

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.006

不同雨强和坡度条件海涂盐土边坡侵蚀细沟发育过程

郑加兴¹, 余冬立^{1,2}, 徐翠兰³, 刘冬冬¹, 沈 晖¹

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098;

3. 江苏省土地开发整理中心, 江苏 南京 210017)

摘要:采用室内人工模拟降雨试验,在不同坡度(11.3°、21.8°、35.0°)和降雨强度(85 mm/h、110 mm/h、125 mm/h)条件下,模拟海涂盐土边坡细沟发育过程。坡面侵蚀细沟发育动态采用数码摄像进行监测,通过 Image-Pro Plus (IPP) 6 图像分析软件对图像和数据进行处理。结果表明:(a)不同坡度和降雨强度条件下,径流产生后,很快在坡面形成细沟且细沟沟网密度变化较快;细沟数量、细沟深度、细沟平均宽度和细沟密度均随降雨时间延长而增大。(b)缓坡度条件下,土壤跌坑发育慢,细沟侵蚀率低;随着坡度增大,坡面跌坑形成后水流聚集迅速,水流侵蚀冲刷力强,细沟发育快。(c)细沟发育越深,坡面细沟数量也越多;坡面侵蚀率与细沟平均深度及水流雷诺数分别在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平上呈显著的正线性相关关系。

关键词:海涂盐土边坡;边坡坡度;降雨强度;细沟侵蚀;相关性分析

中图分类号:S157 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2015)04-0313-06

Evolution process of erosion rill on saline soil slope in coastal reclamation with different rainfall intensities and slope gradients

ZHENG Jiaying¹, SHE Dongli^{1,2}, XU Cuilan³, LIU Dongdong¹, SHEN Hui¹

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Jiangsu Land Consolidation and Rehabilitation Center, Nanjing 210017, China)

Abstract: Simulated rainfall experiments were conducted with three slope gradients (11.3°, 21.8°, and 35.0°) and three rainfall intensities (85 mm/h, 110 mm/h, and 125 mm/h) to investigate the rill evolution process on saline soil slopes in coastal reclamation. The evolution process of rill erosion was recorded with a digital camera, and then the image data were analyzed with Image-Pro Plus (IPP) 6 software. The results are as follows: (a) Rills formed soon after the runoff occurred and the rill density changed rapidly with different slope gradients and rainfall intensities. The rill number, rill depth, average rill width, and rill density increased with the rainfall duration. (b) At low slope gradients the drop pits developed slowly, and the rill erosion rate was low. With the increase of the slope gradient, water concentrated in the drop pits rapidly, and the erosion rate increased, leading to rapid evolution of rills. (c) The number of rills increased with the rill depth. There were significant linear positive correlations of the slope erosion rate with the average depth of rills and Re at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively.

Key words: saline soil slope in coastal reclamation; slope gradient; rainfall intensity; rill erosion; correlation analysis

收稿日期: 2014-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(51109063, 41471180)

作者简介: 郑加兴(1989—),男,安徽池州人,硕士研究生,主要从事水资源规划研究。E-mail: 846766720@qq.com

通信作者: 余冬立,教授。E-mail: shedongli@hhu.edu.cn

我国是世界土壤侵蚀最严重的国家之一,其土壤侵蚀范围遍及全国各地,威胁社会和农业可持续发展^[1-2]。细沟侵蚀为土壤侵蚀的重要类型之一,是细沟沟岸和沟底土壤被细沟中的股流所分散、剥离和输移的过程。侵蚀细沟的产生将加剧坡面侵蚀程度,细沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的绝大部分^[3-4]。细沟侵蚀发育过程及侵蚀产沙特征的研究对水土保持规划、土壤侵蚀模型模拟等方面具有重要意义。

细沟侵蚀的发生取决于坡面水流水力学特性和坡面下垫面条件,包括降雨径流条件、土壤性质、地形因素、坡度、降雨雨强等。郑粉莉等^[5-7]、李君兰等^[8]研究了土壤侵蚀过程中包括细沟侵蚀在内的不同侵蚀方式发生的临界判定式,所构建的侵蚀形态演变过程动态监测方法与模拟模型填补了该领域研究空白,并为流域侵蚀防治和预报模型建立提供了重要的科学依据。Gomez等^[9]研究了土壤表面粗糙度对细沟发育过程的影响。作为降雨、径流水动力作用界面,土壤是决定侵蚀过程最重要的内在因素。不同类型的土壤,其结构稳定性与土壤抵抗降雨溅蚀能力、降雨入渗以及土壤结皮形成、径流的冲刷和泥沙的颗粒特性等侵蚀特性方面都存在着很大的差异,因此雨滴击溅-径流冲刷下坡面侵蚀细沟的发育过程及其水力学机理也有所差异。目前我国在这方面的研究主要集中于西北黄土、东北黑土、南方红壤等,对于滩涂盐碱地粉砂土的研究资料较少,极大限制了对该类型土壤细沟侵蚀过程的研究^[10]。笔者在模拟降雨试验的基础上,分析海涂围垦区盐碱土在坡度和降雨雨强双因素条件下细沟的发育过程,以期防治该区域水利工程边坡侵蚀提供科学支持。

1 试验材料与方法

1.1 土壤材料

试验土样取自江苏省南通市如东县东陵垦区(121°22'E, 32°36'N)。土壤砂粒(粒径0.25~0.05 mm)、粉粒(粒径0.05~0.002 mm)、和黏粒(粒径小于0.002 mm)的质量分数分别为38.6%、52.9%和8.5%,有机质质量比为3.26 g/kg,钠离子质量比为1.6 g/kg,交换性钠的质量分数为68.9%,1:5土样和水经过振荡、离心后的电导率为5.98 mS/cm。试验土样经自然风干后过4 mm筛,充分混合均匀。

1.2 试验设计

模拟降雨试验采用组合侧喷式单喷头降雨器^[11],降雨喷头组成包括喷头体、碎流挡板和出流孔板部件。降雨器支架高度为4 m,雨滴上喷高度为0.5 m,雨滴到达水平地面的高度为4.5 m,雨滴降落速度可达到自然雨滴速度的95%以上,降雨均匀度为87%。降雨区采用2个喷头互喷式,相隔距离5 m,形成叠加降雨区。每个喷头装置连接1根带有控制阀门的供水管,供水采用中型泵取水(扬程45 m,流量6 m³/s)。通过调节压力,可获得不同的降雨强度(本试验降雨强度分别为85 mm/h、110 mm/h、125 mm/h)。每次试验降雨持续时间为72 min。试验用土槽采用Meyer^[12]类似的设计。土槽长50 cm、宽30 cm、高15 cm。土槽底部铺设直径2~10 mm的石子,厚度约为4.5 cm,装土前再铺1层纱布,保持平整,装填土壤密度控制在1.3 g/cm³左右。土槽坡度设置为11.3°、21.8°、35.0°共3个梯度。每个处理进行2次重复。

坡面侵蚀过程中细沟发育动态采用数码摄像记录方式进行监测,通过Image-Pro Plus (IPP) 6图像分析软件对图像和数据进行处理以得出细沟发育的动态变化过程。本文主要选取各场降雨试验下坡面产生径流后3 min、6 min和9 min细沟发育过程进行绘图对比研究。同时,坡面开始产生径流后每隔2 min取径流、泥沙样,观察径流、侵蚀动态变化。采用高锰酸钾染色剂法结合数码摄像机录像与IPP图像处理分析方法,每隔2 min分别测定细沟数量和细沟间的水流速度。试验过程中降雨水温18~22℃。根据实测降雨强度资料与径流资料,计算坡面水流动力学参数^[13],包括水流雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 和曼宁糙率系数 n 。试验数据采用Excell和Spss12.0进行分析处理。

2 结果分析

2.1 降雨强度对坡面细沟发育过程的影响

降雨强度对坡面细沟的形成和发育有着重要影响^[14]。图1呈现了坡度为35.0°情况下,降雨强度分别为85 mm/h、110 mm/h、125 mm/h时各次降雨下盐土坡面细沟形态发育过程。海涂围垦区盐土粉砂性强,降雨过程中坡面开始产流,细沟即开始发育,随着产流时间的推进,坡面土壤细沟数量增加,细沟宽度和深度不断增大,之后趋于稳定。对各次降雨试验下坡面侵蚀细沟数、宽度和深度发育的统计结果见表1。不同降雨强度下,海涂盐土坡面细沟的发育主要体现在细沟数量和深度的发育。各径流小区坡面经溅蚀、表土入渗饱和等过程后,从坡面中下部

开始产生径流。在降雨水流的淘蚀作用下,坡面中下部逐渐出现跌坑。跌坑处由于积水形成一股水流,增加了水流的侵蚀力,同时土壤表面形态的变化遭到破坏,使土壤抗侵蚀能力下降,直至径流在该处突然下泄,跌坑不断向坡面上部发展,坡面侵蚀细沟形成。随着降雨过程的进行,水流对细沟的沟底切割加深,侵蚀量增大。

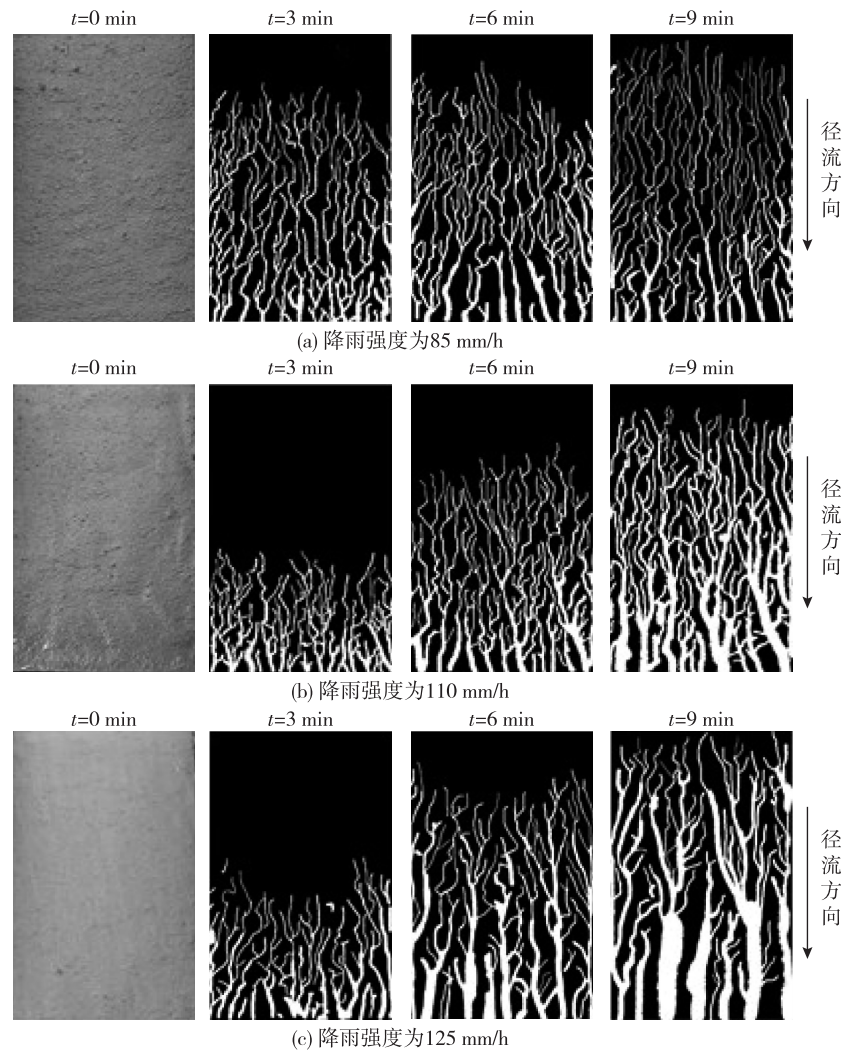


图 1 不同降雨强度作用下细沟发育过程

Fig. 1 Rill evolution process with different rainfall intensities

坡度为 35.0°、降雨强度分别为 85 mm/h、110 mm/h、125 mm/h 的坡面,开始产流的时间略有差异,分别为33 min、29 min 和 27 min。从各坡面产流后 3 min 细沟发育的图像可以看出海涂盐土坡面降雨产流后不久就能形成细沟,此时细沟数量分别为 121 条、90 条、63 条,细沟平均宽度分别为 0.31 cm、0.27 cm、0.34 cm。随着降雨侵蚀的继续进行,坡面细沟沟壁稳定性降低,加上此时沟壁土层含水量不断增大,土块逐渐失去平衡,坍塌至沟底,导致细沟宽度相应地增加。径流产生 9 min 的时候,细沟网已经发育完全,此时各降雨强度下坡面细沟数量分别为 137 条、125 条、81 条,细沟平均宽度分别为 0.46 cm、0.34 cm、0.51 cm。在降雨强度为 85 mm/h、

表 1 不同降雨强度下径流产流后细沟主要特征参数
(坡度为 35.0°)

Table 1 Rill parameters after runoff with different rainfall intensities (at slope gradient of 35.0°)					
降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	径流产流 时间/min	细沟 数量/条	细沟平均 深度/cm	细沟平均 宽度/cm	细沟 密度/%
85	3	121	0.34	0.31	17.0
	6	130	1.79	0.41	20.0
	9	137	3.19	0.46	19.2
110	3	90	0.81	0.27	10.0
	6	117	2.40	0.35	16.3
	9	125	2.48	0.34	27.0
125	3	63	0.42	0.34	8.9
	6	96	1.85	0.35	18.0
	9	81	2.47	0.51	27.0

注:细沟密度是细沟沟网面积占坡面面积的百分比。

110 mm/h、125 mm/h 的情况下,细沟侵蚀密度分别为 19.15%、27.03%、27.01%,较细沟发育初期(产流后 3 min)分别增加了 1.6 倍、2.7 倍、3.0 倍,细沟密度随时间的变化也不断增加。

2.2 坡度对细沟动态发育过程的影响

如图 2 所示,降雨强度为 110 mm/h,坡度分别为 11.3°、21.8°和 35.0°时,细沟发育过程明显。坡度为 11.3°时,径流产生初期,坡面溅蚀不明显;跌坑产生后,水流需较长时间在跌坑内聚集,水流侵蚀力弱,跌坑向上发育变慢,延缓了细沟的形成;随着坡度增大,坡面跌坑形成后水流聚集迅速,水流侵蚀冲刷力增强,细沟发育加快。

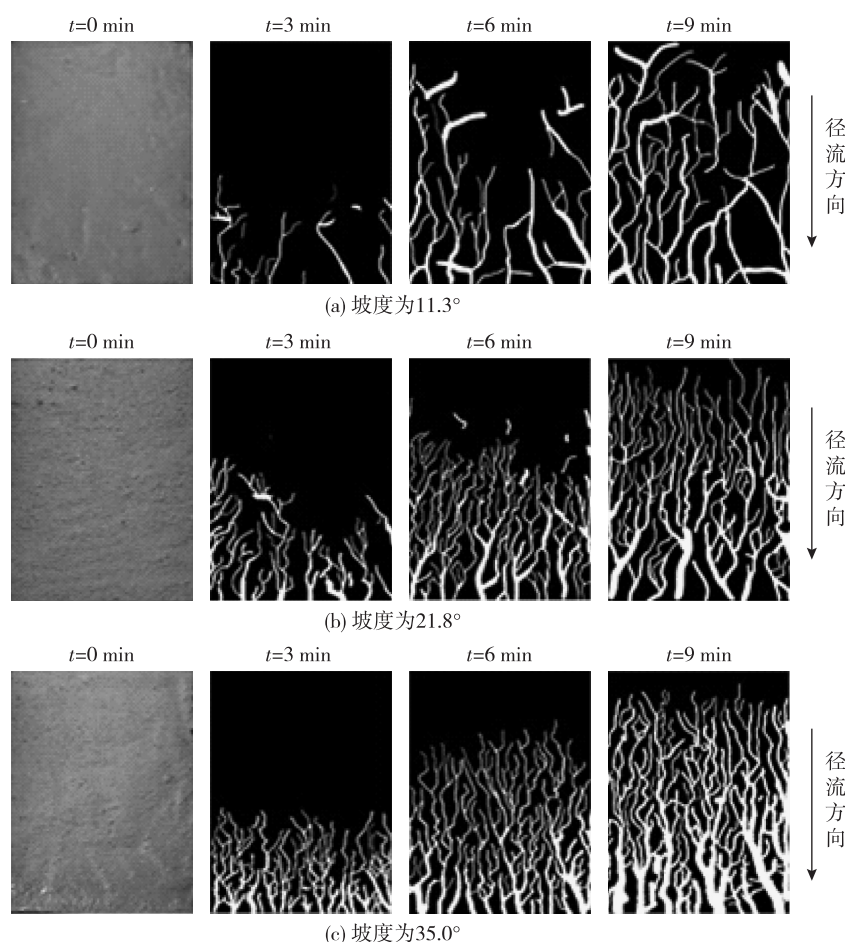


图 2 不同坡度坡面细沟发育过程

Fig. 2 Rill evolution process with different slope gradients

表 2 是降雨强度为 110 mm/h,坡度分别为 11.3°、21.8°和 35.0°情况下,径流产生后细沟发育参数。随着降雨时间的持续,细沟数量不断增加;坡度越大,细沟数量越多,在径流开始 3 min 时,坡度为 35.0°的细沟数量是坡度为 21.8°和 11.3°的 1.43 倍和 3.75 倍;坡面产流后 9 min,坡度为 35.0°的细沟数量是坡度为 21.8°和 11.3°的 1.14 倍和 1.79 倍;平均细沟深度和宽度随着时间的持续而增大,坡度为 21.8°时,细沟最大平均深度分别是坡度在 11.3°和 35°下最大平均深度的 13.1 倍和 1.16 倍。

2.3 侵蚀参数与水力学参数的相关性分析

坡面细沟的发育是坡面水流冲刷与土壤抗蚀作用的综合结果^[15]。表 3 给出了部分试验参数。不同降雨强度和坡度条件下,径流产生的时间并没有显著的规律性,这与土壤初始状态有关。降雨强度相同,坡度变化的情况下,总产沙量随时间变化明显。在降雨强度为 110 mm/h、坡度为 35.0°时的总产沙量是坡度为 21.8°和 11.3°时总产沙量的 2.31 倍和 9.97 倍。坡度为 11.3°和 21.8°,降雨强度变化的情况下,总产沙量不断增大。坡度为 35.0°、降雨强度变化的情况下,总产沙量先增大、后减小。说明存在一个临界坡度,在降雨强度变化的情况下总产沙量先增加到最大值,然后逐渐减小并达到稳定。

表 2 不同坡度下径流产流后细沟的主要特征参数

Table 2 Rill parameters after runoff with different slope gradients

坡度/ (°)	径流产流 时间/min	细沟 数量/条	细沟平均 深度/cm	细沟平均 宽度/cm	细沟 密度/%
11.3	3	24	0.15	0.31	2.3
	6	44	0.20	0.41	7.7
	9	70	0.28	0.46	14.2
21.8	3	63	1.40	0.27	4.5
	6	116	2.87	0.35	14.4
	9	110	3.72	0.34	17.4
35.0	3	90	0.34	0.34	10.0
	6	117	1.79	0.35	16.3
	9	125	3.19	0.51	27.1

表 3 不同坡度和降雨强度下的侵蚀参数

Table 3 Erosion parameters with different slope gradients and rainfall intensities

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	径流产生 时间/min	坡面平均流速/ (cm·s ⁻¹)	总产 沙量/g
85	11.3	31	14.7	427.40
	21.8	28	19.2	2543.32
	35.0	33	18.4	5310.68
110	11.3	22	22.3	743.23
	21.8	21	27.1	3200.57
	35.0	29	26.5	7406.93
125	11.3	24	27.0	1439.56
	21.8	21	32.6	4005.78
	35.0	27	39.0	6915.00

为了研究水力参数与细沟发育过程的关系,试验取用坡面产生径流后 0~9 min 相应的试验数据,利用 Spss 软件进行了 Pearson 相关性检验(双侧检验),结果如表 4 所示。研究表明,细沟平均深度与细沟数量在 0.01 水平下两两显著相关,说明细沟平均深度越深,坡面形成的细沟数量也就越多;细沟平均深度与坡面沟网密度、坡面侵蚀率在 0.05 水平下两两显著相关;坡面侵蚀率与雷诺数在 0.01 水平下显著相关且随着坡面侵蚀率与水流雷诺数成线性相关($Rs=1.9576Re-4.6432$; $R^2=0.71$),这样的结果可能缘于雷诺数的增加,水流冲刷形成的惯性力作用增强,产流量增大,产流挟带的泥沙量增加,坡面侵蚀率也随之增加;流速与弗劳德数在 0.01 水平下显著相关。然而坡面侵蚀率与流速、弗劳德数、曼宁糙率系数等水力学参数关系不明显,需要进一步研究。

表 4 细沟发育过程与水力学参数相关性分析结果

Table 4 Results of correlation analysis between rill evolution process and hydraulic parameters

参数	平均细沟 深度	坡面 侵蚀率	细沟 数量	沟网 密度	流速	雷诺数	弗劳德数	曼宁糙率 系数
平均细沟深度	1	0.538 *	0.676 **	0.469 *	0.257	0.368	0.122	-0.074
坡面侵蚀率		1	-0.045	0.387	0.050	0.842 **	-0.036	0.028
细沟数量			1	0.452	0.249	0.196	0.143	-0.229
沟网密度				1	0.270	0.723 *	0.081	-0.095
流 速					1	0.248	0.975 **	-0.571
雷诺数						1	0.099	-0.151
弗劳德数							1	-0.481
曼宁糙率系数								1

注:*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 结 语

细态发育过程的研究对土壤侵蚀过程演变研究具有重要意义。细沟发育受土壤质地、坡度、降雨强度等因素的影响。笔者采用人工模拟降雨,在不同坡度和降雨强度条件下对细沟发育过程和水力参数进行分析,主要结论如下:

- a. 降雨强度对海涂盐土坡面细沟动态发育过程的影响明显;不同降雨强度下,海涂盐土坡面细沟的发育主要体现在细沟数量和深度的发育。
- b. 在不同坡度和降雨强度条件下,海涂盐土坡面细沟数量、细沟深度、细沟平均宽度和细沟密度随着降雨历时的持续而不断增加。
- c. 缓坡条件下,海涂盐土土壤跌坑发育慢,细沟侵蚀率低;随着坡度增大,坡面跌坑形成后水流聚集迅速,水流侵蚀冲刷力强,细沟发育快。
- d. 细沟发育越深,坡面细沟数量也越多;海涂盐土坡面侵蚀率与细沟平均深度及水流雷诺数分别在

$p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平上呈显著的正线性相关关系。

参考文献:

- [1] SHE Dongli, FEI Yuanhang, LIU Zhipeng. Soil erosion characteristics on saline soil hillslope in coastal region of China: field investigation and rainfall simulation experiment [J]. *Catena*, 2014, 121: 176-185.
- [2] 刘晓冰, 周克勤, 苗淑杰, 等. 土壤侵蚀影响作物产量及其因素分析 [J]. *土壤与作物*, 2012, 1(4): 205-211. (LIU Xiaobing, ZHOU Keqin, MIAO Shujie, et al. Crop yield and relevant factors as affected by soil erosion [J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(4): 205-211. (in Chinese))
- [3] KIMARO D N, POESEN J, MSANYA B M, et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: interrill and rill erosion [J]. *Catena*, 2008, 75: 38-44.
- [4] 张晴雯, 雷廷武, 高佩玲, 等. 黄土区细沟侵蚀过程中输沙能力确定的解析法 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37(5): 699-703. (ZHANG Qingwen, LEI Tingwu, GAO Peiling, et al. An analytic method for determining transport capacity of concentrated flow in eroding rills [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(5): 699-703. (in Chinese))
- [5] 郑粉莉, 唐克丽, 陈文亮. 细沟侵蚀过程的研究方法 [J]. *中国科学院水利部西北水土保持研究所*, 1993, 17(1): 107-111. (ZHENG Fenli, TANG Keli, CHEN Wenliang. Research methods of rill erosion process [J]. *Memoir of NISWC, Academic Sinica and Ministry of Water Resources*, 1993, 17(1): 107-111. (in Chinese))
- [6] 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. (Zheng Fenli. The critical slope length and slope when rill erosion happens [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1989(8): 19-24. (in Chinese))
- [7] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生发展和防治途径的探讨 [J]. *水土保持学报*, 1987, 1(1): 36-48. (Zheng Fenli, Tang Keli, Zhou Peihua. Approach to the genesis and development of roll erosion on slope land and the way to control [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987, 1(1): 36-48. (in Chinese))
- [8] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(6): 8-13. (LI Junlan, CAI Qiangguo, SUN Liying, et al. Analysis of interaction effects of rainfall intensity, slope degree and slope length on rill erosion [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(6): 8-13. (in Chinese))
- [9] GOMEZ J A, DARBOUX F, NEARING M A. Development and evolution of rill network under simulated rainfall [J]. *Water Resource Research*, 2003, 1148: 1029-2002.
- [10] LIU Dongdong, SHE Dongli, YU Shuang'en, et al. Rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation [J]. *Catena*, 2015, 128: 54-62.
- [11] 陈文亮. 组合侧喷式野外人工模拟降雨装置 [J]. *水土保持通报*, 1984(5): 43-48. (CHEN Wenliang. Artificial simulate rainfall device of combination of side jet [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1984(5): 43-48. (in Chinese))
- [12] GUO Tailong, WANG Qianjiu, LI Dingqiang, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion [J]. *Catena*, 2013, 107: 145-153.
- [13] 余冬立, 刘冬冬, 彭世彰, 等. 海涂围垦区排灌工程边坡土壤侵蚀过程的水动力学特征 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 1-5. (She Dongli, Liu Dongdong, Peng Shizhang, et al. Hydrodynamic characters of runoff in soil erosion processes on drainage-irrigation engineering slope of farmland in coastal region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 1-5. (in Chinese))
- [14] BERGER C, SCHULZE M, RIEKE D, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35: 1456-1467.
- [15] 张永东, 吴淑芳, 冯浩, 等. 黄土陡坡细沟侵蚀动态发育过程及其发生临界动力条件试验研究 [J]. *泥沙研究*, 2013(2): 25-32. (ZHANG Yongdong, WU Shufang, FENG Hao, et al. Experimental study of rill dynamic development process and its critical dynamic conditions on loess slope [J]. *Journal of Sediment Research*, 2013(2): 25-32. (in Chinese))