

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.028

何源,陈俞池,TALAT Ahmed Ehab,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 Yuan, CHEN Yuchi, TALAT Ahmed Ehab, 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.

窟野河流域土壤侵蚀时空特征及趋势预测

何源¹, 陈俞池¹, TALAT Ahmed Ehab¹, 王健¹, 赵广举², 姜泰³

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.南京水利科学研究院,
南京 210000;3.韩城市水土保持工作站,陕西 韩城 714000)

摘要: [目的] 窟野河流域是黄河中游粗沙区的主要侵蚀策源地。阐明窟野河流域土壤侵蚀时空变化特征,预测流域土壤侵蚀发展趋势,为流域未来水土流失综合治理提供决策支持。[方法] 基于窟野河流域 2010—2020 年多源数据,刻画流域土壤侵蚀空间分布,结合土壤侵蚀强度动态度、信息熵、综合指数和转移矩阵等定量指标,分析土壤侵蚀强度变化特征;构建 CA-Markov 模型,预测流域 2025 年土壤侵蚀状况。[结果] (1)研究区土壤侵蚀以微度、轻度侵蚀为主,面积占比超过 70%,较强度侵蚀主要分布于流域中下游和支流牯牛川区域。2010—2020 年,平均土壤侵蚀量由 1 955.56 t/(km²·a)降至 892.98 t/(km²·a),微度侵蚀面积大幅增加,其他侵蚀等级面积相应减少,大部分区域土壤侵蚀强度不变或下降,仅有不到 3% 的区域侵蚀强度加剧。(2)窟野河流域土壤剧烈、极强度、强度侵蚀的动态度变化较大,土壤侵蚀强度信息熵由 1.29 稳定下降至 0.81,土壤侵蚀强度综合指数由 178.96 降低至 76.61,且前 5 年下降幅度更高,流域土壤侵蚀强度朝减弱方向转化,主要发生在邻近两侵蚀强度等级之间。(3)CA-Markov 模拟显示,预计到 2025 年,流域土壤侵蚀状况将进一步改善,微度侵蚀占比超 75%。[结论] 2010—2020 年间,研究区土壤侵蚀状况持续好转,后 5 年水土流失治理效率更高,2025 年流域土壤侵蚀状况将进一步改善。

关键词: 土壤侵蚀; CA-Markov 模型; 动态分析; 窟野河

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0010-10

Spatio-temporal Pattern and Trend Prediction of Soil Erosion in Kuye River Basin

HE Yuan¹, CHEN Yuchi¹, TALAT Ahmed Ehab¹, WANG Jian¹, ZHAO Guangju², JIANG Tai³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210000, China; 3. Hancheng District Soil and
Water Conservation Workstation, Hancheng, Shaanxi 714000, China)

Abstract: [Objective] Kuye River Basin is the main source of erosion in the coarse sand area in the middle reaches of the Yellow River. The study is aimed at elucidating the spatio-temporal pattern of soil erosion, predicting the development trend of soil erosion in Kuye River Basin and providing decision support for the comprehensive control of soil erosion in the future. [Methods] Based on the multi-source data from 2010 to 2020, the spatial distribution of soil erosion in the Kuye River Basin was studied, and the characteristics of soil erosion intensity change were analyzed by using quantitative indicators such as dynamic degree of soil erosion intensity, information entropy of soil erosion intensity, comprehensive index of soil erosion intensity and transfer matrix. The CA-Markov model was established to predict the soil erosion in 2025. [Results] (1) The soil erosion intensity in the study area was mainly in micro and mild erosion, accounting for more than 70% of the total area, and stronger erosion was mainly distributed in the middle and lower reaches of the basin and tributary Beiniuchuan. From 2010 to 2020, the average soil erosion decreased from 1 955.56 t/(km²·a) to 892.98 t/(km²·a), the area of micro erosion increased significantly, and the area of other erosion intensity

收稿日期: 2024-05-13

修回日期: 2024-06-29

录用日期: 2024-07-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-09

资助项目: 内蒙古自治区科技兴蒙行动专项(KJXM-EEDS-2020005-01); “十四五”国家重点研发计划子项目(2022YFF130080105)

第一作者: 何源(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 1035292089@qq.com

通信作者: 王健(1973—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wangjian@nwsuaf.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

decreased correspondingly. The soil erosion intensity remained unchanged or decreased in most regions, and only less than 3% of the regions experienced increased erosion intensity. (2) The dynamic degree of intensity, extreme intensity and extreme erosion in Kuye River Basin changed greatly, the information entropy of soil erosion intensity decreased steadily from 1.29 to 0.81, the comprehensive index of soil erosion intensity decreased from 178.96 to 76.61 and the decline rate was higher in the first five years, and the change of soil erosion intensity in the basin to the weakening direction mainly occurred between the two adjacent erosion intensity levels. (3) CA-Markov model simulation shows that, it is expected that by 2025, the soil erosion situation in the basin will be further improved, with the proportion of micro erosion accounted more than 75%. [Conclusion] From 2010 to 2020, the soil erosion situation in the study area continued to improve, and the control efficiency of soil erosion in the next five years was higher, and the soil erosion situation in the basin would be further improved in 2025.

Keywords: soil erosion; CA-Markov model; dynamic analysis; Kuye River Basin

Received: 2024-05-13

Revised: 2024-06-29

Accepted: 2024-07-15

Online(www.cnki.net): 2024-09-09

土壤侵蚀是在各种外营力的作用下,土壤物质被剥离、迁移和沉积的过程,是全球主要生态环境问题之一。根据《2022 年中国水土保持公报》^[1]显示,我国共有 $265.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ 土地存在土壤侵蚀现象,约占我国陆地面积的 27.59%。黄河流域中游黄土高原生态系统脆弱,是我国土壤侵蚀最为严重的地区,是黄河泥沙的重要策源地^[2]。其中,窟野河流域是土壤侵蚀最为剧烈的地区,也是黄河粗泥沙的主要来源^[3],严重的水土流失不仅造成土地生产力降低,而且威胁着流域农业生产,且因汇聚泥沙和污染物对生态系统和社会经济发展造成严重影响^[4-5]。因此,开展窟野河流域土壤侵蚀特征分析及动态模拟,对深入认识土壤侵蚀机理、预测流域土壤侵蚀发展趋势、优化水土保持措施配置等具有重要的理论和现实意义。

近年来,国内外学者对土壤侵蚀的时空变化特征开展了大量研究,张卓佩等^[6]基于 RUSLE 模型揭示黄河中游多沙粗沙区 2000—2020 年土壤水蚀时空演变特征发现,土地利用/覆盖格局改变驱动土壤水蚀空间分布主导因子的动态变化;田昌园等^[7]研究近 30 年来大别山区土壤侵蚀时空变化及其与景观格局关系。然而,多数研究主要关注过去时空变化,对未来状况预测较为缺乏,限制对长期土壤侵蚀治理策略的制定和优化。CA-Markov 模型结合 Markov 链在时间维度上的分析优势和 CA 模型在空间维度上的分析能力,引入空间邻域单元及可能的空间分布变化,赋予 Markov 链空间预测的能力^[8-9],被证明是一种可行且实用的预测方法,广泛应用于预测水文过程^[10]、植被演替^[11]及土地利用格局^[12]等地理过程。虽然部分国外学者采用 CA-Markov 模型进行土壤侵蚀研究,如 GETACHEW 等^[13]将 CA-Markov 预测的土地利用状况代入 RUSLE 模型,预测塔纳湖未来

土壤流失状况,判断流域侵蚀风险热点地区;MOKARRAM 等^[14]采用主成分分析法,确定影响土壤侵蚀的干旱关键指标,随后利用 CA-Markov 模型对 2040 年伊朗西南部的土壤侵蚀和干旱条件进行预测。但前人利用 CA-Markov 模型对土壤侵蚀的预测往往基于单一指标,如土地利用^[13]、干旱状况^[14]等,未能全面考虑各种因素的综合作用,导致预测结果的不确定性。本研究结合 RUSLE 模型和 CA-Markov 模型的优势,综合考虑降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形、植被覆盖措施、水土保持措施等多种因素影响,更全面地反映土壤侵蚀实际情况,提高预测准确性和可靠性。此外,本研究首次将动态度、信息熵、综合指数等指标综合运用用于区域土壤侵蚀研究中,为定量分析土壤侵蚀变化提供新思路。

为全面评估窟野河流域的土壤侵蚀现状和未来趋势,本研究探究流域 2010—2020 年土壤侵蚀强度变化时空特征与趋势,分析不同土壤侵蚀强度的转移格局,并基于 CA-Markov 模型合理预测流域 2025 年的土壤侵蚀空间格局,为流域制定科学合理且具有前瞻性的水土流失防治措施提供方法支撑和数据依据。本研究深入分析土壤侵蚀状况,揭示各因子对流域土壤侵蚀变化的影响机制,厘清流域水土保持措施效应,不仅针对当前侵蚀问题,还考虑到未来可能的变化,有助于制定针对性的水土保持措施、优化流域管理策略,为流域内土地规划、农业发展及生态恢复提供理论依据,促进窟野河流域资源的合理利用和生态环境的持续改善,为流域乃至更广泛地区的可持续发展奠定坚实基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

窟野河 ($109^{\circ}28' - 110^{\circ}52' \text{ E}$, $38^{\circ}23' - 39^{\circ}52' \text{ N}$)

是黄河的一级支流,发源于内蒙古东胜区巴定沟,流经伊金霍洛旗,在陕西省神木市店塔镇与牯牛川交汇,于神木市贺家川乡沙峁头村汇入黄河,干流长 241.8 km,流域面积 8 706 km²(图 1)。流域海拔 735~1 585 m,地势西北高东南低。窟野河流域属于干旱、半干旱地区,多年平均降水量 410 mm,平均气温 7.9 ℃,无霜期 280 天。降水年内分布极不均匀,多集中于夏季,多年平均径流量 5.10×10⁸ m³。流域土壤分布具有地域性,主要类型为黄绵土、风沙土和栗钙土。流域

内植被多以灌丛植被和草本植物为主,植被覆盖度约 49%。窟野河处于毛乌素沙地和黄土丘陵沟壑区的过渡地带,水土流失剧烈,2000—2020 年年平均输沙模数为 362 t/km²,是黄河中游水土流失严重的多沙粗沙支流之一。土地利用类型以耕地、林地、草地为主,耕地主要分布在流域中部和东南部,林地、草地主要分布在流域东南部和西北部。全区总人口超 100 万,矿产资源丰富,是我国重要的能源重化工基地。

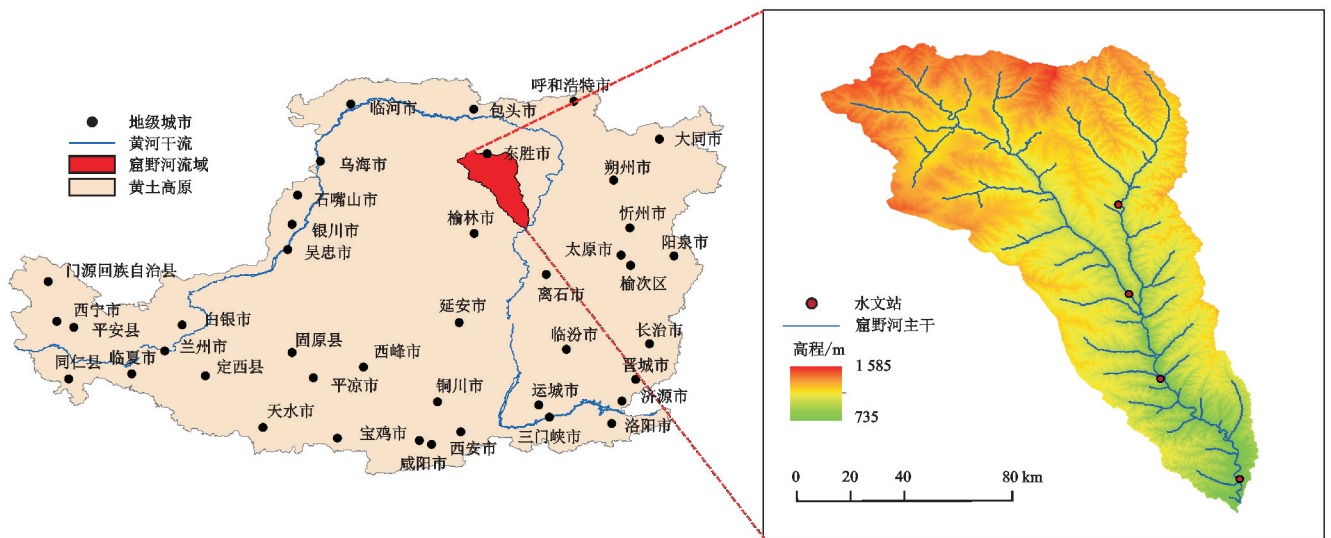


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

1.2 数据来源与处理

研究选用的 Landsat 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);降雨数据来源于国家青藏高原科学数据中心发布的“中国 1 km 分辨率逐月降水数据集(1901—2022)”,本研究以窟野河流域 2010—2020 年的逐月降雨数据计算降雨侵蚀力;土壤属性数据来源于国家青藏高原科学数据中心发布的“基于世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD)土壤数据集(v1.2)”并根据实地采样结果作部分修正;土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)发布的中国多时期土地利用/土地覆盖遥感监测数据集,包括 2010 年、2015 年和 2020 年 3 期;植被覆盖指数数据来源于国家生态科学数据中心发布的“2000—2022 年中国 30 m 年最大 NDVI 数据集”,所用数据均转换为 GCS_WGS_1984 坐标系,栅格数据分辨率重采样为 30 m×30 m。

1.3 RUSLE 模型

采用 RUSLE 模型对窟野河流域土壤侵蚀进行模拟分析,表达式为:

$$A=R\times K\times LS\times C\times P \tag{1}$$

式中: A 为单位面积土壤侵蚀模数[t/(hm²·a)]; R 为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)]; K 为土壤可蚀性因子[(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)]; LS 为坡长坡度因子; C 为地表植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。

1.3.1 降雨侵蚀力因子(R) 本文采用章文波等^[15]月尺度公式计算 R 因子:

$$R=0.183\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\left(\frac{\sum_{j=1}^{12}P_{i,j}^2}{\sum_{j=1}^{12}P_{i,j}}\right)\right]^{1.996} \tag{2}$$

式中: $P_{i,j}$ 为第 i 年、 j 月的降雨量(mm); n 为年数。

1.3.2 土壤可蚀性因子(K) 本文采用 EPIC(erosion-productivity impact calculator)模型^[16]计算 K 因子:

$$K=0.1317\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256\text{SAN}\left(1-\frac{W_{\text{sil}}}{100}\right)\right]\right\}\times\left(\frac{W_{\text{sil}}}{W_{\text{cla}}+W_{\text{sla}}}\right)^{0.3}\times\left[1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right]\times\left[1-\frac{0.7SN}{SN+\exp(22.95SN-5.51)}\right] \tag{3}$$

式中: W_{san} 为砂粒质量分数(%); W_{sil} 为粉粒质量分数

(%); W_{cla} 为黏粒质量分数(%); C 为有机碳质量分数(%); $SN = 1 - SAN/100$ 。其中,土壤砂粒、粉粒、黏粒、有机碳依托 HWSD 土壤数据集进行现场 27 个点的随机采样。

1.3.3 地形因子(LS) 本文使用符素华等^[17]开发的 LS 计算工具 2.1,使用坡长法进行 LS 因子的计算:

$$S = \begin{cases} 10.80 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.80 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (4)$$

$$L = \begin{cases} \frac{\lambda_{\text{out}}^{m+1} - \lambda_{\text{in}}^{m+1}}{(\lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}})(22.13)^m} & \lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}} > 0 \\ \left(\frac{\lambda_{\text{out}}}{22.13}\right)^m & \lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}} < 0 \\ 0 & \lambda_{\text{out}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 0.5^\circ \\ 0.3 & 0.5^\circ \leq \theta < 1.5^\circ \\ 0.4 & 1.5^\circ \leq \theta < 3.0^\circ \\ 0.5 & 3.0^\circ \leq \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ 为坡度($^\circ$); m 为坡长指数; λ_{out} 、 λ_{in} 分别为栅格出口及入口的坡长;当 $\lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}} = 0$ 时, L 为流入单元格最长流路栅格的坡长因子值。

1.3.4 植被覆盖因子(C) 本文采用蔡崇法等^[18]提出的方法估算 C 因子:

$$C = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f & 0 < f < 78.3\% \\ 0 & f \geq 78.3\% \end{cases} \quad (7)$$

$$f = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (8)$$

式中: f 为植被覆盖度; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为纯裸土像元的 NDVI 值; NDVI_{max} 为纯植被像元的 NDVI 值。

1.3.5 水土保持措施因子(P) 基于前人的研究^[19],结合研究区的土地利用类型特点以及实地调查情况进行水土保持措施因子赋值,水域为 0,旱地、其他林地、林地、灌木林、草地、城镇用地、农村居民点、建设用地、未利用地为 1。

1.4 土壤侵蚀表征指数

1.4.1 土壤侵蚀强度动态度 为进一步刻画 2010—2020 年窟野河流域土壤侵蚀的时空动态变化,构建流域土壤侵蚀强度动态度模型^[20]。土壤侵蚀强度动态度是刻画某一土壤侵蚀强度在一定时间内变化速率和幅度的区域差异的指标,旨在反映其变化的剧烈程度与总体态势。其公式为:

$$J = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (9)$$

式中: J 为某一强度土壤侵蚀动态度; U_a 、 U_b 分别为

研究初期和研究末期某一侵蚀强度面积; T 为研究时间段的时长。本研究 T 取值 5 或 10,表达不同强度土壤侵蚀在 2010—2015 年、2015—2020 年或 2010—2020 年动态变化率。

1.4.2 土壤侵蚀强度信息熵 研究将信息熵的概念引入到土壤侵蚀构成的分析评价中,以衡量窟野河流域土壤侵蚀状况的构成和有序程度^[21]。由于流域土壤侵蚀强度以微度为主,土壤侵蚀强度信息熵越低表明微度侵蚀的占比越大,其他强度的土壤侵蚀占比减少,即土壤侵蚀状况好转。

$$H = - \sum_{i=1}^n Q_i \times \ln Q_i \quad (10)$$

式中: H 为土壤侵蚀强度信息熵; Q_i 为第 i 级强度的土壤侵蚀面积占流域水土流失总面积的比重; n 为土壤侵蚀强度分级数。

1.4.3 土壤侵蚀强度综合指数 土壤侵蚀强度综合指数根据土壤侵蚀的严重程度及对环境造成的危害程度,将其量化分级,分别乘以不同权重分值,分值越大,表明土壤侵蚀越严重。

$$M = 100 \times \sum_{i=1}^n B_i \times Q_i \quad (11)$$

式中: M 为土壤侵蚀强度综合指数; B_i 为第 i 级强度土壤侵蚀分级指数; Q_i 为第 i 级强度土壤侵蚀分级面积占比; n 为土壤侵蚀强度分级数。不同强度等级的分级值 B_i 划分为:微度、轻度、中度、强度、极强和剧烈的分级值分别为 0,2,4,6,8,10。

1.4.4 土壤侵蚀转移矩阵 土壤侵蚀转移矩阵适用于系统分析同一地区不同时相的水土流失现状变化,描述发生变化的土壤侵蚀强度、位置、数量,可以预测未来一段时间内土壤侵蚀强度转移方向。

$$D = \begin{pmatrix} D_{11} & \cdots & D_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{i1} & \cdots & D_{ij} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: D 为转移矩阵; D_{ij} 为 t 时期 i 级土壤侵蚀强度转变为 $t+T$ 时期 j 级土壤侵蚀强度的面积。

1.4.5 土壤侵蚀预测 基于 IDRISI 平台 CA-Markov 模型,模拟窟野河流域未来土壤侵蚀状况。CA-Markov 模型集成 Markov 模型和 CA 模型的优势,降低制定转换规则的难度,避免人为因素的干扰^[22]。

(1)根据研究区 2010 年、2015 年和 2020 年的土壤侵蚀状况,获得 2010—2015 年和 2015—2020 年的土壤侵蚀强度转移矩阵;

(2)选择降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形、植被覆盖措施、水土保持措施等为约束条件,生成适宜性图集;

(3)以 2015 年的土壤侵蚀格局为起始时刻,将 2010—2015 年的土壤侵蚀强度概率转移矩阵和适宜

性转移图像集设定为转换规则,迭代 5 次(迭代次数为预测年份与基准年份的差值),模拟 2020 年的土壤侵蚀强度空间格局。比较模拟结果与实际土壤侵蚀强度,利用 Kappa 系数检验模型的可行性,Kappa>0.6 为模拟精度较高:

$$Kappa=\frac{E_o-E_c}{E_p-E_c}$$

(13)

式中: E_o 为正确模拟的比例; E_c 为随机情况下期望的正确模拟比例; E_p 为理想状态下模拟完全准确的比例,一般取 1。

(4)以 2020 年为土壤侵蚀强度空间格局模拟的起始时刻,2015—2020 年的概率转移矩阵和适宜性转移图像集为转换规则,为保持模型的一致性和可比性,将 CA 迭代次数设置为 5 次(与数据获取的时间间隔一致),模拟 2025 年的土壤侵蚀强度空间格局,从而相对准确地反

映近期土壤侵蚀趋势和影响因素的变化。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀时空变化特征

根据 SL 190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》^[23],将土壤侵蚀计算结果分为 6 级(微度、轻度、中度、强度、极强度、剧烈侵蚀),得到窟野河流域土壤侵蚀强度分级图(图 2)和各强度侵蚀面积占比(表 1)。该地区土壤侵蚀强度空间分布规律与陈利利^[24]的研究基本吻合,证明研究结果可靠且 RUSLE 模型在研究区具有较好的适用性。2010—2020 年窟野河流域的土壤侵蚀情况发生明显的变化,2010—2015 年平均土壤侵蚀量呈持续下降趋势,从 2010 年的 1 955.56 t/(km²·a)降至 2015 年的 1 288.12 t/(km²·a)。至 2020 年,流域平均土壤侵蚀量降至 892.98 t/(km²·a)。

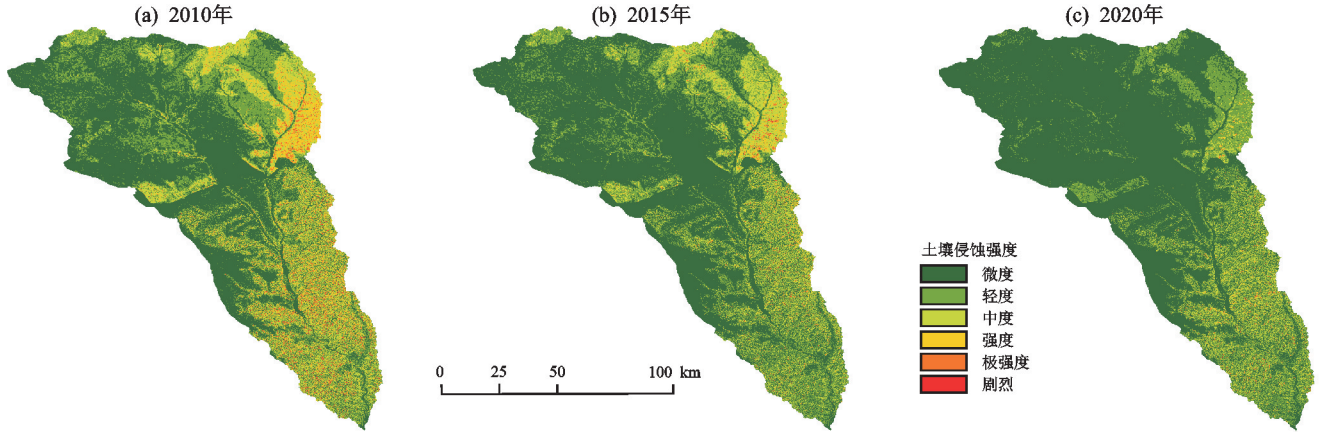


图 2 2010—2020 年窟野河流域土壤侵蚀强度分布

Fig. 2 Soil erosion intensities in the Kuye River Basin from 2010 to 2020

表 1 2010—2020 年窟野河流域土壤侵蚀强度分布

Table 1 Soil erosion intensities in Kuye River Basin from 2010 to 2020

侵蚀等级	面积/km ²			比例/%		
	2010 年	2015 年	2020 年	2010 年	2015 年	2020 年
微度	4 345.245 3	5 348.240 6	6 329.537 0	49.657 7	61.120 0	72.334 3
轻度	2 159.022 6	1 988.895 3	1 657.227 5	24.673 4	22.729 2	18.938 9
中度	1 353.588 4	1 148.189 5	635.870 1	15.468 9	13.121 6	7.266 8
强度	649.801 5	194.524 3	93.119 9	7.426 0	2.223 0	1.064 2
极强度	199.452 5	58.661 0	29.594 6	2.279 4	0.670 4	0.338 2
剧烈	43.286 8	11.886 4	5.048 0	0.494 7	0.135 8	0.057 7

2010 年,窟野河流域大面积区域属于中度以下侵蚀,土壤侵蚀程度以微度和轻度为主,面积占比超过 70%,剧烈侵蚀主要分布于流域中下游;强度侵蚀和极强度侵蚀零星分布在流域中下游和东侧;中度侵蚀集中分布于支流牯牛川区域、中游东侧以及下游区域。2015 年,流域中下游强度及以上侵蚀明显减少,牯牛川区域强度侵蚀大量减少但仍略为集中。2020 年,牯牛川区域中度及以上侵蚀明显减少,上游乌兰

木伦河区域水土流失治理效果良好,微度侵蚀占比提高。2010—2020 年,窟野河流域土壤侵蚀状况变化显著,微度侵蚀区域大面积增加,其他侵蚀区域面积减少,表明窟野河流域水土保持效果较好。

2010—2015 年窟野河流域有 68.13%的区域土壤侵蚀强度等级不变,29.60%的区域土壤侵蚀强度等级下降,主要为轻度侵蚀转微度侵蚀、中度侵蚀转微度侵蚀、强度侵蚀转中度侵蚀,轻度侵蚀转微度侵

蚀分布于整个流域,中度侵蚀转微度侵蚀、强度侵蚀转中度侵蚀主要分布于牯牛川区域和中下游区域,全区域 2.28% 的地区土壤侵蚀强度等级升高,主要为微度侵蚀转轻度侵蚀、轻度侵蚀转中度侵蚀,零星分布于整个流域。

2015—2020 年的土壤侵蚀强度变化与前 5 年略有不同,等级不变与等级降低的区域分别占比 75.54% 和 21.73%,土壤侵蚀强度等级上升的地区占比增至 2.72%,主要为微度侵蚀转轻度侵蚀、轻度侵蚀转中度侵蚀,主要分布于流域下游区域,可以考虑适当增加该区域的水土保持设施建设。

2010—2020 年窟野河流域有 56.77% 的区域土壤侵蚀强度等级不变,42.90% 的区域土壤侵蚀强度等级下降,主要为轻度侵蚀转微度侵蚀、中度侵蚀转微度侵蚀,轻度侵蚀转微度侵蚀分布于整个流域,中度侵蚀转微度侵蚀主要分布于牯牛川和中下游区域,在牯牛川区域较为集中;0.33% 的地区土壤侵蚀强度等级升高,主要为微度侵蚀转轻度侵蚀、轻度侵蚀转中度侵蚀,微度侵蚀转轻度侵蚀零星分布在乌兰木伦河区域,轻度侵蚀转中度侵蚀零星分布在流域中下游(图 3)。总体上,2010—2020 年间窟野河流域的土壤侵蚀情况持续好转。

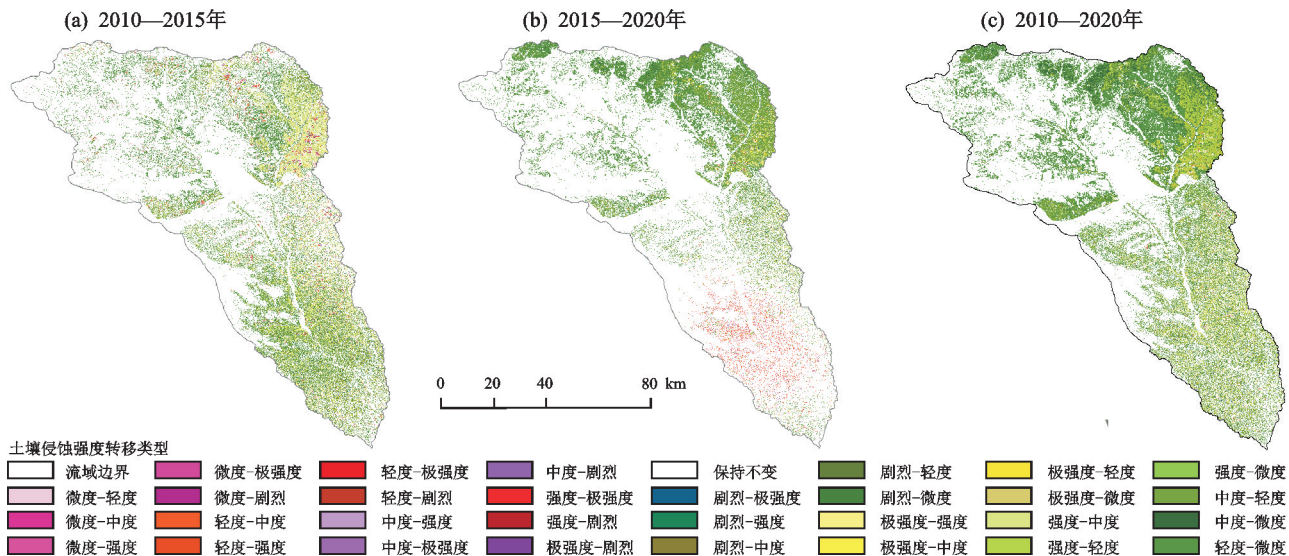


图 3 窟野河流域各时段土壤侵蚀强度等级变化

Fig. 3 Changes of soil erosion intensity at different time periods in Kuye River basin

2.2 土壤侵蚀变化表征指数

2000—2020 年,窟野河流域土壤侵蚀转移的各指数变化见图 4。2010—2015 年,剧烈侵蚀的动态度变化最大,其次分别为极强度、强度、微度、中度、轻度,除微度侵蚀外均为负值;2015—2020 年,各侵蚀强度动态度大小趋势为剧烈侵蚀、强度、极强度、中度、微度、轻度,除微度侵蚀外均为负值;2010—2010 年,各侵蚀强度动态度大小趋势与 2015—2020 年相同。由图 4 可知,剧烈、极强度、强度侵蚀的动态度最大,说明剧烈、极强度、强度侵蚀较微度、轻度、中度侵蚀在 2010—2020 年变化速率和幅度更大,水土流失严重地区得到重点治理。从整体上看,2010—2015 年的各侵蚀动态度值最大,说明该阶段流域水土流失治理效果较后 5 年更好。土壤侵蚀强度信息熵与土壤侵蚀强度综合指数变化趋势相近,土壤侵蚀强度信息熵由 1.29 下降至 0.81,土壤侵蚀强度综合指数由 178.96 降至 76.61,说明 2010—2020 年流域整体微度侵蚀比重增加,土壤侵蚀减少,对环境的危害减轻。10 年间,流域土壤侵蚀强度信息熵稳定下降,2010—2015 年与

2015—2020 年下降幅度相近,说明流域微度侵蚀比重稳定增加。而土壤侵蚀强度综合指数降低趋势与土壤侵蚀强度信息熵略有不同,2010—2015 年下降幅度明显高于 2015—2020 年,说明 2010—2015 年水土流失治理效率较高,而 2015—2020 年有所减缓。

为进一步探究土壤侵蚀转移状况,将窟野河流域在各时段的土壤侵蚀强度转移矩阵进行可视化处理见图 4d。2010—2015 年,极少部分微度侵蚀转移为轻度侵蚀,大部分保持不变;轻度侵蚀近半数保持不变,近半数转为微度侵蚀,极少部分转为中度侵蚀;中度侵蚀主要转为轻度侵蚀或不变,极少部分转为微度侵蚀;强度侵蚀主要转为中度侵蚀,极少部分保持不变或转为轻度侵蚀;极强度侵蚀大部分转移为强度侵蚀;剧烈侵蚀转移多向。2015—2020 年,微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀转移方向及程度与 2010—2015 年类似;其余强度侵蚀转移多向。总体来看,2010—2020 年窟野河流域土壤侵蚀主要朝减弱方向转化,转移主要发生在邻近两强度之间,说明窟野河流域土壤侵蚀状况的改善并不是一蹴而就,而是循序渐进的。

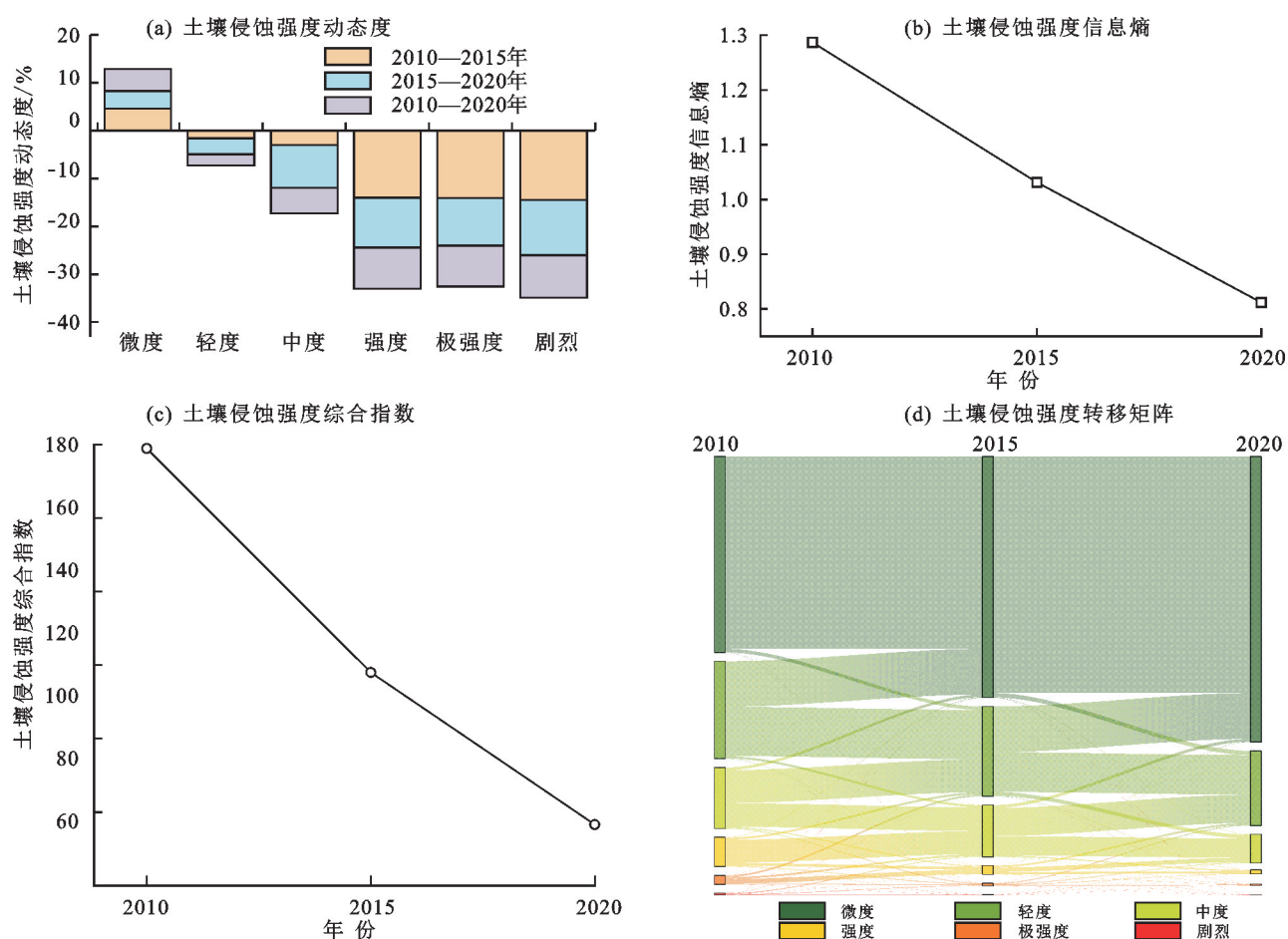


图 4 窟野河流域 2010—2020 年土壤侵蚀强度动态度、信息熵、综合指数、转移矩阵

Fig. 4 Dynamic degree, information entropy, comprehensive index and transfer matrix of soil erosion intensity in Kuye River Basin from 2010 to 2020

2.3 土壤侵蚀预测

将 CA—Markov 模型预测得出的 2020 年窟野河流域土壤侵蚀强度分布图与实际比较得出, Kappa 系数为 0.81, 通过精度检验, 说明该模型适用于窟野河流域。CA—Markov 模型模拟流域 2025 年土壤侵蚀强度结果见图 5 和表 2。

2020—2025 年, 流域微度侵蚀面积增加, 占比从 2020 年的 72.334 3% 增至 75.523 3%, 轻度侵蚀面积几乎不变, 其他类型侵蚀面积减少, 中度及以上侵蚀主要分布于流域中下游和小部分牯牛川区域, 面积仅占全流域的 5.731 1%。

3 讨论

对窟野河流域 2010—2020 年的土壤侵蚀时空分布特征分析发现, 土壤侵蚀模数整体呈下降趋势。本研究创造性地将动态度、信息熵、综合程度等土地利用评价指标应用于土壤侵蚀研究中, 定量结果与区域侵蚀模数递减趋势吻合, 反映流域水土流失治理效果。已有研究^[25]表明, 人类活动是流域土壤侵蚀变化的主要驱动因素, 窟野河流域大规模退耕、还林还草等生态工程建设, 增加植被的固水保土作用, 以及

水库、淤地坝等水土保持工程, 均对流域土壤侵蚀减少起到重要作用^[26]。再加上近十几年来流域总降水量的增加, 尤其是在植被发育关键期, 流域高强度降雨减弱及中小降雨增加^[27], 均为植被进一步恢复提供有利条件。

值得注意的是, 2015—2020 年, 研究区下游土壤侵蚀状况表现出部分恶化的趋势。近年来流域极端降水量总体均呈增长趋势, 特大暴雨所形成的洪水泥沙可能将过去水保措施所拦截的泥沙一并冲下^[28]。另一方面, 淤地坝经过多年运行, 许多坝体工程因设施老化, 存在不同程度的毁损, 部分淤地坝已丧失继续拦泥和防洪的能力^[28-29], 由此造成严重的土壤侵蚀。而流域上游乌兰木伦河区域土壤侵蚀状况基本不变, 与该地区地势较为平坦, 且严格实施我国三北防护林四期工程等重点林业工程的区域政策密切相关^[30]。

研究区煤矿资源丰富, 神东煤田几乎覆盖上中游全部范围, 随着其城市化和工业化的快速发展, 环境压力日渐增大。从 2000—2019 年, 窟野河流域原煤产量增加近 12 倍^[31], 矿产开采的加剧导致地下水位下降, 土壤含水量锐减, 从而造成流域径流减少甚至

断流,破坏原有的土壤结构,土壤侵蚀更易发生^[32]。大规模的煤炭开采受到政府的高度重视,并开始专项整治措施。但是,矿产资源开发尤其是露天煤炭资源开发造成的水土流失尚未得到有效控制^[33]。

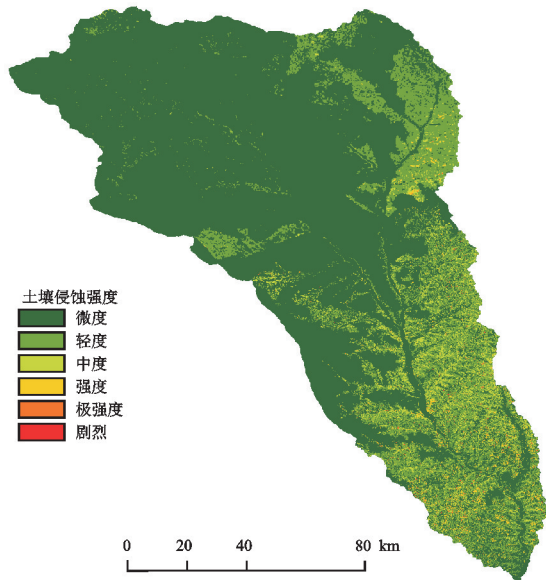


图 5 预测 2025 年窟野河流域土壤侵蚀等级分布

Fig. 5 Distribution of soil erosion intensities in Kuye River Basin in 2025

表 2 预测 2025 年窟野河流域不同土壤侵蚀等级面积

Table 2 Area of different soil erosion intensities in Kuye River Basin in 2025

侵蚀等级	面积/km ²	比例/%
微度	6 608.585 8	75.523 3
轻度	1 640.321 7	18.745 7
中度	411.640 6	4.704 3
强度	71.638 2	0.818 7
极强度	16.299 7	0.186 3
剧烈	1.911 0	0.021 8

刘晓燕等^[31]研究得出,2016 年以来,窟野河流域的植被盖度已经达到相应自然条件的峰值,流域植被减水减沙能力已达峰值。目前,窟野河流域土壤侵蚀状况持续好转,但若轻视极端暴雨状况、对矿产资源开发造成的水土流失状况不加控制,窟野河流域水土流失治理效率将变慢,甚至可能在部分地区出现土壤侵蚀加剧状况。因此,在未来的土壤侵蚀治理工作中,应该强化现有的防治措施,进一步推动“退耕还林”政策的实施。需考虑增加极端暴雨应对措施,如提高强水土保持性能植被的投入量及设立预警监测措施;针对淤地坝老化现象,应持续监测其运行状态,并采取溢洪道施工、补坝等有效措施,以保证最大的截沙效率;而对于矿井密集的区域,坚持实行绿色开采和生态保护并行,建立矿井周边的土壤侵蚀状况实时监控机制。这些综合措施旨在保护流域土壤,有效

防治侵蚀,从而推动流域可持续发展的实现。

本研究综合 RUSLE 和 CA-Markov 的模型优势,结果亦证明 CA-Markov 模型在土壤侵蚀领域的适用性,但研究仍存在不足:通过实地采样计算土壤可蚀性因子(K),由于采样点数量和分布的限制,导致计算结果存在一定误差;地形数据存在一定空间变异性,难以完全精确地描绘出细微的地形变化,影响 LS 因子计算的精确度;受遥感数据分辨率、大气条件等因素影响,解析 $NDVI$ 计算的植被覆盖度与实际值之间存在一定的偏差。这些都影响土壤侵蚀计算的准确性,在今后的研究中应进一步优化数据采集和分析方法,提高模型的精确度和适用性。

4 结论

(1)窟野河流域土壤侵蚀以微度、轻度侵蚀为主,较强程度的侵蚀主要分布于流域中下游和支流牯牛川区域。2010—2020 年,流域的平均土壤侵蚀量由 $1\,955.56\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 持续下降至 $892.98\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,微度侵蚀面积大幅增加,其他侵蚀等级面积相应减少。流域大部分区域的土壤侵蚀强度不变或下降,仅有不到 3% 区域侵蚀程度加剧,区域水土保持措施取得显著成效。

(2)窟野河流域土壤剧烈、极强度、强度侵蚀的动态变化较大,水土流失严重地区得到重点治理;土壤侵蚀强度信息熵由 1.29 稳定下降至 0.81,土壤侵蚀强度综合指数由 178.96 降至 76.61,且 2010—2015 年下降幅度更高,水土流失治理效率更高;流域土壤侵蚀强度朝减弱方向转化,主要发生在邻近两侵蚀强度等级之间。

(3)CA-Markov 模拟显示,预计到 2025 年,窟野河流域土壤侵蚀状况将进一步改善,微度侵蚀占比超 75%。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.2022 年中国水土保持公报[EB/OL].(2023-08-25)[2024-05-10].http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202308/t20230825_1680719.html. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China,2022 China Soil and Water Conservation Bulletin[EB/OL].(2023-08-25)[2024-05-10].http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202308/t20230825_1680719.html.
- [2] 曲绅豪,周文婷,张翔,等.黄河中游典型流域近 60 年水沙变化趋势及影响因素[J].水土保持学报,2023,37(3): 35-42.
- QU S H, ZHOU W T, ZHANG X, et al. Variation trend and influencing factors of water and sediment in the middle reaches of the Yellow River in recent 60 years[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023, 37(3):35-42.

- [3] 张东,曹莹,赵志琦,等.煤矿开采活动对黄河中游窟野河流域溶解性硫酸盐的影响[J].地球科学与环境学报,2023,45(2):414-426.
ZHANG D, CAO Y, ZHAO Z Q, et al. Impacts of coal mining activities on dissolved sulfate in the Kuye River Basin, the midstream of Yellow River, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 414-426.
- [4] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报,2020,34(4):21-30.
ZHANG G H. Several ideas related to soil erosion research [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 21-30.
- [5] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [6] 张卓佩,牛健植,樊登星,等.黄河中游多沙粗沙区土壤水蚀时空变化及动态驱动力分析[J].水土保持学报,2024,38(2):85-96.
ZHANG Z P, NIU J Z, FAN D X, et al. Analysis of spatial and temporal evolution and dynamic driving force of soil water erosion in the middle reaches of the Yellow River in the rich and coarse sediment area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 85-96.
- [7] 田昌园,张红丽,汪军红,等.近 30 年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应[J].水土保持学报,2024,38(3):37-44.
TIAN C Y, ZHANG H L, WANG J H, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion and its response to landscape pattern in Dabie Mountains of western Anhui in recent 30 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 37-44.
- [8] 刘小妮,鞠琴,鞠晓晗,等.基于 CA-Markov 模型的渭河中下游干流土地利用变化模拟及预测[J].节水灌溉,2022(11):1-8.
LIU X N, JU Q, JU X H, et al. Simulation and prediction of land use change in the middle and lower reaches of the Weihe River Basin based on the CA-Markov model [J]. Water Saving Irrigation, 2022(11): 1-8.
- [9] 杨维鸽.基于 CA-Markov 模型和多层次模型的土地利用变化模拟和影响因素研究:以陕西省米脂县高西沟村为例[D].西安:西北大学,2010.
YANG W G. The study of the simulation and influencing factors of land use change based on CA-Markov model and multi-level model: A case study of Gao Xi-gou Village, Mizhi Country, Shannxi Province [D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- [10] YAN S X, LONG Y N, HE H G, et al. Flood response to urban expansion in the Lushui River Basin[J]. Natural Hazards, 2023, 115(1): 779-805.
- [11] CUI L, ZHAO Y H, LIU J C, et al. Vegetation coverage prediction for the Qinling Mountains using the CA-Markov model[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(10): e679.
- [12] ZHU G F, QIU D D, ZHANG Z X, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 127: e107770.
- [13] GETACHEW B, MANJUNATHA B R, BHAT G H. Assessing current and projected soil loss under changing land use and climate using RUSLE with Remote sensing and GIS in the Lake Tana Basin, Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2021, 24(3): 907-918.
- [14] MOKARRAM M, ZAREI A R. Soil erosion prediction using Markov and CA-Markov chains methods and remote sensing drought indicators[J]. Ecological Informatics, 2023, 78: e102386.
- [15] 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,2003,25(1):35-41.
ZHANG W B, FU J S. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. Resources Science, 2003, 25(1): 35-41.
- [16] WILLIAMS J, RENARD K, DYKE P. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38: 381-383.
- [17] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].中国水土保持科学,2015,13(5):105-110.
FU S H, LIU B Y, ZHOU G Y, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5): 105-110.
- [18] 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 JP geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24.
- [19] 吴芳,朱源,许丁雪,等.渭公河流域土壤侵蚀空间特征及其优先治理区确定[J].生态学报,2019,39(13):4761-4772.
WU F, ZHU Y, XU D X, et al. Assessment of soil erosion and prioritization for treatment at the catchment level in the Mekong Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4761-4772.
- [20] 赵青松,兰安军,范泽孟,等.贵州省不同地貌形态类型土壤侵蚀强度变化的定量分析[J].地球信息科学学报,2020,22(7):1555-1566.
ZHAO Q S, LAN A J, FAN Z M, et al. Quantitative

- analysis on the soil erosion intensity change in different morphological types of Guizhou Province[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(7): 1555-1566.
- [21] 江洪,汪小钦,陈芸芝.九龙江流域土壤侵蚀变化遥感监测与分析[C]//福建省土地学会.2007年福建省土地学会年会论文集.福州:福建省土地学会,2007:281-286.
- JIANG H, WANG X Q, CHEN Y Z. Remote sensing monitoring and analysis of soil erosion change in Jiulong River Basin [C]// Fujian Land Society. 2007 Annual Meeting of Fujian Land Society Collection. Fuzhou: Fujian Land Society, 2007: 281-286.
- [22] 耿爱玉,王宁,于格,等.胶州湾国家海洋公园沿岸地区土地利用预测研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(3): 133-143.
- GENG A Y, WANG N, YU G, et al. Research on land use prediction in the coastal area of Jiaozhou Bay national ocean park [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2024, 54(3): 133-143.
- [23] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water and Power Press, 2008.
- [24] 陈利利.窟野河流域土地利用变化、侵蚀响应及因素贡献分析[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- CHEN L L. The analysis of lucc, erosion responses and human activities contribution in the Kuye River Basin, China[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [25] 刘强,蔡学娅,刘君怡,等.黄河中游窟野河流域水沙关系变化特征及其成因分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 68-74.
- LIU Q, CAI X Y, LIU J Y, et al. Variation characteristics and causes of runoff-sediment relationship in Kuye River Basin in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 68-74.
- [26] 陈梓楹,郭巧玲,韩瑶瑶,等.降水与土地利用变化对窟野河流域径流的影响[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(7): 14-18.
- CHEN Z Y, GUO Q L, HAN Y Y, et al. Effects of precipitation and land-use changes on runoff of Kuyehe River Basin [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(7): 14-18.
- [27] 高文永,高亚军,徐建华.采矿塌陷对窟野河流域水沙的影响[J]. *人民黄河*, 2017, 39(11): 76-80.
- GAO W Y, GAO Y J, XU J H. Influences of mining collapse on water and sediment of Kuye River Basin [J]. *Yellow River*, 2017, 39(11): 76-80.
- [28] 孙从建,林若静,郑振婧,等.基于水土流失经验模型(RUSLE模型)的黄河中游典型小流域水土流失特征分析[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(1): 200-208.
- SUN C J, LIN R J, ZHENG Z J, et al. Characteristic analysis of soil and water loss in typical small watersheds of the Middle Yellow River based on RUSLE model [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(1): 200-208.
- [29] ZHANG X, SHE D L, HOU M T, et al. Understanding the influencing factors (precipitation variation, land use changes and check dams) and mechanisms controlling changes in the sediment load of a typical Loess watershed, China [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 163: e106198.
- [30] 颜伟伟.伊金霍洛旗生态恢复效益评价及耦合协调度分析[D].北京:北京林业大学,2020.
- YAN S W. Evaluation of ecological restoration benefit and coupling coordination degree in Yijinhuoluo Banner [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [31] 刘晓燕,李皓冰,李晓宇,等.黄河流域窟野河入黄水沙锐减成因分析[J]. *水利学报*, 2022, 53(3): 296-305.
- LIU X Y, LI H B, LI X Y, et al. Analysis on the cause of sharp decrease of runoff and sediment from Kuye River in Loess Plateau [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(3): 296-305.
- [32] 刘强,尉飞鸿,夏雪,等.1980—2020年窟野河流域土地利用景观格局演变及其驱动力[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 335-341.
- LIU Q, YU F H, XIA X, et al. Landscape pattern evolution and driving forces of land use in Kuye River Basin from 1980 to 2020 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 335-341.
- [33] 张润平,余金龙,郑云云,等.浅析我国能源化工区河流综合治理:以神木市窟野河为例[J]. *陕西水利*, 2018(6): 115-116.
- ZHANG R P, YU J L, ZHENG Y Y, et al. Analysis on the comprehensive management of rivers in China's energy and chemical industry zone: A case study of Kuye River in Shenmu city [J]. *Shaanxi Water Resources*, 2018(6): 115-116.