 85.1%, 林地增加是吕梁山区土壤侵蚀减少的主要因素; 在空间上, 临汾—吕梁西部仍长期处于高侵蚀风险区。3) 2033 年不同情景下, 经济发展情景(S2)的土地利用结构最为优化, 总体侵蚀强度呈草地(3.263×10^6 t) > 耕地(2.162×10^6 t) > 林地(0.797×10^6 t), 林地抗蚀能力仍显著优于其他地类。【结论】对于吕梁山区, 应加强梯田—淤地坝系统建设及协调配置水土资源、优化国土空间格局, 以降低区域侵蚀风险。

关键词: 土壤侵蚀; 土地利用变化; FLUS-InVEST 模型; 多情景模拟; 时空格局; 吕梁山区

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2026)01-0070-12

土壤侵蚀是自然营力与人类活动共同驱动的地表物质剥蚀、运移的过程, 是影响全球土地及生态系统功能退化的关键性因子^[1]。作为区域侵蚀风险评估的重要定量指标, 其受植被、地形、人为等多因素的协同调控^[2-3]。土地利用变化是土壤侵蚀的人为主导驱动源, 其格局重构不仅直接影响植被覆盖度和地表扰动强度, 还通过水土保持措施的配置, 改变区域土壤侵蚀的特征。因此, 评估土地利用对土壤侵蚀的影响, 对水土流失防控、国土空间优化及推进区域高质量发展等具有重要的研究价值。

随着地理信息系统与地理建模技术的发展, 基于多源数据土地利用变化驱动下的土壤侵蚀模拟与评估已成为研究热点^[4-5]。FLUS(future land use simulation)模型融合人工神经网络与元胞自动机方法, 能够有效模拟多重驱动因子下的土地利用演变, 目前已广泛应用于山区^[6]、特殊地貌区^[7]、流域及生态脆弱区^[8-9]等多类型区域; InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型可模拟和定量评估土壤侵蚀等关键生态过程^[10], 如量化流域尺度土壤保持量^[11]、模拟丘陵区土壤侵蚀时

收稿日期: 2025-05-23 网络首发日期: 2025-09-02

项目名称: 山西省哲学社会科学规划课题“黄河流域(山西段)生态系统服务权衡协同与高质量发展路径研究”(2025YB092); 山西省基础研究计划(自由探索类)项目“气候变化和人类活动对山西省不同类型植被水分利用效率影响研究”(202203021212497); 山西省统计科学研究项目“基于生态系统服务价值的黄河中游山西段区域间生态补偿核算体系构建”(2024Z024); 山西师范大学自然科学基金项目“黄河中游水土流失敏感区生态安全格局构建”(020820250003)

第一作者简介: 刘晓钰(2003—), 女, 本科生。主要研究方向: 土壤侵蚀与生态安全。E-mail: liuxy031219@163.com

†通信作者简介: 张齐飞(1989—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 遥感、生态安全研究。E-mail: zhangqf@sxnu.edu.cn

空动态^[12]、评估多模块组合的水土保持效能等^[13]。将 FLUS 与 InVEST 模型结合,可同步模拟土地利用变化的空间配置及其对侵蚀动力的影响,克服传统统计模型难以量化“地类转换—侵蚀响应”机制的缺陷。然而,对土壤侵蚀在多情景预测、精细时序建模及驱动因子影响机制下的特征,仍缺乏系统性研究。

黄河中游是中国重要的生态廊道,其地理连通性与水土保持功能对黄河流域生态安全具有重要战略意义^[14]。自 2000 年来,黄河中游土壤侵蚀量有所降低,但在空间分布上存在显著差异^[15]。吕梁山区作为该区域典型的水土流失敏感区,仍面临水土流失周期性波动、土壤盐渍化加剧等生态问题^[16-17]。鉴于此,笔者以吕梁山区为研究对象,结合 FLUS-InVEST 模型,通过集成 2003—2023 年 5 期高时序精度的土地利用数据,优化模型输入,进而提高土地利用模拟的空间精度与生态响应评估的科学性。此外,笔者进一步设定 4 种未来发展情景,以预测不同土地利用格局下的土壤侵蚀风险空间演变,系统评估区域土壤侵蚀的响应特征。研究结果可为吕梁山区水土流失空间治理、水土保持工程效能提升与可持续发展提供参考。

1 研究区概况

吕梁山区位于山西省西部,黄土高原中部,地

处黄河中游典型水土流失区(E 110°22' ~ 113°58', N 35°23' ~ 40°17'),区域范围自南向北分布于临汾市、吕梁市、太原市、忻州市及朔州市,总面积约 8.44 万 km²(图 1)。区域年降水量集中于 6—9 月,南北气候差异显著。山体东坡地势陡峭,西坡相对平缓,坡面形态对水土流失空间分异具有重要影响;土地利用格局呈现出典型的丘陵沟壑区特征,以耕地和草地为主;土壤类型呈明显空间差——以黄绵土、石灰性褐土、棕壤、山地草甸土及栗钙土为主,地表沙化程度高、易受风力和水力侵蚀;土壤侵蚀强度整体处于极高水平,黄土丘陵沟壑区是主要产沙区。整体上,吕梁山区是黄河中游泥沙输出的重要源区之一,也是国家重点防治的水土流失敏感区。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

1)笔者选取 2003—2023 年吕梁山区每 5a 为 1 期共 5 期土地利用数据,在 ArcMap 10.8 统一投影为 WGS_1984_UTM_ZONE_49N,重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。2)土地利用模拟驱动因子数据,包括自然、社会经济驱动因子。自然驱动因子中,DEM 约束土地开发;坡度直接影响耕地和建设用地的空间分布,且存在水土流失风险^[18]。社会经济驱动因子中人口和 GDP

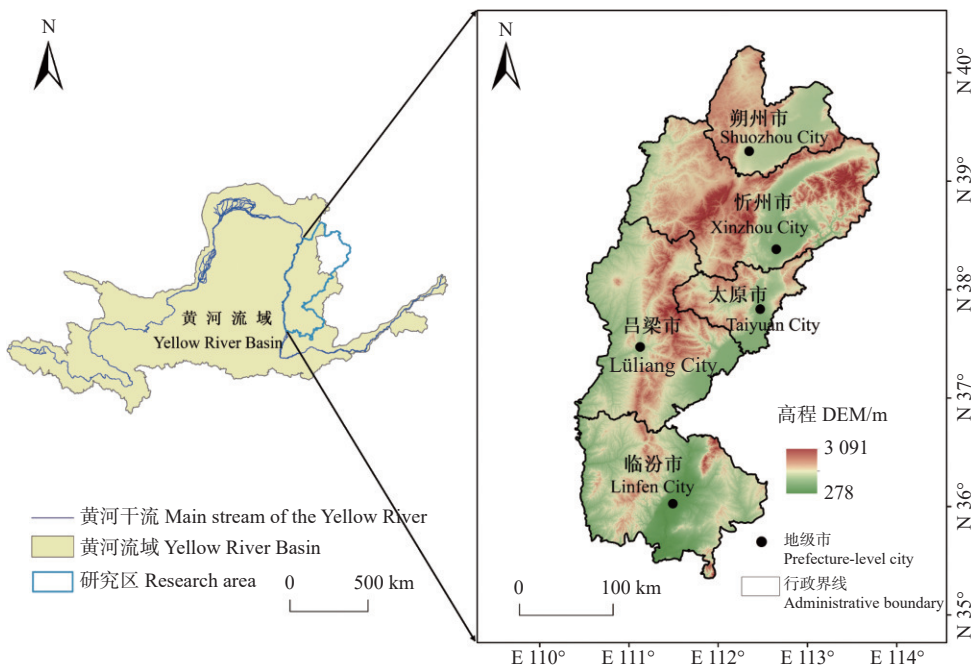


图 1 吕梁山区地理位置

Fig. 1 Location of Lüliang Mountains

表征人类活动强度和区域发展水平,是建设用地扩张的核心动力^[19];各级城市点到1级道路、2级道路、高速、铁路、居民点的距离用来量化交通通达程度和城镇辐射效应^[20]。3)土壤侵蚀模拟数据——降水与土壤侵蚀因子在栅格计算器中计算,并进行掩膜提取。以上所有数据的栅格空间分辨率都统一为60 m,行列号、投影等与土地利用数据一致,驱动因子进行归一化处理。本文所涉及的数据见表1。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化模拟 笔者采用FLUS V2.4模型对吕梁山区土地利用现状及未来多情景演变进行模拟分析。首先,选取2003—2023年5期土地利用数据,通过Kappa系数加以验证;根据选取的9个土地利用变化驱动因子及随机采样策略,构建各类土地利用的适宜性概率图。随后,基于马尔可夫链(Markov chain)模型对2033年多情景土地利

用格局进行模拟,为后续土壤侵蚀模拟与生态风险评估提供基础数据支撑。

2.2.2 多情景设置 结合山西省土地利用发展趋势和《山西省国土空间规划(2021—2035年)》等政策导向,构建2033年多情景模拟方案,包括自然发展情景(S1)、经济发展情景(S2)、耕地保护情景(S3)和生态保护情景(S4),具体领域因子及转移矩阵设置见表2和表3。

1)自然发展情景(S1)。基于2003—2023年吕梁山区土地利用变化的历史演变趋势进行模拟,维持原始土地利用转化规律,用以反映土地系统在自然演替驱动下的演变趋势。

2)经济发展情景(S2)。强化以太原市为核心的“一群两区三圈”空间发展战略,建设用地扩张的概率显著提高,其他用地类型的比例相对下降,以反映区域城镇化和基础设施快速发展的土地利用格局变动。

表1 数据信息与来源

Tab. 1 Data information and sources

数据类型 Data type	数据名称 Data name	分辨率/类型 Spatial resolution/Type	数据来源 Data source
基础数据 Basic data	5期土地利用类型数据 Land use data of five periods	1 000 m	中科院资源环境数据共享中心 Resource and environmental science data platform (http://www.resdc.cn)
自然因子 Natural factor	高程 Digital elevation model	30 m	地理空间数据云 Geospatial data cloud (https://www.gscloud.cn)
	坡度 Slope gradient	60 m	使用高程通过ArcGIS计算 Calculation from DEM using ArcGIS
社会经济因子 Socio-economic factor	人口 Population	60 m	中科院资源环境数据共享中心 Resource and environmental science data platform
	GDP	60 m	(http://www.resdc.cn)
	到1级道路距离 Distance to primary roads	矢量 Vector	全国地理信息资源目录服务系统 National catalogue service for geographic information (https://www.webmap.cn)
	到2级道路距离 Distance to secondary roads	矢量 Vector	
	到高速公路距离 Distance to expressway	矢量 Vector	
	到铁路距离 Distance to railway	矢量 Vector	国家冰川冻土沙漠科学数据中心 National glacier, geocryology and desert scientific data center (https://www.ncdc.ac.cn)
	到居民点距离 Distance to residential areas	矢量 Vector	
降水侵蚀因子 Rainfall erosion factor	年累计降水量 Annual cumulative rainfall	1 000 m	中国气象数据网 China meteorological data network (https://data.cma.cn)
土壤侵蚀因子 Soil erosion factor	土壤属性数据 Soil property data	矢量 Vector	国家冰川冻土沙漠科学数据中心 National glacier, geocryology and desert scientific data center (https://www.ncdc.ac.cn)

表 2 不同情景下的领域因子设置

Tab. 2 Neighborhood factor settings under different scenarios

情景/地类 Scenario/Land use type	耕地 Cultivated land	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water body	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
S1	0.5	0.8	0.2	0.4	0.6	0.1
S2	0.3	0.5	0.2	0.1	0.9	0.1
S3	0.8	0.6	0.2	0.4	0.5	0.1
S4	0.3	0.9	0.7	0.3	0.4	0.1

注：S1、S2、S3、S4分别代表自然发展情景、经济发展情景、耕地保护情景、生态保护情景。下同。Notes: S1, S2, S3 and S4 represent natural development scenario, economic priority development scenario, cultivated land protection scenario and ecological protection scenario, respectively. The same below.

表 3 不同情景下转移矩阵设置

Tab. 3 Land use transfer matrix settings under different scenarios

情景 Scenario	S1						S2						S3						S4				
地类 Land use type	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
b	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
c	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
d	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
e	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注：a、b、c、d、e、f分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。Notes: a, b, c, d, e, and f represent cultivated land, forestland, grassland, water body, construction land, and unused land, respectively.

3) 耕地保护情景(S3)。响应国家粮食安全战略与耕地保护红线要求, 严格控制耕地向非农业用地的转化, 降低其转移概率, 反映在耕地后备资源稀缺、水土流失严重背景下强化耕地保护的政策导向。

4) 生态保护情景(S4)。根据山西省国土规划的要求, 强化生态优先与绿色发展的战略导向, 落实对吕梁山、太行山等重点区域的水土保持与荒漠化治理措施。提高草地、林地扩张概率, 限制建设用地的大规模扩张。

2.2.3 土壤侵蚀量计算模型 InVEST 模型能够根据吕梁山区土地利用变化的规律来对土壤侵蚀量以及土壤保持量进行研究, 是最直接也是最有利于观察近年来吕梁山区的生态保护的效果的方法。InVEST 模型能自动计算坡长 L 与坡度 S 因子的值^[21]。土壤保持总量计算公式如下:

$$D(n) = Q(n) - A(n); \quad (1)$$

$$Q(n) = R_n K_n L_n S_n; \quad (2)$$

$$A(n) = R_n K_n L_n S_n C_n P_n. \quad (3)$$

式中: $D(n)$ 为 n 年土壤保持量, t/km^2 ; $Q(n)$ 为 n 年土

壤潜在侵蚀量, t/km^2 ; $A(n)$ 为 n 年土壤实际侵蚀量, $t \cdot km^2$; R_n 为 n 年降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm / (km^2 \cdot h \cdot a)$; K_n 为 n 年土壤可蚀性因子, $t \cdot hm^2 \cdot h / (MJ \cdot km^2 \cdot mm)$; L_n 为 n 年坡长因子; S_n 为 n 年坡度因子; C_n 为 n 年植被覆盖因子; P_n 为 n 年工程措施因子, L_n 、 S_n 、 C_n 、 P_n 量纲均为 1。

1) 降水侵蚀力因子 R , 计算公式如下^[22]:

$$R_n = 0.053 P_n^{1.655}. \quad (4)$$

式中: R_n 为第 n 年的降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm / (km^2 \cdot h \cdot a)$; P_n 为第 n 年的降雨量, mm 。

2) 土壤可蚀性因子 K , 计算公式如下^[3]:

$$K = (-0.013 83 + 0.515 75 K_1) \times 0.131 7; \quad (5)$$

$$K_1 = (0.2 + 0.3 \exp(-0.025 6 I_1(1 - I_2/100))) \times (I_2/(I_3 + I_2))^{0.3} \times (1 - 0.25 C_1 / (C_1 + \exp(3.7 - 2.95 C_1))) \times (I_2/(I_3 + I_2))^{0.3} \times (1 - 0.7 I_4 / (I_4 + \exp(-5.51 + 22.9 I_4))). \quad (6)$$

式中: K 、 K_1 分别为修正前和修正后的土壤可蚀性因子, $t \cdot hm^2 \cdot h / (MJ \cdot mm \cdot hm^2)$; I_1 、 I_2 、 I_3 、 C_1 分别为砂

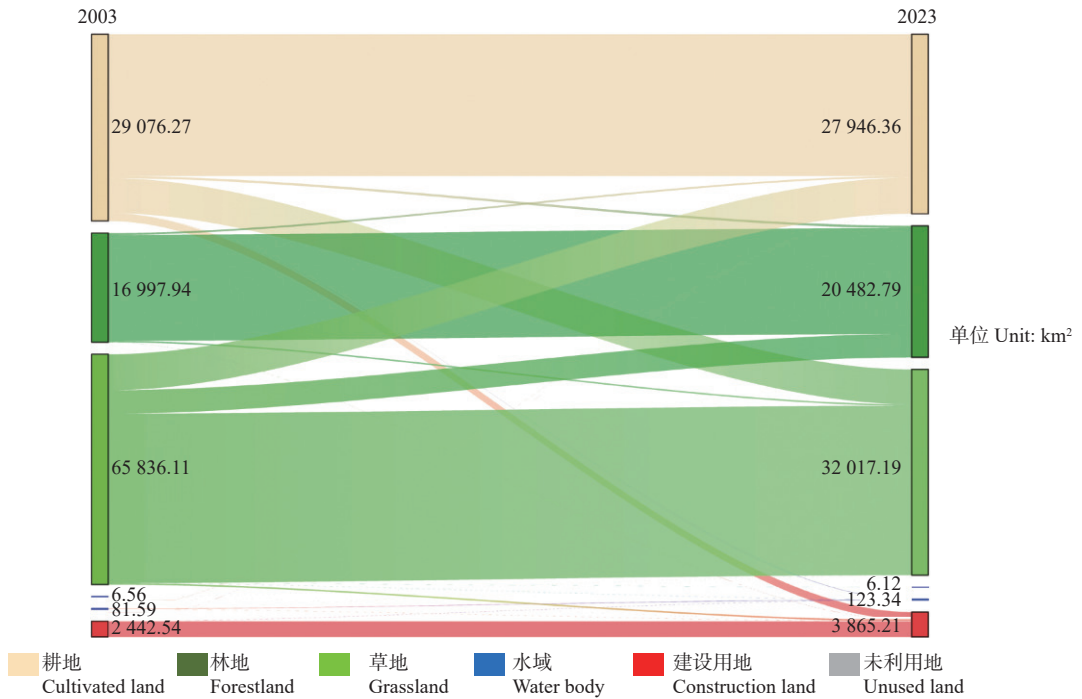


图 2 2003—2023 年吕梁山区土地利用转移图

Fig. 2 Land use transfer map of Lüliang Mountains (2003–2023)

表 5 FLUS 模型土地利用 Kappa 系数精度验证

Tab. 5 Accuracy verification of land use Kappa coefficient for FLUS model

时期 Period	2003—2008	2008—2013	2013—2018	2018—2023
Kappa系数 Kappa coefficient	0.87	0.83	0.79	0.77
平均精度 Average accuracy	0.82			

(图 5), 降幅达 85.1%。这一动态过程呈现“减—增—减”趋势, 与 2003 年相比, 2023 年草地单位土壤侵蚀量与耕地、林地的差值分别减少至 24.54 和 70.94 t/km²。

2003—2023 年间, 吕梁山区土壤侵蚀总体上呈现“西南高、东北低”的空间格局; 其中, 2008 年曾出现东北高于西南的局面。研究期内, 高侵蚀风险区集中于临汾西部与吕梁西南一带, 约占全区 15%, 其内部侵蚀强度明显减弱; 中轻度侵蚀面积比例从不足 20% 上升至 65%(图 6)。

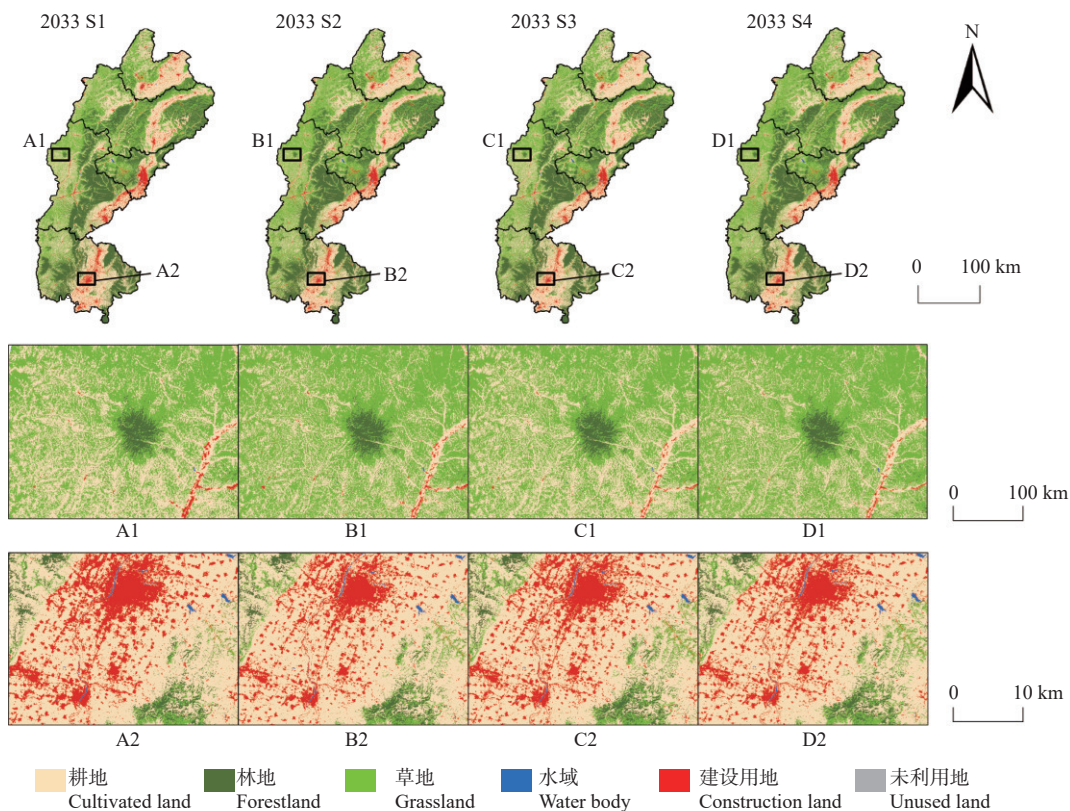
3.4 不同情景下土地利用变化对土壤侵蚀量的影响

未来 4 种情景下的土地利用预测结果显示, 土壤侵蚀量均呈现出草地 > 耕地 > 林地(表 6)。草地单位土壤侵蚀量在 4 种情景下分别为 110.06、107.79、109.41 和 107.48 t/km², 是耕地的 1.27 倍、林地的 2.88 倍; S1 和 S4 情景中草地土壤侵蚀总量分别为最高值(3.347 × 10⁶ t)与最低值(3.018 × 10⁶ t), 差幅为 10.9%。相比之下, S4 情景的耕地土壤侵蚀总量为 2.084 × 10⁶ t, 为各情景中最低水平, 分别

比 S1、S2、S3 情景低 11.7%、3.6%、14.2%。而林地在 4 种情景下的土壤侵蚀总量比值均接近于 1。

4 讨论

本研究基于 FLUS—InVEST 模型, 分析黄河中游吕梁山区 2003—2023 年土地利用驱动下的土壤侵蚀状况, 预估 2033 年多情景的土壤侵蚀量。结果表明, 2003—2023 年吕梁山区土壤侵蚀量降低 85.1%, 其主要原因为“退耕还林还草”政策的实施, 土地利用格局演变通过改变地表覆盖和影响生态过程, 直接驱动土壤侵蚀特征的变化, 林地面积的增加显著提升生态脆弱区的生态保护成效, 这与邹琴英等^[23]的研究结果相一致, 体现森林植被通过涵养水源、根系固土来增强土壤的抗蚀能力。其中, 2008—2013 年土壤侵蚀量出现反弹, 恰与杨淋等^[24]在黄土丘壑区测算的同期降雨侵蚀力因子 *R* 的高值区相吻合, 表明降水年际波动仍是扰动土壤侵蚀治理成效的关键自然驱动。然而研究期内耕地侵蚀量仍高于林地, 与黄振华等^[25]在青弋江流域中



A1, B1, C1, D1, A2, B2, C2, D2 为吕梁山区不同情景下局部地区土地利用状况。A1, B1, C1, D1, A2, B2, C2, D2 are the land use conditions in some areas of Lüliang mountain area under different scenarios.

图 3 多情景下的土地利用空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land use under multiple scenarios

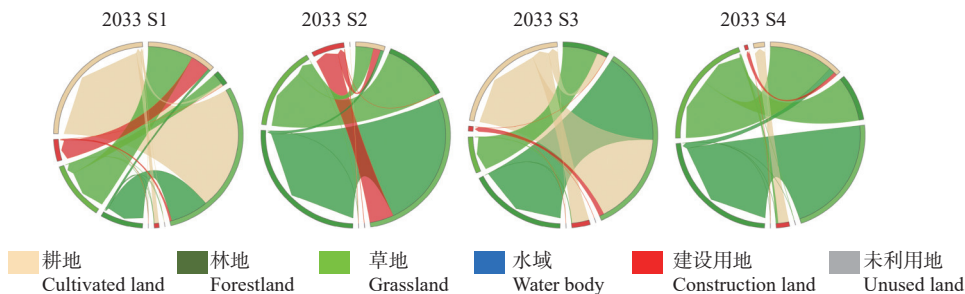


图 4 多情景下的土地利用转移弦图

Fig. 4 Chord diagrams of land use transfer under multiple scenarios

“林地 > 耕地”的研究结果有所差异,这归因于吕梁山区耕、草地比例过高且多分布于西坡高坡度、地形破碎区域,导致耕地侵蚀风险加剧;此外,局部地区因农业开垦导致的耕草损失也是侵蚀量差异的原因之一。未来多情景模拟表明,S1 情景因建设用地过度扩张挤占生态空间,导致草地承载过高土壤侵蚀压力;S3 与 S4 情景则偏重单一地类规模的扩张;与之相比,S2 情景表现出最优的土壤侵蚀控制效果,通过建设用地集约化与林草空间重组,协同降低土壤侵蚀强度。

到 2023 年为止,吕梁山区土壤侵蚀治理成效

显著,但其西南部仍存在持续性高风险区,且面临坡耕地分布、淤地坝超限^[26]、水资源分布不均^[27]等问题,亟需实施针对性保护措施。建议开展坡耕地改造梯田^[28];新建大中型淤地坝并消除超限淤地坝隐患,使防洪防沙能力达到最大化^[17];鉴于区域资源分布空间与生态屏障高度重叠,需特别关注吕梁山区南部连片贫困区的水资源利用,优化“三生”空间用水结构。以上措施可有效控制沟道侵蚀、保障淤地坝安全运行,增强农田水土资源调控能力,保障农业安全。但仍需注意,若工程布局与生态恢复协同不足,可能加剧局部水资源竞争或产生新的

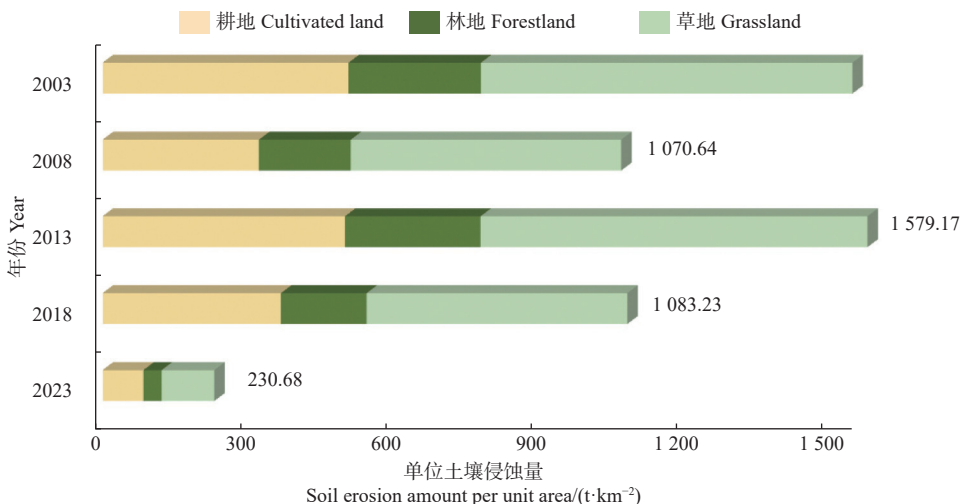


图 5 2003—2023 年吕梁山区土壤侵蚀量变化

Fig. 5 Changes in soil erosion in Lüliang Mountains (2003–2023)

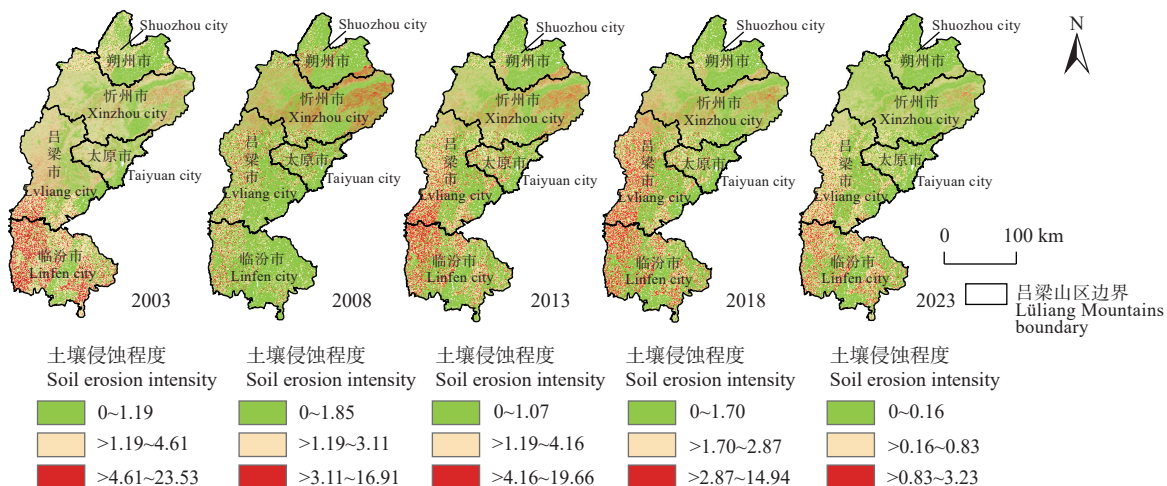


图 6 2003—2023 年吕梁山区土壤侵蚀空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of soil erosion in Lüliang Mountains (2003–2023)

生态问题，影响治理的可持续性。此外，在未来国土空间规划中应强化生态敏感性分区分管控，优先在高侵蚀风险区布局林草植被恢复工程，着力构建以太原盆地为主体发展区、以吕梁山为重要生态安全屏障的“开发—保护”格局，实现生态保护与开发建设的动态平衡，推动区域协调发展。因此，强化水土保持措施、合理配置水土资源及梯田—淤地坝建设是改善临汾—吕梁地区土壤侵蚀状况的重要手段。

本研究也存在一定局限性：吕梁山区复杂地形难以精确刻画微地形对侵蚀的调控作用；虽将建设用地 C 因子设为 0 符合主流方法，但其扩张通过挤压生态空间间接加剧周边侵蚀，且 InVEST 模型对未来土壤侵蚀量预测存在固有约束。未来研究可优化模型参数，结合实地调查、社会生态等综合

数据提高准确性，系统评估土地利用和土壤侵蚀状况。

5 结论

1) 2003—2023 年间吕梁山区土地利用结构发生显著变化。耕地和草地面积分别减少 4.04% 和 10.66%，林地和建设用地分别增加 20.50% 和 58.25%。其中草地与耕地之间的双向转化以及草地向林地的转移最为显著。

2) 2003—2023 年吕梁山区土壤侵蚀治理成效显著，单位土壤侵蚀量下降 85.1%。土地利用格局的“两减两增”与土壤侵蚀下降存在响应关系，林地的增加是吕梁山区土壤侵蚀减少的主要因素。空间上，高风险侵蚀带持续存在临汾—吕梁西部黄土丘陵沟壑区，资源利用不当及淤地坝建设不足等问

表 6 多情景下不同土地利用类型的土壤侵蚀状况
Tab. 6 Soil erosion status of different land use types under multiple scenarios

情景 Scenario	土地利用类型 Land use type	单位土壤侵蚀量 Soil erosion per unit area/(t·km ⁻²)	土壤侵蚀总量 Total soil erosion/t
S1	耕地 Cultivated land	88.89	2.532 × 10 ⁶
	林地 Forestland	37.66	0.796 × 10 ⁶
	草地 Grassland	110.06	3.018 × 10 ⁶
S2	耕地 Cultivated land	83.66	2.162 × 10 ⁶
	林地 Forestland	37.67	0.797 × 10 ⁶
	草地 Grassland	107.79	3.263 × 10 ⁶
S3	耕地 Cultivated land	85.54	2.431 × 10 ⁶
	林地 Forestland	37.78	0.799 × 10 ⁶
	草地 Grassland	109.41	3.093 × 10 ⁶
S4	耕地 Cultivated land	81.97	2.084 × 10 ⁶
	林地 Forestland	37.62	0.795 × 10 ⁶
	草地 Grassland	107.48	3.347 × 10 ⁶

题加重其土壤侵蚀。

3)未来多情景中,与 S1(自然发展)、S3(耕地保护)和 S4(生态保护情景)相比,S2(经济发展)情景下建设用地有序扩张,且未加剧土壤流失,优于其他情景。土壤侵蚀总量呈草地(3.263 × 10⁶ t) > 耕地(2.162 × 10⁶ t) > 林地(0.797 × 10⁶ t),林地土壤侵蚀量低于耕地与草地,抗蚀能力较强。未来治理应聚焦于临汾—吕梁西部地区的梯田—淤地坝建设与植被恢复,且注重土地利用类型间的空间协同。

6 参考文献

- [1] BORRELLI P, ROBINSON D A, PANAGOS P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070)[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(36): 21994-22001.
- [2] LAI Jinlin, LI Jiashun, LIU Li. Predicting soil erosion using RUSLE and GeoSOS-FLUS models: A case study in Kunming, China[J]. *Forests*, 2024, 15(6): 1039.
- [3] QIAO Xinru, LI Zijun, LIN Jinkuo, et al. Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(2): 298-312.
- [4] XU Erqi, ZHANG Hongqi. Change pathway and intersection of rainfall, soil, and land use influencing water-related soil erosion[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106281.
- [5] TIAN Tian, YANG Zhenqi, GUO Jianying, et al. Spatiotemporal evolution of soil erosion and its driving mechanism in the Mongolian section of the Yellow River Basin[J]. *Land*, 2023, 12(4): 801.
- [6] ZHANG Yunping, LIN Jianping, HUANG Yimin, et al. Delineation of urban growth boundary based on FLUS model under the perspective of land use evaluation in hilly mountainous areas[J]. *Journal of Mountain Science*, 2024, 21(5): 1647-1662.
- [7] 林彤, 冯兆华, 吴大放, 等. 基于 FLUS 模型的喀斯特地区生态用地时空变化及多情景预测: 以湖南省宁远县为例 [J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 219-227. LIN Tong, FENG Zhaohua, WU Dafang, et al. Spatial-temporal changes and multi-scenario prediction of ecological land in karst area based on FLUS model: A case study in Ningyuan County, Hunan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 219-227.
- [8] FENG Dingrao, BAO Wenkai, FU Meichen, et al. Current and future land use characters of a national central city in eco-fragile region—A case study in Xi'an City based on FLUS model[J]. *Land*, 2021, 10(3): 286.
- [9] CHENG Yali, CHEN Yangbo. Spatial and temporal characteristics of land use changes in the Yellow River Basin from 1990 to 2021 and future predictions[J]. *Land*, 2024, 13(9): 1510.
- [10] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡, 等. 基于 InVEST 模型的黄河流域土壤侵蚀评估及其时空变化 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(5): 650-658. YANG Jie, XIE Baopeng, ZHANG Degang, et al.

- Soil erosion and its temporal-spatial variation in the Yellow River Basin based on the InVEST model[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2021, 57(5): 650-658.
- [11] 杨超, 张蕾, 龚磊. 气候和土地利用变化对白洋淀流域土壤保持功能的影响 [J]. *水土保持通报*, 2025, 45(3): 363-373.
YANG Chao, ZHANG Lei, GONG Lei. Impacts of climate and land use change on soil conservation function in Baiyangdian Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(3): 363-373.
- [12] 韩晶, 崔金芳, 杨威, 等. 基于 InVEST 模型的低山丘陵区土壤侵蚀变化与驱动因素分析 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 32-39.
HAN Jing, CUI Jinfang, YANG Wei, et al. Analysis of soil erosion change and driving factors in low hilly areas based on InVEST model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 32-39.
- [13] 刘沛显, 刘莹, 李铁男, 等. 黑龙江省牡丹江市水土保持生态服务功能时空分异 [J]. *水土保持通报*, 2025, 45(1): 357-369.
LIU Peixian, LIU Ying, LI Tienan, et al. Spatiotemporal differentiation of soil and water conservation ecological service function in Mudanjiang City, Heilongjiang Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(1): 357-369.
- [14] ZHANG Bingbing, CAO Jianrong, CHEN Dengshuai, et al. Construction of watershed ecological security patterns with integrated of spatial variability: A case study of the Yellow River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 159: 111663.
- [15] YIN Zuotang, CHANG Jun, HUANG Yu. Multiscale spatiotemporal characteristics of soil erosion and its influencing factors in the Yellow River Basin[J]. *Water*, 2022, 14(17): 2658.
- [16] 李海生. 黄河流域生态环境问题系统识别与展望 [J]. *环境科学研究*, 2024, 37(1): 1-10.
LI Haisheng. Systematic identification and prospect of eco-environmental problems in the Yellow River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(1): 1-10.
- [17] 高海东, 易琦, 贾莲莲, 等. 黄河流域治理状态识别与对策分析 [J]. *地理学报*, 2025, 80(3): 778-792.
GAO Haidong, YI Qi, JIA Lianlian, et al. Identification of governance status and countermeasures based on sediment transport modulus and water quality index in the Yellow River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(3): 778-792.
- [18] 贾静, 宿星, 张军, 等. 1985—2020 年甘肃省通渭县滑坡区土地利用变化及驱动力 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(10): 2833-2841.
JIA Jing, SU Xing, ZHANG Jun, et al. Land use changes and driving forces of landslide area in Tongwei County, Gansu Province, Northwest China from 1985 to 2020[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(10): 2833-2841.
- [19] 朱凯, 刘娜, 夏露, 等. 2000-2018 年吕梁市土地利用结构变化及其驱动力分析 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 44(6): 25-35.
ZHU Kai, LIU Na, XIA Lu, et al. Analysis of land use structure changes and driving forces in Lvliang City from 2000 to 2018[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2024, 44(6): 25-35.
- [20] 杜洲, 牛健植, 樊登星, 等. 基于 PLUS 模型的黄河中游多沙粗沙区土地利用变化模拟及驱动力分析 [J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6): 309-318.
DU Zhou, NIU Jianzhi, FAN Dengxing, et al. Simulation and driving force analysis of land use change in the sandy and coarse region of the middle reaches of the Yellow River based on PLUS model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6): 309-318.
- [21] 赵欣悦, 王金凤, 李庆, 等. 基于 InVEST 模型的北三河流域土壤保持功能研究 [J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2022, 40(4): 487-496.
ZHAO Xinyue, WANG Jinfeng, LI Qing, et al. The function of soil conservation in Beisan River Basin based on InVEST model[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2022, 40(4): 487-496.
- [22] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J]. *资源科学*, 2003(1): 35-41
ZHANG Wenbo, FU Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount[J]. *Resources Science*, 2003(1): 35-41.
- [23] 邹琴英, 师学义, 张臻. 汾河上游土壤侵蚀时空变化及景观格局的影响 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 15-21.
ZOU Qinying, SHI Xueyi, ZHANG Zhen. Effects of temporal and spatial changes of soil erosion and landscape pattern in the upper reaches of the Fenhe River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 15-21.
- [24] 杨淋, 张建国, 张建军, 等. 黄土高原丘陵沟壑区降雨侵蚀力的时空分布与变化趋势 [J]. *水土保持通报*, 2025, 45(2): 223-231, 347.
YANG Lin, ZHANG Jianguo, ZHANG Jianjun, et al.

- Spatiotemporal distribution and variation of rainfall erosivity in hilly and gully areas of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(2):223-231, 347.
- [25] 黄振华, 余健, 房莉, 等. 基于 InVEST 模型的青弋江流域土壤侵蚀与影响因素研究 [J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 189-197.
- HUANG Zhenhua, YU Jian, FANG Li, et al. Research on soil erosion and influencing factors in Qingyi River Basin based on InVEST model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 189-197.
- [26] 张齐飞, 孙从建, 向燕芸, 等. 基于遥感信息的黄河中游水土流失敏感区淤地坝坝地资源特征研究 [J]. 地球环境学报, 2022, 13(4):357-368, 379.
- ZHANG Qifei, SUN Congjian, XIANG Yanyun, et al. Study on the check dam resource features in the sensitive area of soil erosion in the middle Yellow River based on remote sensing information[J]. *Journal of Earth Environment*, 2022, 13(4):357-368, 379.
- [27] 孙从建, 贾焰文, 李新功, 等. 吕梁山连片贫困区南部水资源实物量表特征 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 372-383.
- SUN Congjian, JIA Yanwen, LI Xingong, et al. Characteristics of water resources in the southern part of the Lüliang mountainous poverty-stricken area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2):372-383.
- [28] 孙尚平, 樊秉更. 大力实施水土保持生态文明工程推进吕梁生态保护和高质量发展 [J]. *中国水土保持*, 2021(9): 1-3, 42.
- SUN Shangping, FAN Binggeng. Vigorously implement the ecological civilization project of soil and water conservation and promote ecological protection and high-quality development in Lüliang[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(9): 1-3, 42.

Spatiotemporal pattern changes of soil erosion in sensitive area of soil erosion in middle reaches of Yellow River Basin based on FLUS-InVEST model

LIU Xiaoyu¹, ZHANG Qifei^{1,3}, LI Yufei¹, LEI Yahui¹, XIANG Yanyun²

(1. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, 030031, Taiyuan, China; 2. School of Public Administration, Shanxi University of Finance and Economics, 030006, Taiyuan, China; 3. Research Center of Ecology and Environment in the Middle Reaches of the Yellow River, Shanxi Normal University, 030031, Taiyuan, China)

Abstract: [Objective] The middle reaches of the Yellow River Basin represent a critical ecological zone highly susceptible to soil erosion, particularly in the Lüliang Mountains, which severely threatens regional ecological security and sustainable development. Investigating the impact of land use change on soil erosion in this sensitive area of soil erosion helps optimize regional spatial layout and provide a scientific basis for ecological conservation and sustainable development in the Yellow River Basin. [Methods] This study analyzed the spatiotemporal characteristics of land use change and soil erosion in the Lüliang Mountains from 2003 to 2023 using the FLUS and InVEST models. The analysis was combined with multi-source data, including land use data, population, gross domestic product, rainfall, digital elevation model, soil properties, and road network data. The FLUS model was employed to conduct Kappa coefficient validation for the land use data of five periods, and the InVEST model was then used to simulate soil erosion magnitude. Furthermore, the impact of land use change on soil erosion under four different scenarios in 2033 was simulated (S1: natural development scenario; S2: economic priority development scenario; S3: cultivated land protection scenario; S4: ecological protection scenario). [Results] 1) Land use types in the Lüliang Mountains were dominated by cultivated land, forestland, grassland, and construction land, and they changed significantly from 2003 to 2023. The land use structure exhibited a trend of "two decreases and two increases". The cultivated land and grassland decreased by 4.04% and 10.66%, respectively, while forestland and construction

land increased significantly by 20.50% and 58.25%, respectively. The bidirectional conversion between grassland and cultivated land, as well as conversion from grassland to forestland, were the most prominent types of land use change. 2) The cumulative soil erosion per unit area decreased remarkably by 85.1% over the past 20 years. Among them, soil erosion in forestland, grassland, and cultivated land decreased by 86.18%, 85.82%, and 84.18%, respectively. Additionally, the spatial distribution pattern remained relatively stable, characterized by higher erosion in the west and south and lower erosion in the east and north. The western Linfen–Lüliang region continued to be the highest erosion risk zone, accounting for approximately 15% of the total study area. 3) Multi-scenario simulations revealed that future soil erosion would be strongly regulated by the area and spatial arrangement of land use. The impact of land use patterns on future soil erosion was significantly different. Under the different scenarios, the economic development scenario (S2) exhibited the most optimized land use structure. The overall erosion intensity indicated that grassland (3.263×10^6 t) had the highest erosion intensity, followed by cultivated land (2.162×10^6 t) and forestland (0.797×10^6 t), demonstrating that forestland exhibited significantly superior erosion resistance compared to other land use types. [Conclusions] The implementation of ecological conservation policies in the Lüliang Mountains significantly mitigates soil erosion intensity, indicating their role as a dominant factor. To further reduce regional soil erosion risks, it is essential to enhance the construction of terrace–check dam systems, coordinate the allocation of water and soil resources, and optimize territorial spatial planning. This study establishes a scientific foundation for decision-making in soil erosion mitigation, ecological conservation, and regional spatial optimization in the Lüliang Mountains.

Keywords: soil erosion; land use change; FLUS-InVEST model; multi-scenario simulation; spatiotemporal pattern; Lüliang Mountains

Funded: Shanxi Provincial Philosophy and Social Science Planning Project "Research on Ecosystem Service Balance Coordination and High-quality Development Path in the Yellow River Basin (Shanxi Section)" (2025YB092). Shanxi Provincial Basic Research Plan (Free Exploration) Project "Research on the Impact of Climate Change and Human Activities on the Water Utilization Efficiency of Different Types of Vegetation in Shanxi Province" (202203021212497). Shanxi Provincial Statistical Scientific Research Project "Construction of Interregional Ecological Compensation Accounting System in the Shanxi Section of the Middle reaches of the Yellow River Based on the Value of Ecosystem Services" (2024Z024). Shanxi Normal University Natural Science Fund Project "Construction of Ecological Safety Pattern in Sensitive Areas in the Middle of the Yellow River" (020820250003)