

DOI: 10.11779/CJGE2016S2030

野外地表渗透系数测量装置与方法研究

吴梦喜¹, 程鹏达¹, 范福平², 李晓彬²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国电建集团贵阳水利水电勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 野外地表的渗透系数是小流域降雨产流和边坡稳定性计算分析必不可少的参数。介绍了新的野外地表渗透系数的测量装置与方法。该装置结合了降雨入渗试验和双环入渗试验装置的优点, 实现了斜坡地表的饱和和无压入渗测量。试验数据分析方法可以直接获得地表土层的渗透系数。在某山区流域进行了入渗试验并分析获得了土层的渗透系数与吸力。

关键词: 边坡; 渗透系数; 测量; 试验装置

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0184-06

作者简介: 吴梦喜(1967-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水工结构与岩土工程数值方法与工程研究。E-mail: wumx@imech.ac.cn。

Test apparatus and method for field measurement of surface permeability

WU Meng-xi¹, CHENG Peng-da¹, FAN Fu-ping², LI Xiao-bin²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: The permeability coefficient of the field surface is the essential parameter for analyzing both the slope stability and the small watershed rainfall yield. A new method and device is described for field measurement of the surface permeability coefficient. The device combines the advantages of a direct rainfall infiltration test and a two-ring infiltration test device to achieve a saturation surface with zero water pressure infiltration measurement of a slope. The permeability of surface soil can be obtained directly by proposed method. Infiltration tests on a mountainous basin are carried out, and the soil permeability and suction are obtained.

Key words: slope; permeability coefficient; measurement; experimental device

0 引言

降雨是诱发边坡失稳滑动的一个重要原因。降雨情况下, 雨水通过边坡表面进入坡体, 并向下渗流, 从而改变边坡土体的含水率和地下水位, 影响边坡的稳定性。当降雨量大于坡面的入渗能力时, 坡面将处于饱和状态并产流, 产流量(等于降雨量与入渗量之差)汇聚形成地表径流。降雨过程和边坡表面入渗能力决定了坡面的入渗量和产流量。坡面入渗能力的测定对降雨作用下边坡内土壤水分布和坡面产流计算都至关重要。坡面的入渗能力与坡表面土层的饱和渗透系数、孔隙率、土体当前含水率及其对应的吸力关系最为密切。其中饱和渗透系数是试验测量的重点, 也是入渗计算的关键参数。

野外地表入渗能力的测量, 有双环法^[1]、人工降雨法和圆盘入渗仪法等。双环法需将土表层处理为水平面, 大小两个环同心压入土层一定深度, 并在内外环中施加一定高度的定水头并测量入渗量-时间关系。

根据测量数据, 回归获得饱和渗透系数。由于入渗环入土过程中, 环与土壤间的缝隙为土壤水入渗提供优先路径, 测量所得的渗透系数可能远高于实际渗透系数^[2]。且双环入渗仪不能直接测定坡地土壤入渗率, 需要平整地表进行测量, 不能考虑地表结皮和植被的影响。Peterson等^[3]、Odgen等^[4]、袁建平等^[5]报道了人工降雨法测量的装置和方法, 通过人工降雨装置, 使水以近似降雨的形式作用于土表面, 测量降雨量与产流量之差得到入渗量, 并据此计算土层表面的渗透系数。人工降雨法是斜坡的入渗能力直接测量的方法。由于产流量难于实时准确测量, 雷廷武等^[6]、刘汗等^[7]提出了利用降雨入渗与坡面流观察相结合的测量方法和仪器, 通过观察坡面流的推进过程和挡水板前的积水

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB035903); 国家科技支撑计划(2014BAB03B04); 华能科技项目(NHKJ15-H13)

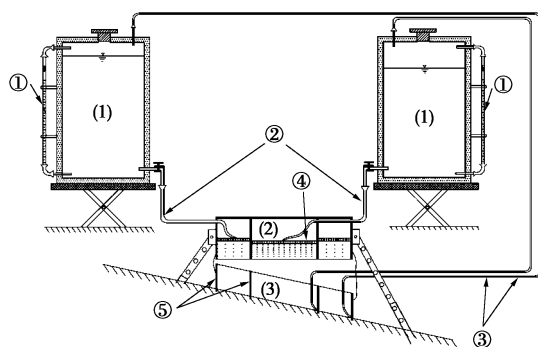
收稿日期: 2016-05-19

深度, 来计算坡地的入渗曲线, 计算过程很复杂。人工降雨法入渗水非垂直渗流, 有侧向扩散, 因此按照表层土垂直向下入渗的假定计算出来的渗透系数与实际可能存在较大偏差。圆盘入渗仪法^[8]虽然省力、省水, 这类盘式入渗方法由于入渗面积小, 其侧渗影响比降雨入渗法还要大, 测得的稳定入渗率大于双环入渗的情况^[9]。现有的斜坡地表入渗试验装置与方法, 还不能比较准确地测量表层土的渗透系数。

本文将降雨入渗可以直接进行斜坡地表入渗测量和双环入渗试验内环中地表水垂直入渗的优点, 提出斜坡地表饱和和无压双环入渗装置及其相应的试验方法。

1 斜坡双环入渗装置与测试方法

斜坡地表饱和和无压双环入渗装置如图 1 所示, 它由马里奥特水箱、降雨筒和斜坡入渗环 3 部分组成。2 个马里奥特水箱的供水阀分别向降雨筒的内外筒供水, 通过降雨筒的多层多孔网板向插入斜坡地表的入渗环内降雨; 水箱的马里奥特管(马氏管)开口用花眼六分管固定于入渗环内侧最低点, 通过马氏管开口的气连通与气封闭转化, 来控制供水箱的供水流量。使用马氏管来实现供水速度的自动调节是双环入渗试验中的成熟技术。当供水流量大于饱和入渗流量时, 入渗环内将形成积水, 封闭马氏管的通气口, 从而使供水箱顶部空间处于与大气隔离的封闭状态, 在供水箱顶部产生负压而减小供水量, 待积水下降使通气口露出水面时, 负压消失, 供水量加大, 来实现入渗流量的调节。



(1)-马里奥特水箱; (2)-降雨筒; (3)-斜坡入渗环;
①-水箱刻度标尺; ②-水箱供水管; ③-水箱通气管;
④-多层多孔网板(最下层为倾斜网板); ⑤斜坡入渗环内外环

图 1 斜坡表面饱和双环入渗装置示意图

Fig. 1 A saturated surface infiltration test apparatus

试验时同时打开 2 个水箱的供水阀, 其开度应使 2 个入渗环内地表面产生坡面流, 最低处出现积水为止。当积水封闭马氏管开口时, 水箱内产生负压而减小向降雨筒供水, 从而使入渗环内斜坡表面保持饱和和无压的条件。由于降雨器产生的降雨很难均匀, 入渗

环内的饱和入渗能力也有空间变异性, 因此, 表面饱和和入渗条件还要辅以坡面流来实现。坡面流的产生方法是最下层降雨板略倾向坡顶方向, 且供水管的开口置于降雨筒内的坡顶方向, 从而使入渗环内坡顶侧降雨量大于坡底侧, 实现坡顶侧降雨量大于入渗量而产生流, 坡面流流过所有入渗表面从而保证坡面的饱和入渗条件。而坡底侧的马氏管通气口在积水时封闭, 水箱内气压力逐步降低而实现供水流量(降雨量)的减小, 直到总的降雨量略小于总的入渗量引起积水下渗, 通气口露出水面从而使水箱顶部与大气连通而增加供水量。由于地表的饱和和无压入渗量总是随时间减小的, 因此, 当进气口过于频繁封闭开启变化时, 应当手动适当减小供水箱阀门的开度, 从而实现坡地表面近似的饱和和无压入渗条件。当入渗流量-时间曲线趋于直线时(不必稳定不变), 可停止试验。

入渗环的直径与注水试验规程^[1]中双环试验情形相同, 内环直径 25 cm、外环直径 50 cm。为适应不同的斜坡坡度, 入渗环有 A, B, C, D 和 E 共 5 种型号如图 2 所示。每个入渗环的上边和下边均可以作为入土边, 直立时 5 种型号的 10 条边的坡度从 0:1 到 0.9:1 (V/H) 均匀变化。对于坡度小于 0.95:1 (43.5°) 的边坡, 其中均有上边或下边与边坡坡比之差并不大于 0.05:1 的入渗环。换言之, 对于 43.5° 以内的边坡, 合适的入渗环直立插入土内的入土深度差外环不超过 2.5 cm, 内环不超过 1.25 cm。试验时可根据斜坡的坡比来选择合适的入渗环及其入土边。由于斜坡表面饱和和无压入渗试验中压力水头接近于 0, 因而其侧渗程度要轻于地表有 10 cm 左右水深的常规双环入渗试验。双环入渗试验中规定入渗环入土深度 5~8 cm 以阻止侧渗。当入渗深度超过入渗环的底边时, 入渗环后部的土体中存在大于 0 的孔隙水压力, 其侧渗程度依然大于表面饱和和无压入渗试验中入渗环后孔隙水压力基本为 0 的情况。因此, 表面饱和和无压入渗试验中, 入渗环压入斜坡土内的深度, 只需满足固定入渗环和防止环内地表水外泄即可。斜坡入渗环入土深的一侧置于坡底方向, 使坡顶端进入坡内地面, 底端超过 2 cm 深即可起到防止积水外泄的作用。

斜坡双环入渗实验中, 马里特奥水箱既是饱和和表面入渗实验的供水装置, 又是入渗量读数的量测装置, 通过附于供水箱外部的刻度分比率为 1 mm 高度的有机玻璃管, 高 0.5 m, 容积 25 L 的水箱的刻度分辨率可到达 0.05 L。若试验过程中水箱水量不够, 可以在入渗环内通气管开口露出水面时, 打开水箱顶部密封盖, 向内加入量好体积的水量。外环水箱的供水量约为内环水箱的 3 倍。由于外环的入渗作用仅仅是为了阻止内环侧渗, 因此, 野外入渗试验中可不记录其入

直线段, 还可以了解坡面土层的初始含水率随深度变化规律的信息。式 (3) 描述的表面有恒压作用的双环试验数据, 同样具有这一特性, 因而也可以用同样的方法来回归饱和渗透系数, 而不需要测量吸力。

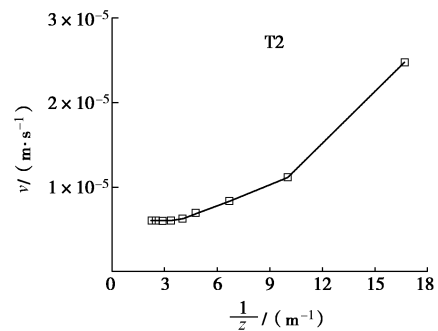


图 3 典型的内环 $v - 1/z$ 试验曲线

Fig. 3 $v - 1/z$ curve of typical inner ring

3 野外试验测试与参数回归

3.1 野外试验测试

西藏昌都某山区小流域面积约 400 km², 沟口区域要作为水电站建设施工布置场地, 需要进行小流域暴雨产流计算, 从而获得沟谷内的暴雨洪水特性。地表的饱和渗透系数是计算的基本资料。2015 年 7 月 7—14 日在如图 4 所示的 6 处地点进行了入渗现场测试, 测试点的基本情况列于表 1。测试点坡度范围在 5°~30° 之间, 高程介于 2659~4128 m 之间。地表土壤为粉土、粉砂土和砂土。首先在测试点进行入渗试验, 测量内环和外环入渗量-时间关系。入渗试验结束时, 用探头长 8 cm 的 TDR 传感器, 完全插入内环土表面的中心, 测量了 0~8 cm 深度内的平均饱和 and 体积含水率。插入测试点外 50 cm 处的土中, 获得深度为 0~8 cm 的平均初始含水率。饱和含水率测试完毕后, 采用内径 34 mm、外径 38 mm, 最大取样深度 1 m 的取土钻自内环中心表面连续取样, 一直到取出土样包含入渗锋面(干湿土的分界面)为止。测量取样孔深度和含入渗锋面试样干土部分的高度, 二者之差即为入渗深度。测试点表土层测得的体积含水率与初始含水率之差 $\theta_s - \theta_0$, 与根据试验结束时的总入渗量与入渗深度计算得到的平均数值列于表 2。由于单一土层的饱和含水率变化很小, 而表层土的初始含水率随着深度增加, 因而, 表层土测试所得的 $\theta_s - \theta_0$ 值应大于计算所得的 $\theta_s - \theta_0$ 的平均值。然而表中情况并非如此, 其原因就是 TDR 是利用电磁脉冲测量电磁波在土层中的传播速度来测定土层介电常数, 从而推算体积含水率的, 当探头穿过的土层含水率变化较大时其误差比较大, 因而对于初始含水率变化较大的表层土, TDR 测头垂直插入地表测初始含水率是不合适

的。宜挖开地面, 探针水平方向插入土层内测量初始含水率。

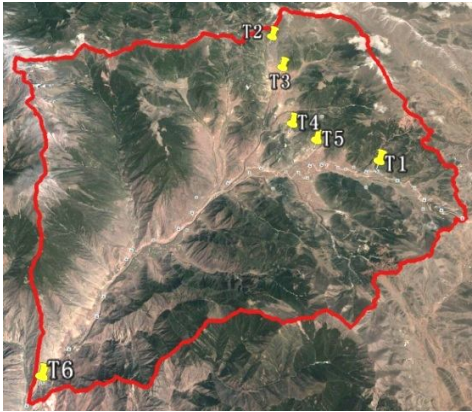


图 4 野外入渗试验位置图

Fig. 4 Position of field infiltration tests

表 1 试验基本情况与数据

Table 1 Basic facts and data in tests

编号	坡度 $/(^{\circ})$	测试点土层描述
T1	5	粉沙土, 裸土
T2	21	红色粉土, 表层干, 2 cm 以下深褐色, 上有 2 cm 高矮草, 50%表面覆盖率
T3	30	含碎石耕作粉土, 稀疏 10 cm 高草荒地, 黄色土, 表层干, 4 cm 以下褐色、潮湿
T4	17	白黄色粉土、含少量碎石, 15 cm 全深极干, 探针贯入困难, 伏地草, 约 5%覆盖率
T5	20	草甸下粉土
T6	20	沙土, 参杂大量砾石

表 2 含水率测试值与推算值

Table 2 Test water contents and estimated values

编 号	入渗历 时/h	θ_0	θ_s	实测 $\theta_s - \theta_0$	测量入渗 深度/cm	总入渗 量/L	推算 $\theta_s - \theta_0$
T1	3.23	0.135	0.373	0.238	55	7.0	0.259
T2	3.71	0.165	0.355	0.190	50	5.0	0.204
T3	2.14	0.123	0.375	0.252	65	9.0	0.282
T4	5.62	0.074	0.327	0.253	15	2.2	0.299
T5	2.30	0.175	0.355	0.180	26	2.3	0.180
T6	1.22	0.067	0.259	0.192	40	3.7	0.188

除了用 TDR 传感器间接测含水率以外。还可以通过取样直接测重量含水率、干容重和比重来计算体积含水率。通过铝土盒取样, 并现场天平称重, 回营地后烘干土样后称干土重, 计算可得到重量含水率。重量含水率的初始值和饱和值分别用 w_0 和 w_s 表示。单一土层的初始含水率随深度变化, 而饱和含水率基本不变。若已知饱和和体积含水率 θ_s , 重量含水率 w_0 按照

下式转换成体积含水率:

$$\theta_0(z)=\frac{w_0(z)}{w_s}\theta_s\quad。$$

(5)

将式 (5) 代入式 (2) 可得

$$Q=A\int_0^z[1-w_0(z)/w_s]\theta_sdz\quad。$$

(6)

θ_s 可用总的入渗量与入渗深度, 由式 (6) 计算得出。 θ_s 也可直接取样测量干容重 r_s 和土颗粒比重 ρ_s 来计算, 但测量相对比较麻烦。

$$\theta_s=1-\frac{r_s\rho_w}{\rho_sg}\quad,$$

(7)

式中, g 为重力加速度。

内环入渗量-时间关系如图 5 所示。由于本次试验中供水箱外没有安装水深读数有机玻璃管, 而是直接用红色油漆在透明度相对较差的塑料供水桶外标定容积的办法测量入渗量, 其分辨率仅为 0.5 L。由于供水箱的分辨率较低, 读数最大误差 0.25 L。而注水试验规程要求在初始入渗时读数间隔比较短, 而内环供水箱中水位读数变化未超过分辨率, 因此本次试验未能按注水试验规程中要求的时间间隔读数, 入渗试验的初始段数据稀疏而未能较准确反映初始入渗时入渗量的急剧变化过程。

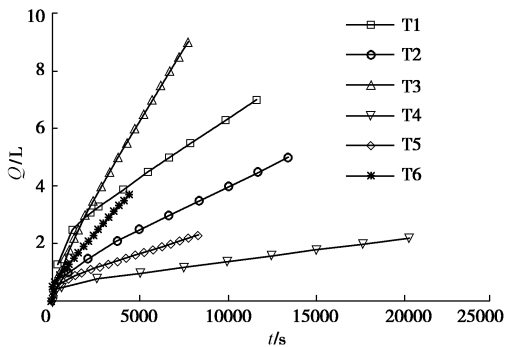


图 5 内环入渗量 - 时间曲线

Fig. 5 Infiltration - time curve inside the inner ring

3.2 试验参数回归

图 6 是根据每个试验所获得的 $v-1/z$ 关系, 对左侧近似具有直线关系的数据段进行线性回归, 可以得到各试验点土层的饱和渗透系数及数据段入渗深度范围土层的初始含水率对应的吸力。图中可见虽然本次试验中读数的误差较大, 试验数据仍然有较好的直线关系。表 3 为饱和渗透系数与吸力, 与图 5 中 $Q-t$ 关系曲线后部对照, 斜率大的试验曲线对应的饱和渗透系数大, 规律上合理。吸力最大值 6.8 cm、最小值 0.3 cm。表 3 中吸力对应的深度范围是指数据点中最小的入渗深度。该深度以下土体的初始含水率对应此吸力。

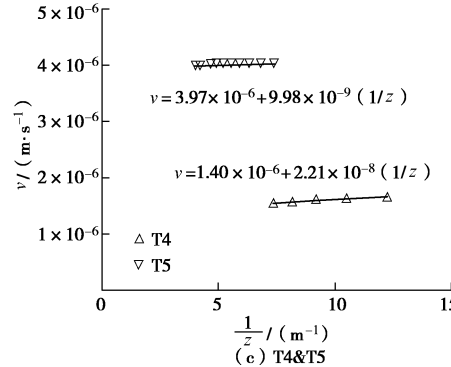
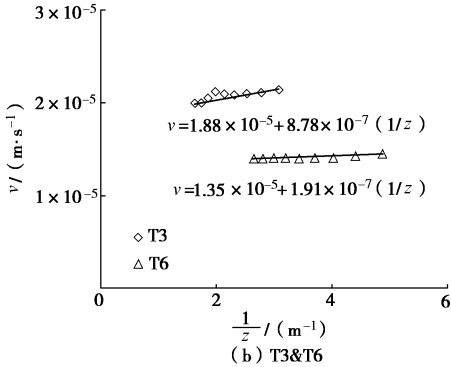
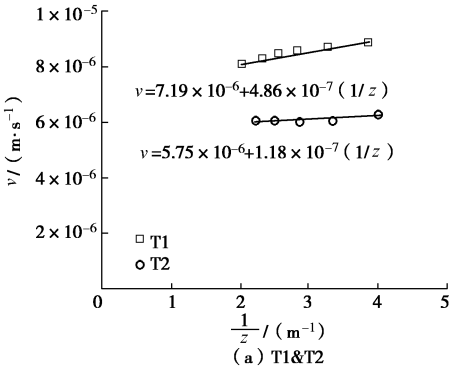


图 6 $v-1/z$ 数据线性回归

Fig. 6 Linear regression of $v-1/z$ data

表 3 饱和渗透系数、吸力及其对应的深度范围

Table 3 Saturated hydraulic conductivities, suctions and corresponding depth ranges

试验编号	$k_s \times 10^{-6}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	h_a/cm	深度/cm
T1	7.19	6.8	>25.9
T2	5.75	2.1	>25.0
T3	18.8	4.7	>32.5
T4	1.40	1.6	>8.2
T5	3.97	0.3	>13.6
T6	13.5	1.4	>20.5

4 结 语

本文介绍了新的野外地表降雨入渗测量装置与方法。该装置结合了降雨入渗法和双环入渗法的优点, 可实现斜坡表面饱和和无压入渗条件, 直接测量斜坡地表的饱和入渗曲线。本文提出的利用 $v-1/z$ 关系数据回归饱和渗透系数的方法, 无需测量土壤的吸

力, 可以比较准确地获得地表土层的饱和渗透系数, 还可以获得土层内部初始含水率所对应的吸力。通过野外地表的实际测量试验, 推荐了提高入渗水读数分辨率的方法和表土层初始含水率的测量方法。试验表明本文介绍的装置与方法, 能比较方便地测得斜坡地表的饱和渗透系数。

参考文献:

- [1] SL345—2007 水利水电工程注水试验规程[S]. 2007. (SL345—2007 Code of water injection test for water resources and hydropower engineering[S]. 2007. (in Chinese))
- [2] 雷廷武, 张 婧, 王 伟, 等. 土壤环式入渗仪测量效果分析[J]. 农业机械学报, 2013, **44**(12): 99 - 104. (LEI Ting-wu, ZHANG Jing, WANG Wei, et al. Assessment on soil infiltration rates measured by ring infiltrometer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, **44**(12): 99 - 104. (in Chinese))
- [3] PETERSON A E, BUBENZER G D. Intake rate: sprinkler infiltrometer[M]// Methods of Soil Analysis: Part 1-Physical and Mineralogical Methods. Madison: American Society of Agronomy(ASA)-Soil Science Society of America(SSSA), 1986: 825 - 843.
- [4] OGDEN C B. Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, **61**(4): 1041 - 1043.
- [5] 袁建平, 蒋定生, 文妙霞. 坡地土壤降雨入渗试验装置研究[J]. 水土保持通报, 1999, **19**(1): 24 - 27. (YUAN Jian-ping, JIANG Ding-shen, WEN Miao-xia. Research on rainfall penetration testing device of slopeland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, **19**(1): 24 - 27. (in Chinese))
- [6] 雷廷武, 潘英华, 刘 汗, 等. 产流积水法测量降雨侵蚀影响下坡地土壤入渗性能[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(8): 7 - 11. (LEI Ting-wu, PAN Ying-hua, LIU Han, et al. Measurement of rainfall-erosion impacted soil infiltration capability of slope land with run-on-ponding water[J]. Transactions of the CSAE, 2006, **22**(8): 7 - 11. (in Chinese))
- [7] 刘 汗, 赵晓芬, 潘英华, 等. 产渗流土壤入渗性能测量仪的设计及应用[J]. 农业机械学报, 2007, **38**(8): 187 - 189. (LIU Han, ZHAO xiao-fen, PAN Ying-hua, et al. The instrument design and application for soil infiltration measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, **38**(8): 187 - 189. (in Chinese))
- [8] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性实验研究[J]. 农业工程学报, 2002, **18**(4): 54 - 58. (XU Ming-xiang, LIU Guo-bin, BU Chong-feng, et al. Experimental study on soil infiltration characteristics using disc permeameter[J]. Transactions of the CSAE, 2002, **18**(4): 54-58. (in Chinese))
- [9] 朱良君, 张光辉, 任宗萍. 4 种土壤入渗测定方法的比较. 水土保持通报, 2012, **32**(6): 163 - 167. (ZHU Liang-jun, ZHANG Guang-hui, REN Zong-ping. Comparing four methods for soil infiltration measurement[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, **32**(6): 163 - 167. (in Chinese))
- [10] GREEN H, AMPT G A. Studies on soil physics: part I: the flow of air and water soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, **4**(1): 1 - 24.
- [11] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东, 等. 土壤渗透系数测定与计算方法的探讨[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(5): 68 - 72. (HU Shun-jun, TIAN Chang-yan, SONG Yu-dong, et al. Determination and calculation of soil permeability coefficient[J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(5): 68 - 72. (in Chinese))

(责任编辑 胡海霞)