

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.019

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.019

胡馨怡,肖作林,秦川,等.基于PLUS-InVEST模型的三峡库区土地利用变化与土壤侵蚀多情景预测[J].水土保持学报,2025,39(6):106-117,127.

HU Xinyi, XIAO Zuolin, QIN Chuan, et al. Multi-scenario prediction of land use changes and soil erosion in Three Gorges Reservoir Region based on PLUS-InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):106-117,127.

基于PLUS-InVEST模型的三峡库区土地利用变化与土壤侵蚀多情景预测

胡馨怡¹, 肖作林¹, 秦川², 成鑫¹, 陈吉龙³, 鞠佳伶⁴

(1.重庆师范大学地理与旅游学院,地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室,重庆401331;2.成都师范学院历史与地理学院,农村土地利用监测与评价重点实验室,成都611130;3.中国科学院重庆绿色智能技术研究院,重庆400714;4.重庆市河道事务中心,重庆401147)

摘要: [目的] 三峡库区作为长江上游重要生态屏障和国家级水土流失重点治理区,深入探究其土地利用及土壤侵蚀的未来时空演变特征,对于优化土地利用规划和促进水土资源可持续管理具有重要意义。[方法] 基于2000—2020年自然、社会经济、遥感等多源数据,系统分析三峡库区土地利用与土壤侵蚀的时空演变规律,并模拟预测自然发展、生态保护和城镇建设3种情景下2030年的土地利用及土壤侵蚀格局。[结果] 1)2000—2020年,三峡库区耕地和草地面积持续缩减,林地和建设用地则呈现扩张态势。土地利用转换特征主要表现为耕地与林地、草地之间的双向转换。2)三峡库区2000年、2010年、2020年的平均土壤侵蚀模数分别为34.76、24.73、20.70 t/(hm²·a),呈现显著减弱趋势。耕地土壤侵蚀最为严重,其次为草地和林地。侵蚀等级以微度、轻度为主,其空间分布结构呈现东高西低的区域分异特征。3)2030年不同情景下三峡库区土地利用格局差异显著。耕地持续减少,建设用地显著扩张,生态保护情景下林地增长尤为突出。4)2030年三峡库区土壤侵蚀状况将有所缓解,尤其在生态保护情景下得到有效控制。中高强度侵蚀向低等级转化,强烈及以上侵蚀等级面积减少,且耕地、林地和草地仍是土壤侵蚀的主要地类。选取积极的生态保护导向型发展模式,通过科学规划实现生态保护与经济发展的动态平衡。[结论] 研究成果揭示三峡库区土地利用与土壤侵蚀的未来变化趋势,为合理规划土地利用及制定有效水土保持措施提供理论依据,也可为长江流域水土资源协同管理实践提供重要参考。

关键词: 三峡库区; 土地利用变化; 土壤侵蚀; InVEST模型; PLUS模型; 多情景预测

中图分类号: TP79; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0106-12

Multi-Scenario Prediction of Land Use Changes and Soil Erosion in Three Gorges Reservoir Region Based on PLUS-InVEST Model

HU Xinyi¹, XIAO Zuolin¹, QIN Chuan², CHENG Xin¹, CHEN Jilong³, JÜ Jialing⁴

(1.Chongqing Key Laboratory of GIS Application, School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2.Sichuan Provincial Key Laboratory of Philosophy and Social Sciences for Monitoring and Evaluation of Rural Land Utilization, School of History and Geography, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China; 3.Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 4.Chongqing River Affairs Center, Chongqing 401147, China)

Abstract: [Objective] As a critical ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River and a key national region for soil erosion control, the Three Gorges Reservoir Region (TGR) demands in-depth investigations into the future spatiotemporal evolution characteristics of land use and soil erosion. Understanding these dynamics is significant for optimizing land use planning and promoting sustainable management of soil and water resources.

收稿日期: 2025-05-27

修回日期: 2025-06-25

录用日期: 2025-07-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-08-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(42001388); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202300558); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2023NSCQ-LZX0150); 重庆市水利局项目(CQS23C01036); 重庆师范大学基金项目(22XLB011)

第一作者: 胡馨怡(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: HUUU_xy@163.com

通信作者: 肖作林(1985—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地表生态过程研究。E-mail: xiaoll@cqnu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

[Methods] Using multi-source data including natural, socio-economic, and remote sensing data from 2000 to 2020, the spatiotemporal evolution of land use and soil erosion in the TGRR was systematically analyzed. The land use and soil erosion patterns in 2030 were simulated under three scenarios of natural development, ecological protection, and urban construction. **[Results]** 1) From 2000 to 2020, cropland and grassland areas in the TGRR declined continuously, while forestland and construction land expanded significantly. The dominant land use transformations involved mutual conversions among cropland, forestland, and grassland. 2) The average soil erosion moduli in 2000, 2010, and 2020 were 34.76, 24.73, 20.70 t/(hm²·a), respectively, indicating a significant weakening trend. Cropland experienced the most severe erosion, followed by grassland and forestland. Erosion intensity was mainly slight and mild, with a spatial distribution characterized by a regional pattern of higher levels of erosion in the east and lower levels in the west. 3) By 2030, the land use patterns under the three different scenarios show significant variations. Cropland is predicted to decrease, while construction land will expand notably. Under the scenario of ecological protection, forestland increases most significantly. 4) By 2030, soil erosion is expected to be further mitigated, particularly under the ecological protection scenario. Medium to high-intensity erosion areas will transition to lower intensity levels, with a reduction in areas affected by severe and stronger erosion. Cropland, forestland, and grassland will remain the primary land types subject to erosion. Adopting a proactive, ecological protection-oriented development model with scientific land use planning is essential for maintaining a dynamic balance between ecological protection and economic development. **[Conclusion]** This study provides critical insights into future land use and soil erosion trends in the TGRR, offering a theoretical foundation for rational land use planning and the formulation of effective soil conservation strategies. The findings also provide valuable insights for the coordinated management of water and soil resources in the Yangtze River basin.

Keywords: Three Gorges Reservoir Region; land use change; soil erosion; InVEST model; PLUS model; multi-scenario prediction

Received: 2025-05-27

Revised: 2025-06-25

Accepted: 2025-07-02

Online(www.cnki.net): 2025-08-14

土壤侵蚀是水力、风力等外营力作用下地表物质发生剥离、迁移和沉积的动力学过程,这一现象不仅导致土壤质量退化、农业生产力下降和生态系统功能受损,还会加剧地质灾害风险,已被公认为全球性环境问题之一^[1]。准确评估和预测土壤侵蚀动态对维护全球土壤资源安全、保障粮食生产稳定及实现可持续发展目标具有关键性科学价值。作为土壤侵蚀的关键驱动因素,土地利用变化通过改变地表植被覆盖类型、地表形态及土壤结构特性,显著调控着区域水文过程和泥沙输移机制^[2]。因此,解析不同发展情景下土地利用变化与土壤侵蚀的关联特征及其演变规律,对优化土地资源管理策略和完善土壤侵蚀防控体系具有重要意义。

土壤侵蚀模型作为评估侵蚀过程的关键工具,在量化侵蚀强度、解析时空分异特征方面具有重要作用^[3]。现有经验模型和物理模型通过整合植被、土壤和气象等参数,侧重于历史及现状土壤侵蚀评估,而对未来情景预测方面的应用仍显不足^[4]。因此,当前土壤侵蚀预测研究主要采用2种技术路径:其一是

整合机器学习与元胞自动机等算法,基于历史侵蚀数据进行直接预测^[5],但存在过程机理阐释不足的局限;其二是通过多模型耦合方法,先模拟未来环境因子变化,再将其作为输入参数驱动侵蚀模型进行间接预测^[6]。对于未来不同情景下的土壤侵蚀预测,修订后的通用土壤流失方程(RUSLE)与CA-Markov耦合模型虽应用广泛,但其在模拟地类间复杂竞争关系时仍存在局限性^[7]。斑块级土地利用模拟模型(PLUS)通过整合随机森林算法和基于斑块的模拟策略,不仅能精确量化不同用地类型的扩张潜力及其驱动因子的相对贡献率,还可基于扩张优势度实现斑块尺度的精准模拟^[8],为土壤侵蚀预测提供更可靠的土地利用输入数据。生态系统服务和权衡的综合评估模型(InVEST)作为生态系统服务评估的重要工具,能够系统分析生态服务功能的时空分布特征,其中,泥沙输移比模块(SDR),因其独特的建模框架,在土壤侵蚀风险评估及其环境效应研究中表现突出^[9]。近年来,集成InVEST模型与PLUS模型方法逐渐兴起,现有研究大多聚焦于生态系统服务

中的碳储量^[10]、生境质量^[11]与水源涵养量^[12]的时空演变与预测分析。鲜有将 InVEST 模型与 PLUS 模型相结合,用于综合分析未来多情景下土地利用变化与土壤侵蚀预测研究。该集成方法通过耦合 PLUS 模型的斑块级土地利用模拟能力和 InVEST 模型的生态系统服务评估功能,不仅能够实现土地利用变化的高精度模拟,更能系统预测不同情景下的土壤侵蚀响应,为深入分析未来土壤侵蚀时空分异变化奠定基础。

三峡库区作为长江上游重要生态屏障和水土流失重点治理区^[13],在人为干扰与自然过程的双重作用下,土壤侵蚀及其衍生的环境问题尤为严重,构成区域生态安全的重要威胁。当前关于三峡库区土壤侵蚀的研究主要采用经验模型和过程模型相结合的方法,重点分析侵蚀过程特征^[14]及其驱动因子^[15],并在小流域尺度开展侵蚀速率的定量评估^[16]。总体来看,当前三峡库区土壤侵蚀研究主要以现状分析为主,对土壤侵蚀内在机理及其与土地利用斑块动态的耦合关系认识较为薄弱,导致基于多情景模拟的土壤侵蚀系统性预测研究相对匮乏。

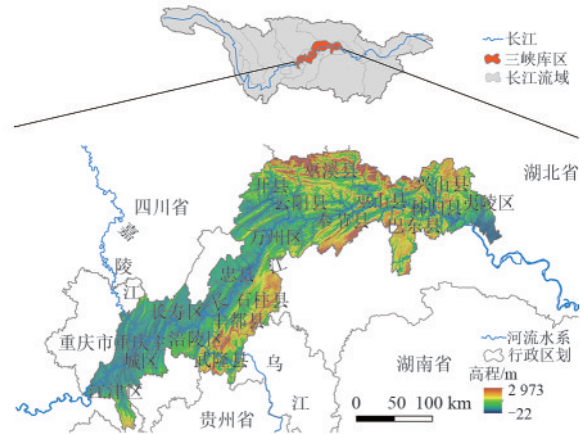
鉴于此,本研究基于 2000—2020 年三峡库区降雨、地形、土壤及历史土地利用等多源数据,结合土地利用转移矩阵与 InVEST 模型,系统分析三峡库区土地利用与土壤侵蚀的时空演变特征。在此基础上,采用 PLUS 模型模拟预测 2030 年土地利用格局,并设定自然发展、生态保护和城镇建设 3 种典型情景。情景设置分别表示土地系统自然演化、生态优先保护及城市扩张主导的不同发展路径,旨在反映政策干预强度变化对土地利用格局的影响。结合第六次耦合模式比较计划(CMIP6)中与 3 种情景相对应的未来气候数据,进一步开展多情景下的土壤侵蚀模拟分析,以期评估不同土地利用路径下的土壤侵蚀风险提供依据,为三峡库区生态保护与长江上游地区的可持续土地管理提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区(28°30′20″~31°44′43″N, 105°48′25″~111°40′14″E)地处四川盆地与长江中下游平原过渡带,横跨渝鄂山区峡谷及川东岭谷,是我国重要的水土流失防治区和长江上游关键生态功能区^[17]。三峡库区作为三峡工程影响的核心区域,行政区划涵盖 26 个区县,总面积约 5.8 万 km²(图 1)。区域地势呈东高西低格局,地貌以中小型山地丘陵为主^[18]。气候特征表现为典型的亚热带湿润季风性气候,年平均气温 15~18℃,多年平均降水量 1 000~1 200 mm。

土地利用结构以林地和耕地为主导,建设用地主要沿长江呈线性分布。土壤类型以易侵蚀的紫色土分布最广,其次为水稻土、黄壤和石灰(岩)土等耕作土壤类型^[19]。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

图 1 三峡库区位置及范围示意

Fig. 1 Location and scope of Three Gorges Reservoir Region

1.2 数据来源

本研究采用多源数据,包括土地利用、自然环境和社会经济 3 类数据集。土地利用/覆被数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供的中国土地利用现状遥感监测数据集(CNLUCC),空间分辨率为 30 m,包含 6 个一级类和 23 个二级类。地形数据采用地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)提供的 30 m 分辨率 DEM 数据。气象数据选用国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)的 1 km 分辨率月均降雨量数据,经气象站点观测值验证具有较高可靠性。土壤数据采用 1:100 万比例尺的全国土壤类型图(<https://www.resdc.cn/>)。人口与 GDP 数据同样源自资源环境科学与数据中心,该数据考虑土地利用类型、夜间灯光亮度等影响因子,经空间插值生成 1 km×1 km 空间格网数据。基础地理数据(水系、道路等)源自全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>)的 1:100 万公众版数据集。所有空间数据统一重采样至 100 m×100 m 分辨率,并转换为 Krasovsky_1940_Albers 投影坐标系进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST 模型 土壤侵蚀模式的计算借助 InVEST 模型中的泥沙输移比例模块(SDR)实现,该模块基于改进的 RUSLE 方程模拟坡面侵蚀与流域泥沙输移过程。计算公式为:

$$\text{RUSLE} = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中:RUSLE 为土壤侵蚀模数, t/(hm²·a); R 为降雨

侵蚀力因子, $(MJ \cdot mm) / (hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, $(t \cdot hm^2 \cdot h) / (MJ \cdot mm \cdot hm^2)$; LS 为地形因子; C 和 P 分别为植被管理因子和水土保持措施因子(表 1)。

为了更加贴合库区内自然环境条件,研究采用 WISCHMEIER 等^[20]提出的公式计算降雨侵蚀力因

子。因土壤可蚀性因子具有特定性,为确保研究的准确性,采用吴昌广等^[21]经几何平均粒径修正模型估算验证得到的三峡库区土壤 K 值。植被管理因子和水土保持措施因子则参考刘爱霞等^[22]、蔡崇法等^[23]对三峡库区土壤侵蚀研究成果合理赋值。

表 1 RUSLE 各因子获取方法
Table 1 RUSLE factor acquisition methods

模型参数	计算方法	说明
降雨侵蚀力因子(R)	$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{\left[\frac{1.5 \log_{10}(P_i^2)}{P} - 0.08188 \right]}$	R 为降雨侵蚀力因子, $(MJ \cdot mm) / (hm^2 \cdot h \cdot a)$; P_i 为月降雨量, mm; P 为年降雨量, mm。
土壤可蚀性因子(K)	红壤 0.007 5、黄壤 0.015 6、黄棕壤 0.016 8、黄褐土 0.019 2、棕壤 0.007 2、暗棕壤 0.011 3、石灰土 0.017 1、紫色土 0.018 4、粗骨土 0.007 7、山地草甸土 0.017 6、水稻土 0.018 5	参见文献[21]
地形因子(LS)	依据所提供的 DEM 数据在 InVEST 模型中自动生成,模型使用 Desmet 和 Govers(1996)的二维地表计算方法	参见文献[24]
植被管理因子(C)	耕地 0.31、林地 0.02、草地 0.03、水域 0、建设用地 0、未利用地 0	参见文献[22]
水土保持措施因子(P)	耕地 0.4、林地 1.0、草地 0.8、水域 0、建设用地 0、未利用地 0	参见文献[23]

1.3.2 PLUS 模型 PLUS 模型整合了土地扩张分析策略(LEAS)和基于多类型随机种子的元胞自动机(CARS)2个模块^[25]。LEAS 模块运用随机森林算法,通过历史土地利用数据分析各类用地扩张驱动因子及其贡献度,生成发展概率图^[11];CARS 模块则采用自适应阈值递减机制,结合随机种子生成技术,实现土地利用斑块的高精度模拟。该模型兼具驱动机制解析和空间模拟优势,显著提升土地利用变化模拟的准确性。

1)情景设置

为探究未来不同情景下三峡库区土地利用格

局,参考前人^[26]经验构建自然发展、生态保护和城镇建设 3 种情景模式(表 2)。自然发展情景综合考虑城镇化进程和现行土地政策导向,依据历史土地利用转移概率进行趋势外推模拟;生态保护情景严格遵循“长江大保护”国家战略,通过设置生态保护红线和建设用地扩张约束条件,重点保障林地、水域等生态用地的稳定性;城镇建设情景则以区域经济发展为首要目标,提高耕地和生态用地转为建设用地的概率,同时降低建设用地的逆向转换可能性。

表 2 土地利用过渡转移矩阵
Table 2 Land use transition transfer matrix

土地利用类型	自然发展						生态保护						城镇建设					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
c	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0
d	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
e	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:a、b、c、d、e 和 f 分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 种地类;0 为不可转换,1 为可转换。

2)邻域权重

邻域权重作为衡量土地利用类型扩张潜力的关键,其数值大小表征不同地类间相互转换的概率和强度。该参数取值 0~1,数值与扩张潜力呈正相关。本研究基于 2000—2020 年土地利用转移概率的历史数据,结合已有研究^[26]成果,科学设定各情景下土地利用类型的邻域权重值(表 3)。

表 3 3 种情景目标下土地利用转换的邻域权重参数
Table 3 Neighborhood weight parameters of land use conversion under three scenarios

情景类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然发展	0.50	0.77	0.35	0.58	0.83	0.50
生态保护	0.60	0.80	0.75	0.58	0.73	0.40
城镇建设	0.50	0.75	0.75	0.58	0.73	0.70

1.3.3 CMIP6 CMIP6是世界气候研究计划推动的国际气候模式评估项目,旨在提升全球气候系统认知和预测能力^[27]。基于CMIP6多模式集成框架,选取EC-Earth、GFDL-ESM4和MRI-ESM2-0 3种具有代表性的全球气候模式,采用SSP119、

SSP245和SSP585情景的降水数据,分别与自然发展、生态保护和城镇建设3种土地利用情景相匹配。通过整合不同情景下土地利用与气候数据,实现未来土壤侵蚀的多情景响应。整体研究框架见图2。

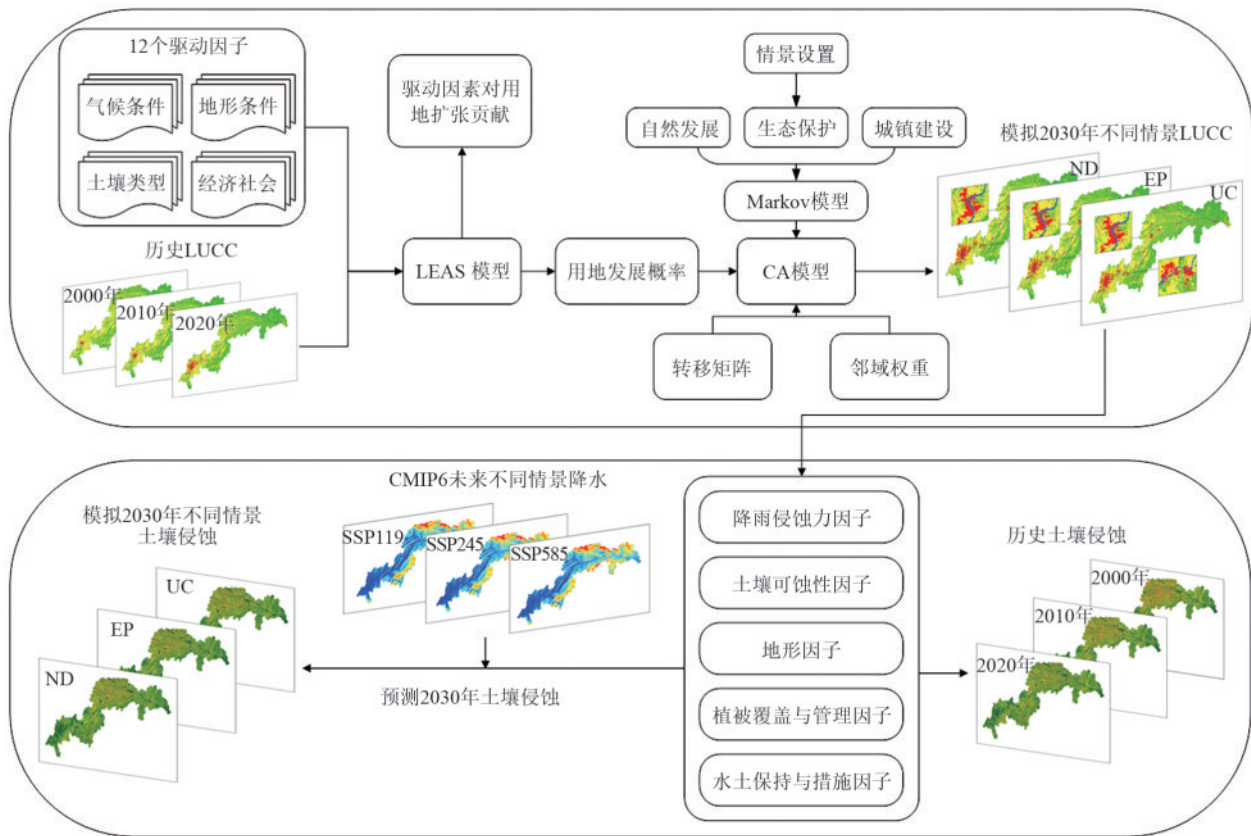


图2 研究框架

Fig. 2 Research framework

2 结果与分析

2.1 2000—2020年三峡库区土地利用时空变化

2000—2020年三峡库区土地利用格局呈现显著的空间分异特征(图3)。土地利用类型以耕地和林地为主导,二者合计占比达84.7%,其次为草地和建设用地,水域与未利用地占比较小。空间分布上,耕地集中分布于人类聚居区周边,建设用地则主要占据地势平缓的交通

便利区域,体现出人类活动与自然地理条件的协同作用。从土地利用转移情况(图4)来看,林地、耕地、草地和建设用地的变化最为显著,水域和未利用地变化较小。研究期间耕地减少908 km²,而林地增加758 km²,反映退耕还林等生态政策的实施成效。地类转换主要表现为1246 km²的耕地和建设用地转为林地和草地,同期1814 km²的林地和草地逆向转为耕地和建设用地,反映城镇化扩张与生态保护政策的双重影响。

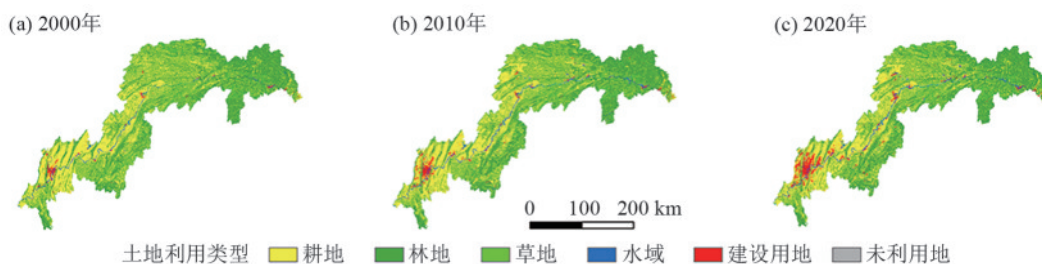


图3 2000—2020年三峡库区土地利用空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of land use in Three Gorges Reservoir Region from 2000 to 2020

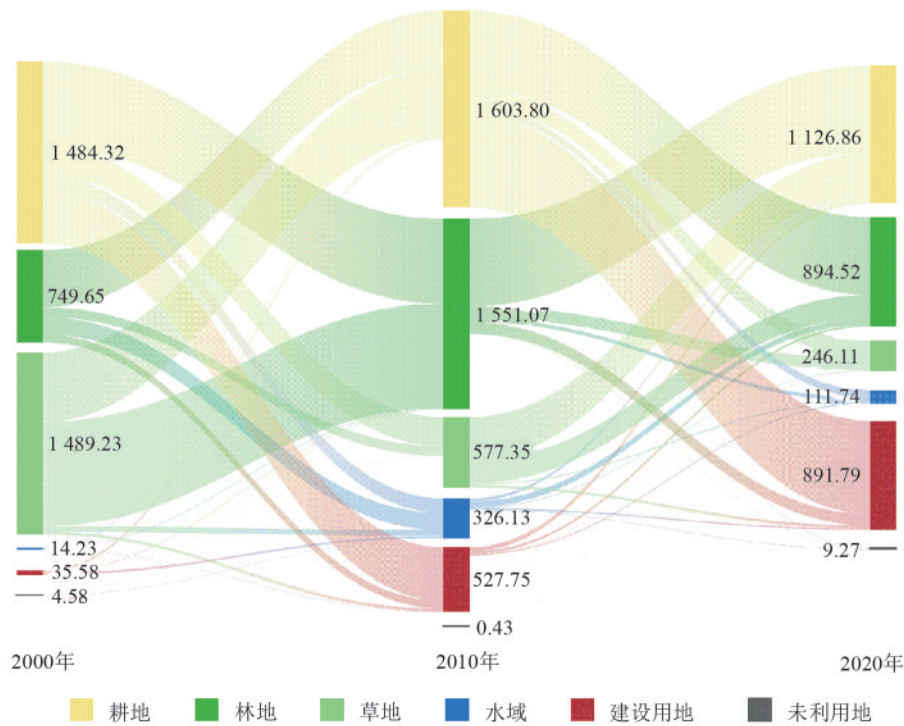


图 4 2000—2020 年土地利用转移桑基图

Fig. 4 Sankey diagram of land use transitions from 2000 to 2020

2.2 基于 PLUS 模型未来土地利用预测

2.2.1 PLUS 模型验证 为评估 PLUS 模型的模拟精度,本研究以 2015 年为基准年,结合地形、气候和社会经济等多维驱动因子,在自然发展情景下以既定的发展趋势与转移概率模拟得到 2020 年三峡库区

土地利用格局。通过与实际土地利用数据进行对比分析,结果与实际土地利用数据在空间分布上具有较高一致性(图 5)。精度验证表明,Kappa 系数达到 0.901 5,总体精度为 94.80%,证实该模型具有较高的模拟可靠性,适用于 2030 年土地利用变化预测研究。

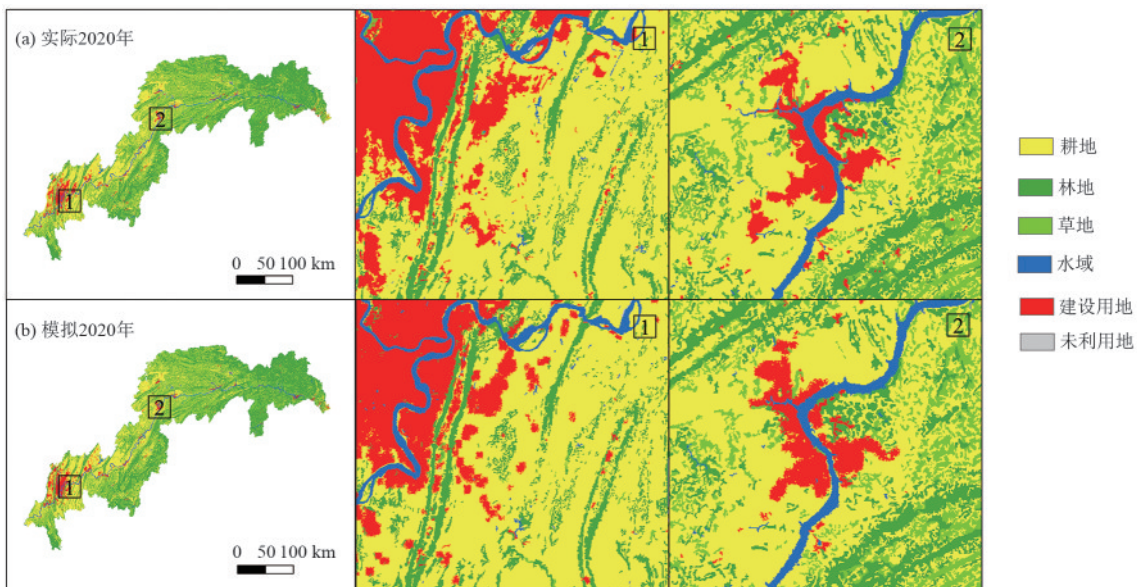


图 5 2020 年三峡库区土地利用模拟结果与实际对比

Fig. 5 Comparison between simulated results and actual land use in Three Gorges Reservoir Region in 2020

2.2.2 土地利用扩张驱动因素分析 土地利用变化受多因素驱动,本研究基于区域特征选取 12 个关键自然与社会驱动因子,其中,气候条件包括温度和降雨,

地形条件包括高程和坡度,土壤条件为土壤类型,经济社会条件包括 GDP、人口密度、距政府距离、距河流距离、距一级公路距离、距二级公路距离和距三级公路距

离。利用PLUS模型的LEAS模块分析各因子对地类扩张的贡献度(图6)。自然因子中,高程对未利用地扩张的贡献度最高,贡献度为0.442,其次是水域,贡献度为0.228;降雨量则显著影响林地和草地的扩张,贡献度分别为0.177和0.122。社会因子中,人口密度对建

设用地扩张的贡献最为突出,贡献度为0.162,GDP则主要驱动林地和草地变化,贡献度分别为0.122和0.177。值得注意的是,耕地与建设用地的空间扩张呈现出显著的高程和人口密度双重驱动特征,表明自然约束与人为干扰共同塑造土地利用演化格局。

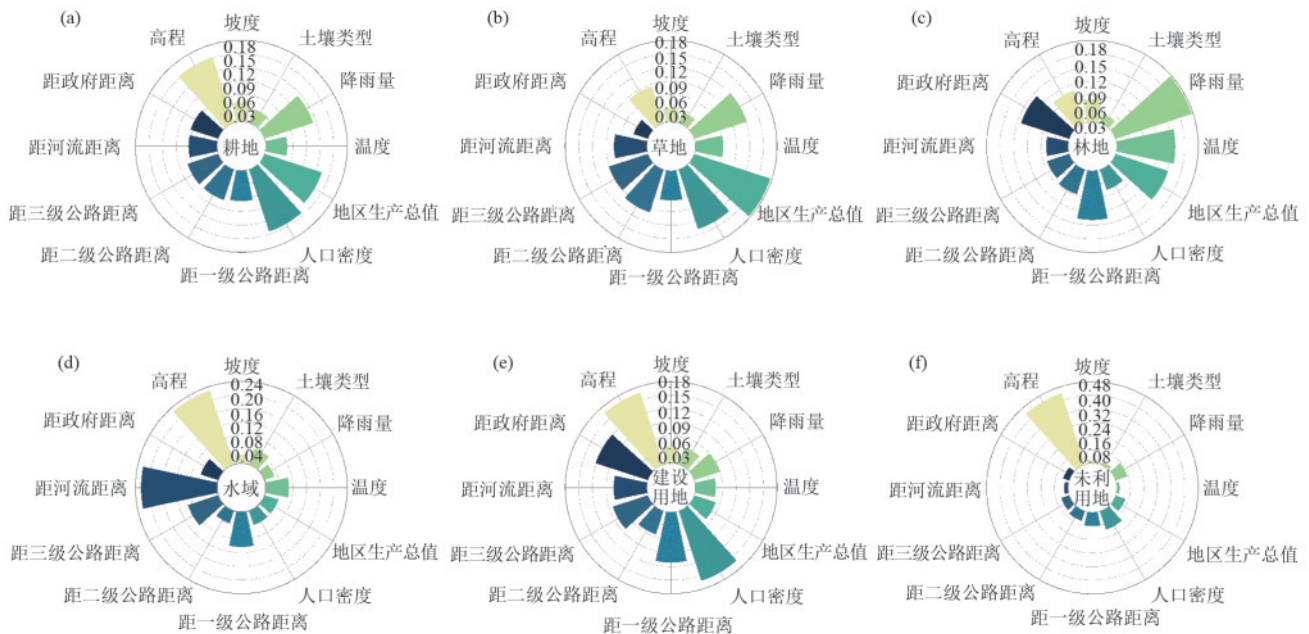


图6 土地利用扩张驱动因子贡献度

Fig. 6 Contribution degree of driving factors for land use expansion

2.2.3 2030年不同情景下三峡库区土地利用预测
2030年三峡库区土地利用格局呈现显著的情景分异特征(图7),且各情景下的土地利用面积变化存在明显差异(图8)。耕地在3种情景中均呈持续减少趋势,生态保护情景下减少最为显著,高达576.56 km²,城镇建设情景减少最少,仅433.51 km²。林地在自然和生态保护情景中分别增加32.70、464.64 km²,城镇

建设情景下减少43.7 km²。建设用地在3种情景下扩张最为显著,城镇建设情景增幅达895.62 km²,反映强开发驱动下城镇扩张对土地资源的占用。草地面积整体呈下降趋势,3种情景分别减少234.84、212.97、184.21 km²。情景横向对比表明,自然发展延续既有趋势,生态保护促进生态修复但耕地流失,城镇建设优先经济发展而忽视生态保护。

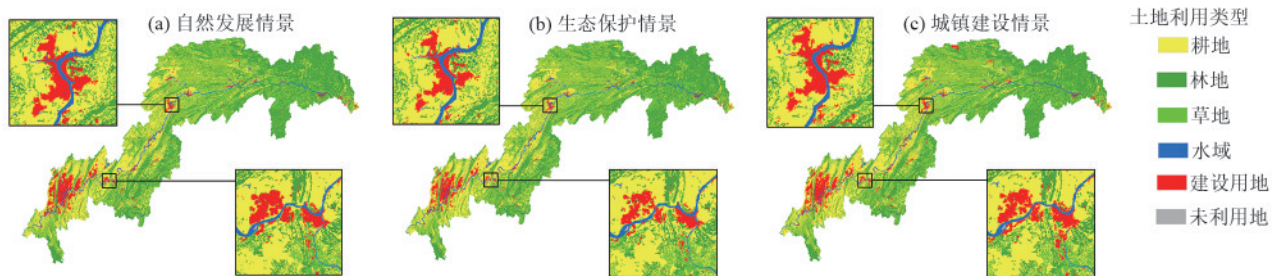


图7 三峡库区多情景预测下2030年土地利用空间格局

Fig. 7 Spatial pattern of land use in Three Gorges Reservoir Region in 2030 under multi-scenario prediction

2.3 2000—2020年三峡库区土壤侵蚀现状分析

2.3.1 InVEST SDR 模型验证 在土壤侵蚀评估中,InVEST模型的SDR模块因其理论严谨性被广泛采用。本研究通过对比已有研究^[17]成果验证模型精度(表4)。结果表明,2000—2010年,三峡库区土壤侵蚀模数从34.76 t/(hm²·a)降至24.73 t/(hm²·a),侵蚀总

量由1.978×10⁸t减少至1.423×10⁸t。与杨凯祥等^[17]的RUSLE模型计算结果相比,相对误差为2.24%~3.94%;土壤侵蚀面积从38 019 km²降至37 479 km²,变化趋势与刘婷等^[28]的研究结果基本一致。尽管不同研究在参数设置上存在差异导致计算结果略有出入,但均在合理误差范围内,证实了模型应用的有效性。

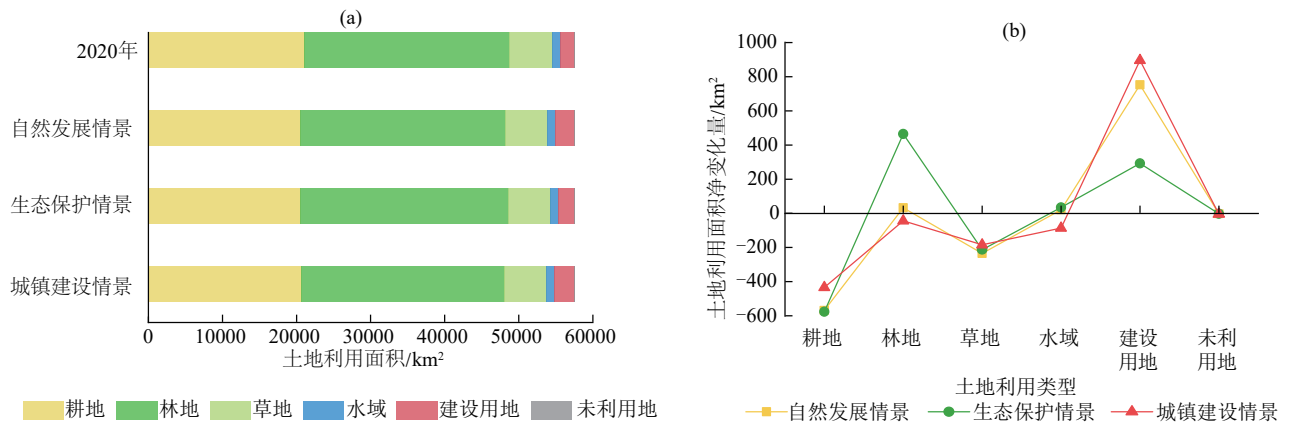


图 8 不同情景下土地利用面积和土地利用面积净变化

Fig. 8 Land use area and its net change under different scenarios

表 4 2000—2010 年平均土壤侵蚀模数和土壤侵蚀量

Table 4 Average soil erosion modulus and soil erosion amount from 2000 to 2010

土壤侵蚀特征指标	杨凯祥等 ^[17] 研究成果		本文模型结果		相对误差/%	
	2000年	2010年	2000年	2010年	2000年	2010年
平均土壤侵蚀模数/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	35.540	25.510	34.760	24.730	2.24	3.15
土壤侵蚀量/(10 ⁸ t)	2.056	1.478	1.978	1.423	3.94	3.87

2.3.2 2000—2020 年三峡库区土壤侵蚀时空演变
2000—2020 年三峡库区平均侵蚀模数呈现持续下降趋势,由 2000 年的 34.76 t/(hm²·a) 降至 2020 年的 20.70 t/(hm²·a),表明区域水土保持措施初见成效。土壤侵蚀强度自东向西递减,具有明显的空间分异性(图 9)。西部平缓地区以微度和轻度侵蚀为主,侵蚀模数普遍低于 25 t/(hm²·a);东部巫溪、奉节等高山峡谷区受地形陡峭和人类活动双重影响,强烈及以上侵蚀类型集中分布,局部区域侵蚀模数超过 30 t/(hm²·a)。同期土壤侵蚀等级结构发生显著变

化,微度和轻度侵蚀面积比例从 64.18% 增至 70.40%,而中度及以上侵蚀面积减少约 17.37%,反映出区域水土保持成效。不同土地利用类型的侵蚀特征差异显著(图 10),林地和未利用地因植被覆盖好、固土能力强,侵蚀模数低;耕地和草地则因植被稀疏、土壤易受扰动,侵蚀模数高,其作为主要侵蚀源地,尽管整体侵蚀模数呈下降趋势,但仍应作为未来治理重点。整体来看,土壤侵蚀减弱趋势不仅源于自然条件的稳定,也反映出生态工程和土地利用结构优化的持续作用。

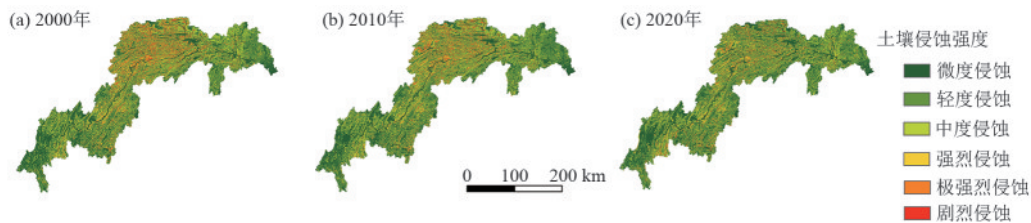


图 9 2000—2020 年三峡库区土壤侵蚀强度等级空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of soil erosion intensity levels in Three Gorges Reservoir Region from 2000 to 2020

2.4 2030 年不同情景下土壤侵蚀预测

基于 2030 年三峡库区多情景土地利用预测和 CMIP6 降水情景数据模拟结果(图 11),区域土壤侵蚀整体维持以中度及以下强度为主,高强度侵蚀主要集中于东部开州、云阳、奉节等地势陡峭、降水丰富且人类活动频繁的区域,呈现出典型的地貌与人为因子耦合驱动特征。不同地类侵蚀特征分析(图 12)表明,耕地、林地和草地的平均侵蚀模数超过 19 t/(hm²·a),显著高于水域、建设用地和未利用地。情景横向对比分析表明,自然发展情景下,除林地外各类用地侵蚀模数普遍上升,草地增幅高达 1.18 t/(hm²·a);生态保

护情景呈现耕地和林地侵蚀模数双降趋势;城镇建设情景则保持相对稳定。土壤侵蚀强度面积统计(图 13)显示,微度和轻度侵蚀占主导地位,面积占比随强度等级增加而递减。与 2020 年基准相比,自然发展情景下轻度侵蚀增幅高达 1 517.53 km²,生态保护情景有效抑制高强度侵蚀,而城镇建设情景各类侵蚀面积净变化量均控制在 400 km²以内。总体来看,生态保护情景的土壤侵蚀改善效果最为显著,高强度侵蚀明显减少,而自然发展和城镇建设情景的侵蚀变化趋势相近,因此,生态导向的发展模式最有利于区域水土资源可持续管理。

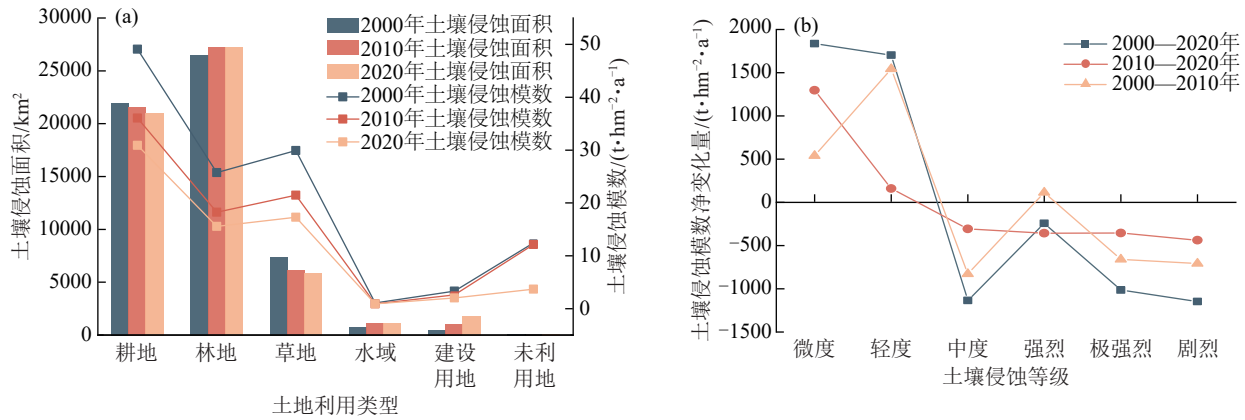


图 10 2000—2020年不同土地利用类型土壤侵蚀模数变化和土壤侵蚀模数净变化

Fig. 10 Changes and their net changes in soil erosion modulus for different land use types from 2000 to 2020

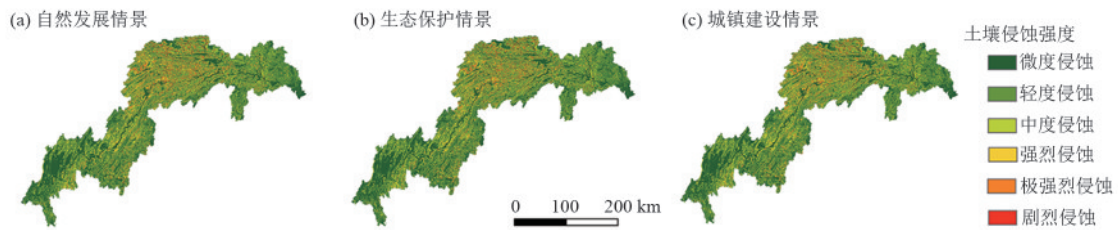


图 11 2030年三峡库区不同情景下土壤侵蚀强度等级空间分布

Fig.11 Spatial distribution of soil erosion intensity levels in Three Gorges Reservoir Region under different scenarios in 2030

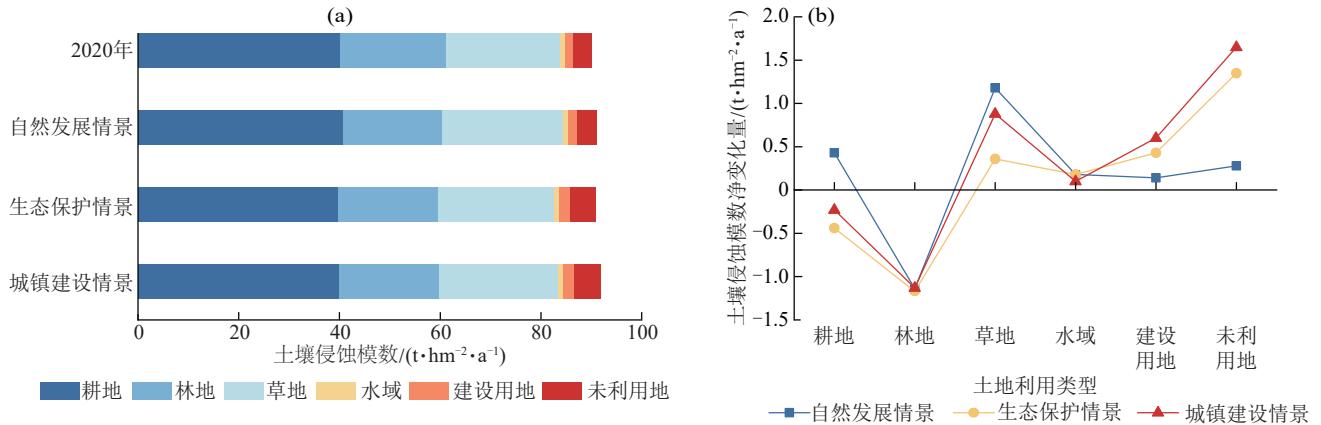


图 12 不同情景下各土地利用类型土壤侵蚀模数和土壤侵蚀模数净变化

Fig.12 Soil erosion modulus and its net changes of each land use type under different scenarios

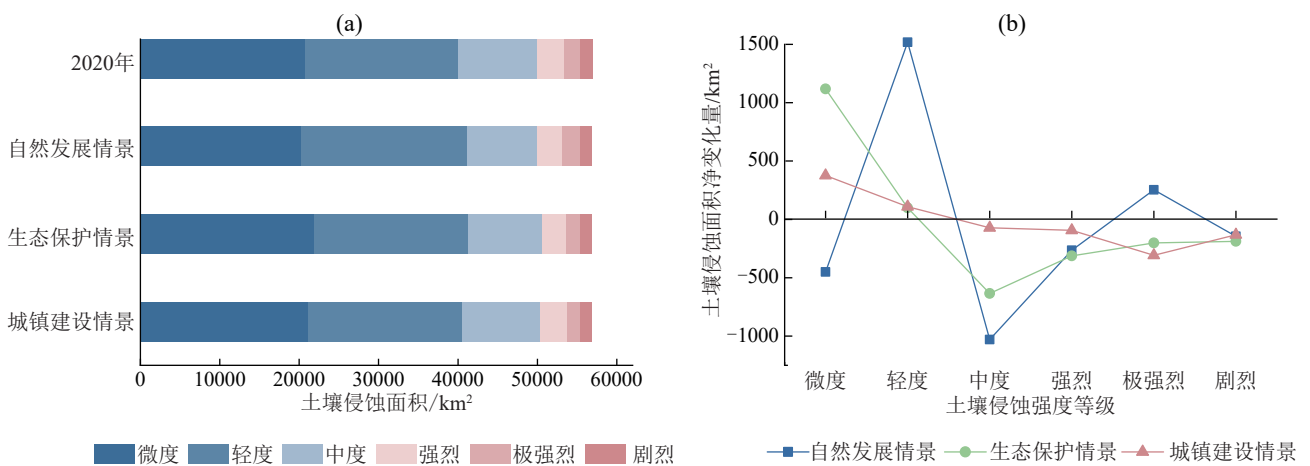


图 13 不同情景下土壤侵蚀等级面积和土壤侵蚀面积净变化

Fig.13 Areas of soil erosion levels and net changes in soil erosion area under different scenarios

3 讨论

3.1 模型集成方法的适用性

本研究构建了基于PLUS和InVEST SDR模型集成的土壤侵蚀预测框架,该方法通过耦合土地利用动态模拟与侵蚀过程评估,实现了对区域土壤侵蚀演变过程的系统模拟。与刘婷等^[28]基于BP神经网络的研究相比,尽管在模型算法和实现路径上存在差异,但2种方法均揭示三峡库区土壤侵蚀以微度和轻度为主的典型特征,特别是在自然发展与生态保护情景下呈现出高度一致的分布格局,这一结果验证了不同方法在宏观趋势预测上的一致性。在模拟精度层面,本研究较邓华等^[26]采用的CLUE-S模型用于模拟土地利用具有显著提升。PLUS模型通过引入基于随机森林的用地扩张分析策略,能够更准确地识别各类土地利用变化的驱动因子及其相对贡献率,有效捕捉土地利用的时空演变特征,从而显著提高模拟结果的准确性。这一改进为土壤侵蚀预测提供更可靠的土地利用变化数据支撑,特别是在处理复杂地形条件下的土地利用转换问题时表现出更好的适应性。通过设置自然发展、生态保护和城镇建设3种具有代表性的情景,本研究系统考察了不同发展路径下土壤侵蚀的响应机制。与刘婷等^[28]仅考虑自然增长与生态保护2种情景的研究相比,本研究的情景设置更加全面,能够更好地反映政策调控、经济发展和环境保护等多重因素的综合影响。模拟结果表明,科学的土地利用规划,特别是生态保护情景,通过优化植被覆盖结构和景观格局配置,能够有效降低区域土壤侵蚀风险。PLUS-InVEST模型的应用证实,该方法能够为区域尺度的土壤侵蚀预测和评估提供有效的技术支持,可作为区域土壤侵蚀预测的有效工具。

3.2 土地利用变化驱动下的土壤侵蚀响应

2000—2020年三峡库区不同土地利用类型的土壤侵蚀呈现显著空间异质性,这一现象主要源于不同土地利用类型植被覆盖度的差异性及其对侵蚀过程的调控作用。已有研究^[29]表明,植被通过冠层截留降雨、根系网络固持土壤及枯落物层保护地表等多重机制,能够有效减缓土壤侵蚀过程。本研究结果显示,耕地区域的土壤侵蚀模数最高,这一方面是由于耕作活动导致植被覆盖度降低,削弱水土保持功能;另一方面,频繁的耕作扰动破坏土壤结构稳定性,同时增加地表径流形成,从而加剧侵蚀过程^[7]。相比之下,草地区域的土壤侵蚀模数相对较低,但其侵蚀风险仍较为显著,主要归因于草本植物根系较浅且分布密度较低,在强降雨条件下固土能力相对

有限。尽管建设用地的植被覆盖度普遍较低,但其土壤侵蚀模数和侵蚀面积却维持在较低水平,主要得益于科学合理的工程选址及配套实施的生态建设措施(如重点区域植被恢复和坡面防护工程),这些措施有效控制了潜在的侵蚀风险^[30]。

本研究发现,2000—2020年三峡库区土壤侵蚀演变呈现明显的等级分异特征,表现为微度和轻度侵蚀模数显著增加,而中高强度侵蚀明显减弱。这一变化与同期土地利用转型特征密切相关,主要体现在耕地与林草地之间的双向转换过程。耕地转为林草地的生态恢复过程中植被覆盖度显著上升,区域水土保持功能相应增强,有效降低土壤侵蚀强度。然而,局部区域仍存在林草地逆向转为耕地的现象,特别是在坡度较大区域,地表抗蚀能力明显削弱,导致侵蚀风险加剧。快速城镇化进程中的建设用地扩张虽然直接减少侵蚀面积,但其对区域水文过程的扰动效应可能引发新的侵蚀风险。当前土壤侵蚀状况反映土地利用转型过程中生态保护与开发建设的双重影响,形成三峡库区特有的土壤侵蚀格局。为此,亟须构建科学的土地管理机制,重点强化生态敏感区保护,建立完善的灾害监测预警系统,将是实现区域可持续发展的重要途径。

3.3 局限性

本研究通过集成PLUS和InVEST SDR模型,系统模拟未来不同情景下三峡库区土地利用变化与土壤侵蚀变化。研究成果虽具有科学性,但仍存在一定局限性。基础数据如降雨和社会经济指标的空间分辨率不足可能影响模型精度,同时地形差异、区域经济发展、地质灾害等潜在因素未被充分纳入土壤侵蚀模拟考虑中。此外,CMIP6气候模式的有限选取可能对降水侵蚀力预测结果产生不确定性。未来研究可通过采用更高分辨率的遥感数据、优化空间插值方法、整合多气候模式对比分析及健全融合自然要素与社会经济因素的土壤侵蚀驱动机制等途径,进一步提升模型在复杂环境下的预测能力,为区域水土保持措施优化和可持续发展决策提供更加可靠的科学支撑。

4 结论

1)2000—2020年,三峡库区土地利用格局呈现显著变化。耕地和草地面积持续缩减,林地和建设用地显著扩张,反映出区域生态保护政策初显成效及城镇化进程持续推进。土地利用的主要转化路径为耕地与林地、草地的双向转换,凸显生态恢复与用地需求之间的动态博弈。

2)三峡库区土壤侵蚀整体呈减弱趋势,2000年、

2010年、2020年平均土壤侵蚀模数分别为34.76、24.73、20.70 t/(hm²·a),耕地仍为主要侵蚀地类,林地和草地侵蚀相对较轻。侵蚀等级以微度和轻度为主,空间分布呈东高西低,反映出土地利用类型及其变化对侵蚀格局具有重要影响。

3)2030年不同发展情景下土地利用格局存在明显差异。耕地面积持续减少,建设用地显著增加,生态保护情景下林地面积增长最为显著。PLUS模型模拟精度较高(Kappa系数0.9015,总体精度94.80%),验证未来土地格局预测的可靠性,为不同发展路径下的土壤侵蚀预测提供技术支持。

4)在未来情景下,三峡库区土壤侵蚀将进一步得到控制,生态保护情景下的改善效果最为显著,强度侵蚀面积减少,中高等级侵蚀向低等级转化趋势明显。耕地、林地与草地仍为关键土地类型,需重点管控。推动生态保护导向的空间规划,科学平衡生态保护与建设开发,是实现区域可持续发展的关键路径。

参考文献:

- [1] 何源,陈俞池,EHAB T A E,等.窟野河流域土壤侵蚀时空特征及趋势预测[J].水土保持学报,2024,38(5):10-19.
- HE Y, CHEN Y C, EHAB T A, et al. Spatio-temporal pattern and trend prediction of soil erosion in Kuye River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5):10-19.
- [2] LI N, ZHANG Y, WANG T W, et al. Have anthropogenic factors mitigated or intensified soil erosion over the past three decades in south China?[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 302: e114093.
- [3] DE VENETE J, POESEN J, VERSTRAETEN G, et al. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand?[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 127:16-29.
- [4] 赵金涛,马逸雪,石云,等.基于ANN-CA模型的黄土丘陵区县域土壤侵蚀演变预测[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(6):60-68.
- ZHAO J T, MA Y X, SHI Y, et al. Prediction of soil erosion evolution in counties in the loess hilly region based on ANN-CA model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(6):60-68.
- [5] 李明伟.基于LSTM模型预测不同水保工程措施条件下土壤侵蚀量:以辽西北地区为例[J].水土保持通报,2023,43(4):162-169.
- LI M W. Estimating soil erosion under different soil and water conservation engineering measures using LSTM model: A case study in northwest Liaoning Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4):162-169.
- [6] DA CUNHA E R, SANTOS C A G, DA SILVA R M, et al. Assessment of current and future land use/cover changes in soil erosion in the Rio da Prata basin (Brazil) [J]. Science of the Total Environment, 2022, 818: e151811.
- [7] 吴淑芳,张彪,石学瑾,等.FLUS-CSLE模型预测黄土高原典型流域不同土地利用变化情景土壤侵蚀[J].农业工程学报,2022,38(24):83-92.
- WU S F, ZHANG B, SHI X J, et al. Prediction of soil erosion under different land uses in the typical watershed of the Loess Plateau based on FLUS-CSLE model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(24):83-92.
- [8] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: e101569.
- [9] ZHOU M M, DENG J S, LIN Y, et al. Identifying the effects of land use change on sediment export: Integrating sediment source and sediment delivery in the Qiantang River basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 686:38-49.
- [10] 丁岳,王柳柱,桂峰,等.基于InVEST模型和PLUS模型的环杭州湾生态系统碳储量[J].环境科学,2023,44(6):3343-3352.
- DING Y, WANG L Z, GUI F, et al. Ecosystem carbon storage in Hangzhou Bay area based on InVEST and PLUS models [J]. Environmental Science, 2023, 44(6):3343-3352.
- [11] 冀泳帆,贾鲁净,杨联安,等.耦合InVEST-PLUS模型的榆林市生境质量时空演变及预测分析[J].水土保持学报,2023,37(1):123-132.
- JI Y F, JIA L J, YANG L A, et al. Spatio-temporal evolution and prediction analysis of habitat quality in Yulin City coupled with InVEST-PLUS model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1):123-132.
- [12] 周莘莘,罗艺,宋小燕,等.基于InVEST-PLUS模型的陕西省水源涵养量估算及预测[J].水土保持学报,2024,38(3):187-194.
- ZHOU P P, LUO Y, SONG X Y, et al. Estimation and prediction of water conservation capacity in Shaanxi Province based on the InVEST-PLUS model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):187-194.
- [13] 宋民欣,吕希恒,韩陈,等.三峡库区降雨特征和林草覆被格局对坡面水沙产出的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):82-90.
- SONG M X, LÜ X H, HAN C, et al. Impacts of rain-

- fall characteristics and vegetation cover patterns on slope runoff and sediment yields in the Three Gorges Reservoir area[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3):82-90.
- [14] 黄凯旋,刘扬,董晓健,等.基于土地利用变化的三峡库区(湖北段)土壤侵蚀消长研究[J].*水土保持研究*, 2020, 27(1):1-6.
HUANG K X, LIU Y, DONG X J, et al. Variation of soil erosion in Hubei section of Three Gorges Reservoir area based on land use change[J].*Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1):1-6.
- [15] 陈仕军,黄元章,谭定光,等.基于CA-Markov模型的巴东县土壤侵蚀预测及空间驱动力分析[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2025, 23(1):222-232.
CHEN S J, HUANG Y Z, TAN D G, et al. Prediction and spatial driving force analysis of soil erosion in Badong County based on CA-Markov model[J].*Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(1):222-232.
- [16] 林娜,潘鹏,王斌,等.基于Stacking集成学习的土壤侵蚀速率计算与主导因子分析:以三峡库区奉节县为例[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2023, 21(4):100-112.
LIN N, PAN P, WANG B, et al. Soil erosion rate calculation based on Stacking ensemble learning and leading factor analysis: A case study of Fengjie County in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(4):100-112.
- [17] 杨凯祥,刘强,李秀红,等.三峡库区土壤侵蚀和植被覆盖变化分析[J].*北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(5):631-638.
YANG K X, LIU Q, LI X H, et al. Analysis of soil erosion and fractional vegetation cover change in the Three Gorges Reservoir area[J].*Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, 57(5):631-638.
- [18] 陈雅如,肖文发,滕明君,等.三峡库区景观格局粒度效应及其对土地利用变化过程的响应[J].*自然资源学报*, 2018, 33(4):588-599.
CHEN Y R, XIAO W F, TENG M J, et al. Grain size effect of landscape pattern and its response to land use change in the Three Gorges Reservoir area[J].*Journal of Natural Resources*, 2018, 33(4):588-599.
- [19] 杨建和,肖莉,黄川雄,等.三峡库区腹地地形因子空间差异及其对CSLE模型结果的影响[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2025, 23(1):40-50.
YANG J H, XIAO L, HUANG C X, et al. Spatial difference of terrain factors in the hinterland of Three Gorges Reservoir area and its influence on the results of CSLE model[J].*Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(1):40-50.
- [20] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains agricultural handbook[M]. Washington D. C. : No1282, U. S. Department of Agriculture, 1965.
- [21] 吴昌广,曾毅,周志翔,等.三峡库区土壤可蚀性K值研究[J].*中国水土保持科学*, 2010, 8(3):8-12.
WU C G, ZENG Y, ZHOU Z X, et al. Soil erodibility K value in Three Gorges Reservoir area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(3):8-12.
- [22] 刘爱霞,王静,刘正军.三峡库区土壤侵蚀遥感定量监测:基于GIS和修正通用土壤流失方程的研究[J].*自然灾害学报*, 2009, 18(4):25-30.
LIU A X, WANG J, LIU Z J. Remote sensing quantitative monitoring of soil erosion in Three Gorges Reservoir area: A GIS/RUSLE-based research[J].*Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(4):25-30.
- [23] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].*水土保持学报*, 2000, 14(2):19-24.
CAI C F, DING S W, SHI Z H, et al. 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.
- [24] DESMET P J J, GOVERS G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(5):427-433.
- [25] TIAN L, TAO Y, FU W X, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(10):e2330.
- [26] 邓华,邵景安,王金亮,等.多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J].*地理学报*, 2016, 71(11):1979-1997.
DENG H, SHAO J A, WANG J L, et al. Land use driving forces and its future scenario simulation in the Three Gorges Reservoir area using CLUE-S model [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11):1979-1997.
- [27] 李宸昊,梁文钧,胡辉,等.中国地球气候系统模式在CMIP6中的影响力分析及CMIP7概况[J].*地球科学进展*, 2025, 40(2):155-168.
LI C H, LIANG W J, HU H, et al. Influence analysis of Chinese earth and climate system model in CMIP6 and overview of CMIP7 [J]. *Advances in Earth Science*, 2025, 40(2):155-168.
- [28] 刘婷,邵景安.基于BP神经网络的三峡库区土壤侵蚀强度模拟[J].*自然资源学报*, 2018, 33(4):669-683.
LIU T, SHAO J A. Simulation of soil erosion intensity in the Three Gorges Reservoir area using BP neural network [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(4):669-683.

(下转第126页)