DOI: 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2022. 06. 018

近10年重庆市降雨侵蚀力时空分布特征

龙训建¹, 翁薛柔^{1,2}, 叶琰¹, 张逸轩³, 曾必顺¹, 叶勇¹, 徐廷兵⁴

西南大学 资源环境学院,重庆 400715; 2. 中山大学 地理科学与规划学院,广州 510006;
 重庆市人工影响天气办公室,重庆 401120; 4. 西南大学 后勤保障部,重庆 400715

摘要:降雨侵蚀力是土壤侵蚀研究工作的重要内容之一.基于重庆市 32 个国家级气象站点 2009-2018 年逐分钟 降雨量数据,统计降雨量和降雨侵蚀力的特征参数,采用反距离权重法和 Ward 系统聚类分析法,对重庆市降雨量 和降雨侵蚀力的年内、年际间的时空变化和分布特征进行分析.结果表明:1)重庆市降雨量和降雨侵蚀力的季节 分布差异明显,其中,夏季多年平均降雨量占据全年的 50%以上,冬季比例则不足 5%.降雨侵蚀力在夏季比例达 到 70%以上,冬季比例不足 1%.2)降雨量呈渝东北片区高、渝西片区低的空间分布特征.降雨侵蚀力高值区主要 分布在渝东北的梁平、开州一带以及渝东南的酉阳、秀山一带,低值区分布在重庆中部.3) Ward 系统聚类法结果 显示,研究区降雨和降雨侵蚀力均可划分为 3 类,分类结果存在一定差别,但类 [具有高度区域相似性.同时,降 雨分类的地域聚集特征明显,降雨侵蚀力的地域分布相对分散.

关 键 词:降雨;降雨侵蚀力;变化特征;重庆
 中图分类号:P426.615;S157.1
 文献标志码:A
 文章编号:1673-9868(2022)06-0171-14



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Rainfall Erosivity in Chongqing in Recent 10 Years

LONG Xunjian¹, WENG Xuerou^{1,2}, YE Yan¹, ZHANG Yixuan³, ZENG Bishun¹, YE Yong¹, XU Tingbing⁴

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

- 2. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China;
- 3. Chongqing Weather Modification Office, Chongqing 401120, China;
- 4. Logistics Department, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Rainfall erosivity is one of the important contents of soil erosion research. Based on the minute-

作者简介:龙训建,博士,讲师,主要从事水资源规划与管理、生态水文过程研究.

通信作者:叶琰,博士,副教授.

收稿日期: 2021-06-17

基金项目:中国科学院、青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项(LHZX-2020-10);国家自然科学基金项目(51509214).

by-minute rainfall data of 32 national meteorological stations in Chongqing from 2009 to 2018, the statistical characteristic parameters of rainfall and rainfall erosivity were determined. The spatial and temporal variation and distribution characteristics of rainfall and rainfall erosivity were analyzed by using Inverse Distance Weight method and Ward cluster analysis method. The results showed that: 1) The seasonal distribution of rainfall and rainfall erosivity in Chongqing is obviously different. The average rainfall in summer accounts for more than 50% of the annual rainfall, and in winter accounts for less than 5%. Meanwhile, the proportion of rainfall erosivity accounts for more than 70% in summer and less than 1% in winter. 2) The spatial distribution of rainfall showed a high-value area in the northeast of Chongqing and a low-value area in the west of Chongqing. The high rainfall erosivity areas are mainly distributed in Liangping and Kaizhou areas in in northeast Chongqing and Youyang and Xiushan areas in southeast Chongqing. 3) The results of Ward clustering method analysis showed that rainfall and rainfall erosivity in the study area can be divided into three categories, and with some differences in the results of classification, but the category I has a high regional similarity. At the same time, the characteristics of regional clustering of the rainfall classification is obvious, and the regional distribution of rainfall erosivity is relatively dispersed. **Key words**: rainfall; rainfall erosivity; change characteristics; Chongqing

土壤侵蚀是农业生产中的重大生态环境威胁,任其发展不利于经济社会的可持续^[1-3].受全球气候 变化和人类活动的共同影响,土壤侵蚀问题变得更加复杂,也受到更多关注,尤其是降雨引起的侵蚀问 题(降雨侵蚀力)成为热点研究内容之一^[4-6].已有研究表明,在不利的地形地质条件、森林乱伐、过度耕 作和放牧等因素影响下,土壤更易产生侵蚀与流失^[2,7-10].目前,水文循环速率加剧导致极端降雨事件 频发,这预示着降雨侵蚀力和土壤侵蚀率的增加^[11].因此,准确评估降雨侵蚀力有利于采取针对性措施 制止或减缓水力侵蚀.

降雨侵蚀力可描述不同降雨特征(雨量、历时、强度等)对土壤侵蚀的影响^[12],其计算模型有纯雨量模型和综合指标模型两类.纯雨量模型主要是以日雨量^[13-14]、月雨量^[15-16]、年雨量^[17-18]为基础数据的模型,如 Richardson等^[19]、Renard等^[20]、Lee等^[21]分别基于日雨量、月雨量、年雨量资料,建立了估算美国、韩国等国家和地区降雨侵蚀力的简易模型;国内主要以章文波等^[13]推荐的利用日雨量估算半月降雨侵蚀力,进而统计月、年降雨侵蚀力的算法应用最为广泛.综合指标模型不仅包括雨量因子,更考虑了雨强等指标的作用,如卜兆宏等^[22]发现汛期雨量、年最大 30 min 雨强(I30)指标与土壤流失量间存在较高的相关性,建立了汛期雨量和年 I30 值乘积的年降雨侵蚀力模型.

以上两类模型对数据分辨率要求较低,其结果通常属于估算结果,不适宜应用于对精确性有要求的工作领域.在具备高时间分辨率和连续的降雨数据前提下,应用Wischmeier等^[23]提出以次降雨总动能(E)与最大 30 min 雨强(I30)的乘积(EI30)作为降雨侵蚀力指标,并将之与通用土壤流失方程(USLE)相结合,降雨侵蚀力相关研究的准确性就能得到巨大提高.同时,王万忠等^[24]通过比较 EI30 与 EI10,EI60 等计算方法,认为 EI30 符合我国绝大多数地区的降雨特性,建议采用 EI30 作为中国降雨侵蚀力的计算公式.基于此,本文以重庆市 2009-2018 年 32 个国家级基本气象台站的逐分钟降雨数据为基础,应用降雨侵蚀力 EI30 计算公式,利用 MK 秩相关检验、空间插值法和系统聚类法,分析探讨研究区降雨和降雨侵蚀力在时空尺度上的趋势变化特征,以期为区域生态环境保护提供可靠的数据基础和理论依据.

1 资料与方法

1.1 研究区概况

重庆市位于中国西南,是长江上游地区的经济、金融、科创、航运和商贸物流中心.重庆总面积 8.24 万 km²,

辖 38 个区县(自治县);常住人口 3 101.79 万人,境内有长江、嘉陵江、乌江穿过,流域面积大于 50 km²的河流 374条,过境水资源丰富,降雨量相对充沛但分布不均,多年平均降雨量 1 100~1 200 mm^[25].

1.2 数据来源

本次基于国家气象数据共享 服务网,收集了重庆市 32 个国家 级气象站点 2009-2018 年的逐 分钟降雨量数据,各气象站点位 置见图 1.

1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算

1) 次降雨

包括次降雨过程的界定和侵 蚀性雨量的界定.次降雨过程的界 定参照 USLE 方程推荐的雨量历 时间隔标准,即将降雨间歇≪6 h 的降雨视为一个次降雨过程,否则 视为下一次降雨.侵蚀性雨量采用 国内通用的侵蚀性雨量分级标准 和史冬梅等^[18]对重庆市降雨侵蚀 的多年研究经验,即研究区侵蚀性 降雨标准为次降雨雨量≥12 mm.

2) 次降雨侵蚀力

次降雨侵蚀力计算公式如下[26]:



式中, I30 是单场次降雨最大 30 min 雨强, 单位 mm/h; E 为单场次降雨的动能, 是降雨-历时函数, 单位 MJ/ha.

$$E = \int_{0}^{D} \{0.29 [1 - 0.72 exp (-0.05i)]\} v dt$$
(2)

式中, D 是次降雨历时, 单位为 h; v 是次降雨量, 单位 mm; i 是雨强值, 单位 mm/h. 1.3.2 趋势变化分析

离差系数(C_a)和趋势系数(r)两项指标通常被用来描述降雨侵蚀力的年际变化特征,计算公式为:

$$C_{v} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{x})^{2}}}{\overline{x}}$$
(3)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})(i - \overline{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2 \sum_{i=1}^{n} (i - \overline{t})^2}}$$
(4)

式中, $t = \frac{n+1}{2}$; *n*为年数; *x_i*为第*i*年的降雨侵蚀力; \overline{x} 为多年降雨侵蚀力的样本平均值. 一般而言, 离差系数 *C_v*越大, 表明年降雨侵蚀力波动幅度越明显; 趋势系数 *r*>0, 降雨侵蚀力在研究时段内有线性增



图1 研究区及气象站点位置

加的趋势,反之亦然, |r|大小表示随时间的增减幅度.

1.3.3 空间插值分析

空间分布是空间对象群体在一定空间区域的散布特性,是空间分布研究的主要内容之一.考虑研究区 内各气象站点为离散分布,本次选用精确性插值法——反距离权重法(Inverse Distance Weighted, IDW)来 实现降雨侵蚀的空间分布.反距离权重法是加权移动平均方法,以插值点与样本点间的距离为权重进行加 权平均,距离插值点越近的样本点赋予的权重越大^[27-28],计算公式为:

$$v_{0} = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_{i} \frac{1}{d_{i}^{k}}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_{i}^{k}}} \qquad i = 1, 2, \cdots, n$$
(5)

式中, v_0 是未知点的估计值, v_i 是第 $i(i = 1, 2, \dots, n)$ 个样本点的值, d_i 是采样点与未知点之间的距离, k是距离的幂值,默认值为 2, 一般取值范围在 0.5~3 之间可获得最合理结果.

1.3.4 Ward 系统聚类法

Ward 系统聚类法是根据选定的特征来识别相对均一的个案(变量)组,基于方差分析思想,以各类别 之间的欧式距离最小作为分类标准,从单独聚类中的每个个案(或变量)开始对各聚类进行组合,直至剩下 一个类别.Ward 系统聚类法可以判断研究区内各站点的降雨及其侵蚀力在同一时间尺度内的相似性,以 验证空间分布特征分析的准确性.

1.3.5 重庆市四季和分区划分

四季划分一般按照气候划分标准,根据当地 30年以上的气温平均值,划出四季交换的日期.根据重庆 市气候中心统计数据,重庆为四季分明区,入春的平均时间为3月2日,平均在6月1日入夏,入秋时间为 10月2日,12月22日是平均入冬时间.据此,将重庆市的3-5月划为春季,6-9月划为夏季,10-12月 划为秋季,1-2月划为冬季.

重庆市一般行政分区涉及4个区域,主城片区、渝西片区、渝东南片区和渝东北片区;从地形地貌特征上一般分为3个区域.相比于行政区域,降雨侵蚀力与地形地貌更为直接相关,本次将研究区整体划为 渝西区域、渝东南区域和渝东北区域3部分,各分区对应行政区范围见表1所示.

序号	行政区范围						
	渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、渝北区、巴南区、涪						
1	陵区、长寿区、江津区、合川区、永川区、南川区、綦江区、大足区、璧山区、铜梁区、潼南	渝西片区					
	区、荣昌区						
2	黔江区、武隆区、石柱县、秀山县、酉阳县、彭水县	渝东南片区					
3	万州区、开州区、梁平区、城口县、丰都县、垫江县、忠县、云阳县、奉节县、巫山县、巫溪	必大业县区					
	县						

表1 重庆市分区范围划分

2 结果与分析

2.1 降雨量时空变化特征分析

2.1.1 降雨的年际变化特征

重庆市 2009-2018 年多年平均降雨量为 1 082.98 mm,各分区年平均面雨量最小值发生在渝西片区的 2011 年,仅 758.24 mm,最大发生在渝东北片区的 2017 年,为 1 476.02 mm,两者倍差为 1.95 倍;整体上,渝东北多年平均值最大,为 1 130.55 mm,渝西最小,为 1 047.02 mm,两者倍差为 1.08 倍(图 2).为判断各站点间多年平均降雨量间的差异,表 2 给出了重庆市 2009-2018 年各区域面降雨量的年际变化

特征参数值.可以看出,渝东北区域标准差、Cv值均最大,说明该区域降雨年际差异最大;研究时段内, 各区域年平均面降雨量均呈增加趋势,其中渝西地区增加幅度最为明显.



图 2 重庆市及各分区年降雨量折线

表 2 各分区平均面降雨量特征参数

序号	区域	降雨量/mm	标准差	Cv 值	趋势系数(r)
1	渝东北	1 130.55	181.40	0.16	0.33
2	渝西	1 047.02	142.40	0.14	0.64
3	渝东南	1 110.12	146.33	0.13	0.59
4	重庆	1 082.98	116.54	0.11	0.70

2.1.2 降雨的年内分布特征

重庆市及各分区降雨量季节分布及比例情况见表 3. 从季节比例角度来看,研究区内冬季降雨量占全 年降雨量的比例最小,仅为全年降雨量的 5%左右,这与冬季气温低,大气层结稳定,绝对水汽含量低,产 生降雨的概率也较低有关;其次为秋季,仅占全年降雨量的 12.39%~15.29%;夏季降雨量占全年降雨量 的比例最大,达 49.37%~55.15%,这一时期的 7-8月,夏季西太平洋副热带高压西伸北移,控制重庆大 部分地区,导致区域内盛行下沉气流,产生降雨的概率较小,但是,受地形地貌影响,大气层结不稳定,绝 对水汽含量高,易产生对流性降雨,从而表现出高的强降雨比例.同时,在此气候作用下,重庆市夏季频繁 发生暴雨、洪涝、山体滑坡,秋季多伏旱,冬季则降雨频次低、雨量少.

在区域分布上,各季节年平均降雨量存在一定的差异,其中渝东北最大,渝东南次之,渝西最小.在季节分布上,各分区分布特征与全市相似,夏季最多,冬季最少.渝西片区夏季降雨量比例在3个片区中最高,达到了55.15%,秋季降雨量比例最低,这与渝西区域夏季多暴雨,秋季伏旱突出的特征相一致.

区域	在亚均	春		夏		秋		冬	
		降雨量/	比例/	降雨量/	比例/	降雨量/	比例/	降雨量/	比例/
	降雨重/mm	mm	0⁄0	mm	%	mm	%	mm	%
渝东北	1 130.55	320.79	28.37	589.93	52.18	172.85	15.29	46.98	4.16
渝西	1 047.02	282.73	27.00	577.47	55.15	129.72	12.39	57.10	5.45
渝东南	1 110.12	359.01	32.34	548.09	49.37	148.15	13.35	54.87	4.94
重庆	1 082.98	306.55	28.31	576.77	53.26	146.07	13.49	53.59	4.95

表 3 各分区年平均降雨量季节分布及比例

2.1.3 降雨量的空间变化

应用反距离权重法得到重庆市 多年平均降雨量的空间分布.结果显 示,降雨量总体上呈现西低东高的分 布趋势.高值区主要分布在渝东南的 酉阳、渝东北的城口-开州-万州-云 阳一带,其多年平均降雨量均超过了 1200 mm;低值区主要分布在渝西 的潼南-大足-荣昌-永川一带,介于 950~970 mm之间;此外,长江沿线 的河谷区域降雨也大多低于两侧山 区.这与方德贤等^[29]、马丽珲等^[30] 对重庆市近年来降雨量空间分布特 征的研究结果一致(图 3).

从重庆市多年平均季节降雨量



审图号: GS(2019)3333 号(自然资源部监制).

图 3 年平均降雨量空间分布

的空间分布可知,不同季节降雨量的空间分布存在显著差异.在春季,高值区主要分布在渝东南酉阳县,达379.11 mm,低值区主要分布在渝西片区的潼南-大足-荣昌-永川一带,降雨量在206.99~224.70 mm.在夏季,西部降雨明显增强,整个区域呈现两边高、中间低的分布,渝东北区域降雨最多,渝西次之,区域中部较低,这与夏季西南涡活动较为频繁以及西太平洋副热带高压的西伸、北抬有关^[31-32].秋季降雨较夏季整体偏弱,呈西低东高的空间分布,高值区位于渝东北云阳区,低值区主要分布在渝西片区的潼南-大足-荣昌-永川一带.冬季降雨呈西高东低分布,高值中心在渝东南的酉阳,低值中心为渝东北的奉节.季节分布特征表明渝西地区的降雨量显著少于其他区域,这也解释了渝西地区易发生季节性干旱的特征(图 4).

为进一步研判降雨量的空间分布相似特征,应用 Ward 系统聚类法对研究区 32 个站点的月平均降雨量进行分类.由结果可知,研究区降雨量可分为 3 类,其中类 I 包括潼南、大足、荣昌、永川、铜梁、北碚、合川、渝北、璧山和江津,主要分布在渝西片区;类 II 包括万盛、沙坪坝、巴南、南川、綦江和酉阳,多聚集于重庆中部;其余区县归为类 III.研究区月降雨的分类特征具有空间相似性,与对应时间尺度降雨空间分布特征一致(图 5).

对聚类后的各类月降雨量的中心距离进行计算,得到各分类的降雨量年内变化曲线.类Ⅰ的年内变化 曲线较尖瘦,在7月达到了峰值,属于类1的区域在7月需尤为注意暴雨事件的频发;类Ⅱ的曲线较扁平, 6-8月雨量较多;类Ⅲ在6月达到降雨量峰值,8月次之.这说明重庆西部降雨集中发生在7月,重庆中部 降雨在年内的集中度较西部弱,重庆东部降雨的年内分布与中、西部有明显差异(图6).

2.2 降雨侵蚀力时空变化特征分析

2.2.1 降雨侵蚀力年际分布特征

应用公式(1)和(2)计算得到各站点次降雨侵蚀力计算结果,根据区域分区原则,采用面积加权法求 得各分区的降雨侵蚀力.由公式(3)和(4)计算得到研究区降雨侵蚀力的年际变化统计参数.结果表明, 重庆市 2009-2018 年多年平均降雨侵蚀力为 1 816.99 MJ•mm/(hm²•h),分区降雨侵蚀力最大值出 现在渝东南片区的 2016 年,达 3 266.88 MJ•mm/(hm²•h),最小值则出现在该区域的 2009 年,仅 949.75 MJ•mm/(hm²•h),两者倍差 3.44 倍.不同分区多年平均降雨侵蚀力存在一定差异,渝东北 区域年均降雨侵蚀力最大,为1857.68 MJ·mm/(hm²·h),侵蚀潜在危险性较高,渝西次之,为 1808.82 MJ·mm/(hm²·h),渝东南最小,为1763.37 MJ·mm/(hm²·h).标准差变化范围为 382.72~734.12,最大值出现在渝东南,最小值出现在渝西.渝东南地区 Cv 值是渝东北和渝西地区 的2倍,其降雨侵蚀力的年际波动显著高于其他区域.趋势系数变化范围为0.27~0.70,各分区降 雨侵蚀力均呈增加趋势(表4).



审图号: GS(2019)3333 号(自然资源部监制).

图 4 各季节降雨量空间分布

表 4 各分区降雨侵蚀力演变趋势参数

序号	分区	平均值/ (MJ・mm・hm ⁻² ・h ⁻¹)	标准差	Cv 值	趋势系数(r)
1	渝东北	1 857.68	398.62	0.21	0.70
2	渝西	1 808.82	382.72	0.21	0.35
3	渝东南	1 763.37	734.12	0.42	0.27
4	重庆	1 816.99	268.74	0.15	0.70



图 5 系统聚类结果

由重庆市 2009-2018 年各分区降雨 侵蚀力的年际变化曲线图可知,各地区降 雨侵蚀力变化幅度大且存在较大差异,重 庆市降雨侵蚀力在 2009-2016 年整体呈 上升趋势,在 2016 年达最大值后,近两年 有所下降;渝东南地区在 2016 年和 2017 年降雨侵蚀力反差强烈,这主要与渝东南 的降雨有关(图 7).



根据研究区降雨侵蚀力在不同季节的





均值及比例可以看出,统计时段内,研究区降雨侵蚀力的季节分布表现出不均匀性.其中,夏季比例均超过70%,渝西地区更是达到了79.39%;春季降雨侵蚀力比例仅次于夏季,为17.25%~24.89%;秋季较少,降雨侵蚀力比例为3.05%~4.66%;冬季降雨侵蚀力最低,比例不足0.5%.根据统计结果,秋冬季侵

蚀力普遍较低,这与该时段内降雨整体比例较低,能引起土壤侵蚀的有效降雨量较少相关.无论是全市整体还是分区比较,降雨侵蚀力的高值期均出现在夏季,应加强该时段内水土流失的监测、防治与监督,以最大程度降低水土流失量,减小水土流失发生的可能性(表 5).



图 7 重庆市及各分区年降雨侵蚀力折线

表 5 研究区降雨侵蚀力季节分布特征

	春		夏		秋		冬	
分区	降雨侵蚀力/	比例/	降雨侵蚀力/	比例/	降雨侵蚀力/	比例/	降雨侵蚀力/	比例/
	$(\mathbf{M}\mathbf{J} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{m}\mathbf{m} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{h}\mathbf{m}^{-2} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{h}^{-1})$	%	$(\mathbf{M}\mathbf{J} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{m}\mathbf{m} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{h}\mathbf{m}^{-2} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{h}^{-1})$	%	$(MJ \bullet mm \bullet hm^{-2} \bullet h^{-1})$	%	$(MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1})$	%
渝东北	370.81	19.96	1 393.58	75.02	86.66	4.66	6.63	0.36
渝西	312.09	17.25	1 436.11	79.39	55.21	3.05	5.41	0.30
渝东南	438.98	24.89	1 241.49	70.40	74.36	4.22	8.54	0.48
重庆	350.27	19.28	1 392.41	76.63	68.03	3.74	6.28	0.35

2.2.3 降雨侵蚀力空间分布特征

采用反距离权重法对研究区 多年平均降雨侵蚀力进行插值,得 到空间分布结果.可以看出,年降 雨侵蚀力呈中间低、两端高的空间 分布,高值区主要分布在渝东北的 梁平、开州一带,低值区主要位于 研究区中部(图 8).

按照季节划分,研究区各季节 降雨侵蚀力的空间分布差异也存 在统计学意义.在春季,高值区主 要分布在渝东南片区的酉阳,低值 区位于渝西的潼南-大足-荣昌-永 川一带;夏季降雨侵蚀力呈中部 低、两端高的分布特征;在秋季,



审图号: GS(2019)3333 号(自然资源部监制).

图 8 年降雨侵蚀力空间分布

渝西地区降雨侵蚀力较低,渝东北的垫江、梁平和渝东南的降雨侵蚀力较高;在冬季,仅有酉阳-秀山一个 高值中心,其余地区降雨侵蚀力均较低.其中,渝东北的高值区主要为山地丘陵区,土壤类型多属于黄壤、 石灰岩土、黄棕壤,易于发生侵蚀;渝东南高值区主要分布在海拔高差较大、易发生土壤流失的酉阳、秀山 一带;渝西片区的高值区主要分布在土地复种指数较高的区县;这些区域的降雨侵蚀潜在危险性都较高, 加之地形地貌的影响,降雨导致的水土流失、土壤侵蚀等问题都亟需注意(图 9).



审图号: GS(2019)3333 号(自然资源部监制).

图 9 各季节侵蚀力分布

为进一步探讨研究区内侵蚀力的分布类型,应用 Ward 联结法对研究区 32 个站点的月降雨侵蚀力进行 系统聚类,以多年平均月侵蚀力为初始聚类,32 个站点为聚类成员进行聚类分析,形成距离谱系聚类图. 以 15 为划分距离,研究区降雨侵蚀力可分为 3 类,其中类 I 包括城口、潼南、大足、荣昌、永川和江津,此 类在空间上主要归属于渝西片区,类 II 包括开州区、云阳、巫溪、梁平、垫江、彭水和酉阳,此类多数聚集 于重庆东部,其余区县归属于类 III (图 10).





图 10 各站点月平均降雨侵蚀力聚类树

各分类降雨侵蚀力的年内变化曲线如 图 11 所示,类 I 与类 II 在年内的分布特征 相似,在 6 月达到峰值,7 月曲线下凹,8 月回升,之后持续下降,但类 II 在年内的 变化趋势较类 I 更加平缓.类 II 在5 月达 到降雨侵蚀力最大值,6 月与5 月基本持 平,7-8 月明显下降,9 月有小幅回升,与 其他两类变化趋势不同.这说明重庆西部 和东部降雨侵蚀力在年内变化趋势相似, 但渝西变化更加剧烈.





对比分析研究区降雨量和降雨侵蚀力的聚类结果发现,以15为划分距离,降雨量和降雨侵蚀力均可分为3大类,但分类结果存在差异.降雨量分类结果存在较强的区域性,同一类型的地理位置明显聚集,而同一类型降雨侵蚀力的站点分布相对分散.

各分类降雨和降雨侵蚀力的年内变化曲线分别呈单峰、双峰特征,变化趋势有显著差别.重庆各

地区降雨量多在 6-7 月达到峰值,而降雨侵蚀力的最高值为 5-6 月.重庆西部和中部的降雨量年内 变化较为相似,而重庆西部和东部的降雨侵蚀力年内变化相近.这说明尽管降雨量是引发水力侵蚀的 重要因素,但降雨侵蚀力受其他降雨特征参数的影响明显,仅通过降雨量研究降雨侵蚀力分布特征缺 乏精确性.

3 讨论

3.1 降雨与降雨侵蚀力时间变化特征对应关系

通过对研究区 2009-2018 年的降雨量和降雨侵蚀力的变化特征进行分析,降雨量和降雨侵蚀力均存 在年际和年内间的波动变化,且空间分布不均的特征.

在研究区域内,从降雨量的年际变化看,各站点多年平均降雨量为950.28~1296.17 mm,统计特征参数中,渝东北变差系数最大,主要是由于时段内最大降雨量达最小降雨量的1.6 倍,具有热带降雨特点. 从年内降雨分布特征看,主要集中于春、夏两季,在西太平洋副热带高压作用下,降雨次数和降雨量都几 乎集中于这一时段.这些特征与付友行等^[33]、史东梅等^[18]对重庆市内涉及的小流域和单一行政区域的研 究成果基本一致.对于降雨侵蚀力,变差系数最大值则出现在渝东南,这主要与计算时段内,年平均降雨 侵蚀力最大值、最小值均发生在渝东南有关.

由此,对比分析研究区内平均面降雨量和平均降雨侵蚀力的极值发现,年降雨量大的区域,并不一定 会产生最大的降雨侵蚀力,可能是由于单次降雨侵蚀力受单次降雨量、降雨动能和降雨强度综合影响.

3.2 降雨与降雨侵蚀力空间特征对应关系

年平均降雨量和年降雨侵蚀力空间分布结果表明,两者最大值均位于渝东北城口-开州-万州-云阳-带和渝东南的酉阳,这与区域单次降雨量和单次降雨侵蚀力最大值出现在该区域有关,由此也可解释次降 雨量越大越易于产生更多的降雨侵蚀.但在降雨侵蚀力的高值分布中,渝西片区也有零星分布,这主要是 受区域极端暴雨事件影响.如铜梁区在2016年6月30日、7月13-14日和7月18-19日发生了3场暴雨 事件,单次降雨量分别为96.7,78.3和54.5mm,对应产生的降雨侵蚀力分别为264.32,353.05和 136.15 MJ•mm/(hm²•h).3场降雨量占当年总降雨量的18.89%,对应的累积降雨侵蚀力占当年总降 雨侵蚀力的32.99%,这一现象也可从季节空间分布结果中得到印证.尤其是在夏季,尽管降雨量高值区 几乎仅分布于渝东北的城口一带,但降雨侵蚀力在渝西片区的高值区表现十分明显.与此同时,基于月尺 度的多年平均降雨量和降雨侵蚀力聚类结果表明,空间分布上,两者的类 [具有高度区域相似性.

另外,根据殷水清等^[34]基于全国范围内 774 个气象站 1961-2016 年逐日降雨数据计算得到的多年平均 年和次降雨侵蚀力空间分布结果,重庆区境内的多年平均降雨侵蚀力值为 2 000~3 000 MJ • mm/(hm² • h), 与本文采用具有高时间分辨率的计算结果为 1 400~2 300 MJ • mm/(hm² • h)不同,由此可说明,利用更小时 间尺度的降雨数据计算降雨侵蚀力更有利于区域生态环境保护工作的开展.

4 结论

1) 重庆市 2009-2018 年平均降雨量为 1 082.98 mm, 区域内各站点多年平均降雨量为 950.28~ 1 296.17 mm,最大值是最小值的 1.36 倍,差异有统计学意义.降雨量的季节分布不均,从大到小依次为 夏季、春季、秋季、冬季,其中夏季占据全年的 50%以上.空间分布上降雨量高值区分布在渝东北片区,低 值区主要分布于渝西片区. 2)研究区各分区降雨侵蚀力的演变趋势统计结果表明,降雨侵蚀力最大值出现在渝东南,最小值出现 在渝西;渝东南降雨侵蚀力的年际波动高于渝东北和渝西.受地形地貌、土地复垦频率和其他人类活动等 因素影响,降雨侵蚀力高值区主要分布在渝东北的梁平、开州一带,渝东南的酉阳、秀山一带,低值区位于 重庆中部.

3)通过 Ward 系统聚类法对研究区降雨量和降雨侵蚀力进行空间分类,结果显示,研究区降雨和降雨 侵蚀力均可划分为3类,但分类结果不同,同一类型降雨具有明显的地域聚集特征,而降雨侵蚀力相对分 散.重庆中部降雨在年内的集中度较西部弱.重庆西部和东部降雨侵蚀力在年内变化趋势相似,但渝西变 化更加剧烈.

参考文献:

- [1] NEARING M, PRUSKI F F, O'NEAL M. Expected Climate Change Impacts on Soil Erosion Rates: a Review [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 59: 43-50.
- [2] PANAGOS P, BORRELLI P, POESEN J, et al. The New Assessment of Soil Loss by Water Erosion in Europe [J]. Environmental Science & Policy, 2015, 54: 438-447.
- [3] NEARING M A, YIN S Q, BORRELLI P, et al. Rainfall Erosivity: an Historical Review [J]. CATENA, 2017, 157: 357-362.
- [4] LI Z Y, FANG H Y. Impacts of Climate Change on Water Erosion: a Review [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 163: 94-117.
- [5] KHARE D, MONDAL A, KUNDU S, et al. Climate Change Impact on Soil Erosion In the Mandakini River Basin, North India [J]. Applied Water Science, 2017, 7(5): 2373-2383.
- [6] 杨兴,谭利平,彭培好,等.雨强和坡度对嵌套砾石工程边坡侵蚀特征的影响[J].西南师范大学学报(自然科学版), 2020,45(3):101-108.
- [7] ANGULO-MARTÍNEZ M, BEGUERÍA S. Estimating Rainfall Erosivity from Daily Precipitation Records: a Comparison among Methods Using Data from the Ebro Basin (NE Spain) [J]. Journal of Hydrology, 2009, 379(1-2): 111-121.
- [8] BI N S, WANG H J, YANG Z S. Recent Changes in the Erosion-Accretion Patterns of the Active Huanghe (Yellow River) Delta Lobe Caused by Human Activities [J]. Continental Shelf Research, 2014, 90: 70-78.
- [9] LAI C G, CHEN X H, WANG Z L, et al. Spatio-Temporal Variation in Rainfall Erosivity during 1960-2012 in the Pearl River Basin, China [J]. CATENA, 2016, 137: 382-391.
- [10] JEAN P. Soil Erosion in the Anthropocene: Research Needs [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(1): 64-84.
- [11] D'ASARO F, D'AGOSTINO L, BAGARELLO V. Assessing Changes in Rainfall Erosivity in Sicily during the Twentieth Century [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(21): 2862-2871.
- [12] YIN S, XIE Y, LIU B, et al. Rainfall Erosivity Estimation Based on Rainfall Data Collected over a Range of Temporal Resolutions [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(10): 4113-4126.
- [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.
- [14] 史志华, 郭国先, 曾之俊, 等. 武汉降雨侵蚀力特征与日降雨侵蚀力模型研究 [J]. 中国水土保持, 2006(1): 22-24.
- [15] 郑海金,方少文,杨洁,等. 赣北第四纪红壤坡地降雨侵蚀力的计算与分析 [J]. 中国水土保持科学,2010,8(2): 36-40.
- [16] 杨轩,梁音,方继青,等. 基于日降雨信息的月降雨侵蚀力模型 [J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 216-222.
- [17] 刘秉正. 渭北地区 R 的估算及分布 [J]. 西北林学院学报, 1993, 8(2): 21-29.
- [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] 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.
- [20] 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(1-4): 287-306.
- [21] 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.
- [22] 卜兆宏, 宫世俊, 阮伏水, 等. 降雨侵蚀力因子的算法及其在土壤流失量监测中的选用 [J]. 遥感技术与应用, 1992, 7(3): 1-10.
- [23] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Rainfall Energy and Its Relationship to Soil Loss [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1958, 39(2): 285-291.
- [24] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究 [J]. 水土保持通报, 1996(5): 1-20.
- [25] 崔莹,谢世友,柳芬,等.重庆市水资源可持续利用能力的模糊评价 [J].西南大学学报(自然科学版),2017,39(4): 115-123.
- [26] BEGUERÍA S, SERRANO-NOTIVOLI R, TOMAS-BURGUERA M. Computation of Rainfall Erosivity from Daily Precipitation Amounts [J]. Science of the Total Environment, 2018, 637-638: 359-373.
- [27] 董晓华,薄会娟,邓霞,等. 降雨空间插值方法及在清江流域的应用 [J]. 三峡大学学报(自然科学版),2009,31(6): 6-10.
- [28] 牟乃夏, 刘文宝, 王海银. ArcGIS 10 地理信息系统教程—从初学到精通 [M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [29] 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等. 2008-2016 年重庆地区降水时空分布特征 [J]. 大气科学, 2020, 44(2): 327-340.
- [30]马丽珲,周婷婷,徐刚,等.重庆市干旱时空分布规律研究[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(8):82-91.
- [31] 陈启智,黄奕武,王其伟,等. 1990-2004 年西南低涡活动的统计研究 [J].南京大学学报(自然科学版),2007,43(6): 633-642.
- [32] 吴国雄,张琼. 夏季副热带高压变化研究的新进展 [M]. 北京:气象出版社,2006.
- [33] 付友行, 廖晓勇. 三峡库区紫色小流域侵蚀性降雨特征 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(1): 184-188.
- [34] 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.

责任编辑 王新娟