

砾石含量对崩积体坡面细沟横断面形态影响

张海东, 陈培松, 林嘉辉, 蒋芳市, 司晓静, 林金石, 郭煜程, 唐雅迪, 黄炎和

(福建农林大学资源与环境学院, 福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002)

摘要: 为研究砾石含量对崩积体坡面细沟侵蚀的影响, 采用室内放水冲刷试验, 研究了30°坡面下不同冲刷流量(2, 4, 8, 12 L/min)对4种土石混合崩积物(0, 10%, 30%, 50%砾石质量比例)冲刷过程中细沟横断面形态特征。结果表明:(1)随冲刷时间的增加, 深度增加速度大于宽度增加速度, 横断面向窄而深发展。(2)坡顶细沟横断面深度较大, 接近“V”形, 侵蚀严重; 坡底细沟横断面深度较小, 侵蚀较弱; 细沟横断面形态指标 η 随坡长增加出现波动变化。(3)横断面深度随砾石含量增加总体呈先减小后增大趋势, 10%砾石含量坡面细沟深度最小; 10%砾石含量坡面细沟横断面形态指标 η 变化范围最大; 临空面在10~15 cm深度开始发育, 低砾石含量土壤更有利于临空面发育。

关键词: 崩岗; 崩积体; 砾石含量; 横断面; 细沟侵蚀

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2019)04-0081-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.012

Effects of Gravel Content on Rill Cross Section Morphological in Colluvial Deposit Slope

ZHANG Haidong, CHEN Peisong, LIN Jiahui, JIANG Fangshi,

SI Xiaojing, LIN Jinshi, GUO Yucheng, TANG Yadi, HUANG Yanhe

(College of Resource and Environmental Science, Fujian Agriculture and Forestry

University, Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fuzhou 350002)

Abstract: In order to explore the influence of gravel content on rill erosion of colluvial deposit slope, the combination scouring tests were conducted. This paper studied the morphological characteristics of rill cross section during scouring of four kinds of soil-rock mixed colluvial (gravel mass ratios of 0, 10%, 30% and 50%, respectively) with different scouring flow rates (2, 4, 8 and 12 L/min, respectively) under slope gradient of 30°. The results showed that: (1) With the increase of scouring time, the increasing speed of depth was greater than that of width, which made the shape of rill cross section develop toward narrow and deep. (2) The depth of rill cross section was large on the top of slope, which was similar to the “V” shape, and the erosion was severe. The depth of rill cross section was small on the bottom of slope and the erosion was relatively mild. The morphological index η of rill cross section fluctuated as the increase of slope length. (3) With the increase of gravel contents, the depth of cross section decreased first and then increased. The depth of rill was shallowest on the slope with 10% gravel content. The morphological variability of cross section was maximum on the slope with 10% gravel content. The free surface began to develop at the depth of 10~15 cm, and the soil with low gravel content was more conducive to the development of the free surface.

Keywords: benggang; colluvial deposit; gravel content; rill cross section; rill erosion

崩岗侵蚀是我国南方红壤区典型的土壤侵蚀现象^[1], 具有突发性强、发展速度快、侵蚀剧烈、治理难度大等特点^[2]。崩岗由集水坡面、崩壁、崩积体、冲刷沟道和洪积扇组成。其中, 崩积体砾石含量高, 为典型土石混合物, 土质疏松, 易被侵蚀, 是崩岗侵蚀泥沙主要来源^[3-4], 其泥沙流失量可占崩岗总侵蚀量50%以上^[5]。野外调查^[6]发现, 崩积体坡面分布大量的细

沟, 其侵蚀泥沙流失量最高可达崩积体坡面总产沙量93%。因此, 研究崩积体坡面细沟侵蚀对于认识崩积体坡面侵蚀机理具有重要意义。目前对崩积体坡面细沟发生发展、形态特征及水动力学机制进行研究, 但崩积体砾石含量高(质量比例最高可达70%), 影响崩积体的物理结构性质, 必然对坡面细沟侵蚀产生影响, 砾石对细沟侵蚀的影响机制还不清楚, 还需对

其做进一步探讨。

细沟侵蚀是坡面侵蚀泥沙的主要来源,又是泥沙输送的主要通道^[3],是土壤侵蚀研究的重要方向,主要包括细沟产流产沙、细沟水动力学参数和细沟形态等方面^[7]。其中,细沟形态被认为是描述细沟侵蚀和发育程度的主要参数,已有学者^[7-8]对细沟密度、细沟宽深比、细沟倾斜度、细沟割裂度等细沟形态参数进行了大量研究。随着细沟形态研究的深入,细沟断面形态研究成为该领域新的研究方向。细沟断面形态研究主要以断面宽度、断面深度、断面宽深比和断面形态指标等为研究对象,对于认识细沟发育规律、解释细沟空间分布形态具有重要意义^[9]。李响等^[10]通过对元谋干热河河谷研究发现,细沟横断面宽度为0.22~0.75 m,深度为0.061~0.512 m;郝好鑫等^[11]研究发现,细沟横断面宽深比为0.93~3.52;王键等^[8]通过研究黄土细沟发现,细沟横断面面向窄深式发育,断面形态指标 η 为0.40~0.80;马小玲等^[9]通过对杨凌壤土的研究发现,细沟横断面指标变化范围为0.360~0.522,细沟侵蚀越强,细沟横断面形态越接近矩形, η 指数越大;而沈海鸥等^[12]对黄绵土研究发现,细沟横断面宽深比为1.93~2.35,细沟侵蚀越强,细沟横断面越接近“V”形,横断面指标 η 更小。目前关于细沟断面形态研究对象主要以单一性质土壤为主,鲜见对土石混合物坡面细沟断面形态的研究报道。因此,本研究以土石混合崩积体为研究对象,通过不同质量比砾石与土壤混合,采用冲刷试验,分析崩积体土石混合物细沟横断面发育过程,为进一步阐释崩积体坡面细沟侵蚀机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点概况

采样点选取福建省安溪县龙门镇(24°57'N, 118°05'E),属亚热带季风气候区,气候温暖,雨水充沛,年均气温18℃,年均降水量1 800 mm。据调查,安溪县有崩岗12 828个,占福建省崩岗总量49%,崩岗侵蚀面积2 305 hm²,占福建省崩岗侵蚀总面积36%,为福建省之最。而龙门镇又是安溪县崩岗侵蚀最为严重的地区之一,崩岗总量1 228个,占安溪县崩岗总量10%,崩岗侵蚀区面积246.77 hm²,占安溪崩岗侵蚀总面积11%^[13]。因此龙门镇崩岗侵蚀在南方地区具有典型性和代表性。

1.2 试验土样采集

试验土样采集自安溪县龙门镇洋坑村,属花岗岩风化壳崩塌形成的崩积土。pH 5.18,呈酸性;有机质含量低,仅为1.71 g/kg;土壤中砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)含量分别为62%,33%,5%,土壤结构差,土质疏松。

1.3 试验装置

试验装置主要由冲刷土槽和放水装置组成(图1)。冲刷土槽为固定可变坡钢槽,内嵌4个镀锌板制土槽,规格为400 cm(长)×40 cm(宽)×50 cm(高)。土槽上部设有坐标点,土槽底部设有出水孔。槽的顶部设置1个溢流槽,溢流槽的规格为40 cm(长)×40 cm(宽)×60 cm(高),其中在离溢流槽顶端的20 cm处嵌入1个隔板(20 cm宽×30 cm高),隔板顶部与离溢流槽顶部持平,隔板下方留有30 cm高的空间,使隔开的2个小槽的水能够自由流通,达到稳流效果。放水装置为蠕动泵(WT600-4F),可以精确控制流量。

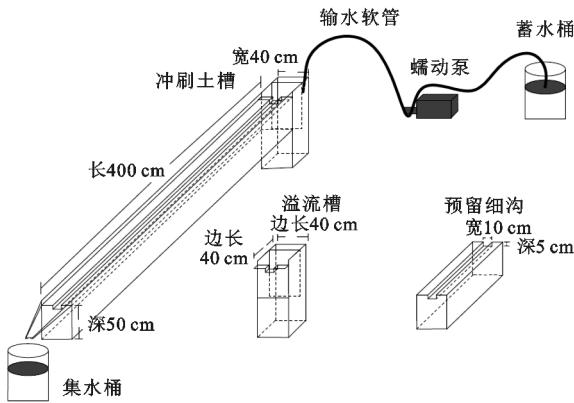


图1 试验装置示意

1.4 试验设计

野外调查发现,崩岗崩积体的平均坡度为30°,故本试验坡度设为30°。根据安溪县多年降雨产流特征及野外调查崩积体砾石质量含量分布特征,采用双变量试验设计,其中流量为2,4,8,12 L/min,土壤砾石质量含量为0,10%,30%,50%。为方便研究细沟发育过程,本试验在冲刷坡面采用预留细沟的方法。填土过程中,通过在土壤表面镶嵌1条矩形镀锌管,预留1条宽10 cm、深5 cm的细沟。试验每次冲刷时间为2.5 min,共4次10 min,每组试验3次重复,试验共冲刷192次。

1.5 试验过程

本试验于2018年8月在福建金山水土保持科技园人工降雨大厅进行。试验前,将采回的花岗岩崩积土均匀混合,除去杂草、树根等杂物和直径>10 mm的碎石,然后分别过2,10 mm筛;将其中粒径<2 mm土粒与2~10 mm砾石按照设计的质量比例混合。填土过程中,土槽底部填入20 cm细沙作为透水层,细沙上部将不同砾石含量试验用土按试验设计分别填入不同土槽。试验用土按照5 cm 1层,先填5层,第6层填土之前将宽10 cm、高5 cm矩形镀锌管固定在土壤表面中间位置,用于预留细沟,然后填入第6层土。填土过程中土壤容重控制为1.30~1.40 g/cm³。填土完毕后,用纱布将土壤覆盖,用喷壶加

水直至饱和,静止18 h,使得土壤水分分布均匀。冲刷前将镀锌管取出,出现预留细沟。

放水冲刷前先将坡面升至30°,然后在接近溢流槽位置进行流量校验,3次校验误差均<5%方可达到试验要求。溢流槽出水口宽度为10 cm,出水口处与坡面预留细沟对接。试验开始后,蠕动泵将水注入溢流槽,流经槽口纱布,水流平稳。试验每次冲刷时间为2.5 min,设置距坡顶0.5,1.5,2.5,3.5 m处4个坡面位置点为测量点。每次冲刷结束后采用佳能相机采集细沟图像信息,合成DEM,将DEM导入Arc Map 10.3,利用其堆栈剖面工具分析细沟横断面宽度、深度、细沟横断面轮廓等参数,并通过Cloud Compare软件进行分析,辅助细沟横断面轮廓绘制,将细沟横断面轮廓数据导入Auto CAD 2014软件中,利用面积工具获取其面积信息;临空面数据获取方式为人工测量。本文表中数据为3次重复数据平均值,横断面形态特征图选取第1次重复横断面轮廓数据绘制。

1.6 指标计算

$$\text{细沟横断面宽深比计算公式: } \beta = \frac{b}{h}$$

式中: β 为细沟横断面宽深比; b 为细沟横断面宽度(cm); h 为细沟横断面深度(cm)。

$$\text{细沟横断面形态指标计算公式: } \eta = \frac{A}{S}$$

式中: η 为细沟横断面形态指标; A 为细沟横断面面积(cm^2); S 为与细沟横断面等宽等深矩形面积(cm^2)。

1.7 数据处理

本试验DEM分析主要通过Arc Map 10.3、Cloud Compare软件完成,横断面面积计算通过Auto CAD 2014软件完成,图表制作通过Microsoft Excel 2016软件完成,方差分析通过SPSS 18.0软件完成。

2 结果与分析

2.1 细沟横断面形态特征随冲刷时间变化

12 L/min流量条件下各砾石含量坡面细沟形态发育最为成熟,本节以该流量条件下的细沟断面形态为例,取每个坡面4个测量点横断面参数均值,分析细沟横断面形态随时间变化规律。从表1可以看出,随着冲刷时间增加,细沟横断面宽度、深度均呈增长趋势。横断面宽度增长缓慢,冲刷结束后横断面宽度为11.37~15.14 cm,仅比初始宽度增加1.37~5.14 cm。但横断面深度增加迅速,冲刷结束后横断面深度为16.51~18.37 cm,比初始深度增加11.51~13.37 cm。横断面深度增加速度大于宽度增加速度,使得其宽深比较小,为0.60~1.10,且宽深比随时间增加呈减小趋势。本研究结果与马小玲等^[9]对杨凌壤土研究结果(横断

面宽深比为3.006~4.884)以及沈海鸥等^[12]对黄绵土研究结果(横断面宽深比为1.93~2.35)存在较大差距。分析原因:一方面为本试验坡度30°,坡度陡,水流重力势能强,细沟内股流流速大,水流来不及分散,路径比较单一,接近直线水流,水流下切侵蚀能力强,侧蚀能力弱^[13-14];另一方面,本试验用土为花岗岩母质风化产生的崩岗崩积土,属于典型土石混合物,而前者试验对象为单一性质土壤,土壤性质不同可能导致侵蚀过程中细沟形态发育存在差异。

由表1还可看出,细沟横断面深度增加速度随冲刷时间的增加呈减小趋势。0~2.5 min冲刷,4个坡面细沟横断面深度分别增加7.45,5.08,6.23,5.78 cm;而7.5~10 min冲刷,4个坡面细沟横断面深度分别增加1.39,2.00,1.46,1.62 cm。这是因为冲刷前期,细沟表面松散物质较多,易被侵蚀,细沟深度增加迅速。随冲刷进行,细沟表面土壤粗化,侵蚀能耗增加。冲刷时间增加,细沟发育成熟,沟道狭窄曲折,对水流阻滞作用增强,水流能量减弱,侵蚀减弱。

表1 细沟横断面形态特征参数随冲刷时间变化

砾石 含量/%	冲刷 时间/min	横断 面宽/cm	横断 面深/cm	横断面宽 深比 β	横断面 形态指标 η
0	2.5	10.35a	12.45b	0.83a	0.66a
	5	10.37a	14.16ab	0.73a	0.65a
	7.5	10.51a	16.42a	0.64a	0.62a
	10	10.60a	17.81a	0.60a	0.56ab
10	2.5	10.35a	10.08a	1.03a	0.59a
	5	11.55a	13.46a	0.86a	0.52b
	7.5	11.60a	14.51a	0.80a	0.49b
	10	11.96a	16.51a	0.72a	0.48b
30	2.5	11.49a	11.23a	1.02a	0.57a
	5	11.57a	13.43a	0.86b	0.49b
	7.5	11.65a	16.27a	0.72b	0.50b
	10	11.87a	17.73a	0.67b	0.49b
50	2.5	11.90a	10.78b	1.10a	0.62a
	5	12.10a	13.80ab	0.88b	0.54b
	7.5	13.61a	16.75ab	0.81b	0.46c
	10	15.14a	18.37a	0.82b	0.44c

注:表中同一砾石含量条件下,同列不同小写字母表示不同冲刷时间细沟横断面形态特征参数之间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

随冲刷进行,细沟横断面形态不断变化。已有学者^[8-10]通过横断面形态指标 η ,即细沟横断面面积除以与其等宽等深矩形面积,评价细沟形态变化特征。选取与野外崩积体砾石含量相近(30%砾石含量)的坡面细沟横断面分析。从图2可以看出,随冲刷时间的增加,细沟横断面形态更接近于“V”形,细沟向窄而深发展;细沟横断面形态指标 η 变化范围为0.44~0.65,随冲刷时间的增加,细沟横断面形态指标 η 呈减小趋

势。这与王健等^[8]对黄土的研究结果相似。

冲刷过程中,细沟边壁出现向内凹陷的形态形成临空面(图 2)。临空面主要发育位置为细沟边壁底部,大多为单侧发育。前 5 min 冲刷过程中没有出现临空面;冲刷 7.5 min 后,细沟边壁临空面开始发育;冲刷 10 min 后,临空面发育最成熟,最大凹陷长度可

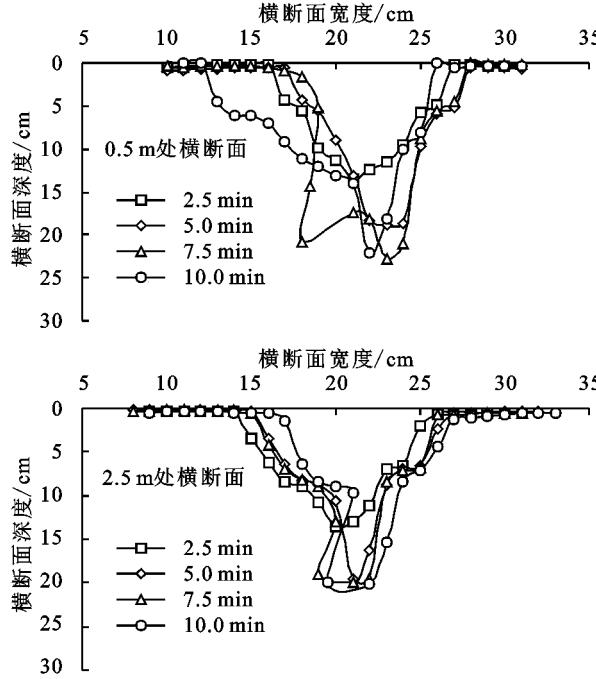


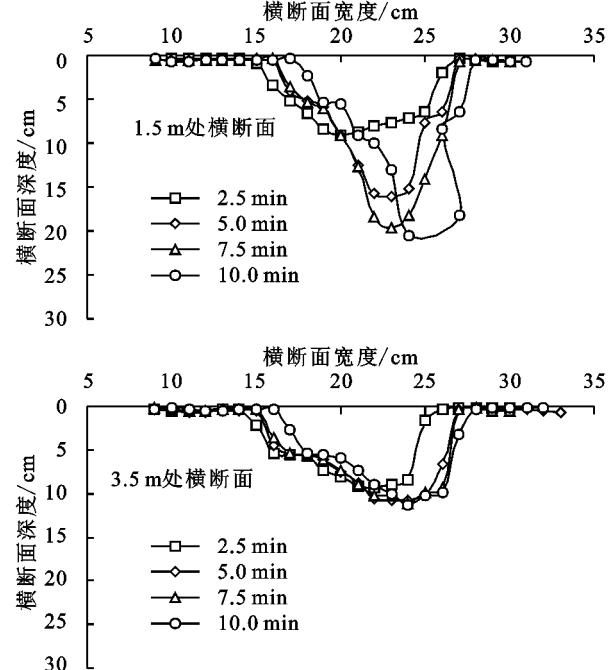
图 2 30% 砾石含量坡面细沟横断面形态特征随冲刷时间变化

2.2 细沟横断面形态特征随坡长的变化

随坡长增加,细沟横断面形态出现明显变化。本节以细沟发育最为成熟的 12 L/min 流量条件下细沟横断面为例,选取每个坡面冲刷 10 min 后不同坡位点细沟横断面形态参数,分析细沟横断面形态随坡长变化。从表 2 可以看出,坡面位置 0.5 m 处不同砾石含量坡面细沟横断面宽度和深度均为最大值,随坡位点下移,宽度和深度均呈减小趋势。细沟横断面宽深比随坡位点下移没有明显变化规律,但在坡面位置 3.5 m 处,宽深比最大。说明坡面上部细沟侵蚀量较大,坡面下部细沟侵蚀量较小,分析原因:本试验为集中水流冲刷试验,坡上水流含沙量少,分离能力强,细沟侵蚀主要以分离为主,导致坡面上部细沟侵蚀量较大;随坡位点下移,水流含沙量增大,水流挟沙能力增强,分离能力减弱,导致坡面下部细沟侵蚀较弱。这与吴永红等^[15]对黄土坡面细沟研究结果一致。

结合图 3 和表 2 可以看出,横断面形态指标随坡位点下移均出现波动性变化,细沟横断面形态指标 η 值先增大后减小,然后再增大。说明不同砾石含量坡面细沟侵蚀随坡长增加均出现一定的波动性。分析原因:细沟侵蚀过程中,当水流中含沙量增大、水流动能减小时,在细沟某一位置会出现弱侵蚀带;随坡长增加,水流恢复到一定侵蚀能力后,细沟侵蚀又会增强,使得水

达 2.63 cm。分析原因:试验前期,细沟较浅,细沟侧蚀表现为细沟宽度拓宽。随冲刷试验进行,细沟深度增加,水流在细沟深处侧蚀,掏刷沟壁,导致临空面发生;随细沟发育成熟,细沟曲折度增加,水流侧蚀能力增强,临空面发育成熟。这与郝好鑫等^[11]对湖北地区红壤细沟横断面研究中临空面发育类似。



流侵蚀能力随坡面位置下移出现强弱交替现象^[15-16]。

表 2 细沟横断面形态特征参数随坡长变化

砾石 含量/%	坡面 位置点/m	横断		横断面宽 深比 β	横断面 形态指标 η
		面宽/cm	面深/cm		
0	0.5	12.47a	24.47a	0.51b	0.47b
	1.5	10.88a	20.46ab	0.53ab	0.59a
	2.5	11.30a	14.06b	0.80ab	0.58a
	3.5	10.83a	12.23b	0.89a	0.59a
	5.0	15.00a	18.57a	0.81a	0.54a
10	0.5	10.43a	18.80a	0.55a	0.56a
	1.5	10.53a	16.33a	0.64a	0.28b
	2.5	10.42a	12.33a	0.85a	0.54a
	3.5	14.57a	22.70a	0.64ab	0.43b
	5.0	11.53a	19.20ab	0.60ab	0.49b
30	0.5	10.53a	18.83ab	0.56ab	0.40b
	1.5	10.86a	10.20b	1.06a	0.62a
	2.5	19.23a	23.93a	0.80a	0.40b
	3.5	14.97a	17.77ab	0.84a	0.49a
	5.0	15.90a	19.30bc	0.82a	0.41b
50	0.5	15.90a	12.46c	0.84a	0.47a
	1.5	10.46a	12.46c	0.84a	0.47a
	2.5	15.90a	19.30bc	0.82a	0.41b

由图 3 还可看出,不同坡位点均可发育临空面,说明坡面位置对临空面发育影响不大。结合图 2 临空面发育受冲刷时间的影响结果,两者都是横断面深度 10~15 cm 处开始出现临空面。可以确定临空面发育主要受细沟深度影响,且细沟深度达到 10~15 cm 为临空面发育临界深度。

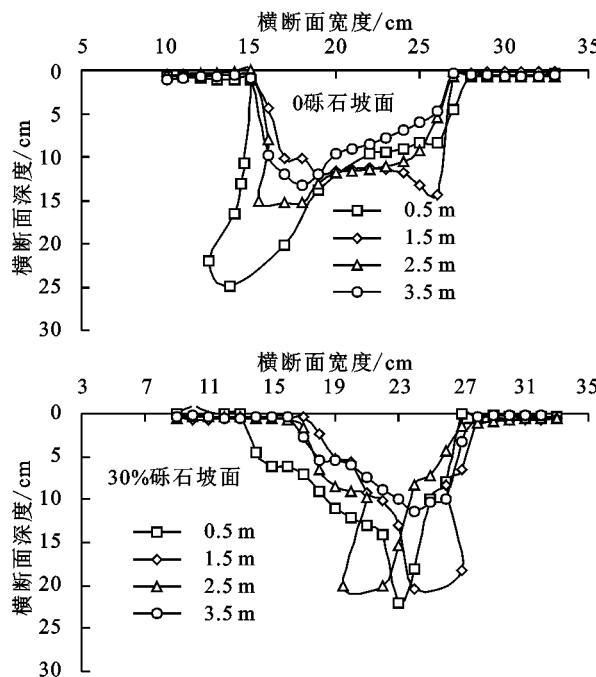


图3 细沟横断面形态特征随坡长变化

2.3 砾石含量对细沟横断面形态特征影响

选取冲刷 10 min 后 4 个砾石含量坡面细沟横断面形态参数分析,各参数取每条细沟 4 个坡位点平均值。从表 3 可以看出,在 2, 4, 8 L/min 冲刷流量下,不同砾石含量坡面细沟横断面宽度无显著差异。但在 12 L/min 流量条件下,细沟横断面宽度随砾石含量的增加出现增大趋势,且 30% 砾石含量坡面细沟和 50% 砾石含量坡面细沟横断面宽度较大。

表 3 细沟横断面形态特征参数随砾石含量变化

冲刷流量/ (L·min ⁻¹)	砾石 含量/%	横断 面宽/cm	横断 面深/cm	横断面宽 深比 β
2	0	10.65a	9.68a	1.10a
	10	10.78a	9.64a	1.12a
	30	10.93a	10.51a	1.04a
	50	10.33a	11.98a	0.86a
4	0	10.58a	12.43a	0.85a
	10	11.46a	12.39a	0.92a
	30	11.51a	12.85a	0.90a
	50	10.44a	12.77a	0.82a
8	0	11.26a	16.58a	0.68a
	10	10.38a	14.45a	0.72a
	30	11.34a	16.80a	0.68a
	50	10.59a	16.43a	0.64a
12	0	11.36a	17.81a	0.64a
	10	11.60a	16.51a	0.70a
	30	11.88a	17.73a	0.67a
	50	15.14a	18.37a	0.82a

从图 4 可以看出,12 L/min 流量条件下 0 砾石含量和 10% 砾石含量坡面细沟沟壁只有轻微侧蚀现象,而 30% 和 50% 砾石含量坡面细沟沟壁出现坍塌现象,以 50% 砾石含量坡面最为严重,使得高砾石含量坡面细沟宽度较大。

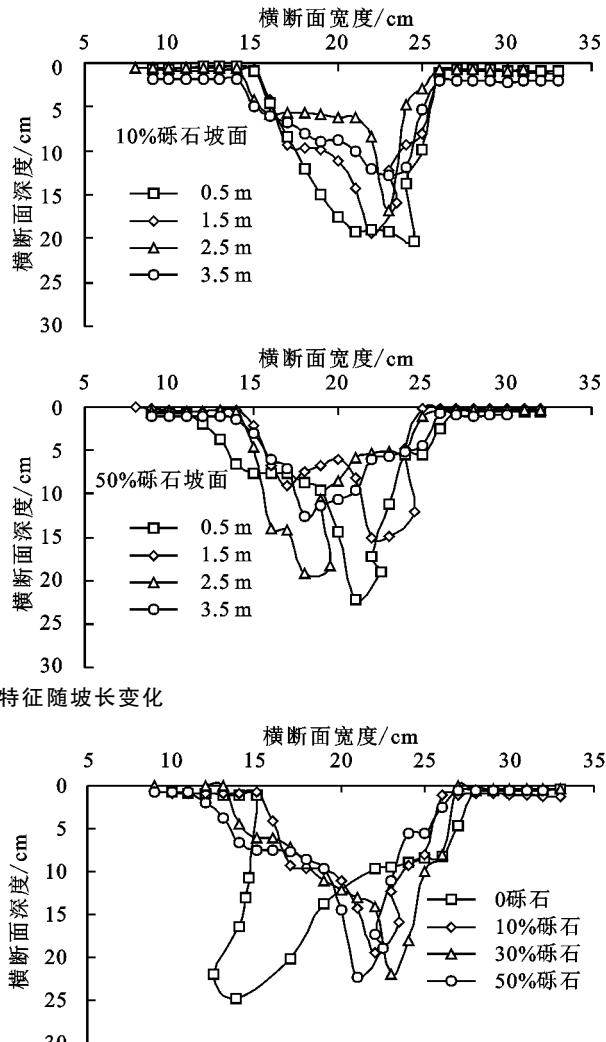


图4 12 L/min 流量下不同砾石含量坡面 0.5 m 点细沟横断面

由表 3 还可看出,不同砾石含量坡面细沟横断面深度差异不显著。随砾石含量增加,2, 12 L/min 流量条件下细沟横断面深度出现先减小后增大的趋势;4, 8 L/min 流量条件下横断面深度出现波动增大趋势;但不同流量条件下,10% 砾石含量坡面细沟横断面深度均最小。由此可以看出,土壤中砾石的存在会对坡面细沟侵蚀产生影响。这与蒋芳市等^[13]对崩积体坡面侵蚀特征研究结果相似。但是,也有其他学者存在不同观点,王小燕等^[17]认为,随砾石含量增高,坡面侵蚀减弱;而王雪松等^[18]则认为,随砾石含量升高,细沟侵蚀增强。主要是因为砾石本身存在一定抗侵蚀性,小流量和小坡度条件下,重力势能弱,水流能量较小,砾石对水流主要起阻碍作用,所以王小燕等^[17]在对斜坡(试验坡度为 15°)侵蚀研究过程中出现随砾石含量增加,坡面侵蚀减弱的现象。随流量和坡度增大,水流冲刷作用增强,逐渐掩盖了砾石对水流阻碍作用,特别是高砾石含量土壤,砾石增加土壤大孔隙,使得土壤中颗粒之间黏结能力下降,降低土壤稳定性,土壤更易被侵蚀,所以本试验对极陡坡(试验坡度为 30°)细沟侵蚀研究过程中,出现细沟侵蚀

随砾石含量增加出现先减弱后增强或波动增加的现象。大坡度和大流量条件下,水流冲刷能力进一步增强,再加上砾石含量增大导致土壤质量增加,土壤自身重力惯性增加,坡面土壤更易被侵蚀,所以王雪松等^[18]对极陡坡(试验坡度为 33°)细沟侵蚀研究过程中出现随砾石含量增加,细沟侵蚀增强的现象^[13]。

通过表 3 还可看出,在 2,4,8 L/min 冲刷流量条件下,10% 砾石含量坡面细沟横断面宽深比最大,且在此基础上随砾石含量增大,宽深比呈减小趋势,这是因为 10% 砾石含量土壤稳定性最高,下切侵蚀较弱。但在 12 L/min 流量条件下 50% 砾石含量坡面细沟横断面宽深比最大。这是高砾石含量土壤稳定性较低,在大流量条件下易坍塌造成的。蒋芳市等^[19]对崩积体细沟研究过程中,同样出现坍塌现象。

为了进一步探究砾石含量对细沟横断面形态特征影响,对不同砾石含量下细沟横断面形态指标 η 进行分析。由表 4 可知,2 L/min 流量条件下,10% 砾石坡面细沟横断面形态指标 η 值最大,为 0.56~0.75。这是因为 10% 砾石含量坡面土壤抗侵蚀能力最强,2 L/min 流量较小,细沟侵蚀最弱,细沟较浅,细沟横断面轮廓接近矩形。4,8,12 L/min 流量条件下,10% 砾石含量坡面细沟横断面 η 值变化范围最大,分别为 0.478~0.634,0.431~0.706,0.277~0.564,说明 10% 砾石含量条件下细沟横断面之间差异性最大。是因为一方面为试验中 10% 砾石含量坡面细沟侵蚀较弱,细沟部分横断面接近矩形;另一方面,侵蚀过程中水流分离,输沙能量消耗较低,细沟某处水流能量聚集,下切侵蚀加剧,使得部分横断面较深^[15-16],细沟侵蚀强弱交替明显。

表 4 细沟横断面形态指标 η 随砾石含量变化

砾石 含量/%	坡面 位置/m	冲刷流量			
		2 L/min	4 L/min	8 L/min	12 L/min
0	0.5	0.57a	0.65a	0.57a	0.47b
	1.5	0.51a	0.53b	0.51a	0.59a
	2.5	0.58a	0.55b	0.60a	0.58a
	3.5	0.59a	0.67a	0.59a	0.59a
	平均	0.56	0.60	0.57	0.56
	0.5	0.66a	0.48a	0.52b	0.54a
10	1.5	0.75a	0.61a	0.51b	0.56a
	2.5	0.56ab	0.45a	0.71a	0.28b
	3.5	0.67a	0.63a	0.43b	0.54a
	平均	0.66	0.54	0.54	0.48
	0.5	0.60a	0.55a	0.48a	0.43b
	1.5	0.44b	0.49a	0.54a	0.49b
30	2.5	0.41b	0.57a	0.58a	0.40b
	3.5	0.62a	0.54a	0.67a	0.62a
	平均	0.52	0.54	0.57	0.48
	0.5	0.61a	0.57a	0.53ab	0.40b
	1.5	0.57a	0.53a	0.50ab	0.49a
	2.5	0.56a	0.50a	0.40b	0.41b
50	3.5	0.52a	0.55a	0.55a	0.47a
	平均	0.56	0.53	0.49	0.44

通过图 4 可以发现,0 砾石含量条件下,临空面凹陷

长度较大,为 0.50~2.63 cm。随砾石含量增大,临空面凹陷长度减小,50% 砾石含量条件下,临空面凹陷长度为 0.50~1.51 cm。这是因为低砾石含量土壤黏性大,沟壁底部被掏空后,临空面上方土壤不易跌落;随砾石含量增加,土壤孔隙增加,土壤黏性降低^[19],当沟壁底部被掏刷时,高砾石含量坡面细沟临空面上方土壤容易跌落,甚至出现沟壁坍塌现象,掩盖了临空面。

3 结论

(1) 不同砾石含量坡面细沟随冲刷时间增加,横断面形态变化呈现相同规律:横断面深度增加速度大于宽度增加速度,横断面形态随冲刷进行向“V”形发展,细沟侵蚀以下切侵蚀为主。

(2) 不同砾石含量坡面细沟随坡长变化,横断面形态变化出现相同规律,即坡顶细沟横断面为窄深型,侵蚀强;坡底为宽浅型,侵蚀弱;此外细沟横断面形态指标 η 随坡长变化出现波动变化。

(3) 随砾石含量增加,横断面深度出现先减小后增大或波动增大趋势;10% 砾石含量坡面细沟横断面深度最小,侵蚀最弱;10% 砾石含量坡面细沟横断面形态指标 η 变化范围最大;临空面在深度 10~15 cm 处开始发育,低砾石含量土壤更有利于临空面发育。

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] Lin J S, Huang Y H, Wang M K, et al. Assessing the sources of sediment transported in gully systems using a fingerprinting approach: An example from South-east China[J]. Catena, 2015, 129: 9-17.
- [3] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial depositional erosion in southeast China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(5): 1741-1752.
- [4] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.坡面水流分离崩塌崩积体土壤的动力学特征[J].水土保持学报,2013,27(1):86-89.
- [5] Liu X L, Tang C, Zhang D L. Simulated runoff processes on colluvial deposits of Liantanggang Benggang and their water distributions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 179-185.
- [6] 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: 46-58.
- [7] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊.细沟发育与形态特征研究进展[J].生态学报,2018,38(19):35-42.
- [8] 王健,李鹤,孟秦倩,等.黄土坡面细沟横断面形态及其水流动力学与挟沙特性[J].水土保持学报,2015,29(3): 32-37.

(下转第 132 页)

2412-2425.

- [6] Anderson C J, Lockaby B G. Research gaps related to forest management and stream sediment in the United States[J]. Environmental Management, 2011, 47(2): 303-313.
- [7] Yoshinobu S, Tomo'omi K, Atsushi K, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers: The effects of rainfall conditions and leaf shapes[J]. Hydrological Processes, 2016, 18(16): 3007-3018.
- [8] Nagashima K, Yoshida S, Hosaka T. Patterns and factors in early-stage vegetation recovery at abandoned plantation clearcut sites in Oita, Japan: Possible indicators for evaluating vegetation status[J]. Journal of Forest Research, 2009, 14(3): 135-146.
- [9] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区3种林地枯落物和土壤水源涵养功[J].水土保持学报,2018,32(2): 357-363.
- [10] 陈继东,周长亮,李惠丽.接坝地区9种典型林分类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持研究,2017, 24(6): 216-221.
- [11] 沈振乾,秦天玲,聂汉江,等.森林枯落物对流域水文过程调节机理研究进展[J].世界林业研究,2019(1):36-41.
- [12] 常玉,余新晓,陈丽华,等.模拟降雨条件下林下枯落物层减流减沙效应[J].北京林业大学学报,2014,36(3): 69-74.
- [13] 孙佳美,李瀚之,赵阳,等.构树林下枯落物对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2015,29(3): 102-105.
- [14] 齐记,史宇,余新晓,等.北京山区主要树种枯落物水文功能特征研究[J].水土保持研究,2011,18(3):73-77.
- [15] 张峰,彭祚登,安永兴,等.北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J].林业科学,2010,46(10):6-14.

- [16] 孙继松,雷蕾,于波,等.近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J].气象学报,2015,73(4):609-623.
- [17] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等.不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J].土壤学报,2013,50(2):281-288.
- [18] 米宏星,陈晓燕,赵宇,等.黄土坡面细沟径流流速的试验研究[J].水土保持学报,2015,29(1):66-69.
- [19] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11): 110-117.
- [20] 张祯尧,孙佳美,余新晓,等.栓皮栎林下枯落物减流减沙效应研究[J].水土保持学报,2016,30(3):55-58.
- [21] 庞梦丽,朱辰光,翟博超,等.河北省太行山区3种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报,2017, 37(1):51-56.
- [22] 陈奇伯.森林枯落物阻滞地表径流和影响砂粒水力起动条件研究[J].人民黄河, 1996(5):37-39, 62.
- [23] 孙佳美,余新晓,李瀚之,等.模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程及特征研究[J].水利学报,2017, 48(3):341-350.
- [24] 郑粉莉.坡面降雨侵蚀和径流侵蚀研究[J].水土保持通报,1998,18(6):17-21.
- [25] 谢申琦,高丽倩,赵允格,等.模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应[J].应用生态学报,2019, 30(2):391-397.
- [26] 薛孟君,马岚,张栋,等.雨强对华北土石山区坡面侵蚀及其颗粒富集过程的影响[J].水土保持学报,2017, 31(4):11-17.
- [27] 何玉广,信忠保,余新晓,等.模拟降雨条件下侧柏林地枯落物对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报, 2017, 31(3):27-32.
- [28] 田培,潘成忠,许新宜,等.坡面流速及侵蚀产沙空间变异性试验[J].水科学进展,2015,26(2):178-186.

(上接第86页)

- [9] 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):217-224.
- [10] 李响,邓青春,张斌,等.元谋干热河谷微流域细沟形态特征及控制因素[J].中国水土保持科学,2015,13(5): 24-30.
- [11] 郝好鑫,郭忠录,李朝霞,等.红壤坡面细沟横断面形态及水动力学特性研究[J].长江流域资源与环境,2018, 27(2):363-370.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] 陈俊杰,孙莉英,刘俊体,等.坡度对坡面细沟侵蚀的影响:基于三维激光扫描技术[J].中国水土保持科学, 2013,11(3):1-5.
- [15] 吴永红,王愿昌,刘斌,等.黄土坡面的土壤侵蚀波动性[J].中国水土保持科学,2005,3(2):28-31.
- [16] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J].农业工程学报,2011,27(3):73-78.
- [17] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J].水科学进展,2014,25(2):189-195.
- [18] 王雪松,谢永生,陈曦,等.模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究[J].泥沙研究,2015(4):74-80.
- [19] 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.