

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.01.014

靳军英, 王林, 金铁生, 等. 基于 REOF 的不同量级降雨侵蚀力时空变化——以重庆市为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(1): 163-177.

基于 REOF 的不同量级降雨侵蚀力时空变化

——以重庆市为例

靳军英, 王林, 金铁生, 张卫华

西南大学 资源环境学院, 重庆 400715

摘要: 研究重庆市不同地理分区内各量级降雨侵蚀力的时空变化特征, 为该地区进行更加精准的区域性水土流失防治工作提供理论依据。选取 1981—2020 年重庆市 31 个站点逐日降雨数据, 利用旋转经验正交函数 (Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF) 对降雨侵蚀力进行地理分区, 并结合 R/S、5 年滑动平均、Mann-Kendall 检验等方法, 分析各分区不同量级降雨侵蚀力时空变化。结果表明: ① 重庆市降雨侵蚀力可分为 6 个地理区域 (I—VI 区); ② 重庆市多年平均降雨侵蚀力为 $5\ 784.04\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 不同降雨侵蚀力从大到小依次为: 大雨、暴雨、中雨、大暴雨; ③ 大雨侵蚀力在 I—III 区和 V—VI 区占主导优势, 暴雨侵蚀力在 IV 区占主导优势。各分区中, 中雨、大雨及暴雨侵蚀力主要集中在 5—9 月, 大暴雨侵蚀力集中在 6—8 月; ④ 各区不同量级降雨侵蚀力年际变化从小到大依次为: 中雨、大雨、暴雨、大暴雨; 同一量级降雨侵蚀力的整体变化趋势均不显著; Hurst 指数表明, 中雨侵蚀力在 I 和 V 区、大雨侵蚀力在 II 和 V 区、大暴雨侵蚀力在 I 和 III 区呈强持续上升趋势; ⑤ 中雨、大雨及大暴雨侵蚀力在渝东南、渝东北占主导优势, 暴雨侵蚀力在渝西以及重庆中部占主导优势, 且 I 区酉阳和秀山、II 区开州、III 区北碚和铜梁、IV 区璧山和永川、V 区巫溪和云阳及 VI 区忠县是不同量级降雨侵蚀力的高峰中心。通过对重庆各分区不同量级降雨侵蚀力的分析, 明确了可能引起土壤侵蚀的主要雨型、高发时期和潜在风险较高的地区, 可为区域水土流失动态监测和水土保持措施的合理制定提供参考。

关键词: 降雨侵蚀力; 时空变化; 旋转经验正交分解法;

MK 非参数趋势检验; R/S 分析法

中图分类号: P426.62; S157.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)01-0163-15

Spatio-Temporal Variation of Rainfall Erosivity of Different Magnitudes Based on the REOF Method

——Take Chongqing as an Example

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U20A20326); 西南大学实验技术研究项目(SYJ2024020); 西南大学教育教育改革研究重点项目(2022JY012)。

作者简介: 靳军英, 博士, 高级实验师, 主要从事水文学及水资源研究。

通信作者: 张卫华, 博士, 副教授。

JIN Junying, WANG Lin, JIN Tiesheng, ZHANG Weihua

College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: This study explored the spatio-temporal variation of rainfall erosivity in different zones of Chongqing, in order to provide a theoretical basis for more precise soil erosion control. The daily rainfall data of 31 meteorological stations in Chongqing from 1981 to 2020 were selected to analyze the spatio-temporal variation of rainfall erosivity of different magnitudes in each zone, with the method of R/S analysis, moving average, and MK trend test. The results indicate: ① Rainfall erosivity can be divided into six geographical zones (I-VI) based on the method of Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF). ② The average annual rainfall erosivity is $5\ 784.04\ \text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, with the order of reducing as heavy rain, rainstorm, moderate rain, downpour. ③ Heavy rain erosivity played dominant role in zone I-III and V-VI, while rainstorm erosivity was dominate in zone IV. Moderate rain, heavy rain, and rainstorm erosivity of each zone were mainly distributed from May to September, while downpour erosivity mainly concentrated from June to August. ④ The yearly variation of rainfall erosivity of different magnitudes in each zone was rising as moderate rain, heavy rain, rainstorm, downpour. The overall change trend of rainfall erosivity of same magnitude was not significant. The Hurst index showed a strong upward trend for moderate rain erosivity in zones I and V, heavy rain in zone II and V, and downpour in zone I and III. ⑤ The erosivity of moderate rain, heavy rain and downpour mainly concentrated in southeast and northeast, while the erosivity of rainstorm was dominant in west and central Chongqing. The rainfall erosivity of different magnitudes showed a decreasing trend from east to west. Youyang and Xiushan of zone I, Kaizhou of Zone II, Beibei and Tongliang of zone III, Bishan and Yongchuan of zone IV, Wuxi and Yunyang of Zone V, and Zhongxian of zone VI were the peak centers of the rainfall erosivity of different magnitudes. This study clarifies the main rainfall types, periods and areas with high possibility of soil erosion, dynamic monitoring and protective measures are supposed to control regional soil erosion according to local conditions.

Key words: rainfall erosivity; spatio-temporal variation; rotating empirical orthogonal function; MK non-parametric test; R/S analysis

强降雨引起的土壤侵蚀会破坏土壤的原生状态, 引发水土流失, 严重威胁生态环境安全^[1]。降雨侵蚀力作为土壤侵蚀的主要动力因子, 可衡量降雨导致土壤侵蚀的潜在能力^[2], 其时空分布在一定程度上决定了土壤侵蚀总量的空间分布, 分析降雨侵蚀力时空分布特征对区域水土保持规划、生态保护及灾害防治等具有重要意义。

国内外学者针对不同类型降雨数据的降雨侵蚀力计算模型进行了研究, 殷水清等^[3]、Yu 等^[4]、Renard 等^[5]、Lee 等^[6]分别基于小时雨量、日雨量、月雨量、年雨量资料, 建立相应的简易模型, 但这些经典算法计算过程复杂, 实际应用局限性较大。国内普遍采用章文波等^[7]提出的基于日降雨数据计算 R 因子的简易计算模型及其相关演变模型用于研究不同区域、不同时空尺度下降雨侵蚀力的变化特征^[8-10]。近年来, 诸多学者在降雨侵蚀力的研究方面取得了较多进展, 如 Vantas 等^[11]研究了降雨侵蚀力与侵蚀性密度之间的关系。同时, 遥感与更多模型算法的应用也在逐步推进, 如江源天等^[12]基于不同遥感降水产品反演降雨数据, 旨在探究遥感在土壤水力侵蚀中的应用; 梁宇靖^[13]将 CLDAS-prcp 融合降水应用于降雨侵蚀力研究; 陈君等^[14]基于 GBDT-OK 算法与星地数据模拟南方降雨侵蚀力; Zhu 等^[15]研究了极端降雨侵蚀的非对称性特征; 张哲等^[16]将侵蚀性降雨分为 I 型、II 型和 III 型 3 种类型, 研究不同雨型下水土流失特征。这些研

究为降雨侵蚀力的测算提供了更多的可行性方法。

重庆市位于三峡库区,是西南山地丘陵地区土壤侵蚀防治的重点区域,其中水力侵蚀面积达 92.21%^[17],是土壤侵蚀的主要类型,而降雨是水力侵蚀的主要驱动力。近年来,诸多学者对重庆市侵蚀性降雨进行了相关研究。史东梅等^[18]利用 1952—2001 逐日降雨资料对重庆市涪陵区的降雨特征进行统计分析,发现夏季是该区域水土流失的高发敏感时期;汪言在等^[19]根据经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)等研究方法发现了重庆市降雨侵蚀力呈东高西低的空间格局;龙训建等^[20-21]基于聚类分析得出重庆市侵蚀性降雨主要集中在 5—9 月,同一类型降雨具有明显的地域聚集特征;邹玉霞等^[22]基于近 60 年逐日降雨资料对重庆市不同量级降雨侵蚀力的时空变化进行研究。

上述研究均从整体角度研究重庆市降雨侵蚀力的变化特征,但仅从整体上并不能很好地体现出重庆市降雨侵蚀力的区域性特征。鉴此,本研究基于旋转经验正交函数(Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF)^[23]法首先对重庆市降雨侵蚀力进行地理分区,并对各区域不同量级降雨侵蚀力的时空变化特征进行更深入地分析,以期从区域性角度为重庆市水土流失防治和水土保持规划提供理论依据。

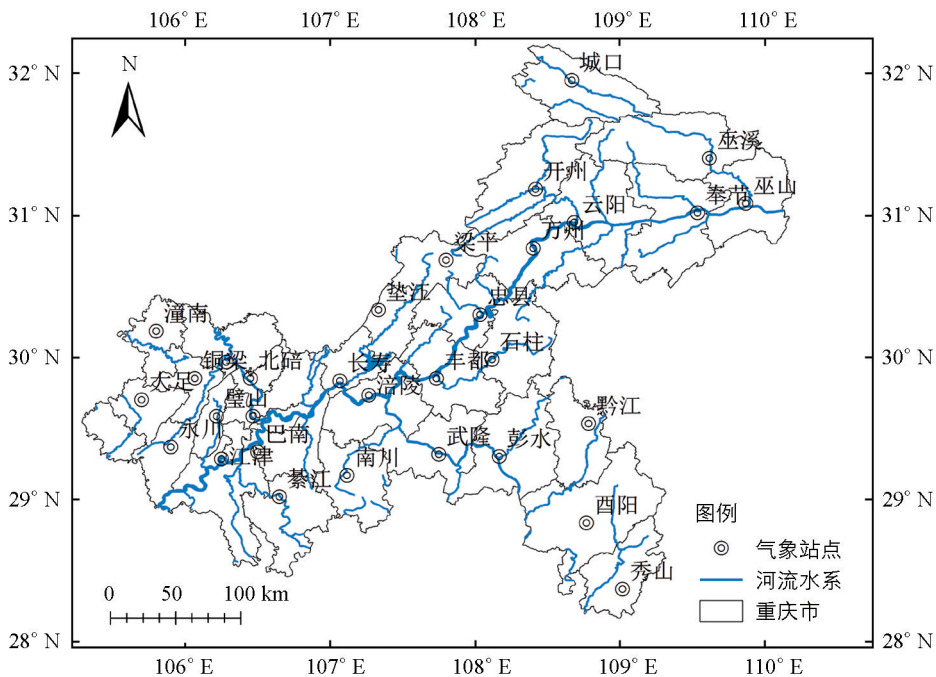
1 资料与方法

1.1 研究区概况

重庆市地处中国西南部,全市面积 8.24 万 km²。地形以丘陵山地为主,属亚热带季风湿润气候,多年平均降雨量为 1 100 mm,降雨充沛但年内分配不均。土层浅薄,土壤抗蚀性差,水土流失频发,极易遭受雨水冲刷并引起较严重的土壤侵蚀。

1.2 数据来源

本研究数据来源于国家气象科学数据中心“<https://data.cma.cn/>”中的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(包括日降雨、气压、温度、风速等数据),选取了重庆市周边的 40 个站点。通过初步筛选与处理,选取重庆市内 31 个站点 1981—2020 年共 40 a 的逐日降雨、经纬度以及海拔数据等,气象站点分布如图 1 所示。



审图号:GS(2024)0650号,下同。

图1 气象站点分布图

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算

本研究采用章文波等^[7]建立的基于日降雨数据,以半月为步长估算降雨侵蚀力的简易模型,公式如下:

$$R_m = \alpha \sum_{i=1}^k P_i^\beta \quad (1)$$

$$\beta = 0.8683 + \frac{18.144}{\bar{P}_d} + \frac{24.455}{\bar{P}_y} \quad (2)$$

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

$$\bar{P}_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{di} \quad (4)$$

$$R = \sum_{m=1}^{24} R_m \quad (5)$$

式中: R_m 为半月降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; P_i 为第 m 个半月第 i 天 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日雨量; k 是第 m 个半月日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的降雨日数; α 、 β 为计算参数; \bar{P}_d 为研究期内日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日平均雨量 (mm); P_{di} 为时间窗口内第 i 日 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日雨量; n 为研究期内降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的降雨日数; \bar{P}_y 为日降雨 $\geq 12 \text{ mm}$ 的年平均雨量 (mm), 年降雨侵蚀力 R 为年内所有半月降雨侵蚀力之和。本研究将日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的降雨视为侵蚀性降雨, 因此本研究忽略 $< 12 \text{ mm}$ 的日降雨, 将日雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的侵蚀性降雨划分为 5 个等级(表 1)^[22], 依据各等级雨量计算相应量级的降雨侵蚀力 R 值, 各量级 R 值加和为相应时段总的 R 值, 由于特大暴雨侵蚀力对于降雨侵蚀力总量贡献特别小(各区县在研究期 40 年内仅出现了约 2~3 次特大暴雨事件), 故不作具体分析。

表 1 降雨量及侵蚀力等级

雨量级别	分级标准/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	侵蚀力等级
中雨	[12, 25)	中雨侵蚀力
大雨	[25, 50)	大雨侵蚀力
暴雨	[50, 100)	暴雨侵蚀力
大暴雨	[100, 200)	大暴雨侵蚀力
特大暴雨	≥ 200	特大暴雨侵蚀力

1.3.2 时空变化分析方法

1) R/S 重标极差分析法

基于 R/S 重标极差分析法的 Hurst 指数^[24-26]是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法, 其基本原理是: 给定一个长度为 N 的时间序列 x_i , 以长度 n 将这个序列均分为 Y 个相邻的子区间, 即 $Y \times n = N$ 。任一子区间表示为 I_a , $a = 1, 2, \dots, Y$ 。在 I_a 中的元素表示为 $N(k, m)$, $k = 1, 2, \dots, n$, $m = 1, 2, \dots, Y$ 。定义 I_a 的均值为:

$$E_a = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N_{k,a} \quad (6)$$

I_a 对于均值的累积截距定义为:

$$X_{k,a} = \sum_{i=1}^k (N_{i,a} - E_a) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

极差定义为:

$$R_{I_a} = \max(X_{k,a}) - \min(X_{k,a}) \quad (8)$$

子区间 I_a 的标准差为:

$$S_{I_a} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (N_{k,a} - E_a)^2}{n}} \quad (9)$$

每一个 R_{I_a} 均由对应的 S_{I_a} 进行标准化。则 R/S 定义为:

$$(R/S)_n = \frac{1}{Y} \sum_{a=1}^Y \frac{R_{I_a}}{S_{I_a}} \quad (10)$$

n 从 3 开始, 并重复 1—5 步, 直到 $n=N$, 得到序列 $(R/S)_n, n=3, \dots, N$ 。

以 $\log(n)$ 为解释变量, $\log(R/S)$ 为被解释变量进行线性回归:

$$\log(R/S) = \log c + H \log n \quad (11)$$

方程中的斜率是 Hurst 指数 H 的估计值, Hurst 指数具体含义如表 2 所示^[27]。

表 2 Hurst 指数含义

Hurst 指数范围	意义
$0.65 < H \leq 1$	强持续序列, 未来与过去变化趋势一致
$0.5 < H \leq 0.65$	弱持续序列, 未来与过去变化趋势一致
$H = 0.5$	随机序列
$0.35 < H < 0.5$	强反持续序列, 未来与过去变化趋势相反
$0 < H \leq 0.35$	弱反持续序列, 未来与过去变化趋势相反

2) REOF 旋转经验正交分解法

旋转经验正交分解法是在 EOF 分解方法^[28]的基础上将特征向量 \mathbf{X} 进行最大方差旋转, 当满足精度要求时停止旋转, 即:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{T} \quad (12)$$

式中: \mathbf{Y} 为旋转后的标准化矩阵; \mathbf{B} 为旋转后的特征向量; \mathbf{T} 为旋转后的时间系数。旋转后的特征向量可以更加清晰地体现空间分布结构^[29]。

3) 气候倾向率

某气象要素 y 随时间 t 的变化序列, 将气象要素 y 与时间 t 建立一元线性方程:

$$y = at + b \quad (13)$$

式中: 斜率 a 的 10 倍即为气候倾向率, 其符号表示要素随时间变化趋势 ($a > 0$ 表示随时间呈上升趋势, 反之呈下降趋势), 绝对值大小表示变化的幅度。

4) Mann-Kendall 非参数趋势检验法

在 MATLAB 软件中利用 Mann-Kendall 非参数趋势检验法 (M-K 检测法) 非参数趋势检验法对不同量级降雨侵蚀力进行趋势分析。对某一独立的时间序列 $X_k (k=1, 2, 3, \dots, n)$ 定义统计量 Z 。

$$Z = \begin{cases} S - \frac{1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ S + \frac{1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (15)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (16)$$

当 $n \geq 10$ 时, S 近似服从正态分布, 此时均值 $E(S) = 0$, 方差表示如下:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (17)$$

式中: Z 为正(负)时, 代表序列呈上升(下降)趋势; 若 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 则说明时间序列通过显著性水平为 α 的检验。0.05 显著性检验和 0.01 显著性检验的临界值分别为 1.96 和 2.57。

5) 滑动平均法

滑动平均法是通过选取不同的时间间隔, 从时间数列的第一项数值开始, 按不同周期求序时平均数, 得出一个由滑动均值构成的新的时间序列, 可以更好地概括数据的趋势和周期性, 突出数据的长期变化趋势, 本研究做 5 年滑动平均。

1.3.3 数据处理与统计分析

本研究利用 Excel 2021、Python 等软件对数据进行初步处理, 结合 MATLAB 对数据进行 REOF、R/S、5 年滑动平均等分析, 利用 ArcGIS 10.7 等软件进行可视化, 所有趋势分析均在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下进行。

2 结果与分析

2.1 不同量级降雨侵蚀力分析

不同量级降雨侵蚀力结果如表 3 所示, 重庆市多年平均降雨侵蚀力为 $5\,784.04 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。年最大值为 $7\,899.72 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 年最小值为 $4\,248.74 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 两者差距较大。各量级侵蚀力从大到小依次为: 大雨、暴雨、中雨、大暴雨, 说明大雨和暴雨是引起土壤侵蚀的主要原因, 其次是中雨和大暴雨。

各量级侵蚀力 C_v 值从小到大依次为: 中雨、大雨、暴雨、大暴雨, 即中雨、大雨以及暴雨均为中等变异, 而大暴雨为高变异, 这说明大暴雨侵蚀力年数值与多年均值相差最大。中雨、大雨以及大暴雨侵蚀力气候倾向率分别为 21.40、14.22、26.35 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10\text{a})$, 表现为上升趋势, 而暴雨侵蚀力则呈下降趋势; 根据 Hurst 指数可以看出, 大雨和暴雨侵蚀力分别表现为弱持续上升与弱持续下降趋势 ($H > 0.5$), 中雨和大暴雨表现为强持续上升趋势 ($H > 0.65$)。

表 3 不同量级降雨侵蚀力年际变化

降雨侵蚀力 分级	年均值/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot$ $\text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	最小值/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot$ $\text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	最大值/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot$ $\text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	C_v	气候倾向率/ [$\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot$ $\text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]	Hurst 指数
中雨	1 352.36	1 105.27	1 625.85	0.09	21.40	0.68**
大雨	2 022.85	1 519.82	2 602.55	0.15	14.22	0.60*
暴雨	1 813.05	1 210.17	2 569.06	0.19	-26.65	0.58*
大暴雨	543.07	0	1 360.71	0.60	26.35	0.68**
$R_{\text{总}}$	5 784.04	4 248.74	7 899.72	0.15	26.35	0.65**

注: ** 为强持续性, * 为弱持续性; $R_{\text{总}}$ 为同一时间段内全部降雨造成的降雨侵蚀力; 表中 0 值表示在研究期内, 一年或多年未发生大暴雨。

2.2 基于降雨侵蚀力的地理分区

通过 REOF 分解法对重庆市降雨侵蚀力进行空间分区, 得到 6 个空间模态, 其方差贡献率分别为

16%、13%、13%、9%、9%、7%(表 4)。利用 ArcGIS 10.7 对 6 种模态进行空间可视化(图 2), 通过反距离权重法可视化并调整阈值区间, 其中颜色最深的部分表示其方差主要贡献地点。

表 4 空间模态参数

模态	方差	累计方差	模态	方差	累计方差
	贡献率/%	贡献率/%		贡献率/%	贡献率/%
1	16	16	4	9	51
2	13	29	5	9	60
3	13	42	6	7	67

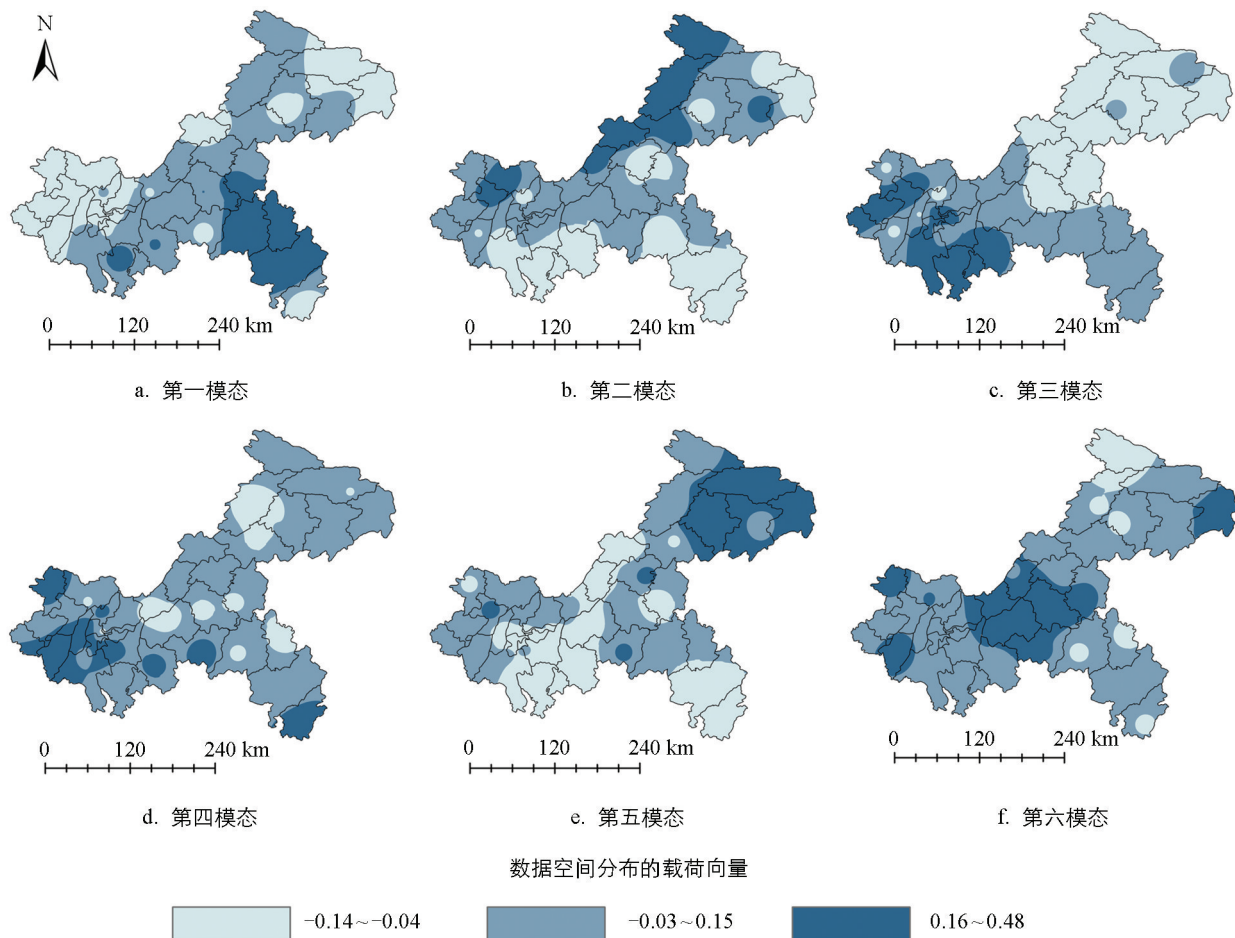


图 2 空间模态分布

由图 2 可知, 各模态空间分布差异大, 且累计方差贡献率达到了 67%, 基本可以代表重庆市降雨侵蚀力的空间特征(如再增加, 则会出现模态重叠), 且各模态方差贡献率收缩幅度逐渐变慢, 有必要进行分区研究。根据图 2 各模态降雨侵蚀力高荷载区域, 绘制重庆市降雨侵蚀力分区(图 3)。

从图 2 可以看出, 第一模态高值区主要集中在渝东南(酉阳、彭水), 该地区的东南湿润空气及乌江、郁江水汽受武陵山抬升影响, 降雨丰沛, 中雨量占主导^[30], 该区对重庆市年降雨侵蚀力贡献程度达到了 16%, 是重庆市水力侵蚀的主要区域之一。

第二模态高值区主要集中在川东平行岭谷东北段(城口、开州、梁平等地区), 该地区主要受平行山脉迎风坡以及西太平洋副热带高压的影响, 易产生侵蚀性强降雨^[30], 对重庆市年降雨侵蚀力贡献程度达到了 13%。

第三模态高值区主要集中在嘉陵江、长江、綦江三江交汇地区, 该地区深处川东平行岭谷西南末段峡

谷腹地,地区内河流水汽丰富,加上盆地海拔较低,多为低强度降雨^[31],对重庆市年降雨侵蚀力贡献程度达到了 13%。

第四模态高值区主要集中在璧山、永川等地,该地区受小安溪等河流水汽影响,降水较丰沛,与第三模态类似,多为低强度降雨,对重庆市年降雨侵蚀力贡献程度达到了 9%。

第五模态高值区主要集中在渝东北(巫溪、巫山、奉节等地),与第二模态类似,受西太平洋副热带高压的影响,多为侵蚀性强降雨,对重庆市年降雨侵蚀力贡献程度达到了 9%。

第六模态高值区主要集中在长江、乌江交汇处,东南侧为武陵山,西侧以及北侧为川东平行岭谷,内部水汽丰富,降雨丰沛,对重庆市年降雨侵蚀力贡献程度达到了 7%。

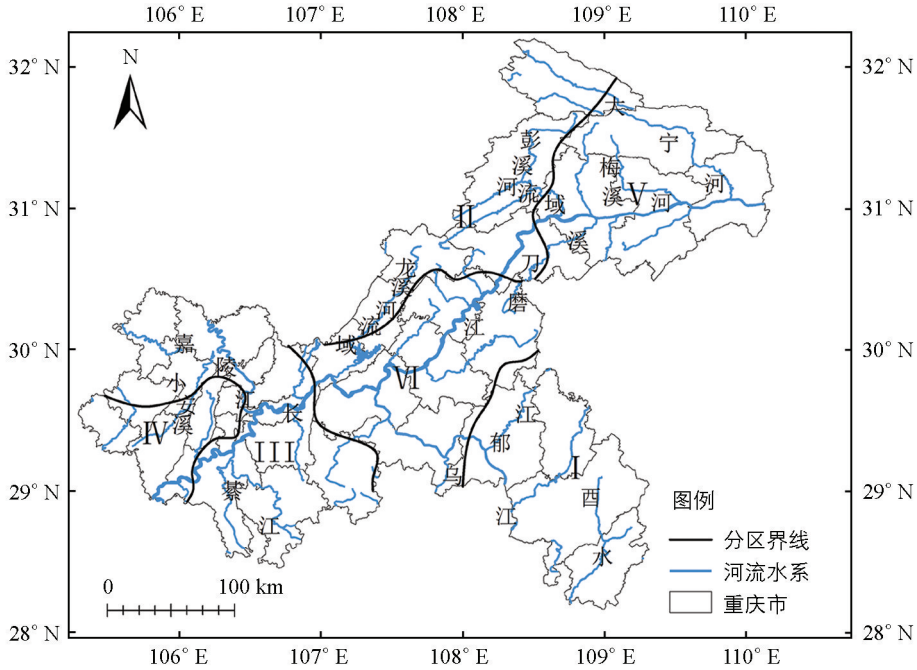


图 3 降雨侵蚀力地理分区

结合图 3 中的相关河流水系分布以及便于分区管理,将重庆市降雨侵蚀力分为 6 个区域,分别为乌江西水区(I 区)、彭溪河及龙溪河区(II 区)、嘉陵江及綦江区(III 区)、濑溪河及小安溪(IV 区)、梅溪河及大宁河区(V 区)、丰都涪陵地区(VI 区)。相应地理分区内气象站点如表 5 所示。

表 5 重庆市各气象站点地理分区

区号	分区名称	气象站点	数量/个
I	乌江西水区	彭水、黔江、酉阳、秀山	4
II	彭溪河及龙溪河区	城口、开州、万州、梁平、垫江	5
III	嘉陵江及綦江区	綦江、南川、沙坪坝、巴南、江津、北碚、合川、铜梁、大足、潼南	10
VI	濑溪河及小安溪	璧山、永川	2
V	梅溪河及大宁河区	巫溪、云阳、巫山、奉节	4
VI	丰都涪陵地区	忠县、石柱、丰都、长寿、涪陵、武隆	6

2.3 不同量级降雨侵蚀力年内变化

各分区不同量级降雨侵蚀力的年内变化如表 6 所示。各分区中雨侵蚀力均集中在 4—10 月; I 和 II 区大雨侵蚀力主要集中在 4—10 月, III 和 VI 区大雨侵蚀力主要集中在 5—9 月; 各区暴雨侵蚀力主要集中在 5—9 月; 各区大暴雨侵蚀力主要集中在 6 月或 7 月。降雨侵蚀力时间分布与重庆市汛期(5—9 月)一致,其中大暴雨侵蚀力集中在重庆市主汛期(6—8 月)。说明降雨侵蚀力高峰时期,也是重庆市防洪的

重要时间段, 在防洪工作进行的同时也要加强区域性的水土流失防治。

表 6 各分区不同量级降雨侵蚀力年内变化

分区	降雨侵蚀力分级	月均侵蚀力/(MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)											
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
I	中雨	16.32	30.12	73.10	165.16	217.78	194.79	170.01	163.20	133.75	150.86	82.73	16.48
	大雨	4.99	13.97	38.13	208.90	342.73	445.85	367.64	276.60	216.60	162.79	52.18	0.90
	暴雨	0	0	4.03	39.00	280.36	306.42	344.61	308.18	180.76	71.96	15.12	0
	大暴雨	0	0	6.66	0	32.67	104.80	177.95	73.39	74.69	20.38	0	0
II	中雨	8.83	16.33	60.25	138.14	164.89	167.64	150.30	128.89	124.49	150.97	67.28	14.11
	大雨	0	3.00	33.76	123.02	296.26	303.02	334.85	276.75	236.56	154.61	54.77	0
	暴雨	0	0	4.44	65.77	242.84	374.91	407.67	300.92	341.36	92.71	9.07	0
	大暴雨	0	0	4.92	5.71	45.60	94.48	222.08	119.32	67.00	32.19	0	0
III	中雨	5.94	11.67	45.60	142.14	182.79	185.95	157.55	139.43	158.59	119.44	55.37	9.55
	大雨	0	0	24.31	115.02	248.69	343.12	322.97	282.09	186.01	88.63	23.69	0
	暴雨	0	0	9.47	53.11	197.58	356.76	442.34	291.12	172.84	43.39	6.16	0
	大暴雨	0	0	0	8.70	19.77	148.60	155.71	90.83	38.29	0	0	0
IV	中雨	0.67	6.76	22.41	63.22	141.92	160.65	147.54	139.60	118.15	126.64	62.80	18.12
	大雨	0	0	7.62	56.31	136.21	231.05	298.54	261.28	228.87	112.84	51.32	12.49
	暴雨	0	0	10.69	43.53	180.23	361.35	458.56	258.99	149.15	10.76	7.49	0
	大暴雨	0	0	0	0	66.67	192.04	132.64	106.46	15.89	0	0	0
V	中雨	12.03	25.24	64.48	121.93	167.84	167.41	153.35	120.66	104.72	130.41	67.07	12.82
	大雨	2.62	9.01	24.52	125.05	289.10	333.82	326.00	260.07	246.37	178.85	39.55	0
	暴雨	0	0	4.03	71.15	176.02	296.06	455.15	279.35	273.66	69.38	4.95	0
	大暴雨	0	0	0	0	12.16	134.24	171.04	41.81	93.46	5.30	0	0
VI	中雨	7.37	12.55	59.12	156.53	220.88	195.37	160.93	137.65	134.95	148.50	85.23	13.60
	大雨	2.58	4.28	31.59	209.09	333.87	404.59	280.18	292.80	214.83	142.34	51.35	0
	暴雨	0	0	13.86	47.49	263.03	371.33	361.94	228.40	153.92	48.16	7.80	0
	大暴雨	0	0	5.32	0	51.52	106.56	141.50	72.54	64.56	8.27	0	0

各分区不同量级降雨侵蚀力年内占比如表 7 所示。I、II、III、V 及 VI 区内降雨侵蚀力均以大雨侵蚀力为主, 占比分别为 38%、33%、33%、36%及 37%; 只有 IV 区以暴雨侵蚀力为主(33%), 其次是大雨, 两者没有较大的区别, 这说明大雨侵蚀力是造成重庆市水土流失的重要原因。

表 7 各区不同量级侵蚀性降雨侵蚀力占比

分区	降雨侵蚀力占比/%			
	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
I	25	38	27	9
II	21	33	33	11
III	24	33	31	9
IV	22	31	33	11
V	23	36	32	8
VI	25	37	28	9

2.4 各分区不同量级降雨侵蚀力年际变化

对各分区不同量级降雨侵蚀力进行 M-K 检验、5 年滑动平均分析,并计算气候倾向率和 Hurst 指数 (R/S 分析),其中 Hurst 指数反映数据的变化趋势是否具有持续性,结果如图 4 和表 8 所示。

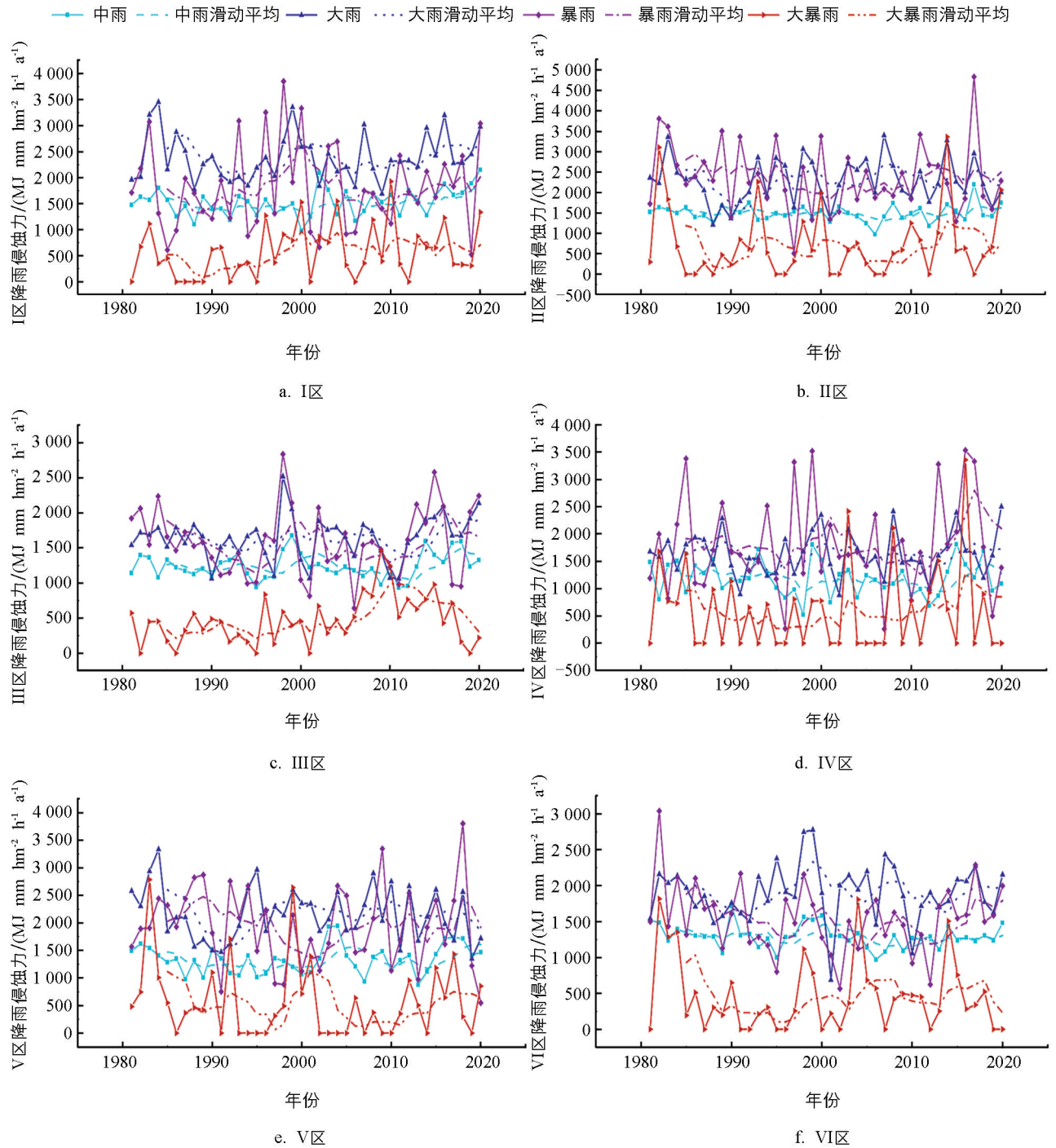


图 4 各分区不同量级降雨侵蚀力年际变化

从图 4 中可以看出,各分区不同量级降雨侵蚀力年际变化波动较大。5 年滑动平均曲线波峰波谷明显,且降雨侵蚀力年际变化存在一定的周期性。由表 8 可知,气候倾向率以及 Z 值结果表明,不同量级降雨侵蚀力在不同区存在上升或下降趋势,其中中雨侵蚀力在 I—III 和 V 区呈上升趋势,在 IV、VI 区呈下降趋势;大雨侵蚀力在 I—IV 和 VI 区呈上升趋势,只在 V 区呈下降趋势;暴雨侵蚀力在 I、III 和 IV 区呈上升趋势,

在 II、V 和 VI 区呈下降趋势; 大暴雨侵蚀力在 I—IV 区呈上升趋势, 在 V、VI 区呈下降趋势。

表 8 各分区各级降雨侵蚀力年际变化参数

降雨侵蚀力分级	分区	气候倾向率/	年均侵蚀力/	C_v	Hurst 指数	Z 值
		$[MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot (10 a)^{-1}]$	$(MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1})$			
中雨	I 区	72.16	1 525.65	0.17	0.75**	1.95
	II 区	4.17	1 496.44	0.13	0.58*	0.41
	III 区	23.31	1 248.14	0.14	0.61*	0.87
	IV 区	-18.95	1 188.17	0.26	0.62*	-0.66
	V 区	33.74	1 337.72	0.19	0.69**	1.06
	VI 区	-29.22	1 294.75	0.12	0.61*	-1.64
大雨	I 区	32.39	2 383.90	0.19	0.59*	1.04
	II 区	21.60	2 283.66	0.24	0.66**	0.03
	III 区	42.37	1 648.79	0.19	0.49*	1.25
	IV 区	22.47	1 641.26	0.24	0.53*	0.38
	V 区	-58.78	2 156.55	0.22	0.77**	-0.57
	VI 区	14.70	1 897.59	0.21	0.54*	0.52
暴雨	I 区	36.47	538.84	36.47	0.45*	0.56
	II 区	-99.44	442.16	-99.44	0.35**	-0.70
	III 区	8.81	533.69	8.81	0.31**	0.58
	IV 区	50.24	460.88	50.24	0.48*	0.47
	V 区	-56.29	458.24	-56.29	0.37*	-0.63
	VI 区	-54.60	353.46	-54.60	0.30**	-0.73
大暴雨	I 区	121.38	570.32	0.88	0.75**	1.49
	II 区	24.60	721.14	1.15	0.55*	0.70
	III 区	95.90	467.15	0.71	0.82**	1.92
	IV 区	26.68	581.46	1.35	0.59*	0.34
	V 区	-83.80	560.44	1.21	0.56*	-0.51
	VI 区	-49.66	453.09	1.12	0.67**	-0.01

注: * 表示弱(反)持续, ** 表示强(反)持续; 气候倾向率、Z 值大于 0 表示呈上升趋势, 反之则呈下降趋势。

由表 8 可知, 各分区不同量级降雨侵蚀力年际变化从小到大依次为: 中雨、大雨、暴雨、大暴雨。中雨和大雨侵蚀力 C_v 系数偏小, 变异性较弱, 说明在研究期内其降雨侵蚀力离散程度较小; 而暴雨和大暴雨 C_v 系数偏大, 变异性较强。对于同一量级降雨侵蚀力来说, 其整体变化趋势均不显著 ($|Z| < 1.96$)。

Hurst 指数结果表明, 中雨侵蚀力在 I 区和 V 区、大雨侵蚀力在 II 区和 V 区、大暴雨侵蚀力在 I 区和 III 区均强持续上升; 暴雨侵蚀力在各区均存在反持续性 ($H < 0.5$), 即在未来几年, 暴雨侵蚀力在 I、

Ⅲ和Ⅳ区可能出现下降趋势,而在Ⅱ、Ⅴ和Ⅵ区则可能出现上升趋势;暴雨和大暴雨侵蚀力在Ⅵ区将强持续下降。

2.5 各分区不同量级降雨侵蚀力空间变化

通过 ArcGIS 10.7 对各分区不同量级降雨侵蚀力空间变化进行分析,结果如图 5 所示。

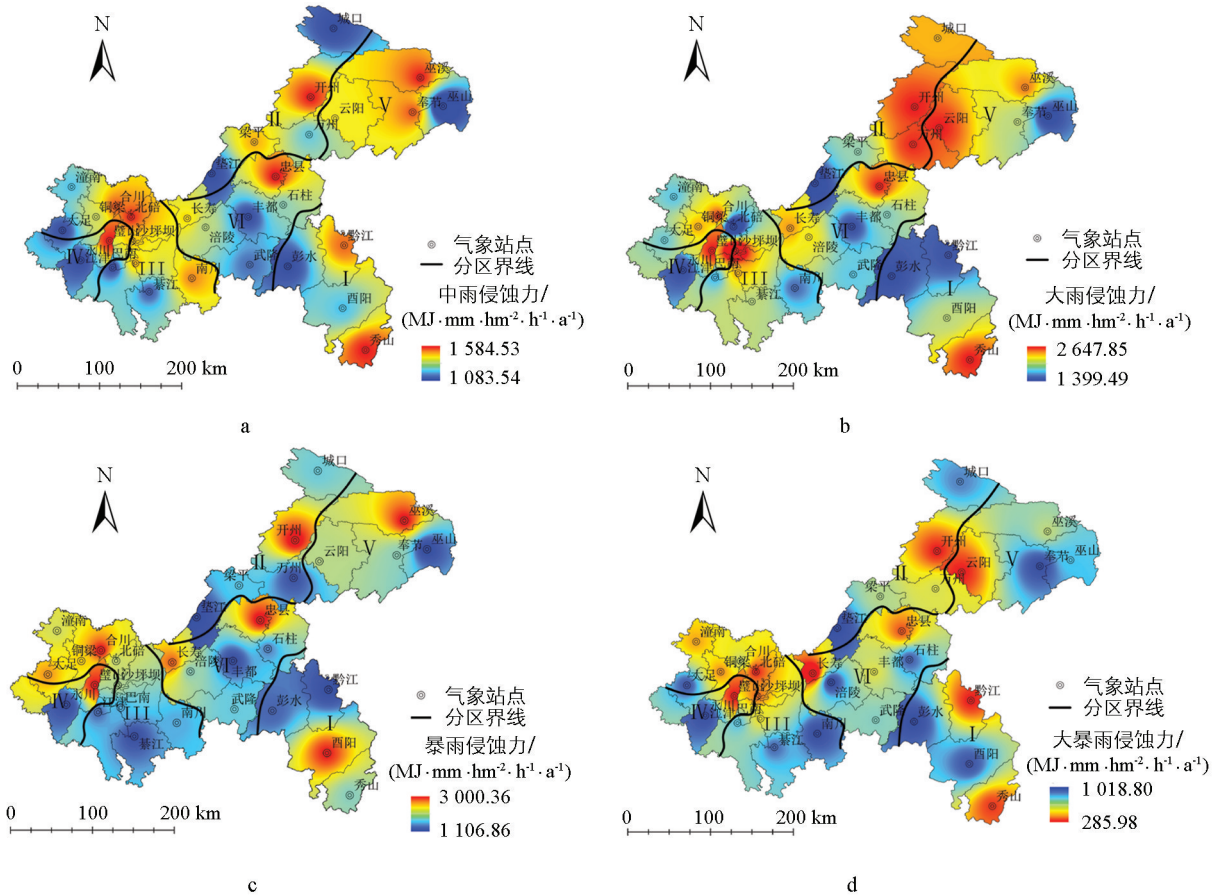


图 5 各分区不同量级降雨侵蚀力空间变化

由图 5 可以看出,同区内不同量级降雨侵蚀力空间分布差异有统计学意义($p < 0.05$),各区不同量级降雨侵蚀力的高、低峰分布明显。中雨侵蚀力在Ⅰ区形成秀山、黔江两个高峰中心且自东向西变小;Ⅱ区以开州为高峰中心,向东北及西南方向减少;Ⅲ区以北碚为高峰中心,且出现多个次高峰中心,以铜梁—江津一线形成北碚一侧偏高、大足一侧偏低的现象;Ⅳ区由璧山向永川减少;Ⅴ区以巫溪为高峰中心,巫溪—奉节一线西高东低,且巫山为低峰中心;Ⅵ区以忠县为高峰中心,由忠县、长寿向丰都方向降低。

大雨侵蚀力在Ⅰ区内以秀山为高峰中心,并呈辐射状向西北侧逐渐降低;Ⅱ区以开州、万州最高,垫江最低,北侧普遍高于南侧;Ⅲ区以沙坪坝为高峰中心,北碚为低峰中心;Ⅳ区璧山高于永川;Ⅴ区以云阳为高峰中心,巫山为低峰中心;Ⅵ区以忠县为高峰中心,丰都为低峰中心。

暴雨侵蚀力在Ⅰ区以西阳为高峰中心,向四周辐射降低;Ⅱ区以开州为高峰中心,万州、垫江偏低;Ⅲ区呈现西北侧普遍高于东南侧的现象;Ⅳ区内永川高于璧山;Ⅴ区以巫溪为高峰中心,巫山为低峰中心;Ⅵ区以忠县为高峰中心,丰都为低峰中心。

大暴雨侵蚀力在Ⅰ区以彭水、西阳为峰值中心,向四周降低;Ⅱ区以开州为高峰中心,向两侧降低;Ⅲ区呈现北侧高于南侧的现象;Ⅳ区内璧山高于永川;Ⅴ区在云阳出现高峰中心,奉节为低峰中心;Ⅵ区在长寿出现高峰中心,涪陵和石柱出现低峰中心。

结合表8,中雨、大雨和暴雨侵蚀力均在I区出现最大值,分别为1 525.65、2 389.90、538.84 MJ·mm/(hm²·h·a);大暴雨侵蚀力在II区出现最大值,为721.14 MJ·mm/(hm²·h·a)。

同一量级降雨侵蚀力年均值在不同分区的大小排序为:中雨和暴雨侵蚀力 I > II > V > VI > III > IV;暴雨侵蚀力 I > III > IV > V > II > VI;大暴雨侵蚀力 II > IV > I > V > III > VI。表明中雨和暴雨侵蚀力在渝东南及渝东北(I、II和V区)占主导优势;暴雨侵蚀力在渝西以及重庆中部占主导地位;大暴雨侵蚀力在渝东南、渝东北(开州、梁平地区)以及璧山等地占主导地位。

3 讨论与结论

3.1 讨论

重庆市各分区不同量级降雨侵蚀力均集中在5—9月,这与重庆汛期一致,其中大暴雨侵蚀力集中在6—8月,即该时间段是水土流失防治的关键时期;各量级年均降雨侵蚀力总量从大到小依次为:大雨、暴雨、中雨、大暴雨,且其年内占比差异有统计学意义^[21]($p < 0.05$)。说明大雨和暴雨是引起土壤侵蚀的重要原因,应重点防治。

重庆各区不同量级年均降雨侵蚀力的年际变化幅度从小到大依次为:大雨、中雨、暴雨、大暴雨,但同量级降雨侵蚀力的年际变化趋势不显著($|Z| < 1.96$, $p < 0.05$),这与刘淑婧^[30]对重庆市降雨侵蚀力变化特征研究结果一致。不同量级降雨侵蚀力年际变化在不同区呈现上升或下降趋势。对于渝东北(II、V区)以及渝东南(I区),中雨降雨侵蚀力和大雨降雨侵蚀力均存在持续上升趋势,这与魏兴萍等^[32]对重庆市降雨侵蚀力研究结果一致。存在上升趋势表示侵蚀性降雨造成的水土流失情况可能会愈发严重,需加强该区的水土保持工作,尤其需要重点关注和预防降雨侵蚀力持续上升的地区。

全球气候变暖导致的侵蚀性降雨逐渐增多,且不同区域具有较大差异。相较于传统的降雨侵蚀力整体区域上的时空特征研究^[9, 18, 20, 33, 34],对降雨侵蚀力场进行分区研究,使得各区的土壤侵蚀研究更加精准化,可结合本区的实际情况采取相应的防治措施,具有更大的区域性指导意义。针对重庆区域,各区侵蚀性降雨逐渐增多^[35],且各量级降雨侵蚀力多数存在持续上升趋势($H > 0.5$),各区降雨侵蚀力空间差异有统计学意义($p < 0.05$)。各分区年均降雨侵蚀力表现为II区(开州、梁平等地)最大,III区(北碚、沙坪坝等地)最小,这与龙训建等^[20]对重庆市降雨侵蚀力时空分布研究结果一致。针对各量级,中雨和暴雨侵蚀力在渝东南及渝东北(I、II、V区),暴雨侵蚀力在渝西以及重庆中部,大暴雨侵蚀力在渝东南、渝东北(开州、梁平)及璧山等地占主导优势,每个地区重点防治的雨型不同,这与魏兴萍等^[32]对重庆市降雨侵蚀力研究结果类似。结合各量级降雨侵蚀力高峰中心分布,针对不同区域的实际情况,加强水土流失动态监测力度,并制定相应的水土保持措施。

3.2 结论

1) 利用REOF法对重庆降雨侵蚀力进行地理分区,分别为乌江西水区(I区)、彭溪河及龙溪河区(II区)、嘉陵江及綦江区(III区)、濑溪河及小安溪区(IV区)、梅溪河及大宁河区(V区)、丰都涪陵地区(VI区)。

2) 重庆市年均降雨侵蚀力为5 784.04 MJ·mm/(hm²·h·a),不同量级年均降雨侵蚀力从大到小依次为:大雨、暴雨、中雨、大暴雨,即大雨和暴雨是引起土壤侵蚀的主要雨型。

3) I、II、III、V和VI区均以大雨侵蚀力为主,占比分别为38%、33%、33%、36%和37%;IV区以暴雨侵蚀力为主(33%)。且各区中雨、大雨及暴雨侵蚀力主要集中在5—9月,大暴雨侵蚀力集中在6月或7月。各区的防汛时段也是侵蚀性降雨引起土壤侵蚀的重要时段,在防汛时段也应加强水

土流失的防治工作。

4) 各区不同量级降雨侵蚀力年际变化从小到大依次为:中雨、大雨、暴雨、大暴雨,对于同一量级降雨侵蚀力来说,其整体变化趋势均不显著($|Z| < 1.96$)。Hurst 指数表明,中雨侵蚀力在 I 区和 V 区、大雨侵蚀力在 II 区和 V 区、大暴雨侵蚀力在 I 区和 III 区将强持续上升,而暴雨侵蚀力在各分区均存在反持续性。应重点防范降雨侵蚀力表现为持续上升趋势地区的水土流失。

5) 各区不同量级降雨侵蚀力的空间分布表现为:中雨和大雨侵蚀力在渝东南以及渝东北,暴雨侵蚀力在渝西及重庆中部,大暴雨侵蚀力在渝东南、渝东北(开州、梁平)及璧山等地占主导优势。酉阳和秀山(I 区)、开州(II 区)、北碚和铜梁(III)、璧山和永川(IV 区)、巫溪和云阳(V 区)及忠县(VI 区)是不同量级降雨侵蚀力的高峰分布中心,应重点监测该区域不同雨型引起的水力侵蚀,合理制定相应的水土保持措施。

参考文献:

- [1] 高歌,殷水清,陈涛,等. 长江流域降雨侵蚀力时空变化及成因分析 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 84-92.
- [2] 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.
- [3] 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 [J]. 地理研究, 2007, 26(3): 541-547.
- [4] YU B, ROSEWELL C J. An Assessment of a Daily Rainfall Erosivity Model for New South Wales [J]. Soil Research, 1996, 34(1): 139.
- [5] 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): 287-306.
- [6] LEE J M, LEE S, HONG J, et al. Evaluation of Rainfall Erosivity Factor Estimation Using Machine and Deep Learning Models [J]. Water, 2021, 13(3): 382.
- [7] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究 [J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [8] 罗梦琦,蒋丹丹,齐斐,等. 江苏省降雨及降雨侵蚀力时空变化趋势研究 [J]. 治淮, 2023(2): 28-31.
- [9] 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.
- [10] 周小英,谢世友,任伟. 1955-2014 年三峡库区降水特征分析——以重庆市万州区为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(10): 102-108.
- [11] VANTAS K, SIDIROPOULOS E, LOUKAS A. Robustness Spatiotemporal Clustering and Trend Detection of Rainfall Erosivity Density in Greece [J]. Water (Basel), 2019, 11(5): 1050.
- [12] 江源天,王文婷,谢云,等. 基于 IMERG 反演降水数据估算广东省降雨侵蚀力 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 153-164.
- [13] 梁宇靖. CLDAS-prcp 融合降水改进及其在降雨侵蚀力中的应用 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2023.
- [14] 陈君,刘时城,王成林. 基于 GBDT-OK 算法与星地数据模拟南方降雨侵蚀力研究 [J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 171-175.
- [15] ZHU D Y, CAO Z, ZHAO Y S, et al. Analysis of the Asymmetric Characteristic of Extreme Rainfall Erosivity in 8 Provinces of Southern China during 1961-2020 [J]. Water (Basel), 2023, 15(13): 2408.
- [16] 张哲,方政,董智,等. 鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 69-76.
- [17] 丁琳,黄婷婷,秦伟,等. 西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征 [J]. 泥沙研究, 2023, 48(6): 51-58, 66.
- [18] 史东梅,江东,卢喜平,等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 16-21.
- [19] 汪言在,苟诗薇. 重庆市降雨侵蚀力空间格局及其变化 [J]. 地理科学, 2013, 33(1): 116-122.

- [20] 龙训建,翁薛柔,叶琰,等. 近 10 年重庆市降雨侵蚀力时空分布特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 171-184.
- [21] 龙训建,翁薛柔,叶琰,等. 基于聚类分析的重庆市侵蚀性降雨特征研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 19-26.
- [22] 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.
- [23] 任建成,谷山青,卢晓宁. 基于 REOF 分析的山东省年降水区域特征及趋势分析 [J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 224-231.
- [24] 高雄飞,刘元会,郭建青,等. R/S 分析法在石家庄市栾城区土壤含水量动态分析中的应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 72-77.
- [25] 江田汉,邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例 [J]. 地理科学, 2004, 24(2): 177-182.
- [26] 武瑾,金文龙,陈亢利. 基于季节性 Kendall 检验和重标极差分析法的阳澄湖水质变化趋势分析 [J]. 环境污染与防治, 2020, 42(7): 894-900.
- [27] 徐浩杰,杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 398-409.
- [28] 庞金凤,门宝辉. 嫩江流域生态干旱影响因素及其时空演变格局 [J]. 生态学报, 2024, 44(13): 5646-5657.
- [29] 唐亚平,张凯,李忠娴,等. 基于 REOF 方法的辽宁气候舒适度区域特征分析 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(2): 120-124.
- [30] 刘淑婧. 重庆市不同量级降雨下的降雨侵蚀力时空演变特征 [D]. 重庆:西南大学, 2021.
- [31] 王鑫,马振锋. 川渝地区主汛期降水的年代际变化与短期气候预测模型的建立 [J]. 高原气象, 2010, 29(3): 595-604.
- [32] 魏兴萍,肖成芳,张爱国. 重庆降雨侵蚀力和侵蚀力密度对土壤侵蚀风险的评估 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 128-139.
- [33] 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.
- [34] 杨波,王全九,郝姗姗. 佳芦河流域 1988-2013 年土壤侵蚀时空变化特征 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 87-92.
- [35] 高歌,殷水清,陈涛,等. 长江流域降雨侵蚀力时空变化及成因分析 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 84-92.

责任编辑 包颖

崔玉洁