试验研究

不同坡长与雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响

陈俊杰[1,2]，孙莉英[1]，刘俊体[3]，蔡崇法[2]，蔡强国[1]

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点试验室，北京 100101；
2. 华中农业大学 水土保持研究中心，湖北 武汉 430070；3. 北京林业大学 水土保持学院，北京 100083)

摘　要：采用室内纯净水人工模拟降雨试验，以坡度为 10°，15°，20°和 25°，土槽为 5，10 m² 两种规格，进行了降雨强度分别为 1.5 和 2.0 mm/min 的降雨试验。利用三维激光扫描仪对每一场降雨前后的坡面进行监测，分析了不同坡长，降雨强度条件下坡度对细沟侵蚀的影响。结果表明，产流时间随坡度的变化并没有显著的规律性，跌坎出现时间随坡度的增加而缩短，产流时间与跌坎出现时间主要由降雨强度控制，坡长增长对产流时间的提前有促进作用。径流量随着坡面由缓变陡呈现先增加后减少变化，在降雨总量相同，不同雨强条件下，坡面径流量差异不大。坡面侵蚀量随坡度的增加而增大，降雨强度在一定程度上增强坡度对侵蚀量的影响，而坡长在一定程度上会减弱坡度的影响。侵蚀速率随降雨历时的变化速度随坡度的增加表现为先增加后减缓，并存在临界坡度。降雨强度和坡长会增强坡度对侵蚀速率的影响。

关键词：人工模拟降雨；坡度；坡长；降雨强度；细沟侵蚀

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2013)02-0001-05　　**中图分类号**：S157

Effect of Slope Gradient on Rill Erosion Under Different Rainfall Intensities and Slope Lengths

CHEN Jun-jie[1,2], SUN Li-ying[1], LIU Jun-ti[3], CAI Chong-fa[2], CAI Qiang-guo[1]

(1. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; 2. *Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei* 430070, *China*; 3. *Beijing Forestry University, College of Soil and Water Conservation, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Simulated rainfall experiments were conducted under 1.5 and 2 mm/min rainfall intensities, with four slope gradients (10°, 15°, 20°, 25°) and two slope lengths (5, 10 m). Purified water was used for the simulation experiments. To study the effects of slope gradient on rill erosion under different surface conditions, a three-dimensional laser scanning system was used to monitor the subtle changes on slope surface before and after each rainfall experiment. The results indicated that the time of runoff initiation showed no significant trend with slope gradient, drop-pits appeared earlier with greater slope gradient. Both the initiation time for runoff and drop-pit were mainly controlled by the rainfall intensity. And the increase of the slope length promoted earlier initiation of runoff. The runoff rate was first climbing up and then declining with increasing slope gradients. No significant variations were found in the total runoff under different rainfall intensities with the same volume of rainfall. The sediment yield increased with slope gradient, which was further enhanced by increasing rainfall intensity but weakened by increasing slope length to some extent. Moreover, during the rainfall process, soil erosion first increases with slope rapidly and the increasing rate reduced after a critical gradient was reached, which could be further enhanced by both rainfall intensity and slope length.

Keywords: simulated rainfall experiment; slope gradient; slope length; rainfall intensity; rill erosion

细沟侵蚀是水流面蚀中重要的侵蚀方式，它的发生往往标志着土壤侵蚀逐步向沟蚀发展。坡度是坡面细沟侵蚀重要影响因素之一，许多的研究者对此进行过大量的探讨研究，获得了各自的研究成果。王贵

收稿日期：2012-05-06　　修回日期：2012-09-17
资助项目：国家自然科学基金项目“细沟侵蚀发育过程及空间形态的三维数字模拟”(40971165)，“坡面水蚀动力与细沟发育形态的相互作用机制及其影响因素”(41271304)，“东北典型黑土区坡耕地水土保持措施对地表径流及其侵蚀的调控和机理研究”(41001165)
作者简介：陈俊杰(1987—)，男(汉族)，浙江省杭州市人，硕士研究生，主要从事坡面土壤侵蚀等研究。E-mail：chenjunjie5566@yahoo.com.cn。
通信作者：蔡强国(1946—)，男(汉族)，湖北省武汉市人，博士，研究员，博士生导师，主要从事土壤侵蚀、水土保持、流域侵蚀产沙模拟与 GIS 技术应用等方面的研究。E-mail：caiqg@igsnrr.ac.cn。

平等[1]、王治国等[2]、贾志军等[3]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。对细沟侵蚀发生的临界坡度研究也广泛开展[4-5],同时,从径流量、径流水流动力、径流剪切力等角度来探讨的细沟临界条件也是关于坡度的函数[6-7]。坡度也是影响径流水力特征的重要因素。陈力[8]等采用杨凌区的土样进行试验得到了细沟过流宽度和湿周与坡度的经验关系。丁文峰等[9]通过冲刷试验探讨了水力学特征受坡度的影响。从建立细沟侵蚀模型的需要和因地制宜实施水土保持措施考虑,不同自然环境下的土壤发生细沟侵蚀的规律不尽相同。但是,已有研究观察因素相对单一,自然环境下细沟侵蚀的发生受多因素共同影响。

本研究通过室内人工模拟降雨试验,设计不同坡长、雨强及坡度条件,对不同条件下坡面细沟侵蚀的资料数据进行对比分析,探讨研究不同坡长、雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响效应,同时初步分析坡长、雨强对坡度效应的影响。研究结果对理解坡面细沟侵蚀过程和机理具有一定的理论意义。

1 材料与方法

1.1 土壤样品

供试土壤取自陕西省杨凌区,土壤类型归属于褐土中的塿土,塿土是在普通褐土表层以上形成一个人工堆垫的表层,它是人为长期旱耕熟化而成。土样均为农耕地表层(0—20 cm)土壤。

试验用土试验前将土样自然风干并过 10 mm 筛,以除去杂草和石块。填土时,先在试验槽底部填入 10 cm 厚的细沙,在细沙上铺上透水的细纱布,以保持试验土层的透水状况接近于天然坡面。然后再填入试验用土,将土均匀填入土槽中,土壤容重控制在 1.1 g/cm^3 内,厚度约为 30 cm。装土时采用分层填土法,边填土边压实,每次装土 5 cm,控制土壤容重在设计范围之内。每次降雨前,采用环刀法测取坡面土壤表层容重及含水量。各场降雨试验初始条件的统计结果显示,土壤平均含水量为 12.81%,土壤平标准差为 0.015;土壤平均干容重为 1.09 g/cm^3,标准差为 0.043。因为标准差均小于 0.05,表明数据集中程度高,故可认为每场降雨试验的土壤初始条件达到一致。

土壤性质分析采用常规方法,即有机质采用重铬酸钾外加热法,土壤碳酸钙含量用中和滴定法,容重采用环刀法,机械组成采用激光粒度分析法,水稳定团聚体采用湿筛法,土壤饱和导水率采用环刀法,每组做 3 个平行进行对照,两种试验土壤样品的各种性质详见表 1。

表 1 供试土壤基本性质

机械组成/%				有机质/(g·kg^{-1})	碳酸钙/(g·kg^{-1})	饱和导水率/(mm·h^{-1})	>0.25 mm 水稳团聚体比例/%
<0.002 mm	0.002～0.05 mm	0.05～0.25 mm	0.25～2 mm				
26.06	64.47	4.25	5.22	6.0	130.2	11.2	6.44

1.2 人工模拟降雨试验

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行,采用下喷式自动模拟降雨系统。降雨系统把水喷射至空中,受空气阻力作用把水流破碎形成不同大小的雨滴,其产生的雨滴有大有小,与天然降雨的雨滴比较相似[10]。降雨高度 18 m,能够保证所有雨滴均能达到终点速度。试验每场降雨的雨强(I)为 1.5 和 2.0 mm/min,为保证总降雨量相同,降雨时间分别为 60 和 45 min。试验采用纯净水作为模拟降雨水源,室温为 10°时,测取试验用纯净水电导率为 4.81 μS/cm。国际上,采取纯净水作为水源来进行室内模拟降雨试验的方法已经被广泛应用[11-12]。根据 Shainberg 等[13]的试验结果可知,与自来水相比,使用纯净水进行模拟降雨会加速和加剧坡面土壤侵蚀,从而更有利于对坡面土壤侵蚀过程的观察及研究。

在降雨试验前,进行率定试验,使其在试验要求雨强情况下降雨均匀度达到约 90%。试验所用土槽设计规格为 1 m×0.5 m×5 m 的移动式可调坡度钢制土槽,另一种规格为 1.5 m×0.5 m×10 m 的固定式可调坡度钢制土槽,最下层装填 10 cm 细沙并用纱布覆盖,以保证良好的透水性,其上依次装填 30 cm 的供试土样,每层装土深度 5 cm,使下垫面土壤条件的变异性达到最小,坡度为 10°,15°,20°和 25°,土槽下端设集流装置,用来收集径流泥沙样品。仔细观察并记录细沟侵蚀过程,产流时间、跌坑产生时间、沟壁坍塌的关键时刻等信息,降雨径流产生后每隔 1 min 取一次样,采用烘干法测定含沙量。径流量则采用自制大量桶测量体积,加上泥沙样累计值,即为总径流量。用染色剂法测定坡面最大流速。

2 结果与分析

2.1 不同坡长与雨强下,坡度对坡面侵蚀发育的影响

如表 2 所示,在相同降雨强度、坡长条件下,产流

时间随坡度的变化并没有显著的规律性,这与土壤初始状态有关。跌坎出现时间大致趋势是随坡度的增加而缩短。在降雨强度相同,坡度相同的坡面上,10 m坡面的产流时间要短于 5 m 坡面。坡长、坡度相同条件下,随着雨强的增大,产流时间明显缩短,跌坎出现时间也缩短。例如,在 5 m 坡面上,2 mm/min 雨强比 1.5 mm/min 雨强条件的产流时间提前了 44 s。雨强越大,不同坡度条件下单位面积单位时间所接受的雨量也增大,因而不同坡度下,产流所需的时间随着雨强的增加而缩短,同时雨强的增大掩盖了坡度对产流时间的影响。

2.2　不同坡长与降雨强度下,坡度对径流量的影响

径流量随坡度的变化是一个复杂的过程,在降雨强度一定的条件下,地表径流量的大小主要由坡面土壤入渗特性和承雨量来决定。已有的研究表明,坡度的增加会导致入渗减少,地表径流增加[14-15],但有些学者发现径流量与坡度没有明显的关系[16-17]。而本试验不同降雨历时累积的径流量与坡度的变化关系表明(图 1),径流量随坡度变化规律并不是单调性的递增或递减,而是随着坡面由缓变陡呈现先增加后减少的变化。这与陈浩等[16]采用马兰黄土进行试验所得到的结果一致。

表 2　土壤降雨过程中坡面侵蚀发育过程的差异

雨强/(mm·min^{-1})	坡长/m	坡度/(°)	产流时间/min	跌坎出现时间/min	坡面平均流速/(m·s^{-1})
1.5	5	10	1.80	14	0.21
		15	1.87	7	0.18
		20	1.85	11	0.24
		25	1.42	6	0.27
	10	10	1.53	10	0.26
		15	1.33	11	0.26
		20	1.37	8	0.25
		25	1.38	4	0.26
2.0	5	10	1.03	9	0.21
		15	1.13	7	0.24
		20	1.40	7	0.22
		25*	1.22	6	0.20
	10	10	1.15	6	0.25
		15	1.08	5	0.31
		20	1.13	3	0.33
		25	1.17	5	0.28

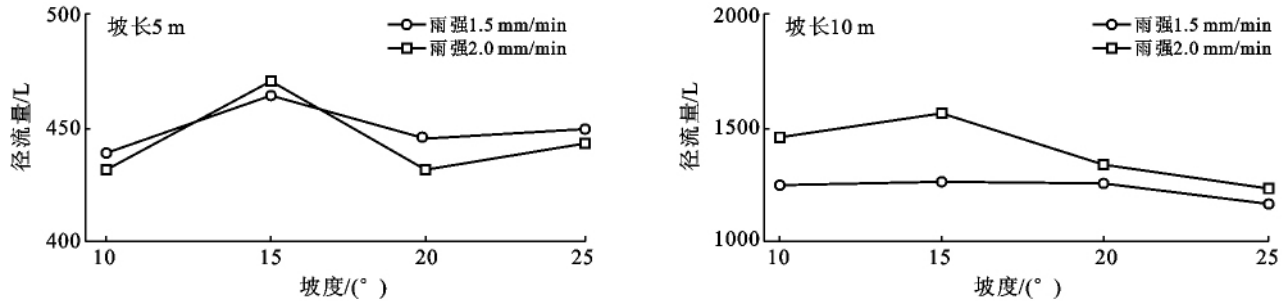


图 1　不同降雨强度和坡长下坡度与径流量的关系

因为采用固定坡长的土槽装置,随着坡度的增加,坡面的承雨面积(水平投影面积)随之减小,并与坡度呈余弦变化关系,承雨量减小由余弦定律可知,10°～15°,15°～20°和 20°～25°这 3 段的斜率逐步增加,则坡面实际承雨面积缩小的幅度逐步增大,产流量逐渐减小。由于降雨量总量相同,在 5 m 坡长下,两种雨强产流量几乎相同,在 10 m 坡长下,2 mm/min 雨强产流量较多,因本试验中所采用的杨凌塿土的产流方式为超渗产流,其入渗能力较弱;与雨强为 1.5 mm/min 试验相比,雨强增至 2 mm/min,单位时间降雨量增加 33%,其入渗能力却并没有明显地提高,所以其产流量要高于 1.5 mm/min。

2.3　不同坡长与降雨强度下,坡度对总侵蚀量的影响

由图 2 可以看出,产沙量随坡度的增加而增加,同时降雨强度对坡度效应也有影响,但其影响的程度会受到坡长的影响。

在不同坡度条件下,2 mm/mim 雨强下的总侵蚀量远大于 1.5 mm/min 雨强试验,两者之间的差距会随坡度的增加而增大。不同雨强下,总侵蚀量随坡度的变化有所不同。在 5 m 坡面上,1.5 mm/min 雨强,总侵蚀量在 10°～25°范围内随坡度的增大而增大,但趋势较平缓。然而在 2 mm/min 雨强,侵蚀量在 10°～25°范围内随坡度的增大而增大,增加幅度较大。10 m 坡面上,同样表现为侵蚀量随坡度的增大而增大的趋势,但两种雨强下,侵蚀量增加的幅度差异不大。5 m 坡长时,25°时 2 mm/h 雨强降雨试验的总侵蚀量是 1.5 mm/min 雨强的 2 倍;在 10 m 时,在 25°坡面上虽然 2 mm/min 雨强下总侵蚀仍是远大于 1.5 mm/min 试验,但是未达到 2 倍的增长幅度。说明坡长在一定程度上减弱坡度的影响。在陡坡条件

下坡面侵蚀增大趋势变小。在图 2 中 2 mm/min 雨强中,这种趋势尤为明显,一方面因为坡面土壤的不稳定性与坡度的大小成正比,坡度愈大,坡面土体受到斜坡重力切向分力愈大,则坡面上土体不稳定性愈大,就更易被径流冲走;另一方面随着坡度的增大,单位面积上承受的雨量变小,单位面积径流量及冲刷量也相应变小,在这两方面因素的综合作用下侵蚀量增加幅度发生变化。

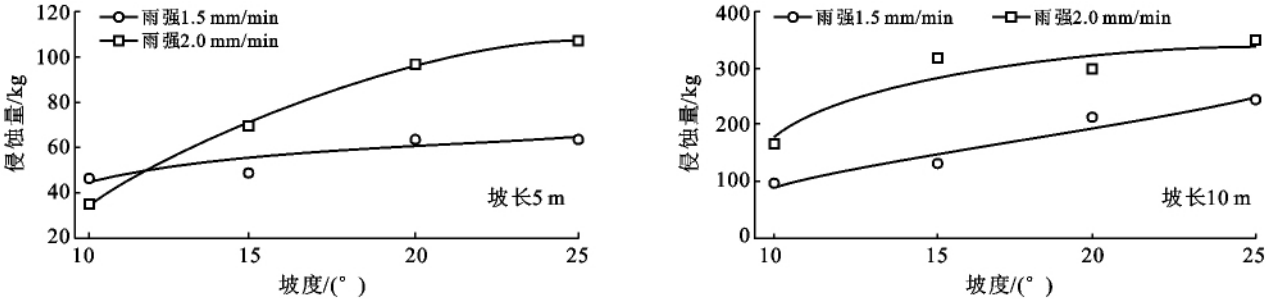


图 2 不同降雨强度和坡长条件下坡度与侵蚀量的关系

2.4 不同坡长与降雨强度下,坡度对产沙过程的影响

侵蚀产沙过程是坡面侵蚀过程研究的主要内容,是研究坡地发育的基础。由图 3—4 可以看出,降雨过程中侵蚀速率出现一个急速增长的过程,进而在较高侵蚀率水平上有一段波动过程,随后出现下降趋势但仍保持稳定状态。这种趋势在大雨强条件下更为明显,无论 5 m 还是 10 m 坡面上,1.5 mm/min 雨强下,坡面侵蚀速率随降雨历时的变化幅度要小于 2.0 mm/min 降雨强度。然在 2.0 mm/min 降雨条件下,各坡度坡面随降雨历时的进行,侵蚀速率变化很明显。在 5 m 坡面上,侵蚀速率达到最高值的坡度为 20°,在 10 m 坡面上,侵蚀速率达到最高时临界坡度为 15°。这说明在降雨条件相同时,坡长侵蚀速率的坡度效应中有影响。这是由于坡长增长,水流对坡面的冲刷时间延长,水深逐渐增加,侵蚀强度相应增大。

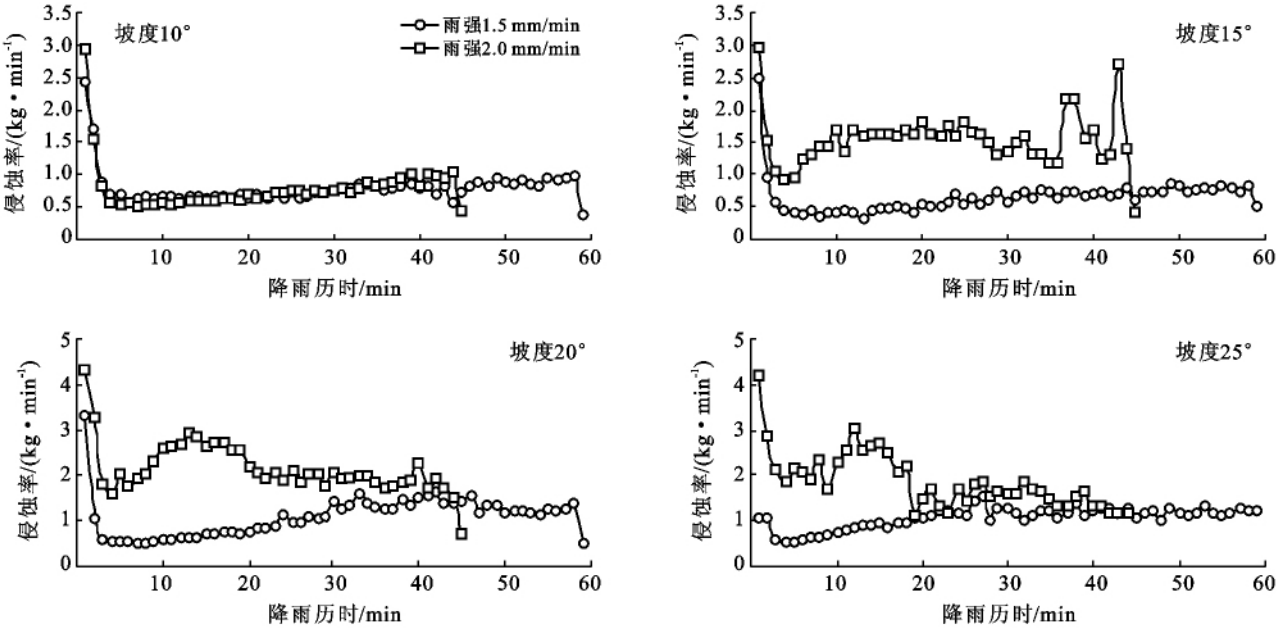


图 3 不同雨强和坡度条件下 5 m 坡长土槽的侵蚀率变化

3 结 论

产流时间随坡度的变化并没有显著的规律性,跌坎出现时间大致趋势是随坡度的增加而缩短,产流时间与跌坎出现时间主要由雨强控制,坡长增长对产流时间的提前有促进作用。径流量随着坡面由缓变陡呈现先增加后减少变化,在降雨总量相同,不同雨强下,坡面径流量差异不大。坡面侵蚀量随坡度的增加而增加,降雨强度在一定程度上增强坡度对侵蚀量的影响,而坡长在一定程度上会减弱坡度的影响。高雨

强条件下,侵蚀速率随降雨历程呈现先快速增长、波动而后下降的趋势;侵蚀速率随降雨历时的变化速度随坡度的增加表现为先增加后减缓,并存在临界坡度;降雨强度和坡长会增强坡度对侵蚀过程的影响。

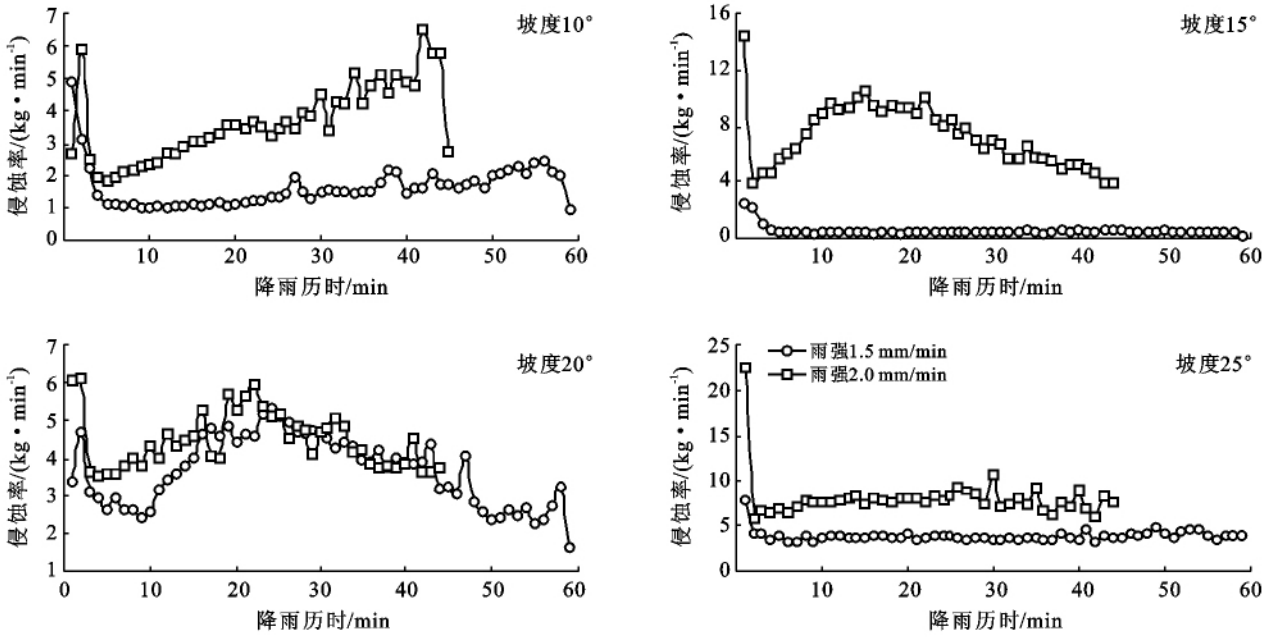


图 4　不同雨强和坡度条件下 10 m 坡长土槽的侵蚀率变化

[参 考 文 献]

[1] 王贵平,白迎平,贾志军,等. 细沟发育及侵蚀特征初步研究[J]. 中国水土保持,1988(5):13-16.

[2] 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.

[3] 贾志军,李俊义,王小平. 地面坡度对坡耕地土壤侵蚀的影响[C]//晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集. 北京:水利电力出版社,1990:26-31.

[4] Savat J, De Ploey J. Sheetwash and Rill Development by Surface Flow[M]//Badland Geomorphology and Piping. Norwich: Geo Books, 1982:113-126.

[5] 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.

[6] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究[J]. 泥沙研究,1998(1):52-59.

[7] 郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度[J]. 中国水土保持,1989(8):23-24.

[8] 陈力,刘青泉,李家春. 坡面细沟侵蚀的冲刷试验研究[J]. 水动力学研究与进展,2005,20(6):761-766.

[9] 丁文峰,李占斌,丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报,2002,16(3):72-75.

[10] 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.

[11] Igwe C A, Udegbunam O N. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in Southern Nigeria[J]. International Agrophysics, 2008, 22(4):319-325.

[12] Tishmack J K, Peterson J R, Flanagan D C. Use of coal combustion by-products to reduce soil erosion[C]// University of Kentucky: International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, 2001:63-73.

[13] Shainberg I, Warrington D, Laflen J M. Soil dispersibility, rain properties and slope interaction in rill formation and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(1):278-283.

[14] 郑粉莉,唐克丽,周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. 土壤学报,1989,26(2):109-116.

[15] 王秀英,曹文洪,陈东. 土壤侵蚀与地表坡度关系研究[J]. 泥沙研究,1998(2):36-41.

[16] 陈浩,蔡强国. 坡度对坡面径流深、入渗量影响的试验研究[C]//晋西黄土高原土壤侵蚀规律试验研究文集. 北京:水利电力出版社,1990:17-25.

[17] 薛亚洲,刘普灵,杨明义. REE 示踪坡面侵蚀的演变过程[J]. 水土保持通报,2004,24(2):8-11.