

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.039.

吴瑶琴, 蒋超华, 徐勤学, 等. 西南喀斯特地区不同岩面形态下岩面径流特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 10-17.

Wu Yaoqin, Jiang Chaohua, Xu Qinxue, et al. Runoff Characteristics of Rock Surface Under Different Rock Surface Morphology in Southwest Karst Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 10-17.

西南喀斯特地区不同岩面形态下岩面径流特征

吴瑶琴^{1,2}, 蒋超华³, 徐勤学^{1,2}, 方荣杰^{1,2}, 付智勇⁴, 陈洪松⁴

(1. 桂林理工大学 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地, 广西 桂林 541004;

3. 广西珠委南宁勘测设计院, 南宁 530007; 4. 中国科学院 环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要: [目的] 研究自然降雨条件下不同岩面形态岩石的降雨产流特征, 为深入了解喀斯特坡地降雨侵蚀规律提供科学依据。 [方法] 选取研究区内光滑、裂隙、溶穴和溶盘 4 种典型岩面形态的岩石为研究对象, 采用野外径流小区原位观测的方法, 对降雨后各种岩面形态下岩石产生的岩面径流进行监测。 [结果] (1) 4 种岩面形态中, 岩面径流系数表现为光滑(0.74) > 溶盘(0.57) > 溶穴(0.35) > 裂隙(0.19), 光滑岩面平均径流系数显著高于其他类型的岩面, 径流系数分别为裂隙、溶盘和溶穴的 3.89, 2.11, 1.30 倍。 (2) 随着降雨等级的增大, 不同岩面径流系数均呈增加趋势, 在大雨及以上降雨事件下, 4 种岩面形态的径流系数存在显著差异。 (3) 降雨量是影响不同岩面径流深的主要降雨因子, 导致岩面产流的降雨量临界值大小表现为裂隙(1.8 mm) > 光滑(1.5 mm) > 溶盘(1.1 mm) > 溶穴(1.0 mm)。 [结论] 岩面形态和降雨量是影响岩面径流的主要因素; 在裸岩广泛分布的喀斯特地区, 岩面径流是坡面径流的重要组成部分, 在水土流失防治中要考虑岩面径流的影响。

关键词: 喀斯特; 岩面形态; 自然降雨; 岩面径流; 产流特征

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0010-08

Runoff Characteristics of Rock Surface Under Different Rock Surface Morphology in Southwest Karst Area

Wu Yaoqin^{1,2}, Jiang Chaohua³, Xu Qinxue^{1,2}, Fang Rongjie^{1,2}, Fu Zhiyong⁴, Chen Hongsong⁴

(1. Key Laboratory for Theory and Technology of Environmental Pollution Control in Guangxi,

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Collaborative Innovation Center for

Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Guangxi Nanning Survey and Design Institute of Pearl River Commission, Nanning 530007, China; 4. Huanjiang

Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to examine the characteristics of rainfall-runoff under different rock surface morphologies under natural rainfall conditions, and to provide a scientific basis for further understanding the rainfall erosion pattern in karst slopes. [Methods] Four typical rock surface morphologies of smoothness, fissure, karst cave, and solution dish in this study area were selected as the research objects. In-situ observational tests on field run-off plots were used to monitor rock surface runoff generation under various rock surface morphologies after rainfall. [Results] (1) Among the four kinds of rock surface morphology, the runoff coefficient of rock surface decreased in the order: smoothness (0.74) > solution dish (0.57) > karst cave (0.35) > fissure (0.19). The average runoff coefficient of smoothness was significantly higher than those of other types, being 3.89, 2.11, and 1.30 times higher than those of the fissure, solution

收稿日期: 2022-11-29

修回日期: 2023-02-16

资助项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035058); 国家自然科学基金项目(51769005)

第一作者: 吴瑶琴(1998—), 女, 湖南桂阳人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: wyq5517@qq.com

通信作者: 徐勤学(1982—), 男, 湖南新宁人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: xqx@glut.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

dish, and karst cave, respectively. (2) With the increase in rainfall grade, the runoff coefficients of different rock surfaces showed an increasing trend. During heavy rainfall and above rainfall events, the runoff coefficients were significantly different for the 4 rock surface morphologies. (3) Precipitation was the main rainfall factor affecting the runoff depth of rock. The critical value of rainfall causing rock surface runoff was fissure (1.8 mm) > smoothness rock surface (1.5 mm) > solution dish (1.1 mm) > karst cave (1.0 mm). [Conclusion] Rock surface morphology and rainfall are important factors affecting rock surface runoff. Large rock surface runoff is a vital component of runoff in karst slopes. The effect of rock surface runoff should be considered in the prevention of soil and water loss on karst slopes.

Keywords: karst; rock surface morphology; natural rainfall; rock surface runoff; characteristics of runoff process

中国西南喀斯特地区是世界上最大的喀斯特连续带,也是世界石漠化灾害最严重的地区,石漠化严重危害该地区的生态环境和经济可持续发展^[1]。石漠化最显著的景观特征是裸露在地表之上的岩石,裸露岩石与土壤间隔分布,除了会形成复杂多变的微地貌单元景观外^[2],还会造成降水的再分配,从而影响喀斯特坡地的产流过程^[3],是影响喀斯特降雨产流的重要因素^[4]。

岩石对坡面水土流失的影响是多方面且复杂的。在非喀斯特地区有研究表明,岩石能够增大地表粗糙度,使得径流流速放缓,从而入渗量增加^[5-6]。Niu 等^[7]通过冲刷试验发现,随着裸岩率的增加,径流量显著减小。在喀斯特地区相关研究表明,裸露的岩石会使得坡面不透水面积增加,阻止了水分的入渗,从而增加了地表径流^[8]。Dai 等^[9]通过室内人工模拟降雨试验研究发现,随着岩石裸露率的增加,地表产流量显著增加。此外,岩石的倾角条件和裸露方式也会对坡面水土流失有重要影响^[10-11]。如 Gan 等^[12]采用室内模拟降雨试验研究发现,岩石倾角越大地表径流量越小;樊春华等^[13]研究发现,当岩石覆盖在土壤表面可以减少地表径流的产生,而当岩石嵌入土壤则会增加地表径流的产生。另一方面,由于可溶性岩石的构造及长期的溶蚀作用使得出露岩石表面形成了多种不同的岩溶形态,如溶穴及溶蚀裂隙等,主要分布在降雨量较高的地区;或受腐殖质土产生的生物 CO₂ 及有机酸影响,形成溶盘等,主要分布于较湿润的环境^[14];光滑形态的岩面则未受到明显溶蚀作用,岩石表面相对较为光滑。岩面形态的不同导致岩面对降水的再分配有所不同,对喀斯特坡面产流也会产生不同的影响。尽管目前的研究已经从多个角度探索了出露岩石对喀斯特坡地水土流失的影响,但关于不同岩面形态对产流特征的影响研究还较少。

目前,裸露岩石对喀斯特坡地水土流失影响的研究多采用人工模拟降雨或冲刷等方式^[10,15],与复杂

的自然降雨过程具有一定差异,缺少自然降雨观测资料的补充和验证。因此,本文基于野外径流小区原位观测试验,对自然降雨条件下,4 种岩面形态(光滑、裂隙、溶穴和溶盘)的岩面流产流特征进行研究,对比不同降雨事件下,4 种岩石的产流量及产流过程差异,以期深入了解岩面形态对喀斯特坡面土壤侵蚀的影响机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区桂林市灵川县海洋乡枇杷塘村(25°17′32″N,110°33′42″E),为典型的喀斯特峰丛洼地地貌。研究区地处亚热带季风气候区,多年平均气温 17.5℃,多年平均降雨量为 1 645 mm 左右,降雨集中在 4—9 月份,10 月到次年的 3 月雨水相对较少。研究区土壤为黑色石灰土或棕色石灰土,呈微酸性到微碱性,土壤含量较少,裸岩成片出露,出露地层为上泥盆统东村组(D₃d)灰岩或夹白云岩,裸露率高达 70% 以上。

1.2 研究方法

通过野外实地调查,在研究区选取 4 块具有典型岩面形态的岩石,分别为:光滑岩面形态、裂隙岩面形态、溶穴岩面形态与溶盘岩面形态,共建立了 4 个径流小区并在雨季进行监测,各径流小区的基本情况如表 1,图 1 所示。采用自主研发的岩面径流收集装置,在裸岩靠近岩土界面的部位,保持 4°~6° 的坡度砌筑条状水泥,将 L 型聚氯乙烯条平行地插入条状水泥中,并在岩石最低处预留出口埋设 PVC 管,将 PVC 管与双翻斗流量计连接(每 100 ml 计数一次),自动记录每场降雨下,各岩石的产流量、产流时间以及断流时间。为方便统计分析,用岩石径流深 R (mm) 表示单位面积下的岩石径流量^[16],公式如下:

$$R = W / 1000F \quad (1)$$

式中: W 为径流总量(ml); F 为岩石投影面积(m²)。

表 1 岩石基本情况
Table 1 Basic rock conditions

径流小区	岩面形态	形态特征	岩石投影面积/m ²	岩面坡度/(°)
1 号	光滑	表面光滑无裂隙、溶穴发育	1.35	31.27
2 号	裂隙	表面有交错的裂隙纹理	1.49	23.82
3 号	溶穴	表面有直径小于 50 cm 的孔穴	1.08	39.13
4 号	溶盘	表面有直径大于 5 cm,深度小于 2 cm 的溶蚀浅碟	1.90	41.25



图 1 光滑岩面、裂隙岩面、溶穴岩面和溶盘岩面布设图

Fig. 1 Layout of smooth rock surface, fissure rock surface, karst cave rock surface and solution dish rock surface

1.3 自然降雨观测

自然降雨观测时间为 2018 年的雨季(4—9 月),采用 Onset 公司生产的自记式雨量桶(RG-3M)监测降雨过程,获得次降雨的起止时间、降雨历时(T)、降雨量(P)、平均雨强($I_{\overline{p}}$)、最大 30 min 雨强(I_{30})等降雨参数。降雨过程中按 6 h 为最小降雨间隙划分降雨事件^[17],并参考降雨量等级划分国家标准(表 2)。

表 2 降雨等级划分标准

Table 2 Rainfall grading standards		
降雨等级	12 h 降水	24 h 降水
划分	总量/mm	总量/mm
小雨	0.1~4.9	0.1~9.9
中雨	5.0~14.9	10~24.9
大雨	15.0~30.0	25~49.9
暴雨	30.0~69.9	50.0~99.9
大暴雨	70.0~139.9	100.0~249.9
特大暴雨	>140	>200

1.4 数据处理

野外自然监测中,由于各岩石的形状不规则,因此将已知实际尺寸的参照物放置于岩石表面,使用相机垂直对岩石进行拍摄,所得照片经 ImageJ 软件处理后计算各岩石投影面积。采用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素(one-way ANOVA)进行方差分析,用 LSD(least signification difference test,LSD)进行样本间差异显著性分析($p<0.05$)。利用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 观测期内自然降雨特征

由表 3 可知,本次野外共监测到有效降雨 36 场,总降雨量为 574.8 mm,单次最小降雨量为 1.2 mm,最大降雨量为 96.0 mm。小雨降雨次数最多,共发生 14 次,占总降雨次数的 38.9%,但仅占总降雨量的 5.9%;暴雨和大暴雨降雨次数最少,共发生 4 次,仅占总降雨次数的 11.2%,降雨量为 258.8 mm,占总降雨量的 45.0%。同时可看出, $I_{\overline{p}}$ 在小雨事件下最小,并随着降雨等级的增大而增大,而 I_{30} 表现为小雨<中雨<暴雨<大雨<大暴雨。

2.2 不同岩面形态下的岩面径流系数

由图 2 可知,观测期内不同岩面形态径流系数从大到小依次为:光滑(0.74)>溶盘(0.57)>溶穴(0.35)>裂隙(0.19)。光滑岩面的平均径流系数显著高于其他岩面,分别为裂隙、溶穴和溶盘岩面径流系数的 3.89,2.11,1.30 倍。4 种岩面形态中,溶盘岩面的径流系数分布更为广泛,其四分位数区间为 0.42~0.74,说明次降雨条件下,溶盘岩面的径流系数波动更大。裂隙岩面的径流系数分布最为集中,其四分位数集中在 0.16~0.25 的狭小区间内,说明次降雨条件下,裂隙岩面的径流系数变化幅度更小。光滑和溶穴岩面的上下四分位数间距大小类似,分别为 0.70~0.88,0.29~0.45。

2.3 不同降雨事件下岩面形态的产流过程

由图 3 可知,随着降雨等级的增大,不同岩面形态的径流系数均呈增加趋势。4 种岩面形态中,溶穴

岩面的径流系数随降雨等级增加的变化幅度最大,径流系数从 0.24(小雨)增加到 0.45(大暴雨),增加了 87.5%;光滑岩面的径流系数随降雨等级增加的变化幅度最小,径流系数从 0.70(小雨)增加到 0.91(大暴雨),增加了 30.0%。随着降雨等级的增加,4 种岩面

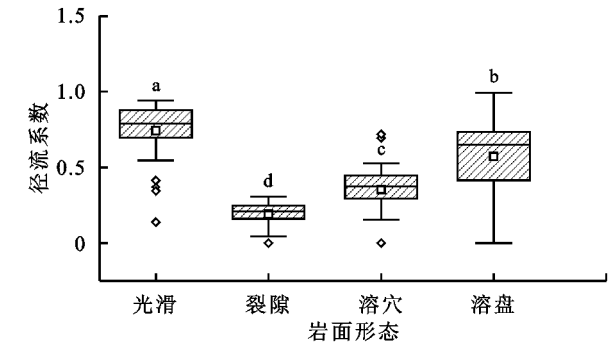
形态的径流系数差异更明显。在小雨事件下,裂隙和溶穴岩面的径流系数差异不显著;在中雨事件下,光滑和溶盘岩面的径流系数,差异也未达到显著水平;而在大雨及以上的降雨事件下,4 种岩面形态的径流系数存在显著差异。

表 3 各降雨事件次降雨特征

Table 3 Rainfall characteristics of each rainfall event

降雨事件	发生频次	占总降雨次数的比例/%	降雨量/mm	占总降雨量的比例/%	产流总量/mm	占总产流量的比例/%	$T_{\text{平}}/\text{h}$	$I_{\text{平}}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	$I_{30}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$
小雨	14	38.9	33.6	5.9	55.5	4.6	1.7	4.9	5.6
中雨	10	27.2	107.0	18.6	212.0	17.6	5.5	8.1	13.0
大雨	8	22.2	175.4	30.5	356.9	29.6	6.8	5.4	28.6
暴雨	2	5.6	88.6	15.4	192.3	15.9	7.3	7.2	20.2
大暴雨	2	5.6	170.2	29.6	389.7	32.3	7.1	12.2	51.4
总计	36	100.0	574.8	100.0	1206.4	100.0	4.5	6.4	16.1

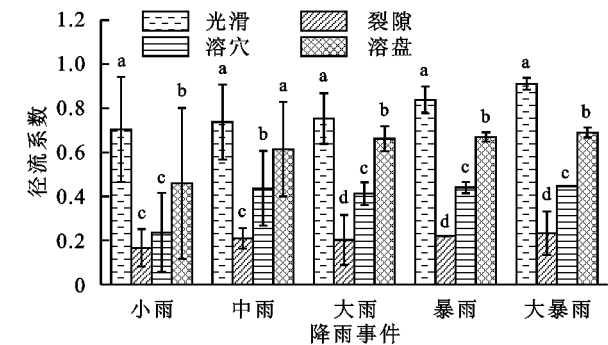
注: $T_{\text{平}}$ 、 $I_{\text{平}}$ 、 I_{30} 分别为平均降雨历时、平均雨强和最大 30 min 雨强,下同。



注:不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

图 2 不同岩面形态的径流系数箱线图

Fig. 2 Box plot of runoff coefficient of different rock surface morphology



注:同组不同小写字母表示相同降雨事件下不同岩面形态径流系数差异显著($p<0.05$)。

图 3 不同降雨事件下各岩面形态的产流特征

Fig. 3 Runoff characteristics of different rock surfaces morphologies under different rainfall events

各选取中雨、大雨、暴雨和大暴雨下的 1 场典型降雨事件,观察 4 种岩面形态在不同降雨事件下的径流过程。由图 4 可知,不同降雨事件下初始产流时间均表现为光滑<溶盘<溶穴<裂隙。在降雨初期,光滑岩面迅速产流,对降雨的产流响应速度最快,而裂

隙岩面的产流时间明显滞后于其余 3 种岩面形态;在降雨后期,随着降雨量的减少,降雨难以在裂隙和溶穴岩面汇集成有效的径流,这 2 种岩面形态均快速断流,其中裂隙岩面断流时间最早。不同岩面形态径流变化过程同降雨过程有很好的相应性,随降雨量变化波动。在次降雨初期,光滑与溶盘岩面产流量之间的差距不明显,而当降雨量增加幅度剧烈时,光滑岩面形态的产流量增加幅度明显大于溶盘岩面,随着降雨量的增加二者产流量之间的差距增大。

2.4 岩面产流与次降雨特征的相关性分析

由表 4 可知,不同降雨事件下,4 种岩面形态的径流深与降雨量均呈正相关关系。在小雨事件下,4 种岩面形态的径流深与降雨量均呈显著正相关关系,且光滑和裂隙岩面的径流深与降雨量的相关性较高,呈极显著正相关关系,同时溶盘岩面的径流深与 $I_{\text{平}}$ 亦呈显著正相关关系;在中雨事件下,光滑和裂隙岩面的径流深与降雨历时和降雨量均呈显著正相关关系;在大雨事件下,光滑、溶穴和溶盘径流深均与降雨历时和降雨量呈正相关关系,其中光滑和溶盘岩面的径流深与降雨量的相关系数更高,而溶穴岩面的径流深与降雨历时的相关性系数更高;在暴雨和大暴雨事件下,光滑、溶穴和溶盘岩面形态的径流深与降雨量呈极显著正相关关系,而裂隙岩面的径流深与各降雨特征均无显著相关关系。

本文采用逐步回归分析的方法,分析不同岩面形态的径流深(R)与降雨历时(T)、降雨量(P)、平均雨强(I)及最大 30 min 雨强(I_{30})之间的关系。如表 5 所示,4 种岩面形态回归方程的 R^2 均在 0.870 以上,说明径流深与降雨量的回归拟合较为理想。4 种岩面形态的径流深与降雨量均呈极显著相关关系,说明

降雨量是影响岩面径流深的主要降雨因子,其中不同岩面形态的径流深与降雨量的相关性大小为光滑>溶盘>溶穴>裂隙。对 4 种岩面形态的径流深与降雨量回归方程进行计算,得出光滑、裂隙、溶穴和溶盘岩面产流的临界降雨量分别为 1.5,1.8,1.0,1.1 mm,

临界降雨量表现为裂隙>光滑>溶盘>溶穴。4 种岩面形态的岩石产流量回归拟合过程中,经过自检剔除了降雨历时和降雨强度,表明降雨因子之间存在自相关性或岩石径流深与降雨历时和降雨强度之间并无直接的线性关系。

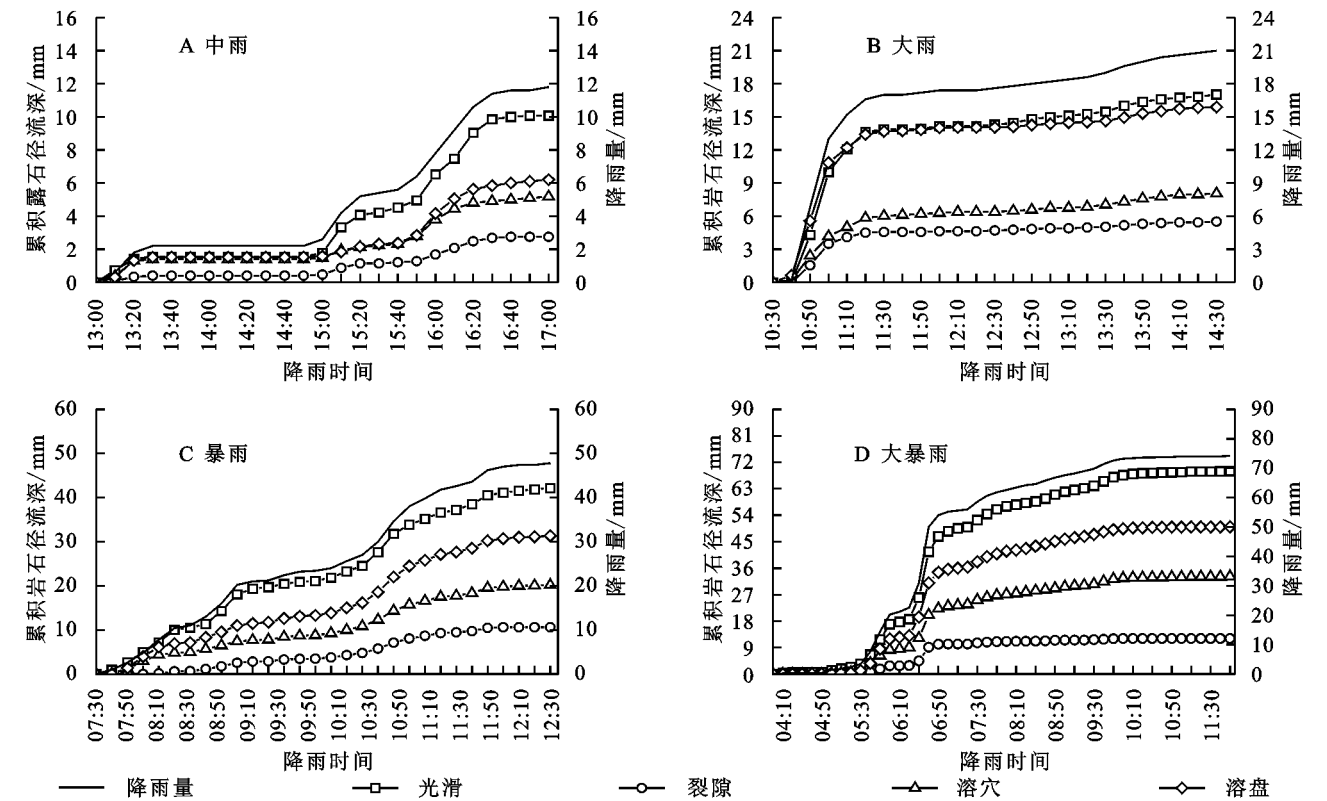


图 4 典型降雨产流过程
Fig. 4 Typical rainfall runoff process

3 讨论

本文结果显示,不同岩面形态平均径流系数为 0.466,即岩石能接收约 46.6%的降水转化为岩面流。相关研究表明,在裸岩覆盖率高的坡面,地表岩石能接收大部分降雨并多转化为岩面流,进而显著影响岩石附近土壤水分的空间异质性^[18]。主要原因是地表裸露的岩石能与土壤形成岩石—土壤界面优先通道,岩面产生的径流能短距离输出,从而很快入渗到土壤中。Sohrt 等^[19]通过亮蓝染色示踪试验对岩—土界面优先流的研究结果表明,沿岩石—土壤界面的径流入渗速度更快,渗透深度更大。喀斯特坡地土层浅薄缺乏 C 层,到达地表的降水,绝大部分进入土壤层后,经裂隙、管道等进入地下河网,故喀斯特地区虽然降雨充沛,但是地表径流少,工程性缺水严重。彭韬等^[20]通过对喀斯特坡地野外自然降雨定点监测得出,地表径流系数非常小为 0.01%~12.81%;陈洪松等^[21]在喀斯特峰丛洼地径流小区得到类似的研究结

论,不同土地利用方式下坡面次降雨径流系数<5%。地表裸露的岩石能汇集降雨形成岩面流,也是喀斯特坡地的主要产流面之一^[22]。本研究中,岩石能接收约 46.6%的降水转化为岩面流,岩石降水—径流转换系数明显大于喀斯特坡地,岩面产流量较多。因此,在喀斯特部分地区可以考虑将岩面流作为一种新的产流水资源加以收集利用,这对解决喀斯特地区坡耕地农水灌溉的问题有重要意义。

岩面形态能显著影响岩面产流能力,不同降雨事件下,岩面径流系数均表现为光滑>溶盘>溶穴>裂隙,其中光滑和溶盘岩面的径流系数显著大于裂隙和溶穴形态。出现此差异的根本原因在于岩溶通道发育,无岩溶通道发育的岩面产流方式类似于弱透水面上的产流,绝大部分降水都形成了径流,而有岩溶通道的岩面产流是降水、下渗、蒸发等过程综合作用的结果,降雨可经裂隙、溶穴等岩溶通道流入地下^[23],从而减少了单位面积的径流量。彭旭东等^[15]的研究也表明,在喀斯特地区裂隙的发育程度对地表、地下

产流有较大的影响,即地表径流系数随着裂隙度增加而减少,但地下径流系数却会增大。此外,光滑岩面的径流系数显著大于溶盘岩面,这主要是因为溶盘岩面具有独特的储水构造,在岩面产生的径流大多汇聚于此,待岩面储水空间蓄满降水后才会发生产流。而溶穴岩面的径流系数显著大于裂隙岩面,一方面是因为岩面裂隙、溶穴发育程度不同,降雨随裂隙、溶穴的入渗量也不同;另一方面是因为溶穴岩石表面只有较少的孔穴发育,降水只能通过固定的孔穴漏失进入土壤,而裂隙岩石表面分布着许多交错的裂隙纹理,使

得裂隙岩石表面径流路径更不连续,降水更易被截流,从而导致产流出现差异性。在笔者团队的岩面形态对喀斯特坡面产流产沙的研究中,溶穴的地表径流系数大于光滑,但本研究中溶穴的岩面径流系数小于光滑,造成该差异的主要原因是溶穴的部分岩面径流形成后,通过溶穴这一优先通道直接进入地下,在岩面所接收到的岩面径流则有所减少。但另一研究中岩面径流通过溶穴进入地下,加快了试验土槽下部土壤水分的饱和,更快形成地表径流,因此溶穴的地表径流系数更高。

表 4 不同岩面形态的径流深与降雨特征的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of runoff depth and rainfall characteristics of different rock surface forms

降雨事件	岩面形态	降雨历时	降雨量	$I_{平}$	I_{30}
小雨	光滑	−0.015	0.788 **	0.389	0.445
	裂隙	−0.017	0.904 **	0.270	0.324
	溶穴	−0.082	0.641 *	0.307	0.292
	溶盘	−0.404	0.558 *	0.547 *	0.527
中雨	光滑	0.658 *	0.929 **	−0.337	−0.363
	裂隙	0.674 *	0.876 **	−0.262	−0.329
	溶穴	0.132	0.405	−0.394	−0.417
	溶盘	0.107	0.320	−0.476	−0.377
大雨	光滑	0.896 **	0.934 **	−0.578	−0.514
	裂隙	−0.484	0.279	0.481	0.462
	溶穴	0.915 **	0.884 **	−0.739 *	−0.639
	溶盘	0.816 *	0.928 **	−0.430	−0.439
暴雨和大暴雨	光滑	−0.273	0.996 **	0.856	0.706
	裂隙	−0.268	0.888	0.838	0.228
	溶穴	−0.180	0.998 **	0.819	0.654
	溶盘	−0.210	0.998 **	0.840	0.616

注:** 指在 0.01 级别相关性显著,* 指在 0.05 级别相关性显著,下同。

表 5 径流深与降雨因子的回归方程

Table 5 Regression equation of runoff depth and rainfall factor

岩面形态	回归方程	R^2	相关性系数	临界降雨量/mm
光滑	$R = -1.349 + 0.900P$	0.991	0.995 **	1.5
裂隙	$R = -0.443 + 0.243P$	0.870	0.933 **	1.8
溶穴	$R = -0.448 + 0.448P$	0.986	0.993 **	1.0
溶盘	$R = -0.749 + 0.695P$	0.989	0.994 **	1.1

本研究发现,不同降雨事件下初始产流时间均表现为光滑<溶盘<溶穴<裂隙。裂隙的初始产流时间明显小于其余 3 种岩面形态,这主要是因为,在降雨初期降雨量还较小,裂隙岩面上方汇集的径流也较少,且绝大部分从裂隙漏失,只有当降雨量较大时,岩面上的径流才有机会越过裂隙,在岩面出口被收集。裂隙的漏失能力不仅与裂隙大小有关,还与裂隙中土壤的渗透能力有关,裂隙较小或者土壤的渗透能力较差都会减弱裂隙对径流的漏失能力。光滑岩面由于

无漏失路径,降雨大部分都汇集成径流在岩面出口被收集,溶盘岩面虽然也无漏失路径,由于特殊的储水构造,所以产流还受前期降雨的影响,在前期无降雨时,产流较晚。

降雨是产生径流的先决条件,降雨量、雨强、降雨历时等特征参数的不同,其对坡面径流的影响也不同^[24]。本文研究岩面的径流深与降雨因子的相关性结果表明,不同降雨事件下岩面形态的径流深与降雨量呈极显著相关关系,而与雨强和降雨历时的相关性较弱。这表明在自然降雨条件下,次降雨量较雨强对产流的影响更明显,径流量随着降雨量的增加而增加。王庆贺等^[16]对云南喀斯特露石径流的研究表明,在一定降雨范围内,露石承接降雨量与露石径流量间存在极显著的正相关关系,这与本研究结果相似。受喀斯特独特的超渗—蓄满产流机制的影响,当降雨强度和降雨量都满足时,才会产生地表径流^[25]。

因此,许多学者研究表明^[26-27],雨强也是影响坡面产流的主要因素。但是本文研究对象为喀斯特裸露岩石,其本身为弱透水面,降雨强度对岩面降水入渗能力的影响较小,故雨强不是影响各岩面径流深的主要因素。有相关研究表明^[28-29],对于同样为弱透水面的道路,雨强与道路产流率的相关性较低,而降雨量能显著影响道路产流率,这与本文研究结果相似。

最后,由于本试验仅在雨季进行,观测时间较短,为更好地研究不同岩面形态的产流特征,在未来,还需进行长期野外观测。同时,本研究中仅研究了不同岩面形态的产流特征,今后可扩展研究不同岩面形态对喀斯特坡地产生流沙的影响,为进一步认识喀斯特坡地水土流失过程与机理提供依据。

4 结论

(1) 研究区 2018 年雨季降雨总量为 574.8 mm,小雨是发生频次最高的降雨事件,但岩面产流总量最少,而大暴雨虽然发生频次低,但单场降雨对岩面的产流量影响最大。

(2) 岩面形态能显著影响裸露岩石的产流能力,岩面径流系数表现为光滑(0.74)>溶盘(0.57)>溶穴(0.35)>裂隙(0.19)。裸露岩石能接收约 46.6%的降水转化为岩面流,岩面流在部分地区可以考虑作为一种新的产流水资源加以收集利用,这对解决喀斯特地区坡耕地农水灌溉的问题有重要意义。

(3) 随着降雨等级的增大,不同岩面径流系数均呈增加趋势,溶穴岩面径流系数随降雨等级增加的变化幅度最大,光滑岩面径流系数增加的变化幅度最小。

(4) 不同降雨事件下,降雨量对岩面径流深的影响较降雨强度和降雨历时更明显。光滑、裂隙、溶穴和溶盘岩面产流的临界降雨量分别为 1.5、1.8、1.0、1.1 mm,临界降雨量之间的差距较小。

参考文献:

- [1] 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.
Cao Y, Wang S J, Bai X Y, et al. Inversion calculation and spatial-temporal pattern of rainfall erosivity in southwestern China over one hundred years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(24):8766-8773.
- [2] 程富东,戴全厚,王玲玲,等.喀斯特坡耕地微地貌特征及土壤质量评价[J].中国水土保持,2015(5):67-71,77.
Cheng F D, Dai Q H, Wang L L, et al. Micro-Geomorphology characteristics and soil quality evaluation of slope farmland in karst area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(5):67-71,77.
- [3] Wang D J, Shen Y X, Huang J, et al. Rock outcrops redistribute water to nearby soil patches in karst landscapes[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016,23(9):8610-8616.
- [4] 沈有信,赵志猛,毕胜春,等.陆地系统中的露石及其生态作用[J].地球科学进展,2018,33(4):343-349.
Shen Y X, Zhao Z M, Bi S C, et al. Rock outcrop and its ecological function in terrestrial ecosystem [J]. Advances in Earth Science, 2018,33(4):343-349.
- [5] 王小燕,李朝霞,蔡崇法,砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J].水科学进展,2012,23(1):38-45.
Wang X Y, Li Z X, Cai C F. Hydrological processes on sloped farmland in purple soil regions with rock fragment cover[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1):38-45.
- [6] Omidvar E, Hajizadeh Z, Ghasemieh H. Sediment yield, runoff and hydraulic characteristics in straw and rock fragment covers[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194:104324.
- [7] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Effect of rock fragment content on erosion processes of disturbed soil accumulation under field scouring conditions[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019,19(4):1708-1723.
- [8] Liu Q, Deng D P, Liao Q D, et al. Analysis on the influence of rainfall characteristics on soil and water loss in rocky desertification region [J]. Carbonates and Evaporites, 2021,36(4):1-11.
- [9] Dai J D, Zhang J H, Xue K, et al. Effects of spatial variations in rock fragments related to tillage on hydrological processes and sediment transport[J]. Catena, 2022,211:105963.
- [10] 宋兰,张玉启,何丙辉,等.喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角对产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):9-15.
Song L, Zhang Y Q, He B H, et al. Effects of angle between rock and slope on the processes and sediment yield in the karst trough valley area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):9-15.
- [11] Smets T, Poesen J, Bochet E. Impact of plot length on the effectiveness of different soil-surface covers in reducing runoff and soil loss by water[J]. Progress in Physical Geography, 2008,32(6):654-677.
- [12] Gan F L, He B H, Qin Z Y, et al. Role of rock dip angle in runoff and soil erosion processes on dip/anti-dip slopes in a karst trough valley [J]. Journal of Hydrology, 2020,588:125093.
- [13] 樊春华,赵龙山,方乾,等.多场次降雨条件下不同土岩镶嵌坡面土壤侵蚀特征[J].土壤学报,2022,59(5):1270-1278.

- Fan C H, Zhao L S, Fang Q, et al. Soil erosion characteristics of different soil and rock mosaic slopes under the condition of successive rainfalls[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022,59(5):1270-1278.
- [14] 袁道先,蒋勇军,沈立成,等.现代岩溶学[M].北京:科学出版社,2016.
- Yuan D X, Jiang Y J, Shen L C, et al. Modern karstology[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [15] 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.
- Peng X D, Dai Q H, Yang Z, et al. Sediment yield of surface and underground erosion in the process of rocky desertification of karst area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016,53(5):1237-1248.
- [16] 王庆贺,赵志猛,沈有信.云南石林喀斯特露石径流输出及其影响因素探究[J].*地球学报*,2021,42(3):383-390.
- Wang Q H, Zhao Z M, Shen Y X. A study of runoff of karst rock outcrops and its influencing factors in shilin, yunnan province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021,42(3):383-390.
- [17] 殷水清,王杨,谢云,等.中国降雨过程时程分型特征[J].*水科学进展*,2014,25(5):617-624.
- Yin S Q, Wang Y, Xie Y, et al. Characteristics of intra-storm temporal pattern over China[J]. *Advances in Water Science*, 2014,25(5):617-624.
- [18] 陈磊,张科利,李业桐,等.喀斯特坡耕地块石出露对土壤水分入渗的影响[J].*农业工程学报*,2022,38(10):111-118.
- Chen L, Zhang K L, Li Y T, et al. Effects of rock outcropping on soil water infiltration in karst cropland slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(10):111-118.
- [19] Sohrt J, Ries F, Sauter M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment[J]. *Catena*, 2014,123:1-10.
- [20] 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.
- Peng T, Wang S J, Zhang X B, et al. Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for karst slopes[J]. *Earth and Environment*, 2008,36(2):125-129.
- [21] 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.
- Chen H S, Yang J, Fu W, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(16):121-126.
- [22] 姜光辉,陈坤琨,于爽,等.峰丛洼地的坡地径流成分划分[J].*水文*,2009,29(6):14-19.
- Jiang G H, Chen K K, Yu S, et al. Separating karst slope runoff in peak cluster area[J]. *Journal of China Hydrology*, 2009,29(6):14-19.
- [23] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].*水土保持学报*,2018,32(2):1-10.
- Dai Q H, Yan Y J. Research progress of karst rocky desertification and soil erosion in southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(2):1-10.
- [24] 陈鹏飞,陈丽华,王宇,等.黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型对坡地产流、产沙的影响[J].*生态与农村环境学报*,2010,26(3):199-204.
- Chen P F, Chen L H, Wang Y, et al. Effect of land use pattern on runoff and sediment yield on slope lands in loess hilly region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010,26(3):199-204.
- [25] Fu Z Y, Chen H S, Xu Q X, et al. Role of epikarst in near - surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: Implications of field rainfall simulation experiments [J]. *Hydrological Processes*, 2016,30(5):795-811.
- [26] 刘正堂,戴全厚,倪九派,等.喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J].*水土保持学报*,2013,27(5):12-16.
- Liu Z T, Dai Q H, Ni J P, et al. Bare slope soil erosion experimental research under the condition of artificial rainfall precipitation in karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013,27(5):12-16.
- [27] 李焱秋,戴全厚,甘艺贤,等.喀斯特裸坡地径流对降雨强度与坡度的响应[J].*水土保持学报*,2019,33(5):28-33.
- Li Y Q, Dai Q H, Gan Y X, et al. Response of runoff to rainfall intensity and slope on bare slope in karst[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,33(5):28-33.
- [28] 刘窑军,王天巍,李朝霞,等.不同植被防护措施对三峡库区土质道路边坡侵蚀的影响[J].*应用生态学报*,2012,23(4):896-902.
- Liu Y J, Wang T W, Li Z X, et al. Effects of different vegetation protection measures on erosion prevention of unpaved roadside in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012,23(4):896-902.
- [29] 刘窑军,王天巍,蔡崇法,等.三峡库区低等级土质道路侵蚀研究[J].*水科学进展*,2015,26(2):169-177.
- Liu Y J, Wang T W, Li Z X, et al. Research of the soil erosion on the low-volume unpaved road in the Three Gorge Reservoir area[J]. *Advances in Water Science*, 2015,26(2):169-177.