

1960—2017 年重庆市不同量级降雨侵蚀力 R 值的时空变化特征

邹玉霞¹, 樊国中², 刘淑婧^{1,3}, 曾凤铃¹, 张伟¹, 张卫华¹

(1.西南大学资源环境学院,重庆 400716;2.重庆江源工程勘察设计院有限公司,
重庆 401147;3.河海大学水文水资源学院,南京 210098)

摘要: 降雨是引起土壤侵蚀的主要动力之一,探究不同量级降雨侵蚀力的时空变化特征,以期为重庆市水土流失防治提供参考。选取 1960—2017 年重庆市及周边 42 个站点 24 h 降雨数据,按雨量等级表将其划分为不同量级降雨,利用简易模型计算 R 值,应用气候倾向率、变异系数、普通 Kriging 插值分析重庆市各量级降雨侵蚀力的时空演变特征。结果表明:(1)研究期内重庆市年均 R 值为 $5\,751.55(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,变异系数为 0.19,属中等变异;(2)不同量级降雨侵蚀力对年均 R 值的贡献率为大雨(34.82%)>暴雨(30.53%)>中雨(23.93%)>大暴雨(10.53%),其中大暴雨侵蚀力的气候倾向率最大,对年降雨侵蚀力的上升贡献率最高;(3)降雨侵蚀力年内分配极度不均,54.19%集中分布在夏季,仅有 0.91%分布在冬季;(4)年均降雨侵蚀力和各量级降雨侵蚀力空间分布呈东高西低的格局。通过对重庆市不同量级降雨侵蚀力的分析,明确了发生土壤侵蚀可能性较高的时期和地区,为因地制宜制定水土保持措施提供参考。

关键词: 侵蚀性降雨; 不同量级降雨侵蚀力; 普通克里金插值; 时空分布

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0041-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.006

Spatio-temporal Variations of Rainfall Erosivity R Values of
Different Magnitudes in Chongqing from 1960 to 2017

ZOU Yuxia¹, FAN Guozhong², LIU Shujing^{1,3}, ZENG Fengling¹, ZHANG Wei¹, ZHANG Weihua¹

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716;
2.Chongqing Jiangyuan Engineering Survey and Design Co., Ltd., Chongqing 401147;
3.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract: Rainfall is one of the main driving forces of soil erosion. In order to explore the spatial-temporal variations of rainfall erosivity with different magnitudes, the 24 h rainfall data of 42 meteorological stations in Chongqing and its surrounding stations from 1960 to 2017 were selected so as to calculate the R value by the daily rainfall erosivity model. And the spatial-temporal variation of different magnitudes rainfall erosivity in different time scales were analyzed by utilizing the climate tendency rate, variation coefficient and ordinary Kriging. The results showed that: (1) The average annual R value of Chongqing was $5\,751.55(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ in 58 a, and the variation coefficient of the average annual R value was 0.19, which between 0.1 and 1, belonging to a medium variation. (2) The order of contribution rate of rainfall erosivity of different magnitudes to annual R value was heavy rain (34.82%)>rainstorm (30.53%)>moderate rain (23.93%)>downpour (10.53%), and the increasing trend of downpour erosivity was dominant in annual rainfall erosivity. (3) The distribution of annual R value was extremely uneven, with 54.19% concentrated in summer and only 0.91% in winter. (4) The annual and each magnitude rainfall erosivity showed a decreasing trend from east to west. This study clarifies the periods and areas with high possibility of soil erosion, protective measures are supposed to take to control soil erosion according to local conditions.

Keywords: erosive rainfall; rainfall erosivity of different magnitude; kriging; spatio-temporal variation characteristics

收稿日期: 2022-04-18
资助项目: 国家自然科学基金项目(U20A20326); 西南大学实验技术研究项目(SYJ2022040)
第一作者: 邹玉霞(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: 18398264749@163.com
通信作者: 张卫华(1974—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水文循环与水土资源管理研究。E-mail: swuwater@126.com

本文将日降雨量 ≥ 12 mm 的降雨称为侵蚀性降雨,按照表 1 将侵蚀性降雨分为 5 个等级,依据各等级雨量计算相应量级的 R 值,各量级 R 值加和为相应时段总的 R 值,特大暴雨侵蚀力贡献率极小,可忽略不计。

表 1 降雨量及 R 值等级

雨量级别	分级标准/mm	R 值量级
中雨量	12~25	中雨侵蚀力
大雨量	25~50	大雨侵蚀力
暴雨量	50~100	暴雨侵蚀力
大暴雨量	100~200	大暴雨侵蚀力
特大暴雨量	≥ 200	特大暴雨侵蚀力

1.3.2 气候倾向率 某气象要素 y 随时间 t 的变化为 $y_1、y_2、y_3、\cdots、y_n$,将气象要素 y 与时间 t 建立一元线性方程为:

$$y=at+b \tag{4}$$

该线性方程斜率的 10 倍即为气候倾向率,10 $a>0$ 表示气象要素随时间呈上升变化,反之呈下降变化,绝对值大小代表气候倾向率变化的幅度。

1.3.3 数据处理 侵蚀性降雨和 R 值的 C_v 值、最值比等指标均在 Excel 2010 中进行计算;利用 ArcGIS 10.7 软件对重庆市侵蚀性降雨、 R 值及其气候倾向率进行空间插值。

2 结果与分析

2.1 年侵蚀性降雨量、年降雨侵蚀力时空变化特征

2.1.1 时间变化特征 重庆市 1960—2017 年侵蚀

表 2 年侵蚀性降雨和 R 值年际变化指标

项目	平均值	最大值	最小值	气候倾向率/ 10 a^{-1}	C_v	最大值/均值	最大值/最小值
年侵蚀性降雨量	800.50	1142.46	538.68	0.60	0.16	1.43	2.12
年降雨侵蚀力值	5751.55	8950.99	3432.65	32.24	0.19	1.56	2.61

注:年侵蚀性降雨量单位为 mm;年降雨侵蚀力值单位为 $(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。

计算每个季节降雨侵蚀力,由表 3 可知,1960—2017 年重庆市年均 R 值有 54.19%分布在夏季,春秋两季 R 值占比相差不大,冬季 R 值仅占全年的 0.91%。说明 R 值年内分布不均,夏季发生土壤侵蚀的风险最高,应加强土壤侵蚀防范和治理力度,冬季 R 值小,土壤侵蚀的风险较低,可以考虑在冬季进行生产建设

表 3 各季节 R 值趋势分析参数统计

季节	月份/月	均值/ $(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1})$	最大值/ $(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1})$	最小值/ $(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1})$	气候倾向率/ $[(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot(10\text{ a}^{-1}))]$	占年 R 值比例/%	C_v
春季	3—5	1304.31	2378.14	400.87	15.18	22.68	0.30
夏季	6—8	3116.93	5959.53	1357.41	37.63	54.19	0.28
秋季	9—11	1277.98	2563.91	589.18	-19.23	22.22	0.37
冬季	12 至翌年 2	52.33	154.62	2.18	-1.33	0.91	0.72

计算 1—12 月侵蚀性降雨量、 R 值及其分别占全年的比例。由图 3 可知,二者各月占比曲线呈单峰型,全年分别有 77.80%的侵蚀性降雨和 81.71%的 R 值集中在 5—9 月。其中,6 月侵蚀性降雨量最大,为 143.31

性降雨量变化范围为 538.68~1 142.46 mm,平均值为 800.5 mm;多年 R 值介于 3 432.65~8 950.99 $(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,多年平均 R 值为 5 751.55 $(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。将侵蚀性降雨量、 R 值分别与时间进行线性拟合,并对该数据进行 5 年滑动平均处理,结果见图 2。研究期内,两者的年际变化具有较高的一致性,最小值均出现在 2001 年;最大值出现年份不同,1998 年侵蚀性降雨量最大,而最大 R 值则出现在 1982 年;二者随时间均呈上升趋势,但趋势变化均不显著。由表 2 可知,侵蚀性降雨和降雨侵蚀力的 C_v 值分别为 0.16、0.19,侵蚀性降雨的最大值与其年均值、最小值之比分别为 1.43、2.12,降雨侵蚀力的最大值与其年均值、最小值之比分别为 1.56、2.61,均说明 R 值的年际变化波动性更大。

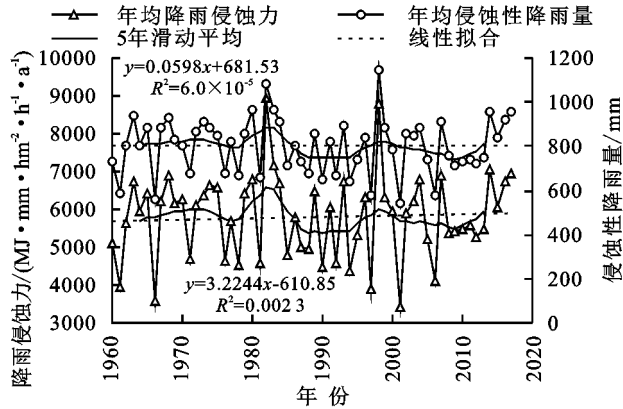


图 2 年侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力年际变化

活动。不同季节 R 值的最大值相差 38 倍,最小值相差 622 倍,说明 R 值季节变化显著;年 R 值在不同季节 R 值共同作用下表现为增长的趋势,其中夏季 R 值起主导作用;4 个季节的 C_v 值均在 0.1~1.0,为中等变异,其中夏季 C_v 值最小,冬季 C_v 值最大,说明 R 值在夏季变化幅度小,在冬季变化幅度最大。

mm,占全年的 17.90%;7 月降雨侵蚀力最大,为 1 174.09 $(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,占全年的 20.24%。

2.1.2 空间分布特征 重庆市年均侵蚀性降雨量和年均 R 值空间分布特征总体一致,均呈东高西低分

布,因受地形条件、高程等影响,也存在一定的差异性。从图 4 可知,所选站点中西阳侵蚀性降雨量最大,为 960.60 mm,江津最小,为 655.20 mm,最值比为 1.47;年均侵蚀性降雨在西阳和梁平形成高值中心,分别向西和东北方向递减。渝西年均 R 值在 $5\,000\text{ (MJ}\cdot\text{mm)/(hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a)}$ 以下,渝东大部分地区年均 R 值在 $6\,000\text{ (MJ}\cdot\text{mm)/(hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a)}$ 以上, R 值在空间上呈东高西低的分布格局,说明渝东地区更容易发生土壤侵蚀;比较所选市内站点年均 R 值,最大、最小值依次为 $7\,239.86,4\,414.52\text{ (MJ}\cdot\text{mm)/(hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a)}$,分别出现在西阳和綦江,最值比为 1.64。

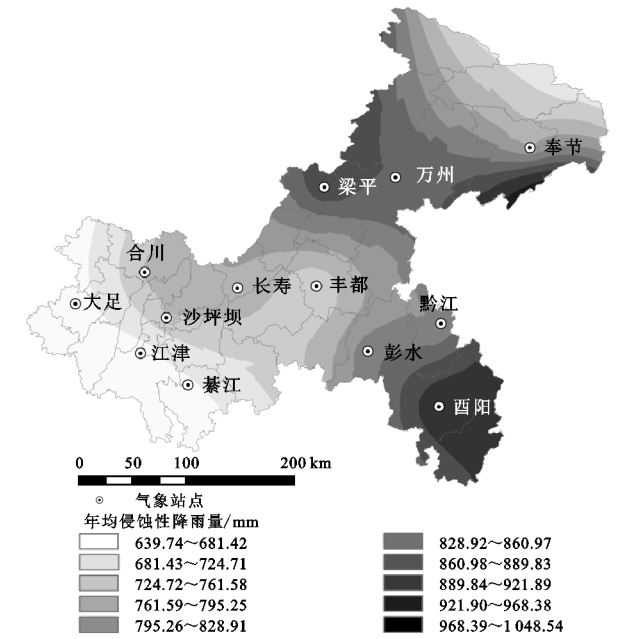


图 4 侵蚀性降雨量与降雨侵蚀力空间分布

2.2 不同量级降雨侵蚀力的时间变化

2.2.1 不同量级降雨侵蚀力年际变化 重庆市 1960—2017 年不同量级 R 值变化趋势特征存在差异。从图 5 可以看出,研究期内中雨侵蚀力年际变化总体以 $13.32\text{ (MJ}\cdot\text{mm)/(hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{10 a)}$ 的速率下降;其余量级降雨侵蚀力随时间呈上升趋势,10 年间大雨、暴雨和大暴雨降雨侵蚀力分别增大 1.96,2.69,36.84 $\text{ (MJ}\cdot\text{mm)/(hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a)}$ 。从 5 年滑动平均曲线变化趋势可知,中雨侵蚀力演变过程中有 3 次明显波动,存在 1 个波峰 3 个波谷,波峰出现在 1980 年,波谷分别出现在 1971 年、1988 年和 1994 年。大雨侵蚀力年际变化过程中出现 1 次明显波动,波峰、波谷分别出现在 1983 年和 1990 年。暴雨侵蚀力变化趋势无明显波动,但年际间升降变化极为频繁。大暴雨侵蚀力存在 1 个较明显的波峰期,峰值为最大值 $831.06\text{ (MJ}\cdot\text{mm)/(hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a)}$,出现在 2010 年。由表 4 可知,不同量级降雨侵蚀力的 C_v 值、最值比均随着降雨量级的升高不断增大;除暴雨侵蚀力外,各量级降雨侵蚀力最大值与年均值的比值也与降雨

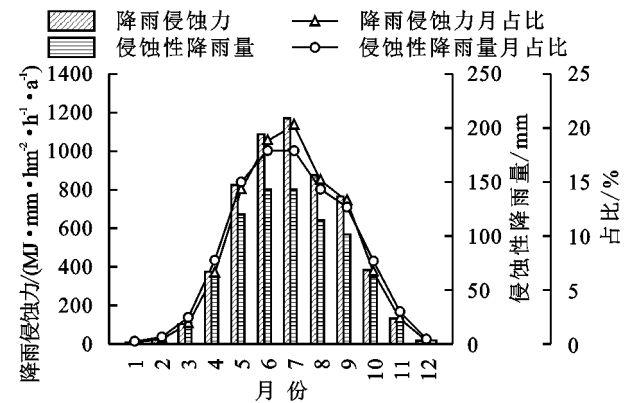
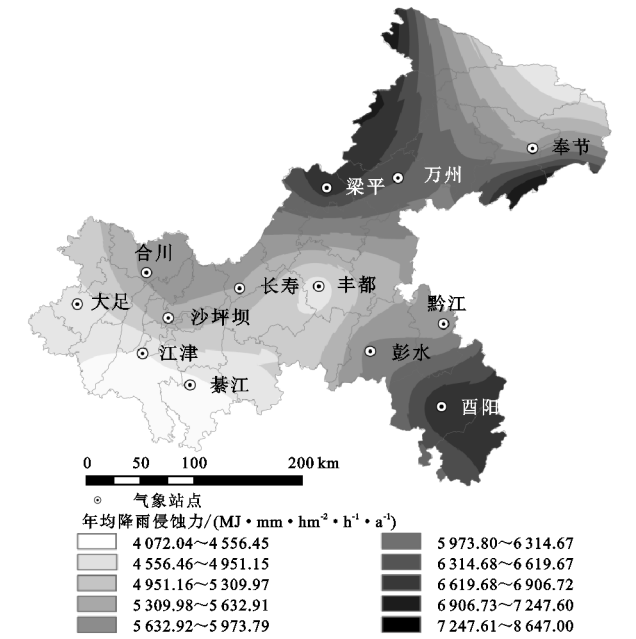


图 3 各月侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力及其月占比



量级呈正比关系;各量级降雨侵蚀力占总侵蚀力的比值存在差别,其中大雨侵蚀力占比最大,达 34.82%,其次是暴雨侵蚀力,占 30.53%。

综上,降雨量级越高,其对应的侵蚀力年际变化波动越大。在不同量级降雨共同影响下,年降雨侵蚀力的年际变化呈上升态势,其中大暴雨作用最大;大雨具有频次高、历时长的特点,所以大雨侵蚀力在年降雨侵蚀力中占比最高;大暴雨具有频率低,一次产生的降雨侵蚀力大的特点,尽管大暴雨侵蚀力占比低,但能引起水土流失较大的时空变化。

2.2.2 不同量级降雨侵蚀力年内变化 中雨、大雨侵蚀力在一年四季均有出现,而暴雨、大暴雨侵蚀力在冬季几乎没有出现,除 2014 年冬季暴雨侵蚀力为 $36.28\text{ (MJ}\cdot\text{mm)/(hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a)}$ 外,其余年份冬季暴雨、大暴雨侵蚀力全部为 0。由表 5 可知,不同量级降雨侵蚀力季节变化趋势不同。中雨侵蚀力除了在夏季均呈下降趋势,其中在秋季下降幅度最大,10 年间平均下降 $14.79\text{ (MJ}\cdot\text{mm)/(hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a)}$,对全年中雨侵蚀力的演变趋势起主导作用。大雨侵蚀力在春季有增大趋向,在

其余 3 季均有减小趋向,秋季下降幅度最大,气候倾向率为 $-3.49(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot 10 \text{ a})$,对全年大雨侵蚀力呈下降走向的贡献最大。暴雨侵蚀力变化趋势虽然只在春季表现为上升,其余 3 个季节都表现为下降趋势,但是春季上升幅度远大于其他 3 个季节的下降幅度,最终导致年暴雨侵蚀力上升。大暴雨侵蚀力

在春、夏季呈上升趋势,夏季上升趋势更显著,在秋季呈下降趋势,最终导致年大暴雨侵蚀力呈上升趋势。比较不同量级降雨侵蚀力在各个季节的 C_v 值发现,冬季大雨侵蚀力、春、秋季大暴雨侵蚀力 C_v 值分别为 1.55,1.31,1.77,属于强变异,其余均属于中等变异,且同一季节的 C_v 值与降雨量级呈正相关关系。

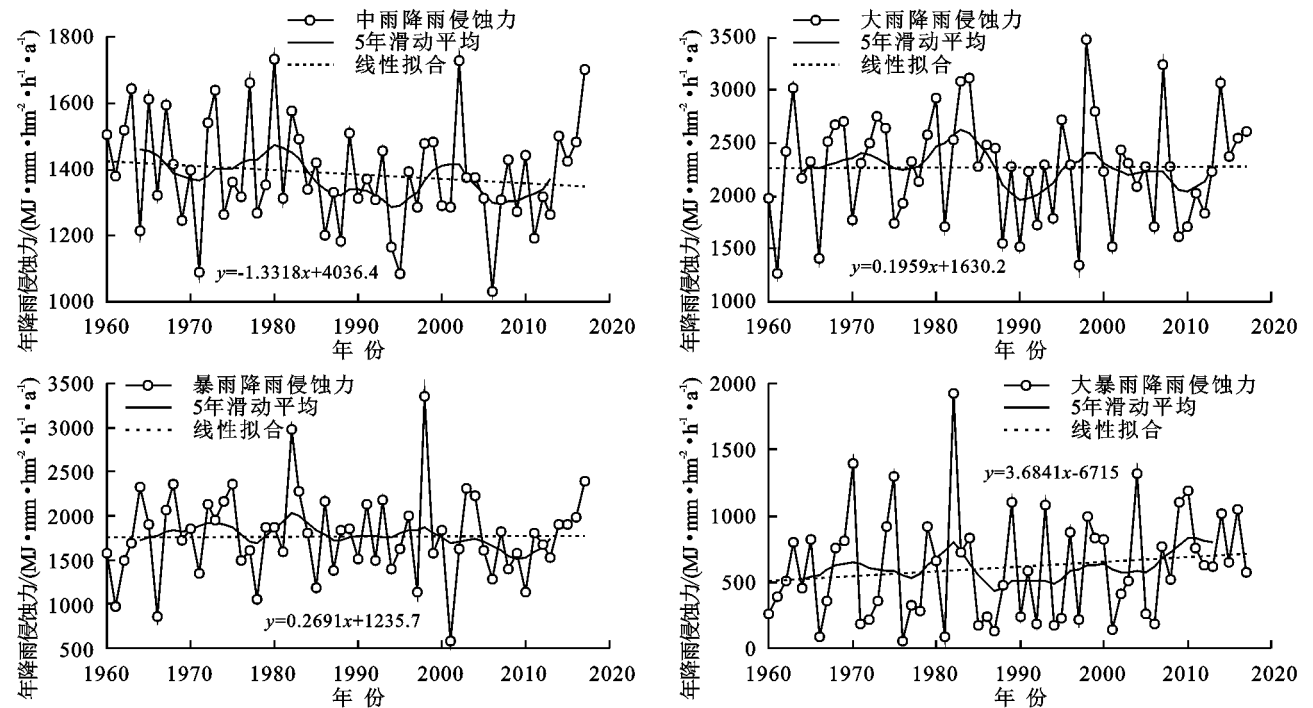


图 5 不同量级降雨侵蚀力年际变化

表 4 不同量级 R 值年际变化指标

指标	均值/ $(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	最大值/ $(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	最小值/ $(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	气候倾向率/ $[(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a}^{-1}))]$	C_v	最大值/均值	最大值/最小值	占年 R 值比例/%
中雨侵蚀力	1376.23	1731.73	1032.60	-13.32	0.12	1.26	1.68	23.93
大雨侵蚀力	2002.54	2985.88	1209.22	1.96	0.20	1.49	2.47	34.82
暴雨侵蚀力	1755.83	3350.11	582.34	2.69	0.27	1.90	5.57	30.53
大暴雨侵蚀力	605.70	1924.54	57.82	36.84	0.66	3.18	33.29	10.53

表 5 不同量级 R 值年内变化趋势分析参数统计

降雨类型	季节	降雨侵蚀力平均值/ $(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	降雨侵蚀力最大值/ $(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	降雨侵蚀力最小值/ $(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	气候倾向率/ $[(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a}^{-1}))]$	占各量级降雨侵蚀力比例/%	占年降雨侵蚀力比例/%	C_v
中雨	春	441.90	729.20	189.13	-0.16	32.11	7.68	0.28
	夏	515.01	750.77	300.79	2.69	37.42	8.95	0.20
	秋	376.77	574.67	157.88	-14.79*	27.38	6.55	0.21
	冬	42.54	126.44	2.18	-1.06	3.09	0.74	0.69
大雨	春	515.52	1006.15	190.20	8.21	25.74	8.96	0.33
	夏	1025.76	1766.65	587.95	-1.91	51.22	17.83	0.28
	秋	452.10	826.38	140.17	-3.49	22.58	7.86	0.37
	冬	9.16	57.61	0	-0.85	0.46	0.16	1.55
暴雨	春	303.77	784.11	13.27	4.96	17.30	5.28	0.63
	夏	1105.42	2425.57	321.73	-2.05	62.96	19.22	0.36
	秋	346.02	1178.23	15.39	-0.78	19.71	6.02	0.69
	春	43.13	285.06	0	2.19	7.12	0.75	1.31
大暴雨	夏	459.49	1634.85	7.53	34.83	75.86	7.99	0.76
	秋	103.08	589.15	0	-0.17	17.02	1.79	1.77

注: * 表示变化趋势显著 ($p < 0.05$); * * 表示变化趋势极显著 ($p < 0.01$)。

2.3 不同量级降雨侵蚀力的空间变化

利用普通克里金插值法研究不同量级降雨侵蚀力及其气候倾向率的空间分布和变化规律。从图 6 和图 7 可以看出,重庆市不同量级降雨侵蚀力在空

间总体分布上存在一致性,但在空间变化趋势上存在差异性。各量级降雨侵蚀力值均呈现东部偏大、西部偏小的空间格局,但具体高值和低值地区的分布存在差异。

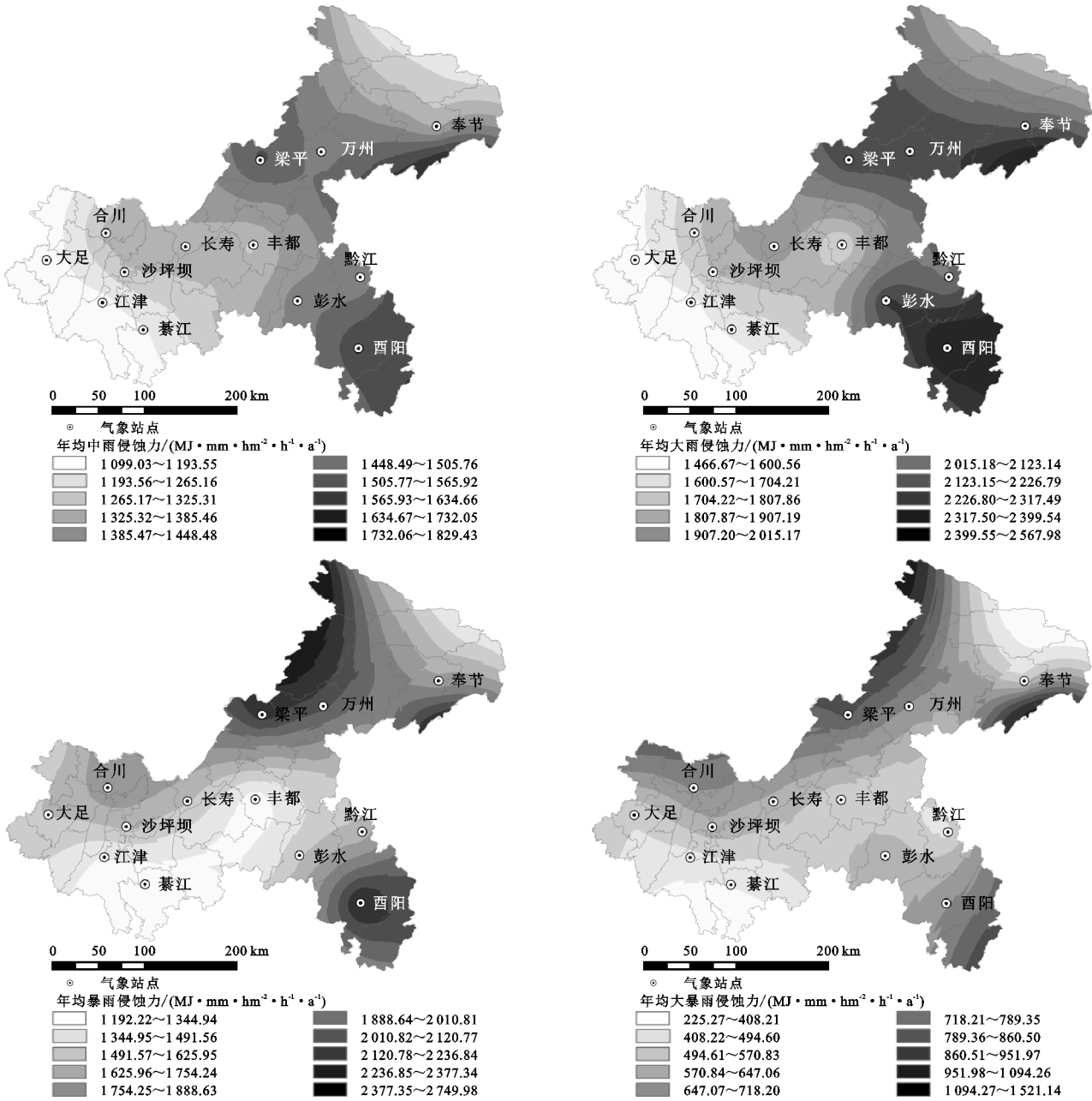


图 6 各量级降雨侵蚀力空间分布

年均中雨侵蚀力主要分布在渝东南地区,最大值为1 624.99(MJ·mm)/(hm²·h·a),出现在酉阳,最小值为1 144.08(MJ·mm)/(hm²·h·a),出现在大足;研究期内,大部分地区中雨侵蚀力气候倾向率小于0,西部及周边少部分地区气候倾向率大于0,其中酉阳地区下降幅度最大,10年间平均下降37.91(MJ·mm)/(hm²·h·a)。年均大雨侵蚀力主要分布在渝东南和渝东北地区,最大值为2 520.43(MJ·mm)/(hm²·h·a),出现在酉阳,最小值为1 558.15(MJ·mm)/(hm²·h·a),出现在大足;年均大雨侵

蚀力变化趋势总体特征为西部上升,东部下降,下降幅度最大的是彭水地区,气候变化率为-98.53(MJ·mm)/(hm²·h·10a),上升幅度最大的是沙坪坝地区,10年间平均上升93.73(MJ·mm)/(hm²·h·a)。年均暴雨侵蚀力主要分布在渝东南和梁平、万州一带,最高值出现在酉阳,为2 392.86(MJ·mm)/(hm²·h·a),最低值出现在綦江,为1 206.22(MJ·mm)/(hm²·h·a);年均暴雨侵蚀力在渝东北和渝西部分地区表现为上升趋势,在西部上升趋势较明显,其中,上升幅度最大的是大足地区,10年间平均

上升 $166.52(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$;在渝东南地区呈下降趋势,在沙坪坝地区出现下降高值中心,10 年间平均下降 $129.91(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。年均大暴雨降雨侵蚀力主要分布在渝东北地区,最大、最小值为 $948.15, 345.20(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,分别出现

在梁平和奉节;年均大暴雨侵蚀力的变化特征为从西南向东北呈上升—下降交替式变化,其中,彭水上升幅度最大,10 年间平均上升 $139.56(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,梁平下降幅度最大,10 年间平均下降 $78.78(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。

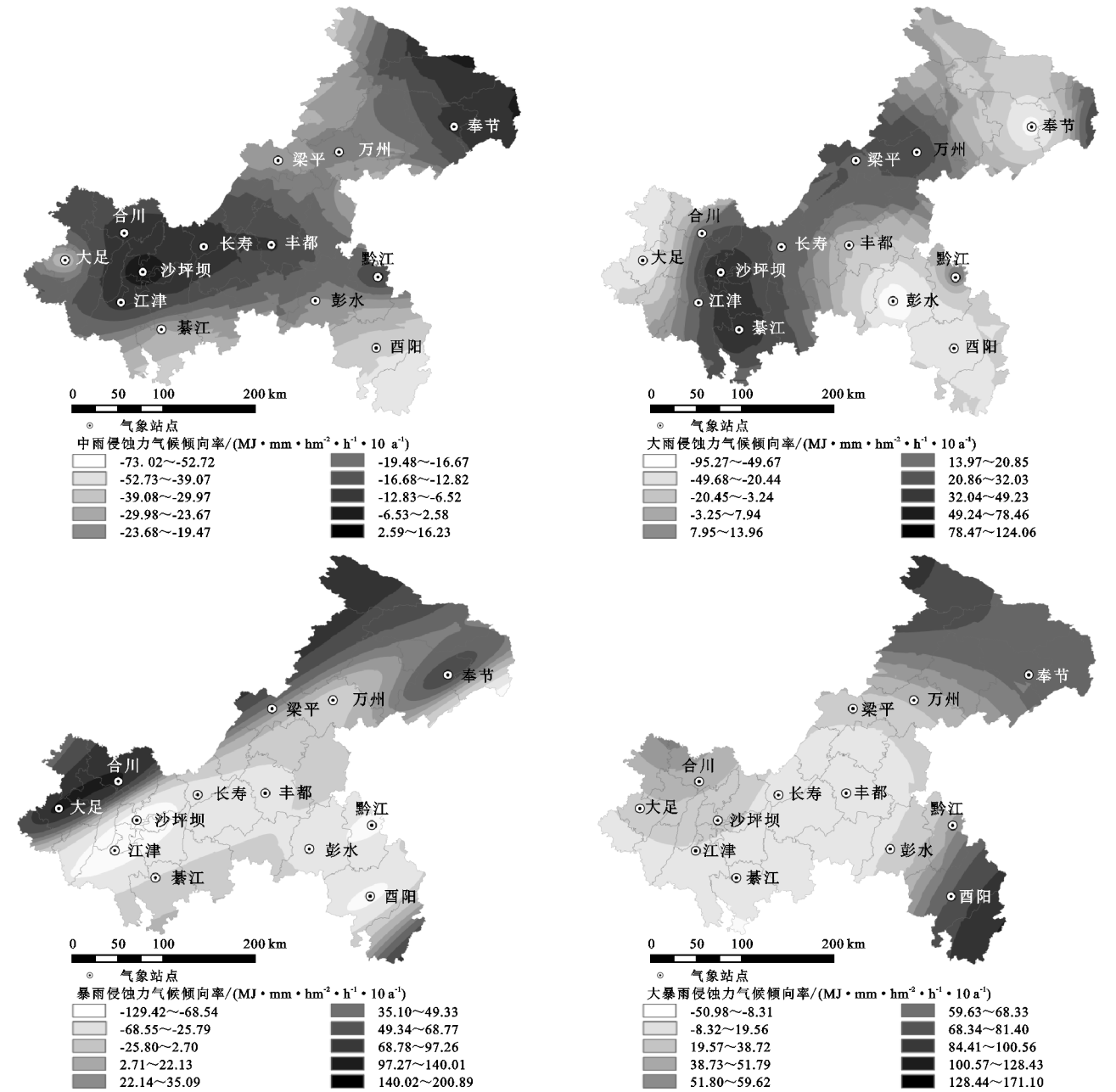


图 7 各量级降雨侵蚀力气候倾向率空间分布

3 讨论

重庆市 1960—2017 年多年平均 R 值为 $5\,751.55(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,在西南地区居中间水平^[23]。在全球气候变暖的大环境下,我国大多数地区强降雨事件频率增加,侵蚀性降雨增多,导致 R 值呈上升的趋势,但 R 值并非只受侵蚀性降雨的影响,同时还受降雨强度、气候条件、地形等条件的影响,所以两者变化并不完全一致。重庆市受东南季风影响,降雨充沛,具有暖季降雨频次高、强度大的特点,导致

R 值季节分配极度不均,超过 50%集中在夏季,春、秋季占比次之,主要是因为春夏之交时冷暖空气交汇比较频繁,易出现连阴雨天气,夏季受副热带高压控制加之地形闭塞,闷热潮湿,秋季副高后退,阴雨连绵,所以春、夏、秋季 R 值之和超过全年 R 值的 99%,其中暴雨侵蚀力贡献率高,大雨次之。重庆市年均 R 值空间上总体呈西低东高分布,与侵蚀性降雨空间分布基本一致,进一步说明侵蚀性降雨是影响 R 值大小的主要因子。不同量级 R 值空间分布差异明显,年均 R 值空

间分布主要受大雨和暴雨侵蚀力影响,高值区集中分布在渝东地区,应针对该地区提前制定防治大雨和暴雨引起的水土流失危害的保护性措施。

4 结 论

(1)1960—2017 年重庆市年均降雨量为 1 146.20 mm,年均侵蚀性降雨量为 800.50 mm,年均 R 值为 $5\,751.55(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$;侵蚀性降雨量和 R 值相关性表现为显著正相关,且年际变化均呈上升趋势,在空间分布上均呈东高西低的格局。

(2) R 值年内分布极不均匀,54.19%的年均 R 值分布在夏季,春、秋、冬季 R 值占比依次为 22.68%,22.22%,0.91%;各量级 R 值都集中分布在 6—8 月,其中大暴雨侵蚀力的 75.86%都集中在这段时间。

(3)不同量级 R 值占年均 R 值的比值存在差异,中雨、大雨、暴雨、大暴雨侵蚀力占比依次为 23.93%,34.82%,30.53%,10.53%;不同量级 R 值的变异系数范围在 0.1~1.0,随着降雨量级增大,其年际变化越剧烈。

(4)不同量级 R 值年际变化不同,中雨侵蚀力 10 年间平均下降 $13.32(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,大雨、暴雨、大暴雨侵蚀力 10 年间平均分别上升 1.96,2.69,36.84 $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。

(5)不同量级 R 值在空间分布上总体呈东高西低的格局,中雨、大雨、暴雨侵蚀力高值均出现在渝东南地区,在重庆大部分地区呈下降趋势,而在渝西及渝东北部分地区呈上升趋势;大暴雨侵蚀力高值出现在渝东北地区,空间上整体呈下降趋势,其中在渝中及渝西南下降趋势最明显。

参考文献:

[1] 董林垚,郑艳霞,程冬兵,等.气候变化对降雨侵蚀力的影响研究综述[J].长江科学院院报,2015,32(3):59-63.

[2] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions of American Geophysical Union,1958,39(2):285-291.

[3] 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.

[4] 孙泉忠,王朝军,赵佳,等.中国降雨侵蚀力 R 指标研究进展[J].中国农学通报,2011,27(4):1-5.

[5] Zhu D Y, Xiong K N, Xiao H. Multi-time scale varia-

bility of rainfall erosivity and erosivity density in the karst region of southern China,1960—2017[J]. Catena, 2021,197:e104977.

[6] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):35-41.

[7] 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.

[8] 伍育鹏,谢云,章文波.国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J].水土保持学报,2001,15(3):31-34.

[9] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.

[10] 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.

[11] 周琳,许武成,尹义星.近 61 年四川省降雨侵蚀力的时空变化趋势[J].水土保持研究,2018,25(4):8-14.

[12] 马岚,黄生志,黄强,等.渭河流域降雨与降雨侵蚀力变化的原因分析[J].水土保持学报,2018,32(1):174-181,189.

[13] 刘国华.西南生态安全格局形成机制及演变机理[J].生态学报,2016,36(22):7088-7091.

[14] Fu X T, Zhang L P, Wang Y. Effect of slope length and rainfall intensity on runoff and erosion conversion from laboratory to field[J]. Water Resources,2019,46(4):530-541.

[15] 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.

[16] 缪驰远,徐霞,魏欣,等.重庆市主城区降雨侵蚀力特征分析[J].资源科学,2007,29(4):54-60.

[17] 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.

[18] 赵平伟,郭萍,李成武,等.云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(12):2135-2141.

[19] 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.

[20] 芦鑫,殷淑燕,高涛涛.1960—2017 年秦岭南北地区降雨侵蚀力的时空变化特征研究[J].浙江大学学报(理学版),2019,46(3):380-390.

[21] 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.

[22] 王明晓.三峡库区降雨侵蚀力研究[D].武汉:华中农业大学,2011.

[23] 操玥,王世杰,白晓永,等.近百年中国西南降雨侵蚀力反演计算与时空格局演变[J].生态学报,2018,38(24):8766-8773.