

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.03.027

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.03.027

明俊男,王泉泉,袁再健,等.基于人工模拟降雨试验的粤北典型牛肝土坡耕地坡面侵蚀特征[J].水土保持学报,2025,39(3):88-96.

MING Junnan, WANG Quanquan, YUAN Zaijian, et al. Characteristics of slope erosion on typical lateritic slope farmland in northern Guangdong Province based on artificially simulated rainfall experiments[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):88-96.

## 基于人工模拟降雨试验的粤北典型 牛肝土坡耕地坡面侵蚀特征

明俊男<sup>1</sup>, 王泉泉<sup>2,3</sup>, 袁再健<sup>2,3</sup>, 张宇婷<sup>2,3,4</sup>, 于波<sup>1</sup>, 黄斌<sup>1,2</sup>,  
廖义善<sup>2,3</sup>, 郑明国<sup>2,3</sup>, 姜世晗<sup>2,3,5</sup>, 欧海东<sup>2,3,6</sup>

(1.广东省环境地质勘查院,广州 510080; 2.广东省科学院生态环境与土壤研究所,华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心,广东省农业环境综合治理重点实验室,广东省面源污染防治工程技术研究中心,广州 510650;  
3.梅州市国际水土保持研究院,广东 梅州 514000; 4.广东工业大学环境科学与工程学院,广州 510006;  
5.佛山大学食品科学与工程学院,广东 佛山 528225; 6.广州大学地理与遥感学院,广州 510006)

**摘要:** [目的] 探讨粤北典型牛肝土坡耕地坡面侵蚀规律对当地水土保持工作与农业可持续发展具有重要意义。[方法] 以粤北南雄盆地坡耕地牛肝土为研究对象,通过人工模拟降雨实验方法,设置3种坡度(5°、10°和15°)和5种雨强(80、90、100、110、120 mm/h),探讨次降雨事件牛肝土坡耕地坡面产流产沙特征,分析坡面侵蚀量与降雨、产流、坡度的关系。[结果] 1)牛肝土较缓坡面(5°)的初始产流时间比较陡坡面(10°、15°)长2~10 s,且雨强对坡面初始产流时间的影响大于坡度;2)较陡坡面比较缓坡面的产流量大,3种坡度与5种雨强的坡面径流量为22.86~34.78 L,相同坡度不同雨强及相同雨强不同坡度下坡面产生的径流差异不大,且雨强对坡面径流量的影响大于坡度;3)牛肝土坡面在产流初期产沙率较高,之后趋于波动稳定,且在相同坡度情况下,雨强越大,坡面侵蚀产沙量越大;在相同雨强情况下,坡度越大,坡面侵蚀产沙量越大;在实际雨强119.5 mm/h与15°坡度的侵蚀泥沙量最大;4)牛肝土坡耕地坡面侵蚀受到降雨量、降雨强度、径流量和坡度等因素的影响,且坡面产沙量与径流量、降雨量呈显著正相关,决定系数 $R$ 大于0.56。[结论] 牛肝土坡耕地坡面初始产流时间与雨强和坡度均有关,坡面初始产流时间随雨强变大而变短,随坡度变大而变短;坡面产流量与产沙量均随坡度、雨强的增大而增加;可以用线性方程或二次函数方程拟合坡面产沙量与径流量、降雨量及雨强的关系,方程的决定系数较高。

**关键词:** 人工模拟降雨; 南雄盆地; 牛肝土; 坡面侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0088-09

## Characteristics of Slope Erosion on Typical Lateritic Slope Farmland in Northern Guangdong Province Based on Artificially Simulated Rainfall Experiments

MING Junnan<sup>1</sup>, WANG Quanquan<sup>2,3</sup>, YUAN Zaijian<sup>2,3</sup>, ZHANG Yuting<sup>2,3,4</sup>, YU Bo<sup>1</sup>, HUANG Bin<sup>1,2</sup>,  
LIAO Yishan<sup>2,3</sup>, ZHENG Mingguo<sup>2,3</sup>, JIANG Shihan<sup>2,3,5</sup>, OU Haidong<sup>2,3,6</sup>

(1.Environmental Geological Prospecting Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China; 2.National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Guangdong Engineering Research Center for Non-point Source Pollution Control, Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;  
3.Meizhou International Institute of Soil and Water Conservation, Meizhou, Guangdong 514000, China; 4.School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

收稿日期: 2025-01-21

修回日期: 2025-02-08

录用日期: 2025-02-20

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-04-21

资助项目: 广东省自然资源厅粤北牛肝土生态调查与生态修复规划项目(44000024000000006683); 国家自然科学基金项目(42377349); 广东省科技计划项目(2021B1212050019, 2022A050509005); 广东省科学院专项资金项目(2022GDASZH-2022010203, 2022GDASZH-2022010105)

第一作者: 明俊男(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害防治及矿山生态修复等研究。E-mail: 982679694@qq.com

通信作者: 袁再健(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水土保持、面源污染、生态水文等研究。E-mail: zjyuan@soil.gd.cn

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

5.School of Food Science and Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528225;

6.School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** [Objective] Exploring the characteristics of slope erosion on typical lateritic slope farmland in northern Guangdong is of great significance for local soil and water conservation and sustainable agricultural development. [Methods] Taking the lateritic soil from slope farmland in the Nanxiong basin of northern Guangdong as the research object, the characteristics of runoff and sediment yield on the lateritic slope under individual rainfall events were analyzed based on artificially simulated rainfall experiments with three slope gradients ( $5^\circ$ ,  $10^\circ$  and  $15^\circ$ ) and five rainfall intensities (80, 90, 100, 110 and 120 mm/h). [Results] 1) The initial runoff time of a gentler lateritic slope ( $5^\circ$ ) was 2–10 s longer than that of a steeper slope ( $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ), and the influence of rainfall intensity on the initial runoff time was greater than that of slope gradient. 2) The runoff of steeper slopes was greater than that of gentler slope. The slope runoff of the three different slopes and five different rainfall intensities ranged from 22.86 to 34.78 L. The impact of rainfall intensity on slope runoff was greater than that of slope gradient. 3) The sediment yield rate of lateritic slope was relatively high at the early stage of runoff, and then tended to fluctuate and stabilize. Under the same slope gradient, the greater the rainfall intensity, the greater the sediment yield of slope erosion; under the same rainfall intensity, the greater the slope gradient, the greater the sediment yield. The maximum sediment yield occurred at the actual rainfall intensity of 119.5 mm/h and a slope gradient of  $15^\circ$ . 4) The sediment yield of lateritic slope was influenced by rainfall, rainfall intensity, runoff, and slope gradient, and the sediment yield was significantly positively correlated with runoff and rainfall, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) above 0.56. [Conclusion] The initial runoff time on lateritic slope farmland is related with rainfall intensity and slope gradient, decreasing with increasing rainfall intensity and slope gradient. Both slope runoff and sediment yield increase with the increase of slope gradient and rainfall intensity. The relationships between slope sediment yield and runoff, rainfall, and rainfall intensity can be fitted using linear or quadratic function equations, with high coefficients of determination.

**Keywords:** artificial simulation of rainfall; Nanxiong basin; lateritic soil; slope erosion

Received: 2025-01-21

Revised: 2025-02-08

Accepted: 2025-02-20

Online(www.cnki.net): 2025-04-21

土壤侵蚀是一个全球性的环境问题,全球已有超过1/4的耕地面积受到土壤侵蚀的影响<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀通过对地表土壤的剥蚀而造成养分流失,不仅使地力下降,也易造成下游水质恶化。同时,土壤侵蚀过程还扰动陆地碳循环,影响全球生态系统安全<sup>[2-3]</sup>。我国是世界上水土流失最严重的国家之一<sup>[4]</sup>。自20世纪50年代以来,国内外在坡面土壤侵蚀规律方面取得很大进展<sup>[5-8]</sup>。坡面侵蚀是造成我国水土流失的主要原因之一<sup>[9]</sup>,坡面浅沟侵蚀是导致耕地土壤退化的重要原因<sup>[10]</sup>,因此,坡耕地侵蚀是我国研究坡面侵蚀的重点,也是水土流失防治的关键所在,可以为确定退耕上限坡度、指导治理措施的配置和建立坡耕地土壤侵蚀预报模型等提供科学依据。

人工模拟降雨试验是研究土壤侵蚀最有效的手段之一,与天然降雨试验相比大大缩短试验周期<sup>[11]</sup>。早在1920年,美国使用人工模拟降雨方式对土壤侵蚀过程进行研究,随后又广泛采用人工模拟降雨研究不同下垫面对坡面产流产沙的影响<sup>[12]</sup>。我国人工

降雨试验起步于20世纪60~70年代,80年代逐步成熟<sup>[13]</sup>。叶翠玲等<sup>[14]</sup>采用模拟降雨装置对铁路施工引起的土壤侵蚀进行定量研究;2004年,北京师范大学和北京交通大学对美国的槽式降雨装置进行二次研发,共建14套模拟降雨装置进行试验,经试验证明,该降雨装置性能良好、工作稳定<sup>[15]</sup>;聂绪宁<sup>[16]</sup>研制一种可在野外广泛使用的便携式人工模拟降雨器,可通过控制雨强和降雨频率来模拟自然降雨给土壤带来的雨滴动能和侵蚀力;甄子雲等<sup>[17]</sup>通过野外人工模拟降雨试验,探讨不同雨强条件下青藏高原不同植被退化与恢复坡面产流产沙过程;耿华杰等<sup>[18]</sup>运用室内模拟降雨试验,探讨降雨、汇流和坡度及其交互作用对东北黑土浅沟坡面侵蚀的影响,并明确浅沟侵蚀对坡面侵蚀的贡献;LIANG等<sup>[19]</sup>通过模拟降雨试验,探讨纵向垄作、横向垄作、平耕和穴播4种耕作方式对坡面侵蚀的影响。

牛肝土是在热带和亚热带气候条件下,由紫色沉积岩风化发育形成的非地带性土壤。粤北牛肝土

以南雄盆地最为典型,面积约 84.9 km<sup>2</sup>[20],其荒漠化严重,是南雄盆地所面临最突出的生态问题之一。它是地质-地貌-气候-生态多重因素耦合的结果,其土层浅薄,质地松软,保水抗旱能力弱,有机质含量低,水土流失严重,严重影响当地农业可持续发展。卢少华<sup>[21]</sup>分析南雄牛肝土母岩特性及土壤流失影响因素,并介绍以等高生物坝为主的乔灌草相结合和以水平梯田为主的沟坡治理与开发相结合的治理模式;李新尧等<sup>[22]</sup>采用中国土壤流失方程定量研究南雄市土壤侵蚀空间分布特征发现,南雄市中度及以上侵蚀强度主要分布在人为扰动用地。南雄盆地是高效农业生产基地,烟叶生产是其重要的经济支柱,坡耕地水土流失严重,但目前尚缺乏坡耕地水土流失规律的深入研究。因此,本研究采用人工模拟降雨试验方法,开展牛肝土坡耕地坡面水土流失机理研究,为粤北牛肝土坡耕地水土保持与农业可持续发展提供基础数据和参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设备

模拟降雨试验在广东省科学院生态环境与土壤研究所红壤侵蚀动力学工程实验室进行。将土壤填置于长 1.0 m、宽 0.3 m、高 0.3 m 的土槽当中(图 1)。土槽由

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

供试土壤	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	缓效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH
牛肝土	5.91	0.98	32.44	43.10	256.70	590.55	7.8

### 1.3 模拟试验处理设计

根据南雄盆地降雨特征,暴雨强度往往能达到 100 mm/h,水土流失通常发生在降雨强度较大的情况下,因此,本试验设计模拟降雨强度为 80、90、100、110、120 mm/h 5 个水平;据现场调查,南雄盆地坡耕地主要分布在缓坡,坡度 >15° 的坡耕地较少,因此,本试验土槽坡度设置 5°、10°、15° 3 个水平,按不同雨强、不同坡度组合试验处理 15 个。在每次降雨开始之前,均需要进行预试验降雨器的降雨强度和分布,通过规定时间雨量筒内的水量对降雨强度进行校准,以获得理想的试验条件(所需的降雨强度和降雨量均匀性 >85%)。在制作土槽前将土壤样品自然风干并过筛去除杂质待用。制作土槽步骤为:

1)土壤初始水分质量分数处理。供试土壤初始水分质量分数为 8%。为确保土壤水分质量分数均匀一致,于试验前 1 d 喷洒一定量的蒸馏水于土壤表面,喷

不锈钢制成,土槽下方打有多排小孔,允许水从底部的孔中自由渗透并流出。降雨模拟器包括雨水管、液压力表、潜水泵和 2 个向下的 SPRACO 锥形喷嘴,安装在离地面 5.0 m 处,并通过绳索将其固定。雨滴的中等直径为 2.4 mm,降雨模拟器的有效控制面积为 20 m<sup>2</sup>,降雨土槽均放置于降雨器的有效控制面积内。

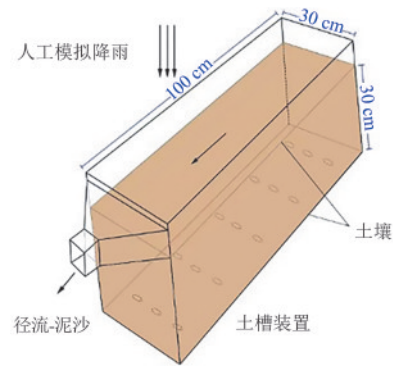


图 1 模拟降雨系统与土槽

Fig. 1 Simulated rainfall system and soil trough

### 1.2 供试土壤

选取位于南雄盆地中心位置的广东省南雄市马市镇丹布村(24°05′00″N, 114°14′42″E)坡耕地牛肝土作为供试土壤(表 1)。该地区属亚热带季风气候,冬季寒冷,夏季炎热,雨量充沛,暴雨频繁,多年平均气温为 19.9 °C,多年平均降水量为 1 966 mm。

洒水量由供试土壤水分质量分数确定,一般土壤经自然风干后的质量水分质量分数约为 5.2%,喷水后覆盖 1 层塑料薄膜以防止水分蒸发,静置约 24 h 后,均匀搅拌土壤,然后装入土槽。

2)土槽装土。土壤填入土槽前,在土槽底部有细孔处放置纱布,防止土壤颗粒堵塞小孔,将土壤按自然体积质量填塞 0~20 cm 土层,最上面 10 cm 土层填塞过筛后的土壤,并将土壤表面整理平整。

3)调整土槽坡度。装土完毕后,将土槽调整到试验所需坡度,放置 24 h 后(土槽坡面用薄膜覆盖,防止水分蒸发或外来干扰)用于试验。

### 1.4 样品采集与测定

降雨强度率定:降雨试验前在土槽四周安放 4 个雨量筒,按设定雨强降雨 3 min,分别测量记录雨量筒雨量,计算雨强,重复 3 次以上,直至雨强达到预定值。3 次重复误差不超过 10%,保证降雨均匀度达到 85% 以上。

径流与泥沙采集:每场试验自坡面产流后连续降雨 60 min,径流监测与泥沙采集直到坡面停止产流。坡面产流后,在不同时段在土槽出水口用塑料桶(容积为 5 L)采集径流泥沙样,采样时间为:在降雨初期 10 min 内每 2 min 采集 1 次,10~30 min 每 5 min 采集 1 次,后期 30~60 min 每 10 min 采集 1 次,每次降雨每个土槽接径流泥沙样品共计 12 个。径流量用体积法测定,径流泥沙量用烘干称重法测定,称重电子天平精度为 0.01 g。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面降雨产流特征

2.1.1 坡面初始产流时间 从降雨开始到坡面径流形成的时间即为坡面产流时间,根据不同降雨强度和不同坡度组合处理的人工模拟试验得出,不同雨强和不同坡度下坡面侵蚀的初始产流时间。由表 2 可知,在本试验条件下,坡面初始产流时间为 37.3~58.1 s,同一坡度不同雨强下的平均初始产流时间为 44.0~51.1 s,同一雨强不同坡度下的平均产流时间为 40.2~55.9 s。不同坡度下产流时间的差异以实际雨强 109.2 mm/h 最大,最大值是最小值的 1.3 倍。根据变异系数分析,雨强对坡面初始产流时间的影响大于坡度。

表 2 不同雨强和坡度下坡面侵蚀的初始产流时间

Table 2 Initial runoff time of slope erosion under different rainfall intensities and slope gradients

实际雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	初始产流时间/s			平均 值	标准 差	变异系 数/%
	5°	10°	15°			
80.6	58.1	56.3	53.2	55.9	2.48	4.44
90.5	53.4	51.4	48.1	51.0	2.68	5.25
101	51.9	48.6	42.3	47.6	4.88	10.25
109.2	48.7	43.1	38.9	43.6	4.92	11.29
119.5	43.2	40.1	37.3	40.2	2.95	7.34
平均值	51.1	47.9	44.0			
标准差	5.55	6.46	6.62			
变异系数/%	10.86	13.50	15.06			

2.1.2 坡面产流量 由表 3 可知,在模拟降雨条件下,3 个土槽的坡面径流量为 22.86~34.78 L,同一坡度不同雨强下的平均径流量为 28.47~29.58 L,同一雨强不同坡度下的平均径流量为 23.42~34.45 L。随着坡度、雨强的改变,牛肝土坡面径流总量也随之发生变化。根据统计分析,相同坡度不同雨强和相同雨强不同坡度下坡面产生的径流量差异均不大,雨强对坡面径流量的影响大于坡度。

### 2.2 坡面侵蚀产沙过程与特征

2.2.1 坡面侵蚀量 本研究用泥沙总量来表述坡面

侵蚀在降雨历时内产生的泥沙质量。由表 4 可知,坡面累计侵蚀产沙量在不同雨强和不同坡度条件下差异较大。在同一坡度条件下,随着雨强的增大,坡面侵蚀累计泥沙量逐渐增加,在雨强为 119.5 mm/h 时,侵蚀累计泥沙量达到最大值;在同一雨强条件下,泥沙总量随坡度增大而增加。

表 3 不同雨强和坡度下的坡面径流量

Table 3 Slope runoff under different rainfall intensities and slope gradients

实际雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	径流量/L			平均 值	标准 差	变异系 数/%
	5°	10°	15°			
80.6	22.86	23.38	24.03	23.42	0.59	2.50
90.5	25.84	26.04	26.92	26.27	0.57	2.19
101	28.00	28.57	29.73	28.77	0.88	3.06
109.2	31.44	30.58	32.43	31.48	0.93	2.94
119.5	34.22	34.34	34.78	34.45	0.29	0.86
平均值	28.47	28.58	25.98			
标准差	4.49	4.20	4.27			
变异系数/%	15.76	14.71	14.45			

表 4 不同雨强和坡度下坡面累积侵蚀产沙量

Table 4 Cumulative slope sediment yield under different rainfall intensities and slope gradients

实际雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	泥沙量/kg			平均 值	标准 差	变异系 数/%
	5°	10°	15°			
80.6	0.27	0.40	0.71	0.46	0.23	49.14
90.5	0.38	0.57	0.92	0.62	0.27	43.94
101	0.43	0.68	1.18	0.76	0.38	50.03
109.2	0.92	1.35	1.82	1.36	0.45	33.02
119.5	1.22	2.12	2.69	2.01	0.74	36.87
平均值	0.64	1.02	1.46			
标准差	0.41	0.71	0.80			
变异系数/%	63.23	69.42	54.80			

2.2.2 坡面侵蚀产沙动态变化 由图 2 可知,在不同雨强和坡度条件下,坡面侵蚀的泥沙总量随降雨历时的累积过程也呈很好的线性增加关系,对各累积泥沙曲线进行拟合可知,拟合曲线的决定系数均在 0.8 以上,说明对于室内模拟坡面,牛肝土坡面侵蚀过程中侵蚀泥沙的累积过程是一个线性增长过程。在试验坡度一定的条件下,雨强增大,坡面侵蚀累积泥沙曲线的斜率也随之增大,说明雨强对坡面侵蚀量的影响显著,平均侵蚀强度随雨强的增大而增加(5°斜率(Ks)为 4.15~20.38;10°斜率(Ks)为 7.32~40.96;15°斜率(Ks)为 12.93~50.28)。在雨强一定条件下,试验坡度增大,对累积泥沙量曲线的斜率有一定的影响,但坡度的改变对累积泥沙量的影响没有雨强的变化影响显著。

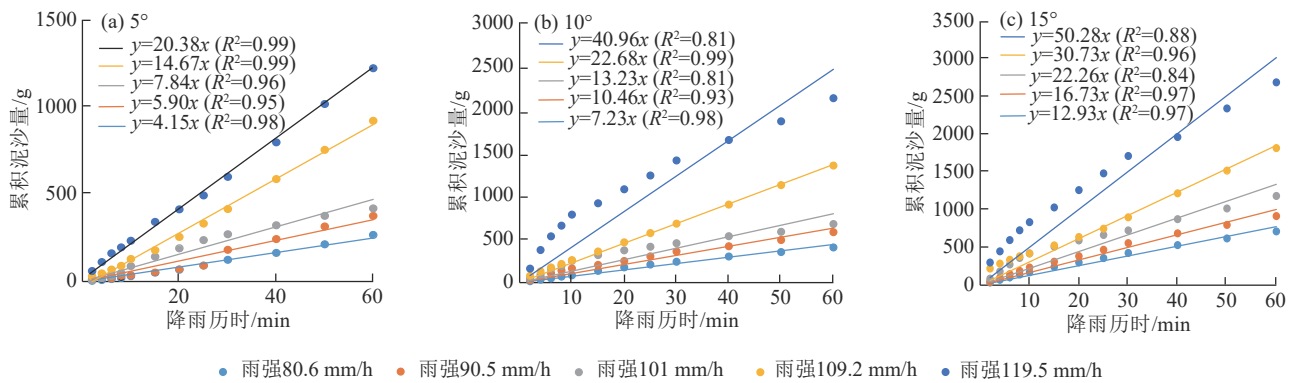


图 2 不同雨强和坡度下坡面累积泥沙量随时间的变化

Fig. 2 The variations of cumulative slope sediment yield under different rainfall intensities and slope gradients over time

由图 3 可知,牛肝土坡面侵蚀产沙率随着降雨历时的变化而变化,此变化在不同雨强和不同坡度条件下有较大的差异。在试验控制的 5 种雨强和 3 个坡度条件下,坡面侵蚀产沙率随降雨历时的动

态变化均表现出类似特征,即在产流初期坡面侵蚀产沙率较大,侵蚀产沙率在侵蚀过程中发生波动,且在侵蚀发生的初期波动剧烈,之后逐渐趋于稳定。

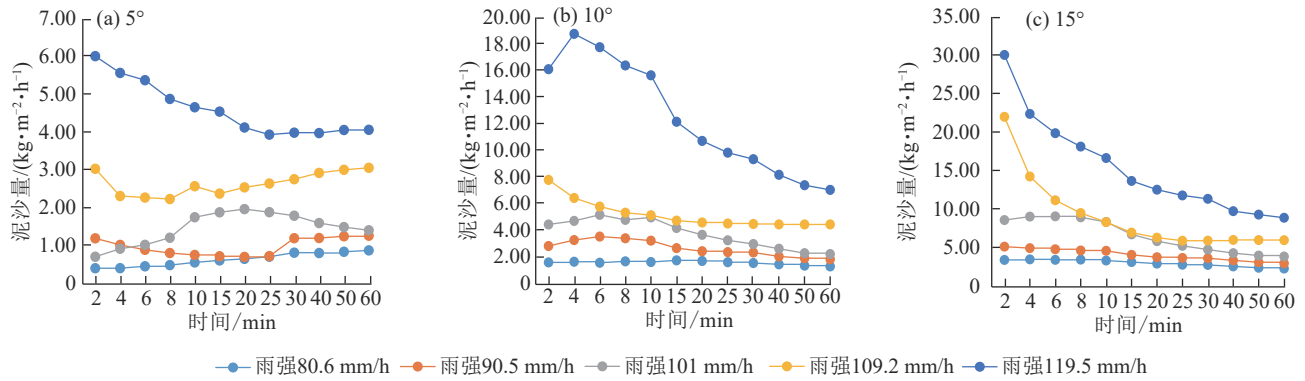


图 3 不同雨强和坡度下坡面侵蚀产沙率随降雨历时的变化

Fig. 3 The variations of slope sediment yield rate under different rainfall intensities and slope gradients over time

2.3 坡面侵蚀量与径流量之间的关系

径流是坡面侵蚀泥沙产生的动力和载体,径流与泥沙关系曲线的斜率反映坡面侵蚀能力的大小。由图 4 可知,坡度相同的情况下,坡面侵蚀泥沙量与径流量具有较好的线性关系,泥沙量可以通过径流量的线性方程来拟合:

$$A = aH + b \quad (1)$$

式中:A 为坡面侵蚀产沙量,kg;H 为径流量,L;a、b 为系数。

不同坡度拟合曲线的横轴截距和斜率各不相同,表明坡度不同,径流量对土壤侵蚀影响程度也不相同。坡度从 5°~15°,拟合方程的斜率逐渐增大。由此可见,径流量对坡面侵蚀的影响与坡度有较大关系,坡度越大,径流量对坡面侵蚀影响越显著。

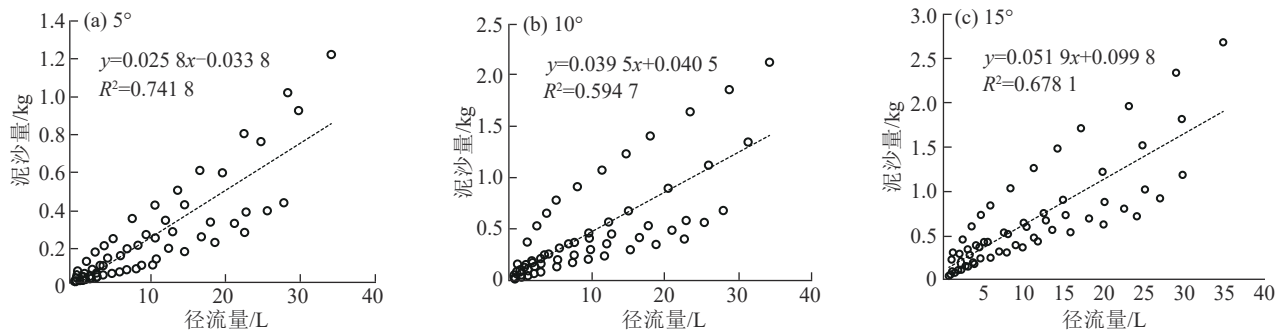


图 4 不同坡度坡面侵蚀泥沙量与径流量的关系

Fig. 4 The relationships between slope sediment yield and runoff under different slope gradients

2.4 坡面侵蚀量与降雨的关系

对不同降雨量和不同坡度条件下坡面侵蚀产沙量进行回归分析(表 5)表明,坡面侵蚀量与降雨量之间能够很好地用二次函数方程表达(表 5),方程决定

系数较高。

$$S = a + bP + cP^2 \quad (2)$$

式中: $S$ 为产沙量,kg; $P$ 为降雨量,L; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为回归系数。

表 5 坡面侵蚀产沙量与降雨量的二次函数方程

Table 5 The quadratic function equations of slope sediment yield and rainfall

坡度/(°)	回归系数			决定系数( $R^2$ )	$p$
	$a$	$b$	$c$		
5	$3.58 \times 10^{-2}$	$6.95 \times 10^{-3}$	$5.67 \times 10^{-4}$	0.77	0.005
10	$13.11 \times 10^{-2}$	$1.84 \times 10^{-2}$	$6.23 \times 10^{-4}$	0.58	0.140
15	$19.21 \times 10^{-2}$	$2.78 \times 10^{-2}$	$7.45 \times 10^{-4}$	0.71	0.034

对不同雨强和不同坡度条件下坡面侵蚀产沙量进行回归分析(表 6)表明,与降雨量类似,坡面侵蚀产沙量与雨强之间也可用二次函数方程表述:

$$A = a + bI + cI^2 \quad (3)$$

式中: $I$ 为雨强,mm/h; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为回归系数。

由表 6 可知,公式(3)受坡度的影响较大,当坡度 $\geq 10^\circ$ 时,坡面侵蚀产沙量能够较好地用雨强的二次方程来表达,但方程的决定系数较低。

表 6 坡面侵蚀产沙量与雨强的二次函数方程

Table 6 The quadratic function equations of slope sediment yield and rainfall intensity

坡度/(°)	回归系数			决定系数( $R^2$ )	$p$
	$a$	$b$	$c$		
5	1.64	$-3.9 \times 10^{-2}$	$2.45 \times 10^{-4}$	0.28	0.193 0
10	8.11	$-18 \times 10^{-2}$	$10.26 \times 10^{-4}$	0.47	0.002 6
15	5.06	$-11.4 \times 10^{-2}$	$6.91 \times 10^{-4}$	0.37	0.068 0

2.5 坡面侵蚀量与坡度的关系

由图 5 可知,坡面产流后 60 min 时间内,侵蚀量随降雨强度的增加而增加。当降雨强度较小时,坡面侵蚀以溅蚀片蚀为主,坡面侵蚀量受到径流量和径流含沙量的共同影响。总体来看,在本试验条件下,在坡度为 $5^\circ$ 时,坡面平均侵蚀率最小,而在坡度为 $15^\circ$ 时,坡面平均侵蚀率最大,坡度为 $5^\circ$ 的坡面侵蚀量显著小于其他 2 个坡度。相关分析表明,在本试验条件下,坡面侵蚀量与坡度的相关性较差,决定系数低。

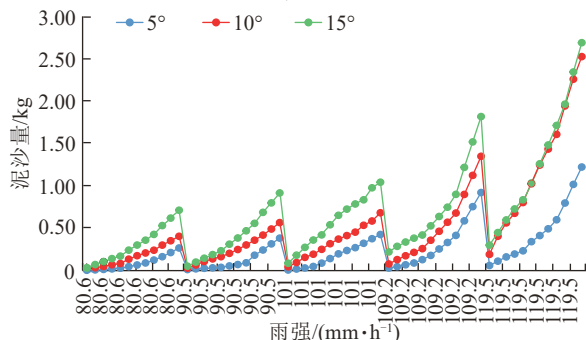


图 5 不同坡度下坡面累计侵蚀量随雨强的变化

Fig. 5 Changes of cumulative sediment yield under different rainfall intensities

3 讨论

坡面侵蚀的主要外营力是降雨,在降雨过程中,降雨初期的雨滴打击作用使土壤表层溶质与雨水混合,当土壤入渗能力大于雨强时,雨水全部入渗,坡面没有径流产生。随着土壤水分的增加,土壤孔隙逐渐被水分填充,土壤的入渗能力降低。当土壤的入渗能力小于雨强时,部分雨水在重力的作用下沿坡面汇流,形成地表径流。在本试验条件下,坡面初始产流时间与雨强和坡度均有关,相同坡度的产流时间随雨强变大而变短。坡面径流产生时间的长短主要取决于 2 个因素:一是坡面平均土壤入渗率 $\leq$ 降雨强度;二是土壤表面积水势能大小。在降雨初期,入渗率大,随着表层土壤含水率增加,入渗率迅速减小;土壤含水率增加快慢取决于单位时间该坡面接纳的降水量,实际取决于坡面的有效承雨面积。有效承雨面积在坡度 $5^\circ$ 时最大,而在坡度 $15^\circ$ 时最小。因此, $5^\circ$ 坡面可能最先产生积水,但积水不一定流动或形成径流,因为积水的势能没有达到某一临界值,而此时形成积水入渗,土壤入渗率较大。若仅从积水的势能角度来说,则坡度 $15^\circ$ 的最大,可能最先产流。在既定试验条件下,有效承雨面积和积水势能对径流的影响程度,在不同坡度下结果表现不同。王辉等<sup>[23]</sup>研究表明,坡度较小并小于一定阈值时,积水势起主导作用,即坡度越大,产流时间越短;坡度较大并超过一定阈值时,有效承雨面积起主要作用,即有效承雨面积越大,产流时间越短。

坡面侵蚀过程复杂,包括降雨溅蚀和径流冲刷引起的土壤分离、泥沙输移和沉积三大过程。EILISON<sup>[24]</sup>通过研究降雨及径流对土壤侵蚀的机械作用过程认为,土壤侵蚀由 4 个基本过程构成:一是雨滴冲击引起的剥离;二是雨滴溅蚀引起的迁移;三是土壤表面径流引起的剥离;四是土壤表面径流引

起的迁移。根据降雨侵蚀产沙理论,坡面侵蚀过程是降雨和径流侵蚀力与土壤抗蚀性之间相互作用的一系列过程的集合。在本试验控制条件下,在产流初期坡面侵蚀产沙率均较大,侵蚀产沙率在侵蚀过程中发生波动,且初期波动剧烈,之后趋于稳定。与 SOMCHAID 等<sup>[25]</sup>在泰国及 SHI 等<sup>[26]</sup>在黄土高原得到的结果类似。在产流初期,坡面径流量虽然较小,但此时的坡面径流为剥蚀能力较强的清水,而且坡面土壤颗粒尚未经过降雨径流的分选,坡面表层细颗粒较多,遇径流较容易被剥蚀。因此,在产流初期坡面具有较大的侵蚀产沙率。坡面产沙率主要受限于径流挟沙能力,随着降雨的增加,坡面产沙率逐渐由径流挟沙力限制过渡到侵蚀能力限制,坡面产沙率较产流初期的产沙率小,并逐渐趋于稳定。因为随着径流中泥沙含量的增加,径流的侵蚀能力降低<sup>[26-28]</sup>。

坡面侵蚀受到降雨强度和坡度的双重影响。降雨强度的差别导致坡面侵蚀方式的差异。在小雨强的情况下,坡面侵蚀以片蚀为主,而大雨强的情况下,坡面侵蚀容易出现沟蚀。不同侵蚀方式的侵蚀结果在不同坡度下有较大的差别。因此,在不同雨强情况下,坡面侵蚀过程与坡度之间的关系变得更为复杂。坡面土壤的不稳定性与坡度的大小呈正比,坡度愈大,土体的不稳定性愈强,在外力作用下发生下移的可能性愈大。可以认为,在坡度 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 范围内,南雄盆地牛肝土坡面侵蚀产沙率随着坡度的增大而增大。与在黄土高原和红壤区开展的其他研究结果相近。范荣生等<sup>[29]</sup>在室内用人工降雨法对黄土进行模拟试验发现,当雨强为 $2.4\text{ mm/min}$ 时,土壤侵蚀量随坡度的增大而减小(试验坡度为 $27.4^{\circ}$ 、 $34.9^{\circ}$ 和 $40^{\circ}$ );潘菊梅<sup>[30]</sup>通过人工模拟降雨试验,分析发现,在不同雨强条件下,与 $12^{\circ}$ 、 $18^{\circ}$ 坡度相比, $6^{\circ}$ 的裸露黄土坡面侵蚀产沙量最小;陈法扬<sup>[31]</sup>采用人工降雨装置在 $6\text{ m}^2$ 的木盒内对发育于第四纪的红黏土进行试验研究发现, $25^{\circ}$ 为土壤侵蚀的临界坡度。由于土壤侵蚀的方式多种多样,包括片蚀、沟蚀等,在不同的侵蚀方式下,坡面侵蚀速率与坡度的关系发生变化<sup>[32]</sup>。在本试验条件下,牛肝土坡面侵蚀受雨强的影响较显著,随雨强的变化均呈明显的规律性变化;而坡度的影响作用较不显著,随坡度的变化没有表现出明显的规律性变化,与本试验只设置3个坡度有关。本研究的试验坡长仅 $1\text{ m}$ ,尚不足以产生侵蚀沟,但从研究结果来看(表4),其最大侵蚀强度也

达到 $8.9\times 10^3\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{h})$ ,足以说明牛肝土坡耕地水土流失的易发性与强烈性,因此,需加强粤北南雄盆地牛肝土坡耕地水土保持工作。

## 4 结论

1)在相同坡度情况下,雨强越大,坡面初始产流时间越短,坡面产流量越大;较缓坡面( $5^{\circ}$ )的初始产流时间比较陡坡面( $10^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ )的坡面产流时间长,较陡坡面的产流量比较缓坡面的产流量大。

2)牛肝土坡耕地坡面产沙变化过程表现为产流初期产沙率较高,之后趋于波动稳定的过程;坡面产沙量受到降雨量、降雨强度、径流量和坡度等因素的影响,坡面产沙量与径流量、降雨量呈显著正相关;在相同坡度情况下,雨强越大,坡面侵蚀产沙量越大;在相同雨强情况下,坡度越大,坡面侵蚀产沙量越大。

3)基于坡面侵蚀量相关因子分析,建立粤北典型牛肝土坡耕地坡面侵蚀量与降雨量、降雨强度、径流量的拟合方程。

受试验条件的限制,坡度、坡长对粤北牛肝土坡耕地土壤侵蚀的影响尚需进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] LE Q B, NKONYA E, MIRZABAEV A. Biomass productivity-based mapping of global land degradation hotspots[M]//Economics of Land Degradation and Improvement: A global assessment for sustainable development. Cham: Springer International Publishing, 2015: 55-84.
  - [2] PIMENTEL D, HARVEY C, RESOSUDARMO P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. Science, 1995, 267(5201): 1117-1123.
  - [3] CHAPPELL A, BALDOCK J, SANDERMAN J. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes [J]. Nature Climate Change, 2016, 6: 187-191.
  - [4] WANG Z J, JIAO J Y, RAYBURG S, et al. Soil erosion resistance of "Grain for Green" vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 141: 109-116.
  - [5] 徐振剑, 权鑫, 史红伟, 等. 黄土坡面侵蚀过程与侵蚀-沉积空间分布特征[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 98-105.
- XU Z J, QUAN X, SHI H W, et al. Erosion process and spatial distribution characteristics of erosion-deposition on the loess slope[J]. Journal of Shaanxi Normal Uni-

- versity (Natural Science Edition), 2021, 49(6):98-105.
- [6] 王全辉, 胡国庆, 董元杰, 等. 磁性示踪条件下坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀空间分异特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):21-23.  
WANG Q H, HU G Q, DONG Y J, et al. Runoff and sediment yield and spatial variation of soil erosion slope under magnetic tracing condition [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2):21-23.
- [7] JAFARPOOR A, SADEGHI S H, ZAREI DARKI B, et al. Changes in morphologic, hydraulic, and hydrodynamic properties of rill erosion due to surface inoculation of endemic soil cyanobacteria [J]. Catena, 2022, 208: e105782.
- [8] XU X M, ZHENG F L, WILSON G V. Flow hydraulics in an ephemeral gully system under different slope gradients, rainfall intensities and inflow conditions [J]. Catena, 2021, 203: e105359.
- [9] WANG H, ZHAO W W, LI C J, et al. Vegetation greening partly offsets the water erosion risk in China from 1999 to 2018[J]. Geoderma, 2021, 401: e115319.
- [10] LIU G, ZHENG F L, WILSON G V, et al. Three decades of ephemeral gully erosion studies [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: e105046.
- [11] 范荣生, 李占斌. 用于降雨侵蚀的人工模拟降雨装置实验研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2):38-45.  
FAN R S, LI Z B. Artificial rainfall device for soil erosion study [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(2):38-45.
- [12] MUTCHLER C, Hermsmerier L. A review of rainfall simulators [J]. Transaction of the ASAE, 1965, 8(1): 67-68.
- [13] 关添泽. 基于人工模拟降雨的西白杨沟小流域土壤侵蚀研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.  
GUAN T Z. Study on soil erosion in xibaiyanggou small watershed based on artificial simulated rainfall [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.
- [14] 叶翠玲, 许兆义, 杨成永. 秦沈客运专线建设过程中的水土流失实验研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2):9-13.  
YE C L, XU Z Y, YANG C Y. Study on water and soil loss during procession of constructing Qinhuangdao Shenyang special line for passengers train [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(2):9-13.
- [15] 张光辉, 刘宝元, 李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6):56-60.  
ZHANG G H, LIU B Y, LI P K. Principles and properties of artificial trough rainfall simulator [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(6):56-60.
- [16] 聂绪宁. 一种便携式人工模拟降雨器研制及其性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.  
NIE X N. Development of a portable artificial rainfall simulator and its performance test [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.
- [17] 甄子云, 赵洋, 姜群鸥, 等. 野外模拟降雨条件下高寒草甸区植被退化和人工植被恢复坡面的产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4):153-161.  
ZHEN Z Y, ZHAO Y, JIANG Q O, et al. Field simulation of runoff and sand production on degraded and revegetated slopes in alpine meadows under rainfall conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 153-161.
- [18] 耿华杰, 郑粉莉, 赵录友, 等. 降雨、汇流和坡度对黑土浅沟坡面侵蚀影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2):57-67.  
GENG H J, ZHENG F L, ZHAO L Y, et al. An experimental study on effects of rainfall, inflow and slope gradient on ephemeral gully slope erosion in Chinese mollisol region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):57-67.
- [19] LIANG X L, SONG K, ZHANG Y H, et al. Effects of different tillage practices on slope erosion characteristics of peanut field [J]. Agronomy, 2023, 13(10): e2612.
- [20] 于波, 符加方, 明俊男. 粤北南雄和灯塔盆地“牛肝土”差异性发育的地质成因[J]. 矿产勘查, 2024, 15(10): 1885-1895.  
YU B, FU J F, MING J N. Geological mechanism of differential development of "niugantu" in Nanxiong and Dengta basin, northern Guangdong Province [J]. Mineral Exploration, 2024, 15(10):1885-1895.
- [21] 卢少华. 南雄市紫色砂页岩区的水土流失与综合治理 [J]. 中国水土保持, 2011(9):16-17.  
LU S H. Water and soil losses and its comprehensive control in the purple sand shale areas in Nanxiong City [J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(9):16-17.
- [22] 李新尧, 张晓远, 刘朱婷. 基于CSLE的南雄市土壤侵蚀评价及主成分因子分析[J]. 广东水利水电, 2022(7): 66-69.  
LI X Y, ZHANG X Y, LIU Z T. Evaluation of soil erosion in Nanxiong City based on CSLE model and analysis of principal component factors [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2022(7):66-69.
- [23] 王辉, 王全九, 邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6):39-44.  
WANG H, WANG Q J, SHAO M A. Laboratory experiments of soil nutrient transfer in the loess slope with surface runoff during simulated rainfall [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6):39-44.
- [24] EILISON W D. Studies of raindrop erosion [J]. Agricul-

- tural Engineering, 1944, 25:131-136.
- [25] SOMCHAI D, CHAIYUTH C. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation [J]. International Journal of Sediment Research, 2012, 27(2):168-177.
- [26] SHI Z H, FANG N F, WU F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. Journal of Hydrology, 2012, 454:123-130.
- [27] ASSOULINE S, BEN-HUR M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing [J]. Catena, 2006, 66 (3) : 211-220.
- [28] RAN Q H, SU D Y, LI P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion [J]. Journal of Hydrology, 2012, 424: 99-111.
- [29] 范荣生, 王高英, 李占斌. 陡坡侵蚀产沙特点及含沙量过程计算模型研究[J]. 水土保持通报, 1993, 13(4): 6-14.
- FAN R S, WANG G Y, LI Z B. Calculative model of sediment content and features of sediment-producing by erosion in steep slope land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1993, 13(4):6-14.
- [30] 潘菊梅. 降雨强度和坡度对裸露黄土坡面侵蚀的影响分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(11):97-100.
- PAN J M. Analysis on the influence of rainfall intensity and slope on slope erosion exposed loess [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2024, 7(11):97-100.
- [31] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验[J]. 中国水土保持, 1985(2):20-21.
- CHEN F Y. Experimental study on the influence of different slopes on soil erosion [J]. Soil and Water Conservation in China, 1985(2):20-21.
- [32] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报, 2010, 28(4):415-421.
- CHEN X A, CAI Q G, ZHANG L C, et al. Research on critical slope of soil erosion in a hilly loess region on the Loess Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(4):415-421.
- (上接第 87 页)
- [26] 童晓霞, 崔远来, 邵东国, 等. 递增式连续降雨条件下典型山区坡面径流产沙水动力学特征[J]. 农业工程学报, 2024, 40(9):88-97.
- TONG X X, CUI Y L, SHAO D G, et al. Hydrodynamic characteristics of runoff and sediment yield on the slopes in typical mountainous areas under incremental and continuous rainfall conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(9):88-97.
- [27] HUANG X, WANG K R, ZOU Y W, et al. Development of global soil erosion research at the watershed scale: A bibliometric analysis of the past decade [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(10): 12232-12244.
- [28] ANDUALEM T G, HEWA G A, MYERS B R, et al. Erosion and sediment transport modeling: A systematic review [J]. Land, 2023, 12(7):e1396.
- [29] 钱秋颖, 秦富仓, 李龙, 等. 自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):46-52.
- QIAN Q Y, QIN F C, LI L, et al. Spatial heterogeneity of surface roughness of slope erosion under natural rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):46-52.
- [30] 张若曦, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区坡面微地貌变化与侵蚀产沙的响应关系[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 21-27.
- ZHANG R X, QIN F C, LI L, et al. Responses of slope micro-geomorphology to erosion and sediment yield in arsenic sandstone area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6):21-27.