

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.04.022

CSTR:32310.14.stbxb.2026.04.022

邢霄钰, 黄麟, 汲玉河, 等. 基于不同降雨资料的中国干湿气候区降雨侵蚀力定量对比[J]. 水土保持学报, 2026, 40(4): 430-442.

Xing Xiaoyu, Huang Lin, Ji Yuhe, et al. Quantitative comparison of rainfall erosivity in dry and wet climate regions of China based on different rainfall data[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(4): 430-442.

基于不同降雨资料的中国干湿气候区降雨侵蚀力定量对比

邢霄钰^{1,2}, 黄麟¹, 汲玉河³, 刘璐璐⁴, 曹巍¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,

北京 100081; 4. 成都大学建筑与土木工程学院, 成都 610106)

摘要: [目的] 为系统评估降雨侵蚀力简易模型在不同区域及雨量等级下的估算精度。[方法] 基于中国湿润区、半湿润区和半干旱区 2 078 个气象站点观测数据, 分别采用小时和日尺度降雨数据, 以经典 EI_{30} 模型计算的不同量级降雨侵蚀力为基准值, 与日雨量侵蚀力模型估算结果进行对比分析。[结果] 1) 2 种方法计算的降雨侵蚀力在空间上均呈西北低、东南高的特点, 在湿润区、半湿润区、半干旱区均呈显著正相关。2) 在不考虑雨量分级的情况下, 日雨量侵蚀力模型在湿润区、半湿润区和半干旱区的估算偏差分别为 16.06%、22.47% 和 24.19%, 但在不同雨量等级情况下, 以上各分区侵蚀力估算偏差则成倍增加, 其中对中雨和大雨侵蚀力估算普遍呈系统性高估, 对大暴雨和特大暴雨侵蚀力估算, 普遍呈系统性低估。3) 综合数据偏差和相关系数 2 项指标, 日雨量侵蚀力模型在湿润区、暴雨雨量等级下的估算精度最高, 其次为半湿润区、暴雨雨量等级, 最低的是湿润区、中雨雨量等级。[结论] 日雨量侵蚀力模型在不同雨量等级及不同干湿区存在的精度差异及变异规律, 将为后续发展分区、分级的估算模型提供重要依据。

关键词: 降雨侵蚀力; 干湿气候区; 相对偏差; 定量评价

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0430-13

Quantitative Comparison of Rainfall Erosivity in Dry and Wet Climate Regions of China Based on Different Rainfall Data

Xing Xiaoyu^{1,2}, Huang Lin¹, Ji Yuhe³, Liu Lulu⁴, Cao Wei¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,

CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key

Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

4. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: [Objective] This study systematically evaluates the estimation accuracy of a simple rainfall erosivity model across different regions and rainfall levels. [Methods] Based on observational data from 2 078 meteorological stations in humid, semi-humid, and semi-arid regions of China, rainfall erosivity of different magnitudes was calculated using the classic EI_{30} model at hourly and daily rainfall scales as the baseline, and then compared with estimates from the daily rainfall erosivity model proposed. [Results] 1) Rainfall erosivity calculated by the two methods showed a spatial pattern of low values in the northwest and high values in the southeast, with significant positive correlations in humid, semi-humid, and semi-arid regions. 2) Without considering rainfall classification, estimation deviations of the daily rainfall erosivity model in humid, semi-humid, and semi-arid regions were 16.06%, 22.47% and 24.19%, respectively. However, under different rainfall levels, deviations of rainfall erosivity estimation in the above regions increased markedly, with systematic overestimation

收稿日期: 2026-01-07

修回日期: 2026-04-01

录用日期: 2026-04-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-04-22

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF1306300)

第一作者: 邢霄钰(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态环境遥感与信息系统研究。E-mail: xingxiaoyu3422@igsrr.ac.cn

通信作者: 曹巍(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事区域生态系统评估研究。E-mail: Caowei@igsrr.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

for moderate and heavy rain and systematic underestimation for rainstorms and extreme rainstorms. 3) Considering both data deviation and correlation coefficient, the daily rainfall erosivity model achieved the highest estimation accuracy in humid regions under rainstorm conditions, followed by semi-humid regions under rainstorm, and the lowest accuracy was found in humid regions under moderate rainfall conditions. [Conclusion] Accuracy differences and variation patterns of the daily rainfall erosivity model under different rainfall levels and in different dry and wet regions will provide an important basis for development of zoned and graded estimation models.

Keywords: rainfall erosivity; dry and wet climate regions; relative deviation; quantitative evaluation

Received: 2026-01-07 **Revised:** 2026-04-01 **Accepted:** 2026-04-15 **Online**(www.cnki.net): 2026-04-22

降雨是土壤侵蚀发生发展的动力和基础,为定量表征降雨对侵蚀的影响,美国学者 Panagos 等^[1]在 20 世纪 50 年代利用大量实测资料,通过系统分析多种降雨指标与实测土壤流失量的关系,提出降雨侵蚀力概念,构建基于降雨动能和降雨强度的经典 EI₃₀ 模型,并应用于通用土壤流失方程 USLE 或 RUSLE 模型^[2-4]。研究者在 EI₃₀ 模型基础上分别在美国密西西比河流域^[5-6]、澳大利亚南部^[7]、韩国大田^[8]、黄土高原等^[9]地区发展了适用于当地的模型,主要体现在单位降雨动能 e_r 和降雨强度 i_r 关系式的修正上(表 1)。由于该类模型所需的高时间分辨率降雨过程数据难以获取^[10-11],大量研究^[12-16]基于特定研究区域的年、月、日等较低时间分辨率降雨量数据,陆续提出一系列简易估算模型,简易模型所需的数据获取较为方便、计算量相对较小,为大尺度、长时序的降雨侵蚀力研究提供可行路径。特别是章文波等^[13]建立的日雨量侵蚀力模型,已被广泛应用于我国黄土高原^[17]、河南省^[18]、南方红壤区^[19]、藏东南地区等^[20]地区的降雨侵蚀力估算。

近年来,全球极端降雨事件频次和强度增加^[21-23],土壤侵蚀风险相应加剧。日雨量侵蚀力模型因数据较易获取、计算较为简便,被广泛用于量化不

同量级降雨对降雨侵蚀力的贡献^[24-25]及构建降雨侵蚀力分级估算模型^[26]。具体而言,基于该模型的区域应用表明,韶关^[24]和重庆市^[25]大雨及以上量级降雨侵蚀力的贡献分别达 77.05% 和 75.88%;李维杰等^[26]以其计算结果为基准,构建太行山脉不同量级年降雨侵蚀力的分级估算方法。尽管王瀚若等^[27]研究发现,该模型在估算陕北多年平均降雨侵蚀力时,其相对偏差为 34%~190%,但该模型对不同量级降雨侵蚀力的估算精度尚未得到系统验证。中国疆域广阔,地理与气候条件复杂多样,各区域降雨特征(雨量大小、持续时间、降雨次数等)差异显著,日雨量侵蚀力模型估算不同地理区域不同量级降雨侵蚀力的适用性与精度亦有待厘清。

因此,本研究以中国湿润区、半湿润区和半干旱区 2 078 个气象站点观测数据为基础,基于小时数据和日雨量数据,采用经典模型和日雨量侵蚀力模型,分别计算中国干湿区不同量级降雨的侵蚀力,对 2 种模型的结果进行系统的差异分析和统计分析,评估日雨量侵蚀力模型在中国湿润区、半湿润区、半干旱区不同量级降雨条件下的适用性和估算精度,为进一步开展降雨侵蚀力分区优化建模及水土流失的分区防治提供科学依据。

表 1 e_r 和 i_r 经验方程
Table 1 Experimental equations of e_r and i_r

建模区域	公式	变量说明
美国密西西比河流域 ^[5]	$e_r = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05i_r)]$	e_r 为次降雨过程中第 r 时段内每 mm 降雨的降雨动能, MJ/(hm ² ·mm); i_r 为第 r 时段的降雨强度, mm/h
美国密西西比河流域 ^[6]	$e_r = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.082i_r)]$	
澳大利亚南部 ^[7]	$e_r = 0.283[1 - 0.52 \exp(-0.03i_r)]$	
韩国大田 ^[8]	$e_r = 0.2575[1 - 0.54 \exp(-0.05i_r)]$	
黄土高原 ^[9]	$e_r = 28.95 + 12.30 \lg i_r$	

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

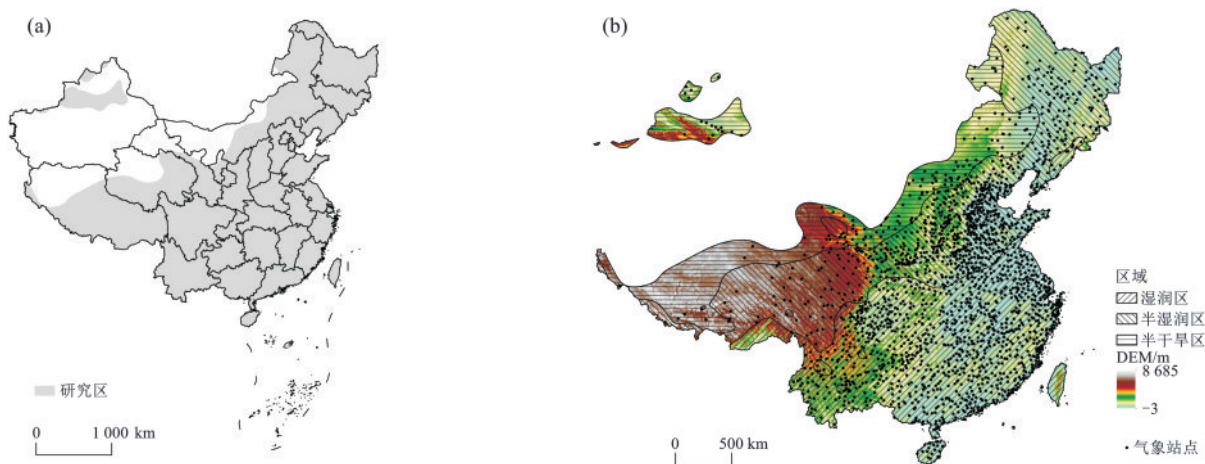
本研究以多年平均降雨量为指标,将我国划分为湿润区(>800 mm)、半湿润区(400~800 mm)、半干旱区(200~400 mm)和干旱区(<200 mm)^[28]。其

中,湿润区位于秦岭淮河以南及西南地区,属亚热带和热带季风气候,红壤分布广泛,土地利用以水田和森林为主^[28],水力侵蚀占主导;半湿润区分布于东北平原、华北平原、黄土高原东部和青藏高原东南部,涵盖温带季风气候、温带大陆性气候和高山高原气

候,土壤以褐土、黑土为主,植被由森林向草原过渡,耕地由水田向旱地过渡^[28],水力侵蚀为主;半干旱区主要位于内蒙古高原、黄土高原西部和青藏高原大部,属温带大陆性及高山高原气候,以栗钙土和风沙土为主,土地利用以草地和旱地为主^[29],雨季伴随一定的水力侵蚀;干旱区多年平均降雨量不足 200 mm^[30],以风力侵蚀为主^[31]。因此,基于不同干湿区域土壤侵蚀特征,本研究选取湿润区、半湿润区和半干旱区作为研究区域(图 1)。

本研究共收集中国湿润区、半湿润区、半干旱区

2 078 个气象站 2021—2023 年的逐小时降雨观测数据(图 1b),数据来源于中国气象局国家气象信息中心(<https://data.cma.cn/>);其中,湿润区、半湿润区、半干旱区分别包含 1 066、867、145 个气象站。同时,采用 6 h 作为最小间歇标准来划分次降雨事件,即若 2 次降雨的无雨间隔超过 6 h,则将其视为 2 次独立降雨事件^[32-33]。据此标准划分后,所有气象站点累计有 642 040 场降雨用于 2 种模型的对比分析。为满足研究分析需求,本研究以北京时间 20:00 为日界划分标准,将原始逐时降雨数据整理为日降雨量数据。



注:基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站 GS(2023)2763 号标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

1.2 降雨侵蚀力计算方法

1.2.1 侵蚀性降雨标准 经典 EI_{30} 模型中将次降雨量 ≥ 12.7 mm 或 15 min 内的雨量 ≥ 6.4 mm 的降雨事件定义为侵蚀性降雨,该阈值基于美国东部地区径流小区观测资料确定^[32]。然而,基于中国多个典型径流小区与次降雨过程资料研究^[33]表明,次降雨量 ≥ 12 mm 更适用于中国区域,可作为中国侵蚀性降雨标准^[34];并基于该标准,进一步构建中国基于雨量和雨强的降雨侵蚀力模型^[35]及日雨量侵蚀力模型^[13]。考虑到侵蚀性降雨阈值的区域适用性问题,本研究统一将 12 mm 作为 2 种模型的侵蚀性降雨标准。

本研究根据侵蚀性降雨标准和《降雨量等级》^[36],将降雨划分为不同量级:24 h 降雨量 < 12 mm 的为非侵蚀性降雨;12~24.9 mm 为中雨;25~49.9 mm 为大雨;50~99.9 mm 为暴雨;100~249.9 mm 为大暴雨; ≥ 250 mm 为特大暴雨。其中,经典模型计算过程中根据次降雨事件连续 24 h 最大降雨量(降雨历时不足 24 h 的降雨事件用总降雨量)来划分量级,而日雨量侵蚀力模型则依据日降雨量来划分量级。

1.2.2 经典降雨侵蚀力模型 采用经典 EI_{30} 模型^[37]计算 2021—2023 年中国湿润区、半湿润区、半干旱区

若干次侵蚀性降雨事件的侵蚀力。

$$R_{\text{次}} = EI_{30} = e_r I_r I_{30} = \sum_{r=1}^q 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.082 i_r)] I_r I_{30} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{次}}$ 为单次降雨事件的降雨侵蚀力, $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$; E 为单次降雨事件的总动能, MJ/hm^2 ; I_{30} 为单次降雨事件连续 30 min 最大降雨强度, mm/h ; e_r 为次降雨过程中第 r 时段内每 mm 降雨的降雨动能, $\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$; I_r 为次降雨过程中第 r 时段的降雨量, mm ; q 为单次降雨事件被划分的时段数; i_r 为第 r 时段的降雨强度, mm/h 。

由于难以获取全国两 2 000 余个站点的降雨过程数据,故依据 Yue 等^[38]的研究,基于次降雨事件最大小时降雨量确定 I_{30} ^[39],并借助相应的转换因子使基于小时降雨数据计算的结果能够有效逼近基于分钟数据计算的降雨侵蚀力结果。

$$I_{30} = \frac{P_{60}}{1.0h} \quad (2)$$

$$R_h = 1.871 R_{60} \quad (3)$$

式中: P_{60} 为次降雨事件最大小时降雨量, mm ; R_{60} 为基于小时降雨数据计算的降雨侵蚀力, $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$; R_h 为 R_{60} 经转换因子调整后的次降雨侵蚀力结果。

本研究将基于小时降雨数据计算并经转换因子调整后的次降雨侵蚀力 R_h 作为侵蚀力的基准值,汇总后分别得到年降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力 R_h 。

1.2.3 日雨量侵蚀力模型 采用章文波等^[13]提出的基于日降雨量数据估算降雨侵蚀力的日雨量侵蚀力模型。

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta \tag{4}$$

$$\beta = 0.836\,3 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \tag{5}$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.189\,1} \tag{6}$$

式中: R_i 为第*i*个半月的降雨侵蚀力,(MJ·mm)/(hm²·h);*k*为半月时段内的天数; P_j 为半月内第*j*天的侵蚀性日降雨量,mm; α 、 β 为模型待定参数,依据当地的降雨情况来确定; P_{d12} 和 P_{y12} 分别表示所有侵蚀性日降雨量的日平均降雨量和年平均降雨量,mm。

本研究将基于日降雨数据计算得到的降雨侵蚀力记为 R_d ,汇总后分别得到年降雨侵蚀力和不同量级降雨侵蚀力 R_d 。

1.3 模型差异分析方法

1.3.1 相关分析 本研究对 2 种模型降雨侵蚀力估算结果进行相关性分析,计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{7}$$

式中: x_i 和 y_i 分别为 2 种模型降雨侵蚀力估算结果 R_d 、

R_h ; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 x_i 和 y_i 的平均值,*n*为样本总数。

1.3.2 相对偏差 相对偏差反映日雨量侵蚀力模型估算结果相对于基准值的偏离程度^[40]。

$$E = \frac{R_d - R_h}{R_h} \times 100\% \tag{8}$$

式中: E 为相对偏差,%; R_d 为日雨量侵蚀力模型估算结果; R_h 为经典模型计算得到的降雨侵蚀力。相对偏差为正时,表示日雨量侵蚀力模型估算结果偏高,反之偏低;相对偏差的绝对值越接近于 0,日雨量侵蚀力模型估算结果越接近于基准值。

2 结果与分析

2.1 降雨量特征

2021—2023 年中国湿润区、半湿润区、半干旱区所有气象站点累计记录的 642 040 场次降雨事件中,以<12 mm 的次降雨事件为主,占总数的 78.94%;位于 12~25、25~50、50~100、100~250、≥250 mm 区间的降雨事件次数占比分别为 11.07%、6.66%、2.71%、0.59% 和 0.02%。

在侵蚀性降雨次数方面,湿润区、半湿润区、半干旱区分别为 91 518、40 591、3 104 场。湿润区的中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨发生次数占总侵蚀性降雨次数的比例分别为 50.94%、32.44%、13.59%、2.93% 和 0.10%(表 2)。半湿润区各量级降雨事件所占比例与湿润区的结果较为接近,但从次数来看,约为湿润区的 1/2。相比之下,半干旱区与湿润区、半湿润区的呈现明显不同,中雨事件占比超过总次数的 70%,极少发生暴雨及以上量级的降雨,且在 2021—2023 年未记录到特大暴雨事件。

表 2 2021—2023 年不同干湿区各量级侵蚀性降雨的频率与雨量贡献

Table 2 Frequency and rainfall contribution of erosive rainfall at different levels in different dry and wet regions from 2021 to 2023 %

量级	湿润区		半湿润区		半干旱区	
	发生次数占比	雨量占比	发生次数占比	雨量占比	发生次数占比	雨量占比
中雨	50.94	27.53	54.76	31.29	72.49	55.01
大雨	32.44	34.11	30.48	33.36	22.36	31.12
暴雨	13.59	26.80	11.93	24.22	4.57	11.44
大暴雨	2.93	10.80	2.72	10.17	0.58	2.43
特大暴雨	0.10	0.76	0.11	0.96	0	0
总计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

在侵蚀性降雨量方面,湿润区、半湿润区和半干旱区分别有 78.63%、72.97% 和 49.14% 的年降雨量来自侵蚀性降雨量。各区域中雨和大雨的降雨量之和分别占年侵蚀性降雨量的 61.64%、64.65%、86.13%,由此可见,2 类降雨事件在各区域侵蚀性降雨量中占据主导地位。尽管湿润区和半湿润区

大雨对侵蚀性降雨量的贡献均最高,中雨次之,但湿润区暴雨的贡献率与中雨量级相近,半湿润区中雨的贡献率比暴雨的贡献率高 7.07%;而半干旱区中雨对侵蚀性降雨量的贡献最高,其次是大雨量级。

进一步分析各区域侵蚀性降雨发生频次、单次

侵蚀性降雨平均雨量、历时、平均雨强等特征(图 2)可以看出,不同干湿区的侵蚀性降雨类型呈现显著差异。其中,湿润区侵蚀性降雨发生频繁,尤其是长江中下游、华南等地出现最高频次,且大部分超过 24 次/a;单次侵蚀性降雨量普遍超过 27 mm,部分站点超过 36 mm,处于中等至偏长历时程度;平均雨强为

三大区域中最高,主要分布在 2.4~2.75 mm/h。因此,湿润区侵蚀性降雨通常表现为高雨量、较大雨强、较高频次、中等至偏长历时的降雨特征。与之相比,半湿润区则表现为中到大雨量、中等雨强、较高发生频次、中等历时的降雨特征,半干旱区多为小雨量、低雨强、低发生频次、较短历时的侵蚀性降雨。

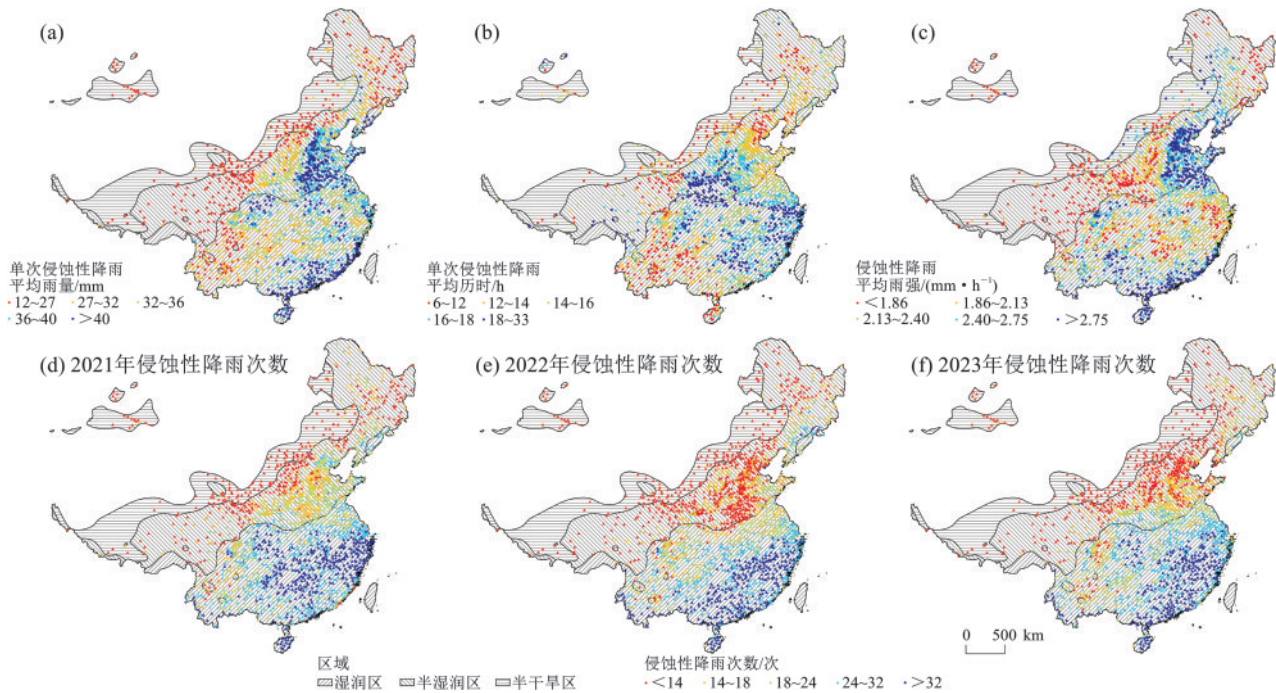


图 2 各站点侵蚀性降雨特征的空间格局
Fig.2 Spatial pattern of erosive rainfall characteristics at each station

2.2 降雨侵蚀力结果对比

研究区 2021—2023 年平均降雨侵蚀力 R_h 与 R_d 空间上均呈现由东南向西北递减的宏观分布特征,高值区集中分布于东南沿海,低值区主要分布于新疆地区及青藏高原西北部地区(图 3)。其中,湿润区 R_h 与 R_d 的平均值最高,分别达 6 953.70、7 679.26 (MJ·mm)/(hm²·h·a),半湿润区次之,半干旱区侵蚀力整体最低,平均值不足湿润区的 11%(表 3),与高歌等^[41]关于湿润区及 Wang 等^[18]关于河南省的降雨侵蚀力的结论基本一致。半干旱区 R_h 的变异系数高达 0.99, R_d 为 0.85,显著高于湿润区和半湿润区,表明半干旱区降雨侵蚀力的变异性更强。

由图 4 可知,年平均降雨侵蚀力 R_h 与 R_d 在湿润区、半湿润区、半干旱区的相关系数分别为 0.93、0.91、0.93($p<0.001$),呈极显著正相关。各区域拟合线在低值区位于 1:1 线上方,在高值区位于 1:1 线下方(图 4),同时 R_d 的平均值和最小值均高于 R_h ,而最大值和标准差均低于 R_h (表 3),表明日雨量侵蚀力模型在低值区高估,在高值区低估。各区域 R_h 的变异系数均高于 R_d ,说明日雨量侵蚀力模型对空间变异性的捕捉不敏感。

为定量评估日雨量侵蚀力模型估算降雨侵蚀力的精度,本研究进行系统的统计分析。首先,采用 Wilcoxon 符号秩检验对 2 种模型的结果进行比较,结果表明,日雨量侵蚀力模型估算湿润区、半湿润区和半干旱区降雨侵蚀力时整体上存在显著高估趋势($p<0.001$)(表 4)。依据 Bootstrap 方法(重采样 10 000 次)得到日雨量侵蚀力模型在湿润区估算的相对偏差平均值为 16.06%(95%CI: 14.60%~17.57%),在半湿润区为 22.47%(95%CI: 20.18%~24.84%),半干旱区为 24.19%(95%CI: 15.53%~33.80%),半干旱区 95% 置信区间的宽度更大,表明该区域的偏差存在较大的波动范围。从偏差分布(图 3)来看,湿润区、半湿润区、半干旱区相对偏差为 -15%~15% 的站点数占各区域站点总数的比例分别为 48.31%、37.95%、35.86%,主要分布在湿润区和半湿润区东部,表明日雨量侵蚀力模型在该类站点的估算效果良好。但由于其余站点以正偏差为主,且正偏差的平均幅度略大于负偏差,使得相对偏差均值偏向正值,整体上呈显著高估($p<0.001$)。空间上,相对偏差绝对值>50% 的站点主要分布在海拔相对较高的地区。

综上所述,日雨量侵蚀力模型在湿润区整体适用性最佳,半湿润区次之,半干旱区偏差更大且不确定性更高,与日雨量侵蚀力模型在雨量丰富的区域估算精度较高^[13]的结论一致。

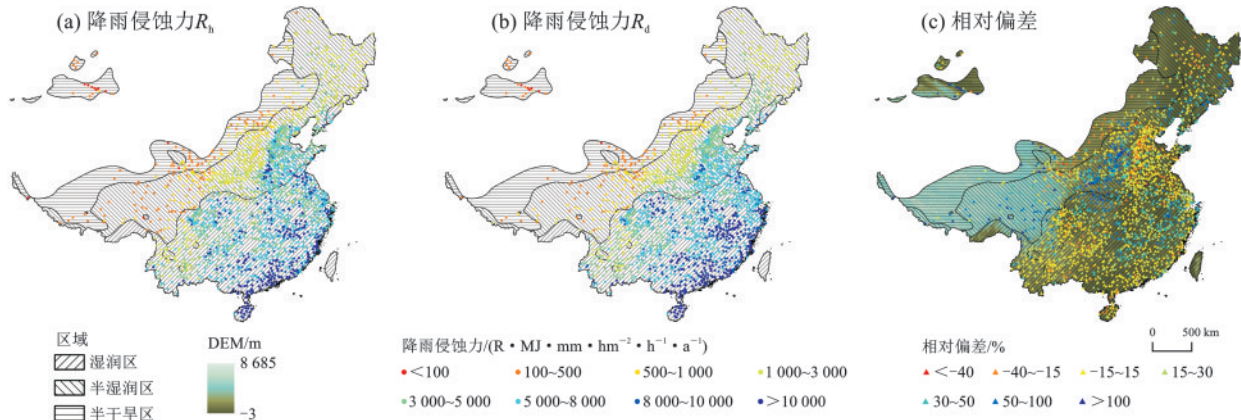


图 3 降雨侵蚀力 R_h 、 R_d 及二者相对偏差空间分布
Fig.3 Spatial distribution of rainfall erosivity R_h , R_d and their relative deviations

表 3 不同干湿区降雨侵蚀力 R_d 与 R_h 统计结果
Table 3 Statistical results of rainfall erosivity R_h and R_d in different dry and wet regions

区域	项目	最小值/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	最大值/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	平均值/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	标准差/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	变异 系数
湿润区	R_h	371.19	30 123.42	6 953.70	3 982.65	0.57
	R_d	568.95	27 653.49	7 679.26	3 729.01	0.49
半湿润区	R_h	74.14	24 389.92	3 254.87	2 382.97	0.73
	R_d	185.39	12 193.54	3 518.03	1 976.06	0.56
半干旱区	R_h	17.05	5 008.51	715.27	712.40	0.99
	R_d	50.13	3 227.65	734.94	628.17	0.85

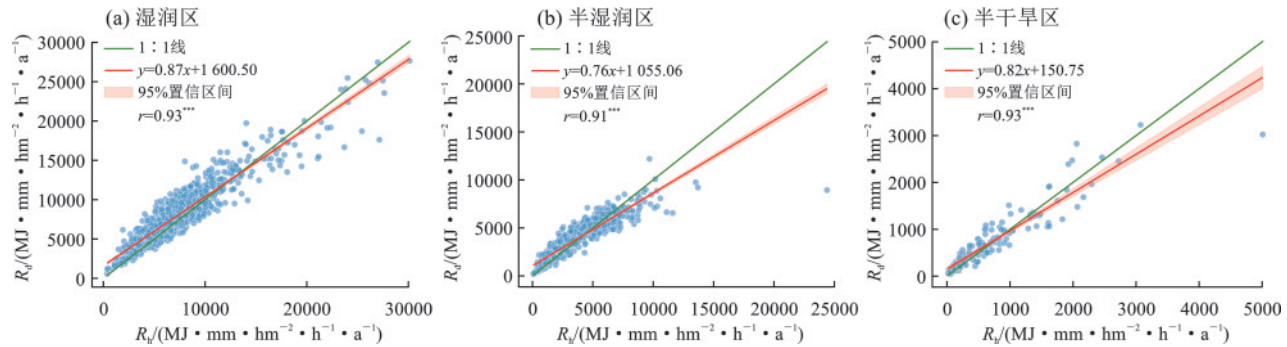


图 4 年平均降雨侵蚀力 R_h 与 R_d 的相关性
Fig.4 Correlation between annual average rainfall erosivity R_h and R_d

表 4 不同干湿区 R_d 与 R_h 的相对偏差均值、置信区间及显著性检验结果 (Wilcoxon_p)

Table 4 Mean relative deviations, confidence intervals and significance test results (Wilcoxon_p) of R_d and R_h in different dry and wet regions

区域	平均值/%	95% 置信区间/%	Wilcoxon_p
湿润区	16.06	14.60~17.57	$p<0.001$
半湿润区	22.47	20.18~24.84	$p<0.001$
半干旱区	24.19	15.53~33.80	$p<0.001$

2.3 不同雨量等级降雨侵蚀力结果对比

各区域 2021—2023 年不同量级年平均降雨侵蚀力 R_h 与 R_d 均呈现由湿润区向半干旱区递减的特征,

且半干旱区几乎不发生大暴雨及以上降雨(图 5)。其中,湿润区各量级降雨侵蚀力 R_h 与 R_d 的平均值最高,半湿润区次之,半干旱区侵蚀力整体最低(表 5)。各区域不同量级降雨侵蚀力 R_h 与 R_d 的相关系数最高为 0.86,最低为 0.57(图 6~图 9),为中等以上强度的正相关($p<0.001$),表明日雨量侵蚀力模型总体上能够反映不同量级降雨侵蚀力的空间分布特征^[27],但在各量级的表现存在较大区域差异。

结合箱线图和散点图,各区域中雨侵蚀力和湿润区、半湿润区大雨侵蚀力 R_d 的平均值、中位数和四分位数均明显高于 R_h (表 5、图 5),拟合线和大部分数

据点位于 1:1 线上方(图 6、图 7),表明日降雨量侵蚀力模型在该类区域和量级下呈现高估趋势;但半干旱区大雨侵蚀力 R_d 的平均值、四分位数略低于 R_h , 拟

合线在低值区位于 1:1 线上方,在高值区位于 1:1 线下方(图 7),表明日降雨量侵蚀力模型对侵蚀力较小的大雨事件高估,对侵蚀力较大的大雨事件低估。

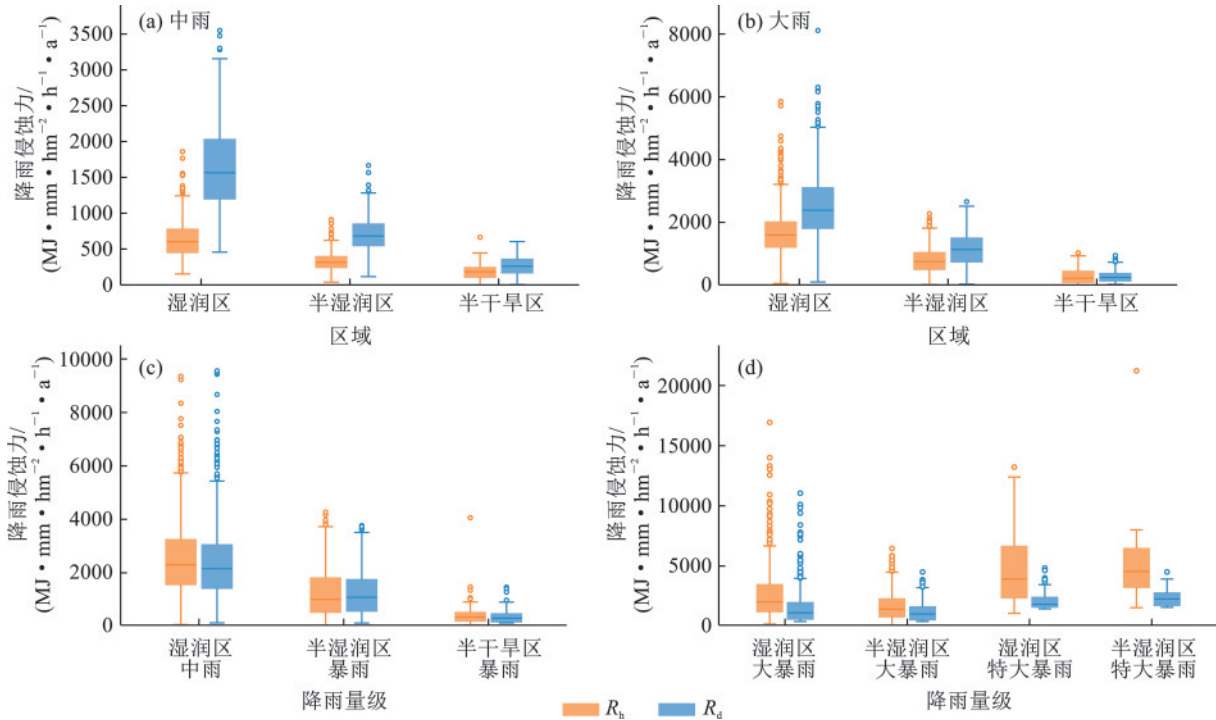
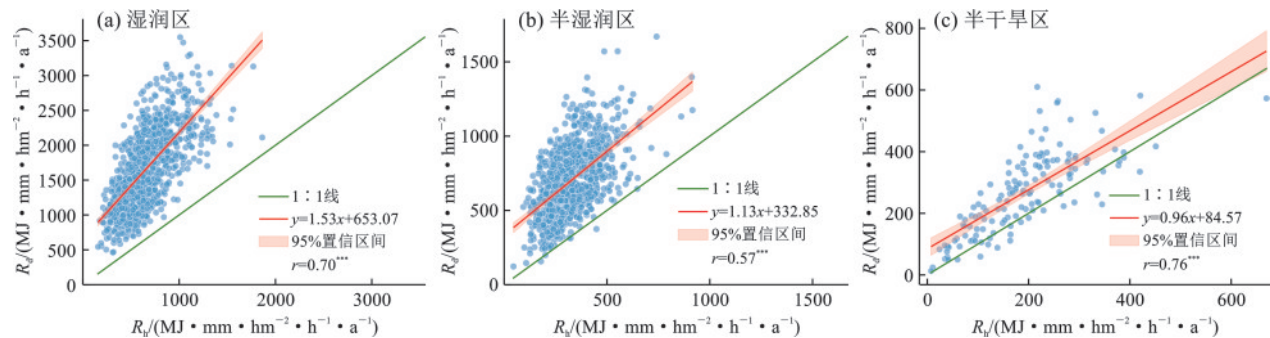


图 5 各区域不同量级降雨侵蚀力 R_h 与 R_d 分布特征
Fig.5 Distribution characteristics of rainfall erosivity R_h and R_d at different levels in each region

表 5 各区域不同量级降雨侵蚀力 R_h 与 R_d 平均值

降雨量级	湿润区		半湿润区		半干旱区	
	R_h	R_d	R_h	R_d	R_h	R_d
中雨侵蚀力	643.10	1 638.22	331.70	707.47	192.12	268.60
大雨侵蚀力	1 684.90	2 526.70	780.94	1 100.54	267.49	262.55
暴雨侵蚀力	2 667.86	2 359.98	1 203.55	1 181.69	447.58	367.49
大暴雨侵蚀力	2 267.58	1 324.86	1 456.93	993.29	660.27	508.20
特大暴雨侵蚀力	3 860.62	1 243.64	3 723.12	1 023.08	—	—



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。下同。
图 6 年平均中雨侵蚀力 R_h 与 R_d 的相关性
Fig.6 Correlation between annual average moderate rainfall erosivity R_h and R_d

随着量级增大,偏差方向发生系统性转变。暴雨量级、 R_d 与 R_h 的平均值、中位数和四分位数基本持平,数值差异微小(表 5、图 5);散点图中数据点主要分布于 1:1 线两侧,拟合线在高值区位于 1:1 线上

方,在高值区位于 1:1 线下方(图 8),日降雨量模型对侵蚀力较小的暴雨事件高估,对侵蚀力较大的暴雨事件低估。大暴雨及以上量级,湿润区和半湿润区 R_d 的平均值、中位数和四分位数均明显低于 R_h (表 5、图

5),大部分数据点位于1:1线下方(图8),表明日降雨量侵蚀力模型在以上区域和量级下呈现低估趋势;半干旱区因样本不足,大暴雨及以上量级未呈现出稳定的规律。

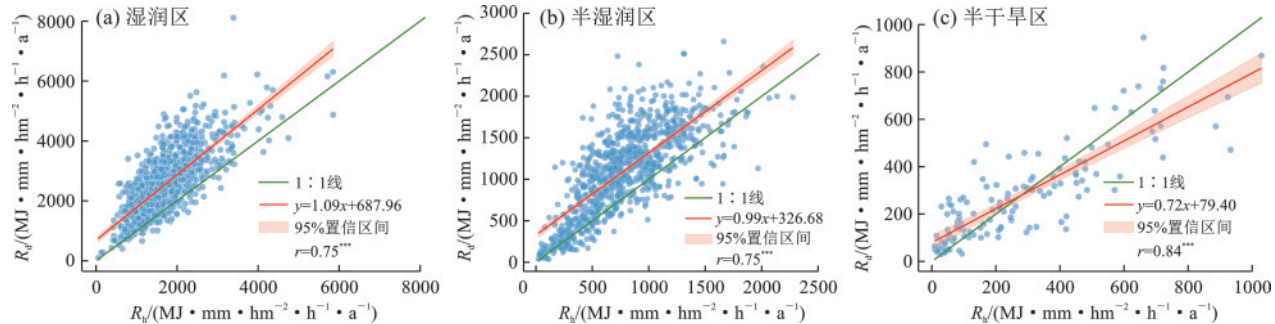


图 7 年平均大雨侵蚀力 R_h 与 R_d 的相关性

Fig.7 Correlation between annual average heavy rainfall erosivity R_h and R_d

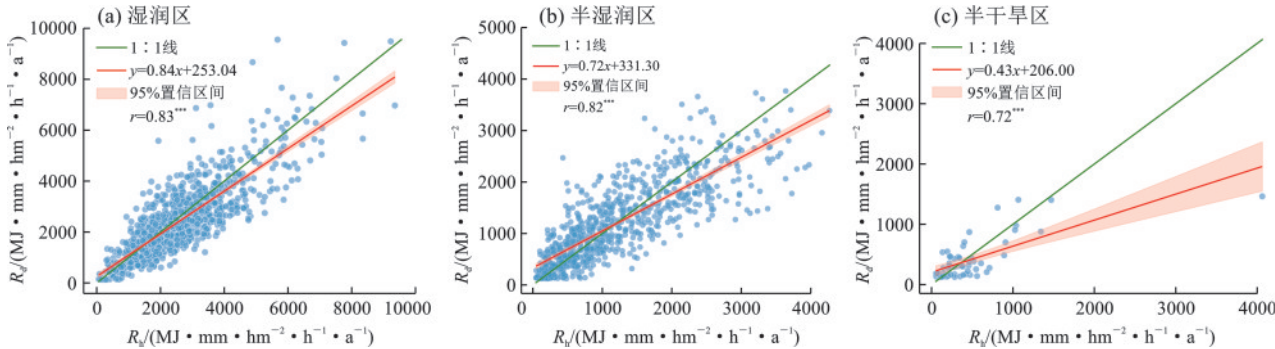


图 8 年平均暴雨侵蚀力 R_h 与 R_d 的相关性

Fig.8 Correlation between annual average rainstorm erosivity R_h and R_d

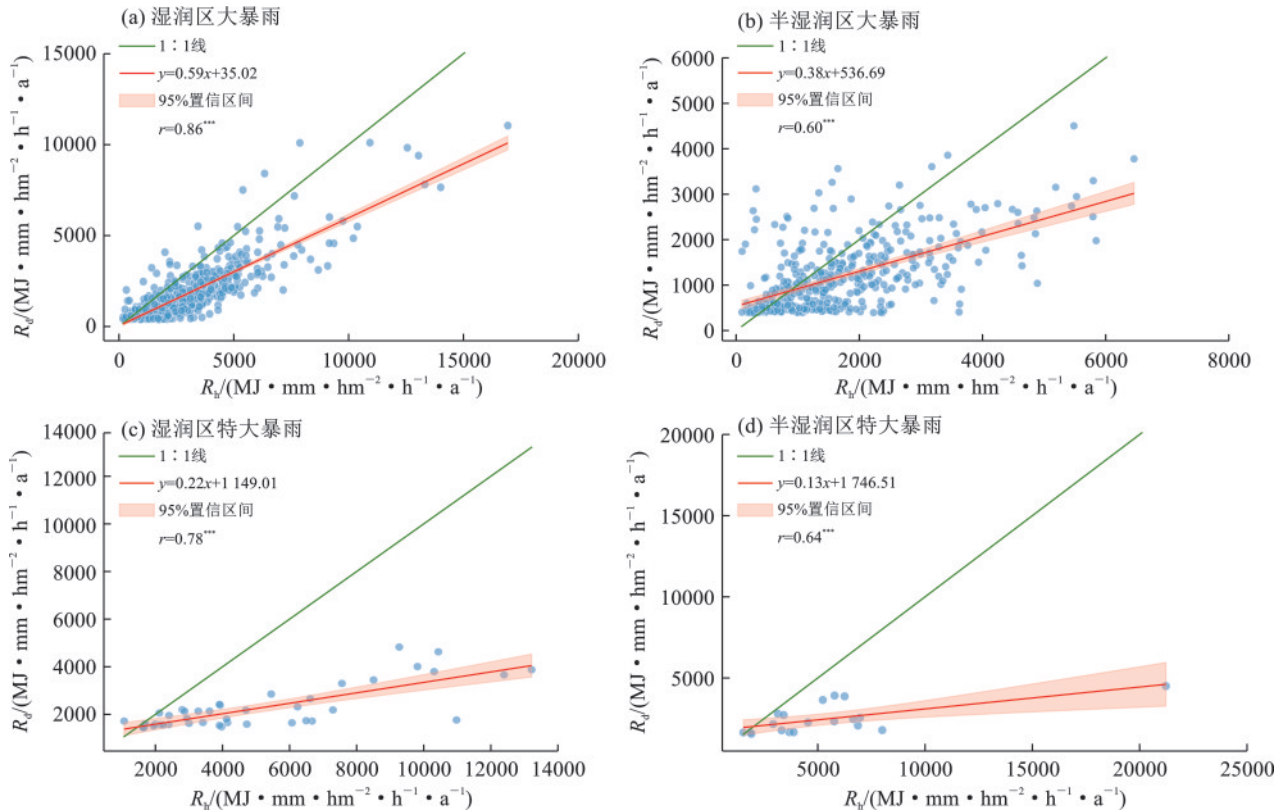


图 9 年平均大暴雨和特大暴雨侵蚀力 R_h 与 R_d 的相关性

Fig.9 Correlation between annual average heavy rainstorm and extreme rainstorm erosivity R_h and R_d

进一步采用 Wilcoxon 符号秩检验对不同干湿区各量级的 R_h 与 R_d 差异进行显著性判定,并通过 Bootstrap 方法(重采样 10 000 次)得到二者相对偏差的平均值及 95% 置信区间,以定量刻画日雨量侵蚀力

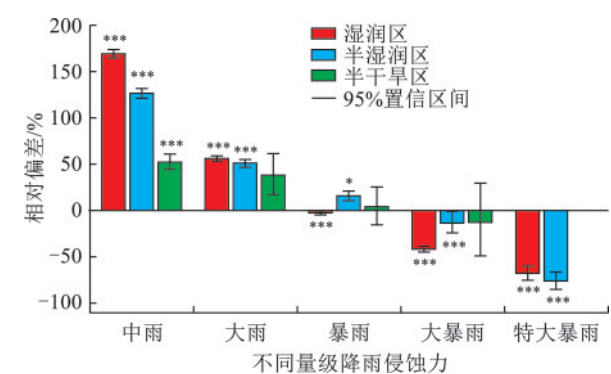
模型在各区域不同降雨等级下的偏差幅度与稳健性。

中雨和大雨量级,各区域相对偏差平均值均为正值。中雨量级,日雨量侵蚀力模型在湿润区相对偏差平均值为 169.19%(95%CI:164.67%~173.76%),半湿润区为 126.45%(95%CI:121.27%~131.69%),半干旱区为 52.50%(95%CI:44.24%~60.99%),均呈显著高估(图 10, $p<0.001$);日雨量侵蚀力模型对湿润区、半湿润区大雨侵蚀力仍呈现显著高估($p<0.001$),偏差平均值分别为 56.07%(95%CI:53.15%~58.97%)、50.87%(95%CI:46.63%~55.14%),尽管半干旱区相对偏差平均值为 38.27%(95%CI:17.26%~61.57%),但其检验不显著($p=0.14$)(图 10)。半干旱区中雨和大雨侵蚀力相对偏差的置信区间宽度明显大于湿润区和半湿润区,日雨量侵蚀力模型估算不确定性更高。空间分布上,湿润区和半湿润区东部的高估现象尤为显著,部分站点相对偏差甚至超过 200%(图 11);中雨侵蚀力的高估程度更严重,仅半湿润区和半干旱区少量站点表现为 $R_d<R_h$ (图 11a)。

暴雨量级,日雨量侵蚀力模型在湿润区转为显著低估(-2.59% , 95%CI: $-4.82\%\sim-0.24\%$)($p<0.001$),半湿润区仍为显著高估(15.71% , 95%CI: $10.64\%\sim21.00\%$)($p<0.05$),半干旱区无显著偏差方向(4.00% , 95%CI: $-15.34\%\sim25.28\%$)($p=0.51$)。大暴雨及以上量级,日雨量侵蚀力模型在湿润区和半湿润区均转为显著低估($p<0.001$),大暴雨

侵蚀力的偏差程度表现为湿润区>半湿润区,特大暴雨侵蚀力的偏差程度表现为湿润区<半湿润区。空间分布上, R_d 小于 R_h 的站点数量超过总站点 1/2(图 11),部分站点负偏差的绝对值超过 80%。

综合数据偏差与相关系数 2 个指标来看,在湿润区和半湿润区,日雨量侵蚀力模型对暴雨侵蚀力的估算精度均最高,其次是大暴雨等级,而中雨量级精度最低;在半干旱区,基于当前有限数据,除中雨侵蚀力外,均没有显著的偏差方向($p>0.05$)(图 10),不确定性更高。总体而言,日雨量侵蚀力模型在湿润区、暴雨量级下的估算精度最高,其次为半湿润区、暴雨量级,最低的是湿润区、中雨量级。



注: *表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$; ***表示 $p<0.001$ 。
图 10 各区域不同量级降雨侵蚀力 R_d 与 R_h 的相对偏差统计与显著性检验

Fig.10 Statistical results and significance test of relative deviation between rainfall erosivity R_d and R_h at different levels in each region

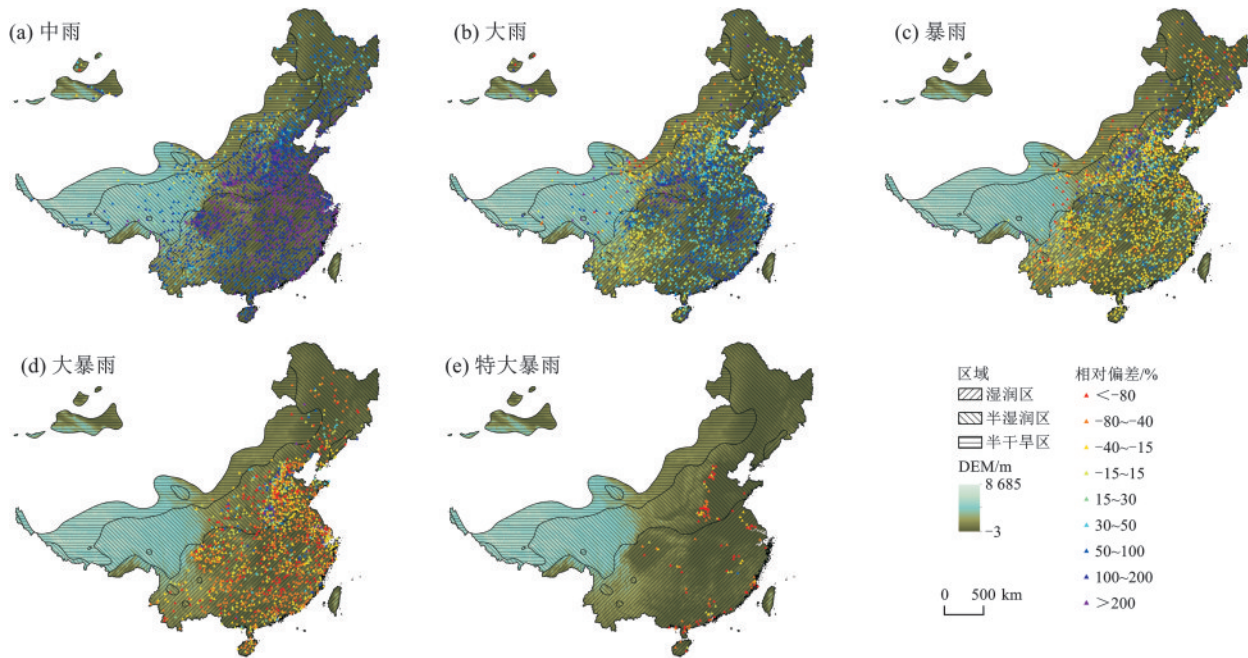


图 11 日雨量降雨侵蚀力模型估算不同量级降雨侵蚀力相对偏差的空间分布

Fig.11 Spatial distribution of relative deviation of rainfall erosivity at different levels estimated by daily rainfall erosivity model

3 讨论

本研究发现,日雨量侵蚀力模型整体上高估中雨和大雨侵蚀力,低估暴雨及以上量级降雨侵蚀力,且由于中雨、大雨发生频率较高,造成模型对不考虑雨量分级时的降雨侵蚀力的估算呈现高估趋势。马小晴等^[42]、王瀚若等^[27]的研究也指出,该模型对中国东部地区的偏差普遍超过30%,将陕北地区的降雨侵蚀力高估近一倍。Jiri等^[11]研究发现,基于年、月、日雨量的简易模型往往高估降雨侵蚀力;章文波等^[13]也指出,构建的日雨量侵蚀力模型对高强度降雨的侵蚀力存在低估现象。日雨量侵蚀力模型估算不同雨量等级和干湿分区降雨侵蚀力的精度存在较大差异的原因主要为:其一,由于日降雨量通常以每天固定时间记录,造成单个日降雨量可能由完整、多次或部分降雨过程组成^[43]。记录方式可能导致非侵蚀性降雨被错误合并,进而使日雨量侵蚀力模型产生偏高估算。结合图11、图12发现,各量级降雨侵蚀力 R_d 与 R_h 偏差 $>50\%$ 的站点,其日雨量侵蚀力模型识别的侵蚀性降雨往往大于经典模型,尤其在中雨和大雨量级下表现最为显著。日尺度记录也可能将长历时降雨事件拆分,降雨过程中累积效应的忽略可能导致降雨侵蚀力估算结果偏低。北京市房山区2023年7月底8月初的1场持续76 h、侵蚀性雨量达

772.2 mm的特大暴雨事件被分割为1个大暴雨日、2个特大暴雨日和2个非侵蚀性降雨日。尽管2种模型的侵蚀性降雨量仅相差8.8 mm,但对应降雨侵蚀力结果表明日雨量侵蚀力模型低估约16.58%。其二,日雨量侵蚀力模型在估算降雨侵蚀力时,仅输入日降雨量数据,未充分考虑动能、雨强等降雨的动力学特征^[36,44]。然而,以上因素对土壤侵蚀具有决定性影响,不同雨型引发的土壤侵蚀差异显著^[45-46]。2021年河南“7·20”特大暴雨的最大小时雨强达到201.9 mm/h,而基于经典模型和日雨量侵蚀力模型计算的降雨侵蚀力分别为63 702.28、13 297.83 MJ·mm/($\text{hm}^2\cdot\text{h}$),相对偏差达-79.13%。日雨量侵蚀力模型对极端峰值雨强的忽略,导致实际降雨侵蚀力被低估。其三,受到东亚季风环流、西风环流和高原季风等因素的共同影响^[47-48],导致不同区域呈现差异显著的降雨过程特征^[49-51]。湿润区多为高雨量、较大雨强、较高频次、中等至偏长历时降雨,半湿润区多为中等雨强、中到大雨量、较高发生频次、中等历时降雨,半干旱区降雨则多呈现小雨量、低雨强、低发生频次、较短历时的特点(图2)。相对偏差大的站点多分布于海拔较高的地区(图3、图11),是地形强迫使风暴系统停滞或移动缓慢,导致降雨在同一区域持续累积,短时降雨强度显著提高,进而造成日雨量侵蚀力模型较大的估算偏差^[52]。

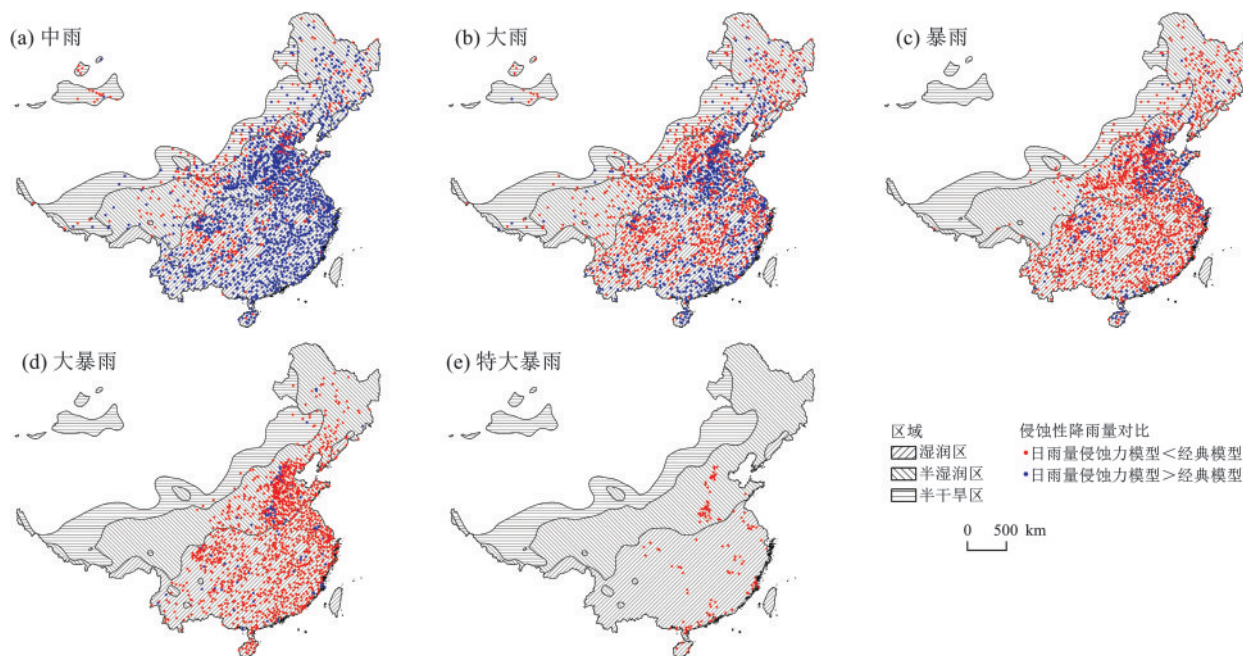


图12 不同量级侵蚀性雨量对比

Fig.12 Comparison of erosive rainfall amounts at different levels

当日雨量侵蚀力模型在不同区域、不同量级下的偏差方向与幅度存在显著差异时,基于该模型的估算结果可能难以真实反映不同区域间降雨侵蚀力

的实际差异,甚至因偏差结构的区域分异而掩盖真实的区域分异规律。因此,在应用日雨量侵蚀力模型进行不同区域对比或分量级侵蚀评估时,需充分

考虑其偏差的区域分异与量级依赖特征。

本研究因缺乏更高时间分辨率(1 min 或 5 min)降雨资料,采用小时尺度数据作为基准值,虽然经转换因子校正后,小时降雨数据可较为可靠地用于检验日雨量侵蚀力模型的性能^[38],但仍存在一定偏差,后续可收集分钟级降雨资料,开展更加精细的对比分析,并在此基础上构建更适用于不同区域和降雨量级的降雨侵蚀力估算模型,以进一步提升模型精度与适用范围。受我国气象站点东南密、西北疏的客观分布影响,本研究中半干旱区站点数量偏少,造成该区域结果的统计稳健性相对较弱,存在一定不确定性,后续可结合更高密度的观测数据或遥感反演产品进一步验证。

4 结论

1) 日雨量侵蚀力模型能够有效揭示降雨侵蚀力的空间分布规律,其与经典 EI₃₀模型的估算结果呈中等及以上程度的显著正相关($p < 0.001$)。

2) 日雨量侵蚀力模型在不区分雨量等级时,各区域均以高估为主,湿润区偏差最小、半干旱区偏差最大。分量级分析表明,模型在湿润区和半湿润区暴雨量级的估算精度相对最高;该模型对发生频率高的中雨和大雨事件侵蚀力的高估,以及对破坏性更大的暴雨及以上量级极端降雨事件侵蚀力的低估,对水土流失评估的准确性及防治措施的有效性造成影响。

3) 采用日雨量侵蚀力模型在不同区域进行分量级降雨侵蚀力的研究时,其估算偏差将直接影响结果的可靠性。因此,发展分区、分级的降雨侵蚀力估算模型,能够有效提升水土保持重点防治区域水土流失评估的准确性与治理措施布局的精准性。

参考文献:

- [1] Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, et al. Rainfall erosivity in Europe[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511:801-814.
- [2] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1959, 23(3):246-249.
- [3] Rajbanshi J, Bhattacharya S. Assessment of soil erosion, sediment yield and basin specific controlling factors using RUSLE-SDR and PLSR approach in Konar River basin, India[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587:e124935.
- [4] Wondrade N. Integrated use of GIS, RS and USLE model for LULC change analysis and soil erosion risk mapping in the Lake Hawassa Watershed, southern Ethiopia[J]. *Geocarto International*, 2023, 38(1):e2210106.
- [5] Brown L C, Foster G R. Storm erosivity using idealized intensity distributions[J]. *Transactions of the Asae*, 1987, 30(2):379-386.
- [6] McGregor K C, Bingner R L, Bowie A J, et al. Erosivity index values for northern Mississippi[J]. *Transactions of the Asae*, 1995, 38(4):1039-1047.
- [7] Dijk V A, Bruijnzeel L, Rosewell C. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: A critical literature appraisal [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 261(1/2/3/4):1-23.
- [8] Lim Y S, Kim J K, Kim J W, et al. Analysis of the relationship between the kinetic energy and intensity of rainfall in Daejeon, Korea [J]. *Quaternary International*, 2015, 384:107-117.
- [9] 江忠善,宋文经,李秀英.黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. *中国水土保持*, 1983(3):34-38.
Jiang Zhongshan, Song Wenjing, Li Xiuying. Study on raindrop characteristics of natural rainfall in loess area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1983, (3):34-38.
- [10] 何绍浪,李凤英,何小武.水蚀预报中降雨侵蚀力研究进展[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2):262-270.
He Shaolang, Li Fengying, He Xiaowu. Research progress of rainfall erosivity for water erosion prediction[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(2):262-270.
- [11] Jiří B, Jana P, Milada Š. Review of methods of spatio-temporal evaluation of rainfall erosivity and their correct application[J]. *Catena*, 2022, 217:e106454.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Bonilla C A, Vidal K L. Rainfall erosivity in central Chile [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 410(1/2):126-133.
- [15] 钱庆欢,王世杰,白晓永,等.基于允许流失量和正负地形源汇理论的喀斯特关键带土壤侵蚀研究[J]. *地理学报*, 2018, 73(11):2135-2149.
Qian Qinghuan, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Assessment of soil erosion in karst critical zone based on soil loss tolerance and source-sink theory of positive and negative terrains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11):2135-2149.
- [16] Fiener P, Dostál T, Krása J, et al. Operational USLE-based modelling of soil erosion in Czech republic, Austria, and Bavaria: Differences in model adaptation,

- parametrization, and data availability [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): e3647.
- [17] 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 Keo, 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.
- [18] Wang Shengfeng, Xu Xinmiao, Lei Longwei. The evolution of spatial and temporal distribution of rainfall erosivity in Henan Province, Central China [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): e25606.
- [19] 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.
- [20] 李超, 骆师堂, 喻雅雯, 等. 1961—2020 年藏东南地区降雨侵蚀力时空分布特征[J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23(2): 103-115.
- Li Chao, Luo Shitang, Yu Yawen, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of rainfall erosivity in southeastern Tibet from 1961 to 2020 [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(2): 103-115.
- [21] Nejc B, Matjaž M, Pasquale B, et al. An in-depth statistical analysis of the rainstorms erosivity in Europe [J]. *Catena*, 2021, 206: e105577.
- [22] Zhang Wenxia, Furtado K, Zhou Tianjun, et al. Constraining extreme precipitation projections using past precipitation variability [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): e6319.
- [23] Zhao Yingshan, Zhu Dayun, Wu Zhigao, et al. Extreme rainfall erosivity: Research advances and future perspectives [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: e170425.
- [24] 吴洁玲, 查轩, 陈世发, 等. 1951—2018 年韶关不同量级降雨侵蚀力变化[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 21-26.
- Wu Jieling, Zha Xuan, Chen Shifa, et al. Variations of rainfall erosivity of different magnitudes in Shaoguan from 1951 to 2018 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 21-26.
- [25] 邹玉霞, 樊国中, 刘淑婧, 等. 1960—2017 年重庆市不同量级降雨侵蚀力 R 值的时空变化特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 41-48.
- Zou Yuxia, Fan Guozhong, Liu Shujing, et al. Spatio-temporal variations of rainfall erosivity R values of different magnitudes in Chongqing from 1960 to 2017 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 41-48.
- [26] 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 Weijie, Wang Jianli. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity at each level in Taihang Mountain [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 785-801.
- [27] 王瀚若, 刘元昊, 王飞, 等. 基于不同降雨资料的陕北降雨侵蚀力定量比较[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(5): 80-86.
- Wang Hanruo, Liu Yuanhao, Wang Fei, et al. Quantitative comparison of rainfall erosivity in northern Shaanxi based on different rainfall data [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(5): 80-86.
- [28] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案[J]. *地理学报*, 2010, 65(1): 3-12.
- Zheng Jingyun, Yin Yunhe, Li Bingyuan. A new scheme for climate regionalization in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 3-12.
- [29] 史学正, 于东升, 高鹏, 等. 中国土壤信息系统(SISChina)及其应用基础研究[J]. *土壤*, 2007, 39(3): 329-333.
- Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, Gao Peng, et al. Soil information system of China (SISChina) and its application [J]. *Soils*, 2007, 39(3): 329-333.
- [30] 赵宇铭, 邱新法, 朱晓晨, 等. 1971—2010 年中国干湿区降雨资源变化特征分析[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(5): 34-41.
- Zhao Yuming, Qiu Xinfa, Zhu Xiaochen, et al. Characteristics of rainfall amount variations in wet and dry partitions of China from 1971 to 2010 [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(5): 34-41.
- [31] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J]. *自然杂志*, 2008, 30(1): 12-16.
- Zheng Fenli, Wang Zhanli, Yang Qinke. The retrospection and prospect on soil erosion research in China [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2008, 30(1): 12-16.
- [32] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [J]. United States. Dept. of Agriculture. *Agriculture handbook (USA)*, 1978.
- [33] Wang Wenting, Yin Shuiqing, Xie Yun, et al. Minimum inter-event times for rainfall in the eastern monsoon region of China [J]. *Transactions of the Asabe*, 2019, 62(1): 9-18.
- [34] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 6-11.
- Xie Yun, Liu Baoyuan, Zhang Wenbo. Study on standard of erosive rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 6-11.

- [35] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. 地理研究, 2002, 21(3): 384-390.
Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Estimation of rainfall erosivity using rainfall amount and rainfall intensity[J]. Geographical Research, 2002, 21(3): 384-390.
- [36] 王友胜, 杨志, 刘冰, 等. 宁夏黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力特征分析[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(4): 34-41.
Wang Yousheng, Yang Zhi, Liu Bing, et al. Characteristics analysis of rainfall erosivity in the loess hilly and gully region of Ningxia[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(4): 34-41.
- [37] Lobo G P, Bonilla C A. Sensitivity analysis of kinetic energy-intensity relationships and maximum rainfall intensities on rainfall erosivity using a long-term precipitation dataset[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 788-793.
- [38] Yue Tianyu, Xie Yun, Yin Shuiqing, et al. Effect of time resolution of rainfall measurements on the erosivity factor in the USLE in China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8(4): 373-382.
- [39] Yin Shan, Xie Yun, Nearing M A, et al. Estimation of rainfall erosivity using 5-to 60-minute fixed-interval rainfall data from China[J]. Catena, 2007, 70(3): 306-312.
- [40] 俱战省, 张一澜, 周旗. 宝鸡市生产建设项目降雨侵蚀力算式及应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 82-88.
Ju Zhansheng, Zhang Yilan, Zhou Qi. Research and application of rainfall erosivity equations for the production and construction projects in Baoji City[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(1): 82-88.
- [41] 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.
- [42] 马小晴, 郑明国. 基于统计检验的降雨侵蚀力简易计算模型比较[J]. 资源科学, 2018, 40(8): 1622-1633.
Ma Xiaoping, Zheng Mingguo. Statistical evaluation of proxies for the R factor of the Universal Soil Loss Equation[J]. Resources Science, 2018, 40(8): 1622-1633.
- [43] Xie Yun, Yin Shuiqing, Liu Baoyuan, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 547-558.
- [44] 马星, 郑江坤, 王文武, 等. 不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 17-21.
Ma Xing, Zheng Jiangkun, Wang Wenwu, et al. Characteristics of the runoff and sediment yield of sloping farmland in the purple soil area under different rainfall patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 17-21.
- [45] Oh B, Kim J, Hwang S. Influence of rainfall patterns on rainfall-runoff processes: Indices for the quantification of temporal distribution of rainfall[J]. Water, 2024, 16(20): e2904.
- [46] Chen Guangzhao, Hou Jingming, Liu Yuan, et al. Urban inundation rapid prediction method based on multi-machine learning algorithm and rain pattern analysis[J]. Journal of Hydrology, 2024, 633: e131059.
- [47] 刘玉芝, 吴楚樵, 贾瑞, 等. 大气环流对中亚干旱半干旱区气候影响研究进展[J]. 中国科学(地球科学), 2018, 48(9): 1141-1152.
Liu Yuzhi, Wu Chuqiao, Jia Rui, et al. An overview of the influence of atmospheric circulation on the climate in arid and semi-arid region of Central and East Asia[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2018, 48(9): 1141-1152.
- [48] Chen Fahu, Yu Zicheng, Yang Meilin, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history[J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(3/4): 351-364.
- [49] Zhang Qiting, Qian Jinglin. Identification and temporal distribution of typical rainfall types based on K-means++ clustering and probability distribution analysis[J]. Hydrology, 2025, 12(4): e88.
- [50] Liu Jie, Li Baofu, Ma Mengqiu. Spatiotemporal variation and causes of typical extreme precipitation events in Shandong Province over the last 50 years[J]. Remote Sensing, 2024, 16(7): e1283.
- [51] 杨任翔, 邱凡, 王坚桦, 等. 雨型和甘蔗种植对赤红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 65-70.
Yang Renxiang, Qiu Fan, Wang Jianhua, et al. Effects of rainfall pattern and sugarcane planting on soil erosion characteristics of lateritic red soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 65-70.
- [52] Zhou Zhengzheng, Smith J A, Wright D B, et al. Storm catalog-based analysis of rainfall heterogeneity and frequency in a complex terrain[J]. Water Resources Research, 2019, 55(3): 1871-1889.