

黔中喀斯特山地黄壤区降雨侵蚀力 R 值的分布特征

李亦秋^{1,2}, 邓欧^{1,2}, 杨广斌^{1,2}, 方启彬³

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州山地资源与环境遥感重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省水土保持监测站, 贵州 贵阳 550002)

摘要: [目的] 研究黔中喀斯特山地黄壤区降雨侵蚀力 R 值的分布特征, 为进行区域土壤侵蚀定量预报、水土保持规划和水土流失防治提供科学参考。[方法] 以黔中喀斯特黄壤分布区 10 个水土保持监测站点 2013—2019 年的日降雨量记录表和 5 min 间隔降雨过程摘录数据为主要数据来源, 分析次 R 值分布特征、 R 值的月分布特征、年际变化特征和 R 值的雨量雨强分布特征。[结果] ① 研究区系列最大次 R 值在次平均 R 值的几倍至十几倍之间, 最大次 R 值占对应年份的年 R 值的比例最少都达 22.28% 以上。一年中几次比较大的暴雨对土壤侵蚀的贡献率大。② 降雨侵蚀力 R 值主要分布在 4—9 月, 又重点集中于 6—8 月; 4—9 月 R 值占年 R 值的 90.00% 左右, 甚至达到 95.00% 以上; 而 6—8 月所占比例最低(都为 55.98%), 最高达到 85.25%。③ 年均 R 值由东南向西北呈明显的减小趋势; R 值年际变差系数与之呈相反趋势, 表明降雨侵蚀力由东南向西北稳定性逐渐降低; R 值年际变差系数变化范围在 0.20~0.44 之间, 年际变化较大。④ 中雨、大雨、暴雨和大暴雨是产生 R 值的主要雨量等级, 大多数站点主要雨量等级所占比例均在 60.00% 以上。大雨因出现频率相对较高, 历时较长, 对总 R 值的贡献最大。大暴雨总体上出现的频率不高, 但单次大暴雨的降雨侵蚀力的 R 值却可以很大, 一次大暴雨就可能改变 R 的整体分布。雨强 15~30 mm/h 是 R 值分布的高峰区, 其平均比例为 31.97%; 大于 60 mm/h 雨强的降雨发生的随机性更大, 所产生的 R 值比例的空间分布差异也大。[结论] 黔中喀斯特山地黄壤区降雨侵蚀力 R 值时空分异明显, 需因地制宜实施水土流失防治。

关键词: 喀斯特山地; 黄壤; 降雨侵蚀力 R 值; 分布特征; 黔中地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0039-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 李亦秋, 邓欧, 杨广斌, 等. 黔中喀斯特山地黄壤区降雨侵蚀力 R 值的分布特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 39-45. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.006; Li Yiqiu, Deng Ou, Yang Guangbin, et al. Distribution characteristics of rainfall erosivity R value in yellow soil area of karst mountainous region in Central Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 39-45.

Distribution Characteristics of Rainfall Erosivity R Value in Yellow Soil Area of Karst Mountainous Region in Central Guizhou Province

Li Yiqiu^{1,2}, Deng Ou^{1,2}, Yang Guangbin^{1,2}, Fang Qibin³

(1. School of Geographic and Environments Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Mountain Resources and Environment Remote Sensing Application, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. Guizhou Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: [Objective] The distribution characteristics of rainfall erosivity R value in the yellow soil area of karst mountainous region in Central Guizhou Province were studied, in order to provide scientific references for regional soil erosion quantitative prediction, soil conservation planning and soil and water loss control. [Methods] Based on the data source of the daily rainfall record from 2013 to 2019, and the extracted data of rainfall process at 5 min intervals from 10 soil and water conservation monitoring stations in the karst yellow soil distribution area of Guizhou Province, the individual distribution characteristics, monthly distribution

收稿日期: 2021-03-17

修回日期: 2021-04-06

资助项目: 黔科合基础项目“黔中喀斯特山地黄壤对降雨的侵蚀响应过程与机制”[2020]1Z031; 黔科合基础项目([2019]1222; [2019]1218); 贵州师范大学博士科研项目(GZNUD[2017]8; GZNUD[2017]9)

第一作者: 李亦秋(1973—), 女(汉族), 四川省达县人, 博士, 教授, 主要从事测绘与 3S 技术应用, 资源生态遥感等方面的研究。Email: yqiu.li@163.com。

通讯作者: 杨广斌(1973—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地理信息系统开发与应用等方面的研究。Email: ygbyln@163.com。

characteristics, inter-annual variation characteristics of R value, rainfall and rainfall intensity distribution characteristics were analyzed. [Results] ① The maximum R values was several times to a dozen times of the average R value of each monitoring stations. The percentage of the maximum R values in the corresponding year was also significantly different, and at least accounted for about 22.28% of the annual value. The contribution rate of several heavy rainstorms in a year was very high. ② The R value of rainfall erosivity was mainly distributed from April to September, and particularly concentrated from June to August. The R value from April to September accounted for about 90.00% of the annual R value in the monitoring stations, among which some stations were more than 95.00%. From June to August, the lowest R value accounted for 55.98% of the annual value, and the highest was 85.25%. ③ The average annual R value decreased significantly from southeast to southwest. The inter-annual variation coefficient (C_v) of R values showed an opposite trend, and increased significantly from southeast to northwest. The variation range of the inter-annual variation coefficient (C_v) of R values was 0.20~0.44, with a large interannual variation. ④ Moderate rain, heavy rain, rainstorm, and heavy rainstorm were the main rainfall erosivity levels, with which most stations accounting for more than 60.00%. Heavy rain, due to its relatively high frequency and long duration, contributed the most to the total R value. Overall, the frequency of heavy rainstorm was not high, but the value of rainfall erosivity R value of a single heavy rainstorm could be very large, which could change the R value distribution by a single heavy rainstorm. The peak area of R value distribution was 15—30 mm/h, and the average proportion is 31.97%. The occurrence of high rainfall intensity was more random, and the spatial distribution difference of the R value proportion generated by rainfall intensity greater than 60 mm/h was also large. [Conclusion] The spatial and temporal variation of rainfall erosivity R value is obvious in the yellow soil area of karst mountainous region in Central Guizhou Province, so it is necessary to take measures to prevent and control soil erosion according to local conditions.

Keywords: karst mountainous region; yellow soil; rainfall erosivity R value; distribution characteristics; Central Guizhou Province

在 20 世纪 50 年代后期,美国学者 Wischmeier 等根据大量径流小区观测资料进行统计分析和系统研究,提出以降雨总动能 E 与最大 30 min 雨强 I_{30} 的乘积 EI_{30} 作为降雨侵蚀力指标(通常用 R 值表示),用来定量表征次降雨可能引起的土壤侵蚀能力,反映雨滴溅蚀以及地表径流对土壤侵蚀的综合效应^[1]。此后,降雨侵蚀力的计算作为进行土壤侵蚀定量预报的一个重要环节,国内外学者提出了多种形式的降雨侵蚀力指标计算方法^[2-8],大多研究^[3]表明降雨侵蚀力 R 与降雨动能 E 及其降雨某时刻最大降雨强度 I_t 的乘积 EI_t 有着密切的关系,但从综合资料的可得性及适用范围来看, EI_{30} 仍是世界上应用最广的土壤侵蚀力指标。我国自 20 世纪 80 年代以来,开展了很多有关降雨侵蚀力的研究^[9-11],模型多采用幂函数结构形式^[12],编制了区域降雨侵蚀力图和分析降雨侵蚀力的季节分布^[13-18],取得了很多有意义的成果。

黄壤主要分布在中国南方高海拔山区,特别是云贵高原^[19]。喀斯特地貌和黄壤在地理空间上有着高度的重合,发育于石灰岩风化物的黄壤以贵州高原较

有代表性^[20]。喀斯特山地黄壤分布区土层普遍较薄,其自然坡面和耕作土壤厚度一般不超过 2 m,传统意义上的轻度侵蚀即可造成重大危害。黄壤作为贵州最为重要的旱地耕作土壤,长期的开发利用加剧了土壤侵蚀过程,出现基岩大面积裸露、土地生产力严重退化的土地石漠化问题,严重威胁到区域的水土资源状况与农业安全^[21-22]。喀斯特黄壤区域的水土流失研究工作起步较晚,研究内容集中在喀斯特地区黄壤侵蚀影响因素分析^[23]、喀斯特石漠化的定义及分类分级、水土流失的侵蚀强度等级划分、不同下垫面侵蚀强度差异性对比等^[23]定性研究阶段,少数定量研究则以喀斯特黄壤坡面降雨产流方式、水化学特征以及室内模拟条件下的坡面产流的水动力学特征等方面^[24-26]。鉴于此,本文以黔中喀斯特黄壤分布区 10 个水土保持监测站点 2013—2019 年的日降雨量记录表和 5 min 间隔降雨过程摘录数据为主要数据来源,计算次降雨 30 min 最大雨强 I_{30} 和次降雨总动能 E ,进而计算次降雨侵蚀力 $R = EI_{30}$,分析次 R 值分布特征、 R 值的月分布特征、年际变化特征和 R 值的雨量雨强分布特征,为进行土壤侵蚀定量预报、土壤保持规划和水土流失防治提供科学参考。

1 研究区概况

为了科学掌握喀斯特山地水土流失影响因子,系统研究其水土流失类型与侵蚀特征,准确评价水土保持综合治理效益,并为全国水土保持监测网络提供连续可靠的基础数据,贵州喀斯特山地黄壤分布区目前已建立起 14 个水土保持监测站点,125 个监测小区,5 个小流域控制站,基本上形成了全面布控和整体监测的水土保持监测网络。黔中地区位于贵州省中部,包括贵州省贵阳市及遵义市、安顺市、毕节市、黔东南州、黔南州的 33 个县(市、区),大部分地区属云贵高原的喀斯特丘陵地貌。黔中喀斯特山地黄壤区已建立起 11 个监测站点,由于石桥站近年无观测数据,本文选取羊鸡冲、云雾等 10 个监测站点为研究对象,研究黔中喀斯特山地黄壤区降雨侵蚀力 R 值的分布特征,其分布见图 1。

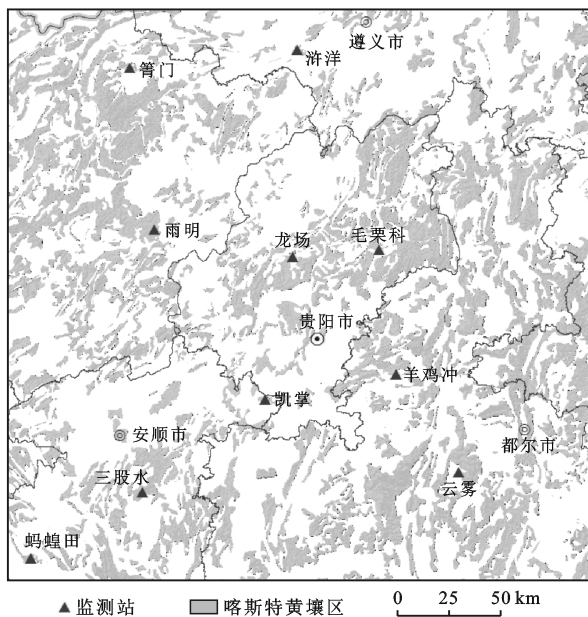


图 1 黔中喀斯特山地黄壤区的水土保持监测站分布

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究数据源主要为各监测站点 2013—2019 年的日降雨量记录表和降水过程数据。监测数据具体包括次降水次序、降水时间(月、日、时、分)、累积雨量(mm)、累积历时(min),时段降雨的雨量(mm)、历时(min)和雨强(mm/h)等。降雨量主要通过 HOBO 小型自动气象站或虹吸式自记雨量计采集记录雨量数据,5 min 间隔进行降雨过程摘录,降雨过程中降雨间歇大于 360 min 时为两次降雨。数据源还包括各监测站点的经纬度位置及其地理环境概况数据等。

2.2 研究方法

(1) 次降雨侵蚀力 R 值计算。贵州省水土保持监测站根据长期的区域性监测资料,确定次降雨侵蚀力计算依据监测站点 5 min 间隔记录的降雨资料数据,采用降雨侵蚀力 EI_{30} 方法计算^[2-3]:

$$R_{\text{次}} = EI_{30} \quad (1)$$

$$E = \sum_{r=1}^n (e_r \cdot p_r) \quad (2)$$

$$e_r = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.082 i_r)] \quad (3)$$

式中: $R_{\text{次}}$ 为次降雨侵蚀力($\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); I_{30} 表示一次降雨过程中 30 min 的最大雨强,如果降雨总历时不足 30 min 时,也按照 30 min 计算,单位为 mm/h,通过雨量纸摘录的断点雨量进行计算; E 为一次降雨的总动能(MJ/hm^2); r 为降雨时段($r = 1, 2, \dots, n$); n 为一次降雨过程按照雨强分为 n 个时段; p_r 为第 r 时段雨量(mm); e_r 为每一时段的单位降雨动能 $[\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})]$; i_r 为第 r 时段雨强(mm/h)。

(2) 年降雨侵蚀力变差系数 C_v 计算。采用年降雨侵蚀力变差系数 C_v 反映降雨侵蚀力的稳定性:

$$C_v = \sigma_{R_{\text{年}}} / \bar{R}_{\text{年}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{\text{年}i} - \bar{R}_{\text{年}})^2}{n-1}} / \bar{R}_{\text{年}} \quad (4)$$

式中: C_v 为变差系数,反映不同年限长度降雨侵蚀力的稳定性; $R_{\text{年}i}$ 为某序列年限长度下的降雨侵蚀力的标准差 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; $R_{\text{年}i}$ 为第 i 年的降雨侵蚀力; $\bar{R}_{\text{年}}$ 为相应年限长度下降雨侵蚀力的平均值 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; n 为序列年限长度。 C_v 值越大,降雨侵蚀力的年际变化越剧烈,对水土流失治理工程不利, C_v 值越小,降雨侵蚀力的年际变化越小,越有利于水土流失治理工程规划实施。

(3) 年平均 R 值($\bar{R}_{\text{年}}$)与年际 R 值变差系数 C_v 空间分布制图。将各监测站点的年平均 R 值($\bar{R}_{\text{年}}$)与年际 R 值变差系数 C_v 进行克里金(Kriging)插值,通过监测站点 $\bar{R}_{\text{年}}$ 和 C_v 的空间自协方差插值法研究其空间相关关系和空间分布特征,实现空间分布制图。

3 结果与分析

3.1 次 R 值的分布特征

本文次降雨侵蚀力 R 值采用 EI_{30} 计算,采用两种指标作为次 R 值($R_{\text{次}}$)分布的特征指标:一是系列最大一次 R 值($R_{\text{次max}}$)与次平均 R 值($\bar{R}_{\text{次}}$)的比值;二是系列最大一次 R 值占对应年份的年 R 值($R_{\text{年}}$)的

比例。经计算得到各监测站次 R 值分布特征统计指标详见表 1。根据表 1 可知,各监测站点系列最大一次 R 值($R_{\text{次max}}$)在次平均 R 值($\bar{R}_{\text{次}}$)的几倍至十几倍之间,三股水站最高,达 17.73 倍。2014 年 6 月 20 日最大降雨的 R 值高达 $2\,296.94 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,站点次平均 R 值 $129.58 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。箐门站次之,为 17.66 倍。2018 年 5 月 18 日最大降雨的 R 值高达 $2\,436.84 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,站点次平均 R 值 $138.02 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。蚂蝗田站系列最大一次 R 值与次平均 R 值的倍数最小,为 6.13 倍。羊鸡冲站、泮洋水站、龙场站、毛栗科站和箐门站年最大一次 R 值占年总 R 值的比例都在 40.00% 以上,分别为 42.16%, 44.23%, 43.85%, 44.12% 和 56.58%。年最大一次 R 值占年总 R 值的比例都在 30.00%~40.00% 的站点包括三股水站和凯掌站,分别为 39.54% 和 33.07%,其余的云雾站、蚂蝗田站和雨明站分别是 28.16%, 22.28% 和 25.18%。综上所述,从贵州喀斯特山地黄壤区次 R 值分布特征来看,系列最大一次 R 值和次平均 R 值区域差异显著,最大次 R 值占对应年份的年 R 值的比例也差异明显。但总体上最大次 R 值占对应年份的年 R 值的比例最少都达 22.28% 以上。土壤侵蚀主要是由一年中几次比较大的暴雨所形成的。

3.2 R 值的月分布特征

通过计算各站点各月份平均 R 值占年平均 R 值比例来表示 R 值的月分布特征。经计算统计,各站点 R 值的月分布情况详见图 2 和表 2。据表 2 和图 2 可知,各站点 R 值的月分布特征与区域降雨季节变化有着十分密切的关系,由于地处亚热带高原季风湿润气候区,年降水量一般在 1 000 mm 以上,主要集中在夏季,降雨侵蚀力 R 值也主要分布在 4—9 月,

又重点集中于 6—8 月。4—9 月,除平坝凯掌站 R 值分别占年 R 值的 89.29% 而外,其余各站点都在 90.00% 以上,其中贵定云雾站、修文龙场站、毛栗科站和箐门站更是达到 95.00% 以上,分别为 96.03%, 98.43%, 96.49% 和 99.21%。6—8 月, R 值占年 R 值比例遵义泮洋水站最低,为 55.98%,修文龙场站最高,为 85.25%。

表 1 研究区监测站次 R 值分布特征指标

监测站	系列最大一次 R 值($R_{\text{次max}}$)	次平均 R 值($\bar{R}_{\text{次}}$)	$R_{\text{次max}}/\bar{R}_{\text{次}}$	$R_{\text{次max}}$ 对应的 $R_{\text{年}}$	$R_{\text{次max}}$ 占 $R_{\text{年}}$ 比例/%
羊鸡冲	2 661.13	163.51	16.28	6 311.51	42.16
云雾	2 142.58	253.63	8.45	7 608.82	28.16
三股水	2 296.94	129.58	17.73	5 808.92	39.54
泮洋水	1 742.76	168.03	10.37	3 939.90	44.23
凯掌	1 471.26	94.08	15.64	4 448.38	33.07
龙场	2 323.23	153.62	15.12	5 297.95	43.85
蚂蝗田	911.20	148.72	6.13	4 089.94	22.28
毛栗科	2 310.50	156.32	14.78	5 236.78	44.12
箐门	2 436.84	138.02	17.66	4 307.06	56.58
雨明	904.77	105.07	6.69	3 593.80	25.18

注: $R_{\text{年}}$ 为年 R 值; R 值单位均为 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ 。下同。

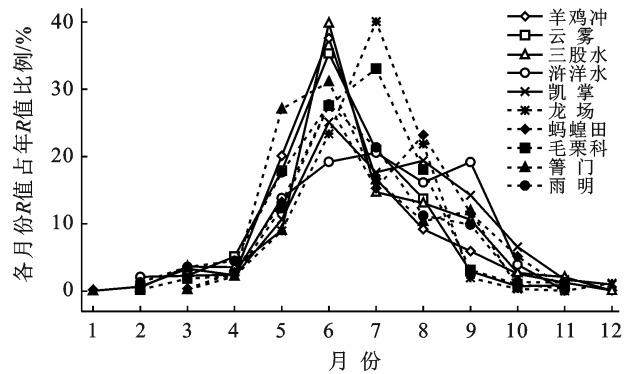


图 2 研究区各站点 R 值月分布

表 2 研究区各站点 R 值的月分布统计结果

监测站	各月份 R 值占年 R 值比例/%												4—9月	6—8月
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
羊鸡冲	0.05	0.69	3.34	2.39	20.12	37.57	16.70	9.22	5.95	2.57	1.29	0.11	91.95	63.49
云雾	0.02		2.34	5.14	17.89	35.30	21.00	13.76	2.94	0.73	0.87		96.03	70.06
三股水		0.55	3.65	3.57	9.05	39.83	14.71	13.10	10.63	2.73	2.09	0.08	90.89	67.64
泮洋水		2.14	2.31	2.48	13.84	19.23	20.59	16.16	19.20	3.93	0.13		91.50	55.98
凯掌		1.40		2.22	10.65	25.11	17.67	19.38	14.26	6.58	1.73	1.00	89.29	62.16
龙场	0.01			2.23	8.97	23.37	40.04	21.84	1.98	0.33	0.05	1.18	98.43	85.25
蚂蝗田	0.22		0.41	2.78	13.24	27.63	15.31	23.22	11.58	5.17	0.42		93.76	66.16
毛栗科		0.23	1.86	2.28	12.32	27.63	33.04	18.05	3.17	1.03	0.39		96.49	78.72
箐门	0.06		0.23	2.2	27.06	31.09	16.52	10.37	11.97	0.5			99.21	57.98
雨明		1.3	3.61	4.52	17.67	27.71	21.38	11.22	9.9	1.37	1.32		91.40	60.31

3.3 R 值的年际变化分布特征

R 值的年际变化特征用 3 种指标表示: ①变差

系数 C_v ($C_v = R_{\text{年}s} / \bar{R}_{\text{年}}$, $R_{\text{年}s}$ 为某序列年限长度下的降雨侵蚀力的标准差, $R_{\text{年}s}$ 为第 s 年的降雨侵蚀力;

$\bar{R}_{年}$ 为相应年限长度下降雨侵蚀力的平均值); ②最大年 R 值与年平均 R 值的比值($R_{年max}/\bar{R}_{年}$); ③最大年 R 值与最小年 R 值的比值($R_{年max}/R_{年min}$)。

各站点的 R 值年际变化特征指标计算结果详见表 3。降雨侵蚀力年均 R 值及变差系数 C_v 空间分布如图 3 所示。

据表 3 和图 3 可知,研究区年均 R 值由东南和西南向北向西呈明显的减小趋势,年均 R 值变化范围在

3 034.43~7 608.82 MJ·mm/(hm²·h)之间,均值为 4 287.78 MJ·mm/(hm²·h)。 R 值年际变差系数与之呈相反趋势,由东南向西北逐渐增大,表明由东南向西北降雨侵蚀力的稳定性逐渐降低。 R 值年际变差系数变化范围在 0.20~0.45 之间,均值为 0.31;最大年 R 值一般为平均年 R 值的 1.18~1.51 倍;最大年 R 值与最小年 R 值的比值为 1.57~2.52 倍,表明降雨侵蚀力年际变化较大。

表 3 研究区 R 值的年际变化特征指标

监测站	$R_{年s}$	$\bar{R}_{年}$	变差系数 C_v	$R_{年max}$	$R_{年max}/\bar{R}_{年}$	$R_{年min}$	$R_{年max}/R_{年min}$
羊鸡冲	1 684.69	4 185.95	0.40	6 311.51	1.51	2 505.83	2.52
云雾	1 809.11	7 608.82	0.24	10 245.00	1.35	6 140.05	1.67
三股水	1 292.31	3 984.58	0.32	5 808.92	1.46	2 768.82	2.10
浒洋水	878.74	3 360.52	0.26	4 068.82	1.21	2 146.53	1.90
凯掌	702.70	3 431.35	0.26	4 448.38	1.30	2 833.87	1.57
龙场	1 383.09	3 841.91	0.36	5 297.95	1.38	2 581.06	2.05
蚂蝗田	802.70	4 089.94	0.20	4 944.26	1.21	3 094.49	1.60
毛栗科	1 623.81	3 690.47	0.44	5 236.78	1.42	2 390.13	2.19
箐门	1 374.62	3 352.73	0.41	4 307.06	1.28	3 011.25	1.43
雨明	1 404.80	3 034.43	0.43	3 593.80	1.18	2 541.43	1.41

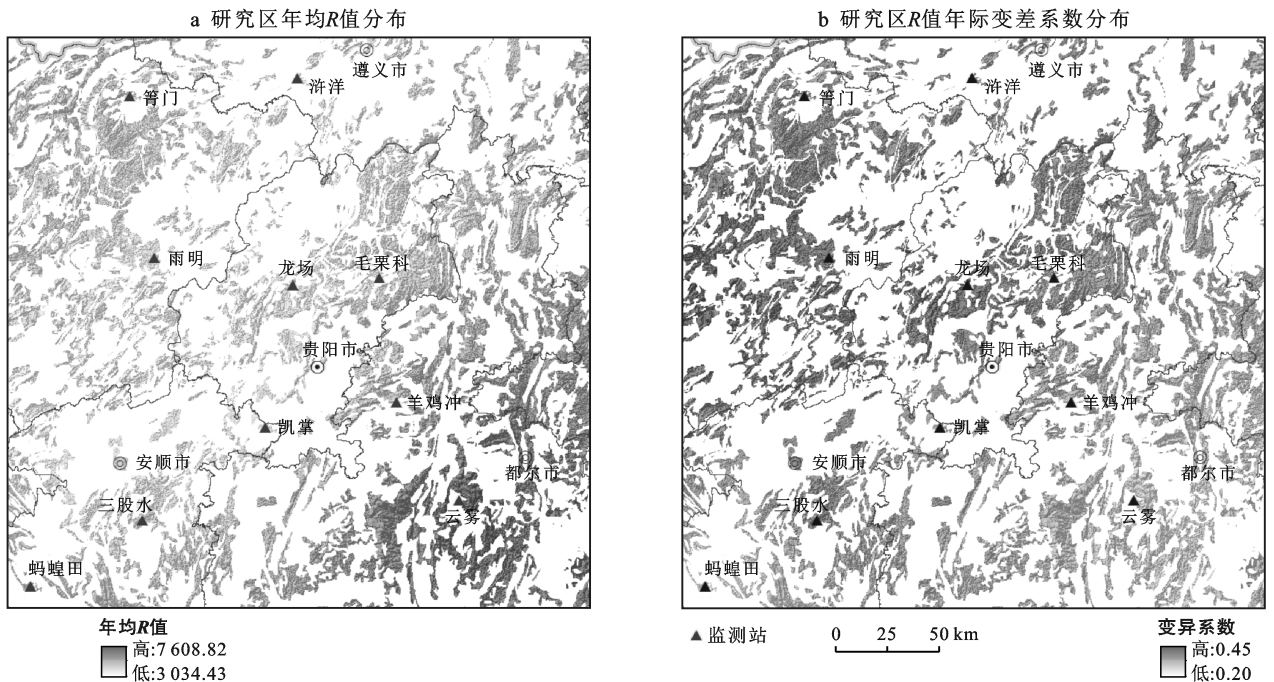


图 3 研究区年均 R 值及变差系数 C_v 空间分布

3.4 R 值的降雨特征分布

3.4.1 R 值的雨量分布特征 将各个监测站点次降雨按雨量大小排序,并按照雨量大小分成 6 个等级^[27]:小雨(24 h 降雨量小于 10 mm);中雨(24 h 降雨量 10~25 mm);大雨(24 h 降雨量 25~50 mm);暴雨(24 h 降雨量 50~100 mm);大暴雨(24 h 降雨

量 100~250 mm);特大暴雨(24 h 降雨量在 250 mm 以上)。各监测站点各等级雨量对应的累计 R 值占总 R 值的比例详见表 4。根据表 4 的数据统计结果,绘制监测站点量级雨量的 R 值比例的雷达图(图 4)。据表 4 和图 4 可知,各个站点小雨所产生的 R 值占总 R 值的比例均在 5.00% 以下,平均占比 2.01%,云雾

站小雨所产生的 R 值占比仅为 0.27%，龙场站小雨所产生的 R 值占比最大，也只占 4.13%；中雨、大雨、暴雨和大暴雨是产生 R 值的主要雨量等级；大雨因出现频率相对较高、历时较长，对总 R 值的贡献也最大，其平均占比达 35.06%；大雨和暴雨是 R 值分布的两个高峰点，所产生的 R 值占比均在 60.00% 左右及其以上，最大占比是蚂蝗田站，占比达 67.84%；大暴雨总体上出现的频率不高，但单次大暴雨的降雨侵蚀力的 R 值却可以很大，如前所述的三股水站 2014 年 6 月 20 日最大降雨的 R 值高达 2 296.94 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ，羊鸡冲站 2015 年 6 月 18 日最大降雨的 R 值高达 2 661.13 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ，箐门站 2018 年 5 月 18 日最大降雨的 R 值高达 2 436.84 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ，一次大暴雨就可能改变 R 的整体分布；各监测站点暂无特大暴雨记录。

表 4 研究区监测站点量级雨量的 R 值比例 %

监测站	雨量等级/mm				
	小雨 (<10)	中雨 ($10\sim25$)	大雨 ($25\sim50$)	暴雨 ($50\sim100$)	大暴雨 ($100\sim250$)
羊鸡冲	0.41	18.97	32.07	27.73	20.82
云雾	0.27	12.17	23.97	34.01	29.58
三股水	1.01	29.22	46.92	15.12	7.73
泮洋水	3.06	20.49	31.70	31.81	12.94
凯掌	2.78	22.24	37.96	23.29	13.72
龙场	4.13	19.19	30.21	26.03	20.44
蚂蝗田	1.19	20.86	39.20	28.64	10.11
毛栗科	3.01	19.12	30.77	26.54	20.55
箐门	2.14	25.99	38.97	22.37	10.54
雨明	2.05	20.02	38.86	27.05	12.02
平均值	2.01	20.83	35.06	26.26	15.85

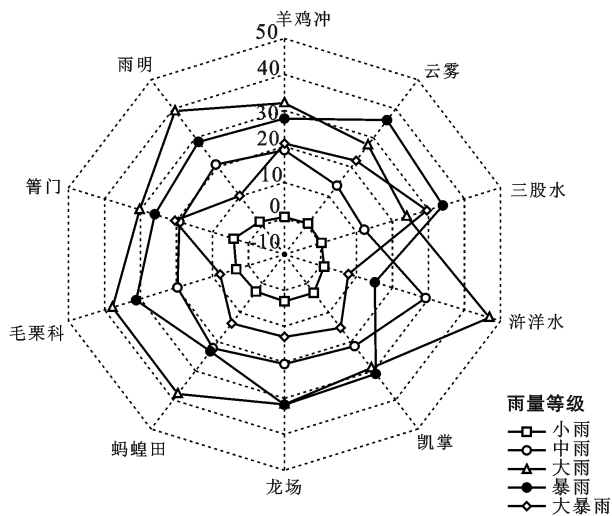


图 4 研究区各量级雨量 R 值比例雷达图

3.4.2 R 值的雨强分布特征 降雨强度是指单位时段内的降雨量，以 mm/min 或 mm/h 计，强度愈大，

雨愈猛烈。计算时特别有意义的是相应于某一历时的最大平均降雨强度。例如， I_{30} 表示一次降雨过程中 30 min 的最大雨强。以次降雨最大 30 min 降雨强度 I_{30} 作为强度指标，将其分为 5 个量级^[17]，各量级雨强对应的累计 R 值占总 R 值的比例见表 5，并绘制监测站点量级雨强的 R 值比例雷达图如图 5 所示。

表 5 研究区各量级 I_{30} 雨强的 R 值比例 %

监测站	I_{30} 雨强/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$				
	<15	$15\sim30$	$30\sim45$	$45\sim60$	>60
羊鸡冲	8.15	31.42	35.15	12.57	12.71
云雾	4.70	28.85	22.26	24.44	19.75
三股水	11.46	37.64	21.17	11.50	18.23
泮洋水	5.65	30.38	28.49	23.51	11.97
凯掌	15.37	32.83	24.15	13.93	13.72
龙场	8.79	34.58	24.82	14.20	17.61
蚂蝗田	7.41	29.47	38.33	20.44	4.35
毛栗科	8.60	33.63	27.92	13.71	16.14
箐门	8.03	30.44	27.62	24.27	9.65
雨明	10.40	30.50	26.75	25.03	7.32
平均值	8.86	31.97	27.67	18.36	13.15

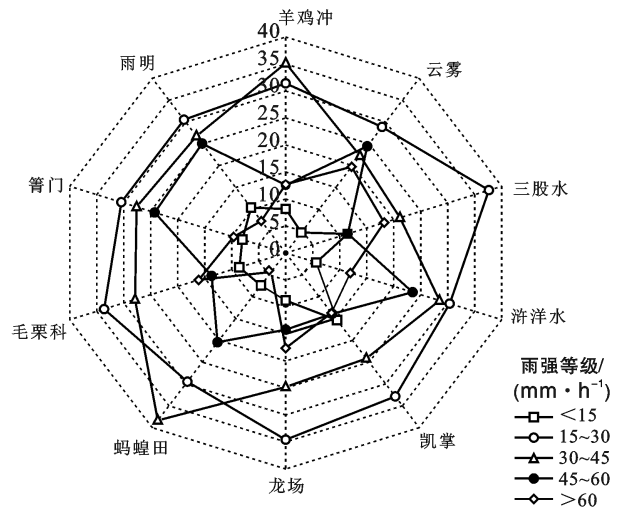


图 5 研究区各量级雨强 R 值比例雷达图

据表 5 和图 5 可知，各个站点小于 15 mm/h 雨强所产生的 R 值占总 R 值的平均占比在 10.00% 以下，雨强 15~30 mm/h 是 R 值分布的高峰区，其平均占比为 31.97%；雨强 30~45 mm/h 是 R 值分布的次高峰区，其平均占比为 27.62%；高雨强的降雨发生的随机性更大，大于 60 mm/h 雨强所产生的 R 值比例的空间分布差异也大，占比最大的云雾站为 19.75%，占比最小的蚂蝗田站为 4.35%。

4 讨论与结论

(1) 各站点系列最大次 R 值在次平均 R 值的几

倍至十几倍之间,最大次 R 值占对应年份的年 R 值的比例也差异明显。总体上,最大次 R 值占对应年份的年 R 值的比例最少都达 22.28%。一年中几次比较大的暴雨对土壤侵蚀的贡献率大。

(2) 降雨侵蚀力 R 值主要分布在 4—9 月,又重点集中于 6—8 月。4—9 月 R 值分别占年 R 值的 90.00% 左右,其中贵定云雾站和修文龙场站更是达到 95.00% 以上。6—8 月 R 值占年 R 值比例最低都为 55.98% (遵义泮洋水站),修文龙场站最高,达到 85.25%。

(3) 年均 R 值由东南和西南向北向西呈明显的减小趋势,年均 R 值变化范围在 3 034.43~7 608.82 MJ·mm/(hm²·h) 之间,均值为 4 287.78 MJ·mm/(hm²·h)。 R 值年际变差系数与之呈相反趋势,由东南向西北呈明显的增大趋势,表明由东南向西北降雨侵蚀力的稳定性逐渐降低。 R 值年际变差系数变化范围在 0.20~0.45 之间,均值为 0.31,表明降雨侵蚀力年际变化较大。

(4) 中雨、大雨、暴雨和大暴雨是产生 R 值的主要雨量等级,大多数站点的占比均在 60.00% 以上;大雨因出现频率相对较高、历时较长,对总 R 值的贡献也最大,其平均占比达 35.06%;大暴雨总体上出现的频率不高,但单次大暴雨的降雨侵蚀力的 R 值却可以很大,一次大暴雨就可能改变 R 的整体分布。雨强 15~30 mm/h 是 R 值分布的高峰区,其平均占比为 31.97%;高雨强的降雨发生的随机性更大,大于 60 mm/h 雨强所产生的 R 值比例的空间分布差异也大。

综上所述,本研究以监测站点径流小区长时间序列的实测降雨过程资料进行数据支持,计算次降雨侵蚀力,在此基础上选用 R 值分布的特征指标分析次 R 值、月 R 值、年 R 值和 R 值的雨量雨强分布特征,在最大程度上保证了分析数据的可靠性。在年 R 值和 R 值年际变差系数空间分异研究中,需要尽可能多的监测站点资料才能保证插值的精度。在后续研究中可将水土监测站点径流小区观测资料与常规气象监测站点观测资料相结合,建立常规雨量站降雨量与水土监测监测站点相应的降雨过程的降雨侵蚀力之间的转换关系,有效解决站点广泛性和资料代表性之间的矛盾,为区域土壤侵蚀定量预报、土壤保持规划和水土流失防治提供更加精准的数据支撑。

[参 考 文 献]

[1] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Transaction of American Geo-

physical Union, 1958,39(2):285-291.

- [2] Wischmeier W H. Estimating the Loss Equation's Cover and Management Factor for Undisturbed Areas [M]. Oxford, MS: Proceedings of Sediment Yield Workshop, U. S. Department of Agriculture Sedimentation Laboratory, 1972.
- [3] 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.
- [4] Grauso S, Diodato N, Verrubbi V. Calibrating a rainfall erosivity assessment model at regional scale in Mediterranean area [J]. Environment Earth Science, 2010, 60 (8):1597-1606.
- [5] 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):30-38.
- [6] Santiago Begueria, Roberto Serrano-Notivol, Miquel Tomas-Burguera. Computation of rainfall erosivity from daily precipitation amounts [J]. Science of the Total Environment, 2018,637(10):359-373.
- [7] Francesco G C, Vito Ferro, Maria A S, Predicting rainfall erosivity by momentum and kinetic energy in Mediterranean environment [J].Journal of Hydrology, 2018, 560(5):173-183.
- [8] Nelva B R, Carlos R M, Samuel B, et al. Rainfall erosivity in South America: Current patterns and future perspectives [J]. Science of the Total Environment, 2020, 724(7): 138315.
- [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.
- [10] 张宪奎,卢秀琴,詹敏,等.土壤流失预报方程中 R 指标的研究 [J].水土保持科技情报,1991(4):48-49.
- [11] 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):541-546.
- [12] 马廷,周成虎.基于雨滴谱函数的降雨动能理论计算模型 [J].自然科学进展,2006,16(10):1251-1256.
- [13] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征 [J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- [14] 邱美娟,穆佳,郭春明,等.1961—2015 年吉林省降雨侵蚀力的时空变化特征 [J].水土保持通报,2017,37(4): 295-302.
- [15] 伊力哈木·伊马木.新疆维吾尔自治区 1981—2018 年降雨侵蚀力的空间变化特征 [J].水土保持通报,2020, 40(4):1-9.
- [16] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 (I) [J].水土保持学报,1995,9(4):5-18.
- [17] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 (II) [J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2 (1):29-39.

- 境科学学报, 2017, 36(6): 1177-1185.
- [7] 张鑫, 张青峰, 周阳阳, 等. 不同坡度黄土微地形条件下 SCS-CN 模型参数研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 74-77.
- [8] 王红艳, 张志强, 查同刚, 等. 径流曲线数(SCS-CN)模型估算黄土高原小流域场降雨径流的改进[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 71-79.
- [9] 何杨洋, 王晓燕, 段淑怀. 密云水库上游流域径流曲线模型的参数修订[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 134-138, 146.
- [10] 王英, 黄明斌. 径流曲线法模型参数在黄土地区的优化研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 54-58.
- [11] Liu Xianzhao, Li Jiazhu. Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China [J]. Chinese Geographical Science, 2008, 18(3): 235-241.
- [12] Huang Mingbin, Gallichand J, Wang Zhanli, et al. A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(3): 579-589.
- [13] 罗利芳, 张科利, 符素华. 径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 58-61, 68.
- [14] 王英, 黄明斌. 径流曲线法在黄土区小流域地表径流预测中的初步应用[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 87-91, 97.
- [15] 邓景成, 高鹏, 穆兴民, 等. 模拟降雨条件下黄土区 SCS 模型的参数率定[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 205-210.
- [16] 高建恩, 吴普特, 牛文全, 等. 黄土高原小流域水力侵蚀模拟试验设计与验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 41-45.
- [17] 李琪, 马建斌, 刘洪吉. 基于逐步回归的投影寻踪水文预报模型研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 10-12.
- [18] 陈虹, 李家科, 李亚娇, 等. 暴雨洪水管理模型 SWMM 的研究及应用进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 225-234.
- [19] 冯憬, 卫伟, 冯青郁. 黄土丘陵区 SCS-CN 模型径流曲线数的计算与校正[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4170-4181.
- [20] Katrien D, Jean P, Lorenzo B, et al. Runoff curve numbers for steep hillslopes with natural vegetation in semi-arid tropical highlands, Northern Ethiopia [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(20): 41-45.

(上接第 45 页)

- [18] 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.
- [19] 刘世全, 张明. 区域土壤地理[M]. 四川 成都: 四川大学出版社, 1997.
- [20] 邹国础, 杨云. 黄壤分类的商榷[J]. 土壤, 1978(5): 189-190.
- [21] 戴海伦, 苑爽, 张科利, 等. 贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 37-41.
- [22] 罗旭玲, 白晓永, 谭秋, 等. 不同岩性背景下土壤侵蚀与石漠化关联性分析[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8717-8725.
- [23] 蔡雄飞. 我国西南喀斯特地区黄壤侵蚀影响因素分析及数值模拟[D]. 贵州 贵阳: 贵州师范大学, 2007.
- [24] 纪启芳, 张兴奇, 张科利, 等. 贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 1-5.
- [25] 郭继成, 张科利, 董建志, 等. 西南地区黄壤坡面径流冲刷过程研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1102-1108.
- [26] 张文源, 王百田, 杨光熈, 等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1776-1782.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 20486-2017 江河流域面雨量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

(上接第 53 页)

- [39] 徐炜杰, 郭佳, 赵敏, 等. 重金属污染土壤植物根系分泌物研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(6): 1137-1148.
- [40] Zeng Fanrong, Chen Song, Miao Ying, et al. Changes of organic acid exudation and rhizosphere pH in rice plants under chromium stress [J]. Environmental Pollution, 2008, 155(2): 284-289.
- [41] Wang J, Zhang C B, Jin Z X. The distribution and phytoavailability of heavy metal fractions in rhizosphere soils of *Paulownia fortunei* (seem) Hems near a Pb/Zn smelter in Guangdong, PR China [J]. Geoderma, 2009, 148(3): 299-306.
- [42] Xiao Min, Wu Fengchang. A review of environmental characteristics and effects of low-molecular weight organic acids in the surface ecosystem [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(5): 935-954.
- [43] 付广义, 邱亚群, 宋博宇, 等. 东江湖铅锌矿渣堆场优势植物重金属富集特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(4): 117-122.