

土石混合崩积体坡面细沟径流流速试验研究

林敬兰

(福建省水土保持试验站,福州 350003)

摘要: 为了探究土石混合崩积体坡面细沟流速的变化特征,设置不同的流量(2,4,8,12 L/min)和砾石质量含量(0,10%,30%,50%),采用径流冲刷试验,分析崩积体坡面细沟径流流速的变化过程,研究流速对流量和砾石含量的响应。结果表明:流速在初始阶段(前 5 min)减小幅度较大,随着冲刷进行,流速变化趋于平缓,二者呈幂函数关系,纯土坡面的流速衰减趋势大于含砾石的坡面;流速随着流量的增加呈幂函数增加,而随着砾石含量的增加呈对数函数递减;流量与砾石含量对流速的影响均达到显著水平,且流量的作用大于砾石含量,可用流量和砾石含量的二元对数表达流速(NSE=0.78)。研究结果深化了对崩积体坡面细沟侵蚀水动力过程的认识。

关键词: 崩岗;土壤侵蚀;细沟侵蚀;砾石;流速

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0119-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.017

Experimental Study on Rill Runoff Velocity on the Slope of Soil-rock Mixed Colluvium

LIN Jinglan

(Fujian Soil and Water Conservation Experimental Station, Fuzhou 350003)

Abstract: To explore the change characteristics of rill flow velocity on the soil-rock mixed colluvial deposit, the scouring experiment was carried out. Four flow rates (2, 4, 8, 12 L/min) and four gravel mass contents (0, 10%, 30% and 50%) were set up. The change characteristics of rill flow velocity on the soil-rock mixed colluvial deposit were analyzed, and the response of flow velocity to flow rate and gravel content was studied. The results showed that the velocity decreases exponentially with scouring time, and the velocity attenuation trend of pure soil is larger than that of gravel-containing slope. The velocity of flow increased as a power function with the increase of flow velocity and decreased as a logarithmic function with the increase of gravel content. The effect of flow velocity and gravel content on flow rate was significant, and the effect of flow rate was greater than that of gravel content. Flow rate can be expressed by binary logarithm of flow rate and gravel content (NSE=0.78). The research results deepen the understanding of hydrodynamic process of rill erosion on colluvial deposit slope.

Keywords: collapse mound; soil erosion; rill erosion; gravel; velocity

崩岗是我国红壤区典型且危害严重的水土流失类型^[1],其侵蚀过程主要包括崩壁的崩塌及崩积体的再侵蚀^[2]。其中,崩积体主要为崩壁崩塌时在其下方堆积形成的物质^[2],具有粗颗粒含量高、土质疏松、坡度大的特点^[3],极易发生侵蚀,在坡面产生大量的细沟^[4]。据调查^[5],崩积体侵蚀产生的泥沙量可占崩岗泥沙量的 50%以上,而崩积体的 70%侵蚀量是由细沟侵蚀引起的^[4]。因此,研究崩积体坡面的细沟侵蚀过程对于揭示崩岗发生发展过程及泥沙的迁移规律

具有重要的意义。砾石(颗粒直径 ≥ 2 mm)是土壤的重要组成部分^[6],其存在影响土壤的结构、孔隙及入渗等特性^[7],进而对土壤侵蚀产生影响^[8-9]。崩积体属于典型的土石混合物,砾石质量含量最高可达 70%^[4]。已有学者对土石混合崩积体坡面细沟侵蚀进行研究,主要包括崩积体坡面入渗^[5]、径流产沙^[4,10]及细沟发生发展^[2-4]等。然而,砾石对崩积体侵蚀作用复杂,特别是其对坡面侵蚀的水动力机制还未明确,限制了对崩积体坡面侵蚀过程的进一步认识。

收稿日期:2020-05-11

资助项目:国家科技支撑计划项目“福建省红壤区生态修复和持续经营急需技术集成与示范”(2014BAD15B00)

第一作者:林敬兰(1970—),女,福建浦城人,高级农艺师,博士,主要从事水土保持科研和技术推广研究。E-mail:14705232@qq.com

流速是计算其他水动力学参数的最基本参数^[11],其大小直接影响细沟的发育及侵蚀强度^[12]。因此,阐明流速的变化特征对于认识细沟的发生发展过程及水动力机制具有重要的作用,其研究一直是细沟侵蚀研究关注的基础问题。流速与降雨、流量、地形以及地表特征密切相关。已有研究^[13-15]表明,流速随雨强、流量和坡度的增大而增大,并建立了相关方程;随着侵蚀过程的变化,地表特征(细沟形态、地表物质组成等)发生变化^[16-17],流速呈现波动性增加或下降过程^[13-14,17]。同时,土壤性质也影响坡面流速。有研究^[14]表明,降雨条件下工程堆积体坡面平均流速表现为壤土>黏土>砂土;对不同土石混合物研究^[10,18]发现,由于砾石的阻滞作用,含砾石工程堆积体及紫色土坡面流速小于纯土,而对壤土研究^[7]发现,砾石表面光滑,含砾石土壤的坡面流速大于纯土坡面。以上说明不同试验对象的流速特征有很大的不同,即使是同为土石混合物的工程堆积物^[14]、紫色土^[18]、壤土^[7],由于发育地质及环境条件不同引起的物质组成及颗粒特征等差异,砾石对流速的作用也表现出不同的特征,土壤性质对流速的作用机制尚未清楚。崩积体由风化壳崩塌形成,其为粗粒花岗岩在热带、亚热带湿热条件下风化发育的产物,故崩积体的砾石特征在粒径、级配及形态方面表现出自身的特征,其对坡面侵蚀动力有何影响,还有待进一步探究。因此,本研究以崩岗土石混合崩积物为对象,分析细沟流速随冲刷过程的变化,探讨砾石含量及流量对流速的影响机制,以期为崩岗崩积体坡面侵蚀过程动力机制的深入认识提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

试验土壤采集于福建省安溪县龙门镇洋坑村(118°05'E,24°57'N),属亚热带季风气候区,雨水充沛,年均降水量为1 800 mm,年均气温达19℃。安溪县是福建省崩岗分布最广泛的县份,共有崩岗12 828处,约占福建省崩岗总数的50%^[2]。而龙门镇崩岗占安溪县崩岗总量的10%,分布密度达到7.86处/km²,为安溪县崩岗侵蚀最为严重的乡镇之一^[3]。

1.2 土样采集与制备

于2017年12月采样,采集的崩积体为粗颗粒花岗岩风化壳崩塌形成。将采集回来的土样去除枯枝落叶及根系后进行风干。风干后,分别过10,2 mm的筛子,获得砾石(2~10 mm)及细土(<2 mm),并将二者分开储存。由于土样采自花岗岩风化壳崩塌形成的物质。故颗粒较完整地保留了风化壳的特征,砾石表面多棱角,磨圆度低。试验土样的pH为

5.17,有机质含量为1.71 g/kg。<2 mm颗粒中含砂粒(2~0.05 mm)为62%,粉粒(0.05~0.002 mm)为33%,黏粒(<0.002 mm)为5%。

1.3 试验装置

本试验装置与蒋芳市等^[2]和张海东等^[3]的装置一致,包括冲刷土槽和放水装置。冲刷土槽由镀锌板制作,长、宽、高分别为400 cm×40 cm×50 cm,在土槽底部设置出水孔;槽的顶部设置1个溢流槽,长、宽、高分别为40 cm×40 cm×60 cm,并在离溢流槽顶端的20 cm处嵌入1个镀锌隔板,宽度和高度分别为40 cm和30 cm,以让隔板下方留有30 cm高的空间,使隔开的2个小水槽的水自由流通,以达到稳流效果(图1)。放水装置为蠕动泵(WT600-4F),流量为100~11 000 mL/min,采用双蠕动泵控制流量。

1.4 试验设计

本次试验坡度30°,为崩岗崩积体的平均坡度。流量根据龙门镇降雨特征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。崩积体砾石质量含量在10%~70%,故设置4个砾石质量含量,分别为0,10%,30%,50%。每组试验做3次重复,共进行48组冲刷试验。

1.5 试验过程

室内冲刷试验于2018年8—9月进行,地点为福建农林大学金山水土保持科教园人工模拟降雨大厅。为清晰地研究细沟发展过程,在坡面上预留细沟。即在冲刷试验前,用1条矩形镀锌管(长400 cm,宽10 cm,深5 cm)镶嵌在坡面的中间位置,获得1条预留细沟(长400 cm,宽10 cm,深5 cm)(图1)。试验前,按照设计的质量比例将细土(<2 mm)及砾石(2~10 mm)混合。填充混合物前,在土槽底部填充细沙以便土槽透水,深度为20 cm,后将混合好的混合物填入土槽。混合物填充的容重控制在1.30~1.40 g/cm³,与野外崩积体的容重相似。混合物填充深度为30 cm,每5 cm填1层,按6次填充完毕。先填5层,后在坡面的中间位置固定矩形镀锌管(宽10 cm,高5 cm),最后填充第6层土。填土完成后,用纱布覆盖于坡面,并用喷壶淋水直到饱和。淋水后,静置18 h,以保证每组试验的混合物含水量均一。冲刷前,取出镀锌管,坡面形成预留细沟(图1)。

放水前,先将土槽升至30°,后进行蠕动泵流量的校正,3次校验误差均小于5%后进行冲刷试验。冲刷过程中,进行水温、水深及流速等的测定。通过温度计测水温,以获得相应的黏滞系数;在坡面上设置4个测量点(分别离坡顶0.5,1.5,2.5,3.5 m处)用于测定水深,用钢尺(0.1 mm精度)测量;流速(V)测定方法为高锰酸钾染色剂法,多次测量取平均值获得

平均流速,并根据水流流态的修正系数[层流(雷诺数 < 500)取 0.67,过渡流(雷诺数 500~2 000)取 0.7,紊流取 0.8(雷诺数 ≥ 2 000)]^[19]进行修正。冲刷时长共 10 min,每 1.0 min 测量 1 次,获得 10 组数据。

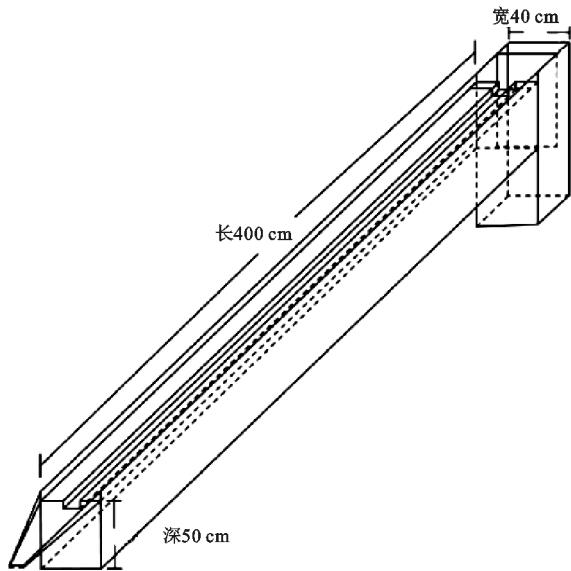


图 1 冲刷土槽装置

1.6 模型有效性系数计算

方程模拟值与实际测量值之间的拟合效果通过模型有效性系数(NSE)^[20]来检验,公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_i - Q_{ci})^2}{\sum(Q_i - Q_m)^2} \quad (1)$$

式中: NSE 为模型有效系数; Q_i 为第 i 个试样实测

值; Q_{ci} 为第 i 个试样模拟值; Q_m 为试样实测平均值。其中 $NSE \geq 0.70$ 表明模型较好; $0.40 < NSE < 0.70$ 表明模型一般; $NSE < 0.40$ 表明模型较差^[21]。

1.7 数据处理与分析

数据处理采用 Excel 2010 完成,方差分析及方程拟合采用 SPSS 18.0 软件完成,采用 Origin 9.0 软件完成绘图。

2 结果与分析

2.1 径流流速随冲刷过程的变化

由图 2 可知,随冲刷时间增加,径流流速减小,且在冲刷的初始阶段(前 5 min),流速减小幅度较大,但随着冲刷进行,流速变化较小,其值趋于平稳。这是因为冲刷初始阶段的细沟床面及沟壁平整,细沟形态产生的阻力较小,所以水流所受阻力也较小^[3];同时,冲刷初始阶段的径流含沙量较小,坡面径流用于输送泥沙的能量损失较少^[13]。但随着细沟侵蚀进行,细沟不断发育,细沟形态变得愈加复杂,对水流的阻滞作用增大^[16];此外,沟壁坍塌造成水流含沙量迅速增大,水流挟带泥沙消耗的能量增大,流速呈现减小趋势^[17]。细沟发育后期,细沟的横断面及纵断面形态发育趋于稳定^[2],流速趋于平稳。方程拟合发现,各条件下的流速随冲刷时间均呈幂函数递减(表 1),符合上述规律。王健等^[17]对黄土坡面研究也发现,流速随着降雨时间的推移而趋于稳定。

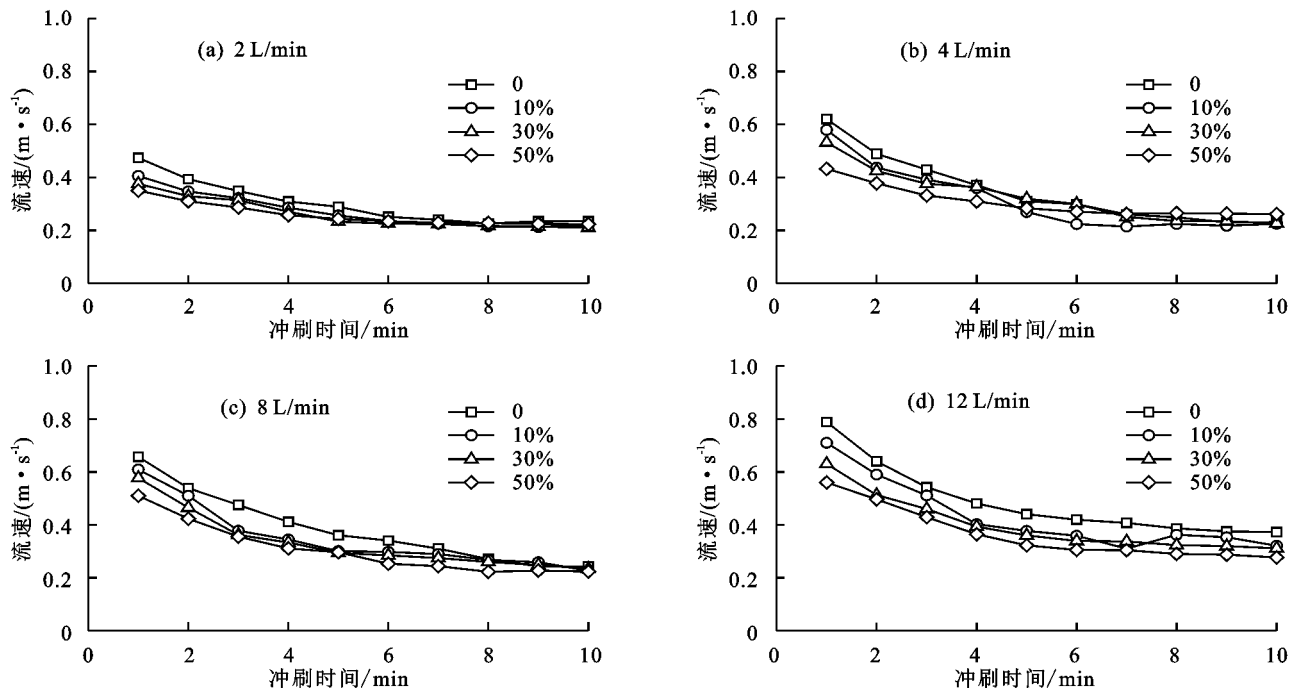


图 2 流速随冲刷时间的变化过程

从图 2 可以看出,纯土的流速衰减速率大于含有砾石的土壤。这是因为纯土无砾石,表面较光滑,加上冲刷过程中无砾石的阻滞作用,流速较大;随着冲刷的进行,细沟形态变成不规则,对流速的阻滞作用增强,造成流速迅速下降。由表 1 可知,各流量条件

下纯土幂方程的指数均高于含砾石土壤说明,纯土的流速衰减速率大于含有砾石的土壤。从图 2 还可看出,在 2 L/min 条件下,冲刷 5 min 后流速趋于稳定,而其他流量条件下,冲刷 7 min 后流速才趋于稳定。这是由于在小流量条件下,径流对土体的冲刷能力较

小,细沟的发育更容易稳定;而随着流量的增加,径流对土体的冲刷作用增强,细沟发育一直处于不平衡状态,需要较长时间才能进入稳定状态。

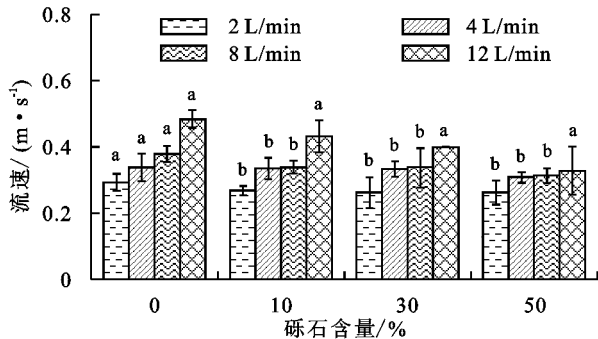
表 1 不同条件下流速随冲刷时间变化的拟合方程

流量/ (L·min ⁻¹)	砾石 含量/%	回归方程	决定 系数 R ²	显著性 水平 P
2	0	$V=0.49T^{-0.34}$	0.97	<0.01
	10	$V=0.42T^{-0.31}$	0.97	<0.01
	30	$V=0.39T^{-0.28}$	0.95	<0.01
	50	$V=0.35T^{-0.21}$	0.98	<0.01
4	0	$V=0.66T^{-0.46}$	0.98	<0.01
	10	$V=0.60T^{-0.45}$	0.95	<0.01
	30	$V=0.56T^{-0.39}$	0.96	<0.01
	50	$V=0.43T^{-0.24}$	0.97	<0.01
8	0	$V=0.72T^{-0.45}$	0.96	<0.01
	10	$V=0.62T^{-0.42}$	0.98	<0.01
	30	$V=0.58T^{-0.39}$	0.99	<0.01
	50	$V=0.53T^{-0.39}$	0.98	<0.01
12	0	$V=0.79T^{-0.35}$	0.99	<0.01
	10	$V=0.71T^{-0.34}$	0.93	<0.01
	30	$V=0.63T^{-0.32}$	0.98	<0.01
	50	$V=0.58T^{-0.34}$	0.97	<0.01

注:V 为流速(m/s);T 为冲刷时间(min)。

2.2 流量对径流平均流速的影响

由图 3 可知,不同砾石含量条件下的平均流速随流量的增大而增大。在纯土坡面,不同流量之间平均流速差异不显著。在所有含砾石的坡面中,仅 12 L/min 流量的平均流速与其他流量的平均流速有显著差异,而在 2,4,8 L/min 流量之间的平均流速的差异不显著。对平均流速与流量进行方程拟合发现,不同砾石含量下二者可用幂函数方程描述(方程决定系数(R²) 在 0.84~0.98)(表 2)。张翔等^[13]与马小玲等^[15]分别对黄土工程堆积体及多沙粗沙区的研究也得出了类似的结论。



注:图柱上方不同小写字母表示不同砾石含量不同流速间差异显著($P<0.05$)。

图 3 不同砾石含量下平均流速随流量变化

2.3 砾石含量对径流平均流速的影响

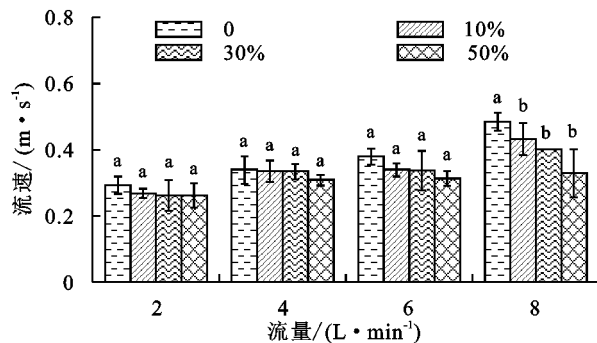
由图 4 可知,不同流量下坡面径流平均流速随砾石含量的增大而减小。在流量 2~8 L/min 时,不同砾石含量之间的细沟平均流速差异不显著;当流量为

12 L/min 时,不含砾石(0%)的细沟平均流速与有砾石之间的平均流速差异显著,但不同砾石含量间的平均流速差异不显著。方程拟合也发现,不同流量条件下平均流速与砾石含量可用对数函数表达,决定系数(R²) 在 0.71~0.99(表 3),说明崩积体含有砾石后,流速会急剧下降,而不同砾石含量的流速差异较小。李建明等^[9]与韩珍等^[18]分别对黄土工程堆积体和紫色土的试验也表明,流速随着砾石含量的增加而减小;但吴冰等^[6]对壤土研究得出相反的结论。这与试验所选择砾石特征有关系。本试验及李建明等^[9]和韩珍等^[18]试验采用的砾石棱角多,颗粒表面粗糙,不仅在搬运过程中对径流有阻滞作用,而且与其存在于细沟床面时也增加了径流弯曲度,进一步阻碍径流流动^[9,18];同时,随着砾石含量的增加,细沟形态发育越明显,对径流消耗作用越强,流速减缓^[2]。而吴冰等^[6]试验采用的砾石采自河床,表面光滑,有利于径流的运动,导致流速加快。以上分析表明,不同砾石形态特征对流速有不同的效应,表现出不同的作用机制,砾石颗粒特征对坡面水力特性的影响有待进一步深入研究。

表 2 不同石含量下细沟平均流速随流量的变化方程

砾石 含量/%	回归方程	决定 系数 R ²	显著性 水平 P
0	$V=0.25q^{0.23}$	0.98	<0.05
10	$V=0.24q^{0.21}$	0.92	<0.05
30	$V=0.24q^{0.18}$	0.91	<0.05
50	$V=0.25q^{0.10}$	0.84	>0.05

注:V 为流速(m/s);q 为流量(L/min)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同砾石含量不同流速间差异显著($P<0.05$)。

图 4 不同流量下平均流速随砾石含量变化

表 3 不同流量下细沟平均流速随砾石含量的变化方程

流量/ (L·min ⁻¹)	回归方程	决定 系数 R ²	显著性 水平 P
2	$V=-0.004\ln C+0.28$	0.99	<0.01
4	$V=-0.005\ln C+0.33$	0.73	>0.05
8	$V=-0.008\ln C+0.35$	0.93	<0.05
12	$V=-0.014\ln C+0.43$	0.71	>0.05

注:V 为流速(m/s);C 为砾石含量(%),当砾石含量为 0 时,C 值取 0.01。

2.4 流量和砾石含量对流速的影响

对不同流量和砾石含量条件下细沟平均流速进行方差分析(表4)表明,流量对平均流速的影响达到极显著水平,砾石含量对平均流速的影响达到显著水平,说明流量的作用大于砾石含量的作用。

表4 流量及砾石含量对流速影响的方差分析

差异源	平方和	自由度	均方差	F	P
流量	0.039	3	0.013	19.73	0
砾石含量	0.010	3	0.003	5.09	0.02
误差	0.006	9	0		
总计	0.066	15			

对细沟平均流速与流量和砾石含量关系可用二元对数方程表示:

$$V = 0.87 \ln q - 0.016 \ln C + 0.76 \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.78, P < 0.05, NSE = 0.78, n = 16)$$

式中: V 为平均流速(m/s); q 为水流流量(L/min); C 为砾石含量(%),当砾石含量为0时, C 取值0.01。

由式(2)可知,拟合方程的决定系数(R^2)为0.78,模型有效系数(NSE)也达到0.78(>0.70),说明方程拟合效果好。

3 结论

(1)冲刷的初始阶段(0~5.0 min),流速减小幅度较大,但随着冲刷时间的推进,流速变化较小,其变化值趋于平稳,冲刷历时与流速的关系可用幂函数表达;纯土坡面的径流流速递减程度大于含砾石的坡面。

(2)细沟径流平均流速随着流量的增大而增大,二者可用幂函数表达;径流平均流速随着砾石含量的增加而减少,二者可用对数函数表达。

(3)流量和砾石含量均对流速的作用达到显著水平以上,且流量的作用大于砾石含量的作用,径流平均流速可用流量和砾石含量的二元对数方程表达。

致谢:本文野外采样及室内冲刷试验得到了福建农林大学资源与环境学院张海东、陈培松、林嘉辉等同志的大力帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 104-106.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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]. Ca-

tena, 2018, 169: 46-58.

[5] Liu X L, Qiu J A, Zhang D L. Characteristics of slope runoff and soil water content in benggang colluvium under simulated rainfall [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18: 39-48.

[6] 吴冰, 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 99-103.

[7] 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.

[8] Rieke-Zapp D, Poesen J, Nearing M A. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(7): 1063-1076.

[9] 李建明, 王文龙, 李宏伟, 等. 黄土区工程堆积体石砾对流速及产沙影响试验研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 64-74.

[10] 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.

[11] 陈丽燕, 雷廷武, 班云云, 等. 土壤冻结对黄土细沟水流速的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 282-289, 191.

[12] 张攀, 姚文艺, 魏鹤举, 等. 黄丘区坡面细沟流速分布特征试验研究[J]. 水利学报, 2017, 48(11): 1334-1340.

[13] 张翔, 高照良, 袁雪红, 等. 工程堆积体坡面细沟流体力学参数特性研究[J]. 泥沙研究, 2016(4): 34-40.

[14] 李建明, 王一峰, 张长伟, 等. 三种土壤质地工程堆积体坡面流速及产沙特征[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(12): 28-35.

[15] 马小玲, 张宽地, 赵珂珂, 等. 多沙粗沙区细沟流水动力学试验研究[J]. 泥沙研究, 2016(5): 14-19.

[16] 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.

[17] 王健, 李鹤, 孟秦倩, 等. 黄土坡面细沟横断面形态及其水动力学与挟沙特性[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 32-37.

[18] 韩珍, 王小燕, 李馨欣. 碎石含量影响下紫色土坡面径流流速变化过程及土壤侵蚀的阶段性[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(10): 102-108.

[19] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(6): 509-515.

[20] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part 1: A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10: 282-290.

[21] Wu B, Wang Z L, She N, et al. Modelling sediment transport capacity of rill flow for loess sediments on steep slopes[J]. Catena, 2016, 147: 453-462.