

黄土高原丘陵沟壑区降雨侵蚀力的 时空分布与变化趋势

杨淋¹, 张建国², 张建军¹, 张勇勇³

[1.中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2.黄河水利委员会黄河上中游管理局, 陕西 西安 710021; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院, 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站/中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000]

摘要: [目的] 探究黄土丘陵沟壑区长时间序列降雨侵蚀力(1970—2020年)时空分布特征及变化趋势, 揭示该区域土壤侵蚀的主要驱动力及其动态变化规律, 为制定区域水土流失防治策略、修复脆弱的黄土高原生态系统提供有益参考。[方法] 基于1970—2020年该区域67个气象站的降雨数据, 采用基于日降雨量的简易算法模型, Machisplin插值法, Mann-Kendall法和小波分析法研究了黄河中游黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力的时间序列的突变点、趋势变化、周期性及空间分布特征。[结果] 该区域多年平均降雨侵蚀力范围为739.97~1749.03 (MJ·mm)/(hm²·h), 空间上由东南向西北递减。年际变化上, 降雨侵蚀力整体呈小幅度增长趋势, 最高年值为2013年的1915.09 (MJ·mm)/(hm²·h), 最低年值为1974年的741.18 (MJ·mm)/(hm²·h)。年内分布中暖季降雨侵蚀力强度明显强于冷季, 暖季的多年平均降雨侵蚀力达到599.01~1742.95 (MJ·mm)/(hm²·h), 而冷季仅有27.61~171.11 (MJ·mm)/(hm²·h)。[结论] 该区降雨侵蚀力呈现由东南向西北递减, 年平均降雨侵蚀力呈现上升趋势, 且年际间的波动较大, 上升的黄土丘陵沟壑区的降雨侵蚀力在改善当地气候条件的同时, 对当地的水土保持措施的功能稳定发挥和水土流失治理工作提出挑战。

关键词: 降雨侵蚀力; 时空变化; 黄土丘陵沟壑区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0223-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 杨淋, 张建国, 张建军, 等. 黄土高原丘陵沟壑区降雨侵蚀力的时空分布与变化趋势[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 223-231. Yang Lin, Zhang Jianguo, Zhang Jianjun, et al. Spatiotemporal distribution and variation of rainfall erosivity in hilly and gully areas of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 223-231. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.023; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.023.

Spatiotemporal distribution and variation of rainfall erosivity in hilly and gully areas of Loess Plateau

Yang Lin¹, Zhang Jianguo², Zhang Jianjun¹, Zhang Yongyong³

[1. College of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Upper and Middle Yellow River, YRCC, Xi'an, Shanxi 710021, China; 3. Chinese Ecosystem Network Research Linze Inland River Basin Research Station/Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China]

Abstract: [Objective] The spatial and temporal distribution characteristics and variation trend of long-term sequence rainfall erosivity in loess hilly and gully region during 1970—2020 were explored, and the main driving force of soil erosion in this region and its dynamic change law were revealed, in order to provide a useful reference for formulating regional soil and water conservation prevention and control strategies and repairing fragile Loess Plateau ecosystem. [Method] Based on the rainfall data of 67 meteorological stations

收稿日期: 2024-08-29

修回日期: 2024-12-04

采用日期: 2024-12-05

资助项目: 黄委优秀青年人才科技项目“黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀模型参数本地化研究”(HQB-202303)

第一作者: 杨淋(2000—), 女(汉族), 浙江省青田县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀、水土保持规划。Email: 2012230051@E-mail.cugb.edu.cn.

通信作者: 张建国(1986—), 男(汉族), 山东省肥城市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持监测及生态恢复研究。Email: zhangjidezs@163.com.

in the region from 1970 to 2020, a simple algorithm model based on daily rainfall, Machisplin interpolation method, Mann-Kendall method and wavelet analysis method were used to study the abrupt change point, trend change, periodicity and spatial distribution characteristics of the time series of rainfall erosive power in the hilly and gully region of Loess Plateau in the middle reaches of the Yellow River. [Results] The average annual rainfall erosivity range in this region was $739.97 \sim 1749.03$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$), spatially decreasing from southeast to northwest. The overall erosive power of rainfall weakly increased interannually, with highest and lowest annual values of 1915.09 MJ and 741.18 ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$) in 2013 and 1974, respectively. The rainfall erosivity intensity was markedly stronger in the warm season than in the cold season, with an average annual rainfall erosivity of $599.01 \sim 1742.95$ and $27.61 \sim 171.11$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$), respectively. [Conclusion] The erosive power of rainfall in this area decreased from southeast to northwest, and the annual average erosive power of rainfall trended upward, but with notable interannual fluctuations. The increasing erosive power of rainfall in loess hilly and gully areas not only improves local climate conditions but also poses challenges to the stable functioning of local soil and water conservation measures and soil erosion control work.

Keywords: rainfall erosivity; spatiotemporal changes; hilly-gullied loess region

水土流失是世界性的环境问题之一^[1]。通常采用降雨侵蚀力作为评价降雨引起水土流失潜在能力的评价指标^[2-3],这一指标能够反映降雨强度、降雨量、降雨历时等特征对土壤结构的破坏以及对土壤搬运的潜在影响^[4]。20世纪50年代,美国学者 W. H. Wischmeier 等首次提出以次降雨总动能 E 与 30 min 最大雨强 I_{30} 的乘积 EI_{30} 作为衡量次降雨侵蚀能力大小的指标即降雨侵蚀力(R 值)^[5],此后,这一指标被广泛应用于土壤侵蚀的研究中。由于 R 值的计算需要的完整的降雨过程资料获取困难,并且计算过程繁琐复杂,国内学者提出了利用比较容易获得的降雨量指标代替需要降雨过程的动能指标的简易算法。其中,基于年降雨量与月降雨量计算的降雨侵蚀力,降雨资料获取相对容易,是较为常见的一类降雨侵蚀力算法,但计算结果较为粗糙,与实际降雨侵蚀力有所差距,而基于日降雨量的降雨侵蚀力算法,能够提供更多的降雨特征,能够更准确地表现实际降雨侵蚀力情况,应用更为广泛^[6]。2002年章文波等^[7]利用全国71个代表性气象站资料,建立利用日降雨量估算降雨侵蚀力的简易算法模型在中国使用最为广泛。2016年谢云等^[8]提出划分侵蚀性和非侵蚀性日降雨量的最佳阈值为 10 mm,能够避免低估降雨侵蚀力的情况。在全球气候变化的背景之下,深入研究降雨侵蚀力的变化规律以及影响因素,对预测土壤侵蚀过程、评估区域土壤侵蚀风险以及预防水土流失具有重要意义。

水土流失现象易受地区自然环境影响,其中,黄土高原地区自然地理条件复杂、空间组合变化明显,地区间的水土流失情况有显著差异。国家发展和改

革委员会在《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030年)》中依据专题性分区、自然条件和资源组合特征的相对一致性、综合治理措施和途径的相对一致性、行政区界的相对完整性等原则,将黄土高原划分为黄土高塬沟壑区、黄土丘陵沟壑区、土石山区、河谷平原区、沙地和沙漠区、农灌区6个综合治理区,其中黄土丘陵沟壑区地形破碎,沟壑纵横,水土流失尤为严重。由于该区降雨侵蚀力的时空变化对区域的水土流失具有显著影响,因此近些年来有众多学者对其开展了研究工作。陈晓安等^[9]着重分析岔巴沟流域不同雨型下降雨侵蚀力与土壤侵蚀模数的关系,指出不同雨型降雨集中程度差异大,对土壤侵蚀影响程度不同。赵文武等^[10]以 rain_9 (每月中日降雨量大于等于 9 mm 时的日降雨量之和)为自变量构建月降雨侵蚀力计算模型,并估算了延河流域的降雨侵蚀力空间分布。为进一步提高模拟精度,钟莉娜等^[11]对比了8种模型研究陕北黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力,并修正了简易模型,可在一定条件下较好地模拟降雨侵蚀力的影响。然而,大部分学者对于黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力的研究主要集中在小流域降雨侵蚀力的时空分布以及降雨侵蚀力的算法改进上,相比之下,针对黄土丘陵沟壑区整个区域范围,降雨侵蚀力的时空分布规律及其空间变化特征的综合性研究仍显不足,而这一研究对于研究更大空间尺度的降雨侵蚀力的影响,以及更好地评估水土流失是尤为重要的。基于这一需要,本文以黄土高原丘陵沟壑区为研究对象,探讨区域长时间序列降雨侵蚀力的空间特征与变化趋势,揭示该区域土壤侵蚀的主要驱动力及其动态变化规律,为制定区域水土流失防治策略、修复脆弱的黄土高原生态系统提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土丘陵沟壑区主要分布在黄河中游托克托县至乡宁县间的黄河两岸支流及无定河、北洛河上游,涉及陕西、山西、内蒙古三省(自治区)的 61 个县(市、区、旗),总面积约为 $1.41 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)。该区域主要为温带大陆性气候,也受温带季风气候的影响,四季分明,春季干燥少雨、多风;夏季炎热,多有集中性降雨;秋季凉爽,冬季干燥寒冷,年均温为 $5 \sim 11.5 \text{ }^\circ\text{C}$,降雨主要集中在 5—9 月,多以暴雨的形式出现,年均降水量为 $300 \sim 550 \text{ mm}$,空间分布由西北向东南递减。区域丘陵起伏、沟壑纵横,海拔范围为 $388 \sim 2791 \text{ m}$,平均海拔 1263 m 。该地区的土壤以黄绵土为主,由黄土母质历经自然发育过程而形成,土壤土质疏松,抗蚀性较差。黄土丘陵沟壑区是黄土高原水土流失最为严重的地区之一,水力侵蚀是区域土壤侵蚀的主要类型,由于黄土丘陵沟壑区雨季集中,夏季多暴雨和强降水,加之黄土结构疏松,具多孔性和富垂直节理,导致水土流失严重。

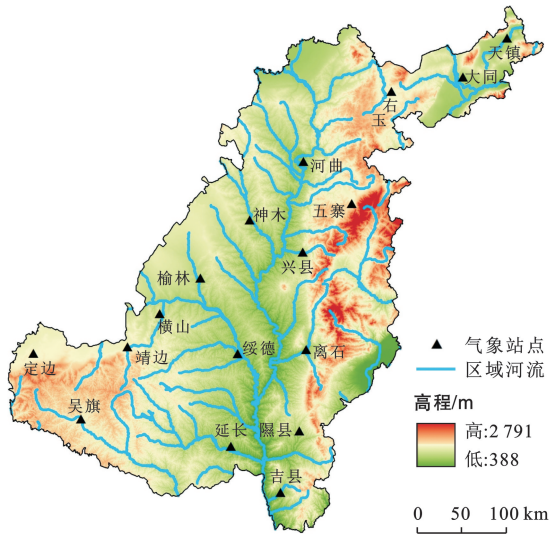


图 1 黄土丘陵沟壑区地形及气象站分布

Fig.1 Terrain of hilly and gully areas of Loess Plateau and distribution of weather stations

1.2 数据来源

本研究采用的 DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>),降雨数据来源于国家气象信息中心的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。研究选取了黄土高原地区 67 个气象站 1970—2020 年每天的 20 时及次日 20 时的降雨量数据,为了避免不同站点数据起始时间不同或局部数据缺测情况,本研究按欧洲气候评估数据集方法筛选数据,即:①数据不得少于 40 a;

②单个站点缺失数据不得超过 10%;③每一年缺失数据不得超过 20%或超过连续 3 个月。对于单个站点的若干数据的缺失,采用附近 2 个及以上观测站点降水量的平均值进行插补,得到完整序列降雨数据^[12]。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力的计算 本文采用 Xie Yun 等^[8]基于中国各流域建立的日降水量模型计算降雨侵蚀力,计算方法为:

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^k P_j^{1.7265} \quad (1)$$

式中: M_i 表示一年中第 i 个半月的降雨侵蚀力; P_j 表示侵蚀性降雨量,即半月内第 j 天 $\geq 10 \text{ mm}$ 的日雨量; α 为模型参数,在谢云等^[8]的模型中, α 的值按照冷季与暖季赋值,冷季(10 月至次年 4 月)为 0.310 1,暖季(5—9 月)为 0.393 7。通过统计各个半月的降雨侵蚀力可以获得月、季、年降雨侵蚀力。

1.3.2 时间变化分析 Mann-Kendall 检验法作为一种非参数统计检验,能够有效检测降雨侵蚀力时间序列中的突变点和趋势变化^[13-14],被广泛应用于气候变化、水文气象等领域,适用于分析降雨侵蚀力的长期变化趋势。而小波分析擅长处理非平稳信号,能通过时域和频域分析,揭示降雨侵蚀力的周期性变化规律及其在不同时间尺度上的特征,有助于理解降雨侵蚀力的复杂变化机制。本研究为了全面揭示区域降雨侵蚀力的变化趋势与周期变化,采用 Mann-Kendall 法和小波分析 2 种方法研究区域降雨侵蚀力的趋势变化与周期变化。

(1) Mann-Kendall 检验法。Mann-Kendall 检验法在分析长时间序列降雨侵蚀力数据时,能检测数据序列中是否存在显著的趋势变化,并确定这一变化趋势是否具有统计学意义上的显著性。将降雨侵蚀力数据按照时间序列依次排布为 $X_n = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$,则统计量 S 为:

$$S = \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{k=m+1}^n \text{sgn}(x_k - x_m) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_k - x_m) = \begin{cases} -1 & (x_k - x_m < 0) \\ 0 & (x_k - x_m = 0) \\ 1 & (x_k - x_m > 0) \end{cases} \quad (3)$$

计算统计变量 Z 值:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\text{var}(S)} & (S < 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\text{var}(S)} & (S > 0) \end{cases} \quad (4)$$

z 值大于 0 时,表明时间序列存在上升趋势;而当 z 值小于 0 时,则表明数据序列存在下降趋势。MK 检

验也可以通过正序列 UF_k 和逆序列 UB_k 统计量判断突变开始时间,即 UF_k 和 UB_k 曲线的交点。

(2) 小波分析法。小波分析能在降雨侵蚀力长时间序列研究中,精确识别气候变化的周期性特征,并有效监测突变点^[15]。复小波系数是小波分析中的一个重要概念,是通过复小波变换所得,在处理气候长时间序列中具有显著作用,计算公式为:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (5)$$

式中: a 是尺度参数; b 是平移参数; $\psi_{a,b}^*$ 是复小波函数的复共轭。

降雨侵蚀力在长时间尺度中的周期效应可以通过小波分析的实部、模、模方及方差来反映^[16]。

1.3.3 空间插值方法 Machisplin 是由 Jason L. Brown 分享在 GitHub 上的插值代码,是气象数据空间插值软件 ANUSPLIN 的免费开源机器学习模拟。Machisplin 是通过使用薄板平滑样条曲线和机器学习组合进行综合分析,能够引入多个影响因子作为协变量,对嘈杂的多变量数据进行插值。Machisplin 利用机器学习算法(如随机森林、支持向量机等)的插值方法通常能够捕捉数据中的复杂关系和非线性趋势,从而提升插值的精度,并且其对噪声和异常值具有一定的容忍度,能够减少噪声与异常值对插值的影响,达到最佳插值效果。Machisplin 插值既具备 ANUSPLIN 软件高精度插值、多变量数据支持、灵活性强等优点,又规避了其学习曲线陡峭、脚本输入易出错以及软件兼容性问题等缺点,具有很强的实用性。本研究在 RStudio 中利用 Machisplin 进行空间插值,实现降雨侵蚀力的可视化,分析其空间特点。

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力时间分布特征

本研究对黄土丘陵沟壑区 1970—2020 年的降雨侵蚀力进行了空间插值处理,进而计算得出该区域在此 51 a 间的平均降雨侵蚀力值,此平均值被用作分析基础,以深入探讨黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力随时间变化的趋势特征及其潜在的周期性波动。1970—2020 年黄土丘陵沟壑区平均降雨侵蚀力变化见图 2。黄土丘陵沟壑区在 1970—2020 年的 51 a 间降雨侵蚀力呈现出明显的波动趋势,年降雨侵蚀力最高值为 2013 年 1 915.09 (MJ·mm)/(hm²·h),最低值为 1974 年的 741.18 (MJ·mm)/(hm²·h),震荡幅度达到了 1 173.91 (MJ·mm)/(hm²·h)。从 5 a 滑动平均线可以看出,尽管短期内有波动,但长期趋势为小幅度上升的趋势。利用 Matlab 对区域近 51 a 的降雨侵蚀力进行 MK 检验, $|Z| = 2.6$, 大于 2.32, 显著性检验大于 99%, 存在显著的趋势性变化。基

于 MK 检验图(图 3)分析可得,1970—2020 年 UF 统计量大部分时间大于 0,也证明了黄土丘陵沟壑区的降雨侵蚀力年降雨侵蚀力在 51 a 间主要呈升高的趋势。黄土丘陵沟壑区长时间序列降雨侵蚀力的突变性可以通过突变点显示,突变点均在 0.05 显著水平线内,置信水平达到 95%, UF 和 UB 统计量曲线在置信区间内有 3 个交点,即发生突变的时间点,分别在 1977—1978, 1978—1979, 以及 2011—2012 年。在 1977—1979 年的两个交点处 $UF > 0$, 在 2011—2012 年的交点处 $UF < 0$, 但 UF 曲线的并没有通过 95% 置信水平,因此年降雨侵蚀力并没有显著突变。

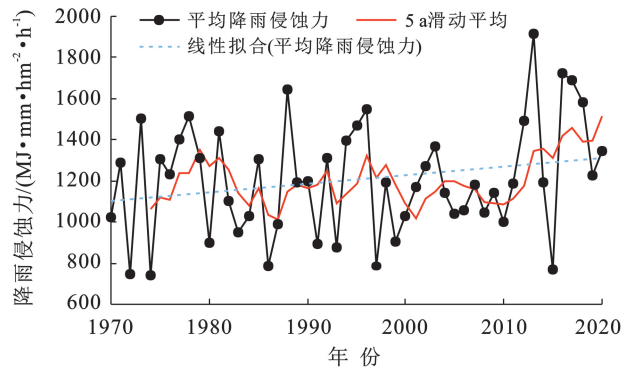


图 2 黄土丘陵沟壑区 1970—2020 年降雨侵蚀力年际变化
Fig.2 Interannual variation of rainfall erosivity in hilly and gully areas of Loess Plateau from 1970 to 2020

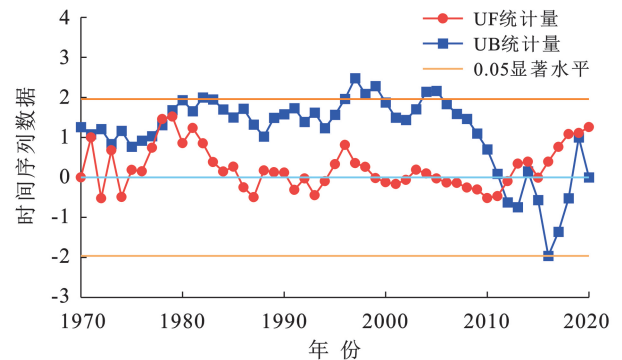


图 3 1970—2020 年黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力趋势检验
Fig.3 Trend test of rainfall erosivity in hilly and gully areas of Loess Plateau from 1970 to 2020

对黄土丘陵沟壑区 1970—2020 年时间序列的降雨侵蚀力开展小波分析可以得到其周期变化情况(见图 4)。小波实部等值线图实部为正数且数值越大,表示降雨侵蚀力相对更大。从图 4 中可以明显看出黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力出现了“强—弱”交替的周期,在 51 a 的时间序列里,区域年降雨侵蚀力随时间尺度变化过程中存在着 2, 3, 5~9, 27 a 等多时间尺度的周期变化特征。根据降雨侵蚀力小波方差图可以发现,年降雨侵蚀力的周期变化主要存在 5 个峰值,最大峰值点即第一主周期在 43 a,说明降雨侵蚀

力序列在 43 a 左右周期震荡最强,在 43 a 的时间尺度中,降雨侵蚀力的周期为 27 a,经过了两轮“减弱—增强”的循环交替,并且在 1995 年之后,出现更加明

显的周期变化。第二主周期为 8 a,在 8 a 的时间尺度下降雨侵蚀力的周期为 5~7 a,在研究期内经历了“增强—减弱”约 9 个周期变化特征。

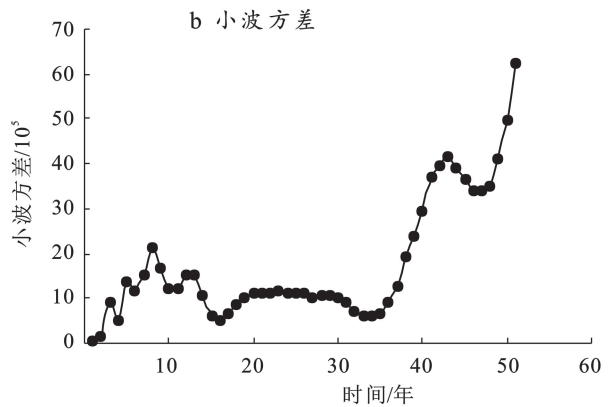
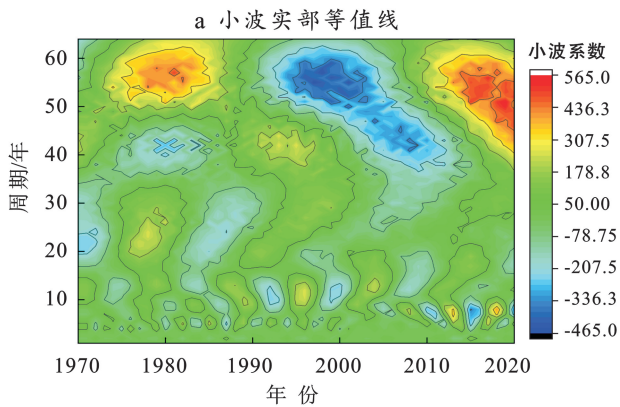


图 4 1970—2020 年黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力小波检验周期性变化

Fig.4 Periodic variation of rainfall erosivity in hilly and gully areas of Loess Plateau based on wavelet analysis during 1970—2020

2.2 降雨侵蚀力空间分布特征

黄土丘陵沟壑区的地形差异较大,最低海拔与最高海拔之间差距 2 403 m,在研究其降雨侵蚀力时还需考量地形因素对其的影响,本研究使用 Machisplin 对研究区降雨侵蚀力进行空间插值,得到多年降雨侵蚀力空间分布格局图。黄土丘陵沟壑区在 1970—2020 年,多年平均降雨侵蚀力为 1 206.63 (MJ · mm)/(hm² · h)。降雨侵蚀力最高分布在吉县站附近,达到 1 749.03 (MJ · mm)/(hm² · h),最低分布在定边站附近,仅有 739.97 (MJ · mm)/(hm² · h),在空间分

布上降雨侵蚀力呈东南向西北递减的趋势,与多年平均降雨量分布一致(如图 5 所示)。根据降雨侵蚀力的大小可以将黄土丘陵沟壑区大致分为 3 个部分,西部地区的定边站、靖边站、衡山站、榆林站、右玉站和大同站,降雨侵蚀力在 700~1 000 (MJ · mm)/(hm² · h)之间,中部地区包括神木站、河曲站、绥德站、兴县站以及五寨站,降雨侵蚀力在 1 000~1 300 (MJ · mm)/(hm² · h)之间,东南部地区包括离石站、延长站、隰县站以及吉县站,降雨侵蚀力大致分布在 1 300 (MJ · mm)/(hm² · h)以上。

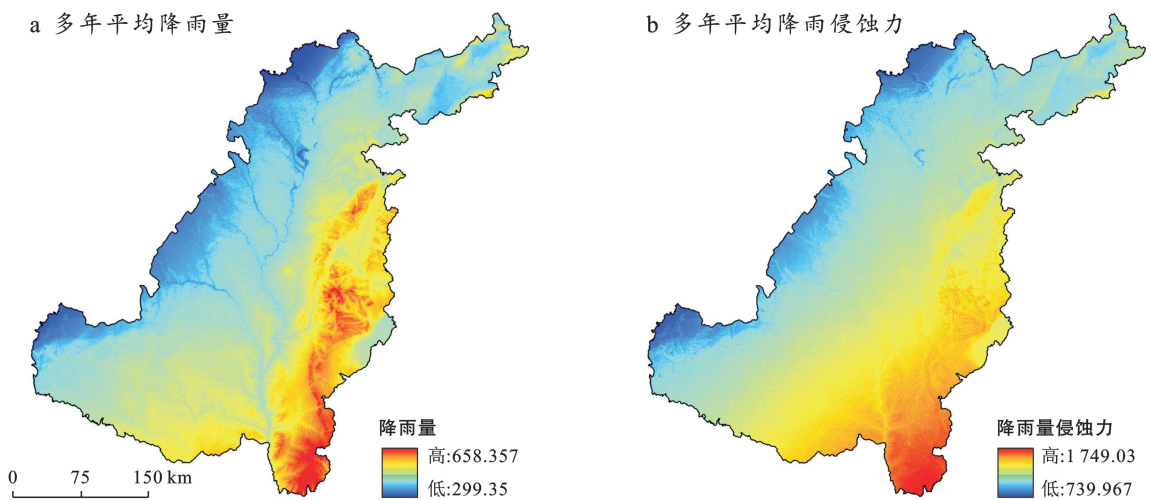


图 5 黄土丘陵沟壑区多年平均降雨量与降雨侵蚀力空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution of annual average rainfall and rainfall erosivity in hilly and gully areas of Loess Plateau

自 1 970 到 2020 年,黄土丘陵沟壑区的降雨侵蚀力的变化见图 6。通过降雨侵蚀力变化空间示意图可以看出,研究区的降雨侵蚀力在 1970—1990 年以及 1991—2005 年的变化形式大致相似主要呈现出东南部升高,西北部略有降低的形式。1970—1990

年降雨侵蚀力提高的面积为 88 998.8 km²,占总面积的 63.35%,1991—2005 年降雨侵蚀力提高的面积为 78 624.1 km²,占总面积的 55.97%。

降雨侵蚀力提高最多的地方主要是黄土丘陵沟壑区的东南部,降雨侵蚀力下降的区域主要是榆林市

和呼和浩特市等流域的西北区域。而在 2006—2020 年,黄土丘陵沟壑区全域的降雨侵蚀力均有提高的现

象,其中降雨侵蚀力提高最显著的区域在山西省的吕梁市和忻州市。

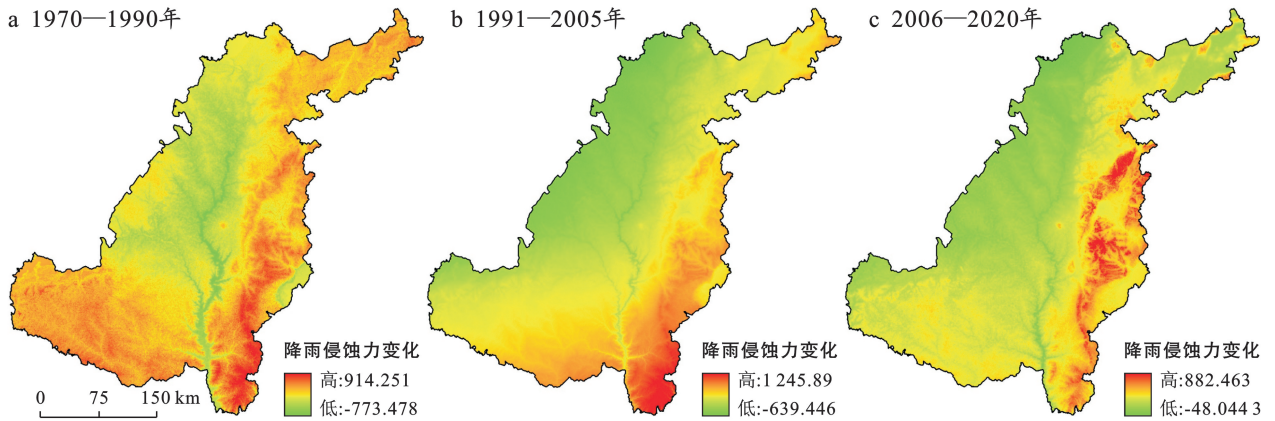


图 6 1970—2020 年黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力空间变化

Fig.6 Spatial variation of rainfall erosivity in hilly and gully areas of Loess Plateau from 1970 to 2020

2.3 降雨侵蚀力冷暖季的空间分布

降雨侵蚀力作为预测土壤侵蚀的关键因子,其季节性差异对土壤侵蚀潜力的评估至关重要。在季风气候影响的地区,降雨在一年内的分布并不均匀,随季节显著变化,冷季和暖季的降雨强度、频率和总量均存在显著差异。暖季降雨更为频繁且强度较大,而冷季降雨则相对较少且强度较弱。此外季节变化还会影响土壤和植被的状态,因此,在研究降雨侵蚀力的变化时还需考虑冷暖季的差异。黄土丘陵沟壑区冷暖季的降雨侵蚀力如图 7 所示。降雨侵蚀力差异相对较大,由于黄土丘陵沟壑区属于暖温带半干旱大陆性季风气候,冬冷夏热,降水主要集中在夏季,且年际变化大,夏季是暖季的主要时间段,因此暖季的降

雨相比于冷季更多,降雨侵蚀力相对于冷季也更大。黄土丘陵沟壑区暖季的多年平均降雨侵蚀力为 $599.01 \sim 1\ 742.95$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,暖季时研究区的降雨侵蚀力自东南向西北递减,降雨侵蚀力大部分都大于 $1\ 000$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,小于 $1\ 000$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 的区域仅有 $31\ 306.8$ km^2 ,仅占总面积的 22.2% 。在暖季中,7、8 月受季风影响最大,降雨量大且多暴雨,因此 7、8 月的降雨侵蚀力强度最大。冷季的降雨侵蚀力也自东南向西北递减,但冷季的降雨侵蚀力强度总体而言较低,多年平均降雨侵蚀力为 $27.61 \sim 171.11$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,冷季蒙古高压势力增强,黄土丘陵沟壑区受到冬季风影响,寒冷干燥,降水少,降雨侵蚀力也低。

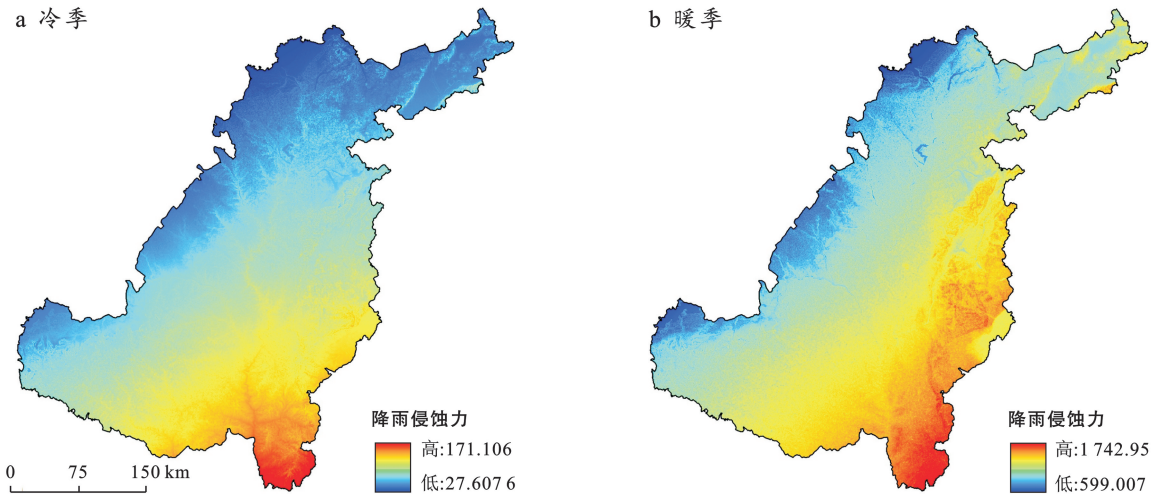


图 7 黄土丘陵沟壑区冷暖季降雨侵蚀力空间分布

Fig.7 Spatial distribution of rainfall erosivity in cold and warm seasons in hilly and gully areas of Loess Plateau

3 讨论

本研究对黄土丘陵沟壑区 1970—2020 年降雨侵

蚀力的时空分布与变化趋势进行了深入分析,本研究发现,黄土丘陵沟壑区在过去 51 a 间的降雨侵蚀力年际差异较大,但整体呈一定上升趋势,并存在 43 和

8 a 的周期变化。这一结果与多数区域降雨侵蚀力的变化趋势相一致。如孙从建等^[17]在黄土高原塬面保护区开展的研究指出,黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力总体上呈现一定的增长趋势,且有明显的季节差异,并存在 32 a 的大周期,在大周期内还存在 13.52 a 的小周期。雷杨娜等^[18]指出,陕西省近 40 a 来降雨侵蚀力年际波动较大,整体呈现上升趋势,并且降雨侵蚀力经历了先减小后增大的变化趋势,当前处于降雨侵蚀力相对较大的时期,并且陕西省降雨侵蚀力存在 2~4, 8 和 31~32 a 共 3 个时间尺度的振荡周期。章文波等^[19]的早期研究也证明了全国大部分地区的降雨侵蚀力年际变化呈现不同程度的正趋势,然而,陈剑南等^[20]在研究 1901—2016 年黄土高原降雨侵蚀力时空变化指出黄土高原降雨侵蚀力变化不显著且无明显突变点,这种差异可能与研究区时间尺度以及所选用的降雨侵蚀力计算方法不同有关。降雨是影响侵蚀力的主要因素,张玉虎等^[21]在沂河流域以

及艾明乐等^[22]在泾河流域的研究都指出,降雨量与降雨侵蚀力呈显著正相关,计算 1970—2020 年黄土丘陵沟壑区平均年降雨,并求出年均降雨量与年均降雨侵蚀力与其平均之差,分别进行累加得到两者的累计距平(见图 8),黄土丘陵沟壑区的年均降雨量与年均降雨侵蚀力变化趋势相似,两者的对应关系也表明,降雨量较高的年份,土壤侵蚀的风险也会相应增加。此外,降雨侵蚀力的周期变化在很大程度上受制于该区域气候要素的波动周期,而太阳黑子和大气环流的异常活动通过影响气候的周期性变化进而影响降雨侵蚀力。太阳活动的变化可以引起大气环流的改变,研究表明,太阳黑子数 8~11.4 a 的显著性周期对区域降水具有一定的影响作用^[23-24],此外,大气环流厄尔尼诺现象(ENSO)也存在 2~7 a 的变化周期^[25],更长周期的气候现象如太平洋 10 a 际振荡(PDO)、大西洋年代际振荡(AMO)等,也通过改变降雨来影响降雨侵蚀力的周期性变化。

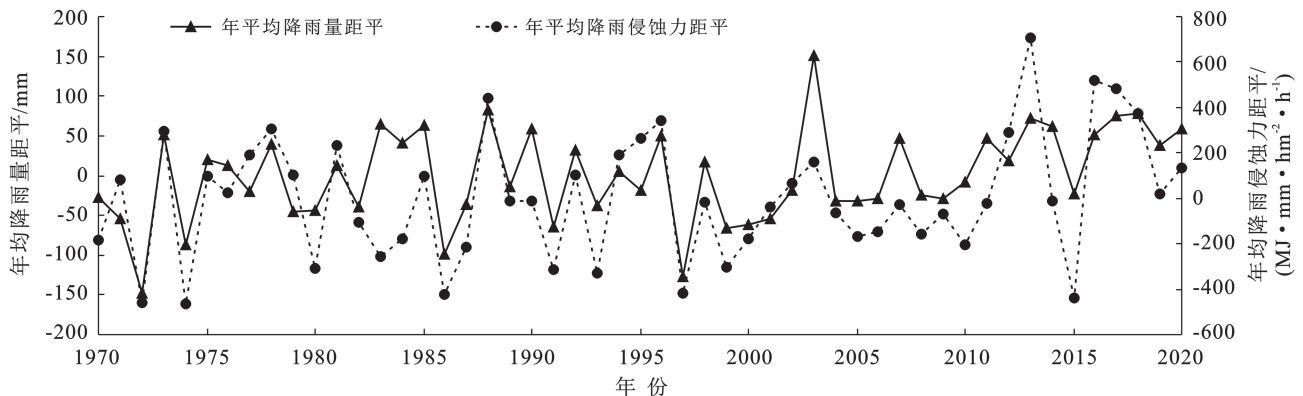


图 8 1970—2020 年黄土高原丘陵沟壑区年平均降雨量与年平均降雨侵蚀力距平曲线

Fig.8 Mean annual rainfall and its erosivity distance level curves in hilly and gully areas of Loess Plateau from 1970 to 2020

地形与气候是影响降雨侵蚀力空间分布差异的关键因素。黄土丘陵沟壑区地形东高西低,吕梁山分布在区域的东部,地势起伏相对较大,夏季风带来的暖湿气流与地形抬升作用相结合,容易形成短时强降水,使黄土丘陵沟壑区东部降雨侵蚀力高于西部,本研究利用 Machisplin 的插值方法揭示了黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力由东南向西北递减的空间分布格局,这与马道铭等^[26]在山西省降雨侵蚀力的空间分布的研究中的结果相吻合。李静等^[27]通过对黄土高原不同地貌类型降雨侵蚀力也指出降雨侵蚀力在空间上表现出显著的区域性差异,并受地形、气候等多种因素共同影响,黄土高原降雨侵蚀力空间这些因素影响分布从东南到西北呈梯度递减趋势。本研究特别关注了冷暖季降雨侵蚀力的差异,发现暖季降雨侵蚀力显著强于冷季,这与姬兴杰等^[28]在黄河流域的研究

结果相吻合。宁婷等^[29]研究山西省降雨侵蚀力时也提出 90% 以上的降雨侵蚀力集中在暖季。黄土丘陵沟壑区属于温带大陆性气候,降水不稳定,降水主要集中在夏季,即暖季。此外,极端降雨也是导致暖季降雨侵蚀力远大于冷季的原因,李双双等^[30]基于 1970—2017 年逐日降水数据对陕北黄土高原区极端降水时空变化特征进行分析指出陕北地区降水呈现极端化,弱降水日数减少,强降水日数增加。黎珩等^[31]通过计算黄土高原水蚀风蚀交错区 11 个极端降水指数分析也同样指出 1970—2020 年黄土高原水蚀风蚀交错区尤其是陕西段极端降水量和强度呈显著增加趋势且极端化程度更显著。

虽然黄土丘陵沟壑区经过近几十年来的治理,生态环境得到显著的改善,植被覆盖度大幅度提升^[32],但面临的土壤侵蚀问题仍不可轻视,还需加强水土保

持,巩固还林育林成果,改善植被,增强抗侵蚀力,重视植被封禁保护。本研究深化了对黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力时空分布特征的认识,通过对比不同时间尺度的降雨侵蚀力变化,揭示了区域土壤侵蚀的动态变化规律,对于理解气候变化对黄土高原地区土壤侵蚀的影响也具有重要意义,为预测未来土壤侵蚀风险提供了科学依据。此外通过了解降雨侵蚀力的时空分布特征和变化趋势,也为黄土丘陵沟壑区的水土保持工作提供了重要参考,可以更加精准地制定水土保持策略,提高水土流失治理的针对性和有效性。

4 结论

本研究基于日降雨量的简易算法模型,对黄土高原 1970—2020 年的 67 个气象站点的降水数据进行了插值,并结合 Mann-Kendall 法和小波分析法揭示了黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力的空间分布特征和时间变化趋势。

(1) 空间分布特征。降雨侵蚀力的空间分布与降雨量的分布呈现出相似分布特征,均由东南向西北递减,并在西南地区出现最高值。而在年内分布中,暖季和冷季的降雨侵蚀力强度相距较大,暖季降雨侵蚀力强度明显强于冷季,前者平均降雨侵蚀力最大可达 $1\ 742.95\ (\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,而后者最大仅有 $171.11\ (\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

(2) 时间变化趋势。黄土丘陵沟壑区平均降雨侵蚀力呈现上升趋势,且年际间的波动较大,并伴随一定程度的突变。上升的黄土丘陵沟壑区的降雨侵蚀力改善当地气候条件的同时,对当地的水土保持措施的功能稳定发挥和水土流失治理工作提出挑战。

参考文献(References)

- [1] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
Zhang Keli, Peng Wenying, Yang Hongli. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(1):7-13.
- [2] 孙泉忠,王朝军,赵佳,等.中国降雨侵蚀力 R 指标研究进展[J].中国农学通报,2011,27(4):1-5.
Sun Quanzhong, Wang Chaojun, Zhao Jia, et al. Research evolution of rainfall erosivity (R) in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011,27(4):1-5.
- [3] 伍育鹏,谢云,章文波.国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J].水土保持学报,2001,15(3):31-34.
Wu Yupeng, Xie Yun, Zhang Wenbo. Comparison of different methods for estimating average annual rainfall erosivity [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(3):31-34.
- [4] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(I)[J].水土保持学报,1995,9(4):7-18.
Wang Wanzhong, Jiao Juying, Hao Xiaopin, et al. Study on rainfall erosivity in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995,9(4):7-18.
- [5] Wischmeier W H, Smith D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [Z]. 1978.
- [6] 宁丽丹,石辉.利用日降雨量资料估算西南地区的降雨侵蚀力[J].水土保持研究,2003,10(4):183-186.
Ning Lidan, Shi Hui. Estimating R-factor in Southwest China with data of daily rainfall amount [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003,10(4):183-186.
- [7] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002,22(6):705-711.
- [8] Xie Yun, Yin Shuiqing, Liu Baoyuan, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China [J]. Journal of Hydrology, 2016,535:547-558.
- [9] 陈晓安,蔡强国,郑明国,等.黄土丘陵沟壑区的岔巴沟流域次降雨侵蚀力的研究[J].泥沙研究,2010,35(1):5-10.
Chen Xiaohan, Cai Qiangguo, Zheng Mingguo, et al. Study on rainfall erosivity of Chabagou watershed in a hilly loess region on the Loess Plateau [J]. Journal of Sediment Research, 2010,35(1):5-10.
- [10] 赵文武,徐海燕,解纯营.黄土丘陵沟壑区延河流域降雨侵蚀力的估算[J].农业工程学报,2008,24(S1):38-42.
Zhao Wenwu, Xu Haiyan, Xie Chunying. Estimation of rainfall erosivity in the Yanhe watershed of the loess hilly-gully area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(S1):38-42.
- [11] 钟莉娜,王军,赵文武.基于修正简易模型的陕北黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力分布特征[J].中国水土保持科学,2016,14(5):8-14.
Zhong Lina, Wang Jun, Zhao Wenwu. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall erosivity in loess hilly region of Northern Shaanxi based on the modified simplified models [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016,14(5):8-14.
- [12] 钟科元,郑粉莉.1960—2014 年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究[J].自然资源学报,2017,32(2):278-291.
Zhong Keyuan, Zheng Fenli. Spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Songhua River basin from 1960 to 2014 [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(2):278-291.
- [13] 冯笛珂,符素华,丁建新,等.北京市近 40 年来降雨侵蚀力时空变异特征[J].水土保持学报,2024,38(4):132-142.
Feng Dike, Fu Suhua, Ding Jianxin, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in Beijing in

- recent 40 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4):132-142.
- [14] 朱大运, 杨倩, 陈海, 等. 1960—2017 年贵州省不同水系降雨侵蚀力时空变异特征[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1):6-14.
- Zhu Dayun, Yang Qian, Chen Hai, et al. Spatiotemporal variations in rainfall erosivity of different river systems in Guizhou Province during 1960—2017 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(1):6-14.
- [15] 卢旭东, 齐实, 陈家东, 等. 南渡江流域降雨侵蚀力时空分布与变化趋势研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(11):1464-1473.
- Lu Xudong, Qi Shi, Chen Jiadong, et al. Spatiotemporal distribution and variation trend of rainfall erosivity in the Nandu River basin [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(11):1464-1473.
- [16] 张悦, 张艳, 史飞航, 等. 基于不同模型的黄河中游降雨侵蚀力时空变化分析[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(2):220-229.
- Zhang Yue, Zhang Yan, Shi Feihang, et al. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in middle reaches of Yellow River based on different models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2):220-229.
- [17] 孙从建, 王佳瑞, 郑振婧, 等. 黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力时空分布特征及其影响因素研究[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(3):568-576.
- Sun Congjian, Wang Jiarui, Zheng Zhenjing, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall erosivity and its influencing factors in the protected area of the Loess Plateau [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3):568-576.
- [18] 雷杨娜, 李明, 程路. 陕西省降雨和风蚀气候侵蚀力时空分布特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3):47-54.
- Lei Yangna, Li Ming, Cheng Lu. Spatio-temporal characteristics of rainfall erosivity and wind erosion climatic erosivity in Shaanxi Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3):47-54.
- [19] 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. *山地学报*, 2003, 21(1):33-40.
- Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Spatial distribution of rainfall erosivity in China [J]. *Journal of Mountain Research*, 2003, 21(1):33-40.
- [20] 陈剑南, 刘益麟, 李朋飞, 等. 1901—2016 年黄土高原降雨侵蚀力时空变化[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4):39-46.
- Chen Jiannan, Liu Yilin, Li Pengfei, et al. Spatiotemporal changes of rainfall erosivity on the Loess Plateau during 1901—2016 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4):39-46.
- [21] 张玉虎, 赵强, 艾明乐, 等. 沂河流域降雨量及降雨侵蚀力的时空尺度分析[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2023, 53(1):122-132.
- Zhang Yuhu, Zhao Qiang, Ai Mingle, et al. Spatial-temporal scale analysis of rainfall and rainfall erosivity in Yihe River basin [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2023, 53(1):122-132.
- [22] 艾明乐, 赵强, 王奎峰, 等. 1957—2017 年泾河流域降雨量及降雨侵蚀力时空变化分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(4):93-100.
- Ai Mingle, Zhao Qiang, Wang Kuifeng, et al. Spatiotemporal variations of rainfall and rainfall erosivity in Jinghe River basin from 1957 to 2017 [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(4):93-100.
- [23] 胡胜, 邱海军, 宋进喜, 等. 气候变化对秦岭北坡径流过程的影响机制研究: 以灞河流域为例[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(5):967-978.
- Hu Sheng, Qiu Haijun, Song Jinxi, et al. Influencing mechanisms of climate change on runoff process in the north slope of Qinling Mountains: A case of the Bahe River basin [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5):967-978.
- [24] 陈仁升, 康尔泗, 张济世. 小波变换在河西地区水文和气候周期变化分析中的应用[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(3):339-345.
- Chen Rensheng, Kang Ersi, Zhang Jishi. Application of wavelet transform on annual runoff, yearly average air temperature and annual precipitation periodic variations in Hexi region [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(3):339-345.
- [25] 张晓琳, 马永星. 厄尔尼诺—南方涛动研究进展[J]. *科学通报*, 2024, 69(8):1047-1057.
- Zhang Xiaolin, Ma Yongxing. Progresses of El Niño and Southern Oscillation research [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(8):1047-1057.
- [26] 马道铭, 回毅滢, 赵炯昌, 等. 近 60 年山西省降雨侵蚀力时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6):24-31.
- Ma Daoming, Hui Yiyong, Zhao Jiongchang, et al. Spatiotemporal characteristics of rainfall erosivity in Shanxi Province in recent 60 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6):24-31.
- [27] 李静, 刘志红, 李锐. 黄土高原不同地貌类型区降雨侵蚀力时空特征研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3):124-127.
- Li Jing, Liu Zhihong, Li Rui. Temporal and spatial characteristics of rainfall erosivity with different geomorphology types on the Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(3):124-127.

- poral and spatial variations in water yield of the Qinghai Lake water system under climate and land use changes [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2022, 58(1):47-56.
- [27] 杜佳衡, 王锦. 基于 InVEST 模型的大理州永平县水生生态系统服务功能时空变化分析 [J]. *西部林业科学*, 2021, 50(6):91-102.
- Du Jiaheng, Wang Jin. Analysis of spatio-temporal changes of water ecosystem service function in Yongping County, Dali prefecture based on InVEST model [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2021, 50(6):91-102.
- [28] 王阳, 魏建兵, 程雨露, 等. 浑河上游新宾县土地利用演变对水源涵养能力影响评价 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4):169-176.
- Wang Yang, Wei Jianbing, Cheng Yulu, et al. Evaluation of the impact of land use evolution on water conservation capacity in Xinbin County, upper reaches of Hunhe River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4):169-176.
- [29] Bai Yang, Ochuodho T O, Yang Jian. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102:51-64.
- [30] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析 [J]. *地理学报*, 2020, 75(3):607-619.
- Dai Erfu, Wang Yahui. Spatial heterogeneity and driving mechanisms of water yield service in the Hengduan Mountain region [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3):607-619.
- [31] 郑续, 魏乐民, 郭建军, 等. 基于地理探测器的干旱区内陆河流域产水量驱动力分析: 以疏勒河流域为例 [J]. *干旱区地理*, 2020, 43(6):1477-1485.
- Zheng Xu, Wei Lemin, Guo Jianjun, et al. Driving force analysis of water yield in inland river basins of arid areas based on geo-detectors: A case of the Shule River [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(6):1477-1485.
- [32] Wang Yunfei, Ye Aizhong, Peng Dingzhi, et al. Spatiotemporal variations in water conservation function of the Tibetan Plateau under climate change based on InVEST model [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 41:101064.
- [33] 吕乐婷, 任甜甜, 孙才志, 等. 1980—2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究 [J]. *生态学报*, 2020, 40(3):993-1003.
- Lü Leting, Ren Tiantian, Sun Caizhi, et al. Spatial and temporal changes of water supply and water conservation function in Sanjiangyuan National Park from 1980 to 2016 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3):993-1003.
- [34] 阚大学, 吕连菊. 水生态文明城市建设试点政策对绿色水资源利用效率的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(3):498-509.
- Kan Daxue, Lv Lianju. Impact of water ecological civilization city construction pilot policy on green water resource utilization efficiency [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(3):498-509.

(上接第 231 页)

- [28] 姬兴杰, 刘美, 吴稀稀, 等. 1961—2019 年黄河流域降雨侵蚀力时空变化特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(14):136-145.
- Ji Xingjie, Liu Mei, Wu Xixi, et al. Spatiotemporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Yellow River basin from 1961 to 2019 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(14):136-145.
- [29] 宁婷, 桑满杰, 郭新亚, 等. 山西省 2000—2016 年降雨侵蚀力时空分布特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1):1-7.
- Ning Ting, Sang Manjie, Guo Xinya, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall erosivity during 2000—2016 in Shanxi Province [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(1):1-7.
- [30] 李双双, 孔锋, 韩鹭, 等. 陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素 [J]. *地理研究*, 2020, 39(1):140-151.
- Li Shuangshuang, Kong Feng, Han Lu, et al. Spatiotemporal variability of extreme precipitation and influencing factors on the Loess Plateau in Northern Shaanxi Province [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(1):140-151.
- [31] 黎珩, 朱冰冰, 边焯, 等. 1970—2020 年黄土高原水蚀风蚀交错区极端降水时空变化研究及驱动因素分析 [J]. *干旱区地理*, 2024, 47(4):539-548.
- Li Heng, Zhu Bingbing, Bian He, et al. Temporal and spatial changes in extreme precipitation and its driving factors in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau from 1970 to 2020 [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(4):539-548.
- [32] 高健翎, 张建国, 朱莉莉, 等. 黄土丘陵沟壑区水土保持关键措施变化特征 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(3):114-118.
- Gao Jianling, Zhang Jianguo, Zhu Lili, et al. Change characteristics of key measures of soil and water conservation in hill-gully region of Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3):114-118.