DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.042 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.042
周乐洋, 夏露, 张晓龙, 等. 晋西黄土区典型流域土壤侵蚀时空变化规律及驱动机制[J]. 水土保持研究,2026,33(6):178-188.
Zhou Leyang, Xia Lu, Zhang Xiaolong, et al. Spatiotemporal variation patterns and driving mechanisms of soil erosion in a typical watershed of Loess Plateau region of western Shanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):178-188.

晋西黄土区典型流域土壤侵蚀时空变化规律及驱动机制

周乐洋[1], 夏 露[1], 张晓龙[2], 马耘秀[1], 孙新新[3], 吕春娟[1], 焦昱华[1]
(1.山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2.中国科学院 遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050022; 3.西北农林科技大学, 资源环境学院, 陕西 杨凌 712199)

摘 要:[目的]解析土壤侵蚀时空演变规律与驱动机制,预测多情景下流域侵蚀发展趋势,为晋西黄土区水土流失防控及生态治理决策提供可靠支撑。[方法]以晋西黄土区典型流域——昕水河流域为研究对象,基于该流域1981—2019年的降水、土壤、DEM及土地利用等资料,利用修正通用土壤流失方程(RUSLE)分析流域多年土壤侵蚀时空演变特征,评估影响流域土壤侵蚀变化的驱动机制,并通过建立不同土地利用、气候变化和植被恢复情景对流域未来土壤侵蚀状况进行预测。[结果](1)昕水河流域土壤侵蚀模数的多年平均值为1 913.31 t/km^2,并且在年际上呈现显著的下降趋势,其中,基准期(1981—2001年)和变化期(2002—2019年)平均土壤侵蚀模数分别为2 346.98 t/km^2,1 407.36 t/km^2,土壤侵蚀强度在空间上呈现由东南方向到西北方向递增的分布特征;(2)在不同土地利用类型中,草地和耕地是流域土壤侵蚀最严重的区域,需作为未来水土流失治理的重点对象;(3)地理探测器结果表明影响土壤侵蚀模数空间分异的主要因素是NDVI、海拔和土地利用类型等下垫面因子;分离评判法结果表明气候变化和人类活动对流域土壤侵蚀降低的贡献率分别为-56.51%和156.51%,双累积曲线法推求的相应贡献率分别为-71.26%和171.26%,两种方法共同验证人类活动是流域土壤侵蚀变化的主要驱动因素;(4)未来土地利用变化和气候变化会加剧流域土壤侵蚀,而植被覆盖度增加会降低流域土壤侵蚀。在3种情景共同影响下,多数情景的土壤侵蚀相对于变化期会加剧,土壤侵蚀强度范围为1 329.24~1 762.02 t/km^2。[结论]昕水河流域近40年土壤侵蚀模数呈显著下降趋势,草地和耕地是高侵蚀风险区,且人类活动是其主要驱动因素。未来气候变化及土地利用变化可能加剧侵蚀,防治应重点针对草地和耕地,通过增加植被覆盖等途径,持续优化土地利用与植被恢复。

关键词:土壤侵蚀; RUSLE模型; 时空变化特征; 驱动机制; 侵蚀预测
中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0178-11

Spatiotemporal variation patterns and driving mechanisms of soil erosion in a typical watershed of Loess Plateau region of western Shanxi

Zhou Leyang[1], Xia Lu[1], Zhang Xiaolong[2], Ma Yunxiu[1], Sun Xinxin[3], Lyu Chunjuan[1], Jiao Yuhua[1]
(1.*College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi* 030801, *China*;
2.*Hebei Key Laboratory of Water Saving Agriculture, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang* 050022, *China*;
3.*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712199, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to analyze the spatiotemporal evolution patterns and driving mechanisms of soil erosion, predict erosion trends under multiple scenarios in a river basin, and provide reliable support for soil erosion prevention and ecological governance decision-making in the Loess Plateau region of western Shanxi.

收稿日期:2025-11-13 **修回日期:**2026-01-04 **接受日期:**2026-01-10
资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目"黄土塬区典型人工造林和自然恢复小流域径流差异性及其驱动机制"(42301047);山西省应用基础研究计划面上项目"植被恢复和气候变化对汾河源区径流及其成分的影响机制"(202303021211107);山西省水利科学技术研究与推广项目"晋西黄土区不同植被恢复模式的生态水文效应及路径研究"(2024GM34)
第一作者:周乐洋(2001—),女,山西省长治人,硕士研究生,主要研究方向为土壤侵蚀。E-mail:15635503189@163.com
通信作者:夏露(1992—),男,安徽省无为人,博士,副教授,主要从事生态水文、土壤侵蚀、水沙过程研究。E-mail:xialuxiaochen@163.com

[**Methods**] This study took the Xinshui River Basin, a representative watershed in the Loess Plateau region of western Shanxi, China, as the study area. Using precipitation, soil properties, digital elevation model (DEM), and land use data from 1981 to 2019, this study employed the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) to analyze the long-term spatiotemporal evolution characteristics of soil erosion in the river basin. The driving mechanisms influencing soil erosion changes were assessed, and future soil erosion under different scenarios of land use, climate change, and vegetation restoration was predicted. [**Results**] (1) the long-term average soil erosion modulus in the Xinshui River Basin was 1 913.31 t/km^2, showing a statistically significant decreasing trend over time. The average values reached 2 346.98 t/km^2 during the baseline period (1981—2001) and 1 407.36 t/km^2 during the change period (2002—2019), with soil erosion intensity spatially increasing from southeast to northwest. (2) Among different land use types, grassland and cropland were the areas with the most severe soil erosion in the river basin, and should be prioritized as key targets for soil conservation efforts in the future. (3) Geodetector analysis revealed NDVI, elevation, and land use type as the primary factors influencing spatial differentiation of soil erosion modulus. The separation evaluation method indicated that climate change and human activities contributed −56.51% and 156.51%, respectively, to soil erosion reduction, while the double mass curve method yielded corresponding contributions of −71.26% and 171.26%. The convergence of both methods robustly demonstrated that human activities constituted the principal driving factor of soil erosion changes in the river basin. (4) Future land use change and climate change were projected to exacerbate soil erosion, whereas increased vegetation cover would mitigate it. Under the combined influence of the three scenarios, soil erosion in most scenarios was expected to intensify relative to the change period, with soil erosion intensity ranging from 1 329.24 to 1 762.02 t/km^2. [**Conclusion**] The soil erosion modulus in the Xinshui River Basin showed a significant decreasing trend over the past 40 years. Grassland and cropland are high-risk erosion areas, and human activities are the main driving factor. Future climate change and land use change may aggravate erosion. Prevention and control should focus on grassland and cropland by increasing vegetation cover and continuously optimizing land use and vegetation restoration.

Keywords: soil erosion; RUSLE model; spatiotemporal variation characteristics; driving mechanism; erosion prediction

土壤侵蚀是全球最为严峻的生态环境问题之一,它会导致土壤肥力降低与土地退化,从而导致生态恶化、限制人类的可持续发展[1]。世界上农业用地的土壤正在以每年13~40 t/hm^{2}的速度流失,每年约有1 000万hm^{2}的农田因土壤侵蚀而退化。开展土壤侵蚀评估是实现区域水土保持措施合理布设和水土保持效应评价的前提和基础,具有重要的研究意义。

目前,众多学者对土壤侵蚀评估已经开展了大量的研究工作。例如,秦伟等[2]评估了四面窑沟流域不同坡度、坡向和土地覆盖情况下的土壤侵蚀状况;闫瑞等[3]采用RUSLE模型计算了北洛河上游的土壤侵蚀模数,并进一步探讨其时空分异规律;刘兴宇等[4]评估了青海黄河流域2000—2020年的土壤侵蚀时空动态变化规律;廖俊等[5]采用不同的算法计算RUSLE模型的5个因子,探究了RUSLE模型在黄土高原退耕植被恢复坡面的适应性。目前,相关研究主要集中在对流域过去土壤侵蚀强度评估及影响因素的分析上,但是对土壤侵蚀变化的定量贡献研究相对不足,且有关未来土壤侵蚀预测的研究较少。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区,因此,国家一直高度重视黄土高原的水土流失治理工作,特别是1999年以来大规模退耕还林还草工程的实施,黄土高原土地利用格局随之转变,植被覆盖度显著增加。在黄土高原大尺度流域治理和气候暖湿化的大环境下,区域土壤侵蚀状况及其背后的驱动机制究竟如何?未来土壤侵蚀状况将会如何转变?这些都是亟待回答的科学问题。

因此,本研究以晋西黄土高原典型流域——昕水河流域为研究对象,利用流域1981—2019年的降水、土壤、土地利用及植被覆盖等数据,运用RUSLE模型评估流域的多年土壤侵蚀量,阐明土壤侵蚀的时空变化规律及其驱动机制,并探究未来不同情景下流域的土壤侵蚀状况,以期为晋西黄土区水土保持治理提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

昕水河发源于山西省临汾市蒲县摩天岭，位于110°30′—111°27′E，36°06′—36°55′N，干流全长为178 km，流域面积为4 326 km²。昕水河流域属于暖温带半湿润大陆性气候，多年平均降水量为526.0 mm，降水主要以暴雨的形式集中在夏秋两季，而干旱多发生于冬春季节，年平均气温为9.4 ℃，年日照时数为205.6 h。昕水河多年平均径流量为1.23亿m³，多年平均输沙模数为3 255 t/km²，水沙情势年际变化较大。

流域现状土地利用类型以草地、林地、耕地为主，三者面积占比达99%以上。流域土壤类型多为淋溶土、褐土，土壤侵蚀严重。流域上游为黄土高原土石山区，中下游属黄土高原残塬区和丘陵沟壑区，地貌类型主要为黄土梁、峁、塬和沟谷[6]，具有典型的黄土高原地形地貌特征。因此，研究选取昕水河流域来研究晋西黄土区土壤侵蚀具有一定的代表性和典型性。

1.2 数据来源与处理

（1）降水数据：包括昕水河流域1981—2019年石口、石家庄、井上等13个雨量站（图1）的逐日降水数据，数据来源于黄河水利委员会。

（2）土壤数据：从“国家青藏高原科学数据中心”网站下载，包括砂粒、粉粒、黏粒和有机碳质量分数等数据，根据流域范围，利用ArcGIS提取工具得到昕水河流域土壤图层。

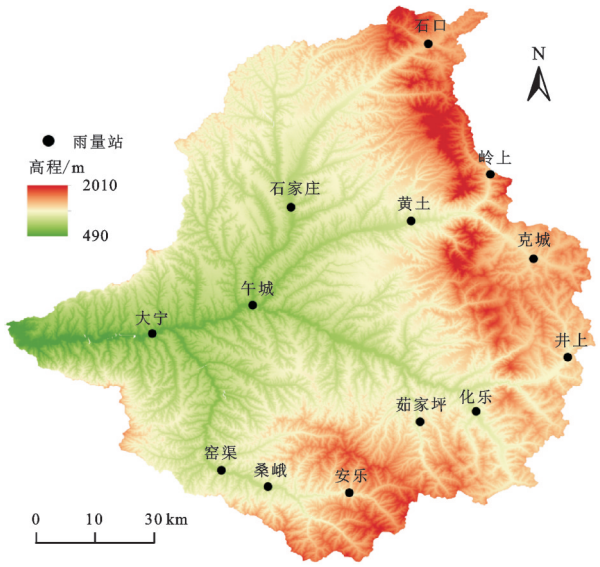


图1 昕水河流域范围及雨量站分布情况

Fig. 1 Scope of Xinshui River Basin and distribution of rainfall stations

（3）DEM数据：从地理空间数据云下载临汾地区GDEMDEM 30 m分辨率数字高程数据，切割生成昕水河流域DEM数据，并提取坡度、坡长图层。

（4）土地利用数据：从“寒区旱区科学数据中心”网站下载山西省1980年、1990年、2000年、2010年、2018年土地利用数据集（30 m分辨率），土地利用类型包括耕地、草地、林地、水域和建设用地。结合流域范围，利用ArcGIS提取工具得到昕水河流域5期土地利用图层。

（5）NDVI数据：从“资源环境科学与数据中心”网站下载，获取中国1981—1997年逐年8 km NDVI数据集和中国1998—2019年逐年1 km NDVI数据集，对1981—1997年的NDVI数据进行重采样，通过回归分析建立二者之间的关系，获得分辨率为1 km的1981—2019年NDVI栅格数据，对其进行掩膜提取，从而获得昕水河流域的NDVI数据集。

2 研究方法

2.1 RUSLE模型的建立

修正的通用土壤流失方程作为估算年均土壤流失量的经典方法，需要考虑降水侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、植被覆盖与管理、水土保持措施管理5大主要因子，方程定义[7]为：

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

式中：A为年平均土壤流失量[t/(hm²·a)]；R为降雨侵蚀因子[MJ·mm/(hm²·h·a)]；K为土壤可蚀性因子[t·h/(MJ·mm)]；LS为坡度坡长因子；C为植被覆盖与管理因子；P为水土保持措施因子。

2.1.1 降雨侵蚀力因子R R因子是RUSLE模型中的关键参数，其量化了物理降雨过程引发土壤表层分离和输移的潜在驱动能力[8]。其值利用全部侵蚀性暴雨时间的降雨动能与最大30 min雨强的乘积之和，即需以次降雨资料为基础。由于本研究最大30 min雨强数据的缺失，采用章文波等[9]提出的计算方法，在缺少具体降雨数据的黄土高原，该方法利用日降雨资料即可计算出R因子，现已在该地区广泛应用：

$$\begin{aligned} R_i &= \alpha \sum_{j=1}^{k} p_j^{\beta} \\ \beta &= 0.8363 + 18.144/P_d + 24.455/P_y \\ \alpha &= 21.586\beta^{-7.1891} \end{aligned} \tag{2}$$

式中：R_i为第i年的降雨侵蚀力（MJ·mm/(hm²·h·a)）；k为1 a内的天数（d）；P_j为年内第j日侵蚀性降雨量（mm），按黄土高原侵蚀性降雨标准，要求大于12 mm，否则按0计）；P_{d12}、P_{y12}分别为日雨量≥12 mm的日均降雨量（mm）和年降雨量（mm）；α、β为相关参数。

2.1.2 土壤可蚀性因子K 土壤可蚀性反映了土壤遭受侵蚀的敏感程度，即其抵抗由降雨、径流所引发

侵蚀能力的综合反映[10]。虽然关于土壤可蚀性因子K估算的方法已提出很多,其中以Wischmeier等在EPIC模型中提出的方法最具代表性,该方法利用土壤有机碳和颗粒组成因子进行估算[11],计算公式如下:

$$K_{\text{epic}}=\left\{0.2+0.3\exp^{\left[-0.0256\text{SAN}\left(1-\text{SIL}/100\right)\right]}\right\}\times\left[\text{SIL}/\left(\text{CLA}+\text{SIL}\right)\right]^{0.3}\times\left\{1-0.25Q/\left[Q+\exp^{\left(3.72-2.95Q\right)}\right]\right\}\times\left\{1-0.75\left(1-\text{SAN}/100\right)/\left[\left(1-\text{SAN}/100\right)+\exp^{\left[-5.51+22.9\left(1-\text{SAN}/100\right)\right]}\right]\right\}$$

$$K=\left(-0.01383+0.51575\times K_{\text{epic}}\right)\times 0.1317 \quad (3)$$

式中:SAN、SIL、CLA、Q分别为砂粒、粉粒、黏粒和有机碳的质量分数(%)。

2.1.3　坡度坡长因子LS　坡长因子(L)与坡度因子(S)[12]均为侵蚀加速因子。鉴于RUSLE模型中LS因子的计算公式主要适用于缓坡,在黄土区陡坡度条件下存在局限性,因此本研究借鉴刘宝元等[13]对陡坡提出的方法:

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03 & (\theta<5^\circ)\\ 16.8\sin\theta-0.5 & (5^\circ\leqslant\theta<10^\circ)\\ 21.9\sin\theta-0.96 & (\theta\geqslant 10^\circ)\end{cases} \quad (4)$$

$$L=\left(\lambda/22.1\right)^m,\ m=\begin{cases}0.2 & (\theta\leqslant 1^\circ)\\ 0.3 & (1^\circ<\theta\leqslant 3^\circ)\\ 0.4 & (3^\circ<\theta\leqslant 5^\circ)\\ 0.5 & (\theta\geqslant 5^\circ)\end{cases} \quad (5)$$

$$LS=L\times S \quad (6)$$

式中:θ、λ分别是由DEM提取的坡度和坡长值;m是坡长指数。

2.1.4　植被覆盖与管理因子C　C因子[14]是土壤侵蚀的抑制因子,目前估算该值通常采用人工赋值、小区试验、根据遥感数据定量计算等方法,本研究参考穆兴民等[15]提出的方法,根据土地利用类型和植被覆盖特征来确定C值,将水域和建设用地的植被覆盖因子设定为0.001,0.1,耕地、草地和林地基于NDVI数据进行计算:

$$C=\begin{cases}1.2899\mathrm{e}^{-6.343\text{NDVI}} & (\text{森林和草地})\\ -0.143\ln\text{NDVI}+0.2525 & (\text{耕地})\end{cases} \quad (7)$$

2.1.5　水土保持措施因子P　P因子[14]是侵蚀抑制因子,可具体表现为相应管理措施对土壤流失量的控制效果。现有研究估算P值多利用土地利用类型进行赋值,本研究借鉴了黄土高原地区相关成果[16],将林地、草地、水域和建设用地P因子值设置为1,而耕地按照坡度范围赋值[17](表1)。

表1　不同坡度范围耕地的P值

Table 1　p values of cultivated land across different slope ranges

坡度范围	5°	5°～10°	10°～15°	15°～20°	20°～25°	>25°
P值	0.100	0.221	0.305	0.575	0.705	0.800

2.1.6　流域年土壤侵蚀量A的计算及年际变化规律分析　本研究中R, C因子采用逐年计算值,K因子和LS因子随年份无显著波动,采用1980年、1990年、2000年、2010年、2018年的P因子分别作为1981—1985年、1986—1995年、1996—2005年、2006—2015年、2016—2019年各年份的P因子,利用ArcGIS软件,将5个因子的栅格图层相乘从而获取1981—2019年逐年的土壤侵蚀图层[18]。在此基础上,利用Mann-Kendall统计检验法[19]揭示昕水河流域土壤侵蚀模数的年际变化趋势。

2.2　流域土壤侵蚀的影响因素及贡献率分析

本研究首先采用地理探测器对影响土壤侵蚀的因素进行分析。地理探测器是用于分析地理要素空间分异性及其驱动因子的统计方法,其通过空间分层异质性检验,利用q统计量度量驱动因子对地理要素的解释力,其计算公式如下[20]:

$$q=1-\sum_{h=1}^{L}N_h\times\sigma_h^2/N\sigma^2 \quad (8)$$

式中:$h=1,2,3,\cdots,L$为变量Y或X的分类或分层;N_h和N分别为h层和全区的单元数;$q\in[0,1]$,且q值越大说明该因子的解释力越强。

地理探测器的数据分析需要进行离散型处理,本研究共选取土地利用类型、年降雨量、NDVI、坡度、海拔、砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、有机碳含量、GDP和人口密度共11个影响因素,将土地利用类型按耕地、草地、林地、水域和建设用地分为5类,坡度分为6个等级:<5°,5°～8°,8°～15°,15°～25°,25°～35°,>35°,GDP和人口密度分为2类,其余数据采用自然断点法分为6类。在此基础上,使用该模型中的因子探测器探究不同因素对土壤侵蚀空间异质性的影响。

此外,本研究利用累积距平法[21]进行年土壤侵蚀的突变分析,将年土壤侵蚀序列以突变点为界,分为基准期和变化期,然后定量评价人类活动和气候

变化对流域土壤侵蚀变化的贡献率。分离评判法[22]和双累积曲线法[23]是该领域中应用最广泛的方法，因此本研究选用这两种方法定量评价驱动因素对土壤侵蚀变化的贡献率，并进行相互验证。

分离评判法的计算原理为将变化期的R因子图层与基准期的K因子、LS因子、C因子和P因子图层进行叠加，得到还原后的天然土壤侵蚀图层，将该图层与基准期的实际土壤侵蚀状况进行对比，分离出气候变化对流域土壤侵蚀的影响，并最终完成对两大驱动因素贡献率的定量评估。双累计曲线法的计算原理为通过建立年累积降雨侵蚀力与年累积土壤侵蚀模数的回归方程，将突变后的累积降雨侵蚀力代入突变前的回归方程得到预测的累积土壤侵蚀模数，并与突变前的累积土壤侵蚀模数进行对比，从而得出气候变化引起的土壤侵蚀变化量，最终得到人类活动和气候变化对土壤侵蚀变化的贡献率。

2.3 未来土壤侵蚀预测

本研究通过构建不同土地利用、植被恢复和气候变化情景，对流域未来2040年的土壤侵蚀状况进行预测。

2.3.1 *土地利用预测* 采用IDRISI软件中的CA-Markov模型对昕水河流域2040年土地利用类型进行模拟预测，CA-Markov模型结合了CA模型模拟空间变化的优势和Markov模型长时间序列模拟预测的优势，可较好地预测和模拟土地利用类型在数量和空间上的变化[24]。具体步骤为利用1980—2010年的地类变化情况作为适应性图集，预测2018年的土地利用情况，并与2018年实际土地利用类型进行精度验证，最后再对2040年的土地利用状况进行预测。

2.3.2 *植被情景设置* 昕水河流域变化期NDVI的最大值和平均值分别为0.80，0.70，以最大值与平均值的比值1.133作为该区域未来的中度植被恢复潜力值，对2040年的昕水河流域设置3种不同植被恢复情景：轻度恢复、中度恢复和高度恢复情景，相应的NDVI值为变化期均值的1.1倍、1.15倍和1.2倍，其相应NDVI值为0.77，0.81，0.85。

2.3.3 *气候情景预测* 本研究参考冷曼曼[6]对昕水河流域未来气候预测结果，在GFDL-ESM2 M气候环流模式下，流域未来2021—2050年RCP 2.6（低减排情景）、RCP 4.5（中等排放情景）和RCP 8.5（高排放情景）的多年平均降水量分别为2000—2015年均值的1.015倍、0.904倍和1.038倍。本研究通过构建年降雨量与降雨侵蚀力的回归方程$y=7.1513x-603.15$（$R^2=0.89$），并结合冷曼曼的未来气候预测结果，最终得到流域3种气候情景下的降雨侵蚀力预测结果。

综上，本研究最终设置了16种未来交叉情景，具体情景如表2所示。

表2 昕水河流域未来土壤侵蚀预测情景

Table 2 Prediction scenarios of future soil erosion in Xinshui River Basin

序号	情景	序号	情景
1	土地利用类型变化＋植被恢复不变＋气候不变	9	土地利用类型变化＋轻度植被恢复＋RCP4.5
2	土地利用类型不变＋轻度植被恢复＋气候不变	10	土地利用类型变化＋轻度植被恢复＋RCP8.5
3	土地利用类型不变＋中度植被恢复＋气候不变	11	土地利用类型变化＋中度植被恢复＋RCP2.6
4	土地利用类型不变＋高度植被恢复＋气候不变	12	土地利用类型变化＋中度植被恢复＋RCP4.5
5	土地利用类型不变＋植被恢复不变＋RCP2.6	13	土地利用类型变化＋中度植被恢复＋RCP8.5
6	土地利用类型不变＋植被恢复不变＋RCP4.5	14	土地利用类型变化＋高度植被恢复＋RCP2.6
7	土地利用类型不变＋植被恢复不变＋RCP8.5	15	土地利用类型变化＋高度植被恢复＋RCP4.5
8	土地利用类型变化＋轻度植被恢复＋RCP2.6	16	土地利用类型变化＋高度植被恢复＋RCP8.5

3 结果与分析

3.1 基于RUSLE模型的土壤侵蚀因子评估

3.1.1 *降雨侵蚀力因子R* 降雨侵蚀力因子R年际变化规律如图2所示。在1981—2019年昕水河流域年降雨侵蚀力与年降水量的变化规律保持一致，多年平均降雨侵蚀力为1 587.64 MJ·mm/(hm²·h·a)，其中，2013年的降雨侵蚀力值最大，为3 477.89 MJ·mm/(hm²·h·a)，1986年的降雨侵蚀力值最小，为418.33 MJ·mm/(hm²·h·a)。虽然各年份之间的降水侵蚀力表现出较大的波动，但总体呈上升趋势。研究区降雨侵蚀力空间差异较大，总体上呈由西南向东北递增的空间分布特征（图3）。

3.1.2 *土壤可蚀性因子K* 流域土壤可蚀性因子K值范围为0.010～0.022，其均值为0.018，低K值主要分布在海拔较高的地区，而高K值则主要分布在河川阶地区。

3.1.3 *坡度坡长因子LS* 昕水河流域LS值范围在0～399.435之间（图4），平均值为10.43。L因子分布与海拔高度之间存在明显的一致性。随着海拔高度

的增加,LS因子的值相应增大;相反,海拔较低的地区则呈现出较小的LS值。

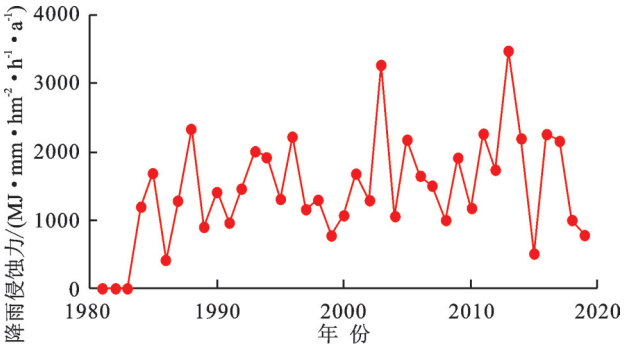


图 2　昕水河流域降雨侵蚀力年际变化规律

Fig. 2　Interannual variation patterns of rainfall erosivity in Xinshui River Basin

3.1.4　植被覆盖与管理因子C　C因子在年际上整体呈现减小的趋势,其值在0.070~0.134范围内浮动,C因子值在2018年最低,1999年最高,多年平均值为0.100。同时,C因子呈现出自西北向东南逐渐减小的特征。植被覆盖度低的地区C因子值显著高于其他地区,这些区域主要为耕地、草地和建筑用地,而C因子值较小的区域主要为林地。

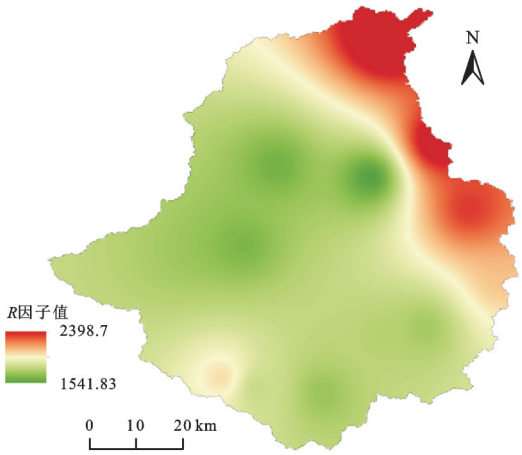


图 3　昕水河流域 *R* 因子值分布图

Fig. 3　Distribution of *R* factor values in Xinshui River Basin

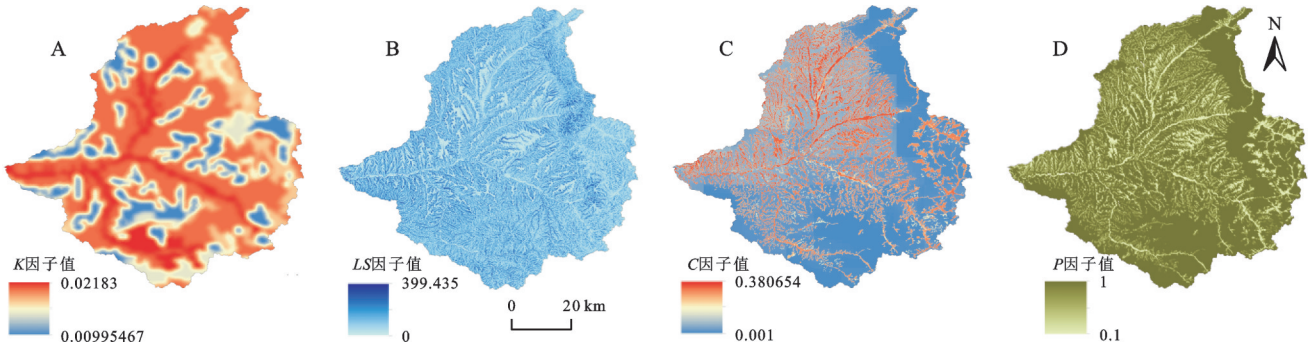


图 4　昕水河流域 *K*, *LS*, *C*, *P* 因子值分布图

Fig. 4　Distribution of *K*, *LS*, *C*, and *P* factor values in Xinshui River Basin

3.1.5　水土保持因子P　P因子在年际上没有明显的变化趋势,其年值范围为0.849~0.860,多年均值为0.854,其中,2018年P值最高,1990年P值最低。P因子在空间上呈现出自西北向东南逐渐增大的特点,流域东北部及南部的P值较大,西北部的P值较小。

3.2　流域土壤侵蚀的时空变化特征

3.2.1　流域土壤侵蚀时间变化特征　RUSLE模型的计算结果表明,昕水河流域1981—2019年平均土壤侵蚀模数为1 913.31 t/km^2(图5)。在研究期间内,流域年土壤侵蚀模数整体表现出下降的趋势。Mann-Kendall统计检验结果表明,流域年土壤侵蚀模数表现出显著的下降趋势(Z=−2.53)。

流域年土壤侵蚀模数累积距平法结果(图6)表明年土壤侵蚀模数于2001年附近达到峰值,可以认为昕水河流域年土壤侵蚀于2001年左右发生了突变。因此,将流域多年土壤侵蚀序列分为基准期(1981—2001年)和变化期(2002—2019年),分析流域土壤侵蚀演变特征。

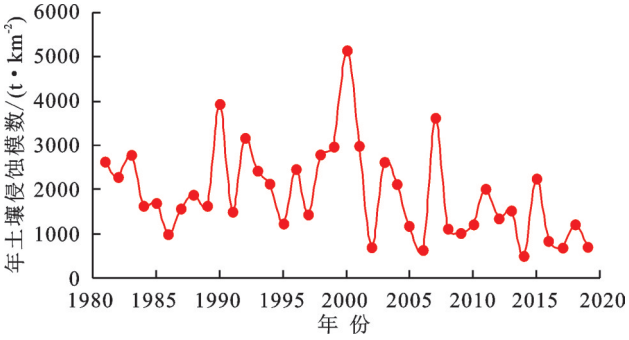


图 5　昕水河流域土壤侵蚀模数年际变化规律

Fig. 5　Interannual variation patterns of soil erosion modulus in Xinshui River Basin

基于水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),将土壤侵蚀强度根据土壤侵蚀模数的大小分为6个级别,得到昕水河流域基准期和变化期土壤侵蚀强度空间分布图(图7)。与基准期相比,流域变化期红、黄色区域面积减少,而绿色区域面积有所增加,这表示变化期相较于基准期的土壤侵蚀强度有所降低。对两个时期的土壤侵蚀强度进行统计分析,昕

水河流域流域平均土壤侵蚀模数从基准期的2 346.98 t/km²降至变化期的1 407.36 t/km²，下降了40.04%。

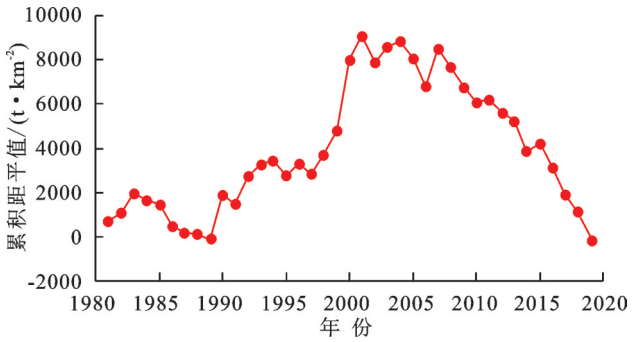


图6 昕水河流域土壤侵蚀模数累积距平值

Fig. 6 Cumulative anomaly values of soil erosion modulus in Xinshui River Basin

3.2.2 不同土地利用类型的土壤侵蚀 利用ArcGIS求出不同土地利用类型在基准期和变化期的土壤侵蚀模数及侵蚀量(表3水域由于土壤侵蚀强度及侵蚀量很小,未统计在表中)。土壤侵蚀模数最大的地类为耕地,其次是草地,其值分别为2 426.88 t/km²,2 358.49 t/km²,均属于中度侵蚀;建设用地的侵蚀模数为1 461.65 t/km²,属于轻度侵蚀,林地的侵蚀模数最小,为742.36 t/km²,属于微度侵蚀。土壤侵蚀量从大到小的地类依次为草地、耕地、林地、建设用地,其中,草地和耕地的土壤侵蚀量分别占整个流域的45.53%和23.37%;建设用地的土壤侵蚀模数虽然较高,但由于其面积小,所以建设用地的土壤侵蚀量很小。

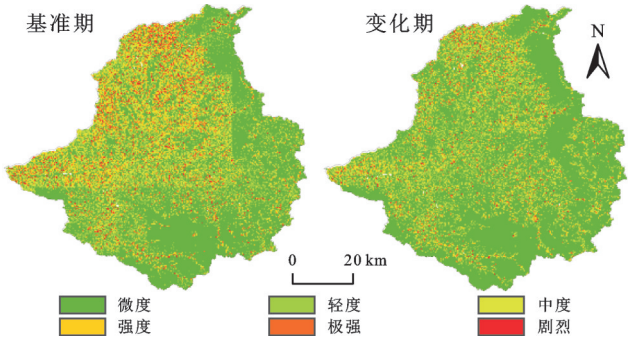


图7 昕水河流域基准期和变化期土壤侵蚀强度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of soil erosion intensity in baseline and change periods of Xinshui River Basin

表3 昕水河流域基准期和变化期不同地类土壤侵蚀模数及侵蚀量

Table 3 Soil erosion modulus and erosion amount of different land use types in baseline and change periods of Xinshui River Basin

土地利用类型	面积		土壤侵蚀模数/(t·km⁻²)	土壤侵蚀量	
	数量/km²	占比/%		数量/10⁴t	占比/%
耕地	1017.61	23.97	2426.88	246.96	23.37
林地	1249.23	29.43	742.36	92.74	8.78
草地	2039.76	48.06	2358.49	481.08	45.53
建设用地	7.56	0.18	1461.65	1.10	0.10

3.3 流域土壤侵蚀的影响因素及贡献率分析

地理探测器的因子探测结果如表4所示。在1980年,各因子对土壤侵蚀模数空间分异影响最大的为NDVI,其次为年降雨量、海拔、土地利用类型和砂粒含量;在1990年,影响力最大的因子仍是NDVI,其次为土地利用类型、海拔、砂粒含量和粉粒含量;在2000年影响力最大的因子是海拔,其次是土地利用类型、NDVI、砂粒含量和粉粒含量;在2010年影响力最大的因子是土地利用类型,其次是海拔、NDVI、粉粒含量和砂粒含量;在2018年影响力最大的因子是海拔,其次是粉粒含量、土地利用类型、砂粒含量和黏粒含量。以上结果综合表明,影响土壤侵蚀模数空间分异的主要因素是NDVI、海拔和土地利用类型等下垫面因子。

在此基础上,对流域土壤侵蚀变化进行贡献率分析(表5),分离评判法结果表明,气候变化和人类活动对于减小昕水河流域土壤侵蚀的贡献率分别为−56.51%和156.51%。双累积曲线法结果表明,人类活动对土壤侵蚀变化的贡献占比为171.26%,而降水对土壤侵蚀变化的贡献占比为-71.26%。由此可见,两种方法的计算结果较为一致,结论较为可信,因此可以认为人类活动是降低昕水河流域土壤侵蚀的主要驱动因素。

表4 昕水河流域典型年份地理探测器的因子探测q值

Table 4 Factor detection q values of geodetector in typical years of Xinshui River Basin

因子/年份	1980年	1990年	2000年	2010年	2018年
土地利用类型	0.042	0.037	0.033	0.036	0.013
年降雨量	0.048	0.024	0.013	0.012	0.003
NDVI	0.091	0.084	0.033	0.023	0.006
坡度	0.006	0.005	0.002	0.001	0.002
海拔	0.048	0.037	0.034	0.029	0.020
砂粒含量	0.024	0.025	0.020	0.018	0.012
粉粒含量	0.024	0.025	0.019	0.018	0.013
黏粒含量	0.013	0.016	0.013	0.015	0.010
有机碳含量	0.017	0.019	0.010	0.010	0.008
GDP	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
人口密度	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

表 5　气候变化与人类活动对流域土壤侵蚀的影响

Table 5　Impacts of climate change and human activities on soil erosion in river basin

方法	土壤侵蚀变化量/(t·km^{-2})	降水造成的变化		人类活动造成的变化	
		变化量/(t·km^{-2})	贡献占比/%	变化量/(t·km^{-2})	贡献占比/%
分离评判法	−939.62	530.95	−56.51	−1470.57	156.51
双累积曲线法		669.57	−71.26	−1609.19	171.26

3.4　未来土壤侵蚀预测

3.4.1　未来土地利用预测　将预测的2018年土地利用结果与实际的2018年土地利用进行对比验证,得到Kappa值为0.924 8,表明该模拟结果预测精度较高,可以对2040年土地利用状况进行模拟,流域2040年土地利用预测状况见表6。结果表明,未来2040年流域耕地和建设用地面积都有所增加,而林地、草地和水域的面积均呈减少趋势。

表 6　2018年、2040年流域土地利用构成

Table 6　Land use composition of river basin in 2018 and 2040

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地
2018	940.52	1225.51	2110.38	4.19	37.04
2040	1074.15	1110.00	2081.26	4.01	46.23

3.4.2　土壤侵蚀预测结果　基于不同土地利用、植被恢复和气候变化情景,利用RUSLE模型预测2040年流域不同情景下的土壤侵蚀状况(图8,表7),16种情景均属于轻度侵蚀。在情景1下,流域土壤侵蚀模数为1 506.57 t/km^2,相较于变化期,该情景下土壤侵蚀增加了7.05%,可以看出未来土地利用变化会引起土壤侵蚀的增加。而情景2,3,4的土壤侵蚀模数相较于变化期,分别减少了2.72%,8.15%和12.78%,且在其他条件不变的情况下,植被恢复程度越高土壤侵蚀模数越小,说明植被覆盖度的增加对土壤侵蚀的减少起到了正向促进作用。情景5,6,7的土壤侵蚀模数相较于变化期,分别增加了36.98%,17.05%和41.20%,且在其他条件不变的情况下,降水量越大相应的土壤侵蚀模数也越大,说明未来气候变化会增加流域土壤侵蚀。在3种情景共同影响下,多数情景的土壤侵蚀相对于变化期会加剧,土壤侵蚀强度变化范围为1 329.24~1 762.02 t/km^2。

表 7　昕水河流域未来16种情景下的土壤侵蚀模数

Table 7　Soil erosion modulus under 16 future scenarios in Xinshui River Basin

编号	情景	土壤侵蚀模数/(t·km^{-2})
1	土地利用类型变化+植被恢复不变+气候不变	1506.57
2	土地利用类型不变+轻度植被恢复+气候不变	1369.03
3	土地利用类型不变+中度植被恢复+气候不变	1292.61
4	土地利用类型不变+高度植被恢复+气候不变	1227.56
5	土地利用类型不变+植被恢复不变+RCP2.6	1927.86
6	土地利用类型不变+植被恢复不变+RCP4.5	1647.38
7	土地利用类型不变+植被恢复不变+RCP8.5	1987.16
8	土地利用类型变化+轻度植被恢复+RCP2.6	1709.43
9	土地利用类型变化+轻度植被恢复+RCP4.5	1460.74
10	土地利用类型变化+轻度植被恢复+RCP8.5	1762.02
11	土地利用类型变化+中度植被恢复+RCP2.6	1626.73
12	土地利用类型变化+中度植被恢复+RCP4.5	1390.07
13	土地利用类型变化+中度植被恢复+RCP8.5	1676.77
14	土地利用类型变化+高度植被恢复+RCP2.6	1555.54
15	土地利用类型变化+高度植被恢复+RCP4.5	1329.24
16	土地利用类型变化+高度植被恢复+RCP8.5	1603.39

4　讨　论

4.1　土壤侵蚀结果评估对比分析

本文采用RUSLE模型评估了昕水河流域1981—2019年的土壤侵蚀状况,多年平均土壤侵蚀模数为1 913.31 t/km^2,属于轻度侵蚀强度,且呈现出下降趋势。近年来,关于黄河中游土壤侵蚀评估的研究较多,但是不同流域土壤侵蚀评价结果由于研究方法、下垫面条件、气候条件的不同也存在着一定差异。邹琴英[25]、齐清[26]、夏露等[18]分别对黄河中游的汾河

上游(1981—2018)、南小河沟(1986—2006)、砚瓦川流域(1981—2016)的土壤侵蚀量进行了评估,各流域多年平均土壤侵蚀模数分别为2 781.74 t/km^2,2 438.98 t/km^2,3 543.7 t/km^2,这与本文相应时段的土壤侵蚀模数结果较为一致。但是田鹏[27]、陈方磊[28]通过对皇甫川流域(1990—2010)和延河流域(1980—2010)土壤侵蚀进行评估发现其多年土壤侵蚀强度分别为12 733 t/km^2,6 082 t/km^2,该值较本研究结果偏大,这可能是因为其研究区处于黄土丘陵沟壑区,地形更加陡峭导致土壤侵蚀强度更加剧烈。

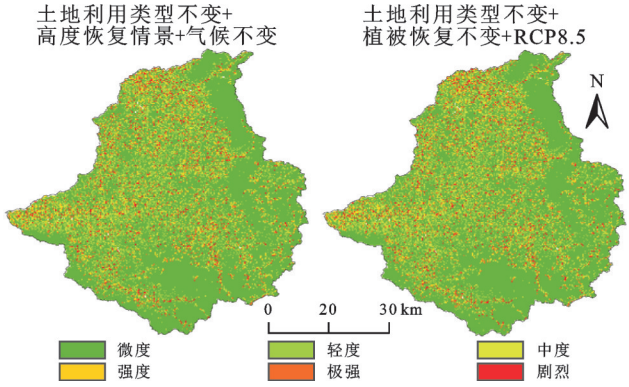


图8 流域未来两种典型情景下的土壤侵蚀强度预测

Fig. 8 Prediction of soil erosion intensity under two typical future scenarios in river basin

4.2 不同土地利用类型的土壤侵蚀特征

昕水河流域不同土地利用类型中,耕地和草地的土壤侵蚀强度较高,林地和建设用地的土壤侵蚀强度较轻。耕地虽然位于坡度较缓的区域,但由于其植被覆盖度低,对降雨的抗冲刷、抗侵蚀作用较弱,且由于频繁的耕作活动,土壤结构较为松散,使得耕地更易受到侵蚀。草地一般位于地形陡峭的区域,其LS因子一般较大,因此其土壤侵蚀强度较为剧烈。同时由于草地和耕地面积较大,导致其土壤侵蚀量分别占全流域的23.37%和45.53%,是流域土壤侵蚀的主要产沙区,因此未来应优先治理耕地和草地。林地虽然同处于地形陡峭的区域,但是其植被覆盖条件较优,因此其土壤侵蚀强度低于草地。

4.3 气候变化和人类活动对土壤侵蚀量的影响

地理探测器的因子探测结果表明,影响土壤侵蚀模数空间分异的主要因素是NDVI、海拔和土地利用类型等下垫面因子,结合定量分析的结果,表明人类活动是昕水河流域土壤侵蚀强度降低的主要原因,这与流域自1999年以来实施的退耕还林还草工程密切相关。该工程的实施改变了流域土地利用类型,使草地面积增加而耕地面积减少,增加了流域植被覆盖度,变化期的植被覆盖度较基准期增加了9.48%,从而提高了下垫面抗冲刷能力。因此,C因子在年际上呈现下降趋势,其年均值从基准期(1981—2001年)的0.114降低到变化期(2002—2019年)的0.083,从而降低了土壤侵蚀强度,这也是流域土壤侵蚀强度在2001年发生突变的原因。

分离评判法和双累计曲线法计算出气候变化的贡献率分别为-56.51%和-71.26%,人类活动的贡献率分别为156.51%和171.26%,人类活动对土壤侵蚀减少起正向主导作用,而气候变化(降雨侵蚀力增加)却增加了土壤侵蚀强度,这与陈利利[29]在窟野河流域的研究结果一致,其气候变化和人类活动对该流域1989—2011年土壤侵蚀降低的贡献率分别为-13.14%和113.14%。但是陈浩等[30]在北洛河上游的研究表明,其气候变化和人类活动对该流域1990—2010年土壤侵蚀降低的贡献率分别为15%和85%,这与本文研究结果不同,其主要原因是北洛河流域研究期间降雨侵蚀力的减少降低了土壤侵蚀强度。由于RUSLE模型未考虑淤地坝、谷坊等工程措施对流域土壤侵蚀的影响,因此可能会低估人类活动中工程措施对土壤侵蚀变化的贡献率,在以后的研究中还需要增加考虑淤地坝、谷坊等工程措施对流域土壤侵蚀的影响部分。

5 结 论

本论文分析了昕水河流域1981—2019年的土壤侵蚀演变规律,研究人类活动和气候变化对流域土壤侵蚀变化的影响,并对未来2040年流域土壤侵蚀状况进行了预测,结果表明:

(1)昕水河流域多年平均土壤侵蚀模数为1 913.31 t/km^2,其年值呈现下降趋势,且在2001年左右产生了突变,变化期(2002—2019年)的土壤侵蚀模数相较于基准期(1981—2001年)下降了40.04%。

(2)在变化期,耕地和草地的土壤侵蚀量分别占全流域的23.37%和45.53%,这表明二者是流域土壤侵蚀产生的主要区域。因此需要优先加强这两类区域的土壤侵蚀防治工作。

(3)地理探测器的因子探测结果表明,影响土壤侵蚀模数空间分异的主要因素是NDVI、海拔和土地利用类型等下垫面因子。分离评判法结果表明气候变化对流域土壤侵蚀降低的贡献率为-56.51%,而人类活动的贡献率为156.51%,双累计曲线法得出的相应贡献率分别为-71.26%和171.26%,由此可知,流域土壤侵蚀的减弱主要归因于人类活动的影响。

(4)未来土地利用变化和气候变化会加剧流域土壤侵蚀,而植被覆盖度增加对流域土壤侵蚀的减少起到促进作用。在土地利用、植被覆盖和气候变化综合影响下,流域未来土壤侵蚀多呈现增加的趋势。

参考文献(References):

[1] 谭永滨,谢剑亮,冉江华,等.基于RUSLE的鄱阳湖流域土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J].西南大学学报(自然科学版),2023,45(9):46-56.
Tan Y B, Xie J L, Ran J H, et al. Analysis of spatio-temporal change and influencing factors of soil erosion in Poyang Lake Basin based on RUSLE [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2023, 45(9):46-56.

[2] 秦伟,朱清科,张岩.基于GIS和RUSLE的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J].农业工程学报,2009,25(8):157-163.
Qin W, Zhu Q K, Zhang Y. Soil erosion assessment of small watershed in Loess Plateau based on GIS and RUSLE[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(8):157-163.

[3] 闫瑞,张晓萍,李够霞,等.基于RUSLE的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究[J].水土保持学报,2017,31(4):32-37.
Yan R, Zhang X P, Li G X, et al. Soil erosion and sediment yield assessment based on RUSLE in Beiluo River on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(4):32-37.

[4] 刘兴宇,宋宏利,李润杰,等.黄河流域青海段2000—2020年土壤侵蚀时空动态变化[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(2):251-259.
Liu X Y, Song H L, Li R J, et al. Spatiotemporal dynamic changes of soil erosion in the Qinghai section of Yellow River Basin from 2000 to 2020 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025,23(2):251-259.

[5] 廖俊,焦菊英,严增,等.RUSLE模型对黄土高原退耕植被恢复坡面土壤侵蚀的模拟效果分析[J].水土保持学报,2024,38(2):97-108.
Liao J, Jiao J Y, Yan Z, et al. Simulation effect analysis of RUSLE model on slope soil erosion restored by reclaimed vegetation in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):97-108.

[6] 冷曼曼.黄土高原昕水河流域径流泥沙对人类活动和气候变化的响应[D].北京:北京林业大学,2021.
Leng M M. Response of streamflow and sediment load to human activities and climate change in Xinshui river watershed of the Loess Plateau, China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.

[7] Suhara K K S, Varughese A, Sunny A C, et al. Erosivity factor of the revised universal soil loss equation (RUSLE) : a systematized review [J]. Current World Environment, 2023,18(2):433-445.

[8] Kim S, Hur S O, Kwak J, et al. Development of web-based decision support tool for rainfall erosivity estimation using both high-resolution rainfall data and simplified models [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2025, 13(3): 600-614.

[9] 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.

[10] Al-Madhhachi A T, Fox G A, Hanson G J, et al. Mechanistic detachment rate model to predict soil erodibility due to fluvial and seepage forces [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,140(5):04014010.

[11] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion losses: a guide for Conservation Planning [M]. Washington D C: United States Department of Agricultural-Handbook, 1978:537.

[12] Panagos P, Borrelli P, Meusburger K, et al. A new European slope length and steepness factor(*LS*)for modeling soil erosion with RUSLE[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014:EGU2014-14449.

[13] 刘宝元,谢云,张科利,等.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, et al. Soil Loss Prediction Model [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.

[14] Xiong M Q, Leng G Y, Tang Q H. Global analysis of the cover-management factor for soil erosion modeling [J]. Remote Sensing, 2023,15(11):2868.

[15] 穆兴民,李朋飞,刘斌涛,等.1901—2016年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制[J].人民黄河,2022,44(9):36-45.
Mu X M, Li P F, Liu B T, et al. Spatial-temporal development and driving mechanisms of erosion on the Chinese Loess Plateau between 1901 and 2016 [J]. Yellow River, 2022,44(9):36-45.

[16] 李天宏,郑丽娜.基于RUSLE模型的延河流域2001—2010年土壤侵蚀动态变化[J].自然资源学报,2012,27(7):1164-1175.
Li T H, Zheng L N. Soil erosion changes in the Yanhe watershed from 2001 to 2010 based on RUSLE model[J]. Journal of Natural Resources, 2012,27(7):1164-1175.

[17] 王超.基于RS/GIS的渭河流域土壤侵蚀评价研究[D].西安:西北大学,2010.
Wang C. RS and GIS based soil erosion assessment in Weihe basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.

[18] 夏露.基于绿水理论的砚瓦川流域生态水文过程对变化环境的响应[D].西安:西安理工大学,2019.
Xia L. Responses of eco-hydrological process to changing environment in Yanwachuan basin based on green water theory[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

[19] Then Y J, Abdul Halim S. Modified Mann-Kendall with higher-order statistics for trend analysis[J]. Scientific Reports, 2026,16:500.

[20] Li Z C, Yu S H, Li X. Study on the spatial characteristics and influencing factors of night-time economic forms from the perspective of the integration of culture and tourism[J]. Sustainability, 2025,17(22):10063.

[21] Wang H L, Wang Z Z, Bai Y, et al. Propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought considering nonlinear correlations: a case study of the Hanjiang River Basin, China[J]. Ecological Informatics, 2024,80:102512.

[22] Morgan M J, Watamaniuk S N J, McKee S P. The use of an implicit standard for measuring discrimination thresholds[J]. Vision Research, 2000,40(17):2341-2349.

[23] Gan R, Gu S Q, Tong X X, et al. A nonparametric standardized runoff index for characterizing hydrological drought in the Shaying River Basin, China[J]. Natural Hazards, 2024,120(3):2233-2253.

[24] Wang S Q, Zheng X Q. Dominant transition probability: Combining CA-Markov model to simulate land use change[J]. Environment, Development and Sustainability, 2023,25(7):6829-6847.

[25] 邹琴英,师学义,付扬军,等.基于RUSLE的汾河上游土壤侵蚀特征分析[J].人民黄河,2020,42(11):74-78,121.
Zou Q Y, Shi X Y, Fu Y J, et al. Analysis of soil erosion characteristics of the upstream of the Fenhe River based on RUSLE[J]. Yellow River, 2020,42(11):74-78,121.

[26] 齐清,王天明,寇晓军,等.基于GIS的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价[J].水土保持研究,2009,16(3):1-5,37.
Qi Q, Wang T M, Kou X J, et al. Quantitative assessment of soil erosion in small watershed in Loess Plateau based on GIS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009,16(3):1-5,37.

[27] 田鹏,赵广举,穆兴民,等.基于改进RUSLE模型的皇甫川流域土壤侵蚀产沙模拟研究[J].资源科学,2015,37(4):832-840.
Tian P, Zhao G J, Mu X M, et al. A modified RUSLE model to estimate sediment yield in the Huangfuchuan watershed[J]. Resources Science, 2015,37(4):832-840.

[28] 陈方磊,王计平,程复,等.1980—2020年延河甘谷驿流域土壤侵蚀评价与驱动因子分析[J].湖北农业科学,2024,63(6):27-34,59.
Chen F L, Wang J P, Cheng F, et al. Evaluation of soil erosion and analysis of driving factors in the Ganguyi Watershed of Yanhe River from 1980 to 2020[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2024,63(6):27-34,59.

[29] 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.

[30] 陈浩,张晓萍,王豆豆,等.北洛河上游流域土壤侵蚀变化及影响因素分析[J].中国水土保持科学,2023,21(2):64-73.
Chen H, Zhang X P, Wang D D, et al. Analysis of soil erosion changes and its influencing factors in the upper reaches of Beiluo River watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(2):64-73.

(上接第177页)

[26] 曲芷程,黄绍普,刘司博,等.1963—2020年蒙古锡林河流域极端气候及其对水文干旱的影响[J].生态学报,2025,45(11):5386-5397.
Qu Z C, Huang S P, Liu S B, et al. Extreme climate and its impact on hydrological drought in the Xilin River Basin of Inner Mongolia over the past 60 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(11):5386-5397.

[27] 刘英,雷少刚,李心慧,等.干旱矿区植被引导型修复中干旱阈值的生态机制[J].煤炭学报,2023,48(6):2550-2563.
Liu Y, Lei S G, Li X H, et al. Ecological mechanisms underlying aridity thresholds in arid mining areas for vegetation guided restoration[J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(6):2550-2563.

[28] 傅伯杰,刘焱序,王帅,等.科学改善荒漠化地区人与自然关系[J].中国科学院院刊,2024,39(12):2027-2036.
Fu B J, Liu Y X, Wang S, et al. Scientifically improving human-nature relationship in desertification areas[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024,39(12):2027-2036.

[29] 李倩茹,贾彦龙,王慧军,等.基于生态功能区的河北省生态系统服务权衡与协同分析[J].地理学报,2023,78(11):2833-2849.
Li Q R, Jia Y L, Wang H J, et al. Analysis of trade-off and synergy effects of ecosystem services in Hebei Province from the perspective of ecological function area[J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(11):2833-2849.

[30] 侯迎,姚诗雨,褚阳,等.黄河流域植被生产力水分胁迫的时间效应及其时空转变特征[J].地理科学,2025,45(3):640-651.
Hou Y, Yao S Y, Chu Y, et al. Time effect and spatio-temporal variation characteristics of water stress on vegetation productivity in the Yellow River Basin[J]. Geographical Science, 2025,45(3):640-651.