

降雨强度对梯田边坡细沟侵蚀的影响

温永福^{1,2}, 高鹏^{2,3}, 穆兴民^{2,3}, 赵广举^{2,3}, 孙文义^{2,3}

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了进一步明确黄土高原丘陵沟壑区梯田边坡在不同降雨强度下的细沟侵蚀和发育特征, 选取陕西安塞县纸坊沟小流域土壤为试验材料, 利用自制的试验模型槽, 采用人工分层填筑方法, 模拟野外最常见的单级梯田形态, 在室内模拟降雨的条件下, 设计了 5 组降雨强度(1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5 mm/min), 研究了不同降雨强度对单级梯田边坡细沟侵蚀和发育的影响。结果表明: (1) 降雨强度越大, 梯田边坡坡面产流、跌坎和细沟出现的时间越早, 细沟主要由沿坡面方向呈线状平行分布的跌坎相互连通演化而成; (2) 各雨强条件下, 细沟长度、宽度和深度的变化趋势不同, 其中细沟的长度能很好地反映细沟的发育过程, 且其与侵蚀速率之间存在着极显著的正相关关系; (3) 不同降雨强度下, 梯田边坡发生崩塌的过程分为 3 个阶段: 跌坎的形成、有跌坎相互贯通形成细沟、由于表层土体悬空靠近坡顶的坡面出现浅层崩塌。

关键词: 降雨强度; 细沟发育; 侵蚀速率; 崩塌过程

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0006-05

Effect of Rainfall Intensity on Rill Erosion on Terrace Wall

WEN Yongfu^{1,2}, GAO Peng^{2,3}, MU Xingmin^{2,3}, ZHAO Guangju^{2,3}, SUN Wenyi^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland

Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Because of the high, steep and the special form, rill evolution and erosion of terrace wall is different from the traditional slow slope. However, the existing studies mainly focused on the tradition slow slope so that they cannot reveal the erosion process of the terrace walls in the field accurately. As a result, studying the rill evolution and erosion process of three-dimensional terrace wall is necessary. In order to simulate the terrace wall, platform is used to bank up the soil which is collected from the Ansai County in Shanxi Province. The rainfall simulation experiments were conducted under the indoor rainfall experimental condition and five kinds of rainfall intensities (1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5 mm/min), variations in erosion and characteristics of rill were studied experimentally. The results show that the greater the intensity of the rainfall, the sooner the runoff, step-down floor and rill of terrace wall appeared, and rill was evolved from a series of step-down floor which was parallel to each other and distributed with line at wall surface direction. The length, width and depth of rill show the different tendency in each rainfall test, and the length of rill which has obvious relevance to the rate of erosion can represent the process of rill well and collapse.

Keywords: rainfall intensity; rill evolution; erosion rate; collapse

水土流失已成为阻碍黄土丘陵沟壑区发展的主要因素之一^[1], 退耕还林还草则成为改善该地区生态

环境以及防止水土流失的一项战略性措施。将坡耕地改为高标准梯田并进一步提高耕作技术会满足农

村人口对粮食基本需求,并在一定程度上推动退耕还林还草的贯彻与实施^[2]。但由于机修梯田规模化发展使梯田边坡不断增高,加之极端降雨频发,当面临百年不遇特大暴雨时,极易产生较大降雨径流,对梯田边坡坡面造成严重的冲刷,侵蚀形式一旦由面状侵蚀发展为细沟侵蚀,侵蚀量会成倍甚至数十倍的增长,与细沟侵蚀量相比,细沟间侵蚀量所占比例很小^[3-6]。最终使得梯田被毁,农作物减产甚至绝收,严重威胁人民群众的生命与财产安全^[7]。

细沟侵蚀是一个非常复杂的土壤侵蚀过程。细沟侵蚀过程及其影响因素一直是土壤侵蚀研究的热点,关于降雨强度、降雨量、坡度、坡长、坡形、土壤性质、土壤前期含水量等因素对细沟侵蚀的影响,以及不同因素组合下细沟侵蚀过程的研究已经取得了丰硕的成果。有学者^[8-9]认为:细沟侵蚀的发生主要是由坡面本身所具有的起伏以及浅层洞穴的崩塌,以及降雨过程中形成的小跌坎及其受坡面径流下切影响造成的。雷廷武等^[10]、张玉斌和郑粉莉^[11]、王占礼等^[12]通过大量室内和野外模拟降雨试验,将细沟侵蚀过程细分为 4 个阶段:溅蚀阶段、细沟间侵蚀阶段、细沟侵蚀为主阶段和雨后径流侵蚀阶段。和继军等^[13]采用室内纯净水模拟降雨试验的方法,研究了壤土和黄绵土的坡面细沟发育过程和水沙关系,表明细沟主要由沿坡面方向呈线状平行分布的跌坎链相互连通演化而成,在雨强较小时壤土更易形成细沟,而黄绵土在雨强较大时才能形成细沟。郑粉莉等^[14]通过野外观测和室内人工模拟降雨试验相结合的方法统计了黄土高原坡耕地细沟宽度和深度分布范围,指出大多数细沟深度小于 20 cm,宽度小于 30 cm。韩鹏等^[15]对黄土坡面的研究表明,考虑雨滴击溅作用时的产沙量要比消减雨量击溅作用时的产沙量高。Bruno 等^[16]利用细沟长度和横断面描述细沟形态,得出细沟长度与细沟体积呈幂函数关系,并通过剖面形态变化推断细沟侵蚀沉积情况。

尽管国内外学者对细沟侵蚀形成和演化过程进行了大量的试验研究,但笔者发现:梯田边坡细沟侵蚀规律与缓坡细沟侵蚀差异性明显,且有关对梯田边坡细沟侵蚀的研究较少。鉴于此,本文采用室内模拟降雨试验并结合高清晰摄像设备,通过对降雨试验过程实时监测,系统分析降雨强度对梯田边坡坡面细沟形态的演变以及细沟发育对侵蚀速率的影响,以期对梯田边坡细沟侵蚀的有效防治提供必要的理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验土体性质

本次模型试验用土取自陕西安塞县纸坊沟,取土深度为 6~8 m,属于 Q4 黄绵土^[17]。试验用土的基本参数指标见表 1。轻型击实试验测得最大干密度为 1.703 g/cm³,最优含水率为 19.3%。土壤粒径采用马尔文激光粒度仪进行测定。测定范围在 0~2 mm,平均级配的特征值为:黏粒(≤0.002 mm)含量为 12.1%,粉粒(0.05~0.002 mm)含量为 52.55%,砂粒(2~0.05 mm)含量为 35.35%,不均匀系数 C_u 为 7.52,说明土样中包含的粒径级数较少,粗细粒径之间差别较小,颗粒级配曲线的曲率系数 C_c 为 1.79,级配优良。

表 1 试验用土的基本参数指标

土样	天然密度/ (g·cm ⁻³)	天然含 水率/%	干密度/ (g·cm ⁻³)	液限/ %	塑限/ %	饱和渗透 系数/(m·d ⁻¹)
安塞纸坊沟	1.32	7.86	1.21	28.48	18.92	0.622

1.2 试验装置

本模型的主体部分为一个梯形的模型槽,尺寸为 2.6 m×1 m×2.1 m^[18]。试验填筑的边坡部分的高度为 1.2 m,坡度为 65°,上、下各留有 1 m 平台。模型的前、后缘和其中的一个侧面用钢板围筑,涂抹了一层凡士林材料进行了墙面光滑处理,以减小模型的边界效应对试验的影响。另一个侧面采用厚度为 1 cm 的高透明有机玻璃作为可视窗口,以便于随时观测试验过程中土体内部的运动情况。同时,为了便于土体运动观测,在有机玻璃上画上边长为 10×20 cm 的长方形格子,并紧靠钢板安置台阶以便于试验过程中对沟道形态参数、流速的测量,前缘设集水槽以便收集径流泥沙。与模型配套的有人工降雨系统,多物理量测试系统:水分传感器、数码相机动态拍照摄影。模型见图 1。

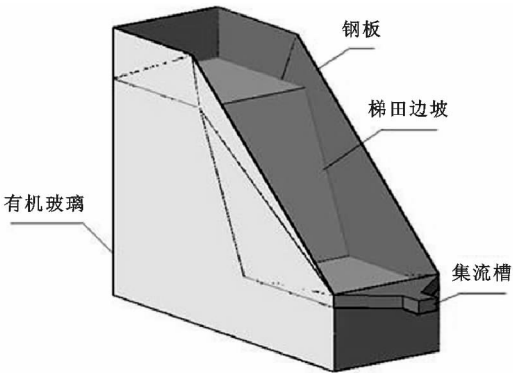


图 1 模型试验装置

降雨装置是由中国科学院水利部水土保持研究所研制,降雨高度 16 m,满足所有降雨雨滴达到终点

速度。降雨强度变化范围为 40~260 mm/h,降雨均匀度大于 80%,最大持续降雨时间 12 h。降雨区由两个独立降雨试验区组成,单个试验区有效降雨面积 4 m×9 m,能很好地模拟天然降雨^[19]。

1.3 填土方式

用边长为 1 cm 的方格铁筛筛分,使模型填土的土颗粒粒径最大不超过 1 cm。然后把这些土均匀的平铺摊开,喷洒适量的水分,均匀拌和,盖上塑料膜,使土的基本物理指标如密度,含水率等和原状土接近,但在模型填筑的过程中,土的结构、颗粒级配、地层结构、土的裂隙等都会有所改变,这是不可避免的。本次试验采用分层击实填筑的方法:把试验前配制好的土均匀的每隔 10 cm 厚度分层,共分 17 层,在每层填土的交界面上用 5 kg 重的铁饼从 20 cm 高处落下,均匀击实土体^[20]。在每一层击实完成后,用环刀在几个不同部位取样,测定其每层土体的湿密度在 1.32~1.40 g/cm³,含水率在 7.5%附近,分层填筑完成后通过人工削坡得到 65°边坡和模型所需几何尺寸。

1.4 试验方法

试验于 2016 年 9 月—2016 年 11 月在陕西省水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅侧喷Ⅱ区进行。试验设计 1.5,1.75,2.0,2.25,2.5 mm/min 共 5 个雨强,试验重复 1 次,共 10 场试验。为保证雨强的均匀性和稳定性,试验开始前先将梯田边坡用塑料布遮盖,在模型槽四周及其顶部 5 个位置对雨强进行率定,当雨强稳定后,迅速将塑料布揭开并开始计时。当梯田坡面上的水流呈层流状态,并由上到下流至出水口时视为产流开始,记录产流时间,之后重新开始计时,试验设计时长 60 min,试验产流后每 2 min 收集一次径流和泥沙全样。坡面出现细沟后,记录细沟出现的时间,出现细沟后每 2 min 用精度为 1 mm 的直尺测量沟长,当细沟长度超过 10 cm 后,沿细沟长度每 10 cm 测量一次宽度和深度,其平均值作为细沟宽度和深度,在细沟形态突变比较明显的部位增大测量密度,同时,用数码相机每 5 min 记录坡面形态,在坡面形态变化剧烈的时间段可加大照相机拍摄频率。试验结束后,将泥沙样静置 6 个小时后倒去上层清液,用烘干法(105°)将样品烘干后称量泥沙重量。

2 结果与分析

2.1 细沟出现的时间和雨强的关系

表 2 是梯田边坡坡面侵蚀过程中几个关键时刻。由表 2 可知,降雨强度越大,产流、跌坎和细沟出现的

时间越早。这是由于雨强越大,径流侵蚀力越大,加之雨滴击溅作用对土壤的破坏使得土壤的抗侵蚀性降低,进而径流侵蚀力大于土壤抗蚀力的时间提前。

2.2 细沟的形态发育特征

图 2A 表示的是各雨强条件下,细沟长度随时间的变化情况。该图的数据表明:各降雨强度下,细沟的长度均呈现出先剧烈增大后逐渐稳定的趋势。对数据进行分析发现:随着雨强的增大,沟长剧烈增长时的速率分别为 3.41 cm/min,5.14 cm/min 和 6.44 cm/min,细沟最终长度分别为 50.8 cm,80.4 cm 和 126 cm。这表明雨强越大,细沟发育到稳定阶段所需的时间越长,细沟发育越剧烈,细沟的最终长度越长。图 2B 表示不同雨强下细沟的宽度随时间的变化关系。细沟宽度总体随降雨强度呈增大趋势,且最终宽度随着雨强的增加而增大。产生这种现象的原因在于:在细沟发育初期,细沟逐渐发育,细沟加宽;之后在股流的掏蚀作用下,细沟的沟壁稳定性降低,土块失去平衡进而整个崩塌下来,致使细沟宽度呈现突变式增加;沟壁崩塌后,沟壁土层暂时达到了新的平衡,此时细沟宽度相对稳定;随着降雨的继续,股流的掏蚀作用将沉积在沟底的泥沙带走,细沟的深度再次增加,沟壁逐渐变陡,沟壁再次发生崩塌。(如 2.5 mm/min 雨强曲线所示)。图 2C 表示的是细沟的深度随时间的变化关系。由于沟岸崩塌所导致的泥沙临时性堆积现象和股流的掏蚀作用,雨强越大,细沟的最终深度越大。

表 2 细沟出现的时间和降雨强度之间的关系

坡度/ (°)	降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	产流 时间/min	跌坎出现 时间/min	细沟出现 时间/min
65	1.5	12.5	50.42	—
65	1.75	10.25	42.56	—
65	2	8.3	28.6	40.78
65	2.25	6.48	15.35	28.93
65	2.5	4.2	5.24	11.98

注:—表示未产生细沟。

2.3 侵蚀产沙和细沟发育过程的关系

研究表明,沟壁的崩塌、侧蚀具有较强的随机性,而细沟长度能较好的代表细沟的发育过程,为了更好的研究细沟的发育过程和侵蚀产沙的关系,将沟长的发育过程和侵蚀速率之间的关系点绘见图 3。

细沟出现并开始发育的时间和侵蚀速率迅速增长的时间相一致。细沟发育初期,侵蚀严重,细沟长度增长迅速,侵蚀速率急剧增加,此时细沟长度变化曲线的斜率和侵蚀速率变化的曲线斜率均最陡;在细

沟发育中后期,侵蚀速率降低,细沟沟长的增长逐渐变缓,此时坡面侵蚀速率趋于平稳,并出现波动,这主要是细沟侵蚀过程逐渐停止,而沟壁崩塌和侧蚀现象时有发生所造成的。通过 SPSS 17.0 软件对数据进行相关性分析发现,各雨强条件下,沟长和侵蚀速率的相关性系数 P 分别为 0.912,0.864,0.831, Sig. 值均小于 0.001,由此说明,细沟长度的发育过程和侵蚀速率的变化之间呈极显著的正相关关系。通过对比发现,坡面径流含沙量的变化情况与坡面细沟形态变化过程基本一致,这跟 Catherine 等^[21]学者的研究结果相同。

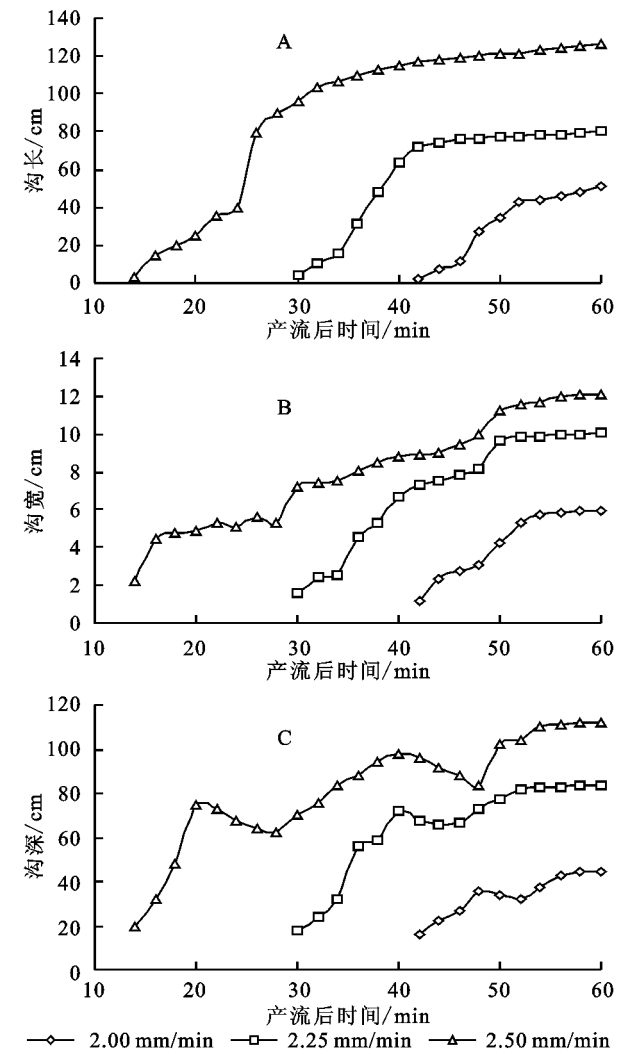


图 2 细沟的长度、宽度、深度随时间变化的变化

2.4 梯田边坡崩塌过程

不同降雨强度下(2.0 mm/min, 2.25 mm/min 和 2.5 mm/min),梯田边坡崩塌过程相同,主要包括土体裂隙的产生和崩塌的形成两个过程。首先,坡面上会产生跌坎、裂隙,裂隙的产生是崩塌形成的关键。梯田边坡土体在降雨作用下,会逐渐由不饱和变为饱和状态,这就会降低黄土的抗剪强度,导致坡体在自

重力和向外的渗透力下开始向临空方向蠕动。边坡土体强度的逐渐减弱,最终会因抗剪强度小于剪切应力而发生失稳。本次试验边坡为冲蚀引起的局部浅层崩塌破坏,其发展过程分为 3 个阶段:第 1 阶段为坡面跌坎的形成;第 2 阶段为随着降雨的持续,坡面发生冲蚀破坏,跌坎相互贯通形成细沟;第 3 阶段为浅层崩塌的产生,细沟沟体由坡脚向坡顶逐渐扩展,后期靠近坡顶的坡面出现浅层崩塌(图 4)。该种破坏模式与文献[22]研究结果相似。

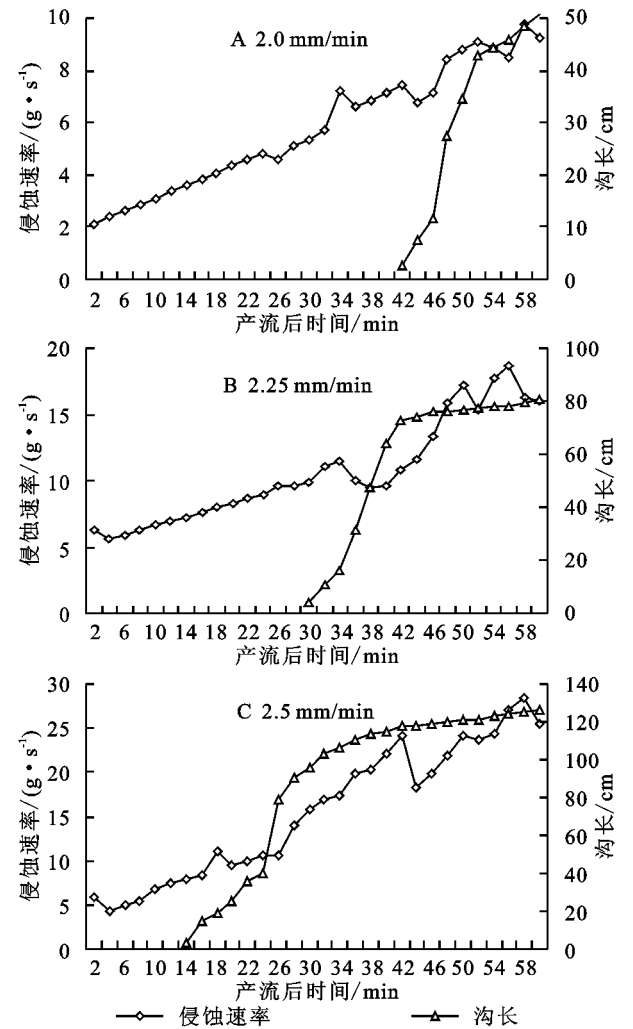


图 3 细沟长度和侵蚀速率之间的关系

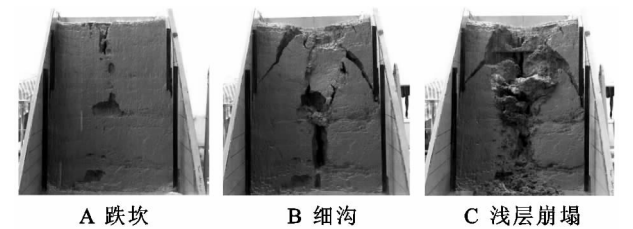


图 4 崩塌失稳模式

3 结论与建议

(1) 降雨强度越大,产流、跌坎和细沟出现的时间越早且总体上细沟的平均长、宽和深度随降雨强度的增

加而增加,细沟出现的时间分别为:40.78,28.93,11.98 min;不同雨强下,细沟形态变化趋势相同,细沟的长度均呈现出先剧烈增大后逐渐稳定的趋势;细沟宽度总体呈增大的特点;细沟深度总体呈增大趋势。

(2) 不同降雨强度条件下,细沟出现并开始发育的时间和侵蚀速率迅速增长的时间相一致,沟长和侵蚀速率的相关性系数 P 分别为 0.912,0.864,0.831, Sig. 值均小于 0.001,由此说明,细沟长度的发育过程和侵蚀速率的变化之间呈极显著的正相关关系。当 $1.5 \text{ mm/min} \leq I \leq 1.75 \text{ mm/min}$ 时,坡面未出现细沟,坡面侵蚀主要是坡面侵蚀,当 $2.0 \text{ mm/min} \leq I \leq 2.5 \text{ mm/min}$ 时,坡面出现细沟,坡面侵蚀主要为细沟侵蚀,细沟出现并开始发育的时间和侵蚀速率迅速增长的时间相一致,沟长和侵蚀速率的相关性系数 P 分别为 0.912,0.864,0.831, Sig. 值均小于 0.001,由此说明,细沟长度的发育过程和侵蚀速率的变化之间呈极显著的正相关关系。

(3) 不同降雨强度下,梯田边坡发生崩塌的过程分为 3 个阶段:跌坎的形成、有跌坎相互贯通形成细沟、由于表层土体悬空靠近坡顶的坡面出现浅层崩塌。

本文基于室内模拟降雨条件下得出的以上结论,鉴于田面宽度仅为 1.1 m,其对土梯田边坡侵蚀影响需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王计平,杨磊,卫伟,等. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响:景观水平与多尺度比较[J]. 生态学报, 2011,31(19):5531-5541.
- [2] 王超,甄霖,杜秉贞,等. 黄土高原典型区退耕还林还草工程实施效果实证分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(7):850-858.
- [3] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rates of sheet and rill erosion in Germany: A meta-analysis[J]. Geomorphology, 2009,111(3):182-193.
- [4] 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: 4415-4435.
- [5] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究[J]. 泥沙研究, 1998(1):52-59.
- [6] 郑良勇,李占斌,李鹏,等. 稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2010,26(3):87-91.
- [7] 原立峰,周启刚. 流域侵蚀产沙系统的复杂性[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2008,22(4):112-116.
- [8] 蔡强国,朱远达,王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J]. 水科学进展, 2004,15(1):12-18.
- [9] Bryan R B, Poesen J. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 14(3):211-231.
- [10] 雷廷武,姚春梅,张晴雯,等. 细沟侵蚀动态过程模拟数学模型和有限元计算方法[J]. 农业工程学报, 2004,20(4):7-12.
- [11] 张玉斌,郑粉莉,曹宁. 近地表土壤水分条件对坡面农业非点源污染物运移的影响[J]. 环境科学, 2009,11(2):376-383.
- [12] 王占礼,王亚云,黄新会,等. 黄土裸坡土壤侵蚀过程研究[J]. 水土保持研究, 2004,11(4):84-87.
- [13] 和继军,吕烨,宫辉力,等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J]. 水利学报, 2013,44(4):398-405.
- [14] Zheng F L, Tang K L, Zhou P H. Rill erosion development and its control on steep slope land of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1987, 1(1):36-48.
- [15] 韩鹏,倪晋仁,王兴奎. 黄土坡面细沟发育过程中的重力侵蚀实验研究[J]. 水利学报, 2003,33(1):51-56,61.
- [16] Bruno C, Stefano C D, Ferro V. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008,33(2):263-279.
- [17] 雷会珠,杨勤科,焦锋. 黄土高原丘陵沟壑区的土壤侵蚀与土地利用[J]. 水土保持研究, 2000,7(2):48-51.
- [18] 雷阿林,唐克丽. 土壤侵蚀模型试验的原型选定问题[J]. 水土保持学报, 1995(3):60-65.
- [19] 郑粉莉,赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004,11(4):177-178.
- [20] 陈伟,骆亚生,武彩萍. 人工降雨作用下黄土边坡的室内模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(5):100-104.
- [21] Catherine B, Marcel S, Dirk R Z, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010,35(12):1456-1467.
- [22] Acharya G, Cochrane T A. Rainfall induced shallow-landslides on sandy soil and impacts on sediment discharge: A flume based investigation[C] // The 12th Conference Of international Association for Computer Methods And advances in Geomechanics, Goa, 2008.