

优先流影响下环式入渗仪内入渗过程可视化试验*

张 婧 雷廷武 胡雅琪 闫 军 陈天勤

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出了一种室内土壤入渗试验装置,可以直接观测入渗过程中水分在环内土壤中的运动过程。详细描述了该装置的构成、工作原理和试验方法与过程。该装置由可以拆分的土槽和入渗环及可以透视的有机玻璃板组成。将入渗环打击进入土槽内土壤后,用钢板将环内的土壤沿径向切分成两半,移去其中一个半环及其中的土壤。用有机玻璃板封闭和固定另一半环内的土壤,用于进行土壤水分入渗过程的可视化试验,观察环式入渗仪内的水分运动过程。用采自北京的粉壤土进行入渗过程试验,同时根据水量平衡原理计算得到土壤入渗性能曲线。剖切面的湿润过程直观地显示了入渗环内水分的入渗过程存在优先流,不仅影响初始入渗过程,而且对整个入渗过程均产生影响。根据土壤湿润体所指示的土壤入渗特征将整个入渗过程划分为3个阶段:初始入渗阶段、过渡阶段和稳渗阶段。

关键词: 环式入渗仪 入渗过程 优先流 可视化装置 试验方法

中图分类号: S237; S152.7+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0155-06

Visualized Experiment for Observing Infiltration Process Affected by Preferential Flow inside Ring Infiltrometer

Zhang Jing Lei Tingwu Hu Yaqi Yan Jun Chen Tianqin

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Studying the effects of preferential flow on the infiltration process is of great importance to increase the accuracy of measurement. An experimental device was suggested to display water movement process in the soil during infiltration. The device consisted of a disassemble soil container, a halved infiltration ring and see-through container surface made of plexiglass plate. After infiltration ring was hammered into soil inside the container, the soil inside the halved ring was cut radially into two halves with a steel plate, part of soil outside the experimental part of the container was removed and a plexiglass plate was used to cover the soil inside infiltration ring for dynamic visualization infiltration experiment. Then the infiltration process in the soil profile within the ring can be observed. The structure of the device, working principle and its application methodologies were detailed. A series of infiltration experiments were conducted to demonstrate the working procedures of the device with silt loam taken from Beijing. The exemplary soil infiltrability processes were computed based on the water supplied into the ring during the experiments. The dynamic process of wetted area in the soil profile inside the ring indicated that preferential flow not only influenced the initial infiltration process but also affected the total infiltration process. The whole infiltration process was divided into three stages based on the infiltration characteristics produced by wetting soil, which were initial infiltration stage, transitional stage and steady infiltration stage, respectively.

Key words: Ring infiltrometer Infiltration process Preferential flow Visualization device Test method

收稿日期: 2014-04-21 修回日期: 2014-05-29

* 国家自然科学基金重点资助项目(41230746)

作者简介: 张婧, 博士生, 主要从事水利工程研究, E-mail: zhangjingde2011@126.com

通讯作者: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和旱地农业研究, E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

引言

入渗是降水由地表进入土壤的过程,是水文循环的重要环节。入渗性能是指在给定的条件下土壤所具有的最大可能入渗率^[1],是土壤的固有属性;与土壤侵蚀,水土流失,作物灌溉管理,溶质运移等方面密切相关。很多学者认为土壤入渗性能的测量是土壤性质的指示器^[2-4],因此提出众多土壤入渗率测量方法,如双环法^[5]、圆盘入渗仪法^[6]、人工降雨法^[7]、降雨-入流-积水法^[8]、降雨-入流-产流法^[9]、线源入流测量方法等^[10]。其中双环入渗仪由于操作过程简单、计算方法直观和设备价格低等特点,是目前应用非常广泛也是最经典的土壤入渗性能测量方法^[11]。

但环式入渗仪在野外使用时耗费体力较大、需水量大、读数困难^[12],为解决此类问题,不少学者致力于环式入渗仪测量的自动化研究。Arriaga 等^[12]针对环式入渗仪读数困难的问题,在软管和内环上分别增加了压力传感器和数据记录仪,实现了环式入渗仪在变水头条件下自动记录数据。王富庆等^[13]在原有双环入渗仪的基础上增加了液位继电器、电磁阀、供水箱、数据采集器等装置,提高了系统测量的自动化程度和测量精度,但昂贵的成本及装置的复杂性限制了其应用前景。改进后的环式入渗仪,在入渗环安装过程中,同样也是采用铁锤将入渗环砸入地表。但铁锤打击入渗环产生的震动形成环壁和土壤间的缝隙,为优先流提供了路径^[14],造成测量结果远大于土壤真实的入渗性能,这一现象至今还没有引起广泛关注。

目前对环式入渗仪的研究主要集中在环内变水

头和常水头对入渗结果的影响^[15],双环和单环测量结果的对比^[16-17],环内水头^[18]、双环直径^[19]、缓冲指数^[20]等对测量结果的影响方面,但并未关注安装环式入渗仪过程中产生的环壁和土壤间缝隙引起的优先流对测量结果的影响。而这一问题在环式入渗仪安装过程中普遍存在,并且严重影响其测量结果的准确性^[21]。在初始入渗结束后,优先流是否存在及其对后续的入渗过程产生怎样的影响,目前尚不得而知。

本文提出一种能够直接观察优先流影响下入渗环内土壤水分运动过程的试验装置,采用室内试验说明试验过程,根据土壤剖切面湿润特征,划分入渗过程,分析入渗湿润体变化过程及其对入渗率测定结果产生影响的原因。

1 可拆分入渗土槽

设计了一种可拆分的室内试验土槽装置。该装置由可拆分成两半的土槽、入渗环、可以透视的有机玻璃挡土板、角钢和螺栓组成。半个土槽内部长、宽、高分别为 30、50、75 cm,2 个同样的半个土槽(图 1a)可以组装成如图 1b 所示的土槽。半个土槽两边焊有连接板(5 cm×75 cm),连接板上每隔 7 cm 打有螺孔。在半个土槽外边的下部用螺栓固定宽×高为 60 cm×55 cm 的土槽下部有机玻璃板。将另外半个土槽与连接有有机玻璃板的半个土槽组装成一个完整土槽,即形成试验中可拆分的入渗土槽。2 个半土槽形状和尺寸完全相同。当剖分入渗环时,只需移出半个土槽和半个人渗环,即能透过有机玻璃板显示出入渗环内部及下部土壤剖面内入渗水分的运动过程。

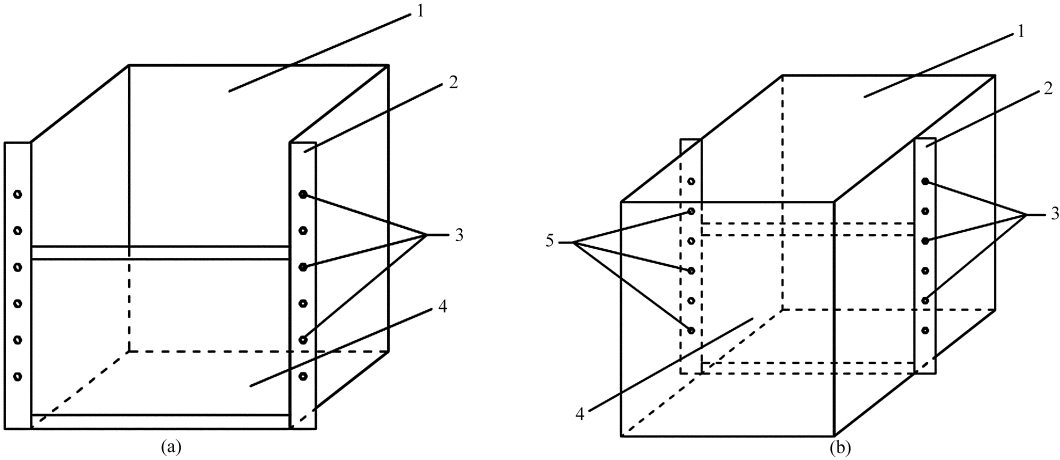


图 1 土槽结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of soil container
(a) 半个土槽 (b) 完整的土槽

1. 半槽 2. 连接板 3. 固定有机玻璃板和半槽的螺栓 4. 有机玻璃板 5. 固定两半槽的螺栓

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验在中国农业大学水利与土木工程学院人工降雨大厅进行。供试土壤为粉壤土(粘粒 15%,粉粒 50.2%,砂粒 34.8%)。在可剖分的土槽内装干容重为 1.40 g/cm^3 的土壤,每 5 cm 为一层,分层装入,按设计干容重计算土壤质量,称量后放入土槽内并整平,压实到 5 cm 厚度。将装好的土层用工具打毛,再装入下一层土壤,以避免上下土层之间出现结构和水动力学特性的突变。整个土槽的装土厚度为 70 cm,土壤初始含水率约为 $0.1\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

2.2 试验方法

土槽填土完成后,将入渗环剖分面放置在土槽连接板所处位置,砸入高为 20 cm 的入渗环,入土深度为 15 cm。砸入后的装置如图 2 所示。铲出将要移出的半个土槽中入渗环外 15 cm 的土壤。拧开入渗环上的螺栓,取出露出的半环后,切削移出半环内的土体;铲出半槽中的土壤,拧开土槽连接板上螺栓,移出半槽,通过有机玻璃板即显出土槽下部的土壤。在入渗环连接板上用玻璃胶贴上硅胶条,防止试验过程中连接板和有机玻璃板衔接处漏水,用螺栓将土槽上部有机玻璃板(60 cm × 20 cm)和半环连接并紧固,即呈现出整个土壤剖切面(图 3)。用玻璃胶封堵两块有机玻璃板之间的缝隙,防止入渗过程中水分渗出。



图 2 砸入入渗环
Fig. 2 Hammered ring

试验时,先在环内土壤表面铺上纱布,量取 2 L 水,一次性加入环内。当环内水位下降到 1.5 cm 水头时,加水 1.2 L 使水位上升到 4 cm;始终保持环内最低水位 1.5 cm,最高水位 4 cm。重复以上过程直至试验结束。入渗时间大约为 2 h。试验进行 2 次重复。

2.3 数据采集

在环内贴上标尺,记录水位变化过程。采用定

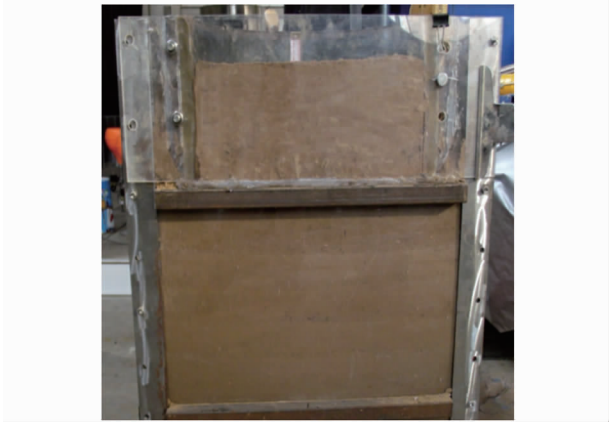


图 3 土槽剖面
Fig. 3 Soil container section

量加水法,由秒表记录水位每下降 0.5 cm 所用的入渗时间,计算土壤入渗性能曲线。

3 结果与分析

3.1 入渗水分在环内土壤中的运动过程

由图 4 可以清楚地看出,入渗环与土壤间的缝隙引起了优先流。环内水分的入渗包括土表入渗和侧壁入渗 2 部分。在优先流的影响下,环内土壤湿润体由垂直向下和侧壁向内 2 部分湿润体组成。根据土壤湿润体随时间变化的特征,入渗过程可以划分为 3 个阶段:初始入渗阶段、过渡阶段、稳渗阶段。

初次向入渗环内加水后,水流迅速充满环壁和土壤之间的缝隙并覆盖土表,形成垂直和径向入渗,半环剖切面呈现出由土表向下和侧壁向内的湿润状况。缝隙底部的水分以线源的形式进行入渗;剖切面上土壤湿润特征是土表向下和环壁向内共同湿润环内土体的结果,湿润锋为直线状向前推进,在剖切面上显示入渗环底部缝隙内水分以点源方式弧形向内、向外入渗。由于优先流的影响,环内水分真实的入渗体积由环内土体的上表面和侧面入渗共同构成;侧面入渗造成环式入渗仪测定的初始入渗率远大于土壤的真实初始入渗率。初始入渗阶段,土壤入渗率主要由基质势控制,重力作用相对很小,因此垂直入渗深度和径向入渗宽度近似相等。除底部两侧点源入渗外,垂直向下和径向向内的湿润锋均以直线的方式向前推进,半环剖切面未湿润面积为矩形(图 4)。该阶段称为初始入渗阶段,持续时间较短,大约为 3 min。

随后,由于优先流的作用,环壁和土壤之间缝隙内的水分继续产生径向入渗;此外由于土壤初始入渗率较大,垂直湿润面积和水平径向湿润面积相互重叠部分迅速增加,重叠部分为垂直和径向入渗共

同作用的区域,其入渗率大于单项垂直和径向入渗率,因此侧壁重叠部分土壤的径向入渗宽度大于底部土壤,垂直入渗深度大于位于中间位置的土壤。湿润锋逐渐由直线变为曲线向前推移。缝隙底部的水分继续以线源的方式向环下部和侧部土壤入渗,湿润面积逐渐增大,此后进入第 2 个入渗阶段,剖切面湿润形状如图 5 所示。随着时间推移,土壤入渗

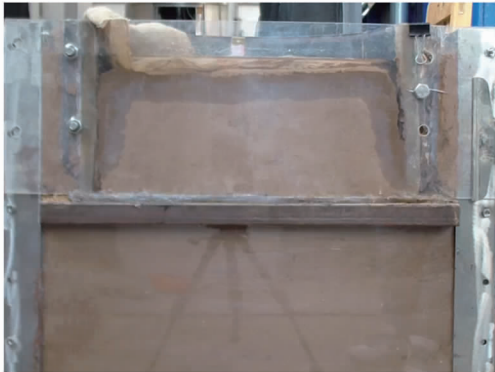


图 4 第 1 个入渗阶段环内土壤湿润面积特征

Fig. 4 Wetted area features for the first infiltration stage

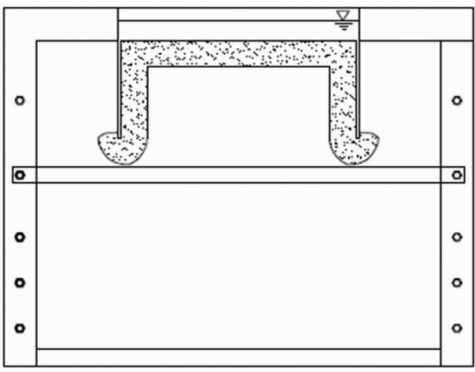
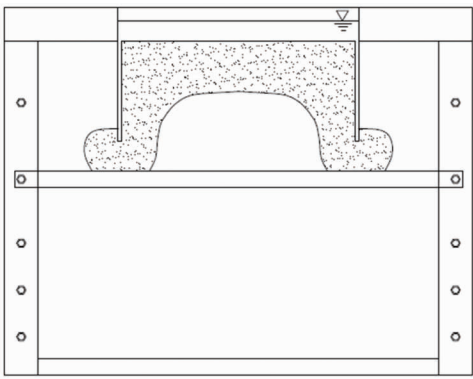


图 5 第 2 个入渗阶段环内土壤湿润面积特征

Fig. 5 Wetted area features for the second infiltration stage



当半环剖切面内土壤全部湿润后,入渗进入第 3 个阶段,该阶段湿润面积形态特征基本不再发生明显变化。来自土表的垂直入渗和侧壁缝隙侧向入渗两部分水分汇集后,在重力势的作用下向下入渗,进入到环下部土壤,形成垂直入渗,同时还会向入渗环向下延长线的外侧形成侧渗,因此土壤的垂直入渗深度逐渐大于两侧土壤的垂直入渗深度。此时剖面上土壤湿润锋逐渐呈现椭圆形状,并以此形状向前推进。在土壤入渗趋于稳定时,湿润锋推进速度和形状也趋于稳定,形成如图 6 所示的湿润状况。

与理想状态(无侧壁优先流存在)垂直一维入渗相比,在优先流影响下,环内土体更易达到充分饱和,此阶段环下部土壤入渗是在有水压的情况下进行的,因此环式入渗仪测得的稳定入渗率也可能偏高。第 3 阶段,土壤剖切面湿润面积特征不再发生变化,因此称为稳渗阶段。

率降低,重力对入渗的作用逐渐增大,入渗环中间位置土壤的入渗深度逐渐大于环壁两侧土壤的径向入渗宽度,湿润锋的弯曲度趋于平缓。入渗继续推进,当环内土壤基本全部湿润后,湿润锋逐渐由环内部向环下部推进,剖切面湿润锋形状逐渐趋于水平,此时第 2 个入渗阶段基本结束。第 2 阶段承接第 1 和第 3 阶段,称为过渡阶段。

3.2 土壤入渗率计算

环式入渗仪测量土壤入渗率根据水量平衡进行计算,即

i = \frac{\Delta Q}{\Delta t A} \tag{1}

式中 ΔQ —— Δt 时段内马氏瓶供水量, mm^3
 Δt ——入渗时段, h
 A ——内环面积, mm^2

利用试验中记录の入渗一定水量所需时间,计算各时刻の入渗率,得到土壤入渗率随时间变化的过程曲线(图 7),进而可以用土壤入渗模型对入渗过程进行拟合,包括 Philip、Horton、Kostiakov 入渗模型。

由图 7 可以看出,根据供水量随时间的变化过程求得的土壤入渗率随时间变化的规律为:在入渗的最初阶段,土壤具有较大的入渗率,随着时间的推

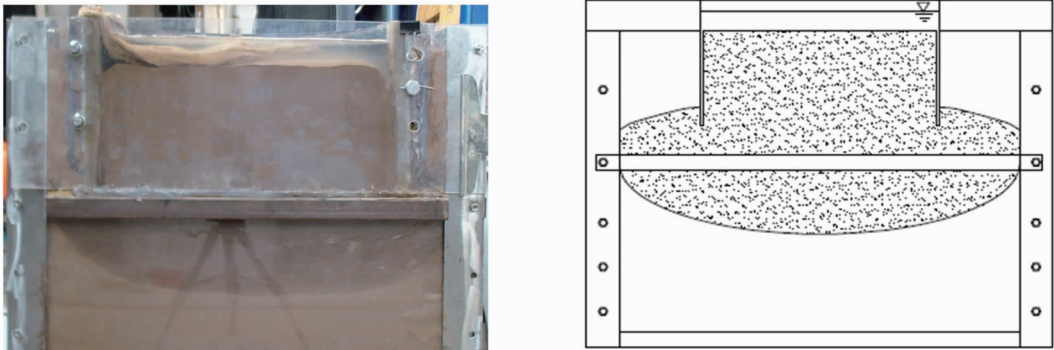


图 6 第 3 个入渗阶段环内土壤湿润面积特征
Fig. 6 Wetted area features for the third infiltration stage

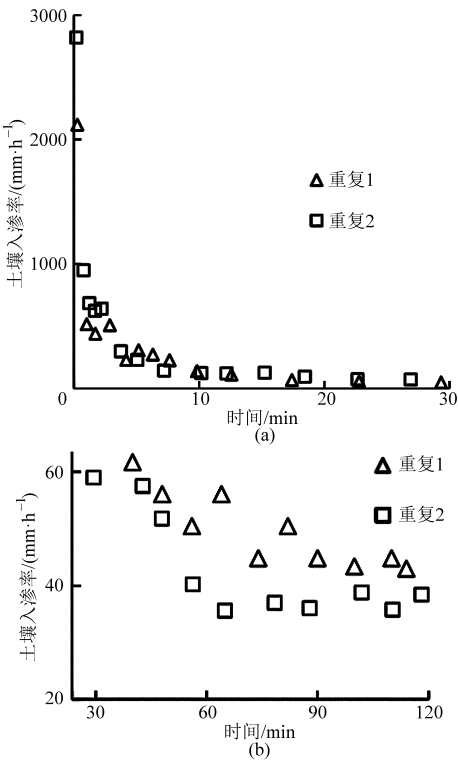


图 7 土壤入渗性能随时间的变化曲线
Fig. 7 Soil infiltrability estimated with variable water level method

(a) 前 30 min 入渗过程 (b) 30 ~ 120 min 入渗过程

移,土壤的入渗率迅速减小。入渗进行一段时间后,入渗率达到稳定。说明优先流影响下测定的土壤入渗率曲线变化规律与一般情况下的土壤水分入渗变化规律相同。

由于优先流的产生增加了水分入渗体积,造成测定的初始入渗率高达 2 117 mm/h,初始入渗阶段土壤入渗率降低很快,入渗进行到 3 min 时初始入渗率降低到 415 mm/h,减大幅度大于一般情况下初始入渗率的减大幅度。第 2 个阶段的入渗曲线变化趋于平缓,入渗率降低幅度变慢。在第 3 个入渗阶段土壤入渗率逐渐趋于稳定,湿润锋推进速度也趋于稳定。环内土体完全湿润后,环壁和土壤缝隙之间的水分产生径向入渗与垂直入渗水分,汇集后向

下入渗,因此环式入渗仪测得的稳定入渗率大于土壤的真实入渗率。

优先流影响下测定的累积入渗量随时间的增加而增加,最终趋于稳定(图 8)。从图 8 可以明显地看出累积入渗量变化趋势对应土壤入渗率变化过程。在入渗进行到一定时间后重复 1 的累积入渗量略大于重复 2 的累积入渗量,这可能是由于装土误差引起的;装土后环刀取土测得重复 2 的干容重为 1.38 g/cm³,略小于重复 1 的容重 1.40 g/cm³,导致重复 2 的入渗率略高于重复 1。

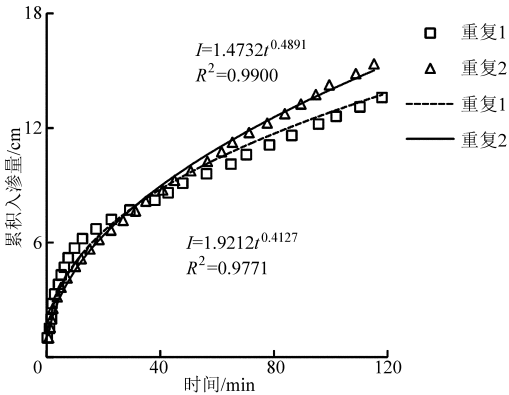


图 8 累积入渗量随时间的变化过程
Fig. 8 Cumulative infiltration as functions of time

4 结束语

提出了一种能够直接观察优先流影响下入渗环内土壤水分入渗过程的试验装置。描述了该试验装置的构成及使用方法。该装置能够直观地显示环内土壤水分真实的入渗过程及优先流对环内土壤水分入渗过程的影响。根据剖切面土壤湿润面积特征将入渗过程划分为:初始入渗、过渡和稳渗 3 个阶段。根据供水量随时间的变化过程计算土壤入渗率曲线,该曲线能很好地表达优先流影响下土壤入渗率随时间的变化规律。该装置首次将优先流影响下环式入渗仪内土壤水分的入渗状况可视化,为进一步研究环内土壤水分入渗过程及提出室内模拟环式入

渗仪试验提供了基础,对分析环式入渗仪测量结果 有力的依据。
的准确性及提出解决优先流影响的改进装置提供了

参 考 文 献

1 Hillel D. Environmental soil physics[M]. New York: Academic Press, 1998.

2 Katsvairo T W, Wright D L, Marois J J, et al. Sod-livestock integration into the peanut-cotton rotation[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(4): 1156 – 1171.

3 Kennedy A C, Schillinger W F. Soil quality and water intake in traditional-till vs. no-till paired farms in Washington’s Palouse region[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(3): 940 – 949.

4 Govaerts B, Sayre K D, Lichter K, et al. Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems[J]. Plant and Soil, 2007, 291(1 – 2): 39 – 54.

5 Bouwer H. Intake rate: cylinder infiltrometer[M] // Klute A. Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 825 – 844.

6 Perroux K M, White I. Designs for disc permeameters[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(5): 1205 – 1215.

7 Peterson A E, Bubenzer G D. Intake rate: sprinkler infiltrometer[M] // Klute A. Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 845 – 870.

8 Lei T W, Pan Y H, Liu H, et al. A run off-on-ponding method and models for the transient infiltration capability process of sloped soil surface under rainfall and erosion impacts[J]. Journal of Hydrology, 2006, 319(1): 216 – 226.

9 Lei T W, Liu H, Pan Y H, et al. Run off-on-out method and models for soil infiltrability on hill-slope under rainfall conditions [J]. Science in China Series D, 2006, 49(2): 193 – 201.

10 Mao L L, Lei T W, Li X, et al. A linear source method for soil infiltrability measurement and model representations[J]. Journal of Hydrology, 2008, 353(1): 49 – 58.

11 Bodhinayake W, Si B C, Noborio K. Determination of hydraulic properties in sloping landscapes from tension and double-ring infiltrometers[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(3): 964 – 970.

12 Arriaga F J, Kornecki T S, Balkcom K S, et al. A method for automating data collection from a double-ring infiltrometer under falling head conditions[J]. Soil Use and Management, 2010, 26(1): 61 – 67.

13 王富庆, 沈荣开. 新型智能土壤入渗特性试验仪[J]. 中国农村水利水电, 1998(10): 10 – 11.

14 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 Tingwu, 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)

15 Elrick D E, Parkin G W, Reynolds W D, et al. Analysis of early-time and steady state single-ring infiltration under falling head conditions[J]. Water Resources Research, 1995, 31(8): 1883 – 1893.

16 Walsh E, McDonnell K P. The influence of measurement methodology on soil infiltration rate[J]. International Journal of Soil Science, 2012, 7(4): 168 – 176.

17 Verbist K, Torfs S, Cornelis W M, et al. Comparison of single- and double-ring infiltrometer methods on stony soils[J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(2): 462 – 475.

18 冶运涛, 伍靖伟, 王兴奎. 双套环测定土壤渗透系数数值模拟分析[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(3): 14 – 18.
Ye Yuntao, Wu Jingwei, Wang Xingkui. Numerical simulation of double-ring measuration on hydraulic conductivity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(3): 14 – 18. (in Chinese)

19 任宗萍, 张光辉, 王兵, 等. 双环直径对土壤入渗速率的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 94 – 97.
Ren Zongping, Zhang Guanghui, Wang Bing, et al. Effects of double-ring diameter on soil infiltration rate[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 94 – 97. (in Chinese)

20 Lai J B, Luo Y, Ren L. Effects of buffer-index of double-ring infiltrometers on saturated hydraulic conductivity measurements [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(1): 19 – 25.

21 张婧, 雷廷武, 张光辉, 等. 环式入渗仪测量土壤初始入渗率效果试验方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 140 – 146.
Zhang Jing, Lei Tingwu, Zhang Guanghui, et al. A new experimental method for observing the initial soil infiltration under ring infiltrometer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 140 – 146. (in Chinese)