

辽西黄土缓坡冲刷破坏及雨水入渗规律

马栋和¹,王常明²,黄如卉¹,刘忠富¹,马玉民¹

(1. 中水东北勘测设计研究有限责任公司,吉林 长春 130000;

2. 吉林大学建设工程学院,吉林 长春 130000)

摘要:针对辽西地区黄土缓坡降雨冲蚀破坏严重的问题,结合野外现场调查、室内物理模拟试验及SEEP/W渗流数值模拟,监测了坡内湿润锋的发展趋势、坡面土体体积含水率的变化,研究了黄土缓坡的冲刷破坏特征及降雨入渗规律。研究表明:辽西地区黄土缓坡坡面在降雨冲蚀作用下,按横向坡面形态可分为V形、U形、梯形、三角形4种冲沟。随着降雨的持续,浸润深度逐渐加深,雨水在坡内的浸润线不平行于边坡线,呈现出上浅下深的规律。辽西黄土缓坡坡面经历短时间降雨冲刷时,主要产生表层面蚀破坏;经历长时间降雨冲刷时,坡脚被冲刷掏空,坡面产生陷穴,进而可诱发边坡灾害。

关键词:黄土缓坡;降雨入渗;坡面冲刷;物理模型试验;渗流数值模拟

中图分类号:TU444 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)06-0029-04

Erosion damage and rainfall infiltration characteristics of loess gentle slope in western Liaoning//MA Donghe¹, WANG Changming², HUANG Ruhui¹, LIU Zhongfu¹, MA Yumin¹(1. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130000, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130000, China)

Abstract: To solve the problem of serious loess gentle slope erosion caused by rainfall infiltration in western Liaoning, site investigation, laboratory physical simulation experiments, and SEEP/W numerical simulation were combined to monitor the development trend of the wetting front within the slope and the variation of the volumetric water content of the slope soil, and the characteristics of loess slope erosion and regularity of the rainfall infiltration were studied. The results show that, caused by the rainfall erosion, the cross-sectional shape of gullies of the loess gentle slope can be divided into four types: V-shaped, U-shaped, trapezoid, and triangle shapes. Along with a continuous rainfall, the depth of invasion increases gradually, but the infiltration lines of rainwater in the slope are not parallel to the slope edge lines, showing a law of less infiltration at the top and more infiltration at the bottom of the slope. When the western Liaoning loess slope is eroded by rainfall for a short period of time, it mainly produces surface erosion; but for prolonged rainfall erosion, the base of the slope becomes hollow and sinkholes appear on the slope surface, finally inducing slope disasters.

Key words: loess gentle slope; rainfall infiltration; slope surface erosion; physical simulation experiment; seepage numerical simulation

随着我国经济的飞速发展,公路建设速度加快,公路越来越多地穿越复杂地形地貌区域,导致公路工程边坡问题也日益增多^[1]。黄土公路边坡稳定及坡面抗冲蚀性一直是人们普遍关注的难题,降雨引起坡面土体强度降低,再加上渗流力的作用,黄土边坡的稳定性降低,导致边坡发生冲蚀及滑动破坏。因此,了解雨水在边坡上的渗流形态,对进一步研究雨水在边坡上的入渗规律,以及分析降雨入渗条件下的路堤边坡稳定性,都具有重要意义。

现行 GB50025—2004《湿陷性黄土地区建筑地基规范》首次将辽宁西部列为黄土边缘区,目前仅有少数学者对该地区的黄土进行了初步研究^[2-4]。Foster等^[5]从泥沙输移角度将黄土侵蚀过程分为细沟间侵蚀和细沟侵蚀两个阶段;郑粉莉等^[6]对黄土坡面土壤水力侵蚀过程进行研究,将其划分为溅蚀、片蚀、沟蚀等几个阶段,但未对冲沟横向形态进行研究;罗斌等^[7]对花岗岩残积路堑边坡冲蚀特征进行了研究,将沟槽发展的横向形态划分为V形、U形、

基金项目:国家自然科学基金(40972171)
作者简介:马栋和(1986—),男,甘肃民勤人,工程师,博士,主要从事岩土力学研究。E-mail:123madonghe@163.com
通信作者:王常明(1966—),男,浙江绍兴人,教授,博士,主要从事岩土力学教学与研究。E-mail:wangcm@jlu.edu.cn

梯形3种,但未对不同坡度的坡面冲蚀特征进行区分。鉴于目前辽西黄土地区存在小坡度边坡冲刷问题,本文通过对冲刷破坏现状的野外现场调查及室内物理模拟试验,分析坡面冲刷破坏特征及降雨入渗特征,并采用SEEP/W模块,建立饱和-非饱和渗流数值模型,深入研究辽西黄土缓坡坡面冲刷破坏规律。

1 坡面冲刷破坏特征

辽西地区黄土主要分布于河流冲积、冲洪积河谷平原及山前地貌上,厚度多为2~15 m,最大可达30 m,且分布范围广^[8]。区内黄土为晚更新世冲洪积次生马兰黄土,且垂向节理裂隙发育,在降雨作用下极易发生冲蚀破坏。降雨初期,具有一定动能的雨滴直接击打到干燥的坡面土体,由于颗粒之间被空气充填,土颗粒来不及吸收雨水,细小的土粒即被雨滴溅散。此后,坡面低洼处开始产生积水,在重力作用下分散开向坡下流动,形成层流,层流在雨滴击溅及坡面地形起伏的作用下,具有一定的侵蚀能力,对坡面产生片蚀;当径流量增加到一定量时,无法继续保持成层水流,在低洼区域逐渐汇集成股流,股流的侵蚀作用比较集中,沟蚀作用一般分为细沟冲蚀、浅沟冲蚀、冲沟冲蚀及淘蚀等阶段。

2 坡面冲刷模拟试验

2.1 试验装置

相比现场冲刷试验,室内物理模拟试验周期短,试验参数方便控制^[9-13]。为揭示缓倾角黄土边坡坡面的水流侵蚀特征,笔者自行研制了小型边坡降雨及观测装置,开展室内边坡降雨冲刷破坏模拟试验。试验装置主要由人工降雨单元、供水系统、排水系统、试验槽、监测系统部分组成,如图1所示。

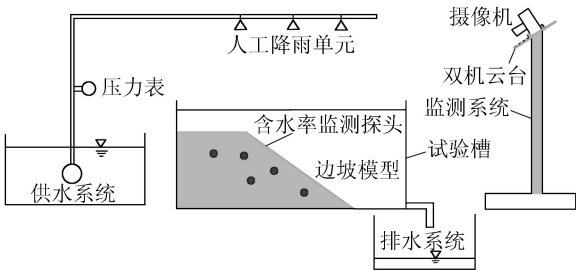


图1 室内模拟试验装置

2.2 模型的制作

为确保试验结果的合理性,模型采用统一的筑坡方法——分层夯实法来填筑边坡。填筑边坡时分层填土,每层厚10 cm;每层填土完成后,利用便携式触探仪在夯实范围内均匀触探,以控制每层填土压实度保持一致。触探完毕后,将逐个土层表面“打毛”。为便于密度的控制及模型的成型,采用先填

满、后开挖的方式,以形成不同坡度的坡面和排水沟。在坡面安置一些变形监测物(如颜色鲜亮的聚乙烯圆粒),以监测坡面变形过程。

2.3 试验结果

通过野外现场调查与室内物理模拟试验观察,按横向剖面形态黄土缓坡(坡度小于或等于40°)坡面冲沟大致可分为以下4种形态:V形、U形、梯形及三角形,如图2所示。

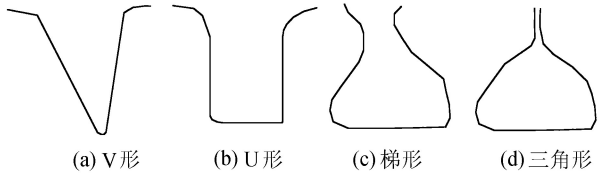


图2 坡面冲沟横向剖面形态

这4种形态的冲沟在一定程度上反映了黄土边坡坡面冲沟发育的不同阶段和纵向的不同位置:V形冲沟主要出现在沟状侵蚀阶段初期,位于坡面的顶部,由坡顶汇水沿坡面集中流动切割而形成较浅冲沟,对应于细沟冲蚀阶段。U形冲沟大致与浅沟冲蚀相对应,出现在沟状侵蚀中期,由V形冲沟持续被水流冲刷后逐渐加深、加长而形成,可延伸贯通至整个坡面。随着冲刷过程的继续,越来越多的产流沿坡面细沟流动,此时水流的下切动力较大,持续切割、扩展坡面细沟,当U形冲沟沟槽被冲蚀至一定程度,水流的下切动力减弱,便开始横向掏蚀沟槽底部的颗粒,在沟槽底部形成一个“腔体”,即梯形冲沟。三角形冲沟主要出现在沟蚀阶段的后期,此时沟槽开口处两侧土体已接近饱和,强度变弱,冲沟两侧土体在重力作用下向冲沟方向发生位移,致使沟槽开口逐渐减小,直至闭合。与此同时,由于沟槽内的大量颗粒被水流持续携带走,“腔体”越来越大,坡面底部开始坍塌,坍塌范围沿着沟槽向上扩展。整个冲蚀破坏过程如图3所示,野外现场调查破坏形态如图4所示。

3 坡面雨水入渗规律

在进行室内物理模拟试验时,在边坡模型侧面架设相机,拍摄记录湿润锋的发展过程,湿润锋的发展过程可以直观反映出坡体内部雨水入渗规律。图5反映了室内冲刷试验过程中40°边坡湿润锋的发展趋势,图中1~8为含水率监测探头编号。随着降雨历时的增加,坡面某些位置的土体逐渐达到饱和而失去强度,土颗粒被水流冲蚀,逐渐形成不平整的入渗面,进而影响湿润锋的形状,所以实际监测的湿润锋形状并非圆滑曲线。

在坡体内部布置含水率监测探头(探头位置见

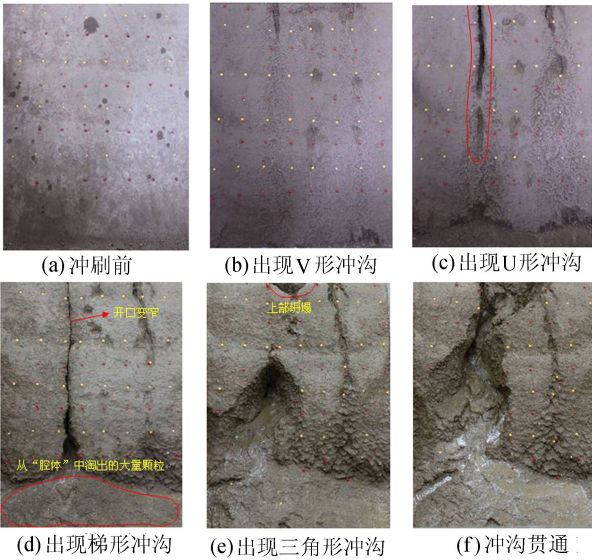


图3 缓坡坡面冲刷破坏演变过程



图4 野外现场调查中“腔体”底部坍塌

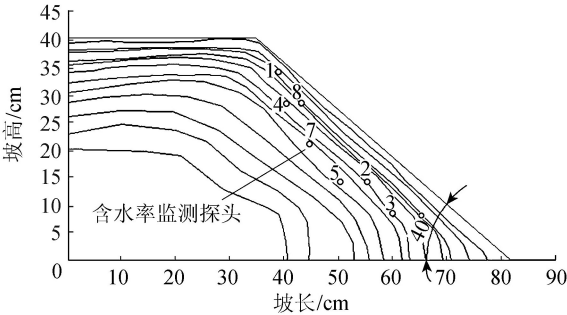


图5 40°边坡湿润锋发展趋势

图5),记录不同位置处土体体积含水率的变化,如图6所示。在降雨开始的较短时间内,地表土体的含水率快速从初始值增加到某一稳定值;坡体内部较深区域土体含水率呈缓慢增长趋势。随着降雨的持续,土壤内部湿润峰向下推移,含水率的分布曲线由陡直渐变为相对平缓。

4 饱和-非饱和渗流数值模拟

饱和-非饱和条件下,土体的导水能力可以通过渗透系数函数来反映。饱和土中,所有土颗粒之间的空隙都充满水,一旦空气进入空隙中,相对于水的流动而言,空气的充填会堵塞水流通道的,水的渗流路径将会变得更加曲折,导致土体渗透系数减小。当孔隙水压力负向增加,更多的空隙被空气所充填,渗

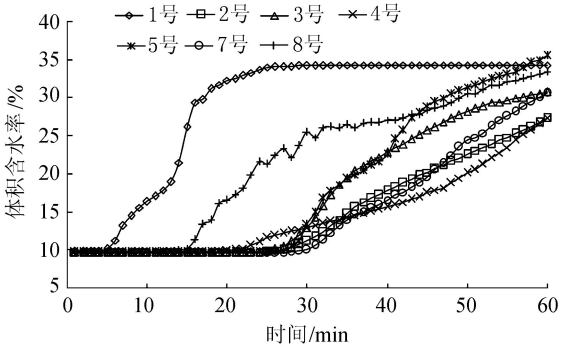


图6 40°边坡土体体积含水率的变化

透系数进一步减小。土体的渗透能力依赖于土体中现有的含水率,而土体中现有含水率可以通过体积含水率来表征。实测渗透系数的难度较大,但体积含水率可以通过实测等方法来确定^[14-16]。

结合室内坡面雨水入渗物理模型试验获得的降雨入渗规律,建立 SEEP/W 渗流数值模型,如图7所示,图中横坐标为边坡模型至左边界的水平距离,坐标原点为模型左边界与底边界交点。坡顶与坡面定义为入渗边界,坡顶的入渗量沿其长度方向均匀分布。坡面的入渗量需要分段定义,坡面上部入渗量较小;而坡面下部土体不仅受到降雨的入渗,坡面径流在该处入渗量也增大,所以定义入渗量较大。试验用土的体积含水率曲线(土-水特征曲线)如图8所示,将实测土-水特征曲线采用 Gardner 公式进行拟合。

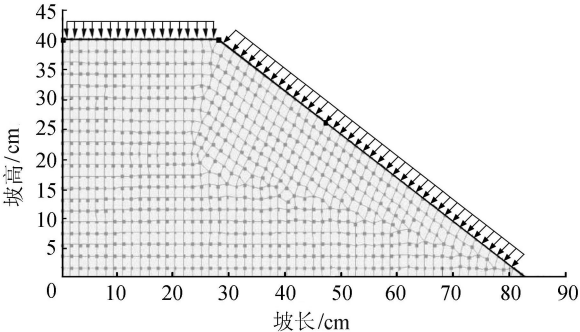


图7 SEEP/W 渗流数值模型

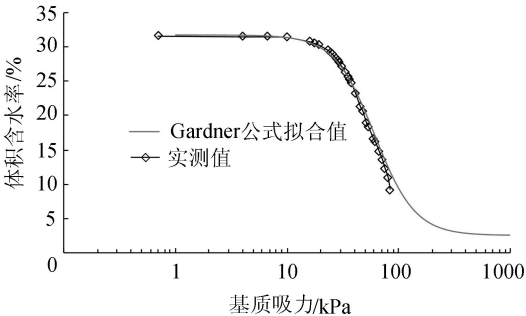


图8 Gardner 拟合实测土-水特征曲线

模拟结果如图9所示,10 min 后,坡顶和坡面上部的入渗深度均在 1 cm 左右,且基本平行于渗流边界线,而坡脚处湿润锋的发展速度加快,逐渐不平行

于渗流边界;10~60 min 期间,坡面浸润线发展呈上浅下深的规律,对应于坡面侵蚀的沟状侵蚀阶段;60 min以后,进入冲刷试验后期的坍塌破坏阶段,由于此时整个坡面孔隙水压力增加明显,土体饱和,土粒间黏结力骤减,沟槽内的大量土颗粒被水流持续携走,“腔体”越来越大,坡面底部开始坍塌,坍塌范围沿着沟槽逐渐向上扩展,直至坡面发生整体破坏。

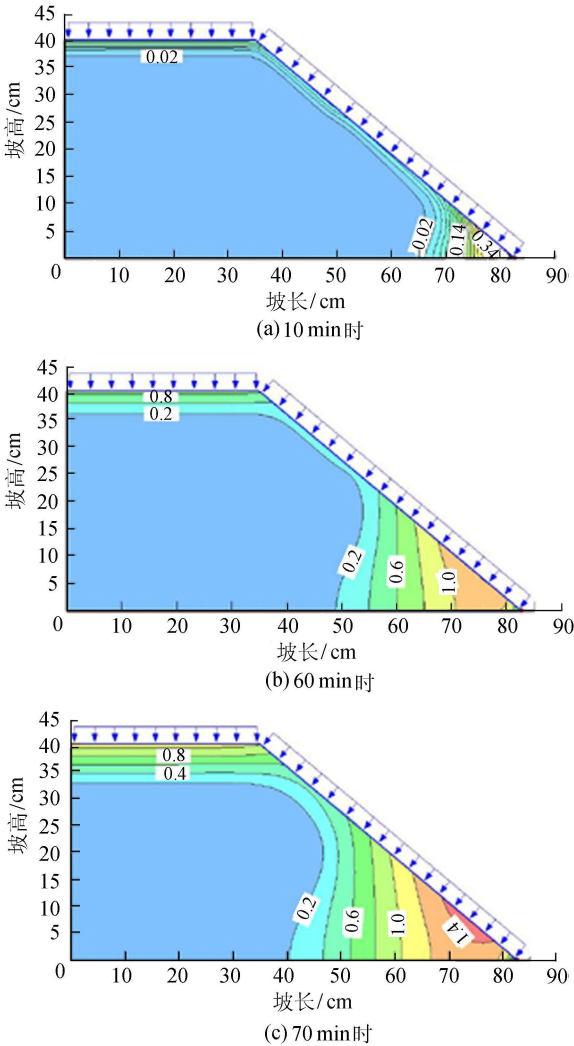


图9 不同时刻 40°边坡孔隙水压力等值线(单位:kPa)

5 结 论

- a. 根据野外现场调查与室内降雨冲刷模拟试验结果,辽西地区黄土缓坡坡面沟蚀横断面的形态大致可分为 V 形、U 形、梯形、三角形,这 4 种冲沟形态在一定程度上反映了辽西黄土缓坡坡面冲沟发育的不同阶段和纵向的不同位置。
- b. 由室内物理试验观测可知,在降雨开始的较短时间内,地表土体的含水率从初始值快速增加到某一稳定值;而坡体内部较深区域的土体含水率呈缓慢增长趋势。随着降雨的持续,雨水浸润深度加深,但雨水在坡面上的浸润线均不平行于边坡线,呈

现上浅下深的规律。

c. 采用饱和-非饱和渗流数值模型对降雨条件下辽西黄土缓坡的雨水入渗特征进行数值模拟;模拟初期(0~10 min)坡顶和坡面上部的入渗深度均在1 cm左右,且基本平行于渗流边界线;后期(10~60 min)坡内浸润线的发展逐渐呈上浅下深的规律,与室内试验观测结果基本一致。

参考文献:

[1] 熊山铭. 公路边坡灾害成因及防治技术[J]. 华东公路, 2011 (4) : 69-72. (XIONG Shanming. The causes of highway slope disasters and formation and control technology [J]. East China Highway, 2011 (4) : 69-72. (in Chinese))

[2] 王常明,马栋和,林容,等. 辽西地区黄土的强度与本构特性[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2010,40 (5) : 1104-1109. (WANG Changming, MA Donghe, LIN Rong, et al. Shear strength and constitutive characteristics of loess in West Liaoning [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40 (5) : 1104-1109. (in Chinese))

[3] 王常明,林容,陈多才,等. 辽西黄土湿陷变形特性及湿陷后微观结构变化[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2011,41 (2) : 471-477. (WANG Changming, LIN Rong, CHEN Duocai, et al. Collapsible deformation characteristics and its changes in microstructure of loess in west Liaoning [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011,41 (2) : 471-477. (in Chinese))

[4] MA Donghe, WANG Changming. Three-dimensional characteristics of the Loess's microstructure and comparison before and after collapse [C]//2011 International Conference on Remote Sensing: Environment and Transportation Engineering. Nanjing: Curran Associates Inc. ,2011:4683-4688.

[5] FOSTER G T, HUGGINS L F, MEYER L D. Laboratory study of rill hydraulics: I velocity relationships [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,1984,27 (3) : 790-796.

[6] 郑粉莉,高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社,2000.

[7] 罗斌,胡厚田,吕小平. 南方花岗岩残积层路堑边坡坡面冲蚀研究[J]. 铁道工程学报,1999,63 (3) : 82-85. (LUO Bin, HU Houtian, LÜ Xiaoping. Study on cutting slope surface erosion of granite eluvium in the south of China[J]. Journal of Rail Way Engineering Society,1999, 63 (3) : 82-85. (in Chinese))

[8] 杨立建. 辽西地区黄土工程特性的试验研究[D]. 长春: 吉林大学,2007.

(下转第 51 页)

- Huimin. The effects of types of flow on Manning's roughness coefficient[J]. Hydrology, 2002, 22(6): 22-24. (in Chinese))
- [7] 李丽,王加虎,王建群,等. 自适应随机搜索算法在河网数学模型糙率反演中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 64-67. (LI Li, WANG Jiahu, WANG Jianqun, et al. Application of adaptive random search algorithm in roughness inversion of mathematical model for river networks[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 64-67. (in Chinese))
- [8] 李红英,罗永钦. 水工模型多条有压隧洞联合泄流糙率校正方法[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(6): 14-15. (LI Hongying, LUO Yongqin. Roughness correction methods for hydraulic model tests on combined discharge of multiple pressure tunnels[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(6): 14-15. (in Chinese))
- [9] 辛小康,刘刚,张向东,等. 基于遗传优化的河网数学模型糙率参数反演[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 21-24. (XIN Xiaokang, LIU Gang, ZHANG Xiangdong, et al. Investigation on parameter identification for river network model by using genetic algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 21-24. (in Chinese))
- [10] 吴航,拾兵,陈志娟. 淹没状态下河道植物偏斜高度与糙率的关系[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(1): 20-22. (WU Hang, SHI Bing, CHEN Zhijuan. Relationship between height of vegetation after deflection and roughness coefficient of vegetated channels in submerged state[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(1): 20-22. (in Chinese))
- [11] 陈耀忠. 引滦入津隧洞糙率两次原型观测成果综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 58-61. (CHEN Yaosheng. Summary of two times' prototype observation results of roughness coefficient for water diversion tunnel from Luanhe River to Tianjin City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 58-61. (in Chinese))
- [12] 马吉明,史哲. 南水北调典型宽浅渠道糙率系数研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(5): 75-79. (MA Jiming, SHI Zhe. Research on the absolute roughness of the typical channel of the south-to-north water diversion project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(5): 75-79. (in Chinese))
- [13] 杨岑,路泽生,栾维功,等. 矩形渠道人工加糙壁面阻力规律试验研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(1): 34-38. (YANG Cen, LU Zesheng, LUAN Weigong, et al. Experimental study on friction law of artificial rough-wall rectangle channel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(1): 34-38. (in Chinese))

(收稿日期:2012-12-17 编辑:骆超)

(上接第 32 页)

- [9] 黄毅,曹忠杰. 单喷头变雨强模拟侵蚀降雨装置研究初报[J]. 水土保持研究, 1997, 4(4): 105-110. (HUANG Yi, CAO Zhongjie. Modeling erode rainfall device by using moni-spray gun to change rain intensity[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997, 4(4): 105-110. (in Chinese))
- [10] 刘素媛,韩奇志,聂振刚,等. SB-YZCP 人工降雨模拟装置特性及应用研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 47-53. (LIU Suyuan, HAN Qizhi, NIE Zhengang, et al. Study on characteristic and application of SB-YZCP artificial rainfall simulator[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(2): 47-53. (in Chinese))
- [11] 陈文亮,唐克丽. SR 型野外人工模拟降雨装置[J]. 水土保持研究, 2000, 7(4): 106-110. (CHEN Wenliang, TANG Keli. A new SR style field artificial rainfall simulator[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 7(4): 106-110. (in Chinese))
- [12] 高小梅,李兆麟,贾雪,等. 人工模拟降雨装置的研制与应用[J]. 辐射防护, 2000, 20(1/2): 86-90. (GAO Xiaomei, LI Zhaolin, JIA Xue, et al. Development and application of artificial rainfall device[J]. Radiation Protection, 2000, 20(1/2): 86-90. (in Chinese))
- [13] 徐向舟,刘大庆,张红武,等. 室内人工模拟降雨试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 52-58. (XU Xiangzhou, LIU Daqing, ZHANG Hongwu, et al. Laboratory rainfall simulation with controlled rainfall intensity and drainage[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(5): 52-58. (in Chinese))
- [14] 刘艳华,龚壁卫,苏鸿. 非饱和土的水土特征曲线研究[J]. 工程勘察, 2002(3): 8-11. (LIU Yanhua, GONG Biwei, SU Hong. Study on characteristic curve of soil and water of unsaturated soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002(3): 8-11. (in Chinese))
- [15] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. ASCE J Geotech Eng Div, 1977, 103(5): 447-466.
- [16] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil water characteristic curve[J]. Can Geotech J, 1994, 31: 521-532.

(收稿日期:2013-05-02 编辑:骆超)