

坡度和雨强对花岗岩崩岗崩积体细沟侵蚀的影响

蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 赵 淦, 葛宏力

(福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002)

摘 要:崩积体是崩岗的重要组成部分,具有土质疏松、粗颗粒含量高、坡度大、易侵蚀的特征。该研究利用人工模拟降雨试验,对不同雨强(1.00, 1.33, 1.67, 2.00, 2.33 mm/min)和坡度(20°, 25°, 30°, 35°, 40°)下的崩积体细沟发生、发育及形态特征进行分析。研究结果表明:发生细沟的时间随着坡度和雨强的增大而缩短;随着雨强的增大,沟头离坡顶的距离越短,沟宽和沟深增大,但细沟密度差异不明显;随着坡度的增大,垂向作用增加,但横向扩张能力相应地降低,造成坡面侵蚀深度增大,宽深比减小;随着雨强和坡度的增大,侵蚀方式从片蚀为主逐渐转变至细沟侵蚀为主;雨强对细沟侵蚀的影响大于坡度。

关键词:崩岗; 崩积体; 人工模拟降雨; 细沟侵蚀

中图分类号: S157.1; S124.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)01-0001-05

Effects of Different Rainfall Intensities and Slope Gradients on Rill Erosion of Coluvial Deposits in Granite Benggang

JIANG Fang-shi, HUANG Yan-he, LIN Jin-shi, ZHAO Gan, GE Hong-li

(College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Benggang mainly consists of colluvial deposits with high erosivity leading to easy rainfall splash erosion or runoff scouring. This study aimed to analyze the rill erosion characteristics of the colluvial deposits under different simulated rainfall and slope conditions. Rainfall intensity ranged from 1.00 to 2.33 mm/min and slope gradient from 20° to 40°. The results indicated that: the time that the rill erosion happened was shorten as the slope and rainfall intensity increased; when the rainfall intensity increased, the distance of rill head from slope top became short, the width and depth increased, but rill density was not obviously different; when the slope increased, the vertical force increased, but the horizontal expansion capacity reduced accordingly, so the depth increased, and the width-depth ratio decreased; and when the slope and rainfall intensity increased, the main erosion pattern changed from sheet erosion to rill erosion; the effects of rainfall intensity on rill erosion was greater than slope gradient.

Key words: Benggang; colluvial deposits; simulated rainfall; rill erosion

崩岗是我国南方红壤区特有的侵蚀现象,主要发生在花岗岩地区^[1]。崩岗具有发展速度快,突发性强,土壤侵蚀严重,危害性巨大,治理难度大的特征。其侵蚀过程主要包括沟壁的后退作用以及崩积体的再侵蚀过程^[2]。崩积体是崩壁土体崩塌后在其下方堆积的物质,由于受到扰动,土质疏松,加上土壤中粗粒含量高,土壤颗粒之间的粘聚力小,土壤的抗侵蚀能力弱,同时由于坡度大(一般为 20°~40°),非常容易被降雨溅蚀及径流冲刷,形成大量泥沙,直接影响崩岗的危害^[3-4]。据野外调查,崩积体坡面细沟分布密集,且有浅沟和切

沟侵蚀发生,土壤侵蚀特别严重。目前崩岗侵蚀研究的重点为崩壁的不稳定性及与岩土特性的关系^[5],而对于崩积体的侵蚀过程及机理却少有关注。

细沟侵蚀是土壤侵蚀的重要形式之一,不仅是坡面泥沙侵蚀的主要来源,也是输送坡面侵蚀产物的通道^[6]。已有研究表明,当坡面进入细沟侵蚀阶段后,坡面产沙会增加几倍至几十倍^[7],与细沟侵蚀量相比,细沟间侵蚀量所占比例很小^[8-9]。因此,近几十年来细沟侵蚀成为土壤侵蚀领域的重要研究方向。降雨和坡度是土壤侵蚀的重要因素,不同降雨和坡度条

件下,坡面的细沟发生、发育及形态特征有很大的差异。王志国等^[10]通过试验观察认为坡度与单位面积细沟侵蚀量呈正相关关系;杨具瑞等^[11]研究认为黄土坡面细沟侵蚀存在临界坡度;周佩华等^[12]提出,严重的土壤侵蚀主要由少数几次暴雨或大暴雨所引起,并形成严重细沟侵蚀;李君兰等^[13]研究发现大雨强条件下细沟的水流流速较大,引起坡面侵蚀程度的加剧。然而,关于细沟侵蚀的研究主要为缓坡和陡坡上,而针对 20°以上急坡或极陡坡坡面的细沟侵蚀关注较少。因此,本研究通过室内人工模拟降雨试验,设计不同的坡度和雨强,对不同条件下的崩积体细沟发生、发育及形态特征进行分析,探讨细沟侵蚀量与坡面侵蚀方式的关系。研究结果对于认识崩积体坡面侵蚀过程与机理具有重要的意义,同时也有利于深化对疏松、高沙、陡坡下土体侵蚀规律的认识。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省安溪县龙门镇(118°05'E, 24°57'N),属于南亚热带气候区,年平均温度 18℃,年平均降水量 1 800 mm。崩岗区土体由晚侏罗世、早白垩世燕山晚期的侵入体发育而成,为酸性花岗岩

类岩石,属于中—粗粒似斑状结构,以长石为主要矿物成分,其次为石英和云母^[14]。龙门镇是安溪县崩岗分布最多的乡镇之一,根据 2005 年调查的崩岗分布数据,全镇共有崩岗 1 228 个,密度为 7.86 个/km²,崩岗侵蚀面积 264.77 hm²,分别占安溪县崩岗数量的 9.57%和崩岗面积的 11.48%,崩岗侵蚀剧烈,治理难度大^[3-4]。

1.2 试验土壤的基本性质

试验用土于 2012 年 6 月采自福建省安溪县龙门镇洋坑村,为花岗岩发育的崩岗崩积土,土壤理化性质见表 1。由表 1 可知,试验土壤的有机质含量低;砾石:砂粒:粉粒:黏粒=1:0.80:0.74:0.09,表现出高石砾、砂粒和粉粒的特征,黏粒含量极低;无大团粒结构,>0.25 mm 团聚体含量低,土质疏松,结构性差。

1.3 试验设计

结合安溪县降雨特征和崩积体的坡度调查,采用两因素组合设计。根据野外调查可知,崩积体的坡度大多为 20°~40°,所以设置土槽坡度为 20°,25°,30°,35°,40°。崩积体侵蚀主要在大雨暴雨条件下发生,按照安溪大雨暴雨的雨强特征设置 5 个雨强,分别为 1.00,1.33,1.67,2.00,2.33 mm/min。试验重复两次。

表 1 供试土壤的理化性质

pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	>0.25 mm 团 聚体含量/%	土壤颗粒大小分布/%			
				>2 mm	2~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
5.17	1.65	1.05	13.38	40.09	34.01	23.32	2.58

1.4 试验装置

试验于 2012 年 7—12 月在福建省福州金山水土保持科教园人工模拟降雨实验室进行,采用下喷式自动模拟降雨系统。降雨系统降雨高度为 12 m,满足所有雨滴达到终点速度;降雨面积 3 m×6 m;雨强变化范围 15~200 mm/h;降雨均匀度大于 0.85;降雨雨量自动测量显示。试验土槽为固定式可变坡钢槽,长 5 m,深 1 m,宽 2 m;土槽按宽 1 m 分成两个槽;可调坡度 0~40°。

1.5 试验过程

土槽底部铺 60 cm 厚细沙,沙层之上先覆盖一层纱布,以保持试验土层的透水状况接近供试土壤,使试验过程中土壤水分能自由下渗,然后在沙层上填 30 cm 的试验用土。为保证试验土层容重均匀,按 5 cm 一层分层填装,容重控制在 1.24~1.42 g/cm³,平均容重为 1.35 g/cm³,标准差为 0.07。降雨试验前,采用 0.5 mm/min 的雨强进行降雨至要产流为止。然后用塑料布覆盖,使水分充分运动渗透,使试验土壤水分接近

自然状态下土壤水分分布状况,并能保证各场次降雨前期土壤含水率保持基本一致。静止 18 h 后进行降雨试验,降雨时的土壤含水量为 25.22%~28.55%,土壤平均含水量为 26.50%,标准差为 0.89。降雨开始后计时产流时间,降雨历时为 60 min,每隔两分钟收集一次径流量。用量筒测定径流样体积,用烘干法(105℃)测定泥沙量。试验过程中,实时记录坡面侵蚀沟发生的时间,并用数码相机定时对坡面的侵蚀状况进行拍照。降雨后,记录坡面的细沟数、每条细沟的长度和形状,同时每隔 10 cm 测量每条细沟的宽度和深度。根据每场降雨后坡面测定的所有细沟深度和宽度计算平均沟宽和平均沟深;细沟密度为单位面积坡面上细沟的长度,单位为 m/m²^[15];宽深比为细沟的宽度和深度的比值^[15]。根据试验后细沟的体积与试验土壤容重的乘积得到细沟侵蚀量。

1.6 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 进行数理统计分析。

2 结果与分析

2.1 发生细沟的时间

从表 2 分析可知,发生细沟的时间随着坡度和雨强的增大呈缩短的趋势。1.00 mm/min 雨强下,出现细沟的时间在 16.33 min 以上,而 2.33 mm/min 雨强下,则为 3.33~8.67 min;在 20°坡面,出现细沟的时间在 8.08 min 以上,而在 40°坡面,3 min 左右就出现细沟侵蚀。以上说明随着雨强的增大,坡面的冲刷增强,更易形成沟蚀;同时,坡度的增大,坡面的稳定性降低,坡面的径流流速增大,水流的冲刷作用增强,出现细沟的时间必然缩短。陈俊杰^[15]对黄绵土及塋土的研究也得出了类似规律。通过双因素方差分析可知,雨强和坡度对发生细沟时间的影响均达到极显著水平,其中雨强的 F 值大于坡度,说明雨强对其影响大于坡度(表 3)。

2.2 不同雨强和坡度条件下细沟发育状况及形态特征

根据最小耗能原理,径流在细沟的形成发展过程中不断地自我调整,力图使其能量消耗达到最小^[15]。随着降雨强度的增大,径流量增大,径流的侵蚀能量也增大,对细沟沟道垂向和横向的剪切力相应的增大,必然引起侵蚀断面形态的变化。坡度的增大,引起径流位能的增加,用于剪切冲刷土壤的能量增加^[16]。因此,雨强和坡度将会在很大程度上决定细沟的形态和分布特征。

由表 2 可知,随着雨强的增大,细沟数增加,在 1.00,1.33 mm/min 雨强下,细沟只是在坡面部分发育,侵蚀沟数为 0~3 条;而在 1.67,2.00,2.33 mm/min 雨强下,细沟发育到整个坡面,侵蚀沟数达到 5~8 条;相同雨强下,细沟数随坡度的变化不大。对沟头离坡顶距离比较可知,随着雨强和坡度增大,大致表现出沟头离坡顶的距离越短,这是因为在雨强和坡度较大的条件下,细沟出现的时间早,且径流的冲刷能力强,沟头溯源的作用增强,离坡顶的距离缩短。这种情况随着雨强的增大表现得尤为明显。侵蚀沟密度随着雨强的增大而增加(表 2);在坡度 30°,35°,40°坡面,大雨强(1.67,2.00,2.33 mm/min)下侵蚀沟密度差别不大,均为 2.5~3 m/m²。侵蚀沟密度在坡度分布因雨强不一致而表现出不同的规律;1.00 mm/min 雨强下的侵蚀沟密度最大的在 35°,1.33 mm/min 雨强下,其随着坡度的增大而增大,1.67,2.00,2.33 mm/min 雨强下的侵蚀沟密度随着坡度的增大先增大后略微减小。在 30°,35°,40°坡面,侵蚀沟宽度整体呈随雨强的增大而增大,但在 20°和 25°坡面,各雨强下的差异不显著,20°坡面各雨强下的侵

蚀沟宽度均略大于 6.00 cm。侵蚀深度均随雨强的增大而增大,最大平均深度达到了 8.23 cm,最小的为 1.76 cm;在坡度方面,1.00 mm/min 雨强下的侵蚀沟深随着坡度的增大呈先增大后减小的趋势,最大值出现在 35°坡面,为 4.69 cm;其它雨强的侵蚀深度大致呈随坡度的增大而增大的趋势。在宽深比方面,随着雨强的增大总体呈减小的趋势,说明在小雨强条件下,细沟宽而浅,随着雨强的增大,深度变大;但各雨强下的宽深比在各坡度的变化不大,说明坡度对宽深比的影响小于雨强。与陈俊杰^[15]研究相比较,其对塋土的试验得出宽深比均小于 1,而本研究均大于 1,这可能与试验的土壤对象有关,本试验的土体比陈俊杰研究土体塋土的粘结性小,细沟发生后沟壁不稳定,易产生崩塌,故其宽深比大于 1。

以上分析可知,细沟侵蚀密度、侵蚀宽度、侵蚀深度及深宽比,在雨强和坡度综合作用下,其变化均有一定的规律可循。雨强增大时,流速增大,径流侵蚀能力增强,不断地使沟道下切造成沟深增加,并使沟头溯源前进,侵蚀沟长度增加,沟头离坡顶的距离减小;同时更容易引起侵蚀沟壁的侧蚀和崩塌,造成沟宽扩大。另一方面,随着坡度的增大,径流流速增大,垂向作用增加,侵蚀沟深度的剪切分力增大,加上土体稳定性的减弱,导致坡面侵蚀深度增大,但横向扩张能力相应地降低,沟宽增大的幅度减小,最后造成宽深比的减小。这与耿晓东^[16]对黄土以及陈俊杰^[15]对塋土的研究一致。

通过双因素方差分析可知(表 3),雨强的 F 值均大于坡度的 F 值,说明雨强对细沟侵蚀的影响大于坡度;同时,雨强对细沟数、细沟密度、平均沟宽及平均沟深的影响达到极显著水平,对宽深比的影响达到显著水平,对最长细沟沟头离坡顶距离的影响不显著;而坡度对细沟密度和平均沟深影响达到极显著水平,对平均沟宽的影响达到显著水平,对细沟数及最长细沟沟头离坡顶距离的影响不显著。

2.3 不同细沟的侵蚀量及侵蚀方式的划分

细沟侵蚀量反映了坡面侵蚀的剧烈程度,是细沟的密度、长度、宽度、深度各侵蚀沟形态的综合体现。从图 1 可知,侵蚀沟侵蚀量随坡度的增大而增大;在坡度方面,除 1.00 mm/min 外,其它雨强的细沟侵蚀量均随坡度的增大而增大,1.00 mm/min 细沟侵蚀量的最大值在 35°,说明在小雨强条件下,细沟侵蚀量存在临界坡度。从图 1 还可以看出,细沟侵蚀量为 0.92~95.72 kg,占总侵蚀量的比例为 10.55%~89.90%,特别是在大坡度大雨强条件下,细沟侵蚀量占总侵蚀量的比例增大到了 60%以上,说明在大雨强和大坡度条件下,侵蚀泥沙量是由细沟侵蚀引起的。

表 2 不同雨强和坡度条件下细沟侵蚀参数

坡度/ (°)	雨强/ (mm·min ⁻¹)	细沟产生 时间/min	细沟数	最长细沟沟头 离坡顶距离/m	细沟密度/ (m·m ⁻²)	平均 沟宽/cm	平均 沟深/cm	宽深比
20	1.00	—	—	—	—	—	—	—
	1.33	28.67a	2b	4.30a	0.26b	6.04a	2.42c	2.50a
	1.67	25.33a	4b	4.20a	0.38b	6.12a	3.85b	1.59b
	2.00	22.17a	3b	3.70ab	0.68b	6.59a	4.24b	1.59b
	2.33	8.08b	8a	2.60b	1.82a	6.42a	5.70a	1.49b
25	1.00	35.17a	3b	4.10a	0.40d	4.55a	1.68b	2.71ab
	1.33	20.83b	4ab	4.10a	0.42d	7.19a	2.07b	3.47a
	1.67	16.75b	5a	3.40a	0.86c	7.00a	3.56a	2.29bc
	2.00	11.20bc	5a	2.50b	1.50b	5.53a	3.84a	1.44c
	2.33	8.67c	6a	2.10b	2.52a	5.89a	4.26a	1.38c
30	1.00	22.30a	2b	3.50a	0.34c	3.93c	2.03c	1.94b
	1.33	18.30a	6a	2.70ab	1.50b	4.70bc	2.18c	2.16a
	1.67	13.42b	5a	2.30b	2.14ab	5.51ab	4.06b	1.14c
	2.00	4.83c	6a	1.40c	2.92a	6.95a	4.57b	1.52c
	2.33	4.67c	6a	1.60c	2.96 a	8.50a	6.18a	1.07c
35	1.00	19.17a	2b	3.60a	0.44b	4.98c	4.69a	1.06a
	1.33	10.50b	4b	2.50b	0.96b	6.62c	5.55a	1.19a
	1.67	7.75bc	8a	1.80c	2.76a	6.75c	6.16a	1.10a
	2.00	5.33c	5ab	1.60c	2.84a	8.57b	6.35a	1.35a
	2.33	4.67c	6a	1.40c	2.90a	10.01a	6.64a	1.51a
40	1.00	16.33a	3b	4.10a	0.36c	4.55b	1.76c	2.59a
	1.33	8.83b	4ab	1.80b	1.46b	5.54b	4.59b	1.21b
	1.67	5.33b	6a	1.90b	2.60a	6.94b	6.53a	1.19b
	2.00	3.75b	5ab	1.80b	2.66a	11.82a	7.97a	1.60b
	2.33	3.33b	6a	1.50b	2.76a	12.26a	8.32a	1.47b

注:表中同一坡度下,同一列中小写字母相同表示差异不显著。

表 3 雨强和坡度与细沟侵蚀参数双因素方差分析 F 值大小

因子	发生细沟 时间	细沟数	最长细沟沟头 离坡顶距离	细沟密度	平均沟宽	平均沟深	宽深比
雨强	12.51**	12.90**	1.15	22.62**	7.27**	18.93**	3.27*
坡度	10.15**	1.69	0.91	10.38**	3.12*	13.00**	2.88

注: $F_{0.05}(4,4)=3.01$, $F_{0.01}(4,4)=4.77$; * 表示显著水平 ($P<0.05$), ** 表示极显著水平 ($P<0.01$)。

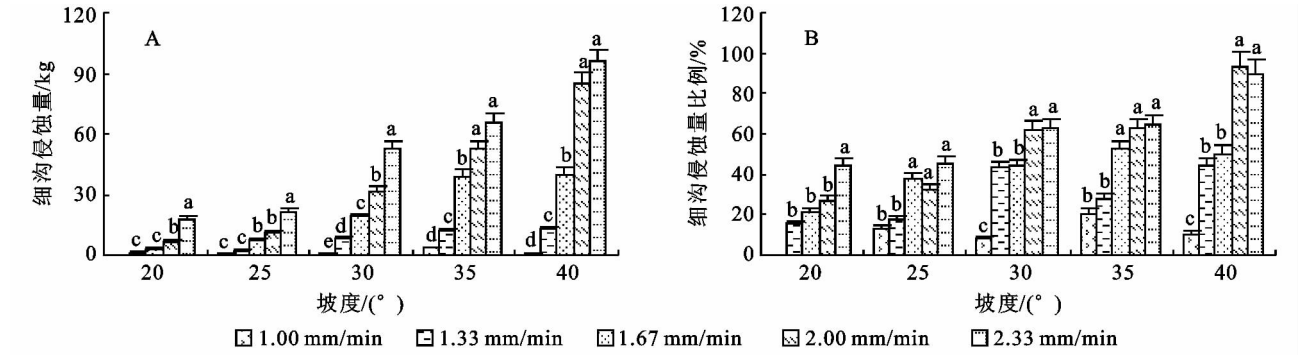


图 1 不同雨强和坡度下细沟侵蚀量及其占总侵蚀量比例

耿晓东研究表明,细沟侵蚀量低于 30%可划定为片蚀为主的侵蚀方式,细沟侵蚀量比例在 30%~60%之间划定为片蚀与细沟侵蚀相当的侵蚀方式,细沟侵蚀量高于 60%划定为细沟侵蚀为主的侵蚀方式^[16]。根据其标准,不同条件下的侵蚀方式见表 4。由表 4 可知,1.00 mm/min 雨强下,侵蚀方式均属于

片蚀;1.33 mm/min 雨强下,除 40°坡面为片蚀+细沟侵蚀外,其他坡度坡面均为片蚀为主;1.67 mm/min 雨强各坡度坡面的侵蚀方式均为片蚀+细沟侵蚀;2.00 mm/min 雨强下,在 20°为片蚀,在 25°坡面为片蚀+细沟侵蚀,其它 3 个坡度坡面均以细沟侵蚀

为主;2.33 mm/min 雨强下,在 20°和 25°坡面为片蚀+细沟侵蚀,其他坡度均为细沟侵蚀。以上说明,随着雨强和坡度的增大,径流的侵蚀力增强,土体的稳定性降低,造成侵蚀方式从片蚀为主逐渐转变至细沟侵蚀为主的侵蚀方式,进而导致坡面的侵蚀泥沙量增加。

表 4 不同雨强和坡度条件下坡面的侵蚀方式

雨强/(mm·min ⁻¹)	20°	25°	30°	35°	40°
1.00	片蚀	片蚀	片蚀	片蚀	片蚀
1.33	片蚀	片蚀	片蚀	片蚀	片蚀+细沟侵蚀
1.67	片蚀	片蚀+细沟侵蚀	片蚀+细沟侵蚀	片蚀+细沟侵蚀	片蚀+细沟侵蚀
2.00	片蚀	片蚀+细沟侵蚀	细沟侵蚀	细沟侵蚀	细沟侵蚀
2.33	片蚀+细沟侵蚀	片蚀+细沟侵蚀	细沟侵蚀	细沟侵蚀	细沟侵蚀

3 结论

(1) 随着雨强和坡度的增大,发生细沟的时间呈缩短的趋势。

(2) 在雨强和坡度综合作用下,细沟侵蚀密度、侵蚀宽度、侵蚀深度及深宽比的变化均有一定的规律可循。雨强增大时,造成沟深增加,沟头溯源前进,并引起侵蚀沟壁的侧蚀和崩塌,造成沟宽扩大。同时,随着坡度的增大垂向作用增加,但横向扩张能力相应地降低,沟宽增大的幅度减小,造成宽深比的减小。雨强对崩积体细沟侵蚀的影响大于坡度。

(3) 随着雨强和坡度的增大,坡面侵蚀方式从片蚀为主逐渐转变至细沟侵蚀为主,导致坡面的侵蚀泥沙量增加。

参考文献:

[1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004:80-82.

[2] 丘世钧. 红土坡地崩岗侵蚀过程与机理[J]. 水土保持通报,1994,14(6):31-40.

[3] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等. 崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J]. 水土保持学报,2013,27(3):49-54.

[4] 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.

[5] 林敬兰,黄炎和. 崩岗侵蚀的成因机理研究与问题[J]. 水土保持研究,2010,17(2):41-44.

[6] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. 地理科学进展,2010,19(11):1319-1325.

[7] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究,1991(4):39-45.

[8] Dunkerley D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(22):4415-4435.

[9] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rates of sheet and rill erosion in Germany; a meta-analysis[J]. Geomorphology,2009,111(3):182-193.

[10] 王治国,魏忠义,段喜明,等. 黄土残塬区人工降雨条件下坡耕地水蚀的研究: I. 影响细沟侵蚀因素的综合分析[J]. 水土保持学报,1995,9(2):51-57.

[11] 杨具瑞,史正涛,曹叔尤,等. 细沟侵蚀临界坡度研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(5):64-67.

[12] 周佩华,窦保障,孙清芳. 降雨能量的试验研究初报[J]. 水土保持通报,1981,1(1):51-61.

[13] 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.

[14] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等. 崩岗土体的渗透性能机理研究[J]. 水土保持学报,2013,27(2):53-56,144.

[15] 陈俊杰. 不同土壤坡面细沟侵蚀影响试验研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.

[16] 耿晓东. 主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2010.