

# 岩土覆被格局对西南喀斯特坡地产生流产沙的影响

敖利满<sup>1,2</sup>, 蒋超华<sup>3</sup>, 徐勤学<sup>1,2</sup>, 方荣杰<sup>1,2</sup>, 付智勇<sup>4</sup>, 陈洪松<sup>4</sup>

(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:**为研究不同岩土格局对喀斯特坡地水土流失/漏失的影响,利用人工模拟降雨试验,以裸坡为对照组,研究镶嵌格局、横坡格局、顺坡格局 3 种岩土覆被格局下的坡面产流产沙特征。结果表明:(1)顺坡格局的地表产流量最多,分别较镶嵌格局、横坡格局与裸坡的地表产流量增加 88.6%,67.1%,576.1%,同时顺坡格局的地下产流量最少,分别较镶嵌格局、横坡格局与裸坡减少 37.5%,36.1%,39.2%。(2)地表产沙量顺坡格局>镶嵌格局>横坡格局>裸坡,地下产沙量镶嵌格局>横坡格局>顺坡格局>裸坡。3 种岩土格局的地表产沙量较裸坡均有明显增加,但地下产沙量相对增加较少。(3)岩土格局可改变地表径流泥沙关系,地表累积径流量与地表累积产沙量呈幂函数关系,镶嵌格局明显改变地表径流泥沙关系,使坡面地表侵蚀量显著提升。研究结果可进一步深化对喀斯特坡地降雨侵蚀规律的认识,为喀斯特地区的石漠化治理提供参考依据。

**关键词:**喀斯特坡地;岩土格局;土壤侵蚀;岩石出露

**中图分类号:**S157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2242(2023)01-0090-07

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.014

## Influence of Rock-Soil Cover Pattern on Runoff and Sediment Yield on Karst Slopes in Southwest China

AO Liman<sup>1,2</sup>, JIANG Chaohua<sup>3</sup>, XU Qinxue<sup>1,2</sup>, FANG Rongjie<sup>1,2</sup>, FU Zhiyong<sup>4</sup>, CHEN Hongsong<sup>4</sup>

(1.Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2.Scientific and Educational Innovation Base of Key Laboratory for Theory and Technology of Environmental Pollution Control in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 3.Guangxi Nanning Survey and Design Institute of Pearl River Commission, Nanning 530007; 4.Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100)

**Abstract:** In order to explore the influence of different rock-soil cover patterns on soil erosion/loss in karst slope land, the artificially simulated rainfall experiment was used to study the characteristics of runoff and sediment yield on karst slope under three rock-soil cover patterns of mosaic pattern, transverse slope pattern and downslope pattern with bare slope as the control group. The results showed that: (1) The surface runoff yield of the downslope pattern was the largest, which increased by 88.6%, 67.1% and 576.1% compared with the mosaic pattern, transverse slope pattern and bare slope, respectively. At the same time, the underground runoff yield of the downslope pattern was the smallest, which was 37.5%, 36.1% and 39.2% lower than that of the mosaic pattern, transverse slope pattern and bare slope, respectively. (2) The surface sediment yield followed the order of downslope pattern > mosaic pattern > transverse slope pattern > bare slope, and the underground sediment yield followed the order of mosaic pattern > transverse slope pattern > downslope pattern > bare slope. The surface sediment yield of the three rock-soil cover patterns significantly increased compared with that of the bare slope, but the underground sediment yield increased relatively less. (3) Rock-soil cover pattern could the relationship between surface runoff and sediment. There was a power function relationship between surface cumulative runoff and surface cumulative sediment yield. Mosaic

收稿日期:2022-06-27

资助项目:国家自然科学基金项目(51769005,42067014)

第一作者:敖利满(1999—),男,硕士研究生,主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail:alm0221@qq.com

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

pattern significantly changed the relationship between surface runoff and sediment, and significantly improved the slope surface erosion. The results of this paper could further enhance the understanding of rainfall erosion law in karst slope land, and provide a reference for rocky desertification control in karst area.

**Keywords:** karst slope; rock-soil cover pattern; soil erosion; rock exposure

我国西南喀斯特地区是世界上面积最大、岩溶发育最典型的喀斯特连续分布带<sup>[1-2]</sup>, 岩溶作用剧烈, 生态环境脆弱。峰丛坡地是西南喀斯特地区的典型地貌, 该地区人口多、耕地少, 当地人民历史上长期开展不合理的社会经济活动, 导致水土流失严重<sup>[3]</sup>, 土地逐渐退化形成大面积的石漠化区域。经长期治理后喀斯特地区石漠化程度减轻, 但目前石漠化土地面积仍较大(1 007 万  $\text{hm}^2$ )<sup>[4]</sup>, 防治形势依然严峻。岩石出露是喀斯特石漠化的直观表现, 岩面能汇集降雨产生岩面流<sup>[5]</sup>, 影响坡面土壤侵蚀过程<sup>[6]</sup>, 研究喀斯特峰丛坡地的土壤侵蚀机制对提升该地区的石漠化治理效益具有较大意义。

岩石出露对坡面土壤侵蚀的影响十分复杂<sup>[7]</sup>, 因此现有坡面土壤侵蚀结果较为离散。有研究<sup>[8-9]</sup>表明, 岩石出露可以抑制坡面产流, 提高地表径流入渗率, 降低地表径流量从而减少土壤流失量; 已有研究<sup>[10-12]</sup>通过模拟降雨试验发现, 土壤流失量随着裸岩率的增加而呈下降趋势; 同时也有研究<sup>[13-14]</sup>指出, 岩石出露对坡面造成更严重的侵蚀; Dai 等<sup>[13]</sup>通过模拟降雨试验发现, 在一定裸岩率下, 岩石出露增加地表产沙量; 宋兰等<sup>[14]</sup>通过室内模拟冲刷试验发现, 岩石与坡面成一定夹角时, 坡面土壤流失加剧。现有关于岩石出露对坡面土壤侵蚀影响的研究仍集中于裸岩率方面, 而多种岩石出露特征如岩石与坡面夹角、岩层倾向<sup>[15]</sup>等因素对坡面土壤侵蚀均有重要影响, 但目前岩石空间分布格局等因素对降雨侵蚀过程的影响研究仍较少。

覆被格局常用于植被对土壤侵蚀影响的研究<sup>[16]</sup>中, 主要表示各种覆被类型包括植被、枯落物和裸地等的空间分布和数量结构<sup>[17]</sup>。在喀斯特坡地, 广泛出露地表的岩石和裸地形成特殊的岩土覆被格局, 与植被类似均能影响坡面侵蚀过程。岩面能够拦截大部分降雨产生岩面流, 而由于岩—土截面突变接触, 岩面流易进入岩—土界面产生壤中流, 或直接汇入地表径流冲刷地表, 从而影响坡面产流产沙过程<sup>[18]</sup>。但不同岩土格局对坡面土壤侵蚀的影响尚不清楚, 该条件下的坡面土壤侵蚀机理仍有待进一步研究。因此, 比较分析不同岩土格局对喀斯特坡地土壤侵蚀的影响, 有助于提出有效的水土保持措施, 进一步提升石漠化治理效果。基于此, 本文从岩土格局对坡面土壤侵蚀过程的影响出发, 利用室内人工降雨试验, 对不同岩土覆

被格局条件下坡面地表与地下产流产沙特征进行研究, 分析不同岩土格局下降雨侵蚀的特征, 为进一步探索喀斯特坡地土壤侵蚀机理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤为黄色石灰土, 采自广西壮族自治区环江毛南族自治县大才乡新坡村山脚(北纬  $24^{\circ}44'11''$ , 东经  $108^{\circ}20'41''$ ), 坡面植被盖度较低, 以草本植物为主, 土壤容重为  $1.1 \text{ g/cm}^3$ , 其中砂粒含量为 22.6%, 粉粒含量为 47.3%, 黏粒含量为 30.1%。试验土壤经自然风干后过 10 mm 细筛并去除根系, 按原土壤容重分 3 层压实填筑, 每层 10 cm, 总填土厚度为 30 cm。填土之前, 在土槽槽底的预留孔上均铺设 1 张  $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$  的水溶棉(遇水溶解), 用土壤将其覆盖后再进行填土。在保证土槽内各处土壤均匀的前提下用平整的铁板对土壤进行压实, 同时为减少边界效应, 对土槽四周边界土壤也进行压实。

### 1.2 试验装置

降雨器采用组合的顶喷式降雨器, 由 4 个喷头组成, 喷头为美国 SPRACO 锥形喷头, 高度调节为 4.5 m。降雨器压力表控制在 0.08 Mpa 压强时, 降雨得到的雨滴下降终点速度符合自然降雨特性。降雨前对降雨强度进行校准, 降雨均匀度可达到 80% 以上, 有效半径为 2 m, 雨强范围为  $25 \sim 150 \text{ mm/h}$ <sup>[18]</sup>。试验土槽为自主设计的固定坡度混凝土槽, 长 3 m, 宽 1.5 m, 高 0.5 m, 土槽通过两排高度不一的砖砌支撑墩柱控制整个土槽坡度, 坡度设计为  $15^{\circ}$ (图 1)。土槽槽底从下至上设有多排等间距排列的预留孔, 预留孔共 3 排, 每排设置 3 个预留孔, 孔径为 5 cm, 根据预留孔的位置将整个土槽分为上、中、下 3 个坡位, 最下方预留孔距离土槽底部 60 cm, 中部预留孔距离土槽底部 140 cm, 最上方预留孔距离土槽底部 220 cm。各排预留孔与地下导流弯管连接, 用于收集地下径流。土槽下端开有 1 个 5 cm 孔洞并用管道连接, 位于距底端 40 cm 处, 用于收集地表径流。

### 1.3 试验方法

室内人工降雨试验于 2019 年 7—10 月在中科院环江喀斯特生态系统观测研究站内开展。结合当地大雨强事件与模拟降雨系统的实际情况, 设计降雨强度为  $90 \text{ mm/h}$ , 降雨历时为 90 min, 每个坡面进行 2 次重复降雨试验。根据喀斯特石漠化等级划分标

准<sup>[19]</sup>,选择 30% 的裸岩率表示轻度石漠化,以裸坡为对照组,将多块岩石(岩石为采石场所购置的石灰岩切割而成,每块岩石投影面积约为 25 cm×30 cm,高度范围为 30~35 cm)以 3 种不同组合方式埋入土壤中:(1)多块岩石间隔镶嵌于土壤中为镶嵌格局;(2)多块岩石相互连接成条形横向埋于土壤中为横坡格局;(3)多块岩石相互连接成条形纵向埋于土壤中为顺坡格局(图 2)。填土时,先填 1 层土壤(10 cm)并压实后,将岩石放置到土层上再进行填土并压实,经自然沉淀 1 周后开始降雨试验。

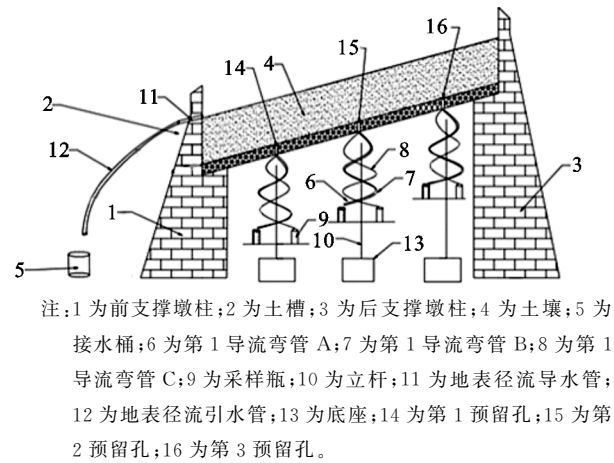


图 1 试验土槽

试验自降雨器出现雨水开始计时,在试验土槽下部和底部导水管出水口处用集流桶分别收集地表径流和地下径流,当导水管出口开始出流时记录其初始产流时间,每间隔 5 min 收集 1 次径流泥沙样。径流样品收集后,采用电子秤称量出径流重,水样经 24 h 自然沉淀后倒出上层清水,再用滤纸过滤出泥沙样品,将滤纸放置在 105 ℃ 的恒温箱中烘干,后使用精度为 0.000 1 g 的电子天平称量滤纸与泥沙的总量,再减去滤纸的净重后获得径流中的泥沙含量。

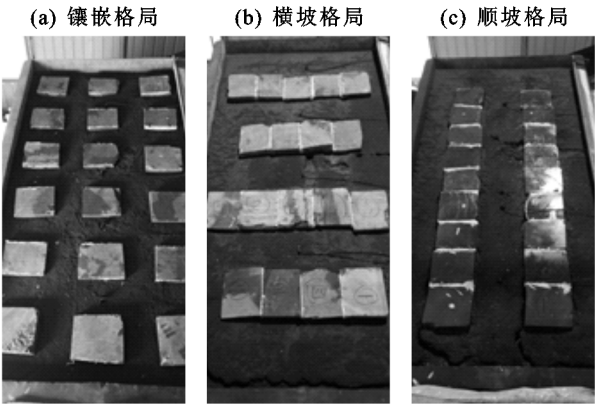


图 2 3 种岩土覆被格局

1.4 数据分析

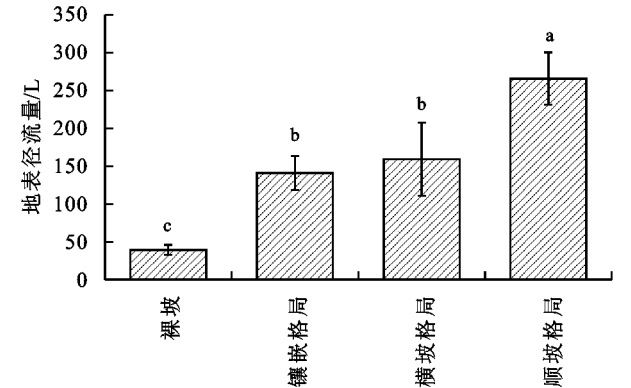
利用 Excel 2016 软件对初始产流时间、产流量和产沙量进行数据处理,采用 SPSS 26 软件进行数据分析,其中差异显著性采用 LSD(least signification

difference test)进行样本检验,使用 Origin 2021 软件绘制图表并进行数据拟合。

2 结果与分析

2.1 岩土格局对地表产流的影响

由图 3 可知,顺坡格局的地表径流总量显著大于其他岩土格局,分别是裸坡、镶嵌格局、横坡格局的 6.8,1.9,1.7 倍,地表径流总量顺坡格局>横坡格局>镶嵌格局>裸坡。



注:图柱上方不同小写字母表示不同岩土格局坡面间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

图 3 不同岩土格局坡面地表径流总量

由图 4 可知,平均地表初始产流时间顺坡格局<横坡格局<镶嵌格局<裸坡。顺坡格局地表初始产流时间最早(17.2 min),且显著早于镶嵌格局(30.9 min)与裸坡(43.1 min),横坡格局的地表初始产流时间为 23.1 min,与顺坡格局差异较小。

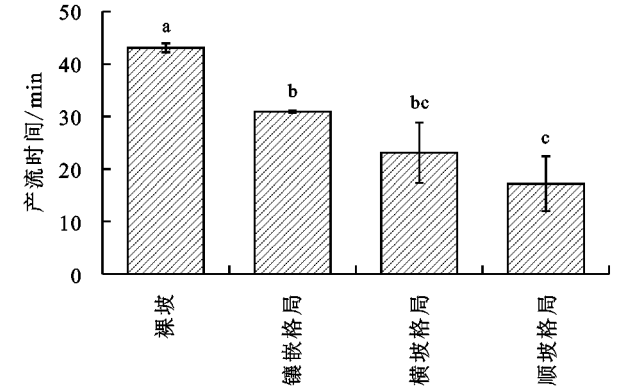


图 4 不同岩土格局平均地表初始产流时间

由图 5 可知,顺坡格局的地表径流强度明显高于其他格局。顺坡格局稳定地表径流强度达到 4.6 L/min,分别较镶嵌格局(2.6 L/min)与横坡格局(2.9 L/min)稳定地表径流强度提升 76.9%与 58.6%。3 种岩土格局稳定地表径流强度均大于裸坡(0.9 L/min),分别是裸坡的 5.1,2.9,3.2 倍。3 种格局地表产流过程均呈现先迅速增大后逐渐稳定的趋势,地表开始产流后,镶嵌格局地表径流强度最快达到稳定水平(55 min),顺坡格局与横坡格局则均在 65 min 趋于稳定,裸坡在 75 min 才缓慢达到稳定状态。



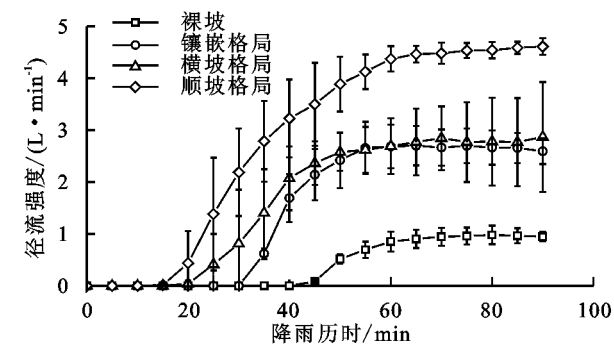


图 5 不同岩土格局地表产流过程

2.2 岩土格局对地下产流的影响

由表 1 可知,地下径流总量裸坡>镶嵌格局>横坡格局>顺坡格局。不同格局之间,顺坡格局的上、中、下坡位的地下径流量均小于其他格局。方差分析显示,顺坡格局的中坡位地下径流量显著小于其他格局,而其他格局的地下径流量之间未见显著差异。不同坡位之间,除横坡格局外,其他格局的下坡位产流量均显著高于上、中 2 个坡位。

由图 6 可知,顺坡格局明显抑制地下产流,平均地下初始产流时间顺坡格局<横坡格局<镶嵌格局

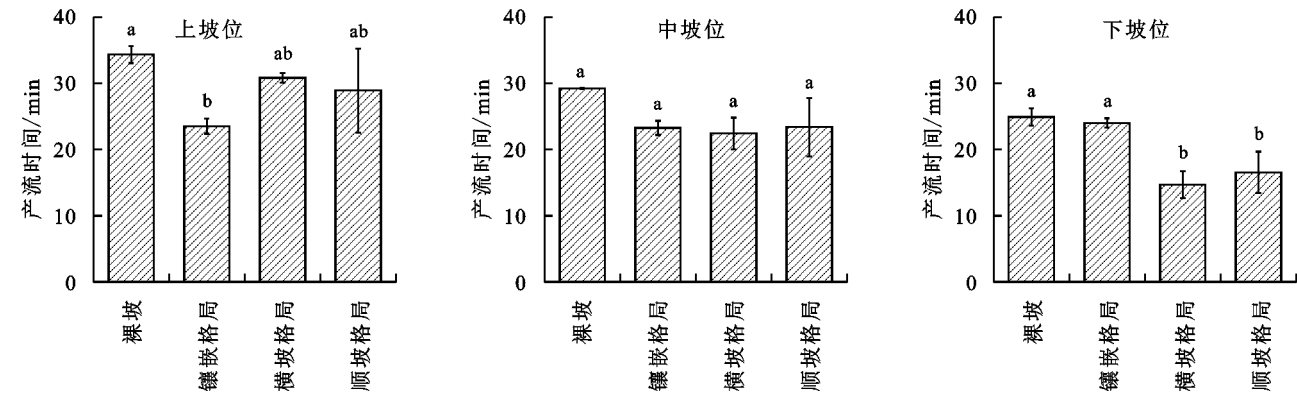


图 6 不同岩土格局地下初始产流时间

由图 7 可知,顺坡格局平均稳定地下径流强度明显低于其他格局。相同坡位间,在上坡位,稳定地下径流强度镶嵌格局>裸坡>顺坡格局>横坡格局,横坡格局稳定地下径流强度较镶嵌格局降低 38.4%。在中坡位,稳定地下径流强度裸坡>横坡格局>镶嵌格局>顺坡格局,顺坡格局稳定地下径流强度较裸坡降低 71.1%。在下坡位,稳定地下径流强度裸坡>镶嵌格局>横坡格局>顺坡格局,顺坡格局稳定地下径流强度较裸坡降低 40.9%。不同坡位相比,各坡位稳定地下径流强度上坡位(0.6 L/min)<中坡位(1.1 L/min)<下坡位(1.6 L/min),不同岩土格局的地下径流强度在 3 个坡位中均呈现先迅速增大后逐渐稳定的趋势。总体而言,顺坡格局平均稳定地下径流强度(2.0 L/min)低于镶嵌格局(3.6 L/min)与横坡格局(3.2 L/min),裸坡(4.1 L/min)最高。

2.3 岩土格局对坡面产沙的影响

2.3.1 岩土格局对地表产沙的影响 由图 8 可知,

局<裸坡。相同坡位间,镶嵌格局上坡位的地下初始产流时间(23.5 min)早于其他格局,且显著早于裸坡地下初始产流时间(34.3 min)。横坡格局中坡位的地下初始产流时间(22.4 min)早于其他格局,但与其他格局均无明显差异。横坡格局下坡位的地下初始产流时间(14.7 min)早于其他格局,与顺坡格局(16.6 min)无显著差异,但显著早于镶嵌格局与裸坡。总体而言,横坡格局的平均地下初始产流时间(22.6 min)最早。不同坡位间,下坡位平均初始产流时间为 20.1 min,早于其他 2 个坡位。坡位从上往下,镶嵌格局地下初始产流时间先提前后延迟,但均在 23~24 min 产流,其他格局地下初始产流时间主要呈逐渐提前的趋势。

| 表 1 不同岩土格局坡面地下径流量 |            |            |             | 单位:L       |
|-------------------|------------|------------|-------------|------------|
| 坡位                | 裸坡         | 镶嵌格局       | 横坡格局        | 顺坡格局       |
| 上                 | 29.8±3.2Ca | 34.1±3.8Ca | 25.7±23.2Ba | 24.2±7.2Ba |
| 中                 | 72.5±4.9Ba | 62.4±3.8Ba | 70.2±7.2ABa | 23.9±1.3Bb |
| 下                 | 96.5±8.0Aa | 96.9±5.5Aa | 93.2±18.1Aa | 72.7±1.3Aa |

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同坡位间差异显著( $p<0.05$ );同行不同小写字母表示不同岩土格局坡面间差异显著( $p<0.05$ )。

坡面平均地表产沙量大小依次为顺坡格局>镶嵌格局>横坡格局>裸坡。顺坡格局的地表产沙量最高,分别较镶嵌格局与横坡格局提升 1.8%与 11.7%。方差分析显示,3 种格局坡面地表产沙量之间无显著差异,但均明显高于裸坡,镶嵌格局、横坡格局、顺坡格局的地表产沙量分别是裸坡的 13.5,12.3,13.7 倍。

2.3.2 岩土格局对地下产沙的影响 由表 2 可知,镶嵌格局、横坡格局、顺坡格局的地下产沙总量均高于裸坡,其中镶嵌格局的地下产沙总量(274.8 g)最高,较横坡格局与顺坡格局分别提高 48.7%与 50.0%。相同坡位间,镶嵌格局在上、中、下 3 个坡位的地下产沙量均最大,明显加剧地下漏失。不同坡位间,从上坡位到下坡位,镶嵌格局与横坡格局的地下产沙量均呈逐渐上升的趋势,而顺坡格局的地下产沙量则呈先减少后增多的趋势。下坡位平均地下产沙量明显高于上、中 2 个坡位,说明下坡位地下漏失更严重。

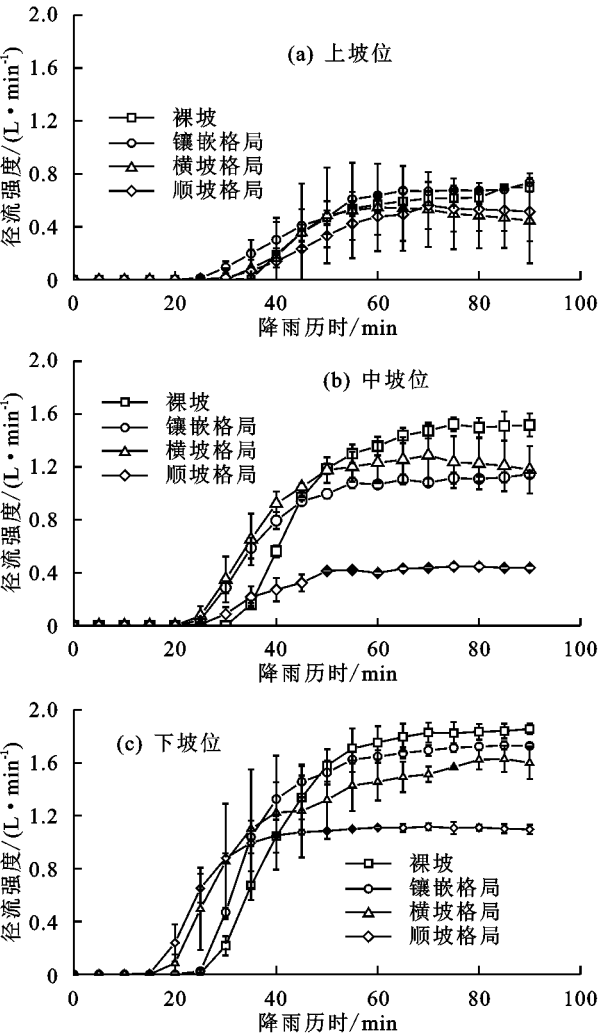


图 7 不同岩土格局地下产流过程

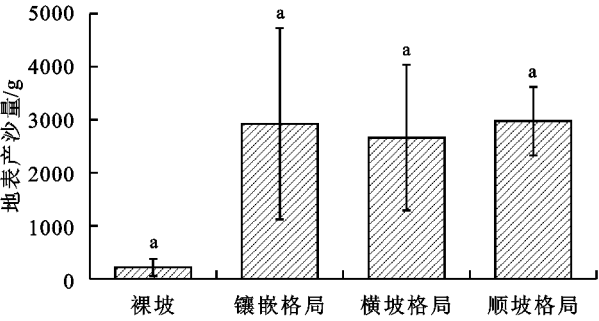


图 8 不同岩土格局坡面地表产沙量

表 2 不同岩土格局坡面地下产沙量 单位:g

| 坡位 | 裸坡          | 镶嵌格局         | 横坡格局          | 顺坡格局        |
|----|-------------|--------------|---------------|-------------|
| 上  | 18.5±15.3Aa | 44.8±61.3Aa  | 17.6±22.5Aa   | 59.2±80.2Aa |
| 中  | 77.1±51.8Aa | 91.4±61.8Aa  | 62.7±72.4Aa   | 48.0±11.9Aa |
| 下  | 73.4±74.4Aa | 138.6±81.6Aa | 104.5±131.9Aa | 76.0±56.7Aa |

2.4 岩土格局对地表径流泥沙关系的影响

由表 3 可知,不同岩土格局坡面的地表累积径流量与地表累积产沙量均呈极显著正相关关系。为进一步分析不同岩土格局地表产流与产沙特征之间的关系,对各格局的地表累积径流量与累积产沙量进行回归分析,结果表明,地表累积径流量与累积产沙量呈幂函数关系,相关系数均在 0.97 以上,累积产沙量

随着累积产流量的增加而增加。拟合方程表明,岩土格局对喀斯特坡面径流泥沙关系的影响均较为显著,结合降雨及喀斯特坡面产流产沙的实际情况,镶嵌格局对坡面径流泥沙关系的影响最显著,明显大于横坡格局与顺坡格局,极大提升坡面产沙量。

表 3 不同岩土格局坡面累积产流量与累积产沙量的回归分析

| 不同岩土格局 | 回归方程               | $R^2$  | 显著性水平 | 皮尔逊相关性 |
|--------|--------------------|--------|-------|--------|
| 裸坡     | $y=18.08x^{0.69}$  | 0.9902 | 0     | 0.987  |
| 镶嵌格局   | $y=154.40x^{0.60}$ | 0.9913 | 0     | 0.975  |
| 横坡格局   | $y=63.07x^{0.75}$  | 0.9738 | 0     | 0.980  |
| 顺坡格局   | $y=29.78x^{0.84}$  | 0.9916 | 0     | 0.993  |

3 讨论

本研究表明,顺坡格局明显促进地表产流,抑制地下产流。顺坡格局地表初始产流时间最早(13.5 min),地表径流总量最大(265.7 L),而镶嵌格局与横坡格局的地表初始产流时间也均早于裸坡,且地表径流总量均大于裸坡。Liu 等<sup>[20]</sup>对缓坡与陡坡的模拟降雨试验研究表明,岩石出露增加缓坡与陡坡的坡面地表径流量,这与本研究结果相似。产生这种结果的原因主要与岩面流有关,Wang 等<sup>[21]</sup>研究发现,出露岩石将近 1/2 到达岩面的降雨通过岩面流的方式输出到岩石附近的土壤中。本研究中试验所用岩石为石灰岩切割而成,光滑度与喀斯特坡地自然出露的岩石有一定差异,且由于本试验在 90 mm/h 的大雨强条件下进行,岩面可拦截降雨转化为大量岩面流,一部分岩面流沿岩面向下进入地下优先通道<sup>[22]</sup>,增加土壤水分,因重力作用土壤水分向下坡位运移,下坡位土壤水分逐渐达到饱和,加速坡面蓄满产流;另一部分岩面流通过岩面直接到达地表,在坡面产生地表径流后,岩面流直接汇入地表径流,使地表径流量增加。顺坡格局由于岩石连续地纵向放置在地表,岩石从上坡位直接延续到下坡位,其连续的不透水面积大于其他格局,岩面汇聚降雨形成岩面流后大部分通过岩面向下坡位运移,而后直接汇入地表径流,使其地表径流量明显大于其他 2 种岩土格局。

本研究表明,顺坡格局的地表产沙量大于其他岩土格局,镶嵌格局的地下产沙量大于其他岩土格局,而 3 种岩土格局的地表产沙量与地下产沙量均较裸坡有所增加,但地下产沙量的增加幅度小于地表产沙量。这可能与岩土格局通过影响径流来间接影响侵蚀有关,有研究<sup>[23-24]</sup>指出,裸岩的截流汇流作用降低地表径流速度,但在本研究中 3 种岩土格局由于裸岩面积较大,降雨在岩面汇聚成岩面流,在地表产流之后,岩面流汇入地表径流增大地表径流量,加快地表径流速度,从而也使地表侵蚀量增大<sup>[25]</sup>。顺坡格局

地表径流量显著大于其他格局,且由于运移路径长,岩面径流速率高,汇入地表径流后增大径流动能,因此产沙量最高。镶嵌格局由于岩石四周与土壤接触面积大于其他格局,岩面流入渗得相对更多,地下产流量更多,导致地下产沙量更大。横坡格局类似于水土保持措施中的横坡耕作模式,但与横坡耕作模式可以拦截径流,保持水土有所不同,横坡格局加剧地表产沙。这主要是因为横坡格局模拟的是坡面横向连续出露的岩石,且本试验岩石较为光滑,在 90 mm/h 的雨强条件下,岩面汇聚了降雨形成大量岩面流,在地表径流形成后,岩面流汇入地表径流,增大地表径流量。此外,喀斯特土层浅薄(本试验为模拟这一特点,总填土厚度为 30 cm),降雨与径流易通过岩石与土壤形成的岩土界面优先通道进入地下,在土槽下坡位易形成蓄满产流,且横向出露的岩石并未完全堵住地表径流的流路径,加上岩面流的汇入,极大地增加地表径流量。然而横坡格局相比其他 2 种岩土格局,起到一定的拦截径流泥沙的作用,横坡格局地表产流量显著低于顺坡格局(图 3),横坡格局的地表产沙量虽然较裸坡有明显提升,但仍低于镶嵌格局与顺坡格局(图 8)。在横坡格局的土槽中,地表径流路径仍然连续,地表径流在土槽与出露岩石边缘作用形成细沟,且由于大量岩面流汇入地表径流,对岩石下方土壤冲刷强烈,增加地表侵蚀。3 种岩土格局对地下产沙量的提升较小,原因主要是地下产流量较裸坡有所减少。岩土格局改变地表径流的运移路径,明显增加地表径流量,岩土格局虽然促进径流入渗,但是增大坡面不透水面积,总体减少地下径流量,且岩石的放置并未破坏大部分土壤结构,土壤仍较为紧实,因此地下产沙量增长较少。

与裸坡相比,镶嵌格局、横坡格局、顺坡格局均明显改变地表径流泥沙关系,不同岩土格局坡面地表径流量与地表产沙量之间存在幂函数关系,拟合方程的相关性系数均在 0.97 以上。结合拟合方程与喀斯特坡面产流产沙的实际情况而言,3 种格局中镶嵌格局显著改变地表径流泥沙关系,提升地表产沙量最多。原因可能是镶嵌格局岩石较为分散,岩石四周与土壤接触面积相比其他格局更大,土槽中土壤受岩面流影响的面积更大,岩面流汇入后的地表径流挟沙能力随之增强。横坡格局由于岩石横向排列,一定程度上起到拦截地表径流的作用,同时受岩面流冲刷的土壤面积小于镶嵌格局,地表径流的挟沙能力也小于镶嵌格局。顺坡格局岩石纵向排列,且岩石更为集中,岩面流的运移路径更长,重力作用使径流速度增大,径流获得的动能更大,地表径流携带泥沙的能力强于裸坡<sup>[26]</sup>。但是顺坡格局由于岩石一直延续到土槽下坡

位,受岩面流冲刷的土壤面积小于其他岩土格局,下部表层松散泥沙减少后,径流可以携带的泥沙也减少,径流挟沙能力因此低于其他坡面。最后,由于本试验所用岩石为石灰岩切割而成,其岩面光滑度与岩石高度相较自然出露岩石仍存在一定差异,同时本试验的结果是通过模拟暴雨情况的人工降雨获得,因此为更好地研究不同岩土格局对喀斯特坡地产生沙特征的影响,在未来,还需加强自然降雨条件下或不同降雨强度的模拟降雨条件下,不同岩土覆被格局对喀斯特坡地产生沙特征影响的野外观测研究。

## 4 结论

(1) 岩土格局使降雨通过岩—土界面优先通道向下快速入渗,同时汇聚大量岩面流冲刷地表,显著促进地表产流,抑制地下产流。顺坡格局对地表产流的促进作用强于其他格局,对地下产流的抑制作用也强于其他格局。

(2) 顺坡格局显著加剧地表产沙,其地表产沙量高于其他格局,是裸坡地表产沙量的 13.7 倍;镶嵌格局的地下产沙量最高,是裸坡地下产沙量的 1.62 倍。岩土格局使地表侵蚀量与地下漏失量均有所增加,但地下漏失量增加较少,表明防治地表土壤流失仍是喀斯特石漠化地区水土保持工作的重点。

(3) 岩面流是影响坡面地表径流挟沙能力的重要因素,地表累积径流量与地表累积产沙量呈幂函数关系,地表径流挟沙能力镶嵌格局>横坡格局>顺坡格局>裸坡,因此在石漠化较严重的喀斯特坡地开展水土保持工作时,需要侧重治理镶嵌格局下的土壤流失。

### 参考文献:

- [1] 陈洪松,冯腾,李成志,等.西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J].水土保持学报,2018,32(1):10-16.
- [2] 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.
- [3] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J].应用生态学报,2014,25(4):947-954.
- [4] 王克林,岳跃民,陈洪松,等.喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J].生态学报,2019,39(20):7432-7440.
- [5] 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.
- [6] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等.岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J].地球学报,2014,35(5):535-542.
- [7] 李瑞,盘礼东.岩石裸露与水土流失关系研究现状及石漠化因子研究存在的问题[J].水土保持学报,2021,35(5):10-15,23.
- [8] Sekucia F, Dlapa P, Kollár J, et al. Land-use impact on porosity and water retention of soils rich in rock fragments[J].Catena,2020,195:e104807.



- [9] Gong T X, Zhu Y J, Shao M A. Effect of embedded-rock fragments on slope soil erosion during rainfall events under simulated laboratory conditions[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 811-817.
- [10] Lv J R, Luo H, Xie Y S. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events [J]. Catena, 2019, 172: 179-189.
- [11] 刘正堂, 戴全厚, 杨智. 喀斯特裸坡土壤侵蚀模拟研究[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 356-362.
- [12] Han Z, Wang X Y, Song D D, et al. Response of soil erosion and sediment sorting to the transport mechanism on a steep rocky slope[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(12): 2467-2478.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 覃自阳, 甘凤玲, 何丙辉. 岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 68-75, 80.
- [16] 王恒星, 张建军, 孙若修, 等. 晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 85-95.
- [17] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
- [18] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. Geomorphology, 2015, 250: 1-14.
- [19] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 王济, 蔡雄飞, 雷丽, 等. 不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J]. 中国岩溶, 2010, 29(1): 1-5.
- [24] Kheir R B, Abdallah C, Khawlie A. Assessing soil erosion in Mediterranean karst landscapes of Lebanon using remote sensing and GIS [J]. Engineering Geology, 2008, 99(3/4): 239-254.
- [25] Ekwue E I, Harrilal A. Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(1): 112-118.
- [26] 曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 黄河下游河岸坡面产流产沙特征及其与汇流路径长度关系[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1389-1400.

(上接第 89 页)

- [18] 张光辉. 对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 151-158.
- [19] 吴淑芳, 刘勃洋, 雷琪, 等. 基于三维重建技术的坡面细沟侵蚀演变过程研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 114-120.
- [20] 张晴雯. 细沟水蚀动力过程试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- [21] 赵宇. 黄土细沟侵蚀过程冲刷试验研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [22] 喻武, 任德智, 张鹏, 等. 藏东南高寒土坡面细沟水流输沙能力变化特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 76-82.
- [23] 刘冉, 余新晓, 蔡强国, 等. 坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(6): 140-146.
- [24] 赵海滨, 闫国新, 姚文艺, 等. 黄土坡面径流输沙能力试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 41-44.
- [25] 高鹏宇, 詹振芝, 蒋芳市, 等. 坡度和流量对崩积体坡面细沟水流输沙能力的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 68-73.
- [26] 陶婷婷, 陈晓燕, 陈仕奇, 等. 饱和紫色土初始态和稳定态细沟水力学特征研究[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 129-138.
- [27] 冯德乾. 细沟水流与跌坑特征响应机制研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [28] Huang Y H, Li F H, Wang W, et al. Rill erosion processes on a constantly saturated slope [J]. Hydrological Processes, 2020, 34(20): 3955-3965.
- [29] Gao X F, Li F H, Chen C, et al. Effects of thawed depth on the sediment transport capacity by melt water on partially thawed black soil slope [J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(1): 84-93.
- [30] 盛贺伟, 孙莉英, 蔡强国. 黄土坡面细沟发育形态对侵蚀特征的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(4): 679-688.