

1991—2023 年陕西省榆林市降雨侵蚀力时空变化

郭锐^{1,2,3,4}, 李旭强^{1,2,3,4}, 马瑞^{1,2,3,4}, 赵帅帅^{1,2,3}

(1. 黄河水土保持绥德治理监督局 绥德水土保持科学试验站, 陕西 榆林 719000;

2. 黄土高原水土保持野外科学观测研究站, 陕西 榆林 719000; 3. 黄土高原水土保持与生态修复国家林业和草原局重点实验室, 陕西 榆林 719000; 4. 陕西黄河规划设计研究有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要: [目的] 探究榆林市降雨侵蚀力时空分布特征及变化趋势, 为研究区域水土流失规律和制定水土保持工作提供理论指导。[方法] 基于榆林市及周边 18 个气象站 1991—2023 年的日降雨量数据, 利用日降雨量侵蚀力模型计算各站点的降雨侵蚀力值; 运用统计分析方法, 探讨分析榆林市 33 a 降雨侵蚀力时空分布特征及变化趋势。[结果] 榆林市年均降雨侵蚀力为 952.88 MJ·mm/(hm²·h·a), 年均侵蚀性降雨量为 270.87 mm; 榆林市各站点降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量年内分布不均, 主要集中在夏秋两季; 降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量空间分布均呈从西北向东南递增。未来降雨侵蚀力除吴堡站延续过去的趋势之外, 其余各站点均与过去相反; 榆林市降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量未来将会逐渐减小。[结论] 榆林市年降雨侵蚀力呈波动上升趋势, 各站点年际间降雨侵蚀力波动较大, 区域未来降雨侵蚀力变化趋势预估呈减小态势。降雨侵蚀力变化趋向仍存在一定的不确定性, 因此需加强水土保持治理和土壤侵蚀防治工作, 特别是降雨侵蚀力上升的站点。

关键词: 降雨侵蚀力; 侵蚀性降雨量; 时空变化; 趋势分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0227-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 郭锐, 李旭强, 马瑞, 等. 1991—2023 年陕西省榆林市降雨侵蚀力时空变化[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 227-235. Guo Rui, Li Xuqiang, Ma Rui, et al. Spatiotemporal variation of rainfall erosivity in Yulin City of Shaanxi Province during 1991—2023 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 227-235.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.040

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.040

Spatiotemporal variation of rainfall erosivity in Yulin City of Shaanxi Province during 1991—2023

Guo Rui^{1,2,3,4}, Li Xuqiang^{1,2,3,4}, Ma Rui^{1,2,3,4}, Zhao Shuaishuai^{1,2,3}

(1. *Suide Water and Soil Conservation Scientific Experimental Station, Suide Administration and Supervision Bureau of Soil and Water Conservation of the Yellow River, Yulin, Shaanxi 719000, China*; 2. *Observation and Research Station of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau, Yulin, Shaanxi 719000, China*; 3. *Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration on the Loess Plateau, State Forestry and Grassland Administration, Yulin, Shaanxi 719000, China*; 4. *Shaanxi Yellow River Planning Design Research Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719000, China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal distribution characteristics and variation trends of rainfall erosivity in Yulin City of Shaanxi Province were explored, in order to provide theoretical guidance for studying the regional soil erosion patterns and formulating soil and water conservation measures. [Methods] Based on daily rainfall data collected at 18 meteorological stations in and around Yulin City from 1991 to 2023, the rainfall erosivity values at each station were calculated using a daily rainfall erosivity model. The spatiotemporal distribution characteristics and variation trends of rainfall erosivity over the past 33 years in Yulin City were then explored and analyzed using statistical methods. [Results] The annual average rainfall erosivity in Yulin City was 952.88 MJ·mm/(hm²·h·a), and the annual average erosive rainfall was 270.87 mm. The rainfall erosivity and erosive rainfall at each station in Yulin City were unevenly distributed throughout the year, mainly concentrated in summer and autumn. The spatial

收稿日期: 2025-05-12

修回日期: 2025-09-28

采用日期: 2025-09-29

资助项目: 国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金重点支持项目“黄河旱区流域分布式水文模型研制与雨洪过程演变协同驱动机理”(U2243227)

第一作者: 郭锐(1988—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 硕士, 主要从事水土保持、水文水资源等方面的研究。Email: 304352014@qq.com。

通信作者: 李旭强(1993—), 男(汉族), 甘肃省会宁县人, 硕士, 主要从事水土保持、水文水资源等方面的研究。Email: 15002677165@163.com。

distribution patterns of rainfall erosivity and erosive rainfall were generally consistent, both showing an overall increasing trend from northwest to southeast. In the future, except for Wubao station which would continue its historical trend, the rainfall erosivity at all other stations was projected to show trends opposite to the past, with rainfall erosivity and erosive rainfall expected to gradually decrease. [Conclusion] The annual rainfall erosivity in Yulin City shows a fluctuating upward trend, with significant interannual fluctuations observed at various stations. The future trend of rainfall erosivity in this region is projected to decrease. However, significant uncertainties remain regarding its variation trend. Therefore, it is necessary to strengthen soil and water conservation management and soil erosion prevention, particularly at stations where rainfall erosivity shows an increasing trend.

Keywords: rainfall erosivity; erosive rainfall; spatiotemporal variation; trend analysis

降雨是影响区域发生土壤侵蚀最主要的自然驱动力^[1]。降雨侵蚀力作为表征降雨对土壤侵蚀影响的潜在能力和生态敏感性评价的基础指标^[2-4],在USLE, RUSLE, EPIC等模型中均被认为是评估土壤侵蚀最重要的参数之一^[5-6]。

目前,国内外众多专家学者结合本国本区域实际降雨统计资料,建立并运用基于次降雨量^[7]、日降雨量^[8-9]、月降雨量^[10]、年降雨量^[11]的雨量因子结合其他指标等^[12]的降雨侵蚀力简易计算模型,在降雨产生土壤侵蚀的机理和应用等方面取得了丰硕的成果。国内主要以章文波等^[9]构建的基于日降雨量估算半月降雨侵蚀力,进而统计年降雨侵蚀力的算法,其计算精度高,在各地各流域范围均得到最为广泛的应用,并取得良好的效果^[13-14]。目前,黄土高原降雨侵蚀力的研究大多采用日降雨量模型^[15-17]。

陕西省榆林市地处黄土高原水土流失核心区,是黄河中上游主要的输沙区,也是黄河上中游生态保护的关键区域。降水尤其是极端暴雨导致土壤表面被冲刷,土壤侵蚀严重,生态环境恶化^[18]。目前,已有学者对黄土高原不同区域降雨侵蚀力进行了相关研究,如杨岩岩等^[19]以靖边县为例,运用气象数据分析了该区域2007—2009年降雨侵蚀力的年际和年内分布;殷水清等^[20]利用多年平均降雨量资料估算了黄土高原地区多年平均降雨侵蚀力;陈剑南等^[21]估算了黄土高原1901—2016年逐月降雨侵蚀力,并分析其百年尺度的时空变化特征;胡琳等^[22]利用气象站点逐日降水数据,基于日降雨侵蚀力模型估算陕西省的降雨侵蚀力,分析其全年和四季空间分布特征,并分析了年内变化特征;姬兴杰等^[14]采用日降雨侵蚀力模型计算黄河流域317个气象站降雨侵蚀力,统计分析了流域降雨侵蚀力的时空变化特征及其与地理因子和气象因子的关系,从总体趋势角度综合探讨了土壤水蚀加剧的原因。然而,针对整个榆林市降雨侵蚀力的时空变化特征缺乏系统研究。基于此,本文选取榆林市及周边18个气象站逐

日降雨量资料,基于日降雨侵蚀力模型,采用统计方法,分析榆林市降雨侵蚀力时空变化特征和演变规律,以期为榆林市水土保持措施优化、农业管理和生态保护等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

榆林市位于陕西省北部,地理坐标为107°28′—111°15′E,36°57′—39°35′N,总面积43 578 km²,约占陕西省总面积的21%。该地属中温带半干旱大陆性季风气候,四季分明,无霜期短,年平均气温10℃,年平均降水量316~513 mm,且集中在7—9月,多暴雨。地势由西向东倾斜,地貌类型有风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区、沿黄土石山区和白于山河源梁涧区4大类(图1)。境内河流属于黄河水系,境北、西及东南部为无定河流域,面积5 904 km²,占全市河流面积的86.4%^[18]。

1.2 数据来源

采用分布于榆林市及周边的18个气象站点1991—2023年逐日降水量(24 h降水量)数据。数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心《中国气象数据要素逐日站点观测数据集》(<https://www.resdc.cn>)。站点分布见图1。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算

采用章文波等^[10]提出的基于日降雨量资料计算降雨侵蚀力的方法。首先计算逐年每个半月的降雨侵蚀力,然后累计汇总得到各月以及各年的降雨侵蚀力。计算公式为

$$R_i = \alpha \sum_{m=1}^n (P_m)^\beta \quad (1)$$

式中: R_i 为第*i*个半月时段内的降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm²·h)]; n 为半月时段内侵蚀性降雨日数; P_m 为半月时段内第*m*天的侵蚀性日降雨量(≥12 mm), (mm); α, β 为模型参数,其计算公式为

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (2)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (3)$$

式中: P_{d12} 为日降雨量 ≥ 12 mm的日平均降雨量(mm);
 P_{y12} 为日降雨量 ≥ 12 mm的年平均降雨量(mm)。

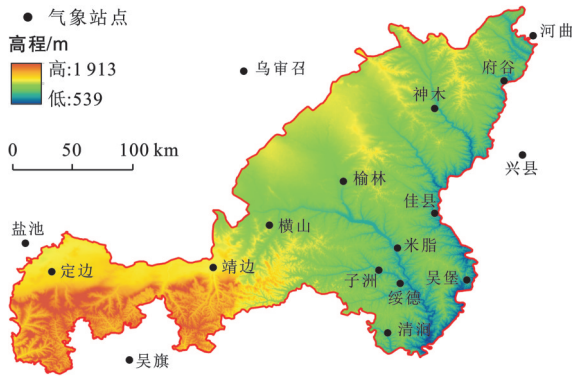


图1 榆林市高程及气象站点分布

Fig.1 Elevation and distribution of meteorological stations in Yulin City

1.3.2 时空变化分析方法

对降雨侵蚀力的时间变化运用趋势分析法,采用累积距平法分析研究时段内榆林市降雨侵蚀力的年际变化趋势和阶段;通过 Mann-Kendall 统计量 Z 值和离差系数 (C_v) 判断该研究时段内侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力的变化趋势,当 $Z > 0$ 时为上升趋势, $Z < 0$ 时为下降趋势, Z 的绝对值越大,表明该序列的变化趋势越显著, $|Z| > 1.96$,表明通过 0.05 显著性检验^[23];离差系数 (C_v) 越大,表明年降雨侵蚀力波动幅度越明显^[6]。采用 R/S 分析法计算 Hurst 值 (H),预测未来的变化趋势,当 $0.5 < H < 1$ 时表明未来趋势与过去一致,且 H 值越接近 1,与过去持续性越强, $0 < H < 0.5$ 时表明未来趋势与过去相反,且 H 值越接近 0,反持续性越强^[13,24]。对降雨侵蚀力的空间变化运用 ArcGIS 中地统计模块的反距离权重空间插值方法,对各离散点进行空间内插,分析年均降雨侵蚀力空间分布。

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀力的时间变化

2.1.1 年际变化

榆林市年降雨侵蚀力与年侵蚀性降雨量变化趋势基本一致,均呈波动上升趋势(详见图2)。该区年降雨侵蚀力趋势率为 $12.9974 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a}^2)$,多年平均降雨侵蚀力为 $952.88 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,最大值和最小值分别出现在 2017 年和 2000 年,其值分别为 $1543.40 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 和 $449.31 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/$

$(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,相差 3.44 倍,离差系数 C_v 为 0.29。年侵蚀性降雨量趋势率为 $3.7074 \text{ mm}/\text{a}$,多年平均侵蚀性降雨量为 262.35 mm ,最大值和最小值分别出现在 2017 年和 1999 年,分别为 446.47 mm 和 124.30 mm ,相差 3.59 倍,离差系数 C_v 为 0.29。

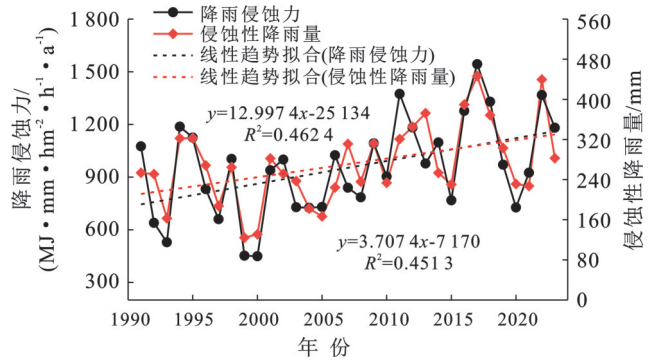


图2 1991—2023年榆林市年降雨侵蚀力和年侵蚀性降雨量的变化

Fig.2 Changes in annual rainfall erosivity and annual erosive rainfall in Yulin City during 1991—2023

由图 3a 及 3b 可知,榆林市各站点降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量的最值年份不尽相同。各站点降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量最大值年份有所不同,出现这种现象是因为虽然部分站点年侵蚀性降雨量较大,但是有多次强降雨是集中在一个半月内的。研究表明,横山、靖边、子洲的降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量最大值均为 2017 年,吴堡均为 2016 年,定边均为 2001 年,府谷均为 1995 年,榆林分别为 2016 年和 2018 年,神木分别为 1995 年和 2013 年,米脂分别为 2017 年和 2022 年,佳县分别为 2012 年和 2022 年,绥德分别为 2022 年和 2013 年,清涧分别为 2006 年和 2022 年。同一站点降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量最小值年份完全一致的是横山、定边、神木、绥德,均为 2000 年,米脂、子洲、吴堡、清涧均为 1999 年,靖边、府谷均为 2006 年,榆林和佳县分别为 2005 年和 1997 年。

不同年份的降雨侵蚀力最大值与最小值差异较大(图 3a),部分站点相差可达 $2500 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 以上,其中,吴堡的差值达到 $2540.50 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,差值最小的是绥德县,为 $1228.42 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。榆林市各站点降雨侵蚀力离差系数 C_v 的变化范围为 $0.37\sim 0.55$,定边最大,清涧最小,表明定边降雨侵蚀力的年际变化波动最大,而绥德降雨侵蚀力的年际变化波动最小。研究表明,各站点降雨侵蚀力 C_v 总体呈现自西向东逐渐减小的变化趋势,受到地理地形及气候等因素的影响,不同年份的侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力变化存在差异(表 1)。

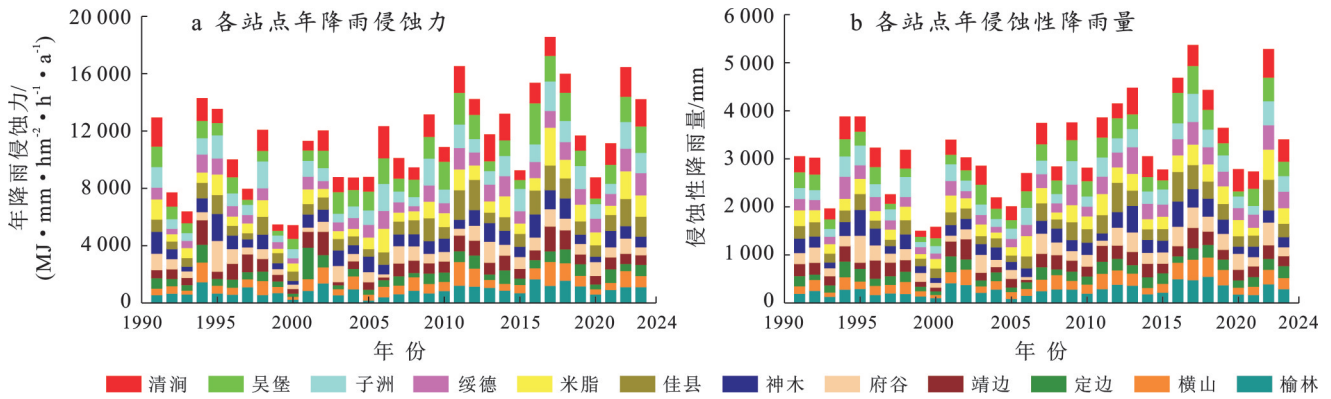


图 3 1991—2023 年榆林市各站点年降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量变化

Fig.3 Changes in annual rainfall erosivity and erosive rainfall at different stations in Yulin City during 1991—2023

表 1 榆林市各站点降雨侵蚀力年际变化离差系数(C_v)

Table 1 Coefficient of variation of interannual rainfall erosivity (C_v) at different stations in Yulin City

站点	榆林	横山	定边	靖边	府谷	神木	佳县	米脂	绥德	子洲	吴堡	清涧
C _v 值	0.40	0.50	0.55	0.47	0.47	0.41	0.44	0.49	0.38	0.40	0.47	0.37

榆林市全区域与各站点的年降雨侵蚀力累积距平变化趋势基本一致(图 4a)。同时,将降雨侵蚀力变化大体划分为 2 个阶段:2005 以前,累积距平呈不断减小趋势,表明各年降雨侵蚀力与多年平均值差

值为负;2005 年以后,累积距平呈现持续上升趋势,表明降雨侵蚀力高于多年平均值。侵蚀性降雨量与降雨侵蚀力累积距平的变化趋势基本一致(图 4b)。

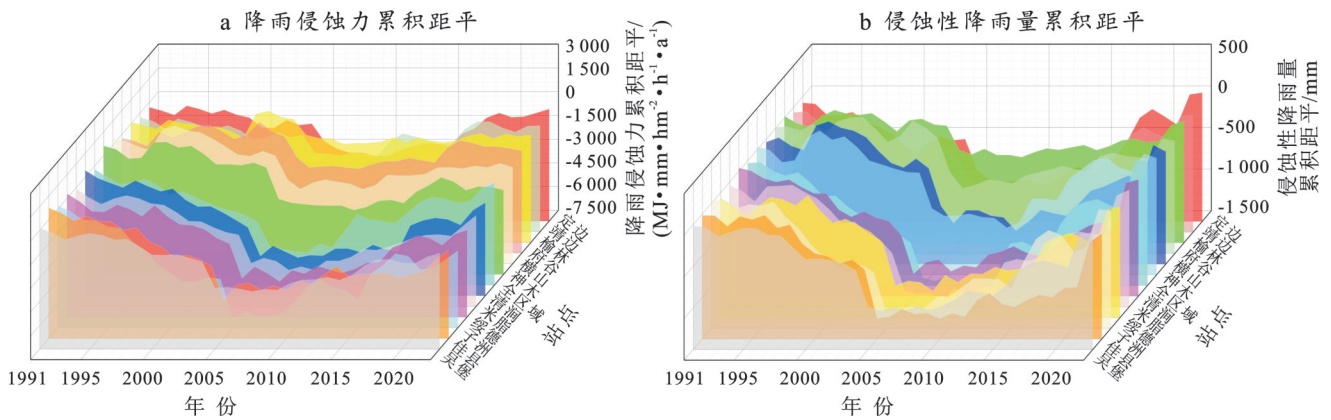


图 4 1991—2023 年榆林市降雨侵蚀力与侵蚀性降雨量累积距平

Fig.4 Cumulative anomalies of rainfall erosivity and erosive rainfall in Yulin City during 1991—2023

2.1.2 年内变化

由图 5 可知,榆林市全区域及各站点降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量的年内变化与季节降雨变化相似,降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量均呈先增长后降低的变化趋势。研究区地处中温带半干旱区,受大陆季风气候影响,冬春季温度低、降水量少,相应的侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力亦较小,分别占全年的 15.28%~21.86%(春季占 10.08%~15.52%,冬季占 5.14%~7.32%)和 11.12%~17.13%(春季占 7.42%~11.43%,冬季占 3.74%~6.09%),而夏秋季降雨量大,侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力亦增多,分别占全年的

78.14%~84.72%(夏季占 35.74%~41.48%,秋季占 39.10%~45.49%)和 82.79%~88.88%(夏季占 37.05%~47.88%,秋季占 36.43%~49.23%)。榆林市全域降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量峰值分别出现在 7 月和 8 月,分别为 596.59 MJ·mm/(hm²·h·a) 和 85.9 mm。

各站点的年内侵蚀性降雨量与降雨侵蚀力的变化与榆林市全区域变化趋势基本一致,其中,佳县、绥德、米脂、子洲、吴堡和清涧 6 个南部站总体高于全区域平均水平,而定边、靖边、横山、榆林、府谷、神木 6 个北部站总体低于全区域平均水平。

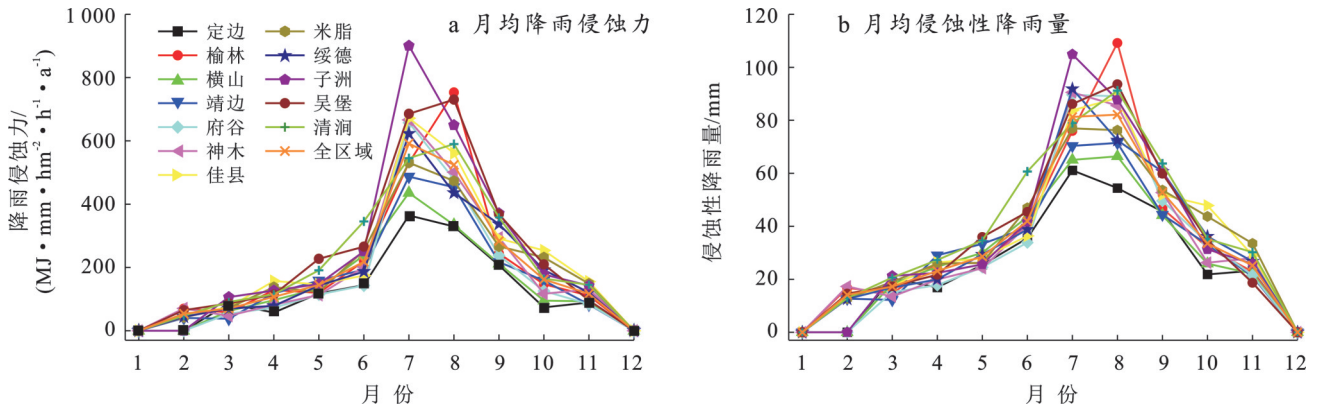


图 5 1991—2023 年榆林市全区域及各站点的月均降雨侵蚀力及侵蚀性降雨量
 Fig.5 Monthly average rainfall erosivity and erosive rainfall across entire region and different stations in Yulin City during 1991—2023

2.2 降雨侵蚀力的空间变化

2.2.1 空间分布规律

采用榆林市各县区及其周边各站点 1991—2023 年平均降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量数据,采用反距离权重空间插值得到榆林市全区域的年降雨侵蚀力和年侵蚀性降雨量空间分布(图 6)。

由图 6 中可以看出,年降雨侵蚀力空间分布呈现从西向东逐渐递增的变化趋势(图 6a),这与年侵蚀性降雨量的空间分布规律基本一致(图 6b)。年降雨侵蚀力范围为 449.31~1 543.40 MJ·mm/(hm²·h·a),年侵蚀性降雨量从西北部的 124.3 mm 增加至东南部的 446.5 mm。

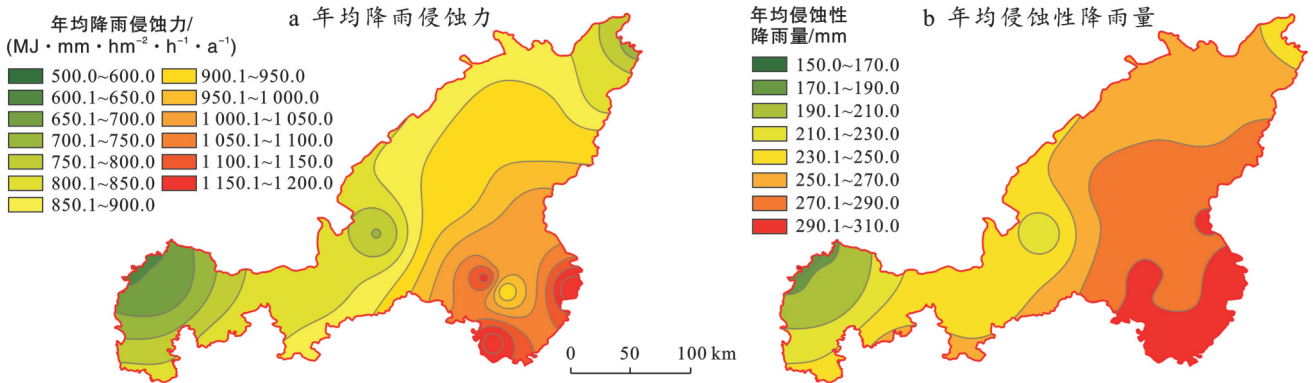


图 6 1991—2023 年榆林市年降雨侵蚀力和年侵蚀性降雨量空间分布

Fig.6 Spatial distribution of annual rainfall erosivity and erosive rainfall in Yulin City during 1991—2023

年降雨侵蚀力与年侵蚀性降雨量的高值中心均位于榆林市东南部吴堡、清涧、子洲站附近,低值中心位于榆林市西北部定边、横山附近(图 6)。由图 7 可知,位于高值中心处的吴堡站多年平均降雨侵蚀力最大[1 236.93 MJ·mm/(hm²·h·a)],清涧站次之[1 222.14 MJ·mm/(hm²·h·a)];多年平均侵蚀性降雨量最大的是清涧站(329.2 mm),吴堡站次之(305.4 mm)。处于低值中心处的定边站多年平均降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量均最小,其值分别为 661.24 MJ·mm/(hm²·h·a)和 194.3 mm。

2.2.2 空间变化趋势

为了深入分析榆林市降雨侵蚀力的变化趋势,本研究计算了各站点多年降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量统计值 Z,并对其进行反距离权重插值,分别得到

降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量 Z 值(图 7)。

降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量 Z 值空间分布(图 8)表明,Z 值空间变化趋势差异较大,Z 值均大于 0,且全区域降雨侵蚀力的 Z 值为 2.40,通过显著性检验,表明降雨侵蚀力随侵蚀性降雨量的增加呈现显著上升趋势,同时因降雨侵蚀力的增加而引发水土流失的可能性将增加,尤其是榆林市东南部黄土丘陵沟壑区和沿黄土石山区,相对北部风沙草滩区和西部白于山河源梁涧区尤为突出,应结合实际情况采取相应的水土保持措施,防范水土流失的加剧。榆林、佳县、米脂、绥德、子洲、清涧和吴堡 7 个站点的降雨侵蚀力统计值 $|Z| > 1.96$,通过显著性检验;榆林、横山、佳县、米脂、绥德和清涧 6 个站点的侵蚀性降雨量统计值 $|Z| > 1.96$,通过显著性检验。

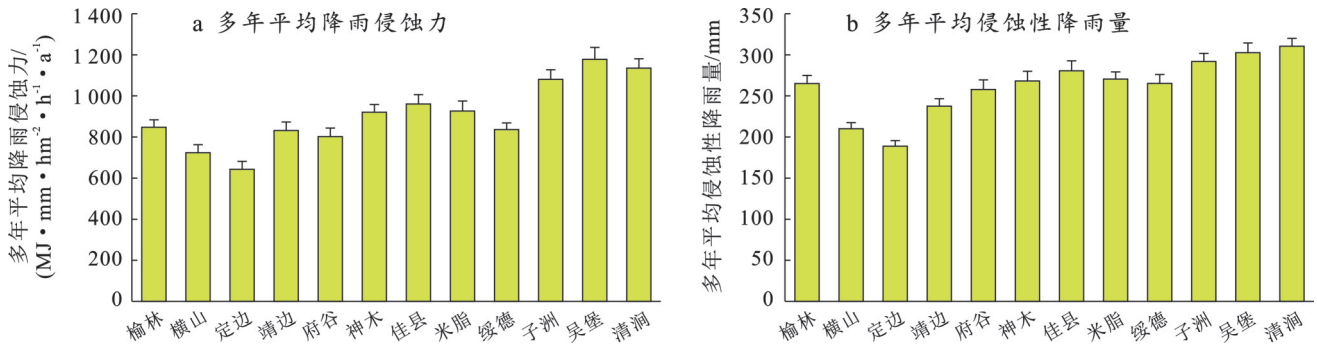


图 7 1991—2023 年榆林市各站点多年平均降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量

Fig.7 Multi-year average rainfall erosivity and erosive rainfall at different stations in Yulin City during 1991—2023

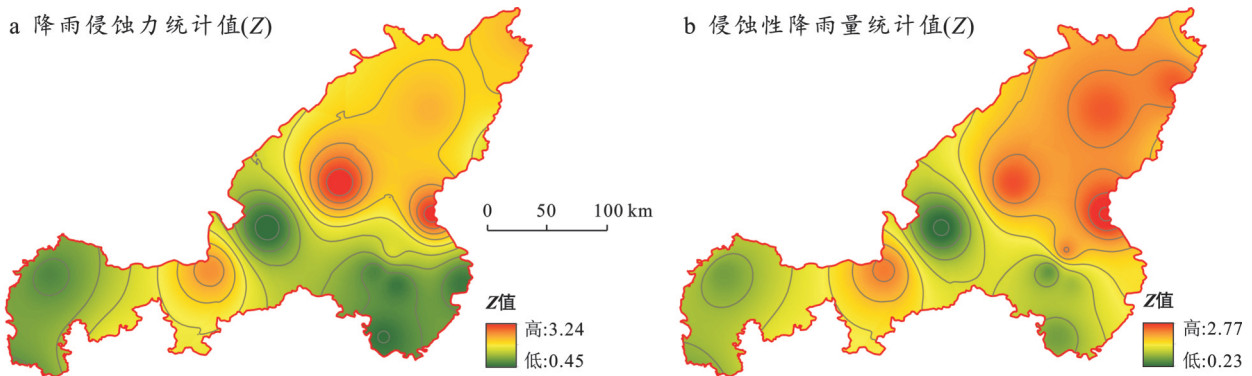


图 8 1991—2023 年榆林市降雨侵蚀力和侵蚀性降雨统计值 Z 空间分布

Fig.8 Spatial distribution of statistical value Z of rainfall erosivity and erosive rainfall in Yulin City during 1991—2023

2.3 降雨侵蚀力未来趋势分析

综合考虑榆林市 1991—2023 年降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量线性趋势拟合(趋势率均为正值)、累积距平(从 2005 年开始累积距平均呈上升趋势)、Mann-Kendall 统计量 Z 值(Z 值均大于 0),可以判断出最近的历史时期内,全区域及各站点的降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量均呈现增加趋势。

基于 Hurst 指数对未来趋势的预测,由表 2 各站点降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量的 R/S 分析结果可知,除吴堡($H=0.537 2$)外,其他 11 个站点的降雨侵蚀力的 H 值均小于 0.5,榆林市全区域降雨侵蚀力的 $H=0.389 4$;12 个站点侵蚀性降雨量的 H 值均小于 0.5,全市侵蚀性降雨量的 H 为 0.392 4。这表明降雨侵蚀力序列和侵蚀性降雨量序列均具有反持续性(或均值回复)^[25],总体上与历史变化趋势相反。

表 3 表明,榆林市全区域降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量未来变化趋势与过去相反,将会逐渐减小;其中,吴堡将延续历史变化趋势,继续保持不断增加,其他站点均与历史变化趋势相反,预计未来会向着逐渐减小的趋势发展;各站点的侵蚀性降雨量均与历史趋势相反,预计未来会缓慢减小。

表 2 榆林市各站点降雨侵蚀力及侵蚀性降雨量的 R/S 分析结果

Table 2 R/S analysis results of rainfall erosivity and erosive rainfall at different stations in Yulin City

站点	降雨侵蚀力		侵蚀性降雨量	
	H	R ²	H	R ²
榆林	0.409 4	0.857 6	0.425 9	0.951 1
横山	0.344 1	0.848 6	0.405 4	0.921 7
定边	0.426 5	0.979 2	0.253 6	0.678 4
靖边	0.375 9	0.841 5	0.383 0	0.958 1
府谷	0.382 9	0.896 7	0.399 2	0.855 8
神木	0.367 1	0.829 9	0.365 9	0.799 7
佳县	0.348 8	0.796 9	0.416 9	0.813 3
米脂	0.385 1	0.791 1	0.307 1	0.721 2
绥德	0.298 5	0.700 5	0.343 0	0.829 9
子洲	0.202 3	0.429 9	0.280 1	0.771 1
吴堡	0.537 2	0.850 2	0.447 2	0.898 0
清涧	0.389 7	0.830 7	0.362 2	0.915 4
全区域	0.389 4	0.826 3	0.392 4	0.877 2

注:H 为 Hurst 值;R² 为决定系数。

3 讨论

本研究利用榆林市 12 个气象站点和周边 6 个气象站点日降雨资料,分析了榆林市降雨侵蚀力的空

间分布及时序变化趋势。结果表明,榆林市降雨侵蚀力及侵蚀性降雨量总体表现为自西北部向东南部逐渐增加,这与殷水清等^[3]对全国,高歌等^[2]和姬兴杰等^[14]对黄河流域,李静等^[26]和KEO等^[1]对黄土高原,胡琳等^[22]对陕西省等区域研究多年平均降雨侵蚀力空间分布的结果中关于榆林市区域内的降雨侵蚀力分布规律基本吻合。

表3 榆林市各站点降雨侵蚀力及侵蚀性降雨量未来趋势
Table 3 Future trends of rainfall erosivity and erosive rainfall at different stations in Yulin City

站点	降雨侵蚀力		侵蚀性降雨量	
	历史变化趋势	未来变化趋势	历史变化趋势	未来变化趋势
榆林	增加	减少	增加	减少
横山	增加	减少	增加	减少
定边	增加	减少	增加	减少
靖边	增加	减少	增加	减少
府谷	增加	减少	增加	减少
神木	增加	减少	增加	减少
佳县	增加	减少	增加	减少
米脂	增加	减少	增加	减少
绥德	增加	减少	增加	减少
子洲	增加	减少	增加	减少
吴堡	增加	增加	增加	减少
清涧	增加	减少	增加	减少
全区域	增加	减少	增加	减少

研究表明,榆林市1991—2023年平均降雨侵蚀力为 $661.24\sim 1\,236.93\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,与姬兴杰等^[14]1961—2017黄河流域降雨侵蚀力榆林市区域内 $400\sim 1\,200\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,廉陆鹞等^[27]黄河流域1960—2022年降雨侵蚀力时空变化特征榆林市区域内 $800\sim 1\,400\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,胡琳等^[22]1971—2000年结果中陕西省榆林市全区域的 $781\sim 1\,514\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 存在差异。主要原因可能是研究时间段不一致,相应的数据来源不同,日均和年均侵蚀性降雨量存在差异,导致计算模型中系数 α 和 β 不同。其中,本研究结果中侵蚀性降雨量为 $194.3\sim 329.2\text{ mm}$,而胡琳等^[22]研究结果为 $169\sim 350\text{ mm}$,可能是大尺度的空间差值,相应的研究区域数据量不足,计算结果空间插值形成的结果有一定的差距,出现这一问题的具体原因还需进一步研究探讨。本研究的降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量的低值中心与胡琳等^[22]的研究结果完全吻合,整个陕西省的低值中心出现在榆林市西北部定边与横山,本研

究中低值中心亦位于定边和横山站附近。杨岩岩等^[19]利用试验站自动气象站实测气象数据所计算得到的靖边县2007—2009年的侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力与本研究同时期的结果基本一致,可见本研究结果在可靠范围内。

陈剑南等^[21]对1901—2016年黄土高原降雨侵蚀力的研究表明,丘陵沟壑区中部(包括榆林市绝大部分地区)的降雨侵蚀力显著增加;姬兴杰等^[18]对黄河流域降雨侵蚀力气候倾向率显著性检验分析表明,陕西北部(包括榆林市大部分区域)降雨侵蚀力呈显著性增加趋势,以上研究结果与本研究基本相同。

榆林市全区域降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量未来变化趋势与过去相反,呈逐渐减小趋势,其原因可能是降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量受制于未来气候要素的波动变化存在周期性波动减小^[21]。本研究累积距平结果表明,2005年之前的14 a降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量累积距平不断缩小,2005年之后的18 a降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量累积距平不断增加,说明过去30余年榆林市降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量趋势存在波动变化。同时,通过 R/S 分析计算的Hurst指数对未来趋势的预测分析存在不确定性,后续研究将增加未来变化趋势的不同研究方法进行进一步预测分析,使预测分析结果对于当地更具有参考作用。

2012年7月27日佳县等地、2017年7月25—26日绥德等地、2022年7月10—11日定边县发生了暴雨和大暴雨。2022年11月10—11日佳县遭受了立冬后百年不遇的特大暴雨。未来榆林市降雨侵蚀力可能会减小,但是还需关注气候变化和防范极端降水等对榆林市降雨侵蚀力的可能影响。榆林市所在的黄土高原地区水土流失治理工程保有量巨大^[28],建议榆林市各地区根据自身独特的侵蚀环境和特点,在水土流失治理质量上进一步提高和改善,在治理对策上坚持“防治结合+工程治理”,做好梯田淤地坝水土保持措施的功能提升,增加抵御暴力和抗风险能力,充分利用降雨推进植被恢复措施,减少极端降雨造成的水土流失^[29]。

4 结论

(1) 榆林市降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量的年际变化均呈现波动式上升趋势。年均降雨侵蚀力为 $952.88\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,年均侵蚀性降雨量为 270.8 mm ,离差系数均为0.29。降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量在2005年之前逐渐减小,2005年之后呈增加趋势。

(2) 榆林市降雨侵蚀力和侵蚀性降雨年内分布

不均,主要集中在秋季,分别占全年的43.21%和42.01%。榆林市年内降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量南部站点整体大于北部站点。

(3) 榆林市降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量空间分布均为由西北向东南逐渐增加。多年平均侵蚀性降雨量为194.3~329.2 mm,多年平均降雨侵蚀力为661.24~1 236.93 MJ·mm/(hm²·h·a)。榆林市降雨侵蚀力呈显著性增加趋势,其中4个站点的降雨侵蚀力通过显著性检验。

(4) 基于Hurst指数对未来变化趋势的预测分析,榆林市全区域降雨侵蚀力和侵蚀性降雨量未来变化趋势与过去相反,将会逐渐减小;各站点的降雨侵蚀力,吴堡站将延续历史变化趋势,继续保持增加趋势,其他站点将会向着逐渐减小的趋势发展;各站点的侵蚀性降雨量均与历史趋势相反,预计未来会缓慢减小。

参考文献(References)

- [1] KEO Soksamnang, 何洪鸣, 赵宏飞, 等. 黄土高原50余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 1-7.
Soksamnang K, He Hongming, Zhao Hongfei, et al. Analysis of rainfall erosivity change and its impacts on soil erosion on the Loess Plateau over more than 50 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 1-7.
- [2] 李嘉睿, 李乐, 郝泽周, 等. 1982—2022年南方红壤区降雨侵蚀力时空格局演变及其归因分析[J]. 生态学报, 2025, 45(9): 4248-4262.
Li Jiarui, Li Le, Hao Zezhou, et al. Spatial-temporal pattern evolution and attribution analysis of rainfall erosivity in the red soil region of southern China from 1982 to 2022 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4248-4262.
- [3] 殷水清, 薛筱婵, 岳天雨, 等. 中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 105-113.
Yin Shuiqing, Xue Xiaochan, Yue Tianyu, et al. Spatio-temporal distribution and return period of rainfall erosivity in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 105-113.
- [4] Teng Hongfen, Hu Jie, Zhou Yue, et al. Modelling and mapping soil erosion potential in China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(2): 251-264.
- [5] 杨轩. 降雨侵蚀力计算方法研究进展[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(16): 5-8.
Yang Xuan. Research progress of computation method of rainfall erosivity [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(16): 5-8.
- [6] 余敏琪, 刘士余, 盛菲, 等. 基于不同量级日降雨的赣南湘水流域降雨侵蚀力时空变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 274-283.
Yu Minqi, Liu Shiyu, Sheng Fei, et al. Analysis of spatiotemporal variation characteristics of rainfall erosivity in Xiangshui River basin of southern Jiangxi Province based on different daily rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 274-283.
- [7] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington, DC: USDA, 1987: 537.
- [8] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount [J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(1): 153-156.
- [9] 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.
- [10] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE [J]. Journal of Hydrology, 1994, 157(1/2/3/4): 287-306.
- [11] Lee J H, Heo J H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea [J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1/2): 30-48.
- [12] Mikhailova E A, Bryant R B, Schwager S J, et al. Predicting rainfall erosivity in Honduras [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 273-279.
- [13] 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. Spatio-temporal 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.
- [14] 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.
- [15] Yin Minfeng, Zhang Jiaqiong, Shang Yueting, et al. Correlation between flood couplet-based sediment yield and rainfall patterns in a small watershed on the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2024, 637: 131407.
- [16] Wu Quanlong, Jiang Xiaohui, Shi Xiaowei, et al. Spa-

- tiotemporal evolution characteristics of soil erosion and its driving mechanisms: A case study: Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2024, 242:108075.
- [17] 谢乐,侯鹏,周涛,等.黄土高原降雨特征对降雨侵蚀力时空变化的影响[J].*生态学报*, 2025, 45(10):4940-4951.
Xie Le, Hou Peng, Zhou Tao, et al. The rainfall characteristics effect spatiotemporal patterns of rainfall erosivity in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(10):4940-4951.
- [18] 徐云环,李景宜,任冲,等.陕西省榆林市土壤侵蚀动态演变及预测[J].*安徽农业科学*, 2020, 48(13):63-69.
Xu Yunhuan, Li Jingyi, Ren Chong, et al. Dynamic evolution and predictions of soil erosion in Yulin City, Shaanxi Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(13):63-69.
- [19] 杨岩岩,刘连友,曹恒武.沙漠-黄土过渡带风水复合侵蚀营力特征:以靖边县为例[J].*干旱区研究*, 2012, 29(4):692-698.
Yang Yanyan, Liu Lianyou, Cao Hengwu. Wind and water erosive forces in a desert-loess ecotone: A case study in Jingbian County, Shaanxi Province [J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(4):692-698.
- [20] 殷水清,谢云.黄土高原降雨侵蚀力时空分布[J].*水土保持通报*, 2005, 25(4):29-33.
Yin Shuiqing, Xie Yun. Spatial variations and seasonal distributions of rainfall erosivity on Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(4):29-33.
- [21] 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.
- [22] 胡琳,苏静,桑永枝,等.陕西省降雨侵蚀力时空分布特征[J].*干旱区地理*, 2014, 37(6):1101-1107.
Hu Lin, Su Jing, Sang Yongzhi, et al. Spatial and temporal characteristics of rainfall erosivity in Shaanxi Province [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6):1101-1107.
- [23] 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.
- [24] 潘雅婧,王仰麟,彭建,等.基于小波与R/S方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J].*地理研究*, 2012, 31(5):811-820.
Pan Yajing, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: Based on wavelet analysis and R/S analysis [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(5):811-820.
- [25] 黄诒蓉,罗奕.基于经典R/S分析方法的H指数估计有效性评价[J].*统计与信息论坛*, 2009, 24(8):59-64.
Huang Yirong, Luo Yi. Assessment on the efficiency of Hurst index estimation based on classical R/S method [J]. *Journal of Statistics and Information*, 2009, 24(8):59-64.
- [26] 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.
- [27] 廉陆鹞,杨茹珍,刘原峰,等.黄河流域1960—2022年降雨侵蚀力时空变化特征[J].*水土保持研究*, 2025, 32(5):39-47.
Lian Luyao, Yang Ruzhen, Liu Yuanfeng, et al. Spatiotemporal variation characteristics of rainfall erosivity in Yellow River basin from 1960 to 2022 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(5):39-47.
- [28] 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 Zongshan, Yang Lei, Wang Guoliang, 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.
- [29] 高歌,陈涛,徐沅鑫.1961—2023年中国降雨侵蚀力变化特征及未来趋势预估[J].*农业工程学报*, 2025, 41(4):50-58.
Gao Ge, Chen Tao, Xu Yuanxin. Variation and trend of rainfall erosivity in China during 1961—2023 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(4):50-58.