

# 喀斯特坡地侵蚀性降雨阈值初探

焦锡桦<sup>1,2,3</sup>, 彭 韬<sup>1,3</sup>, 李社红<sup>1</sup>, 张 林<sup>1,3</sup>, 顾再柯<sup>4</sup>, 张信宝<sup>5</sup>, 王世杰<sup>1,3</sup>

(1.中国科学院地球化学研究所,环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550081;

2.中国科学院大学,北京 100049;3.中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站,贵州 普定 562100;

4.贵州省水土保持监测站,贵阳 550000;5.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041)

**摘要:**喀斯特坡地表层岩溶带发育,入渗强烈,产流机制与非喀斯特坡地有较大差异,为提高喀斯特坡地土壤流失模型预测准确性,以贵州省普定县陈旗小流域 6 个不同土地利用类型径流小区为观测对象,分析 2007—2010 年、2015—2019 年 2 期泥沙和地表径流数据,了解产流产沙规律,并利用降雨侵蚀力偏差法计算各小区侵蚀性降雨量。结果表明:(1)植被覆盖率与喀斯特坡地地表产流产沙量呈负相关,高植被覆盖下,暴雨和极端暴雨是造成喀斯特坡地水土流失的主要降雨事件;(2)植被恢复十余年随着覆盖度的提高,年均土壤流失量呈显著下降趋势,多小于 10 t/km<sup>2</sup>;(3)喀斯特坡地裂隙发育,地下漏失严重,土壤量少且不易被侵蚀,除少数极端暴雨外,多数降雨不产流不产沙,因此建议将喀斯特坡地侵蚀性降雨量阈值定为 50 mm,该阈值显著高于非喀斯特地区。

**关键词:**侵蚀性降雨阈值;降雨侵蚀力;喀斯特;地表径流系数

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2023)05-0057-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.007

## Preliminary Research on the Threshold of Erosive Rainfall on Karst Slopes

JIAO Xihua<sup>1,2,3</sup>, PENG Tao<sup>1,3</sup>, LI Shehong<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1,3</sup>,

GU Zaike<sup>4</sup>, ZHANG Xinbao<sup>5</sup>, WANG Shijie<sup>1,3</sup>

(1.State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.Puding Karst Ecosystem Research Station, Puding, Guizhou 562100; 4.Guizhou Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang 550000; 5.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resource, Chengdu 610041)

**Abstract:** A large number of epi-karst zones have developed on karst slopes, with strong infiltration, and the runoff production mechanism is very different from that of non-karst slopes. In order to improve the prediction accuracy of soil erosion models in karst areas, six runoff plots of different land-use types in the Chenqi Small Watershed of Puding County, Guizhou Province, were taken as the observation objects. The sediment and surface runoff data under different vegetation cover from two periods of 2007—2010 and 2015—2019 were analyzed to understand the laws of runoff and sediment production, and the erosive rainfall of each plot was calculated by using the rainfall erosion force deviation method. The results showed that: (1) Vegetation coverage was negatively correlated with runoff and sediment production on karst slopes. Under high vegetation coverage, heavy rains and extreme heavy rains were the main rainfall types that cause soil erosion on karst slopes. (2) Over the past decade of vegetation restoration, with the improvement of coverage, the annual average soil loss showed a downward trend, mostly less than 10 t/km<sup>2</sup>. (3) The karst slope developed fissures, serious underground leakage, small amount of soil and was not easy to be eroded. Except for a few extreme heavy rainstorm, most rainfall did not produce runoff and sediment. Therefore, it is recommended to set the threshold of erosive rainfall on karst slopes at 50 mm, which is generally significantly higher than that in non-karst areas.

收稿日期:2023-02-14

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB40020201);国家自然科学基金委 NSFC-INSF(中伊)国际(地区)合作重点项目(42261144672);国家自然科学基金项目(42077317);科技部科技基础资源调查专项(2021FY100701);贵州省科技厅基础研究重点项目(黔科合基础-ZK[2022]重点 048);中国科学院科技服务网络计划(STS计划)区域重点项目 A类(KFJ-STQY-ZD-2021-24-001);贵州省科技厅创新能力建设项目(黔科通[2012]114号)

第一作者:焦锡桦(1997—),女,硕士研究生,主要从事喀斯特土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:jiaoxihuaxx@163.com

通信作者:彭韬(1984—),男,研究员,博士,主要从事喀斯特生态环境、土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:pengtiao@mail.gyig.ac.cn

**Keywords:** erosive rainfall threshold; rainfall erosivity; karst; surface runoff coefficient

降雨是土壤侵蚀过程中起主导作用的一个自然因素。并不是所有降雨都产生水土流失,在黄土高原严重的土壤侵蚀主要由少数几次暴雨和大暴雨所引起,大多数降雨不产生径流<sup>[1]</sup>。发生径流情况下的降雨对土壤侵蚀的作用,被称作降雨侵蚀力(erosivity factor of rainfall,  $R$ )。降雨侵蚀力是土壤流失模型 USLE(universal soil loss equation)和 RUSLE(revised universal soil loss equation)中的 1 个主要指标,是在拟定侵蚀性降雨量值后计算出的侵蚀力<sup>[2]</sup>。准确合理的降雨侵蚀力对土壤流失的定量预报具有重要意义。

降雨侵蚀力值的计算方法最早由 Wischmeier 等<sup>[2]</sup>提出,他们分析了 35 个水土保持试验站 8 250 个休闲小区的降雨侵蚀资料后,确定降雨动能( $E$ )与最大 30 min 降雨强度( $I_{30}$ )的乘积  $E * I_{30}$  是表征  $R$  的最好指标,并提出通用土壤流失方程(USLE),拟定 12.7 mm 作为侵蚀性降雨量标准。此方法需要详细降雨资料,工作量大,资料获取难度高,因此各国学者开始建立简易估算模型,包括年降雨量、月降雨量、半月降雨量、日降雨量及次降雨量模型<sup>[3]</sup>。王万忠等<sup>[4]</sup>选择我国 10 个代表小区资料分析认为, $EI_{30}$  仍然是我国降雨侵蚀力的评价指标,并用频数分析和回归分析方法拟定雨量标准来衡量黄土地区侵蚀性降雨;谢云等<sup>[5]</sup>使用统计学为基础的降雨侵蚀力偏差法,即降雨侵蚀力计算误差、错选度、漏选度和剔除率作为指标计算出黄土高原坡面侵蚀的雨量标准为 12 mm,最大 30 min 雨强标准为 15 mm/h,平均雨强标准为 24 mm/h。该方法一经提出便得到广泛运用。刘和平等<sup>[6]</sup>利用此法和密云水土保持试验站 10 年小区资料确定北京侵蚀性降雨雨量标准为 18.9 mm 和最大 30 min 雨强为 17.8 mm/h;Todisco 等<sup>[7]</sup>也采用降雨侵蚀力偏差法计算意大利的侵蚀性降雨标准。在喀斯特地区,杜波等<sup>[8]</sup>选取关岭县蚂蝗田小流域径流小区,得到侵蚀性次降雨雨量为 10~14 mm,最大 30 min 雨强在 5~30 mm/h 发生产流产沙。

王万忠等<sup>[9]</sup>总结全国不同地区侵蚀性降雨量标准,认为我国普遍采用指标为 10 mm,并根据我国 125 个站点数据绘制全国降雨侵蚀力( $R$ )值等值线图,结果显示, $R$  值与雨量线一致从东南—西北向由大到小分布。但我国南方喀斯特地区地势复杂多变,土壤与碳酸盐岩之间土石界面直接接触,土壤蠕滑填充岩石孔隙之中,赋存在石沟、石缝裂隙中<sup>[10]</sup>,碳酸盐岩成土速率低,土壤总量少。喀斯特坡地存在重力

侵蚀、化学溶蚀和流水侵蚀 3 种土壤流失方式,不仅存在地表流失,地下漏失也十分强烈,降水和土壤均沿裂隙和落水洞向下渗漏,地表径流小,喀斯特坡地的地表产沙量低<sup>[10]</sup>。而黄土、红土、黑土以及紫色土地区不存在地下漏失,西南喀斯特地区坡地土壤稳定入渗率变化范围为 30~1308 mm/h<sup>[11]</sup>,特别是石灰岩广泛分布的地区,如普定陈旗小流域径流小区资料<sup>[12]</sup>显示次降雨量大于 60 mm,才产生较大的地表径流和土壤流失,广西环江喀斯特小流域资料<sup>[13]</sup>显示次降雨径流系数整体小于 5%。因此,喀斯特区侵蚀性降雨标准和  $R$  值应该有别于非喀斯特地区,但全国  $R$  值等值线图和侵蚀性降雨标准研究中没有考虑喀斯特坡地径流小区,且其存在地下漏失的特殊性,可能导致喀斯特地区水土流失模型计算土壤流失量远大于实测值。

本文以普定陈旗径流小区 2007—2010 年、2015—2019 年 2 期不同植被覆盖率情况下的产流产沙观测数据,探讨喀斯特坡地的侵蚀性降雨阈值及其影响因素,利用降雨侵蚀力偏差法确定适宜的侵蚀性降雨阈值,加强对喀斯特区地表水土流失规律的认识,为该区今后土壤流失量定量预报提供参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

陈旗小流域位于贵州省安顺市普定县后寨河流域内,是贵州高原典型喀斯特山地小流域,属于亚热带季风湿润气候,年均降水量 1 400 mm,降雨集中在 5—11 月。下伏基岩为中三叠统关岭组灰岩和泥灰岩,土壤分布不连续,以黑色石灰土为主<sup>[12]</sup>。为探明喀斯特坡地上不同土地利用对产流产沙的影响,在小流域内喀斯特山地上选取 6 种西南岩溶坡地典型土地利用类型建立径流小区,分别是火烧恢复灌草地[burned area (recover), BAR]、火烧迹地(burned area, BAU)、幼林地(young forestland, YFL)、坡耕地(cropland, CL)、稀疏灌丛(pastureland, PL)和复合植被地(combination vegetation land, CVL)。

该径流小区于 2007 年建立,2010 年后径流场停止扰动,坡耕地退耕种植梨经济林,其他小区自然恢复成为灌草、灌丛、次生林等,幼林地和复合植被地植被状况以及径流泥沙情况均可由其他小区代表,因此 2010 年后只监测 4 个径流场,使用 2007—2010 年、2015—2019 年 2 期观测数据用于研究。2007—2010 年,6 种不同土地利用类型径流小区的植被覆盖率较低,地表岩石出露,石漠化发育程度高;2015—2019 年径流场坡度、样地面积不变,而基岩出露率和群落盖度变化见表 1 和表 2。

表 1 2007—2010 年陈旗径流小区基本概况

径流场名称	人为作用方式	坡度/°	样地面积/m <sup>2</sup>	基岩出露率/%	整体覆盖率/%
BAU	火烧	32	684.3	37	0
BAR	火烧后恢复	37	1255.1	35	90
YFL	封山育林	35	1146.4	30	70
CL	玉米—油菜轮作	30	2440.4	30	0
PL	过度放牧	31	2890.0	50	2
CVL	轻度放牧	36	2439.6	35	50

表 2 2015—2019 年陈旗径流小区基本概况

径流场名称	植被类型	演替阶段	群落高度/m	基岩出露率/%	整体覆盖率/%
BAU	灌草	初期	2.0	10	90
BAR	灌草	灌草	1.5	56	60
CL	灌丛、次生林	乔灌	5.5	45	90
PL	梨经济林	初期	3.0	30	45

注:BAU 代表火烧迹地;BAR 代表火烧恢复灌草地;YFL 代表幼林地;CL 代表坡耕地;PL 代表稀疏灌丛地;CVL 代表复合植被地。下同。

1.2 研究方法

径流小区依山势而建,下端出口设立形状规则的分流池收集泥沙和径流。每次产流后,测量径流池水深计算次降雨的径流量和径流深;收集泥沙池中全部泥沙,风干称重计算地表土壤流失量。在稀疏灌丛和火烧迹地径流小区旁设有 HOBO 微型气象站,长期每 5 min 自动记录连续数据,精度为 0.20 mm。

采用谢云等<sup>[5]</sup>提出的降雨侵蚀力偏差法来确定侵蚀性降雨阈值,具体过程为:把所有引起土壤流失的降雨对应降雨侵蚀力相加,得到实际的降雨侵蚀力;之后按由大到小的顺序对所有降雨事件进行排序,从最大降雨量事件开始依次累加其降雨侵蚀力,直到累加数值等于或者最接近实际降雨侵蚀力,此时,对应降雨事件的雨量被确定为侵蚀性降雨的雨量标准。

在降雨事件中总存在发生侵蚀的小雨和不发生侵蚀的大雨,误选不可避免。因此,使用降雨侵蚀力偏差系数( $R_{cv}$ )来表示因误选造成的降雨侵蚀力计算误差。

$$R_{cv} = |R_{mis} - R_{ext}| / R_{tot} \quad (1)$$

式中: $R_{mis}$ 为发生侵蚀而被漏选的降雨侵蚀力之和; $R_{ext}$ 为不发生侵蚀而被误选的降雨侵蚀力之和; $R_{tot}$ 为所有降雨侵蚀力之和。降雨侵蚀力偏差系数介于 0~1。值越接近 0,降雨侵蚀力的计算精度越高。

拟定的侵蚀性降雨标准是否合理,可以由错选度(CE)、剔除率(SF)、损失率(EL)3 个指标来衡量。分别反映对侵蚀性降雨的区分能力、可减少的工作量、对侵蚀性降雨侵蚀力计算精度的影响。

$$CE = (N_{mis} + N_{ext}) / N_{tot} \quad (2)$$

式中: $N_{mis}$ 为发生侵蚀而被剔除的降雨次数; $N_{ext}$ 为未发

生侵蚀而被误选的降雨次数; $N_{tot}$ 为降雨事件总数。

$$SF = N_e / N_{tot} \quad (3)$$

式中: $N_e$ 为剔除的降雨事件数目。

$$EL = E_e / E_{tot} \quad (4)$$

式中: $E_e$ 为漏选的土壤侵蚀量; $E_{tot}$ 为土壤侵蚀总量。

2 结果与分析

2.1 喀斯特坡地地表产流产沙变化

2007—2010 年、2015—2019 年侵蚀性降雨次数分别为 56,29 次。经过十余年喀斯特坡地植被大量恢复后,产沙次数明显减少。表 3 为喀斯特坡地 2007—2010 年、2015—2019 年 2 期年均地表径流量、年均地表径流系数和年均土壤流失量。从表 3 可以看出,喀斯特坡地地表径流量、地表径流系数和土壤流失量均较小,特别是地表径流系数均低于 5%。不同土地利用方式下喀斯特坡地产流特征不同,在 2 期结果中稀疏灌丛地的径流量、径流系数和土壤流失量值均最大,这与其裸岩比和植被类型有一定关系。但总体第 2 期年均地表径流量整体呈显著下降趋势,年均地表径流量小于 10 mm,其中稀疏灌丛地下降最为明显,由 24.147 mm 下降至 8.143 mm;土壤流失量整体也呈下降趋势,火烧迹地和稀疏灌丛年均流失量分别减少 6.093,27.354 t/km<sup>2</sup>;火烧迹地和坡耕地随着干预停止且植被恢复,年均地表径流系数呈明显下降趋势,其余小区基本持平不变,均小于 3%。

表 3 2007—2010 年、2015—2019 年喀斯特坡地产流产沙情况

年份	径流场名称	年均地表径流量/mm	年均地表径流系数/%	年均土壤流失量/(t·km <sup>-2</sup> )
2007—2010	BAU	4.512	0.482	6.600
	BAR	1.951	0.208	0.379
	YFL	1.669	0.183	0.261
	CL	3.889	0.422	2.591
	PL	24.147	2.182	36.602
2015—2019	CVL	18.147	1.794	1.997
	BAU	0.464	0.045	0.503
	BAR	1.805	0.163	0.359
	CL	4.604	0.450	4.692
	PL	8.143	0.757	9.248

表 4 是根据降雨量、 $I_{30}$ 和降雨持续时间 3 个指标利用系统聚类分析划分出观测期间侵蚀性降雨类型。降雨可分为 5 个类型:I 型代表一般中等降雨;II 型代表持续时间短但强度大的降雨;III 型代表时间长的低强度降雨;IV 型代表时间长且降雨强度大的暴雨;V 型代表持续时间、强度和降雨量都最大的极端暴雨。总体来看,短时高强降雨类型产流产沙的频数占比最高,中等降雨次之,长时低强类占比最少。第 1 期产沙频数占比趋势为中等>短时高强>暴雨>长时

低强>极端暴雨;第 2 期趋势为暴雨>短时高强>极端暴雨>中等>长时低强。很明显,2015—2019 年产生水土流失的暴雨和极端暴雨占比大,占总有效降雨的 55%,而 2007—2010 年期间仅占 23%,这与毕

节石桥小流域产流量、产沙量与大雨和暴雨有显著性相关的研究<sup>[14]</sup>结果一致,说明在植被恢复后雨量少、降雨强度小的事件不易产生水土流失,雨量雨强与产沙量呈正相关<sup>[15]</sup>。

表 4 2007—2010 年、2015—2019 年侵蚀性降雨分类

降雨分类指标	I 型(中等降雨)			II 型(短时高强降雨)			III 型(长时低强降雨)			IV 型(暴雨)			V 型(极端暴雨)		
	降雨量	$I_{30}$	持续时间	降雨量	$I_{30}$	持续时间	降雨量	$I_{30}$	持续时间	降雨量	$I_{30}$	持续时间	降雨量	$I_{30}$	持续时间
平均值	25.9	13.6	673.9	25.2	28.6	178.4	27.4	4.1	1084.3	53.3	34.0	643.6	71.0	44.0	974.5
标准偏差	9.2	8.1	319.4	10.4	12.0	130.5	15.6	1.8	861.9	16.0	15.8	313.6	19.2	12.9	379.3
总频数	23			26			7			18			11		
频数	2007—2010 年			18			6			8			5		
	2015—2019 年			8			1			10			6		

注:降雨量单位为 mm; $I_{30}$ 单位为 mm/h;持续时间单位为 min。

## 2.2 次降雨量与地表径流系数的关系

2 次观测结果(图 1)均表明,陈旗小流域喀斯特石灰岩坡地地表径流系数极低,2007—2010 年火烧灌草地地表径流系数均未超过 1.2%,坡耕地和火烧迹地普遍<2%,稀疏灌丛地当降雨量>60 mm,次降雨地表径流系数才提高,可达 15%<sup>[16]</sup>。2015—2019 年火烧迹地小区地表径流系数全部低于 5%,火烧迹地、坡耕地和稀疏灌丛小区低于 5%的降雨分别占 96.2%,92.3%和 77.0%。

## 2.3 喀斯特坡地侵蚀性降雨阈值

理论上,侵蚀性降雨阈值是指裸坡地上发生侵蚀(大于微度)时的降雨量,本文将降雨前 24 h 没有产生降水作为 1 场事件。喀斯特坡地次降雨土壤流失量产出较低,全年土壤流失量介于 0.05~62.25 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[17]</sup>。本文取 0.025 t/km<sup>2</sup> 作为微度侵蚀标准,2007—2010 年期间径流小区大于 0.025 t/km<sup>2</sup> 事件的侵蚀量平均占总流失量的 97%,火烧恢复灌草地、火烧迹地、稀疏灌丛地和坡耕地大于 0.025 t/km<sup>2</sup> 事件的占比分别为 90.3%,99.6%,98.0%和 99.9%,可以有效识别到侵蚀性事件。2007—2010 年期间陈旗径流小区中的火烧迹地、火烧恢复灌草地、坡耕地和稀疏灌丛 4 个小区植被较差,可将其视为裸坡地,故不讨论幼林地和复合植被地侵蚀性降雨量。陈旗喀斯特坡地径流小区 2007—2010 年期间共计 133 次降雨,其中造成 BAU、BAR、PL、CL 径流小区土壤流失的次数分别为 33,13,22,14 次。表 5 统计分析了 2007—2010 年的裸坡地侵蚀性降雨阈值,分别为 49.4,49.4,52.2,48.0 mm,此阶段喀斯特坡地侵蚀性降雨阈值总体为 50.0 mm。全部径流小区的偏差系数低于 1%,损失率低于 25%,错选率低于 30%,剔除率达到 90%。稀疏灌丛、坡耕地侵蚀性标准的损失率极低,表明在这个降雨量下至少有 90%侵蚀事件被

覆盖,结果准确性高。研究结果显示,4 个不同土地利用类型区侵蚀性降雨阈值的大小为稀疏灌丛地>坡耕地>火烧恢复灌草地=火烧迹地,与不同土地利用小区产流产沙特征基本一致。

## 3 讨论

### 3.1 典型喀斯特坡地 10 年植被恢复对地表径流和土壤流失的影响

喀斯特坡地大部分降雨沿岩溶裂隙进入地下,只有少部分转化为地表径流,地下漏失强烈,坡面产流量极少,年均地表径流系数非常低,多小于 5%,陈洪松等<sup>[13]</sup>对广西环江喀斯特小流域的研究表明,2006—2010 年期间不同土地利用方式次降雨径流系数整体小于 5%,与本文研究结果一致;魏兴萍等<sup>[18]</sup>研究重庆南坪镇岩溶槽谷区发现,只有大雨(25~50 mm)甚至是>50 mm 的暴雨才产生地表径流,本文表 4 显示暴雨和极端暴雨也是引起土壤流失最主要的降雨事件。产生这种现象的主要原因是石灰岩坡地地下孔隙发育,喀斯特产流除地表产流还存在地下流、壤中流等多种形式<sup>[19]</sup>,降雨极易由岩土界面入渗到表层岩溶带和地下,一般情况下裂隙蓄满之后才会产流<sup>[20]</sup>,因此地表径流系数低。

2 期结果对比(表 3)表明,随人工干预停止,坡耕地、火烧迹地径流系数呈下降的趋势,其余小区基本持平,年均土壤流失量整体下降且值较低,多小于 10 t/km<sup>2</sup>,说明植被覆盖与产流产沙之间存在相关性,植被覆盖的增加导致更多的水渗入土壤和表层岩溶<sup>[21]</sup>,进而减小对土壤的侵蚀力。植被恢复后,逐渐发育大量灌草、灌丛等地表覆盖物、经济林、次生林等高层覆盖物(表 2),从 1.5~5.5 m 均有覆盖,整体植被覆盖度越高,减沙减流的作用越显著。一方面该径流小区裸岩占比 30%以上,土壤分布不连续,石漠化严重出现无土可流的情况;另一方面,植被恢复后,蒸散发消耗更多的水分<sup>[22]</sup>,草地、灌丛等减小雨滴的打击力,枯枝落叶

层减弱降雨动能,还可以减缓地表径流流速<sup>[23]</sup>,减小地表径流携带泥沙的能力;植物地下部分根系生长影响土壤的紧密度,土壤裂隙更加发育,增强土壤中降

水的入渗;如稀疏灌丛地在前期径流量、径流系数和土壤流失量都较高,随植被恢复为灌丛和次生林,植被盖度增加至 90%,其值大幅度下降。

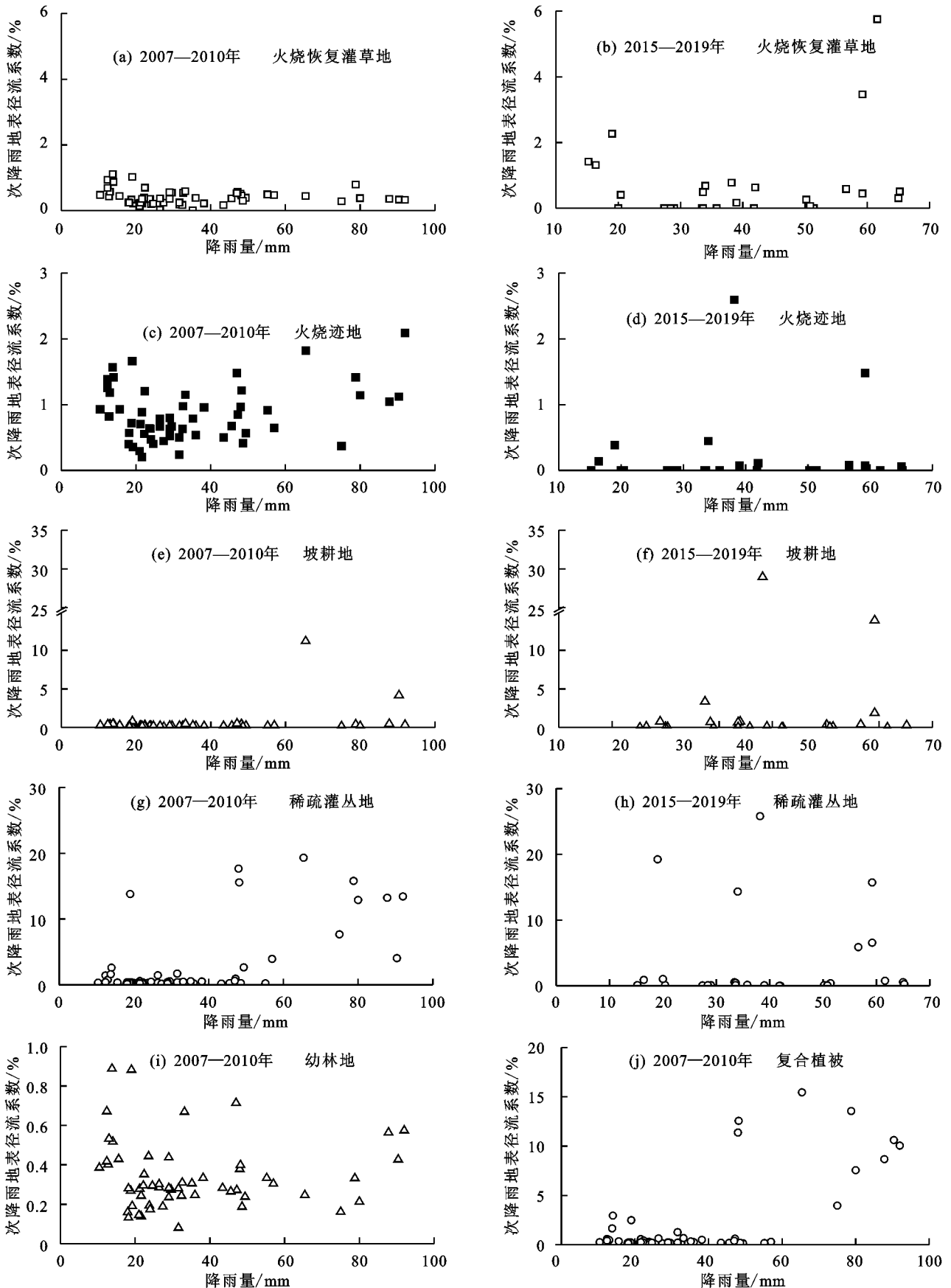


图 1 2007—2010 年、2015—2019 年径流小区降雨与地表径流系数关系

表 5 4 个径流小区 2007—2010 年侵蚀性降雨阈值

土地利用 类型	标准/ mm	偏差 系数/%	损失率/ %	错选率/ %	剔除率/ %
BAU	49.4	0.98	20.34	27.3	91.7
BAR	49.4	0.25	23.60	7.5	91.7
CL	52.2	0.54	9.45	10.5	92.5
PL	48.0	0.86	7.90	9.0	89.5

### 3.2 喀斯特坡地产流产沙特征

2 期降雨类型的划分对比说明, 植被恢复后需要更大强度和更高雨量的降雨才能产流产沙, 2015—2019 年暴雨和极端暴雨产沙的频数比例明显上升。低强度降雨在石灰岩坡地上随岩溶裂隙和岩土界面向地下入渗, 在喀斯特模拟降雨试验中降雨强度为 30 mm/h 时水土流失以地下漏失为主, 当降雨强度 > 50 mm/h 时, 土壤侵蚀向地表转变<sup>[24]</sup>。已有研究<sup>[11]</sup>表明, 喀斯特坡地土壤稳定入渗率变化范围为 30~1 308 mm/h, 因而当降雨雨强大于土壤入渗速率时, 坡地开始产生地表径流; 当降雨雨强小于入渗速率时, 降水首先沿裂隙向下渗漏, 直至岩石裂隙饱和后, 开始产出地表径流。因此, 高雨强和高降雨量是喀斯特坡地产流的重要因素。

暴雨和极端暴雨共 39 次事件, 占总侵蚀性降雨事件的 45%, 却集中 70% 土壤流失量, 且在 5 类降雨中降雨量指标均较高, 最低也在 25 mm 以上, 属于雨量分类中的大雨范围, 这也说明次降雨量足够大时, 岩石裂隙蓄满水之后, 此时雨强对土壤侵蚀的影响程度提高。观测数据显示, 在 2007 年 7 月 22 日降雨量为 49.4 mm,  $I_{30}$  为 32.8 mm/h, 此时 6 个径流小区都产出泥沙, 坡耕地产出 7.85 t/km<sup>2</sup>; 而 2009 年 7 月 24 日的  $I_{30}$  为 33.6 mm/h, 但降雨量较小, 为 24.6 mm, 此情况下没有土壤流失; 2009 年 9 月 20 日  $I_{30}$  达到 43.6 mm/h, 降雨量为 31.6 mm, 也没有产出泥沙。Peng 等<sup>[16]</sup>研究喀斯特坡地发现, 具有较大前期降水的暴雨事件更易产生较大水土流失, 可能是因为前期降雨使岩溶裂隙水分饱和, 同样的降雨事件下会增加地表径流和泥沙的产出。非喀斯特坡地如西北黄土区降雨强度是引起土壤流失的主要因素, 而对南方土壤流失影响程度高的是降雨量<sup>[9]</sup>, 特别的喀斯特坡地是表层岩溶带产流、蓄满产流和超渗产流的集合, 但以蓄满产流为主<sup>[13]</sup>。可见, 在喀斯特坡地降雨入渗到岩溶裂隙饱和后, 降雨强度对产流产沙的影响程度才提高。因此, 喀斯特区侵蚀性降雨阈值可采用次降雨的单一降雨量指标或降雨量和雨强复合指标来表示。本文选择从次降雨量角度来进行侵蚀性降雨阈值的探讨。

### 3.3 喀斯特坡地侵蚀性降雨阈值影响因素

喀斯特坡地侵蚀性降雨量(50 mm)远大于非喀斯特地区。表 6 汇总部分地区侵蚀性降雨标准, 紫色顺坡农耕地 11.3 mm<sup>[25]</sup>、北京 18.9 mm<sup>[6]</sup>、皖南 13.6 mm<sup>[26]</sup>、贵州黄壤 15 mm, 以及常用标准 12.7 mm。喀斯特与非喀斯特区的主要区别在于地质背景, 岩溶坡地的土壤流失规律不同于非喀斯特区: (1) 喀斯特坡地的土壤和碳酸盐岩直接接触, 石灰岩颗粒间的孔隙小, 质地紧密, 孔隙不透水, 发育大量构造裂隙, 水沿垂直节理向下渗透。坡面土壤侵蚀以地下漏蚀为主, 可以占到 75% 以上<sup>[16]</sup>, 一部分土壤充填岩石裂隙, 另一部分细颗粒随入渗流进入地下河, 最后出露或流入地表河。(2) 喀斯特坡地以蓄满产流为主, 地表径流作为土壤颗粒移动的主要载体, 其量少, 对土壤的携带少、冲蚀性弱, 加之坡地上发育有溶沟、溶槽, 其中的土壤被入渗径流带入表层岩溶带或者蠕滑充填到表层岩溶带的孔隙中, 不易侵蚀。(3) 石灰岩坡地土层浅薄, 不连续, 难以覆盖全部坡地, 例如, 稀疏灌丛小区, 裸岩比例 50%, 基岩出露率大, 石漠化现象严重, 表层土壤越薄, 出现少有或无土可流的情况。非喀斯特区没有类似“筛孔”一样的下垫面, 所以土壤遇见降水产生面蚀、沟蚀等, 同样的降雨条件下喀斯特区产出的地表泥沙比非喀斯特区量少, 因此, 侵蚀性降雨阈值较高。

表 6 各地区侵蚀性降雨标准

研究区	土壤 类型	侵蚀性降雨 标准/mm	年份	参考 文献
北京	褐土	18.9	2007	刘和平等 <sup>[6]</sup>
甘肃西峰	黄土	10.0	1984	江忠善等 <sup>[27]</sup>
安徽歙县	棕红土	13.6	2004	程庆杏等 <sup>[26]</sup>
江西鄱阳湖	红壤	14.0	2021	田杏敏等 <sup>[28]</sup>
四川	紫色土	11.3	2013	李林育等 <sup>[25]</sup>
贵州省中部	黄壤	15.0	2014	张文源等 <sup>[29]</sup>
贵州关岭县	黄壤	14.5	2016	杜波等 <sup>[8]</sup>

## 4 结论

喀斯特坡地年均地表径流量、年均土壤流失量均较小, 产流产沙特征随着植被覆盖条件变化而发生改变, 降雨强度和雨量是坡地产流产沙的重要影响因素。(1) 人为干扰停止后, 植被覆盖度提高, 暴雨和极端暴雨是造成喀斯特坡地水土流失的主要雨型; (2) 年均地表径流系数低, 小于 5%, 随植被盖度的提高, 年均土壤流失量呈下降趋势, 且其值较低, 多小于 10 t/km<sup>2</sup>; (3) 降雨类型划分和侵蚀性降雨阈值中高剔除率说明喀斯特地区全年只有少数几场降雨产生

大量水土流失;(4)喀斯特坡地降雨沿裂隙迅速入渗,溶沟溶槽发育,土壤易充填孔隙,不易被侵蚀,因此侵蚀性降雨阈值(50 mm)总体高于非喀斯特地区。

侵蚀性降雨阈值与坡地地面物质组成有关,如岩性、土壤性质、土石比等,陈旗径流小区 2007—2010 年也不是标准裸坡地,此次初步研究得出的侵蚀性降雨阈值(50 mm)的代表性有待进一步验证。建议开展南方喀斯特主要类型区不同坡地地面物质组成的侵蚀性降雨径流小区研究,为建立喀斯特坡地土壤流失预测模型奠定坚实科学基础。

#### 参考文献:

- [1] 周佩华,王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J].水土保持学报,1992,6(3):1-5.
- [2] Wischmeier W H. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[J]. Agriculture Handbook,1978,537:285-291.
- [3] 杨轩.降雨侵蚀力计算方法研究进展[J].安徽农业科学,2019,47(16):5-8.
- [4] 王万忠,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):7-18.
- [5] 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.
- [6] 刘和平,袁爱萍,路炳军,等.北京侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持研究,2007,14(1):215-217,220.
- [7] Todisco F, Vergni L, Vinci A, et al. Practical thresholds to distinguish erosive and rill rainfall events[J]. Journal of Hydrology,2019,579:e124173.
- [8] 杜波,唐丽霞,潘佑静,等.贵州喀斯特地区侵蚀性次降雨产流产沙特征研究[J].西南林业大学学报,2016,36(5):111-117.
- [9] 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,1996,16(5):1-20.
- [10] 张信宝,王世杰.浅议喀斯特流域土壤地下漏失的界定[J].中国岩溶,2016,35(5):602-603.
- [11] 方胜,彭韬,王世杰,等.喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究[J].地球与环境,2014,42(1):1-10.
- [12] 彭韬,王世杰,张信宝,等.喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J].地球与环境,2008,36(2):125-129.
- [13] 陈洪松,杨静,傅伟,等.桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J].农业工程学报,2012,28(16):121-126.
- [14] 张兴奇,顾礼彬,张科利,等.坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):18-22,72.
- [15] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J].水土保持通报,2020,40(1):9-16.
- [16] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on Karst slopes in southwest China[J].Catena,2012,90:53-62.
- [17] 彭韬,杨涛,王世杰,等.喀斯特坡地土壤流失监测结果简报[J].地球与环境,2009,37(2):126-130.
- [18] 魏兴萍,谢世友,张志伟,等.重庆南平镇岩溶槽谷区不同土地利用类型地表水土流失[J].农业工程学报,2011,27(6):42-46.
- [19] 郭纯青.中国岩溶生态水文学[M].北京:地质出版社,2007.
- [20] 郑长统,梁虹.喀斯特流域产流特性分析[J].水科学与工程学报,2009(4):33-34.
- [21] Lian J J, Chen H S, Wang F, et al. Separating the relative contributions of climate change and ecological restoration to runoff change in a mesoscale Karst Basin[J].Catena,2020,194:104-116.
- [22] Cai L B, Chen X, Huang R C, et al. Runoff change induced by vegetation recovery and climate change over carbonate and non-carbonate areas in the Karst region of South-west China[J].Journal of Hydrology,2022,604:e127231.
- [23] 杨文利,樊后保.森林植被冠层对降雨侵蚀力的减缓效应[J].福建林学院学报,2007,27(4):328-332.
- [24] 袁应飞,戴全厚,李昌兰,等.喀斯特典型坡耕地模拟降雨条件下的土壤侵蚀响应[J].水土保持学报,2016,30(3):24-28.
- [25] 李林育,王志杰,焦菊英.紫色丘陵区侵蚀性降雨与降雨侵蚀力特征[J].中国水土保持科学,2013,11(1):8-16.
- [26] 程庆杏,吕万民,吴百林.土壤侵蚀的雨量标准研究初报[J].中国水土保持科学,2004,2(3):90-92.
- [27] 江忠善,李秀英.黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):40-45.
- [28] 田杏敏,李凤英,何小武,等.鄱阳湖流域日降雨的侵蚀性雨量标准研究[J].水土保持学报,2021,35(3):185-189.
- [29] 张文源,王百田,杨光傲,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.