

喀斯特土石异质坡面产流产沙规律

陈磊¹, 张科利^{1,2}, 马芊红¹, 顾再柯³, 曹梓豪¹, 杨志成¹

(1.北京师范大学地理科学学部,北京 100875;
2.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875;3.贵州省水土保持监测站,贵阳 550002)

摘要: 侵蚀性降雨是引起喀斯特黄壤坡面水土流失的主要动力因子。采用贵州省遵义市泮洋水流域 2018—2020 年 4 个径流小区 92 次侵蚀性降雨产流产沙实测数据,研究次降雨条件下,裸露坡面和块石出露小区对产流产沙的影响。结果表明:(1)侵蚀性降雨可以分为 A、B、C 3 类,A 类降雨是造成喀斯特黄壤坡面土壤侵蚀的主要雨型。侵蚀性降雨的标准为次降雨量>6.6 mm 或 $I_{30}>3.6$ mm/h。(2)裸露坡面 63.27% 的侵蚀性降雨径流深<0.4 mm,66.30% 的侵蚀性降雨土壤流失量<1 g/m²,坡面土壤侵蚀量主要是由个别的次降雨所贡献。比较 3 类降雨,产流产沙的规律总体上表现为 A 雨型>C 雨型>B 雨型。(3)土壤流失量主要是由径流深决定,径流深直接决定着坡面产沙的多少。A 类降雨中 20 mm 降雨量是喀斯特黄壤坡面径流深和土壤流失量明显增加的突变值。(4)3 类降雨下,块石出露增加了坡面产流量,产流量随着出露率的增加而变大。但产沙量的变化比较复杂,A 类降雨下,产沙量随着块石出露率的提高呈明显增加。研究结果对喀斯特坡面水土流失治理和土壤侵蚀预报模型的建立具有重要意义。

关键词: 喀斯特; 黄壤坡面; 块石出露; 侵蚀性降雨; 产流产沙

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0082-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.05.012

Law of Runoff and Sediment Yield on Karst
Heterogeneous Slope of Soil and Rock

CHEN Lei¹, ZHANG Keli^{1,2}, MA Qianhong¹, GU Zaike³, CAO Zihao¹, YANG Zhicheng¹

(1.Faculty of Geographic Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875;
2.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University,
Beijing 100875; 3. Guizhou Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang 550002)

Abstract: Erosive rainfall is the main dynamic factor causing soil and water loss on the karst yellow soil slope. Using the measured data of 92 erosive rainfall runoff and sediment yield from 4 runoff plots from 2018 to 2020 at Huyangshui watershed in Zunyi City of Guizhou Province, this paper studied the response of runoff and sediment yield to bare slope and rocky outcropping plots under single rainfall events. The results showed that: (1) Erosive rainfall could be divided into three types A, B and C. A rainfall was the main type causing soil erosion on karst yellow soil slope. The standard of erosive rainfall was single rainfall>6.6 mm or $I_{30}>3.6$ mm/h. (2) On the bare slope, totally 63.27% of the erosive rainfall runoff depth was less than 0.4 mm, and 66.30% of the erosive rainfall soil loss was less than 1 g/m², and the soil erosion was mainly contributed by some single rainfall events. Contrasting the three types of rainfall, the law of runoff and sediment yield was as type A>type C>type B. (3) Soil loss amount was mainly determined by runoff depth, which directly determined the sediment yield on slope. 20 mm was a mutation value in type A rainfall leading to the apparent increase in runoff depth and soil loss on karst yellow soil slope. (4) Under the three types of rainfall, the plot runoff yield increased with the outcrop rate. That is to say, rock outcrop increased the runoff yield of the slope. But the change of sediment yield was complicated. In case of type A rainfall, sediment yield increased obviously with the outcrop rates of rocks. These results have great significance for the management of soil

收稿日期: 2022-02-15
资助项目: 国家自然科学基金项目(41730748)
第一作者: 陈磊(1994—),男,博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 202031051014@mail.bnu.edu.cn
通信作者: 张科利(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: keli@bnu.edu.cn

erosion and the establishment of soil erosion prediction model on karst slopes.

Keywords: karst; yellow soil slope; outcropping rock; erosive rainfall; runoff and sediment yield

西南地区是世界三大岩溶区集中分布的亚洲片区中心地带,碳酸盐出露广布,岩溶发育强烈。喀斯特地区由于复杂的人文和地理过程,受降雨、地形坡度、下垫面基岩岩性、地表植被覆盖类型、人类活动和管理方式等影响,特殊的地质背景和岩溶环境伴随着严重的土壤侵蚀和水土流失^[1-2]。喀斯特地区的水土流失过程具有显著的3个特征:易发性、隐蔽性、复杂性^[3]。喀斯特地区裂隙、岩溶漏斗、落水洞、地下暗河等发育,水土流失呈地上地下二元结构流失,而非喀斯特地区水土流失主要体现为降雨挟带泥沙顺坡而下,进入地表水系。土壤侵蚀的驱动因素很多,包括风蚀、水蚀和重力侵蚀,但侵蚀性降雨是引起喀斯特坡面土壤侵蚀的主要动力因子^[4-5]。

侵蚀性降雨与产流产沙的研究主要集中在侵蚀性雨量标准、坡面产流产沙与降雨特征值的定量关系、降雨特征值与侵蚀模数的比较等方面。Wschmeier等^[6]提出土壤侵蚀的相关因子包括降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡长与坡度因子、作物覆盖与管理因子、土壤保持措施因子,基于对美国地区8 000多个小区的分析,认为侵蚀性雨量标准为12.7 mm。黄土高原的降雨侵蚀主要集中在7—8月,且大雨和中雨对坡面土壤侵蚀的贡献最大^[7]。周子渊等^[8]发现,黄土丘陵区10°和15°坡度下,灌木林沙棘、乔木林油松的土壤侵蚀量明显较低。在黄土高原坡面上,侵蚀性雨量标准为12 mm^[9]。北方土石山区棕壤坡面侵蚀性雨量标准为8 mm,中频率、长历时、大雨量、中雨强类型的降雨对该区土壤侵蚀的累积贡献率最大^[10]。喀斯特地区降雨和径流的周期变化具有同步性^[11],但喀斯特坡面在不同降雨类型下产流产沙存在明显差异^[12]。黔西高原地区中雨以上降雨事件的产沙量约占总产沙量的99.5%,6—7月雨季中侵蚀性降雨的产沙量占总产沙量的78%左右^[13]。基于对喀斯特坡面不同生物措施下产流产沙的分析发现,中历时、大雨量、中雨强类型的降雨侵蚀力最大^[14]。顾礼彬等^[15]利用黔西高原野外观测的径流泥沙数据得出,坡面降雨量与产沙量呈显著的指数关系。纪启芳等^[16]发现,喀斯特坡面不同土地利用方式下产流产沙存在明显差异,产流量与产沙量呈线性关系,且产流产沙量与最大30 min雨强、降雨量和坡度均呈幂函数关系。

目前这些研究已经从多角度分析了侵蚀性降雨的特征及其与产流产沙的关系,为水土保持工作提供了重要指导作用,但关于喀斯特黄壤土石异质坡面次

降雨下的产流产沙研究较少。由于国外土壤侵蚀主要发生在缓坡上,而我国>15°的陡坡耕地上土壤侵蚀严重。因此更需要更多的野外实测资料探究其规律,以指导该区水土保持的预防布设。鉴于此,本文基于长期野外径流小区观测试验,利用2018—2020年泮洋水流域坡面径流小区的实测数据,揭示了黄壤坡面侵蚀性降雨的特征类型和标准,对比分析了喀斯特黄壤裸露坡面和块石出露小区对产流产沙的响应,为喀斯特地区石漠化的综合治理、水土资源保护和利用及黄壤坡面土壤侵蚀模型的建立提供有价值的信息。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

水土保持监测点位于贵州省遵义市鸭溪镇仁和村7组(106°37′00″E,27°37′00″N),所属泮洋水小流域,流域内坡耕地面积大,水土流失面积占比为47.24%。小流域所属水系为长江流域乌江水系赤水河中上游。气候为中亚热带湿润季风气候,多年平均降水量1 024 mm,多年平均气温14.6℃,流域内的地表水、地下水主要以岩溶洞水和裂隙水的形式存在。地貌类型为中低山丘陵地貌,处大娄山脉南侧陡坡地带。植被类型以中亚热带常绿阔叶林为主。岩性以灰岩、结晶灰岩、泥灰岩、和页岩为主。土壤为喀斯特典型的酸性黄壤,有机质含量和土壤肥力较低。

1.2 径流小区监测维护

监测站于2006年修建完成,小区坡度为15°,长为20 m,宽为5 m,面积均为100 m²。本文依据小区内不同块石出露,选取1,2,3,4号坡面裸露小区,其块石裸露率分别为0,2.3%,3.8%,5.6%,1号小区为裸露坡面作为对照。数据选取2018—2020年3年监测期内保存较为完整的实测数据。为避免监测结果受其他因素干扰,监测期内定期维护径流小区,及时清理集流槽、出水口等位置的杂草、枯落物等,并保证径流小区杂草盖度低于5%,平均每10天拔草1次。

1.3 研究方法

1.3.1 次降雨径流泥沙收集及指标计算 在坡面径流小区附近安装HOB0 U30自记雨量计和1个雨量筒,相互校验来获得降雨量、降雨历时、平均降雨强度等降雨过程数据。径流小区主要监测内容包括:产流产沙量、径流深、土壤侵蚀力。径流泥沙的监测方法为每次降雨后检查径流桶中是否有产流,有产流则首先记录降雨场次并用直尺量水深,3次重复并据此计算产流量。随后用搅拌棒把径流泥沙搅拌均匀并用采样瓶收集浑水1 000 mL,2个重复并记录体积,

若产流较少不足收集 2 瓶,则收集全部径流并记录采样瓶水样体积。径流泥沙收集完后清理集流桶,并收集集流槽中泥沙至饭盒中,做好记录后带回实验室烘干称重。收集的浑水样品在实验室内静置 48 h 后倒掉上清液,把泥沙移至饭盒中并置于烘箱中恒温 105 ℃ 烘干称重,结合产流量,计算次降雨的土壤侵蚀量。

(1)径流深是某一时间段内的径流总量平铺在整个小区所得到的水层深度,计算公式为:

$$H = \frac{h \cdot S}{A}$$

式中: H 为径流深(m); h 为水深(m); S 为集流池底面积(m^2); A 为径流小区坡面面积(m^2)。

(2)降雨总动能计算公式为:

$$E = \sum_{r=1}^n (e_r P_r)$$

式中: E 为 1 次降雨总动能(MJ/hm^2); e_r 为某时段单位降雨动能 [$MJ/(hm^2 \cdot mm)$]; P_r 为对应时段降雨量(mm)。

(3)降雨侵蚀力计算公式为:

$$R = E \cdot I_{30}$$

式中: R 为次降雨侵蚀力 [$(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$]; I_{30} 为最大 30 min 雨强(mm/h)。

(4)单位降雨动能计算公式为:

$$e_m = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05 i_m)]$$

式中: e_m 为单位降雨动能 [$MJ/(hm^2 \cdot mm)$]; i_m 为每个时段的雨强,称为断点雨强(mm/h)。

(5)次降雨侵蚀模数为监测期内降雨量在单位面积上的产沙量。土壤侵蚀模数计算公式为:

$$M = T/A$$

式中: M 为次降雨下土壤侵蚀模数(g/m^2); T 为次降雨量产沙量(g); A 为小区面积(m^2)。

1.3.2 降雨类型划分及数据处理 在所有的降雨事件中,只有部分降雨能够发生土壤侵蚀,将发生侵蚀的降雨称为侵蚀性降雨。不同降雨强度的结合在次降雨过程中形成了雨型,降雨类型是影响侵蚀过程的主要因子之一。2018—2020 年监测期间径流小区共发生侵蚀性降雨 92 次,为了更准确地探究土石异质坡面对侵蚀性降雨的响应,以平均雨强、降雨历时、降雨量为特征参数,在 SPSS 26 软件中进行系统聚类 and k —均值聚类,本文基于聚类分析的 25%,75%分位数来描述 3 类降雨的具体特征指标。由聚类谱系图可知,侵蚀性降雨可分为 3 类(表 1)。数据分析和图片处理在 Excel 2019 和 Origin 2021 软件中进行。

A 雨型:小—中雨量(6.05~21.95 mm)、短历时(257.45~668.58 min)、大雨强(0~2.88 mm/h)、高频率 84.78%;B 雨型:中—大雨量(9.35~55.35 mm)、中历时

(1 165.00~2 050.90 min)、中雨强(0~1.20 mm/h)、中频率 10.87%;C 雨型:大雨量(26.65~87.15 mm)、长历时(3 653.75~4 336.25 min)、小雨强(0~0.67 mm/h)、低频率 4.35%。就侵蚀性降雨的发生频次而言,A 雨型发生了 78 次,占样本量的 84.78%,表明在 A 雨型环境下坡面产流产沙现象频繁易发。依据总的降雨侵蚀力,A 雨型 4 808.46 ($MJ \cdot mm$)/($hm^2 \cdot h$)>B 雨型 1 031.07 ($MJ \cdot mm$)/($hm^2 \cdot h$)>C 雨型 393.04 ($MJ \cdot mm$)/($hm^2 \cdot h$)。从土壤侵蚀模数来看,2018—2020 年 4 个径流小区由 3 类降雨引起总的土壤侵蚀模数为 A 类降雨 2 380.98 g/m^2 ,B 类降雨 164.24 g/m^2 ,C 类降雨 973.03 g/m^2 。从产流产沙的次数及土壤流失量来看,喀斯特坡面主要的侵蚀性降雨为 A 雨型:小—中雨量、短历时、大雨强、高频率,降雨的产流形式多为超渗产流。综合分析来看,与降雨量相比,雨强对土壤流失量的贡献率更大,特别是短历时的强降雨下,降雨对土壤的分离溅蚀作用更强,增加了水流挟沙力,导致地表产流产沙增加。对于侵蚀性降雨发生的频率、总的降雨侵蚀力而言,三者的规律整体呈现为 A 雨型>B 雨型>C 雨型。

2 结果与分析

2.1 侵蚀性降雨标准的确定

侵蚀性降雨引起了喀斯特坡面水土流失,确定坡面侵蚀性降雨的阈值,不仅对于研究降雨特征与土壤侵蚀关系具有重要理论意义,而且对于小流域坡面土壤侵蚀模型的建立及水土保持的预防调控具有重要实际价值。目前,雨量和雨强标准一般用来界定描述侵蚀性标准。由于前期土壤含水量对土壤侵蚀影响显著,有时候 1 次微量的 1 mm 降水也会引起水土流失,而在普通情况下,微量降雨并不会带来水土流失。小雨量、小雨强的侵蚀性降雨会造成低估侵蚀性降雨标准,为了避免前期土壤含水量对土壤侵蚀的影响,依据 2018—2020 年在研究区监测期内的 92 次侵蚀性降雨数据,结合上述侵蚀性降雨的 3 种分类。采用王万忠^[17]提出的 $P=80\%$ 经验频率法,忽略掉一些极短历时降雨产生的侵蚀现象,确定雨量和雨强影响的侵蚀性降雨标准的阈值。具体分析为:把侵蚀性降雨的次降雨量按照降序排列,依据公式

$$P = \frac{a}{b+1} \times 100\%$$

计算出经验频率值 P (式中: a 为次降雨的序列号; b 为次降雨的总样本数)。计算出 P ,然后绘制出次降雨量与 P 的频率曲线(图 1),在曲线上获得 $P=80\%$ 时的次降雨量即为该区侵蚀性降雨的基本雨量标准。同理,求得最大 30 min 雨强 I_{30} 的临界标准。因此,15°喀斯特黄壤裸露坡面侵蚀性降雨的标准为次降雨量 6.6 mm 或 I_{30} 为 3.6 mm/h。

表 1 不同侵蚀性降雨类型特征

雨型	样本数	比例/%	降雨特征指标					
			参数	降雨量/ mm	降雨 历时/min	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	<i>I</i> ₃₀ / (mm·h ⁻¹)	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)
A	78	84.78	总和	1119.20	35958.10	185.37	1005.00	4808.46
			均值	14.35	461.00	2.38	12.88	61.65
			最小值	1.00	7.40	0	1.20	0.13
			最大值	48.60	963.20	24.32	53.20	458.58
			P ₂₅	6.05	257.45	0	4.30	3.44
			P ₇₅	21.95	668.58	2.88	19.00	81.01
			总和	331.00	15842.20	4.09	105.60	1031.07
B	10	10.87	均值	33.10	1584.22	0.41	10.56	103.11
			最小值	7.40	1036.00	0	2.00	1.75
			最大值	70.00	2530.00	1.29	40.40	659.83
			P ₂₅	9.35	1165.00	0	2.00	2.99
			P ₇₅	55.35	2050.90	1.20	14.20	83.36
			总和	218.00	15760.00	0.89	36.00	393.04
			均值	54.50	3940.00	0.22	9.00	98.26
C	4	4.35	最小值	24.60	3635.00	0	0.80	0.17
			最大值	94.00	4465.00	0.89	24.40	274.01
			P ₂₅	26.65	3653.75	0	1.30	2.88
			P ₇₅	87.15	4336.25	0.67	20.30	232.47

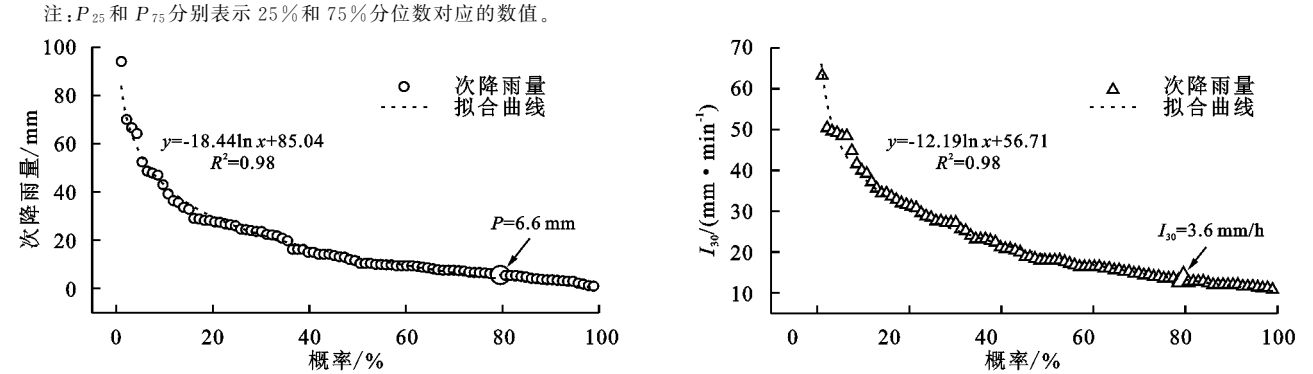


图 1 次降雨量、 I_{30} 和经验频率 (P) 的曲线

2.2 裸露坡面产流对侵蚀性降雨的响应

裸露坡面在 3 类侵蚀性降雨下的产流用径流深来表示,为更好地阐述 3 类降雨下裸露坡面产流的主要驱动力,从降雨量、最大 30 min 雨强、降雨总动能、降雨侵蚀力 4 个降雨特征因子出发,分析建立了次降雨下坡面产流的驱动关系(图 2)。为方便对比分析,统一采用线性拟合,通过 R^2 的对比发现,总体上降雨量对坡面产流的贡献最大,对于产流贡献率为降雨量>降雨总动能>降雨侵蚀力>最大 30 min 雨强。侵蚀性降雨主要伴随以下特征,降雨量集中在 0~20 mm,最大 30 min 雨强在 0~10 mm/h 内,降雨总动能<5 MJ·mm,降雨侵蚀力在 0~100(MJ·mm)/(hm²·h)。喀斯特黄壤裸露坡面侵蚀性降雨产流的径流深多数<0.4 mm,A 类降雨中有 54 次,B 类降雨有 6 次,C 类降雨中有 2 次,径流深<0.4 mm 的侵

蚀性降雨占据 63.27%。

A 类降雨中,平均径流深为 0.68 mm,最大径流深 13.90 mm 出现在 2019 年 6 月 12 日的次降雨中,出现在这次降雨中的原因是 2019 年 6 月 8 日降雨 48.6 mm、6 月 9 日降雨 26.4 mm、6 月 10 日降雨 5 mm,前期连续的侵蚀性降雨导致土壤水分饱和,雨水基本不在下渗,短历时的强降雨带来超渗产流并搬运走大量泥沙。B 类降雨中,平均径流深为 0.44 mm,C 类降雨中,除 2019 年 9 月 10 日发生的 94 mm 暴雨事件外,平均径流深为 0.60 mm。对比 3 类降雨,产流的规律总体上表现为,平均径流深 A 雨型>C 雨型>B 雨型,A 类降雨中,当次降雨量<20 mm 时,平均径流深为 0.16 mm,当次降雨量>20 mm 时,平均径流深为 30.67 mm。A 类降雨中 20 mm 降雨量是喀斯特黄壤坡面径流深,明显增加的突变值。

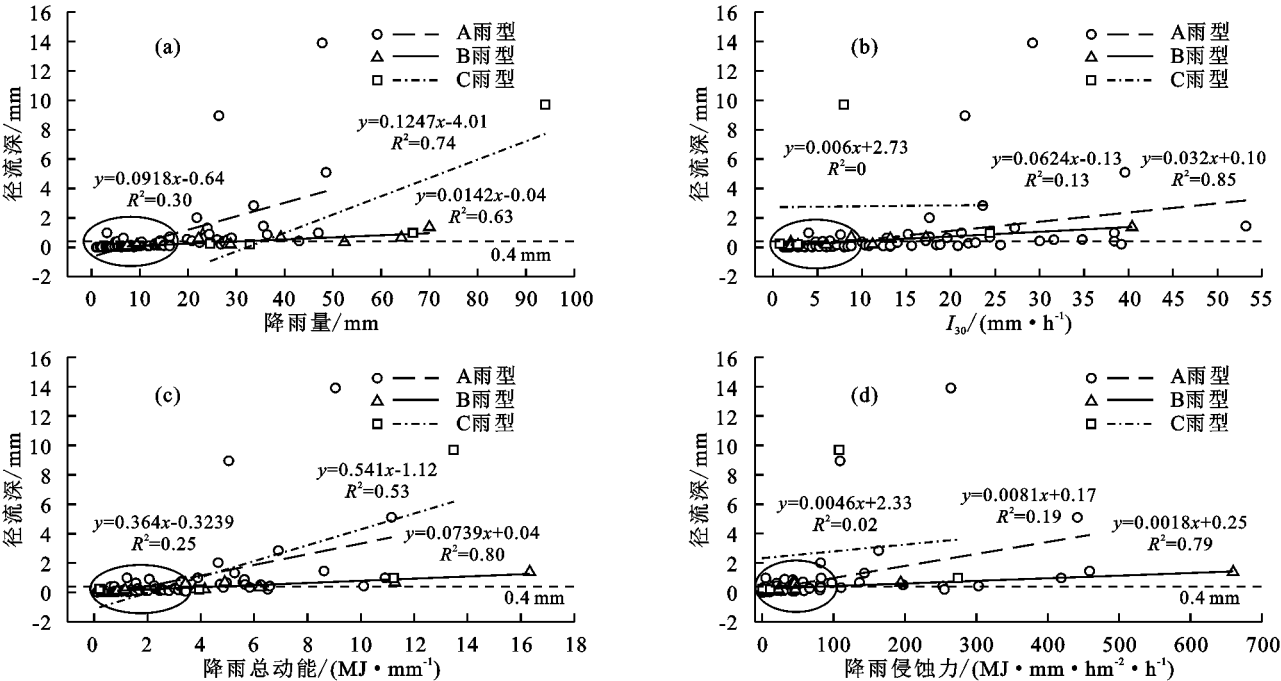


图 2 裸露坡面次降雨与产流的关系

2.3 裸露坡面产沙对侵蚀性降雨的响应

裸露坡面在 3 类侵蚀性降雨下的产沙量采用侵蚀量来表示,同理用上述 4 个降雨特征因子,分析建立了次降雨下坡面产沙驱动关系(图 3)。通过 R^2 的对比发现,总体上降雨量对坡面产沙的贡献最大,对于产沙贡献率为降雨量>降雨总动能>降雨侵蚀力>最大 30 min 雨强。喀斯特黄壤裸露坡面侵蚀性降雨的土壤流失量多数<1 g/m²,A 类降雨中有 51

次,B类降雨中有 8 次,C类降雨中有 2 次,土壤流失量<1 g/m²的侵蚀性降雨占据 66.30%。但坡面土壤侵蚀量主要是由个别的次降雨所贡献,如 C 类降雨中,2019 年 9 月 10 日发生 94 mm 的次降雨,降雨侵蚀力为 107.844 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,4 个径流小区土壤流失量为 968.72 g/m²,这次降雨占据 C 类降雨中土壤流失总量的 99.56%,对 3 年总的土壤流失量的贡献率为 27.53%。

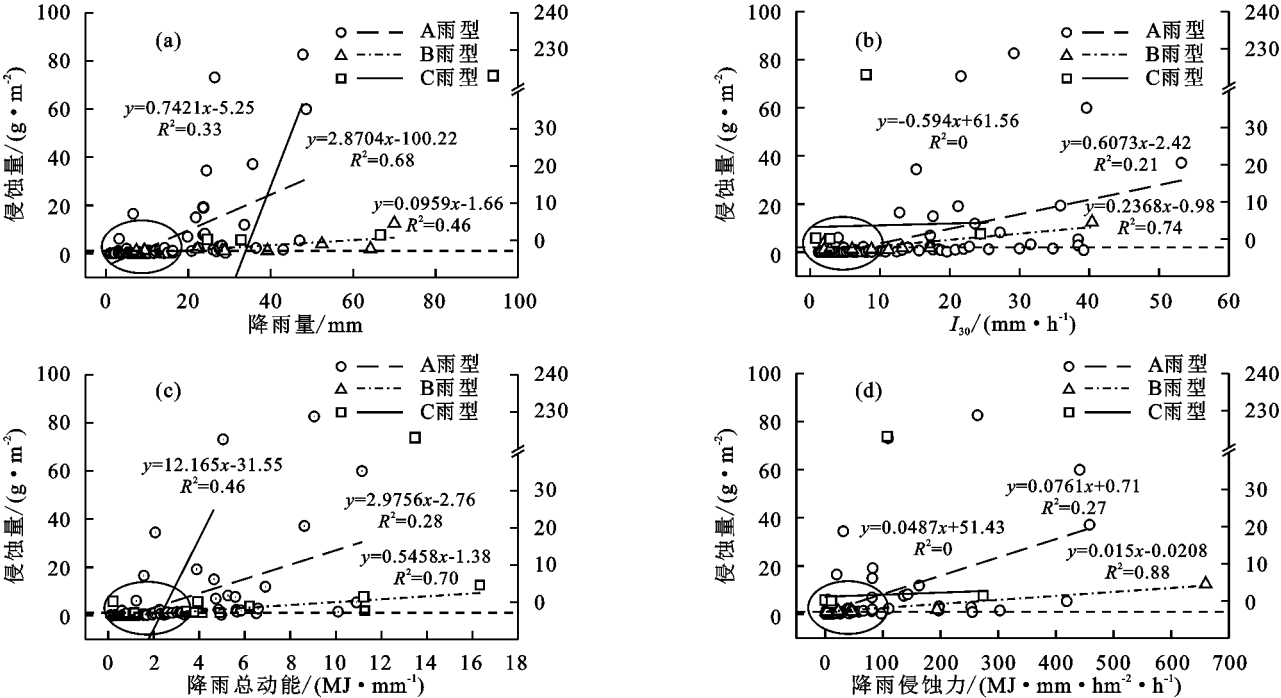


图 3 裸露坡面次降雨与产沙的关系

A 类降雨中,平均土壤流失量为 5.40 g/m²,最大土壤流失量 82.64 g/m²同样出现在 2019 年 6 月 12 日的次降雨中。最大土壤流失量出现在这次降雨

中的原因是和上述最大产流量出现的原因一致。B 类降雨中,平均土壤流失量为 1.52 g/m²,C 类降雨中,除 2019 年 9 月 10 日发生的 94 mm 暴雨事件外,

平均土壤流失量为 0.48 g/m^2 。对比 3 类降雨, 产沙的规律总体上表现为平均土壤流失量 A 雨型>B 雨型>C 雨型。A 雨型, 当次降雨量<20 mm 时, 平均土壤流失量为 0.87 g/m^2 , 当次降雨量>20 mm 时, 平均土壤流失量为 17.72 g/m^2 。A 类降雨中 20 mm 降雨量是喀斯特黄壤坡面土壤流失量明显增加的突变值。因此, 在今后的坡面水土保持工作中, 应重点防范 A 类降雨中>20 mm 的侵蚀性降雨。

从次降雨下坡面产流产沙关系(图 4)来看, 产流量(径流深)和产沙量(土壤侵蚀量)呈线性相关关系, 裸露坡面 3 类降雨下其决定系数为 A 类 0.83, B 类 0.69, C 类 0.99。表明土壤流失量主要是由径流深决定的, 地表径流与降雨特征因子相比, 其对坡面产沙的贡献率最大。

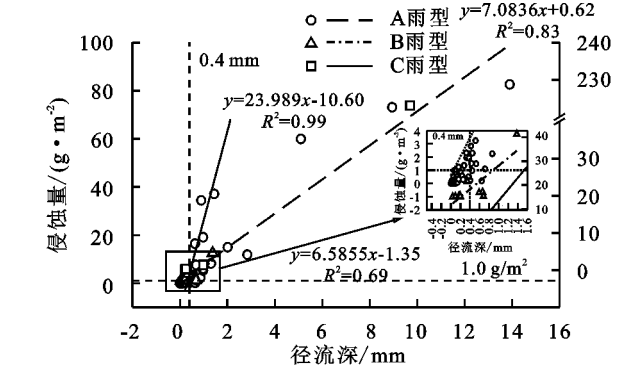
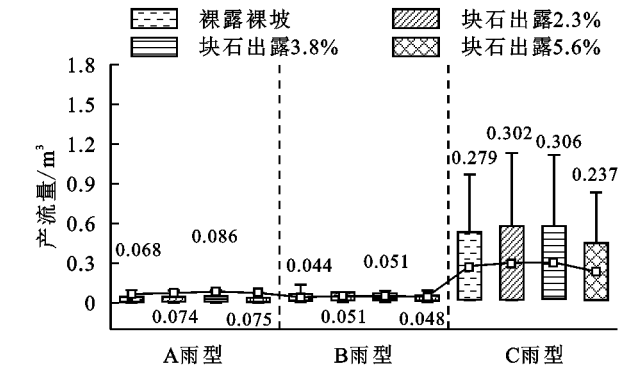


图 4 裸露坡面侵蚀性降雨产流与产沙的关系

2.4 土石异质坡面产流产沙差异

3 类侵蚀性降雨下的产沙量用平均含沙量来表



示, 由块石出露小区和裸露坡面产流产沙差异(图 5)来看, A 类降雨下, 小区产流量表现为块石出漏 3.8%>块石出漏 5.6%>块石出漏 2.3%>裸露坡面, 小区产沙量表现为块石出漏 5.6%>块石出漏 3.8%>裸露坡面>块石出漏 2.3%。平均产流量随着块石裸露率先增加后减少, 裸露坡面的产沙量大于块石出露 2.3% 的小区, 块石出露小区平均产沙量随着块石出露率的变大而增加。B 类降雨下, 裸露坡面小区产流量和产沙量均最小, 3 种块石出露小区产流量差异很小, 而产沙量差异较大。C 类降雨下, 块石出露 3.8% 的小区产流量最大而产沙量却最小, 块石出露 5.6% 的小区产流量最小而产沙量却最大。C 类降雨下径流小区的产流量和产沙量受 94 mm 暴雨事件影响明显较大。

就产流量而言, 在裸露坡面和 3 种块石出露率下产流量表现为 C 雨型>A 雨型>B 雨型。A 和 B 类降雨下, 裸露坡面产流量均小于块石出露下的小区, 块石出露率的增加提高了产流量。C 类降雨下产流量随块石出露率的增加, 呈先增后减的变化。总体上 3 类降雨中, 与裸露坡面相比, 块石出露小区的产流量随着出露率的增加而变大。从产沙量来看, 产沙量在裸露坡面、块石出露 2.3% 和 5.6% 的小区均呈现 C 雨型>A 雨型>B 雨型, 而在块石出露 3.8% 的小区没有这一规律。3 类降雨中, 产沙量的变化比产流变化复杂, A 类降雨, 产沙量随着块石出露率的提高呈明显增加, B 类降雨下呈先增后减的变化, C 类降雨下呈先减后增的变化。

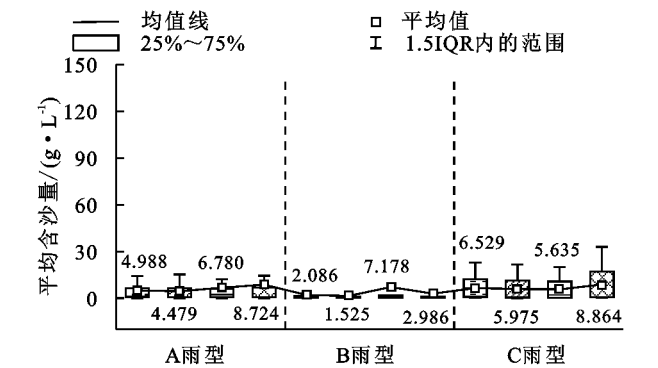


图 5 侵蚀性降雨下土石异质坡面产流产沙

3 讨论

以往的研究^[18]中单一的参数指标不能更好地反映降雨特征, 往往忽略了雨强和雨量存在的不一致性问题。本研究中以侵蚀性降雨的降雨量、降雨历时、平均雨强为划分依据, 降雨类型划分为 A、B、C 3 类, 划分结果与黄凯等^[19]对贵州省黔南区不同侵蚀性降雨类型的划分类似。已有许多学者研究了不同地区和土壤类型下, 关于次降雨对坡面土壤的侵蚀规律。谢云等^[9]研究表明, 黄土高原坡面土壤侵蚀的降雨标

准为 12 mm, 平均雨强为 0.04 mm/min, 最大 30 min 雨强为 0.25 mm/min。邬铃莉等^[10]研究表明, 北方土石山区坡面土壤侵蚀, 主要是由中雨量、短历时、大雨强、低频率的次降雨导致的, 且坡面土壤侵蚀的临界雨量为 8 mm, 临界雨强为 9.5 mm/h。王改玲等^[7]研究表明, 晋北黄土区坡地 8°裸露坡面小区, 次降雨量达到 8.47 mm 或 I_{10} 为 14.24 mm/h 时便会发生侵蚀性降雨。黄国平等^[20]研究表明, 新疆伊犁河谷灰钙土 12°坡面小区降雨产流阈值为, 降雨量>4

mm 且 $I_{30} > 3.6$ mm/h。区域地形、土壤类型、小区坡度等是影响侵蚀性降雨阈值和侵蚀过程的重要因素^[21]。各研究区因其土壤类型和小区坡度等因素不同,导致喀斯特黄壤裸露坡面侵蚀性降雨的雨量和雨强的标准与其他地区存在差异。秦伟等^[22]得出 12° 红壤裸露坡面的土壤侵蚀,主要是由短历时、小雨量、大雨强、高频次的次降雨所贡献的,且最大 30 min 雨强 > 15 mm/h 后,土壤侵蚀强度明显增加。这与本研究结果类似,喀斯特黄壤坡面侵蚀性降雨主要为 A 雨型,具有短历时、小雨量、大雨强、高频次的降雨特征。 15° 喀斯特黄壤裸露坡面侵蚀性降雨的标准为次降雨量 6.6 mm 或 I_{30} 为 3.6 mm/h。

块石出露是喀斯特黄壤坡面经典的地貌景观之一,因此研究块石出露下坡面侵蚀性降雨及产流产沙的特征,对于坡面水土资源利用与保护及小流域坡面土壤侵蚀模型的建立具有重要意义。Jean 等^[23] 研究认为,在 5° 坡面上裸露岩石增加则径流减少,而在 10° 和 20° 坡面上裸露岩石增加则径流增加,在不同坡度面上裸露岩石的多少对径流的响应结果截然不同。Liu 等^[24] 通过不同岩石出露下的人工模拟降雨试验得出,在 15° 和 30° 坡面上,坡面径流量均随着裸露岩石的增加而增加,而土壤流失量在降雨前期随着裸露岩石的增加而变大,降雨后期则相反。在本研究中, A 和 B 类降雨下,裸露坡面产流量均小于块石出露下的小区,产流量随着块石出露率的增加而增加。Dai 等^[25] 通过在坡面上的人工模拟降雨试验得出,随着裸露岩石的增加,产沙率呈先变大后变小的趋势。Bunte 等^[26] 研究表明,土壤流失量随着裸露岩石的增加呈现先增大后减少的变化,且认为 20% 的岩石出露率是土壤流失量由多到少的阈值。这与本研究中 B 类降雨下产沙规律类似,3 类降雨中,产沙量的变化比产流变化复杂。A 类降雨,产沙量随着块石出露率的提高呈明显增加;B 类降雨下呈先增后减的变化 C 类降雨下则和 B 变化趋势相反。喀斯特土石异质坡面产流产沙的问题比较复杂,今后的研究仍有很多影响因子有待继续深入探讨。

4 结论

(1) 侵蚀性降雨可以分为 3 类, A 类: 小—中雨量、短历时、大雨强、高频率; B 类: 中—大雨量、中历时、中雨强、中频率; C 类: 大雨量、长历时、小雨强、低频率。A 类降雨是造成喀斯特黄壤坡面土壤侵蚀的主要雨型。侵蚀性降雨的标准为次降雨量 > 6.6 mm 或 $I_{30} > 3.6$ mm/h。

(2) 喀斯特黄壤裸露坡面 63.27% 的侵蚀性降雨径流深 < 0.4 mm, 66.30% 的侵蚀性降雨土壤流失量

< 1 g/m², 坡面土壤侵蚀量主要是由个别的次降雨所贡献的。比较 3 类降雨, 产流产沙的规律总体上表现为 A 雨型 $>$ C 雨型 $>$ B 雨型。

(3) 土壤流失量主要是由径流深决定, 径流深直接决定着坡面产沙的多少。A 类降雨中 20 mm 降雨量是喀斯特黄壤坡面径流深和土壤流失量明显增加的突变值。在今后的坡面侵蚀防治工作中, 应重点防范 A 类降雨中 > 20 mm 的降雨。

(4) 3 类降雨下, 块石出露增加了坡面产流量, 产流量随着出露率的增加而变大。但产沙量的变化比较复杂, A 类降雨下, 产沙量随着块石出露率的提高呈明显增加; B 类降雨下呈先增后减的变化; C 类降雨下呈先减后增的变化。

致谢: 本研究特别感谢北京师范大学地理科学学部何江湖、柯奇画、罗建勇、魏梦瑶、朱彤、张思琪在野外径流收取及试验过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [2] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [3] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, et al. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches [J]. Reviews of Geophysics, 2014, 52(3): 218-242.
- [4] Zhu D Y, Xiong K N, Xiao H. Multi-time scale variability of rainfall erosivity and erosivity density in the karst region of southern China, 1960—2017 [J]. Catena, 2021, 197: e104977.
- [5] 彭旭东, 戴全厚, 杨智, 等. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1237-1248.
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains [M]. U.S. Department of Agricultural Handbook, 1965: 1-47.
- [7] 王改玲, 王青梓, 石生新. 晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 1-5.
- [8] 周子渊, 王立, 王小平, 等. 西部黄土丘陵区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 24-27.
- [9] 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.
- [10] 邬铃莉, 王云琦, 王晨洋, 等. 降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 157-164.
- [11] 熊亚兰, 张科利, 杨光徽, 等. 乌江流域降雨和径流的周期变化[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(4): 475-479.
- [12] 黄凯, 刘瑞禄, 覃莉, 等. 不同降雨条件下坡长对喀斯特

坡面土壤侵蚀的影响[J].应用生态学报,2021,32(1): 271-280.

[13] 顾璟冉,张兴奇,顾礼彬,等.黔西高原侵蚀性降雨特征分析[J].水土保持研究,2016,23(2):39-43,48.

[14] 杨坪坪,李勇,宋涛,等.典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应[J].生态环境学报,2021,30(1):53-62.

[15] 顾礼彬,张兴奇,杨光橄,等.黔西高原坡面次降雨产流产沙特征[J].中国水土保持科学,2015,13(1):23-28.

[16] 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.

[17] 王万忠,黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究研究Ⅲ:关于侵蚀性降雨的标准问题[J].水土保持通报,1984,4(2):58-63.

[18] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.

[19] 黄凯,李瑞,李勇,等.贵州省黔南区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应[J].水土保持学报,2020,34(6):14-21.

[20] 黄国平,张文太,陈景梅,等.伊犁河谷次降雨特征对坡面产流产沙的影响[J].甘肃农业大学学报,2021,56(3):109-116.

[21] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J].土壤学报,2017,54(3):545-557.

[22] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.

[23] Jean J S, Ai K F, Shih K, et al. Stone cover and slope factors influencing hillside surface runoff and infiltration: Laboratory investigation [J]. Hydrological Processes,2000,14(10):1829-1849.

[24] Liu D D, She D L. Can rock fragment cover maintain soil and water for saline-sodic soil slopes under coastal reclamation? [J].Catena,2017,151:213-224.

[25] Dai Q H, Peng X D, Zhao L S, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes [J].Land Degradation and Development,2017,28(7):1922-1932.

[26] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow [J]. Water Resources Research,1993,29(5):1415-1424.

(上接第 81 页)

[10] Miao C, Ashouri H ,Hsu K L, et al. Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China[J].Journal of Hydrometeorology,2015,16(3):1387-1396.

[11] 郑江坤,杨帆,王文武,等.不同降雨等级下耕作措施对坡地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(1):38-45.

[12] Moore S, Evans C D, Page S E, et al. Deep instability of deforested tropical peatlands revealed by fluvial organic carbon fluxes [J].Nature,2013,493(7434):660-663.

[13] 陈美洪,张卓栋,王晓岚,等.西南黄壤和西北黄土坡面侵蚀产沙规律比较研究[J].中国水土保持科学,2016,14(6):53-60.

[14] 武万华,何淑勤,宫渊波,等.玉米季横垄坡面径流及可溶性有机碳流失特征[J].中国水土保持科学,2017,15(5):31-38.

[15] 尹晓爱,方乾,杨通杭,等.模拟玉米茎秆流对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):67-72.

[16] 杨帅,尹忠,郑子成,等.四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J].水土保持学报,2016,30(4):7-12.

[17] 何超,王磊,郑粉莉,等.垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):24-28.

[18] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18,78.

[19] 喻艳红,张桃林,李清曼,等.温度和水土比对红壤吸附低分子量有机酸的影响[J].土壤,2011,43(1):50-55.

[20] Humphrey V, Berg A, Ciais P, et al. Soil moisture-atmosphere feedback dominates land carbon uptake variability[J].Nature,2021,592(7852):65-69.

[21] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):105-113.

[22] 马瑞,郑子成,王双,等.山地黄壤区玉米不同生育期土壤抗蚀性特征[J].农业工程学报,2020,36(19):107-114.

[23] 郑子成,林代杰,李廷轩,等.不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):24-28.

[24] 赵龙山,侯瑞,吴发启,等.不同农业耕作措施下坡耕地填洼量特征与变化[J].农业工程学报,2017,33(12):249-254.

[25] 王双,叶良惠,郑子成,等.玉米成熟期黄壤坡耕地径流及其氮素流失特征研究[J].水土保持学报,2018,32(6):28-33.