

DOI: 10.20103/j.stxb.202409102191

谢乐, 侯鹏, 周涛, 刘亦晟, 王家豪, 任晓琦. 黄土高原降雨特征对降雨侵蚀力时空变化的影响. 生态学报, 2025, 45(10): 4940-4951.

Xie L, Hou P, Zhou T, Liu Y S, Wang J H, Ren X Q. The rainfall characteristics effect spatiotemporal patterns of rainfall erosivity in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4940-4951.

黄土高原降雨特征对降雨侵蚀力时空变化的影响

谢 乐^{1,2}, 侯 鹏^{2,*}, 周 涛², 刘亦晟^{2,3}, 王家豪^{2,4}, 任晓琦^{2,5}

1 中国环境科学研究院, 北京 100012

2 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

3 中南林业科技大学, 长沙 410004

4 北京建筑大学测绘与城市空间信息学院, 北京 100044

5 山东科技大学测绘与空间信息学院, 青岛 266590

摘要: 黄土高原的脆弱生态环境导致降雨侵蚀现象频发, 准确评估降雨侵蚀力对优化该区生态管理策略具有重要意义。然而, 不同降雨侵蚀力估测模型差异导致其时空演变规律及驱动机制差异。因此, 利用黄土高原 1990—2021 年小时降雨数据, 分析雨量与雨强模型计算的降雨侵蚀力差异, 揭示不同季节、雨型、海拔等特征参量对两模型降雨侵蚀力时空分布规律的影响。结果显示: (1) 黄土高原基于雨强计算的年均降雨侵蚀力均值为 $918.36 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 范围在 $222.81—2583.52 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$; 基于雨量计算的年均降雨侵蚀力均值为 $1058.17 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 范围在 $271.92—2700.71 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。(2) 两种模型计算出的降雨侵蚀力空间分布和时间变化相似, 但基于雨强计算得到的降雨侵蚀力变异系数更高, 变异系数为 0.44。(3) 不同雨型、季节的降雨侵蚀力值空间分布相似, 随季节推移, 夏季降雨侵蚀力值最高且分布最广; 且雨强模型对海拔更敏感, 相关系数为 -0.58 。综上, 综合考虑雨量与雨强的双重效应可有效反映黄土高原降雨侵蚀过程的动态特征, 准确评估降雨侵蚀力对区域特征参量变化的响应, 有助于黄土高原生态环境的保护、支撑政府间水土保持相关策略的制定。

关键词: 降雨侵蚀力; 高时间分辨率; 模型差异; 时空变化

The rainfall characteristics effect spatiotemporal patterns of rainfall erosivity in the Loess Plateau

XIE Le^{1,2}, HOU Peng^{2,*}, ZHOU Tao², LIU Yisheng^{2,3}, WANG Jiahao^{2,4}, REN Xiaoqi^{2,5}

1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 Satellite Environment Application Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China

3 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

4 School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China

5 College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: The fragile ecological environment of the Loess Plateau significantly increases the susceptibility to rainfall erosion, underscoring the importance of accurately assessing rainfall erosivity to optimize ecological management strategies in this region. However, discrepancies in rainfall erosivity estimation models have led to variations in spatiotemporal patterns and driving mechanisms, complicating the understanding of erosion dynamics. To address this, this study utilized high-resolution hourly rainfall data from 281 stations across the Loess Plateau spanning the period from 1990 to 2021. The research aimed to analyze the differences between rainfall erosivity models based on rainfall amount and rainfall intensity,

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFF1306105)

收稿日期: 2024-09-10; 网络出版日期: 2025-03-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: houpey@163.com

and to explore the spatiotemporal distribution patterns of rainfall erosivity derived from these models. Furthermore, the study investigated the influence of key factors such as seasonal variations, rainfall types, and elevation on the formation and distribution of rainfall erosivity. The results revealed several critical findings: (1) The annual average rainfall erosivity calculated using the rainfall intensity model was $918.36 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, with values ranging from 222.81 to $2583.52 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$. In contrast, the annual average rainfall erosivity derived from the rainfall amount model was $1058.17 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, with a range of 271.92 to $2700.71 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$. (2) While both models yielded comparable spatial and temporal patterns in rainfall erosivity, the model predicated on rainfall intensity exhibited a greater degree of variability, as evidenced by its higher coefficient of variation (CV) of 0.44. This elevated CV underscores the heightened sensitivity of the rainfall intensity model to interannual fluctuations and variations in the characteristics of rainfall events, suggesting that it is more responsive to changes in rainfall patterns over time. (3) The spatial patterns of rainfall erosivity were consistent across different rainfall types and seasons, with the highest values and most extensive distribution observed during the summer months. Additionally, the rainfall intensity model demonstrated greater sensitivity to elevation, as evidenced by a correlation coefficient of -0.58 , suggesting that elevation plays a significant role in influencing rainfall erosivity when calculated using this model. In conclusion, this study highlights the importance of integrating the dual effects of rainfall amount and intensity to accurately capture the dynamic characteristics of rainfall erosion processes on the Loess Plateau. By providing a more precise evaluation of rainfall erosivity and its response to regional parameter variations, this research supports efforts to conserve the fragile ecological environment of the Loess Plateau. Furthermore, the findings offer valuable insights for policymakers in formulating effective soil and water conservation strategies, ultimately contributing to sustainable land management and ecological restoration in the region.

Key Words: rainfall erosivity; high temporal resolution; differences of models; spatiotemporal patterns

水土流失和土壤侵蚀是全球土壤资源面临的核心挑战,严重制约了人类可利用土地的可持续发展。土壤侵蚀不仅破坏土地资源,还可能引发旱涝灾害,进一步加剧水土流失^[1]。此外,水土流失还导致江河淤积、土地退化和生物多样性丧失等问题,削弱生态系统的稳定性与服务功能,对生态环境质量和社会经济发展构成重大威胁^[2-4]。因此,及时评估和预测土壤侵蚀的变化,依据地区侵蚀特征和气候环境采取适宜的防治措施,对生态恢复具有重要的意义^[5]。

降雨是土壤侵蚀过程中的主要驱动因素之一,其强度、降雨量、持续时间和类型等特征直接影响土壤侵蚀的发生和程度^[6]。在土壤侵蚀预测研究中,美国农业部提出的通用土壤流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation) 及其修正模型 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 得到了广泛应用^[7],其中的降雨侵蚀力因子(R 因子)用于量化降雨引发土壤侵蚀的能力。Wischmeier 等^[8]最早提出了次降雨动能计算年平均降雨侵蚀力(EI_{30} 算法),但其对高时间分辨率、长时序降雨数据的需求限制了实际应用范围。为克服这一局限,研究者们陆续开发了多种简化模型,包括日降雨、月降雨、季节性降雨和年降雨模型^[9-13],这些模型数据需求灵活、适用性更广,拓展了降雨侵蚀力研究的应用场景。在中国地区,谢云等^[13]从季节变化对模型进行参数化修正,得到了三种不同的模型,其中利用日最大 60min 降雨量数据和日雨量乘积的降雨侵蚀力计算模型精度要高于其他两个模型^[14]。基于降雨量的传统降雨侵蚀力模型具易用性和高精度特征,但忽略了雨强对降雨侵蚀力的影响。而通过结合高时间分辨率的降雨数据,利用雨强评估降雨侵蚀力可提高其估测精度^[15]。

黄土高原是全球土壤侵蚀最为严重的地区之一,每年土壤流失量对全球土壤侵蚀总量的贡献率高达 60%—90%^[16]。这种高侵蚀率主要归因于该地区地表松散、坡地裸露、植被覆盖率低等因素。此外,降雨主要集中在每年 6 月至 9 月,极端气候条件下的短时强降雨极易引发强烈的侵蚀过程,加剧地表径流,最终导致土壤侵蚀现象频繁发生^[17]。相关研究表明,降雨强度对土壤侵蚀的影响要高于华南地区,尤其是在西北黄土地区最为显著^[18]。然而,目前针对黄土高原降雨侵蚀力的研究大多采用日降雨量模型^[19-22],其局限性在于

难以有效捕捉短时降雨强度的快速变化对降雨侵蚀力的影响。从地形地貌特征来看,黄土高原呈现出西北高、东南低的地势特征且地貌类型多样。此外,黄土高原位于我国东西部之间的半湿润区向半干旱区的过渡地带,降水分布极为不均,呈现出从东南至西北、由山区向平地递减的趋势。这种地区气候与地形的差异,使得降雨的侵蚀力呈现出明显的空间分异特征^[23]。

综上,为精准解析不同季节、雨型、海拔等特征参量下雨强和雨量对黄土高原降雨侵蚀力的影响,本文选取黄土高原 1990—2021 年 281 个站点的逐小时数据,基于雨强的降雨侵蚀力模型^[24]与雨量的降雨侵蚀力模型^[13]估算降雨侵蚀力,分析黄土高原降雨侵蚀力的时空变化特征并揭示降雨侵蚀力与海拔的相关关系,验证雨强在短时强降雨气候特征下对降雨侵蚀力的显著影响,为未来黄土高原地区降雨侵蚀力的预测提供了重要的科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河流域的中游,范围在 34°—45°5′N, 101°—114°33′E,覆盖面积达 64 万 km²,海拔高度约为 200—3000m^[25],为温带大陆性季风气候,冬季干燥寒冷,夏季湿热,降雨主要集中在 6—9 月,年平均降水量在 150—720mm 之间,属于干旱/半干旱地区^[26]。黄土高原是世界上最大的黄土沉积区^[27],主要由于第四纪戈壁沙漠风积而成,容易遭受降雨、径流、重力、冻融和风力等侵蚀力作用剥离^[28],而短历时的强降雨是造成黄土高原水土流失严重的主要因素之一^[29]。区域示意图见图 1。

1.2 数据来源与处理

本研究选取的黄土高原 281 个站点实测小时降雨数据来源于国家气象信息中心,时间分辨率为每小时,时间序列为 1990—2021 年。其中 1990—2011 年大部分站点无冬季月份数据,但因黄土高原冬季降雨少,所以影响不显著。数字高程模型(DEM)数据使用地理空间数据云平台分辨率为 90m 的 ASTER GDEM 数据,主要用于分析降雨侵蚀力的垂直及相关性分析,计算不同海拔下的降雨侵蚀力变化规律。气象站点分布如图 1 所示,具体点位信息见附件。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算

(1) 基于雨强的降雨侵蚀力计算

一次降雨事件中侵蚀性降雨事件的降雨侵蚀力计算值一般广泛使用降雨强度指数 EI_{30} 表示。 EI_{30} 定义为降雨动能(E)与暴风雨 30min 最大强度(I_{30})的乘积。 E 的计算公式为^[30]:

$$E = \sum_{r=1}^l (e_r \times \Delta V_r) \quad (1)$$

式中, e_r 为单位降雨动能($\text{MJ hm}^{-2} \text{mm}^{-1}$), ΔV_r 为断点雨强对应时段的降雨量(mm); l 为本次降雨过程的次数, E (MJ/hm^2) 为降雨过程总动能。

$$e_r = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.082 i_r)] \quad (2)$$

式中, i_r 为第 r 部分的降雨强度(mm/h),根据连续记录雨量计的断点降雨数据计算得出。

但由于长期断点降雨数据获取困难,本研究采用 60min 固定间隔降雨数据,公式如下^[24]:

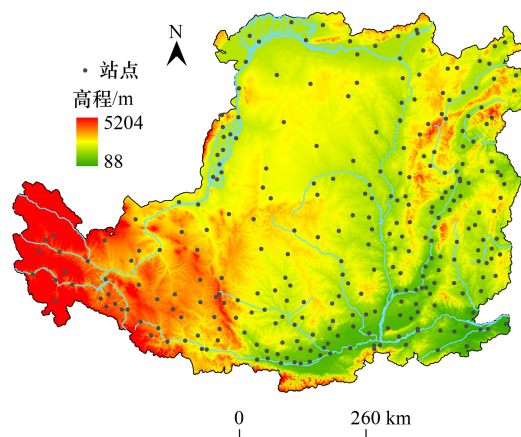


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

$$R = 1.811 \times (E \times I_{60}) \quad (3)$$

式中, E 和 I_{60} 根据每小时降雨数据计算得出; I_{60} 为本次降雨过程中的最大 60min 降雨强度; 式(1)中的 l 为此次降雨事件的持续时间(以小时为单位); 式(1)中 ΔV_r 和式(2)中 i_r 分别为每小时降雨量(mm)和降雨强度(mm/h)。最终将侵蚀性降雨事件的降雨侵蚀力相加, 近似计算出年降雨侵蚀力。

(2) 基于雨量的降雨侵蚀力计算

谢云利用全国多个站点数据对 RUSLE 方程中原降雨侵蚀力模型修正, 得到三种日降雨侵蚀力模型。采用日雨量 P_d 和最大 60min 降雨量($P_{60\min}$) d 的组合模型 III, 效果优于其修正的模型 I 和模型 II, 因此本文基于此方程利用雨量计算得到降雨侵蚀力, 公式如下:

$$R_{\text{day}} = 0.3988 P_d (P_{60\min}) d \quad (4)$$

式中, P_d 为日侵蚀性雨量(mm), ($P_{60\min}$) d 为最大 60min 降雨量(mm), R_{day} 为日降雨侵蚀力($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$)。

谢云等^[31]利用陕北团山沟径流小区降雨过程资料, 拟定了黄土高原坡面侵蚀性降雨量标准为 12mm, 因此本文将每小时降雨量数据累加得到每日降雨总量, 根据侵蚀性降雨标准, 剔除了日降雨量小于 12mm 的数值, 并利用雨量分级方法将黄土高原降雨雨型分为三种类型统计, 再通过算术平均法计算出每个站点各雨型多年均值。根据国家标准《GB/T 28592-2012》^[32], 日降雨量小于 10mm 的定义为小雨日, 大于或等于 10mm 且小于 25mm 定义为中雨日, 大于或等于 25mm 且小于 50mm 的定义为大雨日, 大于或等于 50mm 的定义为暴雨日。根据此标准计算不同量级降雨下的两种输入数据的降雨侵蚀力, 对比其时空变化特征。

1.3.2 时空变化分析

(1) 空间插值

本研究采用经验贝叶斯克里金插值法对数据进行空间插值分析, 它结合了贝叶斯统计和经典克里金方法的优点。相比于传统的克里金插值, 经验贝叶斯克里金插值通过多次迭代自适应地计算和优化插值模型, 从而能更准确地捕捉空间数据的不确定性和变异性^[33]。

(2) 时间趋势与变异程度分析

Mann-Kendall 秩相关检验方法被广泛应用于水文和气象学的研究^[34]。通过使用数据序列的顺序判断两个变量之间的相关程度, 可以避免最大或最小值的干扰, 同时客观实现长期数据序列的变化趋势, 并判断突变点发生的时间。

变异系数(CV)反映特性参数的变异程度, 划分标准为弱变异性[0, 0.1)、中等变异性[0.1, 1)和高变异性[1, ∞)^[35]。

2 结果与分析

2.1 降水量时空分布特征

2.1.1 降水量空间分布特征

如图 2 所示, 黄土高原多年平均降水量存在着显著的空间差异, 呈现出自东南向西北地区递减, 降水量主要集中在 200—600mm 之间。南部土石山区和河谷平原地区的郑州市、洛阳市、西安市、咸阳市、晋城市和运城市多年平均降水量明显高于其他地区, 而处于西北河套平原以及沙地沙漠区的银川市、吴忠市、白银市、乌海市、鄂尔多斯市等地受到大陆性气候的影响, 气候干旱, 降水较少, 多年平均降水量为黄土高原降水量最低值区域。黄土高原暴雨各站点多年均值在 220.79—1238.69mm 之间, 空间均值为 521.94mm; 大雨在 97.89—185.65mm 之间, 空间均值为 130.32mm; 中雨雨量在 23.48—45.72mm 之间, 空间均值为 33.16mm。其中, 暴雨的变异系数最高, 为 23.95%, 具有中等变异性, 说明暴雨的空间变异程度大于其他雨型, 因而暴雨的降雨侵蚀力的空间分布差异也大。

2.1.2 降水量年际变化特征

1990—2021 年黄土高原年均降水量整体呈多峰状波动, 多年平均降水量有显著性增加的趋势变化, 增加

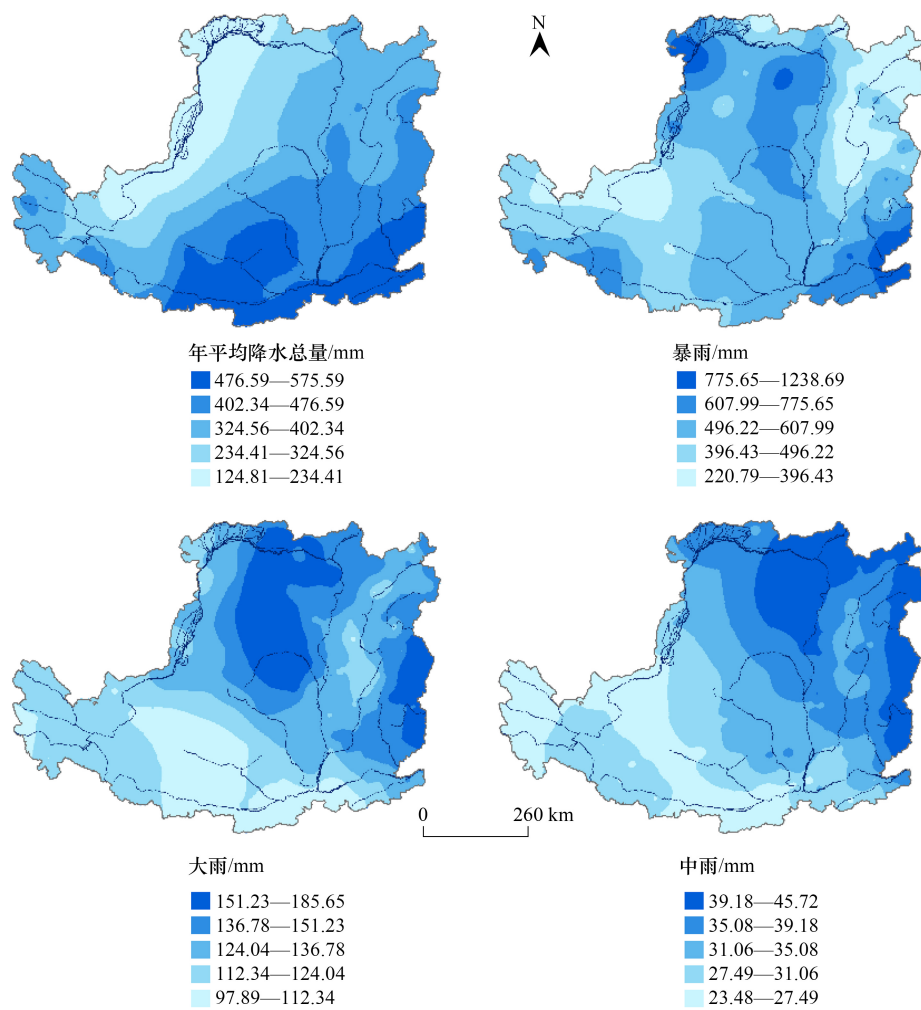


图 2 年均降水总量和不同雨型年均降水量空间分布

Fig.2 The spatial distribution of annual mean total precipitation and annual mean precipitation under different rainfall patterns annual mean

率为 5.03mm。黄土高原 1990—2021 年平均降水量在 375.18mm,最高年均降水量出现在 2017 年,达到 560.32mm,最低年均降水量为 1999 年的 243.89mm(图 3)。对 32 年降水量分年代进行统计,2011—2021 年的年平均降水量最高,为 440.51mm,1990—2000 年年平均降水量最低,为 328.94mm,降水量 1990—2000 年呈下降趋势,从 2001 年开始整体呈现上升趋势。年代降水变异系数波动较小,说明黄土高原突变型降水情况变化较小,气候对该地区有一定影响(表 1)。

表 1 黄土高原年代平均降水量统计结果

Table 1 Statistical results of the average rainfall in the Loess Plateau

时间 Time	平均值/mm Average	最大值/mm Maxmum	最小值/mm Minimum	标准差/mm Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
1990—2000 年	328.94	381.17	243.89	45.03	13.69
2000—2010 年	354.17	463.75	314.03	41.38	11.68
2010—2021 年	440.51	560.32	336.06	62.77	14.25
平均 Average	375.18	560.32	314.03	69.55	18.54

对 1990—2021 年黄土高原降水量采用 Mann-Kendall 突变方法检验其局部变异性,发现 UF 曲线在

1990—2014 年之间均在 95% 置信区间内,变化趋势不显著,2016 年以后呈显著性上升趋势。降水量正序列统计量 $UF(k)$ 和反序列统计量 $UB(k)$ 曲线在置信区内有一个交点,出现在 2013 年,但 2013 年曲线在置信区间内,说明黄土高原发生了不显著的波动,但很快又在 2015 年出现下降趋势。对于黄土高原而言,降水量出现突变点较少,说明黄土高原整体降水量趋势趋于平稳(图 4)。

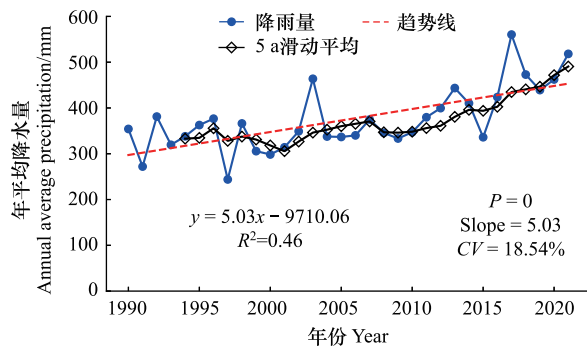


图 3 1990—2021 年平均降水量年际变化

Fig.3 Interannual variation of average rainfall from 1990 to 2021

CV: 变异系数 Coefficient of variation

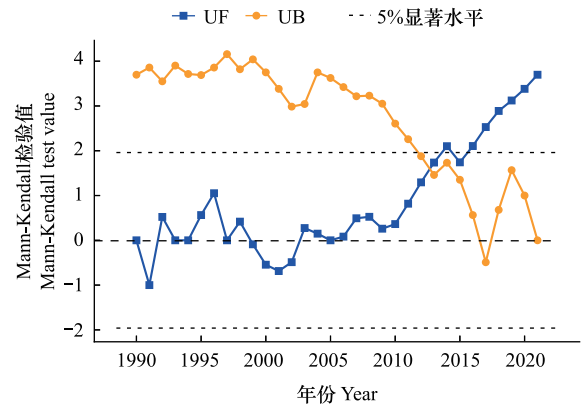


图 4 黄土高原 1990—2021 年年降水量 M-K 检验曲线

Fig.4 M-K test curve of annual rainfall in the Loess Plateau from 1990 to 2021

UF: 递推序列统计量 Upward cumulative statistics; UB: 递推序列统计量 Backward sequence statistic

2.2 降雨侵蚀力时空分布特征

2.2.1 降雨侵蚀力空间分布特征

由图 5 可知,由雨量模型计算的黄土高原 1990—2011 年平均降雨侵蚀力值的范围在 271.92—2504.65 MJ mm hm⁻² h⁻¹, 2012—2021 年平均降雨侵蚀力值的范围为 332.65—2700.71 MJ mm hm⁻² h⁻¹;而通过基于雨强计算模型的 1990—2011 年平均降雨侵蚀力值范围为 222.81—2357.24 MJ mm hm⁻² h⁻¹, 2012—2021 年平均降雨侵蚀力值的范围为 273.91—2583.52 MJ mm hm⁻² h⁻¹。整体上存在明显的空间分布差异,呈现出东南偏高,西部偏低的特点,最高值出现在黄土高原的最东南地区,为河南省的郑州市,而该地区的其他城市如河南省济源市和漯河市、山西省晋城市和运城城市,均超过 1500 MJ mm hm⁻² h⁻¹。低值区呈现出从西向东逐渐递减的趋势,甘肃省的白银市和宁夏省的吴忠市、银川市、石嘴山市的年均降雨侵蚀力值均在 300 MJ mm hm⁻² h⁻¹ 以下。

2.2.2 降雨侵蚀力时间变化趋势

黄土高原地处北方地区,大部分站点在 2012 年之前仅监测雨季数据,冬季月份无降雨数据,因此根据数据资料记录,对黄土高原降雨侵蚀力年际趋势分析时本研究将其分为两个时间段。两种模型下的黄土高原年均降雨侵蚀力变化特征趋于一致,1990—2021 年间,年均降雨侵蚀力的 P 值均大于 0.05,因此黄土高原 1990—2021 年年平均降雨侵蚀力呈现不显著上升趋势。黄土高原地区 32 年平均降雨侵蚀力,基于雨强数据计算的降雨侵蚀力最大值和最小值为 1318.52 MJ mm hm⁻² h⁻¹ 和 552.84 MJ mm hm⁻² h⁻¹,最大值是最小值的 2.38 倍;雨量数据计算得到的年均降雨侵蚀力最大值和最小值分别为 1422.78 MJ mm hm⁻² h⁻¹ 和 632.7 MJ mm hm⁻² h⁻¹,最大值是最小值的 2.25 倍。两种参量计算模型下的年平均降雨侵蚀力变异系数都超过 40%,属于中等变异性,但是基于雨强计算得到的降雨侵蚀力变异程度要大于由雨量数据计算得到的降雨侵蚀力。这表明与雨量数据相比,基于雨强计算的降雨侵蚀力年际变化更为剧烈(图 6)。

如图 6 所示,利用 Mann-Kendall 检验方法下的基于雨强计算的年平均降雨侵蚀力正序列统计量 $UF(k)$ 和反序列统计量 $UB(k)$ 曲线在置信区内有 3 个交点,而由雨量计算的年平均降雨侵蚀力值在置信区只有 1 个交点,两者的交点处 UF 均大于 0,但是交点位置都位于 ± 1.96 内,不满足 0.05 显著性水平,表明了降雨侵蚀力

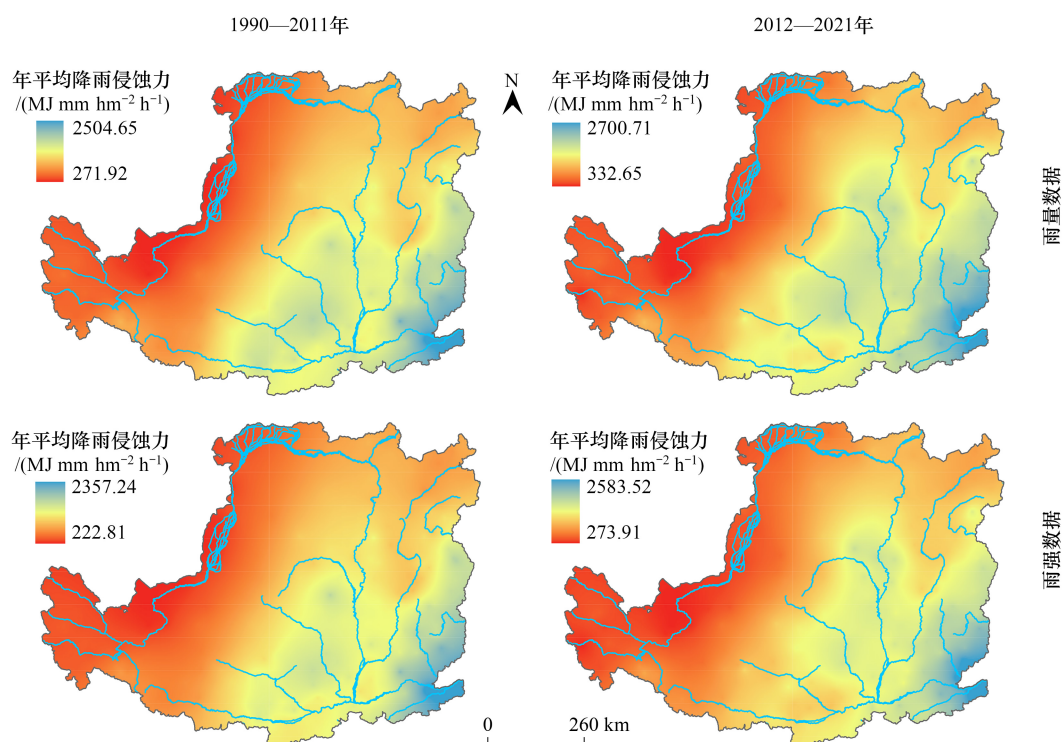


图5 不同计算模型下多年平均降雨侵蚀力空间分布

Fig.5 Spatial distribution of multi-year average rainfall erosivity under different calculation models

在 1990—2021 年没有发生显著性突变情况。

2.3 不同雨型的降雨侵蚀力空间分布特征

对三种不同雨型的降雨侵蚀力计算并插值发现,降雨侵蚀力的高值区和低值区与对应雨型降雨量空间分布整体一致。从图 7 可知,黄土高原的东南地区暴雨侵蚀力高于其他地区,由此说明该区域降雨量多且降雨强度大的气候事件多于其他地区。基于雨强计算的暴雨降雨侵蚀力均值为 $556.22 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$,雨量计算的暴雨降雨侵蚀力均值为 $565.82 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。大雨和中雨降雨侵蚀力高值主要出现在黄土高原的中部和北部地区,大雨降雨侵蚀力最高值为 $194.66 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$,中雨最高值为 $59.27 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。暴雨侵蚀力的数值显著高于大雨和中雨侵蚀力且高值区分布的范围更广,对全年降雨侵蚀力贡献最高。三种雨型降雨侵蚀力的计算中,基于雨强计算的数值变异系数要大于只输入雨量数据计算的降雨侵蚀力,说明在基于雨强计算下的降雨侵蚀力相较于只基于雨量计算的模型更能够反映黄土高原对气候变化的敏感性,即黄土高原整体受降雨强度的影响大于雨量。

2.4 不同季节降雨侵蚀力空间分布特征

不同季节的降雨侵蚀力存在较大差异,通过对黄土高原不同季节的降雨侵蚀力进行插值分析可以看出,黄土高原三个季节的降雨侵蚀力高值区都出现东南地区,由东南向西北逐渐递减。基于雨强计算和雨量计算下的夏季降雨侵蚀力均值分别为 $740.35 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $816.73 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$,远超过年平均降雨侵蚀力,说明黄土高原夏季的降雨侵蚀力是全年降雨侵蚀力的主要贡献来源。在夏季降雨侵蚀力分布情况中,两种计算模型的降雨侵蚀力值大于 $1000 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 的区域分别占黄土高原总面积的 14.76% 和 18.87%。春季和秋季的降雨侵蚀力均值都在 $100 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 左右,春季降雨侵蚀力超过均值面积占比分别为 19.28% 和 19.56%,秋季超过均值的区域面积占比为 24.62% 和 25.73%,两种数值计算下的高值区域占比相似,但是变异系数仍是基于雨强计算的数值大于雨量计算值,尤其是夏季降雨侵蚀力的 CV 系数达到了 48.67%,说明夏季降雨多、雨量大、雨强大产生剧烈天气变化的时候,基于雨强计算的降雨侵蚀力模型更能捕捉到这些细微的变

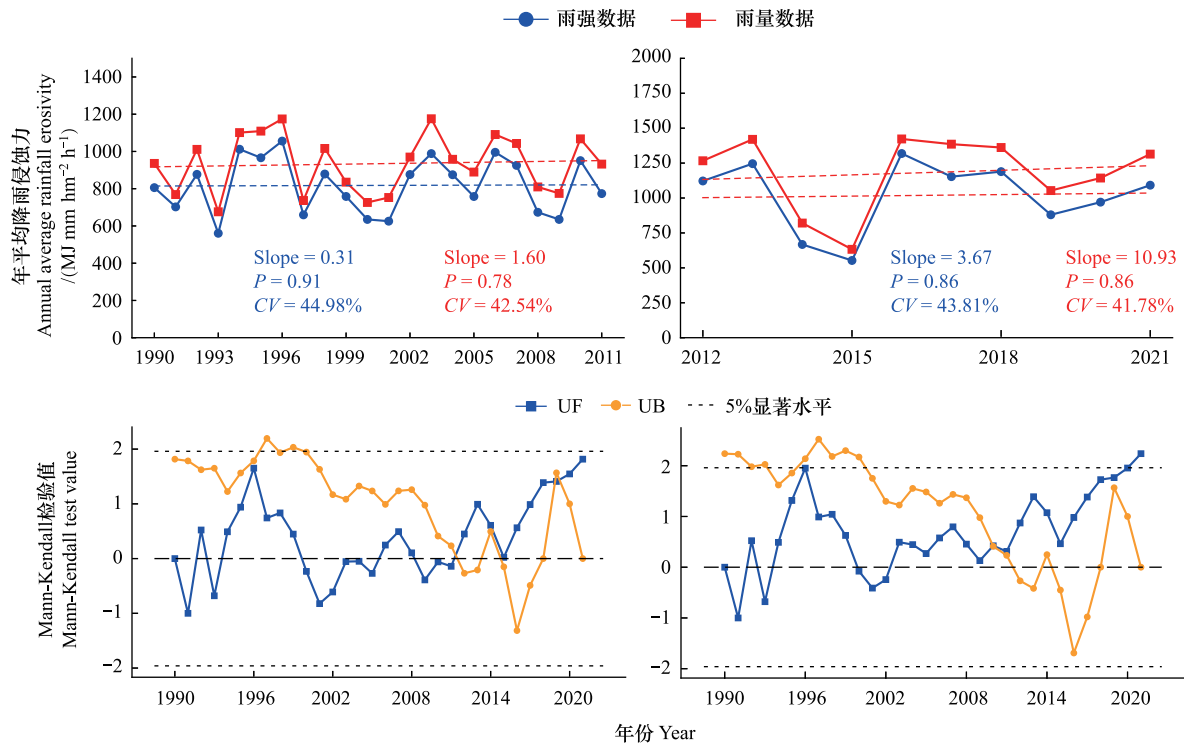


图6 1990—2021年平均降雨侵蚀力变化趋势及突变检验

Fig.6 Trend and mutation test of average rainfall erosivity from 1990 to 2021

化,对生态系统管理保障提供更细致的信息(图8)。

2.5 不同模型下的降雨侵蚀力与地形相关性分析

不同地区的降雨侵蚀力不仅受气候驱动,地形特征亦对其具有显著影响。地形通过调控地表径流路径、坡度变化及水土分布,直接或间接地影响降雨侵蚀过程^[36]。探究地形与降雨侵蚀力之间的关系,对了解黄土高原不同高程地区的降雨侵蚀力空间差异具有重要意义。黄土高原的高程范围在88—5204m之间,平均高程为1416.17m,根据标准差本研究将黄土高原分成了6个高程区,6个高程范围从低到高排列,基于雨量和雨强模型计算下不同高程区所对应的年平均降雨侵蚀力如表2所示。黄土高原西部地区的降雨侵蚀力整体在1000MJ mm hm⁻² h⁻¹,甘肃省大部分地区的高程在2000m以上,其降雨侵蚀力却远低于位于土石山区的河南省,而河南省的高程远低于甘肃省(图9)。

表2 雨量和雨强模型下不同高程区年平均降雨侵蚀力

Table 2 Annual average rainfall erosivity at different elevation under rainfall amount model and rainfall intensity model

类型 Types	高程1 Elevation1	高程2 Elevation2	高程3 Elevation 3	高程4 Elevation 4	高程5 Elevation 5	高程6 Elevation 6
雨量模型 Rainfall amount model/(MJ mm hm ⁻² h ⁻¹)	1611.49	1236.7	1004.45	729.1	571.49	490.24
雨强模型 Rainfall intensity model/(MJ mm hm ⁻² h ⁻¹)	1450.23	1084.99	874.84	599.68	451.07	373.29

黄土高原降雨侵蚀力与高程之间整体呈负相关关系(图10),高程每增高1m,降雨侵蚀力大约减小0.34MJ mm hm⁻² h⁻¹。基于雨强计算的年均降雨侵蚀力与高程之间的相关系数为-0.57516,而由雨量数据计算的年均降雨侵蚀力与高程的相关系数为-0.55025,因此体现了在黄土高原基于雨强的降雨侵蚀力模型要优于只有雨量数据输入的降雨侵蚀力模型。

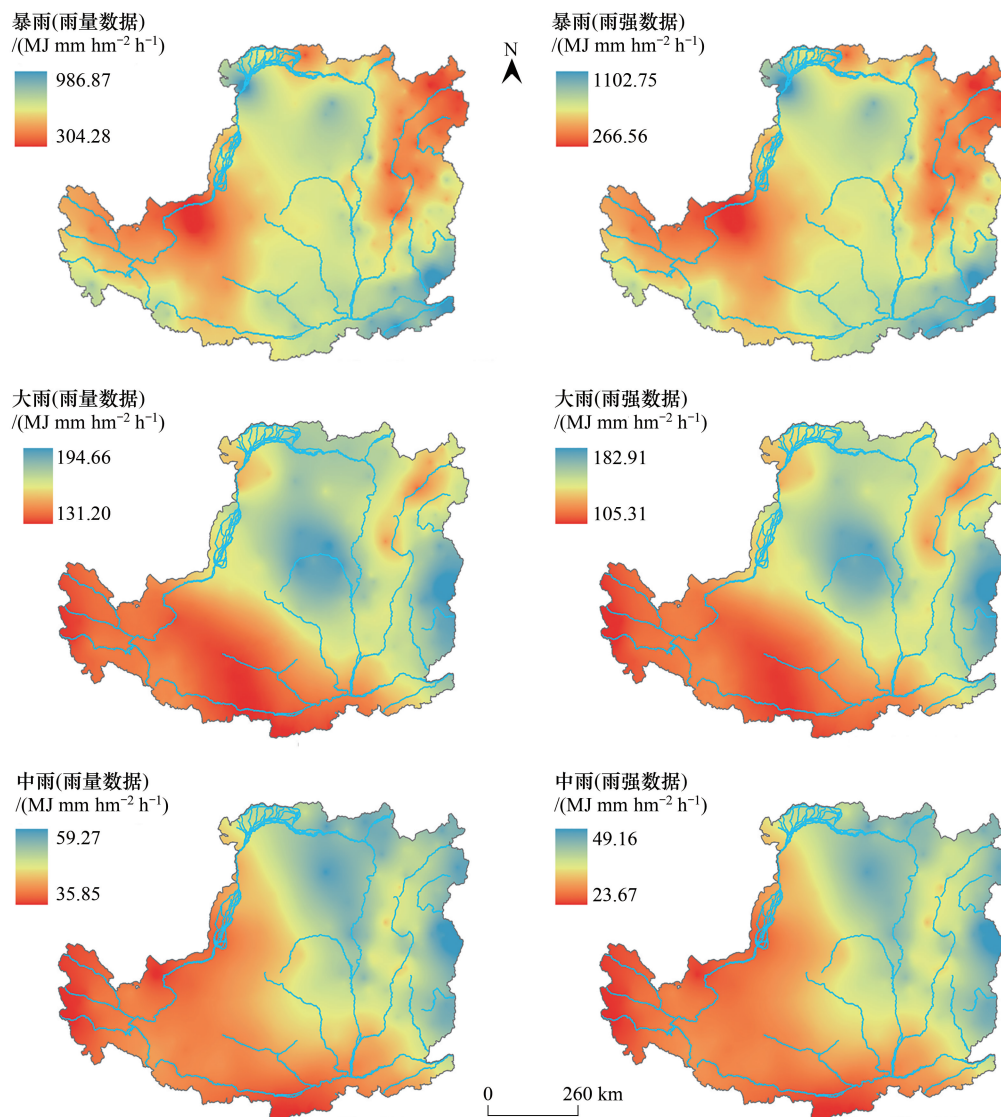


图 7 不同雨型年均降雨侵蚀力空间分布

Fig.7 Spatial distribution of annual average rainfall erosivity under different rainfall types

3 讨论

黄土高原是我国重点生态治理区,降雨是影响土壤侵蚀的关键因素之一,黄土高原降雨侵蚀特征研究对黄土高原生态治理政策制定具有重要意义。1990—2021 年黄土高原降雨量和降雨侵蚀力值空间分布均表现出东南高、西北低趋势,其中,东南地区的最高值超过 $1500 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$,而西部干旱区的年均降雨侵蚀力值低于 $300 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$,这与前人的研究一致^[37—38]。主要原因是黄土高原的气候由东南向西北呈现明显的干湿梯度。东南部受季风影响显著,年降水量较高,且降水多集中在夏季,具有较强的侵蚀效应。夏季强降雨事件频繁发生,暴雨是全年降水量的主要贡献来源,夏季的降雨侵蚀力也高于春季和秋季。相比之下,西部地区位于大陆性气候区,常年干旱,降水稀少且分布不均,短时间、强度弱的降水不会造成强烈的侵蚀。受极端气候影响,河南省郑州市及周边地区在 2021 年的 7 月遭遇了历史罕见特大暴雨,发生了严重的洪涝灾害,降雨侵蚀力最高值达到 $6377.77 \text{ MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$,降雨总动能为 76.89 MJ/hm^2 。

降雨侵蚀力受气候和地形双重因素影响。本研究将降雨侵蚀力与海拔进行相关性分析,发现黄土高原降

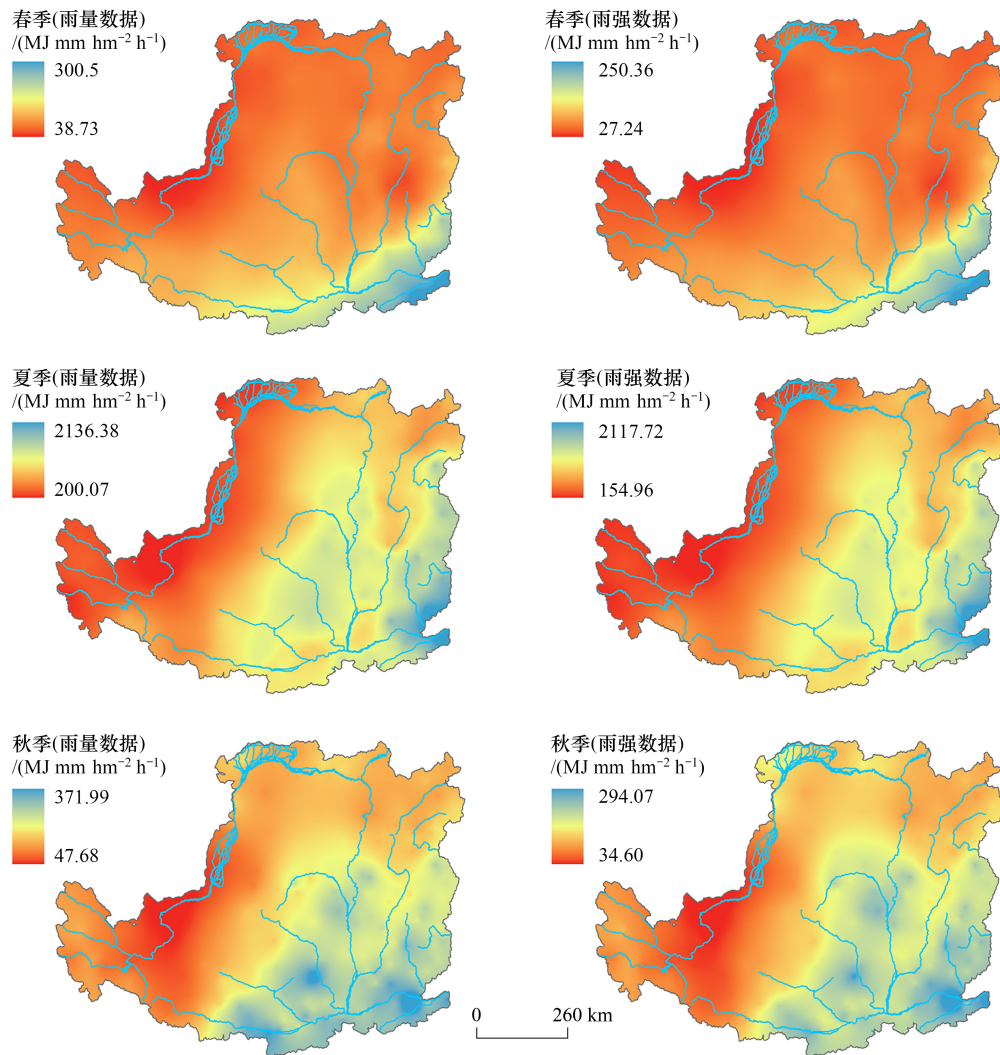


图8 不同季节年平均降雨侵蚀力空间分布

Fig.8 Spatial distribution of annual average rainfall erosivity in different seasons

雨侵蚀力与海拔之间整体呈负相关关系,且基于雨强计算的降雨侵蚀力与海拔的相关性高于雨量模型,东南低海拔土石山区的降雨侵蚀力远高于西南高海拔地区。造成这一现象的原因是东南部地区的地形较为复杂,地势起伏大,坡度陡,降雨时的地表径流汇集快;而西部地区地形相对平坦,产生的地表径流能量要低于东南地区,所以东南地区的降雨侵蚀力会高于西部地区。西南部高海拔地区陇南、甘南有较好的森林和草地覆盖,气候干燥降雨较少,降水形式多为稳定的小雨,所以侵蚀力低于东南部地区。

基于雨强和雨量模型计算的年均降雨侵蚀力值非常接近,但是基于雨强计算的降雨侵蚀力值不管是从雨型、季节划分都表现出更高的变异程度,说明黄土高原降雨强度对降雨侵蚀力的影响显著,与 Chang 等^[39]得出的结论相同。因此,在降雨侵蚀力及土壤侵蚀研究中,利用高时间分辨率数据计算降雨侵蚀力并考虑降雨强度对土壤侵蚀的影响十分必要。本研究并没有将降雨持续时间、气温、极端气候事件、植被覆盖等因素加入对降雨侵蚀力的影响分析,导致研究不够全面,后续研究可从以上方面进行更加深入细致的研究。

降雨侵蚀力作为土壤侵蚀过程中重要的驱动因子,应根据不同雨型、不同季节和不同海拔各地区降雨侵蚀力的分布特征,建立长期的生态监测系统,及时做好应对防治措施,根据监测数据及时调整管理策略,科学应对突发性的强降雨侵蚀事件,减少环境风险。例如在降雨集中、强度大的季节(夏季汛期),应优先实施工程性保护措施,如坡面防护、蓄水工程和排水系统,避免集中降水引发的侵蚀。同时,加强河道治理和洪水调

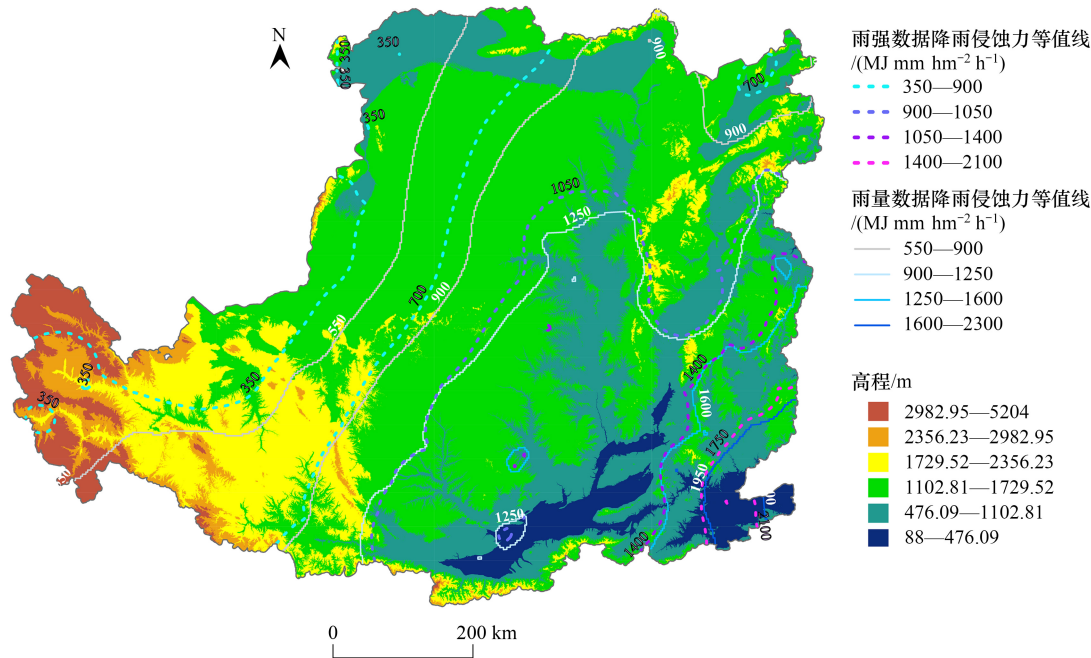


图 9 黄土高原不同高程下年均降雨侵蚀力等值线

Fig.9 Contour lines of annual rainfall erosivity at different altitudes on the Loess Plateau

控,减少暴雨导致的径流侵蚀。通过优化植被结构,提高群落的稳定性和生物多样性,从而增强植被对降雨侵蚀的防护能力。

4 结论

本文比较基于雨强和雨量两种不同模型计算的降雨侵蚀力,展示了黄土高原 1990—2021 年不同季节、不同雨型的年均降雨侵蚀力以及 32 年总平均降雨侵蚀力时空变化。主要结论如下:(1)两种模型计算的降雨侵蚀力空间分布相近,基于雨强的降雨侵蚀力模型变异性明显高于基于雨量的降雨侵蚀力模型,表明黄土高原降雨侵蚀力的对雨强的敏感性更高;(2)32 年来,基于雨强和雨量模型计算的年均降雨侵蚀力均值分别为 918.36、1058.17MJ mm hm⁻² h⁻¹,其空间分布格局与降雨分布基本一致,呈现出由东南向西北逐渐递减的空间特征。(3)夏季降雨侵蚀力平均最高(>700MJ mm hm⁻² h⁻¹),且该季暴雨降雨侵蚀力最大(1102.75MJ mm hm⁻² h⁻¹),分布在黄土高原东南部,是全年降雨侵蚀力的主要贡献来源;(4)降雨侵蚀力的动态变化由降雨量、降雨强度和地形差异所致,但海拔与基于雨强的降雨侵蚀力模型计算值相关性更高。综上,在全球气候变化背景下,基于高时间分辨率数据优选降雨侵蚀力模型,精细地捕捉多重驱动因素下降雨侵蚀力动态变化,对于理解地表侵蚀过程对气候变化的响应和保护敏感区生态环境安全具重要的理论和实践价值。

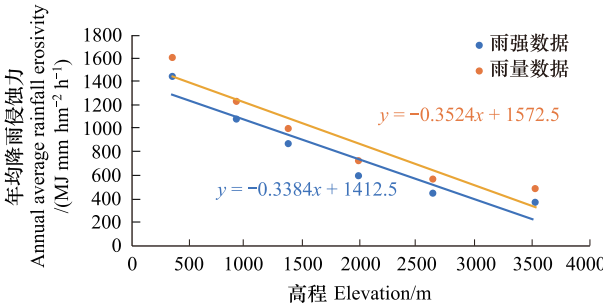


图 10 高程和降雨侵蚀力线性关系

Fig.10 Linear relationship between elevation and rainfall erosivity

参考文献 (References):

[1] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 程先富. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估. 土壤学报, 2016, 53(1): 28-38.
[2] 韩旭, 田培, 黄建武, 王珂珂, 王瑾钰, 刘目兴, 潘成忠. 基于 2009—2018 年径流小区观测数据的武汉市土壤侵蚀因子定量评价. 生态学报, 2021, 41(10): 3878-3890.
[3] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, Olson C, Sztein A E, Sparks D L. Soil science. Soil and human security in the 21st century. Science,

- 2015, 348(6235): 1261071.
- [4] 侯鹏, 王桥, 申文明, 翟俊, 刘慧明, 杨旻. 生态系统综合评估研究进展: 内涵、框架与挑战. 地理研究, 2015, 34(10): 1809-1823.
- [5] 史志华, 王玲, 刘前进, 张含玉, 黄萱, 方怒放. 土壤侵蚀: 从综合治理到生态调控. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 198-205.
- [6] Ballabio C, Borrelli P, Spinoni J, Meusburger K, Michaelides S, Beguería S, Klik A, Petan S, Janeček M, Olsen P, Aalto J, Lakatos M, Rymaszewicz A, Dumitrescu A, Tadić M P, Diodato N, Kostalova J, Rousseva S, Banasik K, Alewell C, Panagos P. Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1298-1315.
- [7] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展. 生态学报, 2014, 34(16): 4461-4472.
- [8] Wischmeier W H, Smith D D, Stastes U, University P. Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide To Conservation Planning. United States. Dept. of Agriculture. Agriculture handbook (USA), 1978.
- [9] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount. *Transactions of the ASAE*, 1983, 26(1): 153-156.
- [10] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 1994, 157(1/2/3/4): 287-306.
- [11] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- [12] 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. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [13] Xie Y, Yin S Q, Liu B Y, Nearing M A, Zhao Y. Models for estimating daily rainfall erosivity in China. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 547-558.
- [14] Chen Y H, Xu M H, Wang Z L, Chen W J, Lai C G. Reexamination of the Xie model and spatiotemporal variability in rainfall erosivity in mainland China from 1960 to 2018. *Catena*, 2020, 195: 104837.
- [15] Yin B, Xie Y, Yao C, Liu B, Liu B Y. Evaluating rainfall erosivity on the Tibetan Plateau by integrating high spatiotemporal resolution gridded precipitation and gauge data. *Science of the Total Environment*, 2024, 947: 174334.
- [16] Wang N, Jiao J Y, Bai L C, Zhang Y F, Chen Y X, Tang B Z, Liang Y, Zhao C J, Wang H L. Magnitude of soil erosion in small catchments with different land use patterns under an extreme rainstorm event over the Northern Loess Plateau, China. *Catena*, 2020, 195: 104780.
- [17] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [18] Wu L, Liu X, Ma X Y. Spatiotemporal distribution of rainfall erosivity in the Yanhe River watershed of hilly and Gully Region, Chinese Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4): 315.
- [19] Yin M F, Zhang J Q, Shang Y T, Wu K Z, Bai R R, Liu Y, Yang M Y. Correlation between flood couplet-based sediment yield and rainfall patterns in a small watershed on the Chinese Loess Plateau. *Journal of Hydrology*, 2024, 637: 131407.
- [20] Chen J S, Chen Y P, Wang K B, Zhang H W, Tian H W, Cao J. Impacts of land use, rainfall, and temperature on soil conservation in the Loess Plateau of China. *Catena*, 2024, 239: 107883.
- [21] Wu Q L, Jiang X H, Shi X W, Zhang Y C, Liu Y H, Cai W J. Spatiotemporal evolution characteristics of soil erosion and its driving mechanisms-a case Study: Loess Plateau, China. *Catena*, 2024, 242: 108075.
- [22] Jia L, Yu K X, Li Z B, Li P, Zhang J Z, Wang A N, Ma L, Xu G C, Zhang X. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in the Loess Plateau of China and its impact on sediment load. *Catena*, 2022, 210: 105931.
- [23] 杨艳芬, 王兵, 王国梁, 李宗善. 黄土高原生态分区及概况. 生态学报, 2019, 39(20): 7389-7397.
- [24] 殷水清, 谢云, 王春刚. 用小时降雨资料估算降雨侵蚀力的方法. 地理研究, 2007, 26(3): 541-547.
- [25] Yang X N, Sun W Y, Li P F, Mu X M, Gao P, Zhao G J. Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 591-600.
- [26] Zhang J P, Ren Y L, Jiao P, Xiao P Q, Li Z. Changes in rainfall erosivity from combined effects of multiple factors in China's Loess Plateau. *Catena*, 2022, 216: 106373.
- [27] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau. *Earth-Science Reviews*, 2019, 199: 102962.
- [28] Li P F, Chen J N, Zhao G J, Holden J, Liu B T, Chan F K S, Hu J F, Wu P L, Mu X M. Determining the drivers and rates of soil erosion on the Loess Plateau since 1901. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153674.
- [29] Guan Y B, Yang S T, Zhao C S, Lou H Z, Chen K, Zhang C B, Wu B W. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104800.
- [30] Foster G. User's reference guide: Revised universal soil loss equation (RUSLE2). Washington D.C: US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 2004.
- [31] Xie Y, Liu B Y, Nearing M. Practical thresholds for separating erosive and non-erosive storms. *Transactions of the ASABE*, 2021, 45: 1843-1847.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T28592—2012 降水量等级. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [33] Gribov A, Krivoruchko K. Empirical Bayesian Kriging implementation and usage. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137290.
- [34] Zhang Y, Chao Y, Fan R R, Ren F E, Qi B, Ji K, Xu B. Spatial-temporal trends of rainfall erosivity and its implication for sustainable agriculture in the Wei River Basin of China. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106557.
- [35] 张悦, 张艳, 史飞航, 李敏, 崔国屹, 刘正则. 基于不同模型的黄河中游降雨侵蚀力时空变化分析. 水土保持通报, 2023, 43(2): 220-229, 238.
- [36] Jiang Y, Gao J B, Yang L, Wu S H, Dai E F. The interactive effects of elevation, precipitation and lithology on Karst rainfall and runoff erosivity. *Catena*, 2021, 207: 105588.
- [37] Dai W, Zeng Y, Jing T G, Wang Z X, Zong R J, Ni L S, Fang N F. Estimation of rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau: a new combination of the ERA5 dataset and machine learning. *Journal of Hydrology*, 2023, 624: 129892.
- [38] Cui Y S, Pan C Z, Liu C L, Luo M J, Guo Y H. Spatiotemporal variation and tendency analysis on rainfall erosivity in the Loess Plateau of China. *Hydrology Research*, 2020, 51(5): 1048-1062.
- [39] Chang Y M, Lei H M, Zhou F, Yang D W. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in the middle Yellow River Basin based on hourly rainfall data. *Catena*, 2022, 216: 106406.