

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.019

郭伟玲, 徐刘洋, 贾纪昂, 等. 耦合 PLUS-CSLE 模型预测淮河流域多情景土地利用变化与土壤侵蚀[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 234-243, 252.

GUO Weiling, XU Liuyang, JIA Jiang, et al. Predicting multi-scenario land use changes and soil erosion in the Huaihe River basin based on coupled PLUS-CSLE model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 234-243, 252.

耦合 PLUS-CSLE 模型预测淮河流域多情景 土地利用变化与土壤侵蚀

郭伟玲¹, 徐刘洋¹, 贾纪昂¹, 高畅¹, 夏小林^{2,3},
汪邦稳^{2,3}, 张靖雨^{2,3}, 陈磊^{2,3}, 陈应健^{2,3}

(1. 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 合肥 230088; 3. 安徽省水科学与智慧水利重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: [目的] 掌握淮河流域内土地利用和土壤侵蚀的未来时空演变对于土地资源的合理协调使用, 制定未来的水土保持策略, 以及推动可持续发展战略具有重要意义。[方法] 基于 PLUS 模型和中国土壤侵蚀模型(CSLE), 模拟 2030 年自然发展、生态保护、快速发展 3 种情景下淮河流域土地利用格局, 并预测未来流域在 3 种情景下的土壤侵蚀格局。[结果] (1) 在 3 种情景下, 建设用地扩张明显, 最大扩张面积为 187.80 km², 其他地类不同程度减少。(2) 流域 2015—2021 年土壤侵蚀强度呈下降—上升趋势, 其中平均土壤侵蚀量分别为 221.96, 214.13, 461.15 t/(km² · a), 高强度侵蚀多集中在东北高坡度地区, 需要重点关注。(3) 地理探测器表明, 坡度、DEM、土壤属性等是影响流域侵蚀分布的主要驱动因素。(4) 2030 年流域自然发展、快速发展、生态保护情景下土壤侵蚀模数分别为 295.48, 259.45, 127.64 t/(km² · a)。在适当扩张建设用地的生态保护模式下, 可实现生态保护和经济发展的双需求。[结论] 研究结果可为流域内土地利用管理和水土保持措施提供思路, 推动健康发展。

关键词: 土地利用/覆盖变化; 土壤侵蚀预测; PLUS 模型; CSLE 模型; 淮河流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0234-10

Predicting Multi-Scenario Land Use Changes and Soil Erosion in the Huaihe River Basin Based on Coupled PLUS-CSLE Model

GUO Weiling¹, XU Liuyang¹, JIA Jiang¹, GAO Chang¹, XIA Xiaolin^{2,3},
WANG Bangwen^{2,3}, ZHANG Jingyu^{2,3}, CHEN Lei^{2,3}, CHEN Yingjian^{2,3}

(1. School of Spatial Information and Surveying Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 230088, China;

3. Anhui Provincial Key Laboratory of Water Science and Intelligent Water Conservancy, Bengbu, Anhui 233000, China)

Abstract: [Objective] Understanding the future temporal and spatial evolution of land use and soil erosion in the Huaihe River Basin is of significant importance for rational and coordinated use of land resources, formulating future soil and water conservation strategies, and promoting sustainable development strategies. [Methods] Based on the PLUS model and the Chinese Soil Loss Equation (CSLE), the land use patterns in the Huaihe River Basin under three scenarios—natural development, ecological protection, and rapid development—for the year 2030 were simulated, and the future soil erosion patterns in the basin under these three scenarios were predicted. [Results] (1) Under all three scenarios, there was a significant expansion of construction land, with a maximum expansion area of 187.80 km², while other land types decreased to varying degrees. (2) The soil erosion intensity in the basin from 2015 to 2021 showed a downward-then-

收稿日期: 2024-06-29

修回日期: 2024-07-27

录用日期: 2024-08-08

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-11-26

资助项目: 安徽省自然科学基金联合项目(2208085US21); 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院青年科技创新计划项目(KY202201, KY202304); 国家自然科学基金项目(42377341)

第一作者: 郭伟玲(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事 GIS 与 RS 在水土保持中的应用研究。E-mail: wlguo28@aust.edu.cn

通信作者: 郭伟玲(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事 GIS 与 RS 在水土保持中的应用研究。E-mail: wlguo28@aust.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

upward trend. The average soil erosion amounts were 221.96, 214.13 and 461.15 t/(km² · a), respectively. High-intensity erosion was mostly concentrated in the northeastern high-slope areas, which require special attention. (3) Geographic detectors indicate that slope, DEM, and soil properties were the main driving factors influencing the distribution of erosion in the basin. (4) In 2030, the soil erosion modulus under natural development, rapid development, and ecological protection scenarios were 295.48, 259.45 and 127.64 t/(km² · a), respectively. An ecological protection model with appropriate expansion of construction land can meet both ecological protection and economic development demands. [Conclusion] This study can provide insights for land use management and soil conservation measures within the basin and promote healthy development.

Keywords: land use/cover change; soil erosion prediction; PLUS Model; CSLE Model; Huaihe River Basin

Received: 2024-06-29

Revised: 2024-07-27

Accepted: 2024-08-08

Online(www.cnki.net): 2024-11-26

土壤侵蚀是指由自然现象中的风力、水力、重力而引发的一个过程,通过剥蚀、运输、沉积等使地表的土壤、岩石或其他物质发生迁移的一个自然过程^[1]。随着人类的活动,土壤侵蚀的速率显著加快。根据联合国粮农组织(FAO)和国际土壤研究中心(ISRIC)共同发布的《全球土壤信息系统:2023 年全球土壤健康报告》指出,土壤侵蚀是全球土壤健康的主要威胁之一,目前全球约有 35% 的土壤受到中度到严重的侵蚀^[2]。为了推动全球土壤健康的改善、保护全球粮食安全及推动可持续发展,对土壤侵蚀的评估与预测成为学术界亟须解决的重要科学问题。

土地利用/覆盖变化(LUCC)是影响土壤侵蚀的一个重要驱动力。土地利用通过改变植被覆盖度、土地管理、地形和局部气候等多方式改变土壤侵蚀速率^[3]。已有研究^[4]表明,不合理的土地开发破坏原有地表植被,使土壤疏松,导致严重的水土流失。气候因素对土壤侵蚀也有显著影响,降雨作为土壤侵蚀的主要驱动力,其降雨量、强度、频率都影响土壤侵蚀的程度。有研究^[5]表明,降雨导致土壤退化,是造成土壤侵蚀的世界多个地区土地资源退化的最主要形式。因此,探究土地利用变化、气候变化与土壤侵蚀之间的关系、过程、模式等,有利于提高土地资源利用性和减少水土流失等具有重要意义。

随着技术发展,土壤侵蚀预报模型成为土壤侵蚀评估的重要工具。中国土壤侵蚀模型(CSLE)通过分析大量的小区规格资料,提出了符合中国实际情况的水土保持措施因子:耕作措施因子(*T*)、工程措施因子(*E*)、生物措施因子(*B*),该模型经过修正符合中国各个地区使用^[6]。目前,基于土壤侵蚀模型的研究主要集中在预测和评估土壤侵蚀的空间布局和影响,以及制定和评估防止或减少土壤侵蚀的策略。而无论是基于经验模型还是物理模型,这些研究通常根据流域内当前和过往数据进行评估,无法准确预测未来侵蚀状况。故当前许多学者开展未来土壤侵蚀研究。

ZARE 等^[7]基于 RUSLE 模型和马尔可夫模型评估了伊朗 1981—2011 年土壤侵蚀分布,并预测了 2030 年未来侵蚀;ASLAM 等^[8]采用 RUSLE 和 Markov chain 预估了 2030 年和 2040 年不同情景下吉德拉尔的土壤侵蚀。这些方法是根据已知数据直接预测未来侵蚀的方法,缺乏对土壤侵蚀复杂变化内在机理的解释。PLUS 模型是基于斑块尺度上模拟土地利用变化,优于传统的 CA-Markov 模型,能够探究土地利用变化的驱动力。石晶等^[9]运用 PLUS-InVEST 模型模拟预测 2035 年酒泉市 4 种情景下的碳储量的时空演变特征,并探究碳储量空间分异驱动力;童海燕等^[10]基于多目标规划和 PLUS 模型模拟未来不同情景下黄河中上游未来土地格局,并提出经济和生态下最优土地使用结构。虽然 PLUS 模拟和土壤侵蚀模型在各个领域得到广泛应用,但将二者结合使用以预测未来土壤侵蚀的研究仍较为罕见。

本研究的目的是通过在不同情景下的流域发展,提出一个土壤侵蚀预测框架。采用 PLUS 模型预测模拟不同情景下土地利用变化,基于中国土壤侵蚀模型(CSLE),并进一步结合 CMIP6 中不同情景气候数据,预测模型中 *R* (降雨侵蚀力因子)、*B*、*E*、*T* 侵蚀因子,从而实现对未来淮河流域不同情景下土壤侵蚀的预测。主要目标为:(1)探究不同情景下 2030 年淮河流域土地利用格局变化;(2)分析 2015—2021 年淮河流域土壤侵蚀时空分布,确定主导土壤侵蚀变化的控制因素;(3)揭示 2030 年淮河流域不同情景下土壤侵蚀空间格局分布。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮河流域(32°25′—33°30′N, 115°87′—118°29′E)位于淮北平原和江淮丘陵范围内,是中国的第三大河流(图 1),流域面积为 25 824.30 km²,总人口约 1 193 万人。淮河流域地势平坦,地势高度由西北向

东南倾斜,平均海拔 29 m。地形主要以平原为主,包括丘陵、丹霞地貌等地形特征。气候属于亚热带季风气候,夏季炎热湿润,冬季寒冷干燥。年降水量较大,多集中在夏季和初秋。淮河流域地区土地肥沃,水资源丰富,是中国重要的农业区域之一,农作物主要有水稻、小麦、玉米、棉花等。流域内土地利用以耕地和水域为主,建设用地主要集中在沿流域方向。

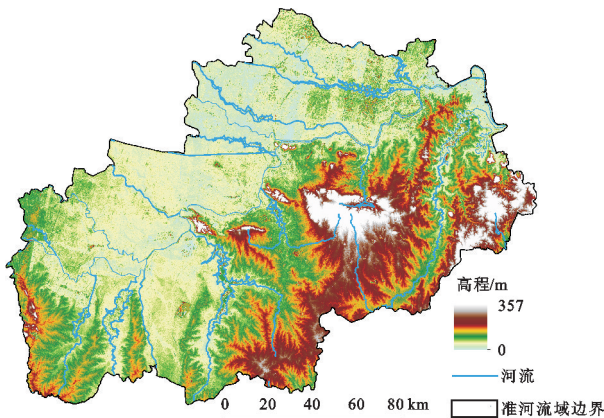


图 1 淮河流域地势

Fig.1 Overview of the Huaihe River Basin

1.2 数据来源

本研究采用数据有土地利用、自然环境和社会经济数据。土地利用数据来源于武汉大学遥感信息处理研究所 (<http://irsip.whu.edu.cn/>),选取 2015—2021 年土地利用数据,将其重分类为耕地、林地、草地、水域和建筑区域共 5 类;基于 Landsat 5—8 系列 30 m 分辨率数据 (<https://www.usgs.gov/>) 分别提取计算 2015—2021 年淮河流域内植被覆盖度情况;由国家气象数据中心(<https://data.cma.cn/>)获取淮河流域月降雨数据,以计算 2015—2021 年降雨侵蚀力;土壤类型数据来源于世界土壤数据库(HWSD),重新采样插值为 30 m 分辨率;DEM 数据来源于 ASTGTM GDEM 30 m 分辨率数据 (<http://gdem.ersdac.jpacesystems.or.jp/>),并基于此数据计算坡度;交通道路河流数据通过 OMS(<https://www.openstreetmap.org/>)提取,后由欧式距离分析获得;GDP、夜光遥感等其他数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。将所有数据统一输出为 30 m×30 m 分辨率,采用 GCS_WGS_1984 地理坐标系。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 PLUS 模型预测未来土地利用 本研究采用 PLUS 模型预测淮河流域 2030 年不同情景土地利用分布情况,该模型是一种基于多类型随机斑块种子的斑块生成土地利用模拟模型^[11],是在 FLUS 模型的基础上的一种改进的 CA 模型,模型集成了土地扩张分析策略(LEAS)和多类型随机种子(CARS),

可计算出各驱动因子对土地利用变化的贡献度,目前已广泛使用于全球土地模拟变化^[12]。

(1)领域权重

多类随机斑块种子的 CA 模型是基于土地利用的多类型随机种子的补丁生成机制,其中的领域权重参数设置反映不同土地类型向其他地类转移的强度,参数值为 0~1,数值越大,则表示该地类在因子影响下的土地扩张能力越强。本研究权重设置由往期土地利用数据进行计算,计算公式为:

$$X_i = \frac{TA_i - TA_{min}}{TA_{max} - TA_{min}} \tag{1}$$

式中: X_i 为第 i 类地类的领域权重参数,数值为 0~1; TA_i 为研究区间内土地利用类型的变化面积; TA_{max} 、 TA_{min} 分别为研究区间土地利用类型变化量的最大值、最小值。领域权重计算见表 1。

表 1 领域因子参数

Table 1 Domain factor parameters

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地
2015—2018	1.000 0	0.100 0	0.100 0	0.320 2	0.792 5
2018—2021	0.100 0	0.179 2	0.100 0	0.768 8	1.000 0

(2)情景设置

为探究不同情景下淮河流域土地利用情况,根据前人^[13]研究方法,设置自然发展、生态保护和经济发展 3 种情景模式。自然发展情景是在无政策干预的情况下,按照自然规律进行的发展过程,主要考虑自然环境的变化;生态保护情景强调生态优先和可持续发展的理念,尽量减少对生态环境破坏,维持生态系统稳定,即林地、草地不转移为其他用地;经济发展模式主要考虑经济效益最大化,以各种方式如农业发展、工业设立和房地产开发等,提高土地的经济价值,即建设用地不向其他地类转移。根据各情景模式设置,土地利用转移矩阵见表 2。

1.3.2 CMIP6 CMIP6 为第六次耦合模型比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6),是由世界气候研究计划(World Climate Research Programmer)下的工作组发起的一个全球气候模型比较项目,目的是通过比较和评估各种气候模型的性能,以提高对气候系统的理解和预测能力^[14]。本研究使用 CMIP6 中所设定的情景模式预测未来降雨数据,选取 EC_Earth、GFDL—ESM4 和 MRI—ESM2—0 3 种模式,采用 IPCC 最新发布 SSP 情景(SSP119、SSP245、SSP585),其中 3 种情景模式分别对应自然发展、生态保护和经济发展土地利用发展情景。

1.3.3 CSLE 模型 中国土壤侵蚀模型(CSLE)是刘宝元等^[15]基于美国土壤保护服务开发的通用土壤流

失方程而提出,该模型充分考虑中国水土流失情况和水土保持措施,将水土保持措施(P)按中国实际更改为生物措施因子(B)、工程措施因子(E)和耕作措施因子(T),其更符合中国当前土壤侵蚀评价的模型,目前已广泛应用于中国各个地区的农业评价和水土保持状况。CSLE 模型计算公式为:

$$A=R\times L\times S\times K\times B\times E\times T$$

(2)

式中: A 为土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})]$; K 为土壤可侵蚀因子 $[(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})]$; L 为坡长因子; S 为坡度因子; B 为生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕地措施因子。

表 2 不同情景模式下转移矩阵设置

Table 2 Transfer matrix settings for different scenarios

土地利用类型	自然发展(ND)					生态保护(EP)					经济发展(RD)				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
b	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
c	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
d	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0
e	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

注:a、b、c、d、e 分别表示耕地、林地、草地、水域、建筑区域;其中 1 表示允许转换,0 表示不允许转换;矩阵内行表示转出,列表示转入。

(1)降雨侵蚀力因子(R)

降雨而引起土壤侵蚀的潜在影响,是降雨对土壤剥蚀和搬运的一种指标,由降雨的雨强和动能来评估计算,本研究采用周伏建等^[16]建立的降雨侵蚀力模型,计算公式为:

$$R=\sum_{i=1}^{12}0.179P_i^{1.5527}$$

(3)

式中: R 为年降雨侵蚀力 $[(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})]$; P_i 为月降雨量(mm)。

(2)地形因子(LS)

地形因子包含坡度坡长因子,表示土壤侵蚀受地形影响的程度,在侵蚀中起着决定性因素,一般随坡度增加而增加^[17]。本研究采用 MC COOL 等^[18]的缓坡公式和 LIU 等^[19]陡坡公式计算坡度因子(S),采用 DWIGHT 等^[20]提出的经验公式计算坡长因子(L)。计算公式为:

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03 & \theta<5^{\circ} \\ 16.8\sin\theta-0.50 & 5^{\circ}\leq\theta<10^{\circ} \\ 21.9\sin\theta-0.96 & \theta\geq10^{\circ}\end{cases}$$

(4)

$$L=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad m=\begin{cases}0.2 & \theta\leq1^{\circ} \\ 0.3 & 1^{\circ}<\theta\leq3^{\circ} \\ 0.4 & 3^{\circ}<\theta\leq5^{\circ} \\ 0.5 & \theta>5^{\circ}\end{cases}$$

(5)

式中: L 为坡长因子; S 为坡度因子; θ 为坡度值($^{\circ}$); λ 为坡长(m); m 为坡长指数。

(3)土壤可侵蚀因子(K)

土壤可侵蚀因子广泛应用于各侵蚀模型中,其表示降雨产生径流对土壤冲刷而造成的侵蚀,表征土壤受到侵蚀的难易程度。本研究采用 WILLIAMS^[21]在 EPIC 模型中的计算方法。计算公式为:

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256SA\left(1-\frac{SI}{100}\right)\right]\right\}\times\left(\frac{SI}{CL+SI}\right)^{0.3}\times\left[1.0-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right]\times\left[1.0-\frac{0.7SAN}{SAI+\exp(-5.51+22.9SAN)}\right]$$

(6)

式中: K 为土壤可侵蚀因子 $[(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})]$; CL 为砂粒含量($\%$); SA 为粉粒含量($\%$); SI 为黏粒含量($\%$); C 为土壤有机碳含量($\%$); $SAI=1-SA/100$ 。

(4)水土保持措施因子(BET)

水土保持措施因子是结合中国水土保持环境,将 USLE 模型中的作物和水土保持因子划分为生物措施因子、工程措施因子和耕地措施因子,该因子表示水土保持对土壤侵蚀的抑制作用,取值 0~1,数值越大,则表示水土保持措施越好^[22]。

生物措施因子是指在一定条件下耕作地上的土壤流失量与同等环境下的裸地上土壤流失量之比^[23],一般为 0~1,果园、其他果园、有林地及其他林地的 SLR_i 计算公式为:

$$SLR_i=0.44468\times e^{(-3.20096\times GD)}-0.04099\times e^{(FVC-FVC\times GD)}+0.025$$

(7)

草地 SLR_i 计算公式:

$$SLR_i=\frac{1}{1.25+0.78845\times1.05968^{100\times FVC}}$$

(8)

式中: FVC 是基于 NDVI 数据由参数修正计算得出,取值为 0~1; GD 为乔木林的林下覆盖度,按实际及经验取值,取值为 0~1。

工程措施因子是指在通过改变小地形(如坡改梯田、平整土地等),增加降雨入渗,合理开发和利用水

资源,减少土壤侵蚀等措施而进行估算^[24]。本研究基于土地利用数据和地形数据,依据淮河流域耕作习惯,将耕地划分为土坎水平梯田和石坎水平梯田,耕地坡度 $<5^{\circ}$ 取值 0.084,坡度 $>5^{\circ}$ 取值 0.102 5,其他地类赋值为 1。

耕作措施因子是指采取某种耕作措施的土壤流失量与相同条件下未采取任何耕作措施土壤流失量之比。依据前人研究结果及结合当地耕作情况,将耕地赋值为 0.372,林地和草地赋值为 1,其他地类赋值为 0。整体研究框架见图 2。

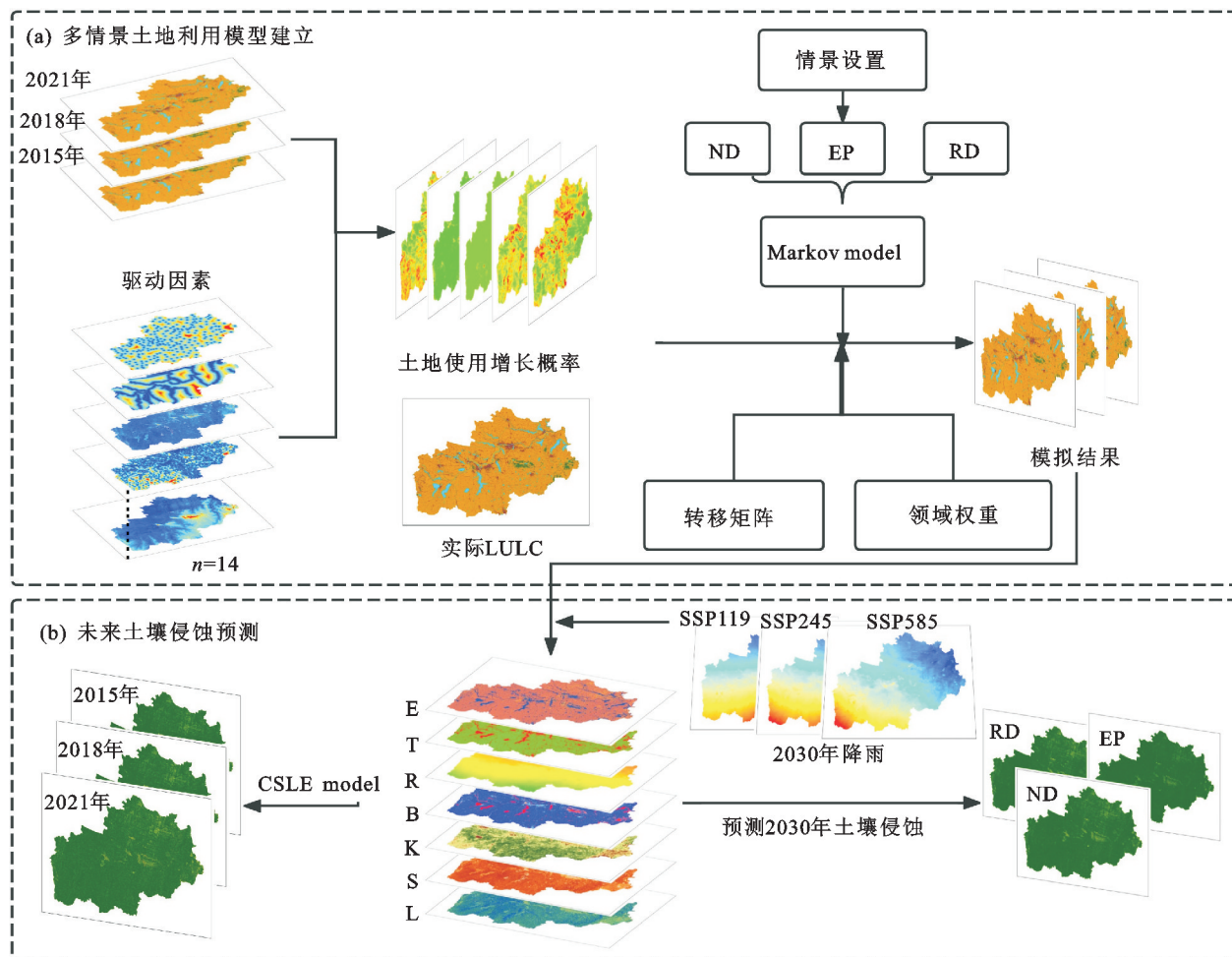


图 2 研究框架

Fig.2 Research framework

2 结果与分析

2.1 3 种模式下降雨对比

根据第六次国际耦合模式比较计划提出了基于不同社会共享经济路径(SSP)新的预估情景,选取 SSP119、SSP245 和 SSP585 3 种不同排放情景,3 种情景分别对应低社会脆弱性与低排放水平、中等社会脆弱性与中等排放、高排放带来的高缓解但低适应挑战,其中 2021 年预测的月平均降雨量分别为 62.68, 93.82,94.95 mm。由图 3 可知,不同情景下 2021 年模拟月降雨总体变化趋势相似,均呈上升—下降趋势,与实际降雨趋势相似。以 SSP119 情景下降雨峰值最高,SSP585 情景最低,总体下年平均降雨与观测值相差 100~300 mm。综合来看,CMIP6 模拟预测降雨数据与淮河流域实际符合,可作为较可靠数据进行使用。

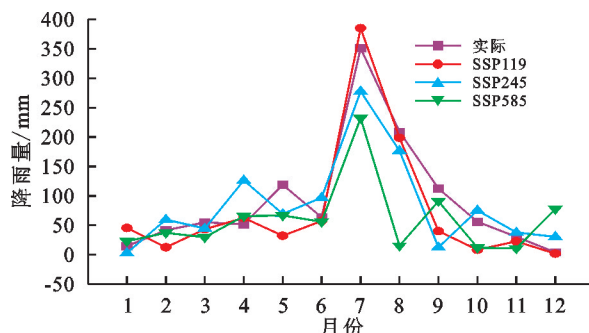


图 3 2021 年 3 种情景降雨对比

Fig.3 Comparison of rainfall for three scenarios in 2021

2.2 基于 PLUS 模型未来土地利用预测

2.2.1 PLUS 模型精度验证 为验证模型精度,本研究以 2015 年土地利用数据为基准,选取坡度、高程、河流、降雨、道路、GDP 等 14 种自然环境和经济社会因素,计算各类土地利用扩张概率图。在 2015 年土

地利用的基础上模拟 2021 年土地利用,并将模拟结果与 2021 年实际土地利用数据进行精度验证。结果显示,2021 年模拟土地利用 Kappa 系数和整体精度分别为 0.82,92.74%。统计 2021 年实际土地利用和模拟栅格数,计算各类用地模拟准确度(表 3)。各类用地模拟准确度均在 80%以上,其中草地模拟准确度较低,仅为 43.53%。这种偏差可能由于草地在所占总体面积较小且分散所致。综上所述,PLUS 模型整体模拟精度较为可靠。

2.2.2 2030 年不同情景下土地利用变化预测 通过

邻域权重和转移矩阵的设置,以 2021 年淮河流域土地利用数据为基础,预测 2030 年自然发展、生态保护和快速发展 3 个情景下未来土地利用(图 4)。

表 3 2021 年实际土地利用栅格数与模拟栅格数对比

Table 3 Actual land use rasters vs modeled rasters in 2021

指标	耕地	林地	草地	水域	建筑区域
2021 年实际	22 423 140	532 604	6 558	1 888 768	3 852 933
2021 年模拟	22 284 345	553 078	9 876	2 000 568	3 856 333
模拟正确数	21 435 221	467 337	2 855	1 671 391	3 044 969
准确度/%	95.59	87.74	43.53	88.49	79.03

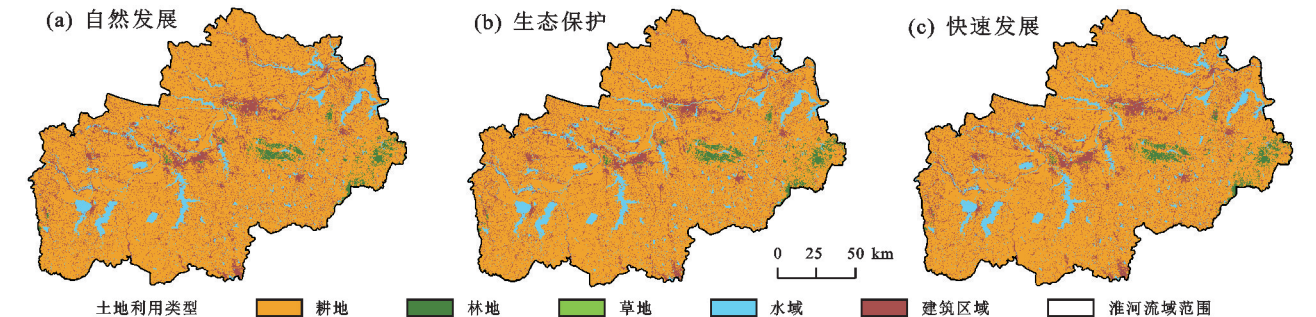


图 4 2030 年淮河流域不同情景下土地利用模拟

Fig.4 Simulation of land use under different scenarios in the Huaihe River Basin in 2030

由表 4 可知,不同情景下土地利用变化明显。自然发展情景下,耕地面积为 20 205.97 km²,与 2021 年相比,增加 0.12%,林地、草地和水域面积不同程度减少,以草地减少幅度最大,建筑区域面积增长最大,增长范围从原有聚集处向周边扩张;生态保护情景下,各类用地面积以小幅度变化,林地和水域面积分别减少 0.347 4,0.518 4 km²,草地面

积增长 1.92%,在生态保护限制下,建设用地较其他 2 种模式下,发展受到限制,表明该情景下,一定程度上保护了生态用地的安全;快速发展情景下,以建筑区域面积发展为主,增长幅度达 5.42%,耕地面积小幅度增长,其他地类不同程度减少,生态用地遭严重破坏,在该情景下,以经济建设为主,忽视对自然环境保护。

表 4 2030 年各情景模式土地利用类型变化

Table 4 Changes in land use types by Scenario Model in 2030

土地利用 类型	面积/km ²			2021 年 面积现状/km ²	变化率/%		
	自然发展	生态保护	快速发展		自然发展	生态保护	快速发展
耕地	20 205.97	20 181.73	20 206.00	20 180.93	0.12	0.01	0.12
林地	457.14	479.00	439.76	479.43	−4.63	−0.07	−8.26
草地	4.05	6.02	4.53	5.90	−31.44	1.92	−23.24
水域	1 528.29	1 699.37	1 528.18	1 699.92	−10.09	−0.03	−10.10
建筑区域	3 638.47	3 467.80	3 655.44	3 467.74	4.93	0.01	5.42

2.3 淮河流域侵蚀分析

2.3.1 2015—2021 年土壤侵蚀现状 由各个侵蚀因子栅格代数运算得 2015—2021 年淮河流域土壤侵蚀分布(图 5),根据中国水利部发布《土壤侵蚀分类分级标准》^[25],将计算的土壤侵蚀模数划分为 5 个等级。2015 年淮河流域总侵蚀量为 573.20×10⁴t/a,土壤侵蚀模数为 221.96 t/(km²·a);2018 年总侵蚀量为 552.98×10⁴t/a,土壤侵蚀模数为 214.13 t/(km²·a);2021 年总侵蚀量为 1 190.89×10⁴t/a,土壤侵蚀模数为 461.15 t/(km²·a),均属于轻度侵蚀。

从侵蚀强度上看,淮河流域 2015—2021 年土壤

侵蚀强度以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,占总面积 95%以上,中度及以上侵蚀强度所占比例较小。其中,微度侵蚀面积随时间增长而减少,轻度侵蚀强度面积增多,中度及以上侵蚀强度面积呈减少后增长趋势。从侵蚀分布上看,3 个年份侵蚀主要分布在淮河流域分水岭的两侧,多集中分布在东北方,侵蚀强度较高的集中在丘陵山脉及周边地势较高处。2018 年淮河流域土壤侵蚀分布较为集中,其次为 2015 年,以 2021 年侵蚀分布最为广泛,占据流域大部分面积。

由图 6 可知,2015—2021 年土壤侵蚀强度转移中,主要以微度侵蚀和轻度侵蚀转移为主,其中,微度

侵蚀向轻度侵蚀转出 138.82 km²,轻度侵蚀向微度侵蚀转入 119.06 km²,其他侵蚀强度转移不明显。而在 2018—2021 年土壤侵蚀转移中,各侵蚀强度转移显著,微度侵蚀向其他侵蚀强度转出最大,占总转

出的 71.61%,表明总体侵蚀等级由低强度向高强度转移,土壤侵蚀加剧。整体上看,2015—2021 年淮河流域土壤侵蚀呈下降—上升的趋势,在未来需要控制水土流失,采取积极措施。

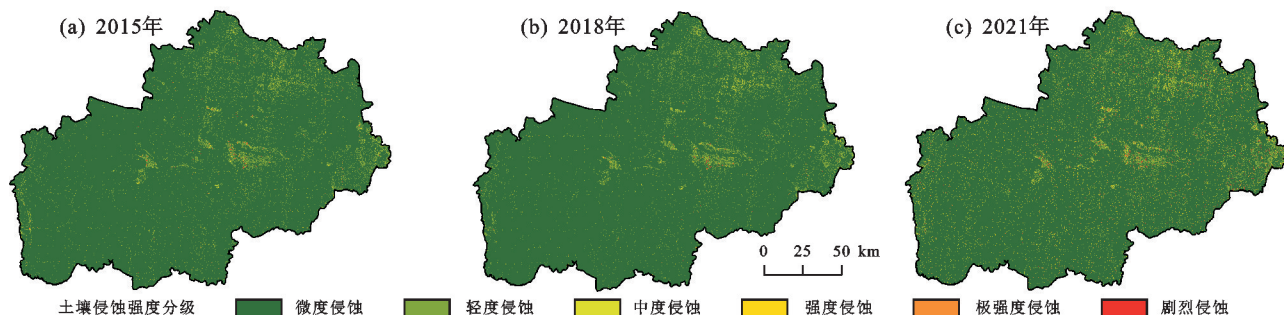


图 5 淮河流域 2015—2021 年土壤侵蚀分布

Fig.5 Distribution of soil erosion in the Huaihe River Basin from 2015 to 2021

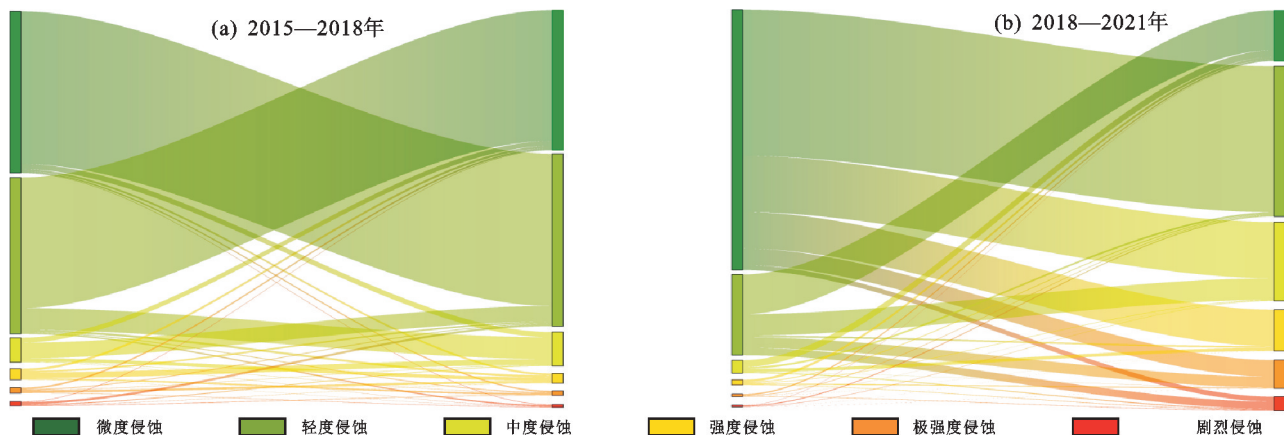


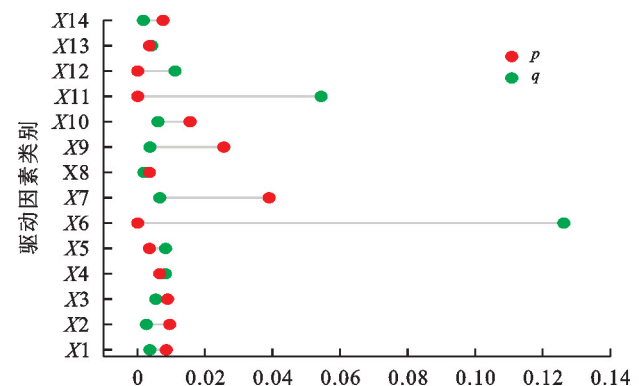
图 6 淮河流域 2015—2021 年土壤侵蚀转移矩阵

Fig.6 Soil erosion transfer matrix for the Huaihe River Basin, 2015—2021

2.3.2 土壤侵蚀驱动力分析 通过选择 2021 年土壤侵蚀空间分布,并结合淮河流域内自然环境和社会经济因素,选取 14 个潜在影响因子,分别为距一级道路距离(X1)、GDP(X2)、距河流距离(X3)、年平均降雨(X4)、距三级道路距离(X5)、坡度(X6)、距高速公路距离(X7)、城市夜光遥感(X8)、距二级道路距离(X9)、距乡镇距离(X10)、DEM(X11)、土壤属性(X12)、距城市距离(X13)、距铁路距离(X14),输入至地理探测器^[26]进行驱动因子和交互因子分析。

由图 7 可知,单因子结果下坡度、DEM、土壤属性和距三级道路是影响淮河流域土壤侵蚀的主要驱动因素。具体来说,不同坡度的大小所带来的重力势能不同,坡度越大,对于土壤和水的拉力越大,从而导致土壤侵蚀的风险增加,反之亦然。而不同 DEM 提供地形等复杂特征信息,如沟壑、山脊、平原等,还揭示水流路径,表示为易侵蚀地区。土壤属性影响土地利用类型的分布,尤其是耕地的布局分布,不同的土壤属性的土壤质地、结构、湿度等对土壤侵蚀有较大影响。距道路的距离反映人类活动对土地利用空间分化的影响,导

致土壤结构破坏,降低土壤的抗侵蚀能力。



注:q 为驱动力;p 为差异性,p 值越小,即某类型量 X 对因变量 Y 是有影响这一推断的可靠性越高。

图 7 淮河流域土壤侵蚀驱动力

Fig.7 Soil erosion drivers in the Huaihe River Basin

由图 8 可知,各个因子之间均存在增强效应,其中以坡度和 DEM 与其他因子存在线性增强效果强于其他因子,且二者交互作用最显著,这显示单因子作用下解释力低的因子,在与其他因子共同作用效果更强。

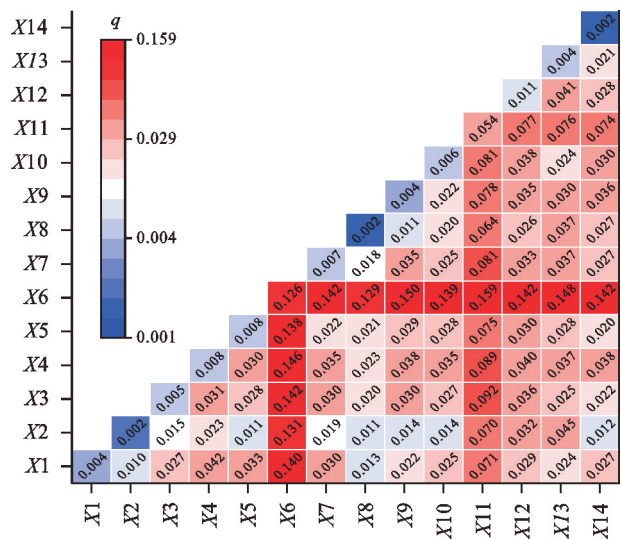


图 8 土壤侵蚀驱动因素的交互式检测值

Fig.8 Interactive detection values for soil erosion drivers

2.3.3 未来不同情景土壤侵蚀预测 以 2021 年淮河流域土地利用数据为基础,通过设置不同情景模式预测 2030 年土地利用,并计算流域内水土保持措施因子(BET)。其中,植被覆盖度数据采用 2015—2021 年多年平均值,根据 CMIP6 预测的 2030 年的 SSP119、SSP245、SSP585 3 种情景模式下的降雨数据计算淮河流域不同情景下降雨侵蚀力因子(R)。

保持土壤可侵蚀因子(K)和地形因子(LS)不变,结合所有因子数据计算未来淮河流域 2030 年 3 种情景下土壤侵蚀。由图 9 可知,2030 年,淮河流域自然发展、生态保护、快速发展的土壤侵蚀模数分别为 295.48,127.64,259.45 t/(km²·a),其侵蚀量由大到小依次为自然发展、快速发展、生态保护。

统计 2030 年 3 种情景下淮河流域不同等级侵蚀。由图 9 和表 5 可知,在 3 种情景下,淮河流域以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,微度侵蚀中,自然发展、生态保护、快速发展分别占 92.22%,97.26%,92.70%。较 2021 年,自然发展情景下,微度侵蚀面积增加1.98%,轻度至强度侵蚀面积减少 1.45%,极强度侵蚀以上减少 0.55%;生态保护情景下,微度侵蚀面积增加 7.02%,轻度至中度侵蚀面积减少 5.57%;快速发展情景下,微度侵蚀面积增加为 2.46%,轻度至强度侵蚀面积减少为 1.78%,极强度侵蚀以上减少 0.10%。自然发展与快速发展情景相比,微度侵蚀面积减少0.47%,强度及以上侵蚀面积增加 0.28%;生态保护与快速发展情景相比,微度侵蚀面积增加 4.57%,轻度至强度侵蚀减少 4.51%。综合分析,生态保护情景下侵蚀强度由高强度向低强度转移最为显著,土壤侵蚀得到有效控制,快速发展和自然发展情景侵蚀情况变化相似,但快速发展略微好于自然发展。

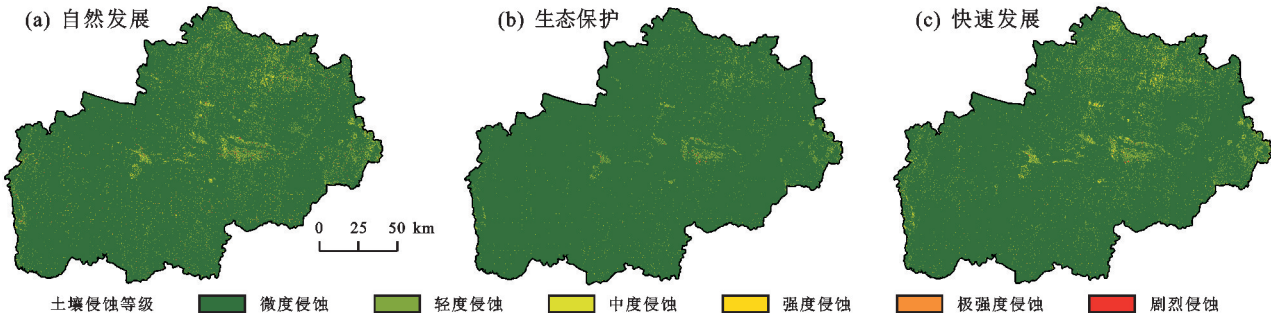


图 9 2030 年淮河流域不同情景下土壤侵蚀分布

Fig.9 Distribution of soil erosion under different scenarios in the Huaihe River Basin in 2030

表 5 淮河流域不同年份土壤侵蚀面积

Table 5 Area of soil erosion in the Huaihe River Basin in different years							km ²
分级	2015 年	2018 年	2021 年	2030 年			
				自然发展	生态发展	快速发展	
微度侵蚀	24 282.53	24 264.04	23 300.16	23 812.19	25 112.95	23 934.05	
轻度侵蚀	1 375.95	1 390.65	1 709.81	1 667.87	653.13	1 649.05	
中度侵蚀	104.22	113.00	415.96	211.26	34.60	180.24	
强度侵蚀	30.15	28.91	194.70	66.30	9.10	30.94	
极强度侵蚀	15.66	14.92	133.49	41.62	5.20	16.11	
剧烈侵蚀	14.17	12.78	70.30	20.44	4.43	8.93	

3 讨论

3.1 土壤侵蚀变化分析

2015—2021 年淮河流域不同地类之间造成的土壤侵蚀存在显著差异,造成其中的一个重要原因是植

被覆盖度的差异。流域内较低的植被覆盖率和经济建设活动导致森林或草地转变为农田或建设用地,原有的植被遭受破坏,从而导致土壤暴露在雨水和风中,增加土壤侵蚀风险^[27]。植被能够有效地减少降

雨和风力对土壤的侵蚀,例如,植被的叶子和树枝可以减少雨滴的冲击力,从而减少土壤侵蚀的可能性,植被的根系可稳固土壤,而枯枝败叶则能够保护地表并增加土壤中的孔隙度^[28]。淮河流域沿河快速的城市化进程和农业耕作导致径流增加、土壤对水吸收减少以及原有土壤结构的破坏,致该地类的土壤侵蚀模数较大^[29]。

土壤类型的差异对侵蚀的抵抗力也不同,如黏土质土壤比沙质土壤的颗粒更小、更紧密,故更能够抵抗水侵蚀。地形对土壤侵蚀的影响非常显著,流域南部山脉的坡度大小影响水流的速度,从而增加对土壤的冲刷力;坡向的南北差异导致阳光照射时间不同,使干燥的一面更易受到风蚀。因此,土壤侵蚀是由植被覆盖度、地物类型、地形和人类活动等综合因素共同作用的结果。

3.2 未来侵蚀预测分析

基于中国土壤侵蚀模型(CSLE)和 PLUS 模型的结合,在 CMIP6 提供气候数据支持下,保持侵蚀因子中 L 、 S 、 K 因子不变,预测淮河流域不同情景下 2030 年土壤侵蚀,可知在生态保护下土壤侵蚀最小,自然发展与快速发展下侵蚀并未有较大的差距。进一步分析 3 种情景下侵蚀因子 R 、 B 、 E 、 T ,在设定情景中,降雨随情景造成的压迫下随之升高,相应增强降雨侵蚀力; B 、 E 、 T 因子是流域内土壤侵蚀对土地利用变化响应,在不同情景下土地利用变化趋势不同,自然发展和快速发展下,在牺牲生态用地的前提下,建设用地和耕作用地扩张,从而增加土壤侵蚀风险。生态保护情景下,以保障生态安全为主,抑制社会经济发展,进而减少土壤侵蚀。

从以往研究得知,不同的土地利用类型中的地貌特征、植被覆盖度及水土保持措施都存在显著差异,从而影响地表径流和土壤侵蚀^[30]。目前人类活动的增强,对土地利用的空间格局产生影响,从而改变土壤侵蚀的空间分布,对未来水土保持和生态建设带来挑战,并且需要进一步关注气候变化的影响,同时增强对土地利用模式和人类活动变化的科学预测,为未来的水土保持工作和生态建设工作提供更有效的策略和解决方案。PLUS—CSLE 模型能够高效、快速地对流域未来土壤侵蚀状况进行预测和评价,是可作为未来土壤侵蚀预测和评估的重要工具。

3.3 局限性

本研究耦合 CSLE-PLUS 模型预测淮河流域未来土壤侵蚀,探究不同情景下土壤侵蚀变化。研究选取的土地利用预测驱动因子具有区域代表性,但忽视

经济因素和生态保护的影响;其次研究采用的 CMIP6 降雨数据只选中其中的 3 种模式的集合平均,而各个模式之间的存在不同差异,故对研究精度产生一定影响,需采用多种模式综合分析对比,以增加预测的精度和可靠性;最后,未来的研究应当考虑结合更多的气候数据、区域未来设计规划及土地利用的综合因素,以进行土壤侵蚀研究,这种方法能够在预测的同时,也为政策制定者提供对土壤侵蚀等相关因素的管理和控制提供建议。

4 结论

(1)2030 年淮河流域土地利用中,3 种情景地类变化差异明显,生态保护情景最符合持续发展方向。

(2)土壤侵蚀方面,从 2015 年—2021 年,淮河流域土壤侵蚀呈减少—上升趋势,侵蚀主要以微度和轻度侵蚀为主,并集中在流域两侧;影响淮河流域土壤侵蚀因素为坡度、DEM、土壤类型等自然因素,后续需对其相应特征进行相关水土保持措施。

(3)2030 年淮河流域自然发展、生态保护和快速发展情景土壤侵蚀模数分别为 295.48,127.64,259.45 $t/(km^2 \cdot a)$,自然发展和快速发展情景土壤侵蚀相差不大,生态保护情景下土壤侵蚀得到有效控制。未来发展中可采取更为积极的生态保护情景发展模式,建设用地扩张的同时兼顾生态和经济发展需要。

参考文献:

- [1] 王景萍,张学霞,古丽米热·甫拉提,等.黑龙江省冻融侵蚀强度分级评价及空间分布特征[J].农业工程学报,2024,40(5):168-176.
WANG J P, ZHANG X X, GULIMIRE · F, et al. Classification evaluation and spatial distribution characteristics of freeze-thaw erosion intensity in Heilongjiang Province of China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2024,40(5):168-176.
- [2] 张转敏,王彬,饶伟,等.初始含水率和降雨能量对黑土团聚体溅蚀特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):68-75.
ZHANG Z M, WANG B, RAO W, et al. Impact of initial soil moisture and rainfall energy on splash erosion characteristics of black soil aggregate[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):68-75.
- [3] 柳清.基于景观生态服务过程的济南市生态空间结构研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
LIU Q. Study on ecological spatial structure of Jinan City based on landscape ecological service process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2021.
- [4] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地

- 貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.
- WANG H, GAO J B, HOU W J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas:Based on the geographical detector method[J].Acta Geographica Sinica, 2018,73(9):1674-1686.
- [5] 赵筱青,石小倩,李驭豪,等.滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J].地理学报,2022,77(3):736-756.
- ZHAO X Q, SHI X Q, LI Y H, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(3):736-756.
- [6] 程琳,杨勤科,谢红霞,等.基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J].水土保持学报,2009,23(5):61-66.
- CHENG L, YANG Q K, XIE H X, et al. GIS and CSLE based quantitative assessment of soil erosion in Shaanxi, China[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(5):61-66.
- [7] ZARE M, PANAGOPOULOS T, LOURES L. Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran[J].Land Use Policy, 2017,67:558-572.
- [8] ASLAM B, KHALIL U, SALEEM M, et al. Effect of multiple climate change scenarios and predicted land-cover on soil erosion: A way forward for the better land management[J].Environmental Monitoring and Assessment, 2021,193(11):e754.
- [9] 石晶,石培基,王梓洋,等.基于 PLUS-InVEST 模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测[J].环境科学, 2024,45(1):300-313.
- SHI J, SHI P J, WANG Z Y, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of carbon storage in Jiuquan City ecosystem based on PLUS-InVEST model[J].Environmental Science, 2024,45(1):300-313.
- [10] 童海燕,董晓,刘加平,等.黄河中上游区土地使用结构与布局复合优化[J].农业工程学报,2024,40(9):252-262.
- TONG H Y, DONG X, LIU J P, et al. Composite optimization of land use structure and layout in the middle and upper reaches of the Yellow River[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(9): 252-262.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李安林,周艳,唐丽毅,等.怒江州土地利用模拟及生态系统服务价值评估:基于 PLUS 模型的多情景分析[J].中国农业资源与区划,2023,44(1):140-149.
- LI A L, ZHOU Y, TANG L Y, et al. Land use simulation and ecosystem services values evaluation in Nujiang Prefecture—a multiple-scenario analysis based on Plus Model[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(1):140-149.
- [14] 何朝飞,骆成彦,陈伏龙,等.基于 CMIP6 多模式的和田河流域未来气候变化预估[J].地学前缘,2023,30(3):515-528.
- HE C F, LUO C Y, CHEN F L, et al. CMIP6 multi-model prediction of future climate change in the Hotan River Basin[J].Earth Science Frontiers, 2023, 30(3): 515-528.
- [15] 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 B Y, XIE Y, ZHANG K L. Soil Erosion Prediction Model[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2001.
- [16] 周伏建,陈明华,林福兴,等.福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J].水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- ZHOU F J, CHEN M H, LIN F X, et al. The rainfall erosivity index in Fujian Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995,9(1):13-18.
- [17] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等.基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J].水土保持通报,2010,30(2):203-206.
- YANG Q K, GUO W L, ZHANG H M, et al. Method of extracting LS factor at watershed scale based on DEM [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2):203-206.
- [18] MC COOL D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transaction of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30(5):13387-13396.
- [19] LIU B Y, NEARING M A, RISSE L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J].Transactions of the ASAE, 1994,37(6):1835-1840.

- LI T, LIU K, HU S, et al. Soil erosion and ecological benefits evaluation of Qinling Mountains based on the InVEST model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(9): 1242-1250.
- [20] 王毅, 张晓美, 周宁芳, 等. 1990—2019 年全球气象水文灾害演变特征[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(4): 496-506.
- WANG Y, ZHANG X M, ZHOU N F, et al. Evolution characteristics of global meteorological and hydrological disasters from 1990 to 2019[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(4): 496-506.
- [21] JOHNSON J W. A heuristic method for estimating the relative weight of predictor variables in multiple regression[J]. *Multivariate Behavioral Research*, 2000, 35(1): 1-19.
- [22] LIANG J, LI S, LI X D, et al. Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESs) based on land use change in a typical agricultural watershed, Southern China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 279(12): e123851.
- [23] 窦攀峰, 左舒翟, 任引, 等. 气候和土地利用/覆被变化对宁波地区生态系统产水服务的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(7): 2398-2409.
- DOU P F, ZUO S Z, REN Y, et al. The impacts of climate and land use/land cover changes on water yield service in Ningbo region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(7): 2398-2409.
- [24] 段琪彩, 吴灏, 王杰, 等. 滇中城市水源地水源涵养能力研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 312-315.
- DUAN Q C, WU H, WANG J, et al. Study on the water conservation capacity of urban catchment areas in central Yunnan[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(5): 312-315.
- [25] FU B J, WANG S, SU C H, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- (上接第 243 页)
- [20] DWIGHT D, SMITH W H W. Factors affecting sheet and rill erosion[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1957, 38(6): 889-896.
- [21] WILLIAMS J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation. [J]. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 1990, 4(4): 206-207.
- [22] 李嘉麟, 陈家慧, 华丽, 等. 基于 CSLE 的湖北省土壤侵蚀时空变化特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 43-52.
- LI J L, CHEN J H, HUA L, et al. Spatial and temporal characteristics of soil erosion in Hubei Province based on CSLE[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 43-52.
- [23] 杨建和, 严冬春, 文安邦. 金沙江流域近十年地表变化与土壤侵蚀时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 13-20.
- YANG J H, YAN D C, WEN A B. Spatiotemporal variation characteristics of surface change and soil erosion in Jinsha River Basin in the past decade[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 13-20.
- [24] 管礼松, 郭伟玲, 李鑫, 等. 2000—2018 年皖南山区土壤侵蚀时空变化[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2): 114-121.
- GUAN L S, GUO W L, LI X, et al. Spatio-temporal changes of soil erosion in mountainous area of southern Anhui Province from 2000 to 2018[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2): 114-121.
- [25] 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 & Power Press, 2008.
- [26] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [27] TAN Z L, LEUNG L R, LI H Y, et al. Representing global soil erosion and sediment flux in earth system models[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2022, 14(1): e2021MS002756.
- [28] THANGAVEL P, ANJUM N A, MUTHUKUMAR T, et al. Arbuscular mycorrhizae: Natural modulators of plant-nutrient relation and growth in stressful environments[J]. *Archives of Microbiology*, 2022, 204(5): e264.
- [29] YUAN X F, HAN J C, SHAO Y J, et al. Geodetection analysis of the driving forces and mechanisms of erosion in the hilly-gully region of northern Shaanxi Province[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(5): 779-790.
- [30] 史书汇, 王晓云, 李发文. 淮河流域皖西大别山区地形因子与水系结构关联性分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 117-126.
- SHI S H, WANG X Y, LI F W. Analysis of correlation between watershed topographic factors and river system structure in Dabie Mountains in western Anhui Province of the Huaihe River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 117-126.