

土石混合崩积体坡面细沟跌坑发育试验研究

蒋芳市¹, 张海东¹, 陈培松¹, 林嘉辉¹, 林金石¹, 施悦忠², 许永明², 黄炎和¹

(1.福建农林大学资源与环境学院,福州 350002; 2.安溪县水土保持委员会办公室,福建 安溪 362000)

摘要: 为了探究土石混合崩积体坡面细沟跌坑发育情况,采用室内放水冲刷试验,通过设置 4 个流量(2, 4, 8, 12 L/min)和 4 种砾石含量的土石混合崩积物(砾石质量比例 0, 10%, 30%, 50%),研究不同条件下细沟跌坑的发育特征。结果表明:在不同冲刷时段,跌坑数量变化为 3~17 个,跌坑平均深度为 1.10~5.93 cm,细沟纵断面形态系数为 2.97~19.97。各跌坑参数随冲刷时间的延长总体呈增大趋势,部分坡面在 5 min 或 7.5 min 时出现最大值;跌坑参数随流量的增加总体呈先增大后减小趋势,8 L/min 流量条件下出现最大值,而随着砾石含量增加总体呈增大趋势;流量对跌坑发育的影响大于砾石含量。各跌坑参数与流速、阻力系数及曼宁粗度系数密切相关,径流剪切力是描述跌坑发育的最适合水动力学指标,可用线性函数表达。

关键词: 崩岗; 崩积体; 砾石; 细沟侵蚀; 跌坑; 水动力学

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0027-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.004

Experimental Study on the Drop Pit Development of Rill Erosion on Soil-rock Mixed Colluvial Deposit Slopes

JIANG Fangshi¹, ZHANG Haidong¹, CHEN Peisong¹, LIN Jiahui¹,

LIN Jinshi¹, SHI Yuezhong², XU Yongming², HUANG Yanhe¹

(1.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University,

Fuzhou 350002; 2.Office of Anxi County Water and Soil Conservation Committee, Anxi, Fujian 362000)

Abstract: In order to explore the drop pit development on soil-rock mixed colluvial deposit slopes, a scouring test was conducted in laboratory. Four soil-rock mixed colluviums (0, 10%, 30%, 50% gravel in mass ratio) under different flow discharges (2, 4, 8, 12 L/min) were tested. The results were as followed: the number of drop pit varied from 3 to 17, the average depth of drop pit was between 1.10 to 5.93 cm, and the profile form indices were between 2.97 and 19.97. The number of drop pit, the depth of drop pit, and the profile form indices all showed the increasing trend overall with the increase of scouring duration, whereas the maximum value appeared in some slopes at 5 min or 7.5 min. All drop pit parameters first increased and then decreased with the increase of flow discharge as a whole, and the maximum value appeared under the discharge of 8 L/min. The number of drop pit, the depth of drop pit, and the profile form indices increased with the increase of gravel content. The influence of flow discharge on the all parameters of drop pit was greater than those of gravel contents. Drop pit parameters were significantly correlated with flow velocity, resistance coefficient and Manning roughness coefficient. Shear stress was the best hydrodynamic parameter to describe the development of drop pit development as a linear function.

Keywords: benggang; colluvial deposit; gravel; rill erosion; drop pit; hydrodynamics

崩岗是我国南方红壤区典型的土壤侵蚀现象^[1],突发性强,发展速度快,侵蚀剧烈,对我国南方红壤区的生态安全构成威胁^[2-3]。典型崩岗一般包括集水坡面、崩壁、崩积体和洪积扇 4 个组成要素^[4-5]。其中,

崩积体是崩壁崩塌后在崩壁下方堆积的物质,土质疏松,坡度大,易被侵蚀^[4-5],是崩岗侵蚀泥沙主要来源,崩岗 50% 以上的泥沙量由其产生^[6]。因此,崩积体的再侵蚀是崩壁土体转化成崩岗泥沙的关键环节,是

收稿日期:2019-08-20

资助项目:福建省自然科学基金项目(2017J01459);国家自然科学基金项目(41977071)

第一作者:蒋芳市(1979—),男,福建大田人,讲师,博士,主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail:jfsfafu@163.com

通信作者:黄炎和(1962—),男,广东饶平人,教授,博导,主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail:yanhehuang@163.com

崩岗泥沙的最直接来源,影响崩岗的发展及危害程度^[4-6]。细沟侵蚀是坡面侵蚀的重要方式,坡面上一旦产生细沟,细沟内股流的侵蚀力将远大于细沟间侵蚀^[7-8],从而导致坡面侵蚀量显著增加^[8-9]。调查^[10]发现,崩积体坡面分布大量的细沟,其侵蚀泥沙流失量平均占崩积体坡面总产沙量的 70%。因此,研究崩积体坡面细沟侵蚀过程,对于崩积体坡面侵蚀机理的认识具有重要意义。已有学者对崩积体坡面细沟产流产沙特征^[4-5]、形态指标变化特征^[10]及水动力学机理^[5,10]进行了研究。调查^[5]发现,崩积体砾石(粒径 ≥ 2 mm 的颗粒^[11])含量高(质量比最高可达 70%),属于典型的土石混合物。砾石是土壤颗粒的重要组成部分,是影响土壤侵蚀的重要因素^[11-13]。砾石的存在影响土壤的容重、孔隙及入渗等物理结构特性^[11-12],必然对崩积体坡面细沟侵蚀产生影响,但砾石对崩积体细沟侵蚀的影响及作用机制尚不清楚,还需做进一步研究。

跌坑是指细沟发育过程中形成一系列近似等间距的冲坑^[14],其形成表明细沟侵蚀正在孕育,是细沟造床的关键^[15-16],因此,近年来跌坑的形成与发育成为细沟侵蚀研究的又一重要命题。坡度和流量是研究跌坑发育最常见因素,董旭等^[14]和马小玲等^[17]对黄土的研究表明,跌坑发育主要受坡度影响,与流量变化关系较小;但赵本山等^[18]对甘肃碎石土研究则认为,流量对跌坑发育的影响大于坡度。跌坑与水动力学特性密切相关,随着跌坑的发育,粗度系数增大,水流阻力变大,能量耗散剧烈^[14,17];而水动力的变化又影响跌坑的发育^[19]。此外,跌坑发育与土壤质地有关,白清俊等^[15]认为,细颗粒含量高的坡面,由于细颗粒的黏性作用,在径流流经处,地表极易形成结皮,径流的下切作用较弱,黏粒对径流侵蚀跌坑的形成有抑制作用。综上表明,影响跌坑形成的因素众多,机制复杂,仍需进一步研究。同时,目前跌坑发育的研究主要为单一性质的细土(颗粒粒径 < 2 mm)为主,对土石混合物的研究甚少。砾石的存在,一方面由于自身重量大,径流需要消耗更多的能量才能搬运^[5],不利于床面跌坑的形成;但另一方面,砾石含量高的坡面,土质疏松^[4],床面易被侵蚀,从而促进跌坑的发育。然而关于砾石对细沟跌坑发育的影响及作用机制还未清楚,限制了坡面细沟侵蚀过程及机理的进一步认识。因此,本试验以土石混合崩积体为研究对象,对不同砾石含量坡面冲刷过程中跌坑的数量、深度及发育特征等进行分析,并对跌坑发育的影响因素及水动力机制进行探究,为进一步阐明崩积体坡面细沟侵蚀过程及机理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 采样点概况

试验土壤采集于福建省安溪县龙门镇(24°57'N, 118°05'E),属亚热带季风气候,雨量丰沛,年均降水量 1 800 mm;气候温和,年均气温 19℃。安溪地质条件多为粗粒花岗岩,在温暖湿热的条件下生物化学作用强烈,形成深厚的风化壳。风化壳石英沙粒含量高,抗侵蚀能力弱,在地表径流和重力作用下,土体极易崩塌形成崩岗。据调查,安溪县是福建省崩岗分布最多的县,共有崩岗 26 024 座,约占福建省崩岗总量的 50%。而龙门镇崩岗总量 1 228 个,占安溪县崩岗总量 10%,是安溪县崩岗侵蚀最为严重的地区之一。因此选择龙门镇作为采样地具有典型性和代表性。

采样点崩积体由酸性中粗粒花岗岩发育的风化壳崩塌形成。由于特殊的花岗岩母岩,崩岗崩积物砾石(≥ 2 mm 颗粒)含量高,平均质量含量为 40%,属典型的土石混合物^[5];而 < 2 mm 的颗粒主要为砂粒和粉粒,黏粒含量极低(质量含量在 10% 以下)^[4]。因此,崩积体土质疏松,结构性差,可蚀性高,极易发生侵蚀^[4]。同时,由于崩塌物质组成差异及崩塌时间的不一样,崩积体在不同部位和不同深度的砾石含量差异很大,质量含量最高可达 70%^[5]。

1.2 试验土样采集及性质

采集龙门镇洋坑村典型崩积土作为试验用土。土壤 pH 为 5.18,有机质含量低,仅为 1.71 g/kg。土壤砾石含量高,质量含量为 37%; < 2 mm 部分的砂粒(0.05~2 mm)为主,粉粒(0.002~0.05 mm)次之,黏粒(< 0.002 mm)最低,依次分别为 62%、33%和 5%。

1.3 土样制备

将采集的土样去除枯枝落叶、根系以及直径 > 10 mm 的碎石,再进行风干。将风干后土样分别过 10, 2 mm 的筛。土样过筛后,将直径 < 2 mm 的细土与直径 2~10 mm 砾石分开储存,备用。

1.4 试验装置

试验装置主要由冲刷土槽和放水装置 2 部分组成。冲刷土槽为镀锌板制土槽(长 400 cm,宽 40 cm,高 50 cm),内嵌在固定可变坡钢槽里。土槽上部的不同位置设置坐标点,土槽底部设一些出水孔。放水装置为溢流槽(长 40 cm,宽 40 cm,高 60 cm),在槽的顶部。在离溢流槽顶端的 20 cm 处嵌入 1 个隔板(宽 20 cm,高 30 cm),使隔板下方留有 30 cm 高的空间,以便水在隔开的 2 个小槽自由流通,以达到稳流效果。由蠕动泵(WT 600-4F)控制流量。

1.5 试验设计

野外崩岗崩积体的平均坡度在 30°,故设置试验坡度为 30°。流量根据研究区暴雨发生频率及在崩

积体坡面上建立的径流小区产生的单宽流量换算得到,设置为 2,4,8,12 L/min。野外调查发现崩积体砾石质量含量在 10%~70%,故设计 4 个砾石质量含量:0%,10%,30%,50%(换算成土石质量比为 100:0,90:10,70:30,50:50)。为了清晰研究细沟发育过程,采用预留细沟的方法。即在冲刷试验前,采用 1 条矩形镀锌管镶嵌在土壤表面,获得 1 条预留细沟(宽 10 cm,深 5 cm)。为了分析跌坑发育随冲刷时间的变化特征,冲刷 2.5 min 后停止,相关参数测定后,继续下一个 2.5 min 的冲刷,共进行 4 次,合计 10 min。每组试验 3 次重复,共进行 192 次冲刷试验。

1.6 试验过程

本试验于 2018 年 8—9 月进行,试验地点为福建金山水土保持科教园人工降雨大厅。试验前,将颗粒 <2 mm 土壤与 2~10 mm 砾石按照设计的质量比例混合。填土前,先填入 20 cm 细沙在土槽底部,作为透水层,后将按比例设计的土石混合物填入土槽。每 5 cm 填 1 层土,先填 5 层,后将矩形镀锌管(宽 10 cm,高 5 cm)固定在坡面的中间位置,之后填第 6 层土。野外崩积体容重为 1.08~1.55 g/cm³,主要集中于 1.30~1.40 g/cm³,故填土容重设置为 1.30~1.40 g/cm³。填土完成后,在土样表面覆盖 1 层纱布,用喷壶淋水,浇至饱和,后静置 18 h,保证每场试验土壤水分含量均一。试验开始前,将镀锌管取出,形成预留细沟(图 1a)。

放水前,将土槽升至 30°,然后进行流量校验,3 次校验误差均小于 5%,后进行冲刷试验。每次冲刷时间为 2.5 min,共 4 次,合计 10 min。每次冲刷结束后用佳能相机采集细沟图像信息,用于合成 DEM。并采用 ArcMap 10.3.1 分析获得跌坑数量、跌坑距离及深度。跌坑深度为跌坑最深处和上游结皮段的高差。并通过跌坑平均深度(H)和跌坑距离(L)(相邻两跌坑最深处沿坡面方向距离的平均值)计算细沟纵断面形态系数(δ)^[17]。

冲刷过程中,进行水温、流速及水深的测定。通过温度计测水温,以获得相应的黏滞系数;采用高锰酸钾染色剂法测定流速(V),在坡面上设置 4 个测量点,分别为 0.5,1.5,2.5,3.5 m 处,故每个测量长度为 1 m,多次测量取平均值即平均流速。并按照水流流态的修正系数(层流 0.67,过渡流 0.7,紊流 0.8)进行修正。在 4 个测量点用钢尺(0.1 mm 精度)测量水深(h)。阻力系数(f)、曼宁粗度系数(n)、径流剪切力(τ)等水动力学参数通过流速及水深等计算获得。

1.7 指标计算

细沟纵断面形态系数(δ)按计算公式^[17]为:

$$\delta = \frac{100H}{L} \quad (1)$$

式中: H 为跌坑平均深度(cm); L 为各组次相邻两跌坑最深处沿坡面方向距离的平均值(cm)。

阻力系数(f)、曼宁粗度系数(n)、径流剪切力(τ ,Pa)、水流功率(ω ,N/(m·s))及单位水流功率(p ,m/s)计算公式为:

$$\delta = 100H/L \quad (2)$$

$$n = \frac{R^{2/3}J^{1/2}}{V} \quad (3)$$

$$\tau = \rho ghS \quad (4)$$

$$\omega = \tau V \quad (5)$$

$$P = VS \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度(m/s²); h 为水深(m); S 为坡度(m/m); R 为水力半径(m); J 为水力能坡,用试验坡度的正弦值(m/m); V 为流速(m/s); ρ 为水流密度(kg/m³)。

1.8 数据处理

DEM 分析通过 ArcMap 10.3.1 和 Cloud Compare 软件完成;数据处理及图表制作采用 Microsoft Excel 2010 软件完成;方差分析、相关分析及方程拟合采用 SPSS 18 软件完成。

2 结果与分析

2.1 跌坑发育随冲刷时间的变化

由表 1 和表 2 可知,整个冲刷过程中,跌坑数量为 3~17 个,跌坑平均深度为 1.10~5.93 cm,跌坑数量和跌坑平均深度随冲刷时间的增加总体呈增大趋势。但赵本山等^[18]对甘肃洪积扇的研究表明,随试验进行,沟道加深拓宽,跌坑变得逐渐模糊,逐渐消失。这是因为赵本山等^[18]研究设计最大坡度为 12°,低坡度条件下,水流重力势能弱,能量不足,坡面细沟一旦形成之后,沟底很难再出现新的跌坑。而本试验设计坡度为 30°,水流重力势能强,能量大,有利于跌坑形成。董旭等^[14]对黄土细沟跌坑研究过程中同样发现,高坡度条件下更有利于跌坑发育。

从表 1 和表 2 还可看出,部分条件下坡面跌坑数量及平均跌坑深度在 5 min 或 7.5 min 时达到最大值。这是因为冲刷开始后,跌坑发育不充分,其数量较少,深度也较小;随着冲刷进行,水流提供能量越大,越有利于跌坑的发育,跌坑数量及深度随之增大;但随着跌坑数量和深度的增加,对水流的阻滞作用增强,冲刷中后期泥沙在部分跌坑沉积,跌坑深度变小;同时,随着跌坑数量增加,相邻跌坑之间距离越来越小,在水流冲击作用下,部分相邻跌坑发生串联,使得冲刷后期部分坡面出现跌坑数量减小的现象。以 4 L/min、10%砾石含量条件下跌坑发育情况为例,随

着冲刷进行,跌坑数量增加(图 1a、图 1b、图 1c、图 1d)),但从图 1d 和图 1e 比较可以看出,细沟中下部位置相邻跌坑串联现象更加明显,冲刷 10 min 后的跌坑数量少于冲刷 7.5 min 后的。

跌坑数量及深度并不能全面反映床面跌坑的发育程度,于是采用 $\delta=100\ H/L$ 无量纲参数来分析细沟跌坑的发育情况。 H 越大, L 越小, δ 越大,表明跌坑发育愈成熟,细沟床面形态越加复杂,对径流的消能更加显著^[17]。从表 3 可以看出,纵断面形态系数变化范围为 2.97~19.97,随冲刷时间的变化规律与跌坑数量及跌坑平均深度的变化趋势相似,总体呈增大趋势,部分坡面细沟纵断面形态系数在 7.5 min 出现最大值。说明冲刷时间越长,床面越起伏,对坡面水流的阻碍作用越强,坡面流能量转化越频繁,越有利于跌坑的形成^[18];但冲刷中后期泥沙沉积及相邻跌坑串联,造成跌坑的发育程度变低。但在 50%砾石含量坡面不同流量条件下,细沟纵断面形态系数随冲刷时间增加均出现增大现象。这是因为 50%砾石含量坡面砾石含量高,土质疏松,沟底易被侵蚀形成跌坑,且冲刷中后期,沟壁易坍塌,泥沙阻塞沟道,造成水流落差增加,使得跌坑深度更大,造成其发育程

度更加成熟。

表 1 跌坑数量随冲刷时间变化

单位:个					
砾石含量/%	流量/ (L·min ⁻¹)	2.5 min	5.0 min	7.5 min	10.0 min
0	2	7±2b	4±3b	10±2a	8±1a
	4	9±3a	12±4a	10±3a	9±3a
	8	10±3a	12±3a	10±2a	12±4a
	12	3±3a	6±3a	8±4a	9±4a
10	2	3±2b	5±2b	10±3a	11±2a
	4	12±3a	11±3a	14±4a	10±3a
	8	10±3a	14±3a	15±4a	14±4a
	12	4±3a	8±4a	7±3a	9±5a
30	2	4±2b	4±1b	10±2a	9±2a
	4	9±4a	12±4a	12±4a	10±3a
	8	10±3a	13±3a	13±4a	14±4a
	12	8±3a	12±3a	9±2a	11±3a
50	2	5±2b	4±2b	7±4b	14±2a
	4	9±2a	8±2a	8±2a	11±3a
	8	7±2b	14±2ab	12±3ab	17±3a
	12	5±3a	7±2a	10±4a	9±2a

注:表中数据为平均值±标准差;同一砾石含量条件下,同行相同小写字母表示不同冲刷时间跌坑数量的差异不显著($P>0.05$)。下同。

表 2 跌坑深度随冲刷时间变化

单位:cm					
砾石含量/%	流量/(L·min ⁻¹)	2.5 min	5.0 min	7.5 min	10.0 min
0	2	1.54±0.30a	2.25±0.41a	2.18±0.35a	2.00±0.33a
	4	1.41±0.21b	2.25±0.43ab	3.58±0.41a	2.70±0.45ab
	8	2.27±0.63a	2.38±0.65a	3.27±0.84a	3.45±1.01a
	12	1.40±0.21b	3.26±0.63a	2.58±0.54a	3.02±0.58a
10	2	1.10±0.35a	1.92±0.51a	1.39±0.43a	1.39±0.42a
	4	2.13±0.71a	3.53±0.87a	2.65±0.82a	3.63±0.93a
	8	2.59±0.70a	3.20±0.68a	3.68±0.72a	4.02±1.21a
	12	3.20±0.60a	3.31±0.45a	3.22±0.56a	3.80±0.54a
30	2	2.25±0.50a	3.00±0.58a	2.16±0.47a	3.43±0.96a
	4	2.01±0.51a	2.18±0.60a	2.72±0.45a	3.41±1.00a
	8	2.00±0.92a	2.87±0.84a	3.14±0.75a	4.03±1.31a
	12	2.96±0.98a	4.97±1.31a	4.01±1.09a	4.71±1.43a
50	2	1.78±0.39a	2.05±0.50a	2.20±0.45a	2.35±0.42a
	4	1.57±0.31b	2.37±0.46ab	3.61±0.23a	3.45±0.15ab
	8	1.74±0.43b	3.37±0.94a	4.13±0.84a	4.11±0.95a
	12	2.38±0.56b	4.34±0.70ab	4.82±0.61ab	5.93±0.68a

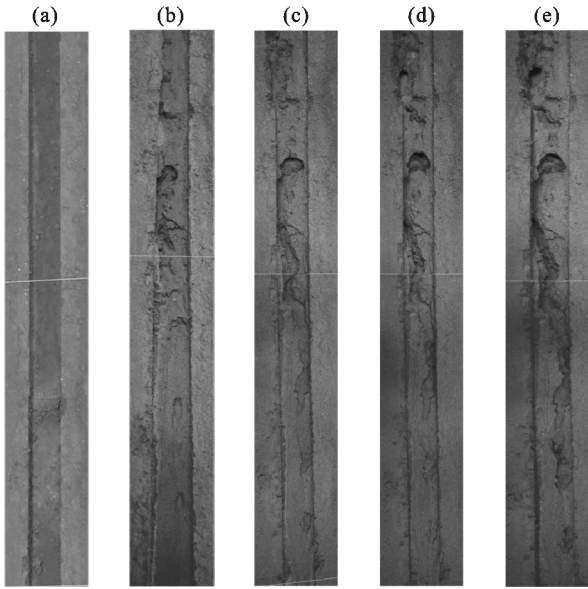
2.2 跌坑发育随砾石含量和流量的变化

选取冲刷 10 min 后各坡面细沟跌坑参数分析,由图 2 可知,随流量增加,跌坑数量、跌坑深度及纵断面形态系数总体呈先增大后减小趋势(砾石含量 30%和 50%条件下例外),8 L/min 流量条件下各指标值最大。这是因为径流能量在运动过程中不断地调整变化,随着流量增加,径流能量也随之加大,需要

更多的跌坑来消耗径流能量^[17],因此有更多的跌坑发育;然而在大流量(12 L/min)条件下,受跌坑的串联相通等影响,跌坑发育程度反而降低。砾石含量 30%和 50%条件下的跌坑平均深度随着流量的增加而增加(图 2),这是因为高砾石含量坡面土质疏松,沟底易被侵蚀形成跌坑;同时,也易造成沟壁坍塌,泥沙阻塞沟道,水流落差增加,使得跌坑深度更大。

由图 3 可知,随砾石含量增加,坡面跌坑数量、跌坑平均深度及纵断面形态系数总体呈增大趋势。这是因为砾石的存在改变了土壤性质,高砾石含量条件下,土壤的黏结性较差^[20],土壤的可蚀性增加^[4],更易被侵蚀,有利于跌坑发育;同时,砾石被搬运后,床面易形成小的坑道,并产生漩涡,更有利于径流掺混和紊动^[14],促进跌坑的形成;另外,随砾石含量的增加,土体的稳定性下降,冲刷中后期沟壁易产生崩塌^[4,13],对沟道产生堵塞作用,造成水流落差增加,使得跌坑深度更大。在以上 3 方面综合影响下,高砾石含量的细沟床面形态更加复杂,跌坑发育越加成熟。白清俊等^[15]对黄土的研究也表明,粗颗粒含量高的土壤更有利于跌坑的形成和发育。但从图 3 还可发现,跌坑数量、跌坑平均深度及细沟纵断面形态系数并不完全随砾石含量的增加而增加,尤其在 2,4,8 L/min 条件下的跌坑平均深度及细沟纵断面形态系数,随着砾石含量的增加,呈现波动性增大。这是由于跌坑发生发展除了受砾石影响外,还与径流的水动力变化有关。细沟在发展过程中的形态呈不规则变化(图 1),导致径流的水动力具有波动性^[19-20],而在

较小流量条件下,径流能量较小,水动力更容易受细沟形态的影响。因此,研究细沟跌坑发育,还需考虑水动力变化的影响。



注:(a)冲刷前;(b)冲刷 2.5 min 后;(c)冲刷 5.0 min 后;(d)冲刷 7.5 min 后;(e)冲刷 10 min 后。

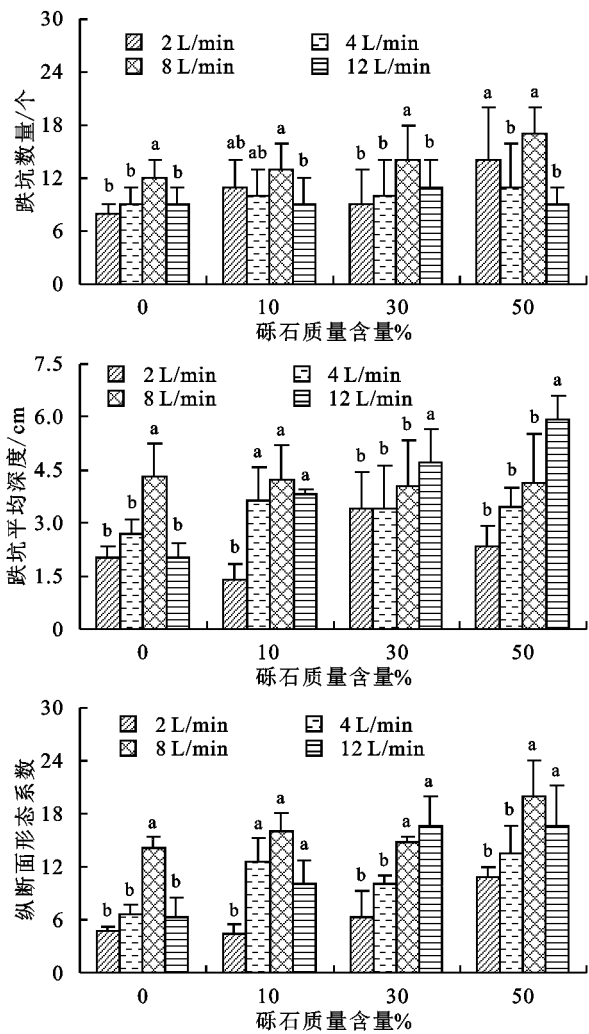
图 1 砾石含量 10%、坡面 4 L/min 条件下不同冲刷时间段细沟跌坑发育情况

表 3 纵断面形态系数随冲刷时间变化

砾石含量/%	流量/(L·min ⁻¹)	2.5 min	5.0 min	7.5 min	10.0 min
0	2	3.72±1.03b	3.33±0.98b	7.27±1.02a	4.71±0.83b
	4	4.10±1.02b	5.82±1.30b	12.06±2.96a	6.57±1.03b
	8	6.31±1.31b	8.41±1.69ab	9.08±1.45ab	14.16±2.97a
	12	2.10±0.43b	7.26±1.20a	7.38±1.03a	6.28±1.09a
10	2	3.30±0.75a	4.57±0.96a	4.63±0.94a	4.37±1.10a
	4	8.00±1.96a	11.11±2.12a	10.60±1.95a	12.52±2.68a
	8	7.62±1.75b	13.58±1.79ab	15.77±0.43ab	16.09±1.06a
	12	6.40±2.11b	9.47±1.65a	9.83±2.03a	10.06±3.15a
30	2	4.70±0.84b	6.60±0.89b	14.20±2.97a	6.30±1.25b
	4	4.40±0.95b	12.50±3.10a	16.00±3.69a	10.00±3.01a
	8	9.40±1.34b	12.60±2.01ab	16.10±1.01a	14.80±0.52ab
	12	10.90±1.60b	13.60±2.45ab	19.90±3.08a	16.70±4.02a
50	2	2.97±0.84b	3.28±1.01b	5.13±1.58b	10.90±2.17a
	4	5.93±1.05b	5.93±1.01b	9.04±1.84ab	13.57±2.72a
	8	3.70±0.57b	12.78±2.45ab	15.50±2.03ab	19.97±3.25a
	12	3.72±0.67b	9.50±3.01ab	16.62±4.98a	16.69±4.53a

为了分析砾石含量及流量对跌坑发育的影响程度,采用双因素方差分析对冲刷 10 min 后各跌坑参数进行统计。由表 4 可知,砾石含量对跌坑数量和跌坑平均深度影响不显著,但对纵断面形态系数达到极显著水平($P<0.01$);流量对跌坑数量、跌坑平均深度及纵断面形态系数的影响均达到极显著水平($P<0.01$)。对表 4 进一步分析可知,3 个参数的 F 值顺序均为流量大于砾石含量,说明流量对跌坑发育的影

响大于砾石含量。流量越大,提供的能量越大,有利于对床面的冲刷,形成跌坑。虽然砾石含量对 3 个跌坑参数的影响程度小于流量,但对细沟纵断面形态系数的影响达到极显著水平,说明砾石对跌坑发育的作用不容忽视。白清俊等^[15]对黄土的研究认为,粗颗粒含量高的土壤胶结能力差,径流的侵蚀力很容易突破表土颗粒的胶结力,对床面形成下切侵蚀,促进跌坑的形成和发育。



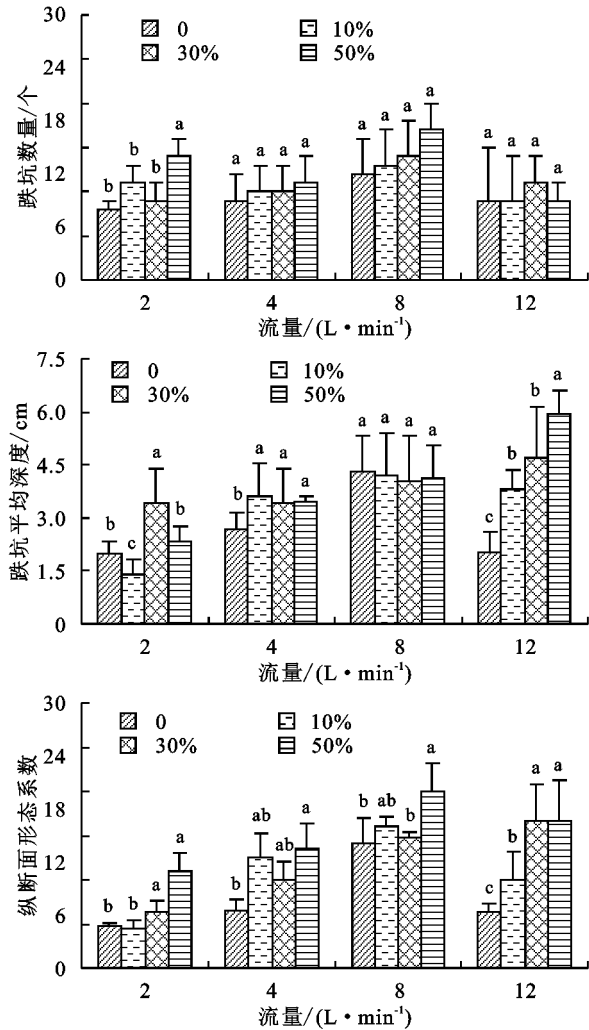
注：同一砾石含量条件下不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 2 跌坑数量、平均深度及纵断面形态系数随流量的变化

2.3 跌坑发育的水动力机制

各因素对跌坑的影响最终均体现在径流动力上，分析水动力与细沟跌坑发育的关系，可准确认识跌坑的形成和发育机制。由表 5 可知，跌坑参数和水动力学参数间存在较高相关关系。其中，3 个跌坑参数与流速呈负相关，但与水深、阻力系数及曼宁粗度系数呈正相关，除跌坑平均深度与流速相关性不显著外，其他的均达到极显著水平($P<0.01$)，说明随着跌坑的发育，床面粗度增大，径流阻力(阻力系数和曼宁粗度系数)增加，径流需要消耗更多的能量运动，造成流速减缓。董旭等^[14]对黄土的研究也发现，随着跌坑的逐渐发育，粗度系数开始急剧增加，且细沟阻力主要由跌坑发育造成的形态阻力组成。对于径流剪切力、水流功率及单位水流功率 3 个水动力学参数，径流剪切力与各跌坑参数的相关性最高，且达到极显著水平，说明径流剪切力的增加有利于跌坑的发育；同时表明，当描述水动力学参数与跌坑发育的关系时，径流剪切力是最适合的水动力学指标。对 3 个跌坑参数与径流剪切力的关系进行拟合发现，线性函数可

以很好地解释水力学参数与跌坑发育之间的关系，建立的方程达到极显著水平($P<0.01$) (表 6)。从表 5 还可以发现，各跌坑参数与单位水流功率呈反比，这是因为单位水流功率是流速和坡度的乘积，本试验坡度均为 30° ，单位水流功率主要受流速的影响，随着跌坑发育，径流能量能耗增加，流速减缓，单位水流功率也随着下降。



注：同一流量条件下，不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 3 跌坑数量、平均深度及纵断面形态系数随砾石含量的变化

表 4 砾石含量、流量及冲刷时间对跌坑发育影响的方差分析

跌坑参数	差异源	离均差平方和	自由度	均方差	F	P
跌坑数量	砾石含量	21.19	3	7.06	3.62	0.06
	流量	56.19	3	18.73	9.60 **	0.04
	误差	17.56	9	1.95		
	总计	94.94	15			
跌坑平均深度	砾石含量	3.79	3	1.26	2.92	0.09
	流量	9.62	3	3.20	7.42 **	0.01
	误差	3.89	9	0.43		
	总计	17.29	15			
纵断面形态系数	砾石含量	111.20	3	37.07	7.39 **	0.01
	流量	193.92	3	64.64	12.88 **	0.00
	误差	45.16	9	5.02		
	总计	350.29	15			

注：* * 表示差异达极显著水平($P<0.01$)。

表 5 跌坑参数与水动力学参数相关性

参数	V	h	f	n	τ	ω	P
N	-0.35**	0.39**	0.57**	0.58**	0.40**	0.08	-0.36**
H	-0.24	0.73**	0.57**	0.65**	0.74**	0.51**	-0.17
δ	-0.33**	0.71**	0.71**	0.75**	0.72**	0.39**	-0.31*

注: N 表示跌坑数量; H 表示跌坑平均深度; δ 表示纵断面形态系数; V 表示流速; h 表示水深; f 表示阻力系数; n 表示曼宁粗度系数; τ 表示径流剪切力; ω 表示水流功率; p 表示单位水流功率;* 表示相关性达到极显著水平($P<0.01$);* 表示相关性达到显著水平($P<0.05$);样本数为 64。

表 6 跌坑参数与径流剪切力(τ)的回归方程

跌坑参数	回归方程	R^2	P
跌坑数量(N)	$N=0.050\times\tau+6.07$	0.16	<0.01
跌坑平均深度(H)	$H=0.028\times\tau+0.96$	0.55	<0.01
纵断面形态系数(δ)	$\delta=0.131\times\tau+0.60$	0.53	<0.01

注:样本数为 64。

3 结论

(1)随冲刷时间增加,跌坑数量、跌坑深度、细沟纵断面形态系数总体呈增大趋势,部分坡面在 5 min 或 7.5 min 时出现最大值。

(2)随流量增加,跌坑数量、跌坑深度及纵断面形态系数总体呈先增大后减小趋势,8 L/min 流量条件下的参数值最大。随砾石含量增加,跌坑各参数总体呈增大趋势。方差分析表明流量对跌坑发育的影响大于砾石含量。

(3)跌坑参数与流速呈负相关,但与水深、阻力系数及曼宁粗度系数呈正相关,且达到极显著水平;径流剪切力是描述跌坑发育的最适合水动力学指标。

参考文献:

[1] 王礼先.中国水利百科全书·水土保持分册[M].北京:中国水利水电出版社,2004.

[2] 季翔,黄炎和,林金石,等.基于 CA-Markov 模型与 ANUDEM 内插法的崩岗侵蚀量预估[J].农业工程学报,2018,34(21):128-136.

[3] Chen J L, Zhou M, Lin J S, et al. Comparison of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullies [J].Geoderma,2018,317:56-66.

[4] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China[J].Soil Science Society of America Journal,2014,78(5):1741-1752.

[5] 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):11-17,102.

[6] Liu X L, Qiu J A, Zhang D L. Characteristics of slope runoff and soil water content in benggang colluvium un-

der simulated rainfall [J]. Journal of Soils and Sediments,2018,18:39-48.

[7] 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.

[8] 覃超,吴红艳,郑粉莉,等.黄土坡面细沟侵蚀及水动力学参数的时空变化特征[J].农业机械学报,2016,47(8):146-154,207.

[9] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7):162-170.

[10] Jiang F S, Zhan Z Z, Chen J L, et al. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain[J]. Catena,2018,169(23):46-58.

[11] 邵明安,马东豪,朱元骏,等.黄土高原土石混合介质土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2010.

[12] Zhang Y H, Zhang M X, Niu J Z, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress[J].Catena,2016,147:153-166.

[13] 牛耀彬,高照良,李永红,等.工程堆积体坡面细沟形态发育及其与产流产沙量的关系[J].农业工程学报,2016,32(19):154-161.

[14] 董旭,张宽地,王光谦,等.黄土细沟流跌坑的形成与作用机理[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(5):28-35.

[15] 白清俊,马树升.细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J].水土保持学报,2001,15(6):62-65.

[16] 严冬春,文安邦,史忠林,等.紫色土坡面水流跌坑形态特征及其成因[J].山地学报,2012,30(1):30-35.

[17] 马小玲,张宽地,杨帆,等.坡面细沟侵蚀断面形态发育影响因素分析及动力特性试验[J].农业工程学报,2017,33(4):209-216.

[18] 赵本山,王生新,徐奎,等.山前洪积扇坡面细沟侵蚀跌坑特征的试验研究[J].干旱区地理,2017,40(2):348-354.

[19] 严冬春,文安邦,史忠林,等.紫色土坡面跌坑贯穿发生细沟的水动力过程[J].长江流域资源与环境,2012,21(1):94-99.

[20] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):149-156.