

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.011

常志勇, 杨以翠, 卢宝鹏, 等. 模拟降雨条件下坡度和降雨强度对桂南崩积体侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 118-125.

CHANG Zhiyong, YANG Yicui, LU Baopeng, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on sediment yield in the colluvial deposits of southern Guangxi under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 118-125.

## 模拟降雨条件下坡度和降雨强度对桂南崩积体侵蚀产沙的影响

常志勇<sup>1</sup>, 杨以翠<sup>2</sup>, 卢宝鹏<sup>3</sup>, 刘艳<sup>4</sup>, 裴承若<sup>1</sup>, 杨春光<sup>1</sup>

(1. 广西水利电力职业技术学院, 南宁 530023; 2. 广西交通设计集团有限公司, 南宁 530029;

3. 广西景鹏科技有限公司, 南宁 530201; 4. 广西民族大学, 南宁 530007)

**摘要:** [目的] 探究坡度和降雨强度对崩岗崩积体坡面侵蚀产沙特征的影响, 为桂南地区崩积体水土流失预测及其防治提供科学依据。[方法] 采用室内模拟降雨试验, 研究不同坡度(15°, 20°, 25°)和降雨强度(60, 90, 120 mm/h)条件下崩积体坡面侵蚀产沙过程。[结果] 各坡度条件下, 60 mm/h 降雨强度时, 崩积体坡面侵蚀速率变化过程较为稳定, 且侵蚀速率多低于 5.0 g/(m<sup>2</sup>·s), 并呈现出一定的下降趋势; 90~120 mm/h 降雨强度下, 侵蚀速率呈先波动增大后波动减小的变化趋势。降雨过程中侵蚀速率最大值随降雨强度和坡度的增大而增大, 侵蚀速率最大值出现的时间集中在 0~25 min 内, 且随坡度的增大有提前的趋势。次降雨产沙量(3.64~48.07 kg/m<sup>2</sup>)随降雨强度和坡度的增大而增大, 与降雨强度和坡度之间的非线性回归结果(幂函数)优于线性回归结果。次降雨产沙量与坡度和降雨强度的交互项相关性最为显著, 二者呈极显著线性函数关系。[结论] 次降雨产沙量对降雨强度的敏感系数要高于对坡度的敏感系数, 降雨强度对次降雨产沙量的影响强于坡度, 崩积体侵蚀防治中建议做好坡面排水措施。

**关键词:** 人工模拟降雨; 崩积体; 坡度; 降雨强度; 侵蚀速率

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0118-08

## Effects of Slope Gradient and Rainfall Intensity on Sediment Yield in the Colluvial Deposits of Southern Guangxi Under Simulated Rainfall

CHANG Zhiyong<sup>1</sup>, YANG Yicui<sup>2</sup>, LU Baopeng<sup>3</sup>, LIU Yan<sup>4</sup>, PEI Chengruo<sup>1</sup>, YANG Chunguang<sup>1</sup>

(1. Guangxi Vocational College of Water Resources and Electric Power, Nanning 530023, China; 2. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China; 3. Guangxi Jingpeng Technology Co., Ltd., Nanning 530201, China; 4. Guangxi University for Nationalities, Nanning 530007, China)

**Abstract:** [Objective] To reveal the influences of slope gradient and rainfall intensity on the erosion and sediment yield characteristics of the colluvial deposits from Benggang, and to provide a scientific basis for soil and water loss prediction and control of the colluvial deposits in southern Guangxi. [Methods] The indoor experiment of simulated rainfall was carried out to investigate the erosion and sediment yield processes of colluvium slope under different slope gradients (15°, 20°, 25°) and rainfall intensities (60, 90, 120 mm/h). [Results] The results showed that the variation processes of the erosion rate of the colluvium were relatively stable, and the erosion rate was mostly lower than 5.0 g/(m<sup>2</sup>·s), and showed a certain downward trend when the rainfall intensity was 60 mm/h under different slope conditions. While, the erosion rate fluctuated to increase first, and then decreased under the rainfall intensity of 90 to 120 mm/h. The maximum erosion rate during each rainfall increased with the increase of rainfall intensity and slope gradient, and the maximum erosion rate occurred within 0 to 25 min and tended to advance with the increase of slope gradient. The sediment yield amount (from 3.64 to 48.07 kg/m<sup>2</sup>) increased with the increase of rainfall intensity and slope

收稿日期: 2023-07-08

修回日期: 2023-08-06

录用日期: 2023-08-20

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-01-17

资助项目: 广西水土保持学会重点领域创新项目“桂东南崩岗土壤理化性质与抗蚀规律研究”(202009004); 国家自然科学基金青年科学基金项目“不同前期含水量下地表糙度对红壤坡面流水动力特性的影响机制”(42207389)

第一作者: 常志勇(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持、森林水文研究。E-mail: 595522093@qq.com

通信作者: 常志勇(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持、森林水文研究。E-mail: 595522093@qq.com

gradient, and the nonlinear regression result (a power function) between the sediment yield amount and rainfall intensity and slope gradient was better than the linear regression result. The correlation between sediment yield amount and the interaction of slope gradient and rainfall intensity was the most significant and showed a high-significant linear function relationship. [Conclusion] The sensitivity coefficient of the sediment yield amount to rainfall intensity was higher than that to slope gradient, and the influence of rainfall intensity on sediment yield was stronger than slope gradient. Slope drainage measures should be taken in the prevention and control of colluvial deposit erosion.

**Keywords:** rainfall simulation; colluvial deposits; slope gradient; rainfall intensity; soil erosion rate

Received: 2023-07-08

Revised: 2023-08-06

Accepted: 2023-08-20

Online(www.cnki.net): 2024-01-17

崩岗侵蚀是我国南方低山丘陵地区广大风化壳坡地上一种特殊的水土流失形式,是山坡土体在水力和重力双重作用下的冲刷和崩塌侵蚀过程<sup>[1-2]</sup>。崩岗侵蚀是南方侵蚀强度最大、危害最为严重的一种侵蚀类型,被喻为华南“生态溃疡”<sup>[3]</sup>。崩积体是崩岗崩壁在重力作用下崩塌形成的崩坡积物,是一种松散易蚀土体,易受流水冲刷,成为崩岗流域的主要泥沙来源,遭遇强降雨可引起严重水土流失,极大地破坏区域的生态环境。由于崩岗自身及其崩积体易蚀性,崩岗区侵蚀模数高达 30 000~50 000 t/(km<sup>2</sup>·a),严重时可达 10 万 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[4]</sup>。因此,研究崩积体坡面侵蚀过程及其影响因素对华南地区水土流失防治和生态环境改善具有重要的科学价值和现实意义<sup>[5]</sup>。

关于华南崩岗崩积体侵蚀的研究目前已取得一定进展。当前研究主要集中在崩积体产流产沙特征<sup>[6-8]</sup>及其影响因素(如流量、坡度、秸秆覆盖度、结皮等)<sup>[9-11]</sup>,细沟侵蚀特征及其影响因素<sup>[12-14]</sup>,以及崩积体坡面侵蚀水动力特征<sup>[15-17]</sup>、水力输沙特征<sup>[18]</sup>与侵蚀机理<sup>[19-20]</sup>等方面。在崩积体产流产沙方面,刘希林等<sup>[5]</sup>研究崩岗崩积体坡面初始产流时间影响因素发现,降雨强度对初始产流时间影响最大,土体初始含水率的影响次之,坡度的影响相对最小;陈培济等<sup>[8]</sup>研究集中水流冲刷条件下土石混合崩积物坡面产沙特征,并表明各条件下产沙过程均呈先增大后减小再趋于稳定的变化趋势;赵淦等<sup>[9]</sup>研究发现,崩积体侵蚀产沙过程可分为逐步递增阶段、波动变化阶段和稳定阶段,而含沙量随时间的变化分为平缓型和多峰型 2 种。在崩积体侵蚀影响因素方面,朱高立等<sup>[7]</sup>通过室内模拟降雨试验,探讨不同覆盖度和坡度组合坡面在模拟降雨条件下的产流产沙时空特征响应关系发现,坡度对径流量的影响达到极显著水平,覆盖度对产沙量的影响达到显著水平;赵淦等<sup>[9]</sup>研究流量及坡度对崩岗崩积体侵蚀的影响发现,上方来水对产沙量的影响大于坡度,而坡度对含沙量的影响大于上方来水;蒋芳市等<sup>[11]</sup>研究不同结皮条件对崩岗崩积体坡

面侵蚀的影响发现,结皮产生使崩积体坡面的产流时间提前,出现细沟的时间延迟,结皮的存在具有减缓土壤侵蚀的作用;蒋芳市等<sup>[21-22]</sup>还进一步研究坡度和降雨强度对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响及对侵蚀泥沙颗粒特征的影响。坡度和降雨强度是坡面土壤侵蚀的重要影响因素,国内部分学者针对南方土壤在不同降雨强度、坡度等因素条件下的产流产沙过程进行研究<sup>[23-25]</sup>。然而,坡度和降雨强度对桂南地区崩积体侵蚀变化过程及其产沙特征的影响目前还不明确。另外,广西壮族自治区崩岗数量仅次于广东省和江西省<sup>[26]</sup>,在广西,面积在 60 m<sup>2</sup>以上的崩岗有 27 000 余座,总面积达 6 597.88 hm<sup>2</sup><sup>[27]</sup>,亟待对桂南地区崩积体土壤侵蚀特征及其影响因素进行研究。

因此,本研究结合广西崩岗普查结果,选取典型崩积体土壤进行室内模拟降雨试验,分析降雨强度和坡度对桂南崩积体侵蚀产沙的影响,旨在探明花岗岩风化形成的崩积体产沙规律,为桂南崩岗区崩积体土壤侵蚀预报模型构建提供数据基础,为区域泥沙侵蚀监测提供借鉴,为区域崩岗治理及水土保持措施配置提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于我国西南部广西壮族自治区北海市合浦县(21°27'15"—21°55'08"N,108°50'58"—109°46'02"E),属亚热带海洋性季风气候,高温多雨,干湿分明,年平均日照时间 1 929 h,多年平均气温 23.7 °C,多年平均降水量 1 688 mm。雨量充沛,4—9 月为雨季,降雨量占全年降水量的 80%以上。成土母质多为砂页岩、石灰岩、花岗岩风化发育而成,土层厚,含砂量大,粒径粗,易发生土壤侵蚀。合浦县是广西崩岗灾害较为严重的地区之一,崩岗侵蚀十分严重,崩积体分布广泛,崩岗分布于全县各个乡镇,而山口镇、白沙镇、沙岗镇是最严重的 3 个镇,3 个镇崩岗数量占全县的 45.4%,其中以白沙镇崩岗最为典型。依据南方崩岗

防治规划,广西壮族自治区北海市合浦县水土保持崩岗治理工程列入广西水土保持重点建设工程。

### 1.2 试验设计

结合广西崩积体坡度多在  $10^{\circ}\sim 35^{\circ}$ <sup>[28]</sup>,故设置试验坡度( $S$ )为  $15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}$ 。通过分析合浦县常年降雨数据,根据当地降雨强度特征,将试验降雨强度( $I$ )设定为 60,90,120 mm/h。将设定的坡度和降雨强度两两组合,共计 9 场次试验。

### 1.3 供试材料

结合合浦县白沙镇崩岗水土保持治理工程实施方案及实地踏勘,2022 年 7 月选择白沙镇西坎村为采样样地。样地位于白沙河小流域,在样地崩积体坡面上、中、下 3 个坡位进行采样。样地为微丘地貌,海拔 20~40 m。土壤颗粒中  $<0.005$  mm 占 8.0%,  $0.005\sim 0.05$  mm 占 18.5%,  $>0.05$  mm 占 73.5%,土壤孔隙率 46.0%,塑限 32.5%。土壤质地为砂质壤土,土层较薄,土质疏松。土壤结构抗剪强度低,渗透力强,降雨时,雨水很快充满孔隙,土壤含水量达 45%以上,大大超过土壤塑限(32.5%)。土体富含钾、钙等矿物质。试验用土风干后过 10 mm 筛以清除土样中的植物根系、石块、塑料等杂物。

### 1.4 试验装置

模拟降雨装置采用西安清远测控技术有限公司生产的 QYJY-503 型降雨器,降雨高度 6 m,降雨调节精度 7 mm/h。模拟降雨器有效降雨面积  $11\text{ m}\times 8\text{ m}$ ,降雨强度变化范围为  $15\sim 200$  mm/h,降雨均匀度  $>0.85$ 。试验前对模拟降雨装置进行调试。试验土槽为固定式可变坡钢槽,坡度调节范围为  $0\sim 30^{\circ}$ ,土槽长  $\times$  宽  $\times$  高依次为  $2.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 。钢槽底部设有排水孔。填装试验土样前在槽车底部铺设 10 cm 厚粗沙,粗沙表面铺上 1 层渗透纱布,模拟自然条件下的水分入渗过程。试验用土采用人工装填,按照样地坡面上、中、下 3 个坡位土样对应装填在变坡钢槽车的上、中、下 3 个位置,每 10 cm 逐层填装,根据野外实地测量的崩积体不同深度土层容重,控制每层填装土样的体积与质量,使土样紧实度、容重等与原状土接近,填土厚度 40 cm,保证土体表面平整,并与土槽排水口齐平。

### 1.5 试验过程与指标获取

降雨试验前调整变坡钢槽处于  $5^{\circ}$  坡度状态,采用 15 mm/h 的模拟降雨使供试土壤充分入渗直至坡面开始产流。之后采用土工布将坡面苫盖,将钢槽调整为水平,静置 24 h,使土壤水体充分渗透,保证各层土体含水量处于均一水平。24 h 后测得土样质量含水量为 13.6%。开始试验前,调整槽车坡面至试验坡

度,打开模拟降雨器,率定降雨强度至目标值,揭开土工布,试验坡面开始产流时进行试验计时。用 2 000 mL 量筒在集流槽口处接取水沙样,用秒表计时,每次接样时间为 5 s,读取水沙样体积。单次降雨时长根据当地常见暴雨历时设计为 60 min,每隔 5 min 取样 1 次,取 2 个重复水沙样,每场降雨试验取样总数为 24 个。降雨结束后,用电子天平称量样品质量,在  $105^{\circ}\text{C}$  烘箱中烘干后称量泥沙干重。

### 1.6 数据分析

侵蚀速率( $Er$ ):是指单位时间内单位面积的泥沙输移质量,计算公式为

$$Er = \frac{m}{bLt} \quad (1)$$

式中: $Er$  为侵蚀速率 [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]; $m$  为测量时间段内的泥沙干重( $\text{g}$ ); $b$  为过水断面宽度,为 1.0 m; $L$  为坡长,为 2.0 m; $t$  为接样时间,为 5 s。

侵蚀速率变异系数( $Cv$ ):是指侵蚀速率标准差( $\sigma$ )与平均值( $\mu$ )之比,计算公式为

$$Cv = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

敏感性系数( $Cs$ ):反映因变量对自变量变化的敏感程度,是因变量变化率与自变量变化率的比值<sup>[29-30]</sup>。计算公式为:

$$Cs = \frac{(M_{f_{\max}} - M_{f_{\min}})/M_{f_{\min}}}{(f_{\max} - f_{\min})/f_{\min}} \quad (3)$$

式中: $M_{f_{\max}}$  为影响因素最大梯度下的次降雨产沙量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); $M_{f_{\min}}$  为影响因素最小梯度下的次降雨产沙量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); $f_{\max}$  为影响因素最大梯度值; $f_{\min}$  为影响因素最小梯度值。

采用 Excel 2019 软件进行数据统计,采用 OriginPro 8.5 软件进行绘图;采用 SPSS 18.0 软件对侵蚀速率与降雨强度、坡度进行 Pearson 相关性分析及逐步回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同降雨强度及坡度下的崩积体侵蚀产沙过程

由图 1 可知,不同降雨强度及坡度条件下,土壤侵蚀速率随降雨历时的变化过程有所不同,且侵蚀速率值之间差异明显。

坡度  $15^{\circ}$  条件下,60 mm/h 降雨强度下的侵蚀速率随降雨历时变化表现出平稳降低的变化趋势,降雨过程中侵蚀速率较小,始终保持在  $2.5\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  以下;而在降雨强度 90,120 mm/h 降雨过程中,侵蚀速率表现为先波动增大后逐渐(波动)减小的变化趋势,2 个降雨强度下的侵蚀速率在降雨过程中出现在某些时刻相等或基本一致的情况,但 120 mm/h 降雨强

度下的侵蚀速率在多数时间段表现出较高水平。坡度 20°条件下,60 mm/h 降雨强度下的侵蚀速率随降雨历时变化表现出缓慢降低的变化趋势,降雨过程中侵蚀速率始终保持在 5.0 g/(m<sup>2</sup>·s) 以下;在降雨强度为 90,120 mm/h 降雨过程中,侵蚀速率表现为先波动增大后波动减小的变化趋势。坡度 25°条件下,60 mm/h 降雨强度下的侵蚀速率随降雨历时变化整体上表现为缓慢降低的变化过程,但在坡面产流

45~60 min 有增大趋势;降雨强度为 90,120 mm/h 时,侵蚀速率也表现出先波动增大后波动减小的变化趋势,且 2 个降雨强度下除起始时刻侵蚀速率值基本一致外,在降雨 5~60 min 内侵蚀速率值始终保持明显的差异性。

可见,当降雨强度和坡度较小时,侵蚀速率随试验历时变化曲线较为平缓,而当降雨强度和坡度较大时,侵蚀速率变化曲线变化幅度明显增大。

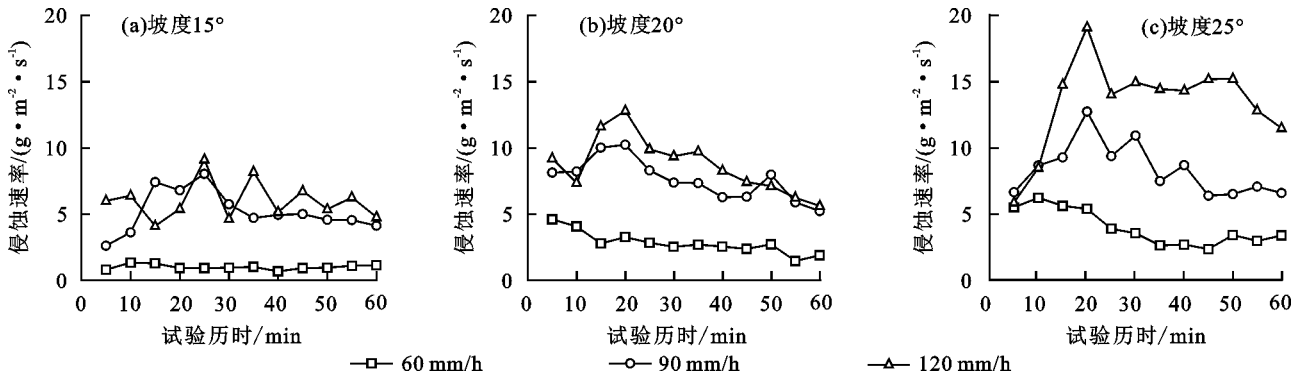


图 1 不同坡度及降雨强度条件下土壤侵蚀速率随降雨历时的变化过程

Fig. 1 The temporal variations of soil erosion rates under different slope gradients and rainfall intensities

由表 1 可知,坡度 15°,20°,25°条件下,60~120 mm/h 降雨强度下的侵蚀速率初始值变化范围分别为 0.81~6.00,4.61~9.21,5.47~5.83 g/(m<sup>2</sup>·s)。坡度 15°和 20°条件下,侵蚀速率初始值随降雨强度的增加表现出明显的增大趋势,而在 25°条件下,各降雨强度下的侵蚀速率初始值基本一致。对于侵蚀速率最大值而言,其随降雨强度和坡度的增大而增大,坡度 15°,20°和 25°条件下,60~120 mm/h 降雨强度下的侵蚀速率最大值变化范围分别为 1.35~9.12,4.61~12.81,6.20~19.06 g/(m<sup>2</sup>·s);侵蚀速率最大值出现的时间集中在 0~25 min 内,且各坡度条件下降雨强度为 90~120 mm/h 时侵蚀速率最大值出现的时间较 60

mm/h 均有延迟,但随坡度的增大表现出一定的提前趋势。变异系数可反映侵蚀速率随降雨历时变化的波动特征,不同降雨强度及坡度条件下侵蚀速率随降雨历时变化的变异系数范围为 0.18~0.33,且多在 0.1~0.3,属于中等变异。就侵蚀速率均值而言,坡度 15°,20°和 25°条件下,60~120 mm/h 降雨强度下的侵蚀速率平均值变化范围分别为 1.01~6.02,2.82~8.73,3.93~13.35 g/(m<sup>2</sup>·s),且随降雨强度及坡度的增大而增大;各降雨强度下,25°坡度的侵蚀速率均值为 15°坡度下的 3.89,1.61,2.12 倍;各坡度条件下,120 mm/h 降雨强度下的侵蚀速率均值较 60 mm/h 降雨强度下分别增加 4.96,2.10,2.40 倍。

表 1 土壤侵蚀速率随降雨历时的变化特征

Table 1 The variation characteristics of the soil erosion rate with rainfall duration

坡度/(°)	降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	初始值/ (g·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	最大值/ (g·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	最小值/ (g·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	极值/ (g·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	平均值/ (g·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	变异系数	最大值出现 时间/min
15	60	0.81	1.35	0.69	0.66	1.01	0.18	5~10
	90	2.62	8.04	2.62	5.42	5.18	0.29	20~25
	120	6.00	9.12	4.10	5.02	6.02	0.23	20~25
20	60	4.61	4.61	1.47	3.14	2.82	0.29	0~5
	90	8.14	10.24	5.23	5.01	7.61	0.19	15~20
	120	9.21	12.81	5.62	7.19	8.73	0.23	15~20
25	60	5.47	6.20	2.32	3.88	3.93	0.33	5~10
	90	6.62	12.70	6.35	6.35	8.33	0.23	15~20
	120	5.83	19.06	5.83	13.23	13.35	0.25	15~20

2.2 不同降雨强度及坡度下崩积体侵蚀产沙量特征

由图 2 可知,次降雨产沙量随坡度和降雨强度的增大而增大。坡度 15°,20°和 25°条件下,60~120

mm/h 降雨强度下的次降雨产沙量变化范围分别为 3.64~21.66,10.16~31.41,14.16~48.07 kg/m<sup>2</sup>。各坡度条件下降雨强度从 60 mm/h 增加至 120 mm/h

min, 次降雨产沙量分别增加 4.96, 2.09, 2.39 倍; 各降雨强度条件下坡度从 15° 增至 25°, 次降雨产沙量分别增加 2.90, 0.61, 1.22 倍。可见, 降雨强度和坡度均对次降雨产沙量有明显的影响。表 2 为次降雨产沙量对坡度和降雨强度的敏感性系数。由表 2 可知, 降雨强度 60, 90, 120 mm/h 条件下次降雨产沙量对坡度的敏感系数分别为 4.34, 0.91, 1.83, 降雨强度最小时, 次降雨产沙量对坡度的敏感系数最大; 坡度 15°, 20° 和 25° 条件下, 次降雨产沙量对降雨强度变化的敏感系数分别为 4.96, 2.09 和 2.39。坡度最小时, 次降雨产沙量对降雨强度变化的敏感系数最大。对比次降雨产沙量对坡度变化敏感系数均值和对降雨强度变化敏感系数均值发现, 次降雨产沙量对降雨强度的敏感系数要高于对坡度的敏感系数, 表明降雨强度对次降雨产沙量的影响比坡度更大。

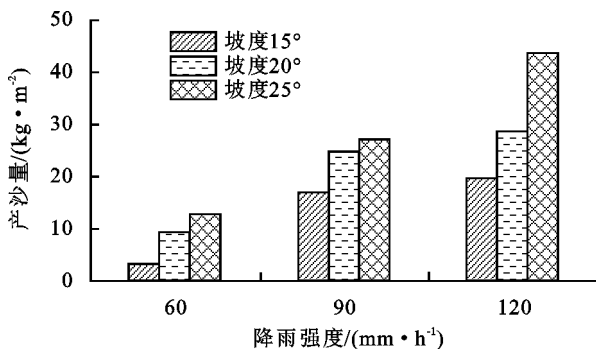


图 2 不同坡度及降雨强度条件下次降雨产沙量

Fig. 2 Sediment yield amounts under different slope gradients and rainfall intensities

表 2 次降雨产沙量对坡度和降雨强度的敏感性系数

Table 2 The sensitivity coefficients of sediment yield amount to slope gradient and rainfall intensity

降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	对坡度的 敏感性系数	坡度/(°)	对降雨强度的 敏感性系数
60	4.34	15	4.96
90	0.91	20	2.09
120	1.83	25	2.39
平均值	2.36	平均值	3.15

### 2.3 崩积体侵蚀产沙与降雨强度及坡度的关系

表 3 为次降雨产沙量与坡度和降雨强度及其交互项之间的 Pearson 相关性分析结果。由表 3 可知, 次降雨产沙量与坡度相关性不显著 ( $r = 0.525, p > 0.05$ ), 与降雨强度相关性显著 ( $r = 0.797, p < 0.05$ ), 与坡度及降雨强度的交互项 (坡度 × 降雨强度) 之间的相关性最为显著, 二者呈极显著正相关 ( $r = 0.974, p < 0.01$ )。

若不考虑坡度和降雨强度的交互作用, 采用逐步线性回归分析, 建立次降雨产沙量和降雨强度及坡度之间的二元线性函数关系 (公式 4), 标准化系数分别

为 0.797 和 0.525, 表明降雨强度对次降雨产沙量的影响大于坡度。同时, 通过非线性回归方法, 建立次降雨产沙量与坡度和降雨强度之间的非线性函数关系 (公式 5), 该函数关系决定性系数 ( $R^2 = 0.943$ ) 增大, 模拟效果比线性函数关系更好。

表 3 次降雨产沙量与坡度和降雨强度及其交互项之间的 Pearson 相关性分析结果

Table 3 The results of Pearson correlation analysis between sediment yield amount and slope gradient, rainfall intensity and their interaction term

参数	坡度	降雨强度	坡度 × 降雨强度
相关性系数 ( $r$ )	0.525	0.797*	0.974**
显著性 ( $p$ )	0.146	0.010	0
$n$	9	9	9

注: \* 表示相关性显著 ( $p < 0.05$ ); \*\* 表示相关性极显著 ( $p < 0.01$ )。

若考虑坡度和降雨强度的交互作用, 采用逐步回归分析, 建立次降雨产沙量和降雨强度、坡度及其交互项之间的多元线性函数关系, 这时降雨强度和坡度因子被剔除, 次降雨产沙量与坡度和降雨强度的交互项呈极显著的线性函数关系 ( $R^2 = 0.942, p < 0.01$ ) (图 3)。

$$M = 0.407I + 1.608S - 45.962, R^2 = 0.882, p < 0.01 \quad (4)$$

$$M = 2.506 \times 10^{-4} I^{1.580} S^{1.425}, R^2 = 0.943, p < 0.01 \quad (5)$$

式中:  $M$  为次降雨产沙量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $I$  为降雨强度 ( $\text{mm}/\text{h}$ );  $S$  为坡度 ( $^\circ$ )。

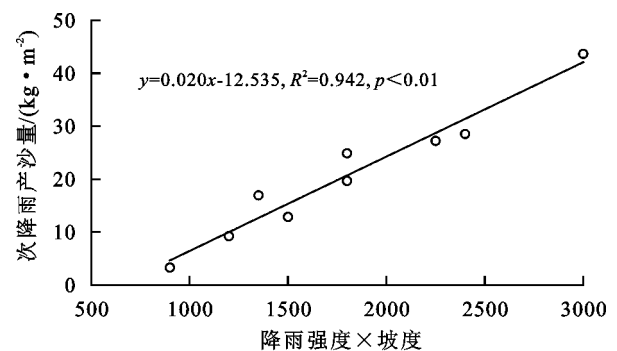


图 3 次降雨产沙量与坡度—降雨强度交互项之间的关系

Fig. 3 The relationship between sediment yield amount and the interaction of slope gradient and rainfall intensity

## 3 讨论

本研究发现, 60 mm/h 降雨强度下崩积体坡面侵蚀速率变化过程较为稳定, 且侵蚀速率多低于 5.0  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 并呈现出一定的下降趋势; 而降雨强度为 90, 120 mm/h 时, 土壤侵蚀速率呈先波动增大后波动减小的变化过程, 且表现出多峰型特征。降雨强度较小时, 一方面降雨雨滴动能小, 坡面溅蚀作用较

弱<sup>[31]</sup>;另一方面,坡面产流形成的径流量较小,径流冲刷能力较弱<sup>[32]</sup>,坡面以层状面蚀为主<sup>[27]</sup>,侵蚀速率较低;而降雨初期由于坡面松散土壤颗粒丰富,侵蚀速率较大,之后随着松散土壤颗粒的减少,并可能在坡面形成土壤物理结皮<sup>[11,33]</sup>,使得侵蚀速率下降。90~120 mm/h 降雨强度下侵蚀速率变化过程和陈培济等<sup>[8]</sup>和赵淦等<sup>[9]</sup>在集中流冲刷条件下对崩积体产沙过程的研究结果相似,而与梁志权等<sup>[23]</sup>对华南红壤侵蚀过程中产沙速率表现出急剧而短暂的上升后迅速下降并保持平稳的变化趋势不同,与朱高立等<sup>[7]</sup>在崩积体坡面无覆盖时产沙量在降雨前期和中期维持在低水平,在降雨后期迅速达到高水平的结果不一致,这主要是由试验土样、坡度等的差异性引起的,后者坡度较大(25°~35°),后期细沟侵蚀迅速发育,导致降雨后期产沙迅速增大。降雨强度较大时,侵蚀速率呈现多峰波动主要和细沟发育有关<sup>[14]</sup>。随着降雨强度的增大,侵蚀方式从片蚀为主逐渐转变至细沟侵蚀为主<sup>[21]</sup>,在降雨开始阶段,坡面层状面蚀向细沟状面蚀快速过渡,细沟侵蚀现象较快发生,产沙量逐渐增加,而当细沟发育稳定后,侵蚀速率又逐渐降低,但当侵蚀沟受汇流冲刷发生坍塌等重力侵蚀现象时,侵蚀速率又会增大,呈现多峰变化。

崩积体次降雨产沙量随降雨强度的增大明显增加,这与蒋芳市等<sup>[14,21]</sup>对崩积体细沟侵蚀的研究结果一致,与梁志权等<sup>[23]</sup>、田培等<sup>[24]</sup>和邓龙洲等<sup>[25]</sup>在华南红壤坡面、侵蚀性风化花岗岩母质坡地等的研究结果类似,说明降雨强度对坡面侵蚀产沙趋势的影响一般不受下垫面类型的影响。本研究发现,崩积体侵蚀产沙随坡度的增大而增大,这与朱高立等<sup>[7]</sup>、赵淦等<sup>[9]</sup>对崩积体的研究结果基本一致,而赵淦等<sup>[9]</sup>在 3.6 L/min 流量条件下的研究发现,产沙量随坡度的增大表现为增大—减小—稳定的变化趋势,并得出临界坡度在 35°附近。试验条件下,坡度对崩积体坡面侵蚀的影响体现在多个方面,坡度越大,坡面受雨面积越小,坡面径流量降低;降雨径流在坡面入渗减少,有利于坡面产流,增加地表径流量;径流流速越大,侵蚀冲刷能力增强;坡面土壤颗粒及土体稳定性降低,更易被侵蚀<sup>[34]</sup>。坡度对崩积体侵蚀产沙的影响取决于多个方面的综合效应。试验结果进一步表明,降雨强度对次降雨产沙量的影响大于坡度,体现降雨侵蚀力和径流冲刷力对崩积体产沙影响大于坡度。蒋芳市等<sup>[21]</sup>研究坡度和降雨强度对花岗岩崩积体细沟侵蚀的影响时也发现,降雨强度对细沟侵蚀的影响大于坡度;另外,相关研究<sup>[17]</sup>还发现,水深或流量对崩积体土壤分离速率的影响也大于坡

度,说明降雨汇流对土壤侵蚀的影响更显著,体现崩积体侵蚀治理过程中排水措施设计实施的重要性。另外,本研究发现,崩积体次降雨产沙量与坡度和降雨强度的交互项相关性最为显著,二者呈极显著线性函数关系,降雨和坡度对坡面侵蚀的综合影响效应表现为当坡度和降雨强度都较大时,崩积体侵蚀强度将大幅增加。本研究得出降雨强度和坡度 2 个影响因子对侵蚀速率的回归结论,目的是通过回归方程能更好预测桂南崩积体受坡度、降雨强度影响因素条件下的产沙量,对崩积体侵蚀防治提供一定的参考意义,为区域水土保持监测提供依据。

## 4 结论

(1)各坡度条件下,60 mm/h 降雨强度时,崩积体坡面侵蚀速率变化过程较为稳定,且侵蚀速率多低于 5.0 g/(m<sup>2</sup>·s),并呈现出一定的下降趋势;90~120 mm/h 降雨强度下侵蚀速率呈先波动增大后波动减小的变化趋势。

(2)次降雨产沙量随降雨强度和坡度的增大而增大,与降雨强度和坡度之间的非线性回归结果优于线性回归结果。

(3)相对于降雨强度和坡度而言,次降雨产沙量与坡度和降雨强度的交互项相关性最为显著,二者呈极显著线性函数关系( $R^2=0.942, p<0.01$ )。

(4)次降雨产沙量对降雨强度的敏感系数高于对坡度的敏感系数,降雨强度对次降雨产沙量的影响强于坡度。表明崩积体侵蚀受降雨强度的影响更为强烈,体现崩积体侵蚀治理过程中排水措施设计实施的重要性。

### 参考文献:

- [1] DUAN X Q, DENG Y S, TAO Y, et al. The soil configuration on granite residuals affects Benggang erosion by altering the soil water regime on the slope[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(3):419-432.
- [2] LIAO Y S, YUAN Z J, ZHENG M G, et al. The spatial distribution of Benggang and the factors that influence it[J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(18):2323-2335.
- [3] 廖义善,唐常源,袁再健,等.南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J].土壤学报,2018,55(6):1297-1312. LIAO Y S, TANG C Y, YUAN Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6):1297-1312.
- [4] 梁音,宁堆虎,潘贤章,等.南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理[J].中国水土保持,2009(1):31-34.

LIANG Y, NING D H, PAN X Z, et al. Characteristics and

- treatment of collapse erosion in red soil area of South China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2009 (1):31-34.
- [5] 刘希林,卓瑞娜.崩岗崩积体坡面初始产流时间影响因素及其临界阈值[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(1):36-46.  
LIU X L, ZHUO R N. Influential factors and their critical thresholds of initial runoff production time on the Benggang colluvial slopes[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(1):36-46.
- [6] 廖义善,卓慕宁,谢真越,等.崩岗崩积体坡面产沙与坡面形态的耦合影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6):66-72.  
LIAO Y S, ZHUO M N, XIE Z Y, et al. Coupling effects of sediment yield with the erosion slope morphology of the colluvial deposits of Benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6):66-72.
- [7] 朱高立,肖泽干,刘晓静,等.模拟降雨条件下崩积体坡面产流产沙特征及其响应关系[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(6):1-7.  
ZHU G L, XIAO Z G, LIU X J, et al. Processes and responses of runoff and sediment yield on colluvial deposits under simulated rainfall[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(6):1-7.
- [8] 陈培济,黄炎和,蒋芳市,等.集中水流冲刷条件下土石混合崩积物坡面产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3):49-54.  
CHEN P J, HUANG Y H, JIANG F S, et al. Feature of sediment yield on soil-rock mixed colluvial soil slope under concentrated flow[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3):49-54.
- [9] 赵淦,黄炎和,林金石,等.流量及坡度对崩岗崩积体侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2):11-16.  
ZHAO G, HUANG Y H, LIN J S, et al. Effect of discharge and slope gradient on colluvial deposits erosion in Benggang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(2):11-16.
- [10] 朱高立,王雪琪,李发志,等.秸秆覆盖对崩积体坡面产流产沙影响的模拟试验[J]. *土壤*, 2017, 49(3):601-607.  
ZHU G L, WANG X Q, LI F Z, et al. Simulation of straw mulch on colluvial soil erosion and yield of runoff and sediment[J]. *Soils*, 2017, 49(3):601-607.
- [11] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.不同结皮条件对崩岗崩积体坡面侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3):1-6.  
JIANG F S, HUANG Y H, LIN J S, et al. Effects of soil crust on the erosion of colluvial deposits in granite Benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):1-6.
- [12] 蒋芳市,张海东,陈培松,等.土石混合崩积体坡面细沟跌坑发育试验研究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6):27-33.  
JIANG F S, ZHANG H D, CHEN P S, et al. Experimental study on the drop pit development of rill erosion on soil-rock mixed colluvial deposit slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6):27-33.
- [13] 张海东,陈培松,林嘉辉,等.砾石含量对崩积体坡面细沟横断面形态影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4):81-86, 132.  
ZHANG H D, CHEN P S, LIN J H, et al. Effects of gravel content on rill cross section morphological in colluvial deposit slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4):81-86, 132.
- [14] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.多场次降雨对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(6):1-7.  
JIANG F S, HUANG Y H, LIN J S, et al. Effects of repetitive rainfalls on rill erosion of coluvial deposit in granite slope collapse[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(6):1-7.
- [15] 黄炎和,赵淦,蒋芳市,等.崩岗崩积体陡坡侵蚀的水动力学特征[J]. *森林与环境学报*, 2015, 35(4):304-309.  
HUANG Y H, ZHAO G, JIANG F S, et al. Hydrodynamic characteristics in steep colluvial deposits slope [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2015, 35(4):304-309.
- [16] 蒋芳市,陈培济,黄炎和,等.集中水流下土石混合崩积体坡面侵蚀水动力特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6):8-14, 99.  
JIANG F S, CHEN P J, HUANG Y H, et al. Experimental study on erosion hydrodynamic characteristics of concentrated flow on soil-rock mixed colluvial deposit slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6):8-14, 99.
- [17] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.坡面水流分离崩岗崩积体土壤的动力学特征[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1):86-89, 229.  
JIANG F S, HUANG Y H, LIN J S, et al. The dynamic characteristics of soil detachment of slumping deposit by surface runoff in Benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1):86-89, 229.
- [18] 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.  
GAO P Y, ZHAN Z Z, JIANG F S, et al. Effects of slop and flow on sediment transport capacity of the colluvial deposit for rill flow in Benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3):68-73.
- [19] 蒋芳市.花岗岩崩岗崩积体侵蚀机理研究[D].福州:福建农林大学, 2013.  
JIANG F S. Eroison mechanism of colluvial deposits in granite Benggang[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [20] 赵淦.不同上方来水及坡度条件下崩岗崩积体坡面侵蚀机理研究[D].福州:福建农林大学, 2014.  
ZHAO G. Effects of different discharge and slope gradient on erosion mechanism of colluvial deposits in

- granite collapsing hill[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
- [21] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对花岗岩崩积体细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 1-5.  
JIANG F S, HUANG Y H, LIN J S, et al. Effects of different rainfall intensities and slope gradients on rill erosion of coluvial deposits in granite Benggang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 1-5.
- [22] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 974-982.  
JIANG F S, HUANG Y H, LIN J S, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on particle size composition of erosion sediment from colluvial deposits of Benggang[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 974-982.
- [23] 梁志权, 张思毅, 卓慕宁, 等. 不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 1-6.  
LIANG Z Q, ZHANG S Y, ZHUO M N, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion process in red soil hillslopes[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 1-6.
- [24] 田培, 仇浩然, 冯宇, 等. 雨强和坡度对红壤坡面产流产沙及侵蚀动力过程影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 1-8.  
TIAN P, QIU H R, FENG Y, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment production and erosion dynamic process on red soil slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 1-8.
- [25] 邓龙洲, 张丽萍, 范晓娟, 等. 不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 143-150.  
DENG L Z, ZHANG L P, FAN X J, et al. Characteristics of runoff and sediment yield under different rainfall intensities and slope gradients in erosive weathered granite area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 143-150.
- [26] 冯明汉, 廖纯艳, 李双喜, 等. 我国南方崩岗侵蚀现状调查[J]. 人民长江, 2009, 40(8): 66-68.  
FENG M H, LIAO C Y, LI S X, et al. Investigation on status of hill collapsing and soil erosion in Southern China[J]. Yangtze River, 2009, 40(8): 66-68.
- [27] 黄艳霞. 广西崩岗侵蚀的现状、成因及治理模式[J]. 中国水土保持, 2007(2): 3-4.  
HUANG Y X. Present situation, causes and treatment mode of collapse erosion in Guangxi[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(2): 3-4.
- [28] 谢福倩, 梁志鑫, 邓羽松, 等. 广西不同形态崩岗空间分布特征与治理措施研究[J]. 中国水土保持, 2020(7): 53-57.  
XIE F Q, LIANG Z X, DENG Y S, et al. Spatial distribution characteristics and control measures of different forms of collapsing slopes in Guangxi[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(7): 53-57.
- [29] GUO W Z, LUO L, WANG W L, et al. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2019, 337: 69-78.
- [30] XU X Z, LIU Z Y, XIAO P Q, et al. Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity[J]. Catena, 2015, 135: 231-239.
- [31] 肖海, 刘刚, 赵金凡, 等. 雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 827-835.  
XIAO H, LIU G, ZHAO J F, et al. Characteristics of mechanical impact and slaking effect of rain drops on soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4): 827-835.
- [32] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 256-265.  
KANG H L, WANG W L, XUE Z D, et al. Experimental study on runoff and sediment yield from engineering deposition with gravel in the northern windy-sandy region, Shaanxi[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(2): 256-265.
- [33] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 97-101.  
WU F Q, FAN W B. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2): 97-101.
- [34] 刘青泉, 陈力, 李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(5): 449-457.  
LIU Q Q, CHEN L, LI J C. Influences of slope gradient on soil erosion[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2001, 22(5): 449-457.