

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.023.

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, 48.

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, 48.

近60年山西省降雨侵蚀力时空变化特征

马道铭¹, 回毅滢¹, 赵炯昌¹, 王百群³, 于洋^{1,2}

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京林业大学

水土保持学院 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083;

3.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]揭示降雨引发区域土壤侵蚀的潜在能力, 分析降雨侵蚀力时空变化特征, 为区域生态建设和水土流失治理提供科技支撑。[方法]基于近60 a(1960—2020年)山西省气象站点均一化逐日降水数据, 采用线性回归及Mann-Kendall非参数检验、Hurst检验和地理信息空间插值等方法对山西省降雨侵蚀力变化趋势和时空分布特征进行分析, 探讨了近60年山西省降雨侵蚀力时空变化。[结果]山西省1960—2020年多年平均降雨侵蚀力变化范围为828.29~3 002.21 MJ·mm/(hm²·h), 最低值出现在1997年, 最高值出现在1964年; 各站点的降雨侵蚀力年际变化趋势迥异, 其中五台山站呈显著下降趋势, 除侯马站外, 其他站点均呈下降趋势, 且Hurst指数均高于0.5, 表明该下降的趋势将长期持续; 山西省多年平均降雨侵蚀力空间分布呈现东南高西北低的特征, 且与降雨侵蚀力与地形存在一定的正相关关系。[结论]山西省大部分地区降雨侵蚀力呈下降趋势, 黄河沿线表现为上升趋势, 未来水土保持与生态治理工作依旧艰巨, 应进一步加强山西省黄河沿线生态建设与水土流失综合治理。

关键词: 降雨侵蚀力; 时空变化; 山西省; 水土流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0024-08

Spatiotemporal Characteristics of Rainfall Erosivity in Shanxi Province in Recent 60 Years

Ma Daoming¹, Hui Yiyong¹, Zhao Jiongchang¹, Wang Baiqun³, Yu Yang^{1,2}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2.Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, School of Soil and Water

Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the potential capacity of regional soil erosion triggered by rainfall, to analyze the spatial and temporal characteristics of rainfall erosivity, and to provide scientific and technological support for regional ecological construction and soil erosion management. [Methods] Based on the homogenized daily precipitation data of Shanxi meteorological stations in recent 60 years (1960—2020), we analyzed the change trend and spatiotemporal distribution characteristics of annual rainfall erosivity in Shanxi Province by means of linear regression, Mann-Kendall nonparametric test, Hurst test and spatial interpolation. The spatiotemporal variation of rainfall erosivity of Shanxi Province in recent 60 years was discussed. [Results] The variation range of annual average rainfall erosivity in Shanxi Province from 1960 to 2020 was 828.29 to 3 002.21 MJ·mm/(hm²·h), with an average value of 1 667.05 MJ·mm/(hm²·h), minimum value occurring in 1997, maximum value occurring in 1964. The interannual variation

收稿日期: 2022-07-27

修回日期: 2022-10-07

资助项目: 国家自然科学基金(42177310); 国家重点研发计划(2022YFF1300803)

第一作者: 马道铭(2002—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为区域生态系统服务。E-mail: mdmmistakes@outlook.com

通信作者: 于洋(1985—), 男, 河北承德人, 博士, 副教授, 主要从事植被恢复与流域治理研究。E-mail: theodoreyy@gmail.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

trend of rainfall erosivity at each station was significantly different, rainfall erosivity at Wutaishan Station showed a significant downward trend. Except for rainfall erosivity at Houma station, rainfall erosivity at all other stations showed a decreasing trend, and the Hurst index was higher than 0.5, indicating that the decreasing trend continued in the long term. The spatial distribution of multi-year average rainfall erosion force in Shanxi Province showed the characteristics of high level in the southeast and low level in the northwest, and there was a positive correlation between rainfall erosion force and elevation. [Conclusion] In most areas of Shanxi Province, rainfall erosivity showed a decreasing trend, while the region along the Yellow River, an increasing trend was detected. The ecological construction and comprehensive control of soil and water loss along the Yellow River region of Shanxi Province should be further strengthened.

Keywords: rainfall erosivity; spatiotemporal characteristics; Shanxi Province; soil erosion

降雨是导致土壤侵蚀的主要驱动因子之一^[1]。降雨侵蚀力作为表征降雨导致土壤侵蚀潜在能力的指标,被广泛应用于水土保持综合治理、农业生产以及生态系统服务评估。在气候变化背景下,不同地区降水时空差异明显,降水量、降水强度和降水历时的高度不确定性导致降雨侵蚀力改变,从而影响土壤侵蚀特征^[2]。因此,开展区域降雨侵蚀力研究对于有效开展水土流失综合防治具有重要意义^[3]。

当前,20 世纪 50 年代以来,人们围绕降雨侵蚀力的报道较多。Johannsen 等^[4]利用奥地利各地 171 个气象站的降雨数据以将降雨侵蚀力描述为平均降雨量的函数,计算了 1995—2015 年降雨侵蚀力,并根据降雨侵蚀力的时空分布差异反映侵蚀危险性;梁宇靖等^[5]基于 CLDAS 遥感数据多源融合降水利用 EI₆₀ 模型从不同时空尺度评估了中国的降雨侵蚀力,结果显示全国降雨侵蚀力呈现东南高西北低的特点,同时降雨侵蚀力的变化趋势和降雨量、侵蚀性降雨次数的变化趋势基本一致;刘斌涛等^[6]利用全国 590 个气象站点 1960—2007 年的逐月降水量数据计算了降雨侵蚀力,得出近 50 a 大部分地区年降雨侵蚀力呈现出不显著的上升的趋势,其中山西省的降雨侵蚀力呈下降趋势,但下降趋势不显著;郑明星等^[7]利用降雨侵蚀力估算方程对西北地区日、月、季度、年降雨侵蚀力进行分析,构建了降雨侵蚀力回归分析模型,结果表明 1970—2017 年西北地区降雨侵蚀力在 1990 年、2008 年发生了两次突变;马良等^[8]利用 Mann-Kendall 非参数方法对山东省 1951—2008 年的降雨侵蚀力进行分析检验,结果表明,多年间的降雨侵蚀力变化不具备显著性,但秋冬季特别是 2 月、5 月、12 月的降雨侵蚀力显著升高。由此可见,降雨侵蚀力作为土壤侵蚀模型的重要参数,目前已广泛用于气候变化预测、土壤侵蚀趋势分析等领域。

黄河流域生态保护与高质量发展是当前重大国

家战略,黄土高原是我国水土流失最为严重的地区,围绕黄土高原生态系统降雨侵蚀力的报道较多。穆兴民等^[9]绘制了 1956—2002 年陕北黄土高原降雨侵蚀力的等值线并分析了其时空变化特征,结果发现陕北地区降雨侵蚀力年际变化趋势呈现出不显著的增加或减少趋势;陈剑南等^[10]研究了 1901—2016 年黄土高原的降雨侵蚀力时空变化,结果表明黄土高原地区年均降雨侵蚀力空间分布呈现东南高、西北低的特征,且显著变化区域集中于黄土高原中部,不显著变化区域多位于黄土高原边界;李维杰等^[11]基于太行山脉及其周边地区建立了年降雨侵蚀力的简易模型分析降雨侵蚀力的时空变化特征,结果发现太行山脉地区各降雨侵蚀力最大值主要分布于太行山脉东南部以及五台山地区,最小值主要分布于地区的东北部。虽然人们围绕区域尺度降雨侵蚀力的变化已开展了大量报道,但对于省域尺度的详细报道较少。

山西省地处黄河中游,黄土高原东部,境内 80% 以上为山地、丘陵区,地形陡峭,沟壑纵横,水土流失严重^[12]。据 2020 年度山西省水土保持公报,截至 2020 年,山西省全省共有水土流失面积 58 942.81 km²,其中水力侵蚀面积 58 914.47 km²,水土流失治理任务依然艰巨,2021 年山西省年内 2 月、9 月、10 月的月降水量超历史同期极值的市县分别为 31,45,60 个,气候条件极端性明显,面临的降雨侵蚀的威胁更加严重。严重的水土流失,尤其是水力侵蚀,制约着山西省经济社会的高质量发展,为了进一步揭示山西省水土流失情况,有必要对山西省全省降雨侵蚀力的时空变化趋势进行分析。基于此,本文通过计算近 60 a (1960—2020 年)省域尺度降雨侵蚀力,分析评估省域尺度侵蚀力时空变化特征,以为山西省生态建设与水土流失防治防护提供参考。

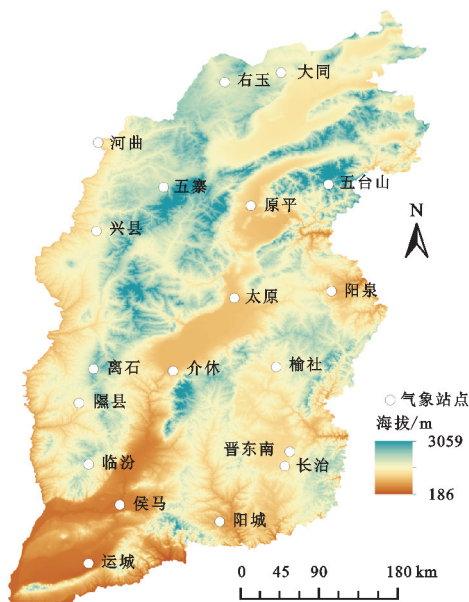
1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西省地处华北地区西部,黄河流域中游的黄土高原上,处于 $35^{\circ}\text{--}40^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{--}114^{\circ}\text{E}$,总面积约 $1.57 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。地形以山地丘陵为主,地势呈现西北高东南低的趋势。全省大部分位于温带半湿润半干旱大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,年均温为 $4\text{--}14^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $400\text{--}600 \text{ mm}$,自东南向西北递减,降水主要集中在6—8月。由于地形和海陆位置影响,山西省处于季风型气候与大陆型气候的过渡地带,总体气候受季风影响极大,是气候变化的典型敏感地区^[13]。

1.2 气象数据来源与降雨侵蚀力计算

研究使用数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)的地面日值观测数据集。选取其中长时间序列下数据较为连贯、完整的19个站点,站点分布如图1所示。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图1 山西省气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in Shanxi Province

国内学者建立了一个基于日侵蚀性降雨量的半月降雨侵蚀力的简单模型,可以在基于降水资料(如日降水量、月降水量、年降水量)的情况下估算降雨侵蚀力,为降雨侵蚀力研究计算提供一个更加简便的、适用广泛的研究方法^[14-16]。本文采用日降水量模型计算区域的降雨侵蚀力,计算方法如下:

$$R = \sum_{k=1}^{24} \overline{R_{\text{半月}k}} \quad (1)$$

$$\overline{R_{\text{半月}k}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\alpha P_{i,j,k}^{\beta}) \quad (2)$$

式中: R 为多年平均降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; $R_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月的降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; k 为1a的24个半月; n 为第 i 为降雨侵蚀力的所用资料的年份,标记1960年为1, $i=1, 2, 3, \dots, n$; j 为第 i 年的所用资料的半月份,标记第一个半月为1, $j=1, 2, 3, \dots, m$; $P_{i,j,k}$ 为第 i 年第 k 半月第 j 次侵蚀性降雨的降雨量 (mm) 。其中侵蚀性降雨定义为日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 。 α, β 为参数,可用以下公式估算:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式中: P_{d12} 为日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日平均雨量 (mm) ; P_{y12} 为日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的年平均雨量 (mm) 。

1.3 时间趋势分析

Mann-Kendall 非参数检验法是判断气候、水文要素随时间变化情况的常用方法。使用 Mann-Kendall 检验法进行时间序列数据的趋势检验和突变检验^[17-18]。该方法能够检验气候序列中存在的气候长期趋势,并判定突变点具体发生的时间。

将降雨侵蚀力数据按照时间序列依次排布为 $X_n = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$; 定义统计量 S 为:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (5)$$

$$\text{其中, } \text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} -1 & (x_i - x_j < 0) \\ 0 & (x_i - x_j = 0) \\ 1 & (x_i - x_j > 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中:若 S 为正,说明降雨侵蚀力随时间序列趋于增加;若 S 为负,说明降雨侵蚀力随时间序列趋于减少。

计算统计变量 Z 值:

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\text{var}(S)$ 为 S 的方差; Z_{mk} 满足标准正态分布。 $|Z| > 1.64$ 时代表 Z_{mk} 通过了95%信度检验,定义为显著变化。

趋势的大小估算方法如下::

$$\beta = \text{median}\left(\frac{X_i - X_j}{j - i}\right) \quad (8)$$

式中:median表示中位数,若 β 为正则呈现增长趋势, β 为负则呈现下降趋势, β 的绝对值大小可以反映变化的剧烈程度。

构造秩序列: $S_i = \sum_{j=1}^k R_j, (k=2, 3, 4, \dots, n)$ (9)

式中: R_i 为 X_i 大于 $X_j (1 \leq j \leq i)$ 的累计数。

定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (10)$$

式中: $\text{var}(S_k)$ 为 S_k 的方差; $E(S_k)$ 为 S_k 的均值

$UF_k (k=1, 2, 3, \dots, n)$ 满足标准正态分布, $UF_1 = 0$, 在给定的显著性水平 α 下, 若时间序列有明显趋势则满足 $|UF_k| > \mu_0$ 。

将时间序列逆序排布为 $X_n = \{x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1\}$, 按照上述方法重新计算出 UB_k , 且使得 $UB_k = UF_k, (k=1, 2, 3, \dots, n), UB_n = 0$ 。绘制 UB_k 和 UF_k 曲线, 若两条曲线出现交点且交点在临界线之内则认为在交点处发生了突变。

采用重标极差分析法 (又称 R/S 方法) 中的 Hurst 指数来评判时间序列中的趋势成分^[17]。该方法利用有偏的随机游走以描述长期的时间序列的趋势情况。其中 Hurst 指数体现了时间序列的自相关性, 尤其反映了序列中隐藏的长期趋势。Hurst 指数 $H (0 < H < 1)$ 存在 3 种情况: 当 $H = 0.5$ 时, 序列是一个随机游动序列, 各观测结果之间完全独立, 气候指标随机变化; 当 $0 < H < 0.5$ 时, 序列比随机序列更强的突变性或易变性, 意味着气候变化的总体趋势将与过去相反; 当 $0.5 < H < 1$ 时, 序列具备持久性或当前趋势将增强, 反映气候变化的总体趋势将与过去相同。Mann-Kendall 法反映趋势变化的剧烈程度, Hurst 指数主要用于评判该趋势是否将长期持续下去, 二者结合可以更好地评判降雨侵蚀力长期的时间序列趋势情况, 更好地作用于省域尺度下的研究。

1.4 降雨侵蚀力空间插值与制图

山西省多山地丘陵, 降雨强度与地形的关系很大, 降雨侵蚀力的空间分布需要结合高程考虑。因此采用结合高程的协同克里金插值的方法, 对山西省各个气象站的计算出的降雨侵蚀力进行空间插值, 可以得出整个山西省的连续的降雨侵蚀力空间分布^[19], 相关分析与制图采用 ArcGIS 10.2 完成。结合高程的协同克里金插值法同时采用降雨侵蚀力和高程的信息, 由于主要关注的是降雨侵蚀力, 因此使用降雨侵蚀力的自相关与降雨侵蚀量和高程之间的互相关的自相关以进行更好地、更精确地插值。

2 结果与分析

2.1 单个站点时间趋势检验

对 19 个气象站点的逐年降雨侵蚀力数据做 M-K

突变检验, 结果如图 2 所示, 1960—2020 年, 大同、河曲、兴县、榆社、晋东南 5 个气象站点的 UF 曲线在零线附近波动且多位于零线以下, 但不超过 95% 置信区间, 不具备显著变化性, 呈现不显著的下降趋势; 右玉、五寨、原平、离石、太原、阳泉、隰县、介休、临汾、长治、运城、阳城 12 个气象站点的 UF 曲线仍在零线附近波动且多位于零线以下, 且有部分位于置信区间之外, 但 p 值检验后不具备显著变化性, 也呈现不显著的下降趋势; 侯马站点 UF 曲线除早期在零线以下外, 其余时期长期处于零线以上, 且不超过置信区间, 呈现不显著的上升趋势; 五台山站点在 1964 年发生了一次突变后, UF 曲线快速下降到置信区间外, 且长期保持在置信区间外, 具备显著性, 呈现显著的下降趋势。

2.2 省域尺度时间序列分析

1960—2020 年, 山西省降雨侵蚀力的年际变化如图 3 所示, 由图可知, 除侯马地区周边呈现不显著的增加趋势外, 其他地区呈现显著或不显著的减少趋势。其中五台山地区的降雨侵蚀力呈现出显著减少的趋势, β 值大小在 -24.35 , 即下降速率约 $-24.35 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 这符合对于五台山地区极端降水指数呈现明显下降趋势的研究结果^[13]。同时五台山地区的降雨侵蚀力呈现明显减少的趋势。

根据 Hurst 指数定义, 当 Hurst 指数大于 0.5 时, 序列趋向于长期性。通过上述分析可知, 山西省的降雨侵蚀力长期呈现不显著的降低趋势, 在此基础上对每个气象站点的年降雨侵蚀力进行 R/S 分析, 得出了每个站点的 Hurst 指数, 并通过 IDW 反距离加权法进行插值。如图 4 所示, 计算出最低的 Hurst 指数为 0.63, 大于 0.5, 且各站点的 Hurst 指数都大于 0.5。侯马地区的降雨侵蚀力呈不显著增长趋势、五台山地区降雨侵蚀力的显著下降趋势, 其他地区降雨侵蚀力的降低趋势将长期持续下去。相比较而言, 山西省南部区域的 Hurst 指数更接近 1, 即山西省南部地区的降雨侵蚀力更具长期记忆性趋势; 而山西省北部区域更接近 0.5, 即山西省北部地区的降雨侵蚀力更近似于一个随机游走的时间序列, 趋势的长期性较南部地区更弱。

2.3 山西省降雨侵蚀力空间分布特征

山西省的地形差异极大, 全省海拔最高点与最低点的差值达到 2 873 m, 在研究山西省降雨侵蚀力空间分布的过程中需考虑海拔对于降雨侵蚀力的影响。采用考虑高程的协同克里金插值法, 对于山西省的多年平均降雨侵蚀力分布进行空间内插, 得到了连续的山西省多年平均降雨侵蚀力空间分布图 (图 5)。山西省 1960—2020 年多年平均降雨侵蚀力 (R) 值为

620.14~2 573.37 MJ·mm/(hm²·h), 总体呈现出西北低东南高的特点, 这符合山西省处于季风气候与

大陆性气候的交界带的特点, 西北部受更为寒冷干燥, 东南部则受夏季风影响较大更多降水^[12]。

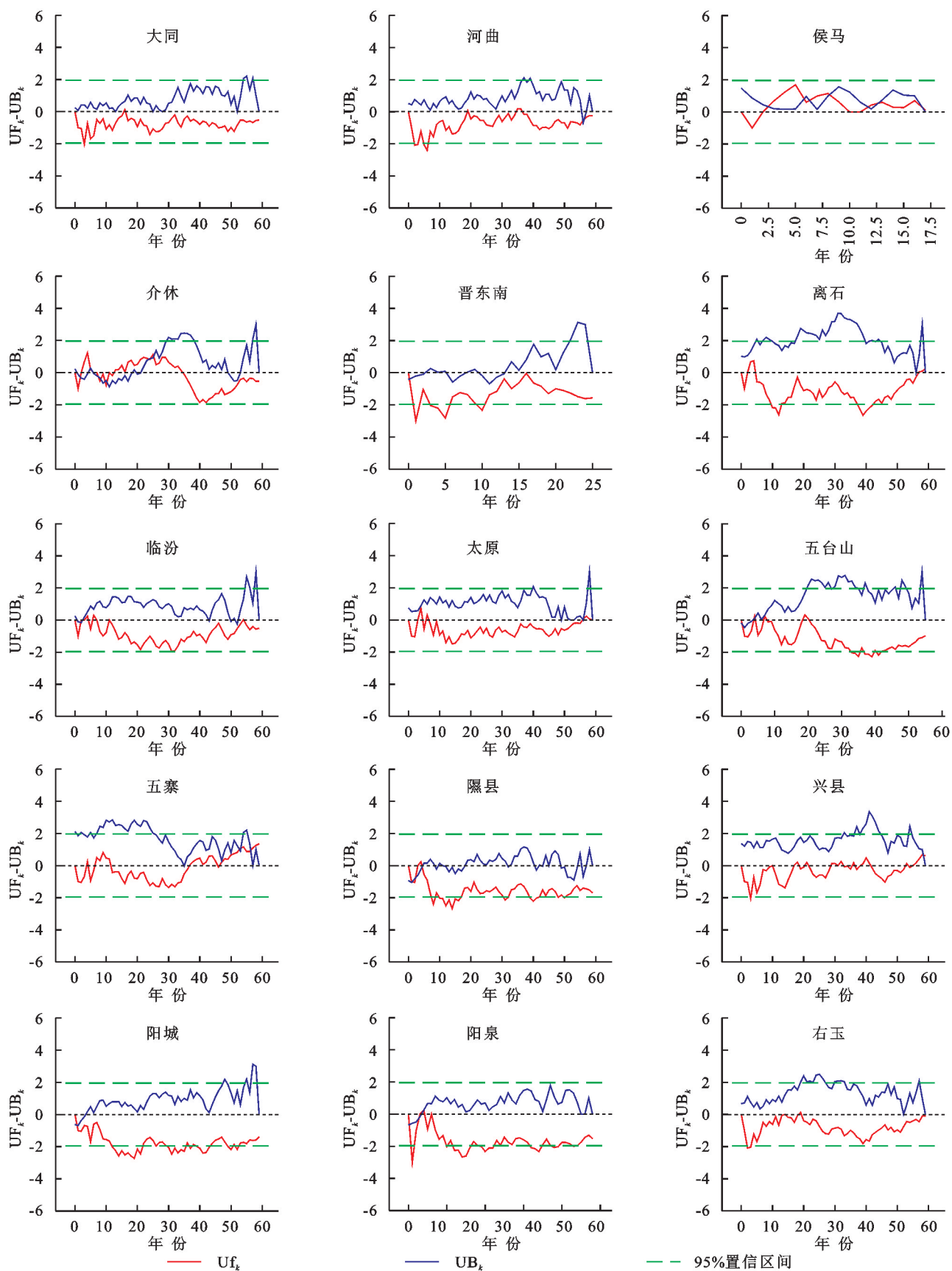


图2 山西省各气象站点降雨侵蚀力趋势检验

Fig. 2 Trend test of rainfall erosive force at meteorological stations in Shanxi Province

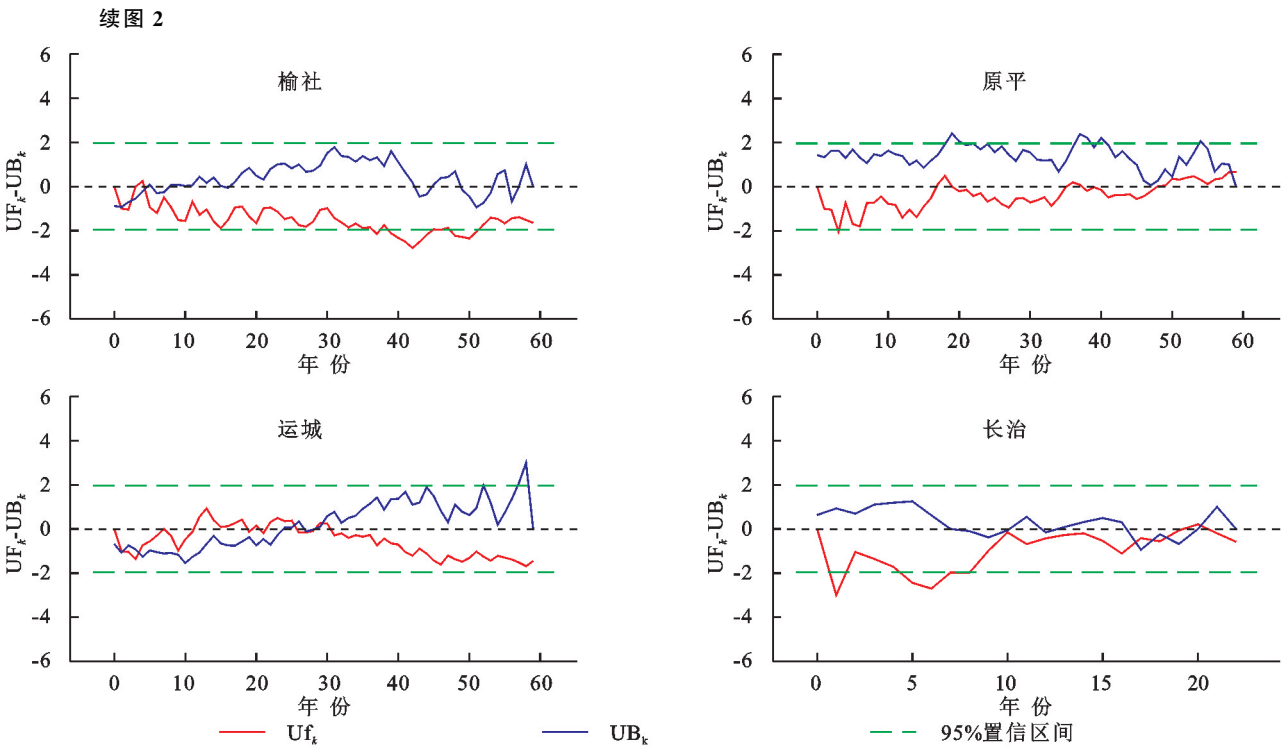


图 2 山西省各气象站点降雨侵蚀力趋势检验

Fig. 2 Trend test of rainfall erosive force at meteorological stations in Shanxi Province

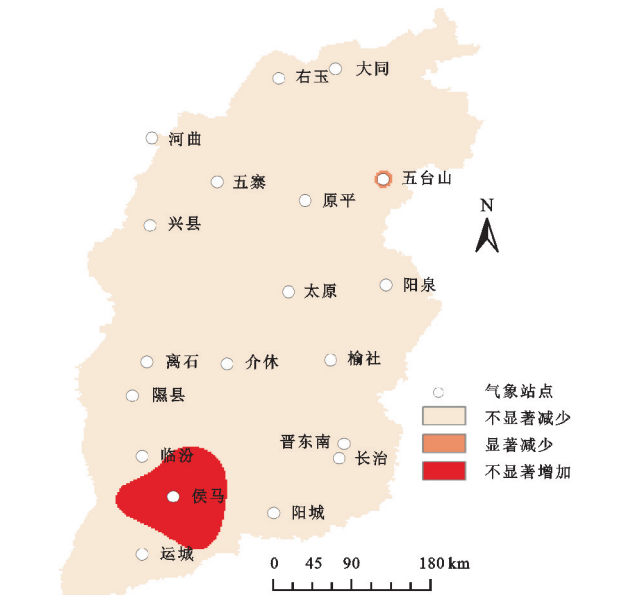


Fig. 3 Overall trend of rainfall erosive force changes in Shanxi Province by region, 1960–2020

此外,山西省多年平均降雨侵蚀力的空间分布与地形有很强的相关性。受地形影响,高山区易形成降水量高值中心,盆地地区降水量明显偏少,成为低值区^[19],因此,多年降雨侵蚀力的高值区也常常出现在山区,如五台山区、吕梁山南部地区、太行山区等都为降雨侵蚀力的高值区。同时,在山西省的黄河沿线,也为降雨侵蚀力的高值区。这对于该区域的水土保持工作提出了更高的要求,需要对该地区的水土保持工作更加重视。

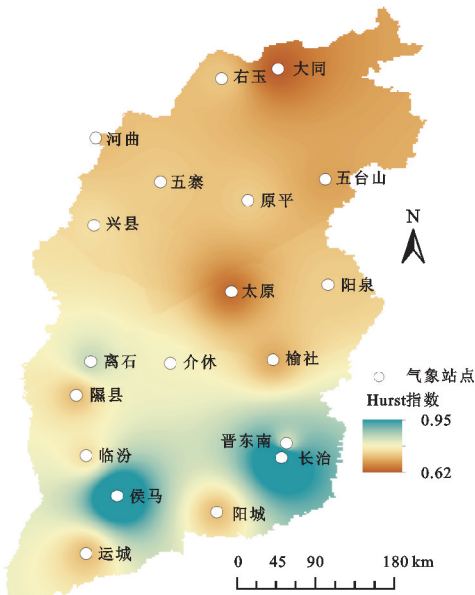


Fig. 4 Interpolation results of Hurst index calculation

3 讨论

山西省近 60 a 的降雨侵蚀力的时空变化趋势显示,基于站点分析表明,除五台山气象站点降雨侵蚀力呈显著变化外,其余站点的年际变化呈不显著变化。具体来说,降雨侵蚀力的年际变化在侯马周边地区呈现出不显著的上升趋势,在五台山周边地区呈现显著的下降趋势,在省内其他地区则呈现出不显著的下降的趋势。侯马周边地区位于吕梁山前面向东南

- [4] Johannsen L L, Schmaltz E M, Mitrovits O, et al. An update of the spatial and temporal variability of rainfall erosivity (R-factor) for the main agricultural production zones of Austria[J]. *Catena*, 2022, 215:106305.
- [5] 梁宇靖, 沈润平, 师春香, 等. 基于 CLDAS 融合降水的中国降雨侵蚀力研究[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5):1333-1346.
Liang Y J, Shen R P, Shi C X, et al. Rainfall erosivity in China based on CLDAS fusion precipitation[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(5):1333-1346.
- [6] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J]. *地理研究*, 2013, 32(2):245-256.
Liu B T, Tao H P, Song C F, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in China during 1960 to 2009 [J]. *Geographical Research*, 2013, 32(2):245-256.
- [7] 郑明星, 张富. 西北地区降雨侵蚀力时空变化规律分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(1):154-160.
Zheng M X, Zhang F. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in northwest China [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2022, 57(1):154-160.
- [8] 马良, 左长清, 尹忠东, 等. 山东省降雨侵蚀力多年变化特征分析[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(4):79-85.
Ma L, Zuo C Q, Yin Z D, et al. Analysis on variation characteristics of the rainfall erosivity during last 58 years in Shandong Province [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(4):79-85.
- [9] 穆兴民, 戴海伦, 高鹏, 等. 陕北黄土高原降雨侵蚀力时空变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(3):37-43.
Mu X M, Dai H L, Gao P, et al. Spatial-temporal characteristics of rainfall erosivity in northern Shaanxi region in the Loess Plateau[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(3):37-43.
- [10] 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 J N, Liu Y L, Li P F, 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.
- [11] 李维杰, 王建力. 太行山脉不同量级降雨侵蚀力时空变化特征[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(4):785-801.
Li W J, Wang J L. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity at each level in Taihang Mountain[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4):785-801.
- [12] 贺晓娟, 韩锦涛. 山西省水土流失空间分布和现状[J]. *江西农业学报*, 2007(3):97-98, 105.
He X J, Han J T. Spatial distribution status of soil and water loss in Shanxi Province [J]. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2007(3):97-98, 105.
- [13] 董伯纲, 于洋. 近 60 年山西省极端降水时空变化特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1):135-141.
- [14] 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 W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6):705-711.
- [15] 章文波, 谢云, 刘宝元. 降雨侵蚀力研究进展[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(5):43-46.
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Research evolution of rainfall erosivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5):43-46.
- [16] 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(1):35-41.
Zhang W B, Fu J S. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. *Resources Science*, 2003 (1):35-41.
- [17] 张涵丹, 卫伟, 薛莲. 基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6):183-189.
Zhang H D, Wei W, Xue S. Analysis on the variation of temperature and precipitation in Dingxi based on R/S and Mann-Kendall test [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(6):183-189.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.
Wei F Y. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Techniques [M]. 2ed. Beijing: Meteorological Publishing House, 2007.
- [19] 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 T, Sang M J, Guo X Y, 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.
- [20] 王佳欢, 张晨星, 杨新兵, 等. 基于 GIS 的白洋淀流域降雨侵蚀力时空分布特征分析[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1):18-24.
Wang J H, Zhang C X, Yang X B, et al. Analysis on spatiotemporal distribution characteristics of rainfall erosivity in Baiyangdian Basin based on GIS [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1):18-24.
- [21] Liu S, Huang S, Xie Y, et al. Spatial-temporal changes of rainfall erosivity in the Loess Plateau, China: Changing patterns, causes and implications [J]. *Catena*, 2018, 166:279-289.

- 锐减归因分析[J].地理学报,2019,74(9):1745-1757.
- Gao H D, Liu H, Jia L L, et al. Attribution analysis of precipitous decrease of sediment loads in the Hekou-Longmen section of Yellow River since 2000[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(9):1745-1757.
- [18] 刘晓燕,杨胜天,李晓宇,等.黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制[J].中国科学:技术科学,2015,45(10):1052-1059.
- Liu X Y, Yang S T, Li X Y, et al. The current vegetation restoration effect and its influence mechanism on the sediment and runoff yield in severe erosion area of Yellow River Basin[J]. Science China: Technological Sciences,2015,45(10):1052-1059.
- [19] 王小燕,杨勤科.中尺度流域土地利用变化对土壤侵蚀的影响:以孤山川流域为例[J].水土保持通报,2016,36(2):1-7,349.
- Wang X Y, Yang Q K. Effects of land use on soil erosion in Mesoscale Watershed: A case study at Gushanchuan Watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(2):1-7,349.
- [20] 冉大川,齐斌,肖培青,等.佳芦河流域特大暴雨洪水对下垫面治理的响应[J].水土保持研究,2015,22(6):7-13.
- Ran D C, Qi B, Xiao P Q, et al. Response of extraordinary rainstorm and flood to the harnessing for underlying surface in Jialu River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(6):7-13.

(上接第31页)

- [22] Xin Z, Yu X, Li Q, et al. Spatiotemporal variation in rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau during the period 1956—2008 [J]. Regional Environmental Change, 2011,11(1):149-159.
- [23] 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 W B, Xie Y, Liu B Y. Spatial distribution of rainfall erosivity in China [J]. Journal of Mountain Research, 2003,21(1):33-40.
- [24] Guo B, Luo W, Han B, et al. Multiple spatial-temporal scale change patterns of rainfall erosivity in China over past 58 years based on gravity centre model [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019,10(1):2200-2219.
- [25] 韩建,占车生,王飞宇,等.太行山区降水空间扩展方法与垂直地带性分析[J].山地学报,2017,35(6):761-768.
- Han J, Zhan C S, Wang F Y, et al. Comparison of the methods of precipitation spatial expansion and analysis of vertical zonality in the Taihang Mountains [J]. Journal of Mountain Research, 2017,35(6):761-768.
- [26] 夏正兵.黄河流域极端气候下降雨侵蚀力时空特征研究[J].水电能源科学,2021,39(7):16-19.
- Xia Z B. Study on temporal and spatial characteristics of rainfall erosion under extreme climate in the Yellow River Basin[J]. Water Resources and Power, 2021,39(7):16-19.

(上接第39页)

- [29] 张学珍,郑景云,郝志新.中国主要经济区的近期气候变化特征评估[J].地理科学进展,2020,39(10):1609-1618.
- Zhang X Z, Zheng J Y, Hao Z X. Climate change assessments for the main economic zones of China during recent decades[J]. Progress in Geography, 2020,39(10):1609-1618.
- [30] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等.耕作对土壤入渗性能的影响[J].生态学报,2006,26(5):1624-1630.
- Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, et al. Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006(5):1624-1630.
- [31] 殷建华.南方红壤丘陵区不同植被类型土壤不同土层水分对降水的响应[J].东北林业大学学报,2017,45(11):72-77.
- Yin J H. Response of soil moisture to rainfall in *Pinus massoniana* stands and *Paspalum notatum* grassland in hilly red soil region of southern China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017,45(11):72-77.
- [32] Wang Y, Xie Z, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2009,96(3):374-382.