

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.017

# 土壤环式入渗仪测量效果分析\*

雷廷武<sup>1</sup> 张婧<sup>1</sup> 王伟<sup>2</sup> 马玉莹<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 土壤入渗率的测量受到广泛关注与研究。环式入渗仪是目前广泛应用的土壤入渗性能测量仪器之一。模拟降雨法和双环法是测量土壤入渗的常用方法, 圆盘入渗仪多用于测量土壤的饱和导水率。大量测量结果表明, 环式入渗仪测量得到的最可靠结果是土壤稳定入渗率, 但结果远高于人工降雨测量结果, 说明环式入渗测量方法并不准确。环式入渗仪入土过程中, 环与土壤间的缝隙为土壤水入渗, 提供优先路径是造成测量结果远高于土壤本身入渗性能的重要原因。环式入渗仪测量过程中采用的时间步长偏大是产生入渗率偏大的另一原因。采用数值计算方法分析了计算入渗赋值方式和时间步长对测量得到的土壤入渗性能曲线的影响, 具体估算了不同时间步长和赋值方式下, 在入渗初期可能引起的入渗测量误差。

**关键词:** 土壤环式入渗仪 时间步长 测量效果 计算方法

**中图分类号:** S237; S152.7<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0099-06

## Assessment on Soil Infiltration Rates Measured by Ring Infiltrometer

Lei Tingwu<sup>1</sup> Zhang Jing<sup>1</sup> Wang Wei<sup>2</sup> Ma Yuying<sup>1</sup>

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

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The measurement of soil infiltration has long been a great concern of scientific researches and applicants. Ring infiltrometer is a widely-applied instrument for soil infiltration measurement. Rain simulator and double ring methods are the common methods for measuring soil infiltration, but the disc infiltrometer is widely for determination of saturated hydraulic conductivity. Numerous reports indicated that the most reliable results measured by the ring infiltrometer in the saturated hydraulic conductivity. This indicates the drawbacks of the ring infiltrometer. The gaps between the ring and the soil during the ring being inserted into soil produces a passage for preferential flow to cause much higher infiltration rate. The relative long time interval between each measurement is another reason to produce higher measured infiltration rates, which is illustrated by numerical computational procedures. Both the time moment at which the computed infiltration rate is assigned to and the length of time step have their impacts on the measured soil infiltration curve. The errors caused by these factors, especially at the beginning of infiltration are illustrated.

**Key words:** Ring infiltrometer Length of time step Measurement accuracy Computational method

### 引言

入渗是降雨或灌溉水由地表向土壤转化的过程<sup>[1-2]</sup>, 降雨入渗是自然界水循环的重要环节, 与降雨向土壤水的转化、降雨产流、地表水文过程、土壤

侵蚀及化学和污染物迁移转化密切相关。降水及灌溉过程中, 土壤入渗性能和供水强度决定了进入土壤, 转化为可为作物利用的土壤水或用于补充地下水的水数量。入渗也决定了一定降雨强度下形成地表径流的数量。而地表径流及其汇集与河流洪水预

收稿日期: 2013-08-20 修回日期: 2013-10-07

\* 国家自然科学基金重点资助项目(41230746)和中科院、国家外国专家局创新团队国际合作计划资助项目(2007-380)

作者简介: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治、农业水利工程、灌溉理论研究, E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

报、水库水资源量估算、灌溉用水调度、随径流发生的污染物迁移紧密相关;土壤入渗性能与作物的灌溉制度、土壤的水蚀过程等密切相关<sup>[1,3]</sup>。

量化土壤入渗性能对于理解和描述水文模型具有重要意义<sup>[4]</sup>,是坡面水文过程研究的基础。土壤的入渗能力与土壤质地、结构、地面坡度、土壤剖面含水率等因素有关。并且土壤具有较高的初始入渗性能,而后随入渗时间的推移而逐渐降低<sup>[2,5]</sup>,最终趋于一个常数——稳定入渗率。土壤稳定入渗率是衡量土壤入渗性能的重要指标,也是量化土壤入渗能力的基础。

土壤入渗率的测量一直受到国内学者的广泛关注。Green 和 Ampt<sup>[6]</sup>、Kostiakov<sup>[7]</sup>、Horton<sup>[8-9]</sup>、Philip<sup>[10-12]</sup>等分别在入渗测量定量研究的基础上,通过理论分析分别提出了著名的 Green-Ampt、Kostiakov、Horton 及 Philip 入渗模型。此后,土壤入渗的研究,一直受到农学、水文、生态、灌溉、土壤侵蚀、土壤物理等各领域的广泛关注。相继出现了各种测量方法,如模拟降雨法、双环法、圆盘入渗仪法、水文法等<sup>[1,13-14]</sup>;此外,袁建平<sup>[15]</sup>研制了一套便携滴头式野外坡地土壤入渗产流试验装置,雷廷武<sup>[16-17]</sup>提出了产流-入流-积水及产流-入流-出流土壤入渗性能测量方法。

模拟降雨法受雨强限制,能够测量得到的最大入渗率为降雨器的降雨强度,无法观测到很高的初始土壤入渗能力。而且当雨强较大时,雨滴对土壤的打击作用及大雨强对土壤的快速湿润会造成地表不确定性结皮<sup>[18-19]</sup>,导致土壤入渗率降低和地表径流增加。雨滴对地表的打击作用会破坏土壤结构<sup>[20-21]</sup>,测量结果不能真实反映土壤入渗能力。圆盘(负压)入渗仪是在负压下进行入渗的仪器,用于测量非饱和导水率和土壤导水参数<sup>[22]</sup>。水渗入土壤的速率低于地表自由积水入渗。产生这种现象的原因是,圆盘入渗仪维持一定的负压向地表供水,因此产生的导水率一般略低于饱和导水率。所以一般情况下,用双环法或单环入渗仪确定土壤的饱和导水率。在圆盘式入渗仪测量法中,水在低于大气压下渗入土壤。然而,由于环式入渗仪在入渗环中维持有一定的积水深度,所以导致测量的饱和导水率可能偏高。但采用圆盘(负压)入渗仪时,由于负压的作用,水不会进入土壤裂隙或根孔与虫孔,只在土体内入渗。因此测量得到的结果更完整。但圆盘入渗仪入渗面积较小,代表性较差<sup>[23]</sup>,而且试验过程中侧渗和圆盘与土壤接触面间的水力连续性差,影响测量精度,并且不能测量得到大于零的土壤吸力下土壤表面的自由入渗过程,更不能测量得到很高

的土壤初始入渗速率。降雨产流-入流-积水法和产流-入流-出流法克服了一般人工降雨法受降雨强度限制不能测量很高的初始土壤入渗性能的缺点,提供了一种能够在坡地上使用、测量降雨和径流影响下土壤入渗性能动态变化过程的新途径,能够测量土壤降雨入渗性能变化的全过程,由于降雨强度可以较常规的人工降雨方法低,故雨滴打击和快速湿润土壤的过程可得到一定的缓解。但降雨影响观测径流推进距离,方法尚有待改进<sup>[16-17]</sup>。

在上述测量方法中,环式入渗仪由于入渗模型概念清晰,计算简单,设备成本相对较低,可以方便地进行野外测量,目前应用最为普遍,同时也是最为经典的测量方法<sup>[1,24]</sup>。在土壤饱和导水率,土壤水分特征,小流域水土保持综合治理对土壤入渗性能的影响,耕作土与荒化土土壤水分入渗特征的分析,典型森林生态系统土壤水文特征,不同土地利用方式对土壤水分入渗特征的影响等研究中,研究者均采用双环入渗仪测量土壤入渗率。

为了提高环式入渗仪的测量精度及操作方便性,学者致力于对环式入渗仪进行改进。王文焰<sup>[25]</sup>等与 Prieksat<sup>[26]</sup>等分别提出了双环法的改进装置和自动测量系统,在传统双环法的基础上增加了马氏瓶、传感器、伽玛射线仪等,从而可完成自动测量,缩短测量时间并提高测量精度。王富庆<sup>[27]</sup>应用自动控制技术,采用高精度的液位继电器、电磁阀和数据采集器等组成智能化环式土壤入渗特性测量系统,提高了测量自动化程度。Milla 与 Kish<sup>[28]</sup>采用红外传感器及单片机进一步提高了环式入渗仪的测量自动化程度。但以上研究大多是对环式入渗仪测量自动化及操作便捷性进行改进,对入渗率测量结果准确性的关注较少。本文对已有环式入渗仪测量结果进行比较,分析环式入渗仪测量效果;并通过数值计算说明环式入渗仪在入渗初期存在的误差。

## 1 环式入渗仪测量效果分析

环式入渗仪包括双环入渗仪和单环入渗仪。由于两者测量原理和性能基本一致,本文将两者统称为环式入渗仪。

Bouwer<sup>[1]</sup>描述了现广为使用的双环入渗仪。双环入渗仪由内环和外环组成。内环直径一般 30 cm,高 20 cm;外环直径一般 60 cm,高 20 cm。其测量原理为,将两个圆环同心地砸入土壤,插入深度一般 10~15 cm,并应注意环口水平。然后将水注入两个环内,内外保持约 5 cm 的固定水深,内环控制试验面积,并可以辅用测针做固定标记,外环的作用是防止内环下渗水流的侧渗,尽量使内环的水分接近一

维入渗。试验开始时,土壤含水率较小,土壤入渗率较高且变化较大,先采用定量加水法,记录加水时距;后采用定时加水法,记录内环加水数量和时距。外环同时加水,不计量,但应注意内外环水面大致相等。内环单位时间单位面积的入渗水量即为测量得到的土壤入渗率,并可由各时刻的入渗率绘制入渗性能曲线。采用环式入渗仪,要求地表基本水平,在测定坡地土壤入渗率时,需将被测地面整理成基本水平后方可测定。但平整地表,将不可避免地破坏土壤的原状性,坡面的连续性也遭到破坏;而且在环入土时,对土壤(尤其是表土)结构产生破坏,造成测量结果偏离真实值,因此,环式入渗仪不适用于坡地土壤入渗率测定。

大量文献表明,采用环式入渗仪测量土壤稳定入渗率一般是人工降雨法测量结果的 2~10 倍。丁文峰等<sup>[29]</sup>用双环入渗仪测量了秦巴山区小流域水土保持综合治理影响下的土壤入渗率,结果为:鸚鵡洲农地稳定入渗率最大为 156 mm/h、最小 12 mm/h,相差 13 倍;林地最大 266 mm/h、最小 144 mm/h,相差约 2 倍。西沟流域农地和荒地的最大与最小稳定入渗率分别相差约 11 倍和 6 倍。林代杰等<sup>[30]</sup>研究了不同土地利用方式下土壤入渗特征,结果表明土壤质地为 37.87% 沙粒(>0.02 mm)、29.00% 粉粒(0.02~0.002 mm)、33.13% 粘粒(<0.002 mm)的红叶李树林初始入渗率高达 1 600 mm/h,其稳定入渗率约为 300 mm/h。如此高的入渗率,土地利用方式影响下的土壤结构良好、大孔隙(根孔、虫孔等)及入渗环侧壁优先流可能都有贡献,但该研究未对两者进行讨论。蒋定生<sup>[31]</sup>报道黄土高原耕地环式土壤入渗试验得出的入渗率测量结果是 300 mm/h,而人工降雨法对相同耕地的测量结果为 30 mm/h,二者相差约 10 倍。吴发启等<sup>[32]</sup>对比环式入渗仪和人工降雨法,环式入渗仪测定的土壤稳渗速率大于人工降雨法测定结果,在黄土高原沟壑区环式入渗仪测定的稳定入渗率是人工降雨法测定结果的 1.8~3.0 倍,在黄土丘陵沟壑区为 2.1~3.2 倍。王翠萍等<sup>[33]</sup>用环式入渗仪进行了黄土地表生物结皮对土壤入渗特征影响的研究,结皮土壤的稳定入渗率为 150 mm/h,未结皮土壤的稳定入渗率为约 100 mm/h。其入渗率为吴发启<sup>[32]</sup>用环式入渗仪测量的无结皮结果的 2~3 倍,是其人工降雨测量无结皮土壤结果的 5~9 倍。尽管土地利用方式不同,但他们采用的土壤类型极其相似。同时,大量研究表明,有结皮土壤的(稳定)入渗率应该显著低于无结皮的土壤<sup>[34-35]</sup>。蒙宽宏<sup>[36]</sup>的研究结果表明,在坡度为 0°、5°、10°和 20°的土地上,双环入渗仪的测量结

果分别是人工降雨法的 2.6、2.8、6.4 和 3 倍。另有研究结果表明环式入渗仪测量结果是环刀法测量结果的 2~4 倍。上述现象说明环式入渗仪测量过程中存在较大的测量误差,现有研究对这种误差关注较少。目前,环式入渗仪测量结果准确性的研究主要集中在环内水头、插深、双环入渗仪缓冲指标等对入渗率测量结果的影响<sup>[37-38]</sup>;对于环式入渗仪测量结果自身的高度变异及其与测量结果相对的模拟降雨法及原状土环刀法之间的差异的研究报道较少。

采用环式入渗仪进行测量,将入渗环砸入土体的过程中,对土壤结构产生一定程度的破坏,环和土体之间可能出现一定的缝隙,形成土壤水入渗过程中的优先路径;由于环式入渗仪为有压入渗,也会增加测量的入渗率。优先流水分通量远高于达西水流,会在很大程度上增加水分运动通量<sup>[39-40]</sup>,造成测得的入渗率增加。优先流的产生可能是环式入渗仪测量结果远远偏离土壤实际入渗率的重要原因。

## 2 数值计算对环式入渗仪测量结果的影响

环式入渗仪假定入渗是一维的,即假定环内各点的入渗率相同,只为时间  $t$  的函数,空间各点的入渗相同。测量过程中,根据入渗率随时间的变化,采用改变供水流量的方法,维持稳定的水头。供水装置通常采用马氏瓶。供水流量随时间的变化用于计算入渗率随时间的变化过程。通过马氏瓶得到的供水流量过程为

$$q = q(t) \quad (1)$$

式中  $q$ ——供水流量,  $\text{mm}^3/\text{min}$

实际供水过程中,瞬时的  $q(t)$  是测不到的,因此,是一个理论流量过程。只能通过记录一个时段  $(t_j - t_{j-1})$  马氏瓶内水量的变化得到时段的供水总量,进而计算得到时段的平均流量

$$\bar{q}_j = \frac{Q_j - Q_{j-1}}{\Delta t_j} = \frac{1}{t_j - t_{j-1}} \int_{t_{j-1}}^{t_j} q(t) dt \quad (2)$$

式中  $\bar{q}_j$ ——时段  $(t_j - t_{j-1})$  内水流的平均流量,  $\text{mm}^3/\text{min}$

$Q_{j-1}$ —— $t_{j-1}$  时刻马氏瓶内的水量

$Q_j$ —— $t_j$  时刻马氏瓶内的水量

由测量得到的时段平均流量估算得到时段  $(t_j - t_{j-1})$  的平均入渗率为

$$\bar{i}_j = \frac{\bar{q}_j}{A} = \frac{1}{A(t_j - t_{j-1})} \int_{t_{j-1}}^{t_j} q(t) dt \quad (3)$$

式中  $\bar{i}_j$ ——时段  $(t_j - t_{j-1})$  内的平均土壤入渗率,  $\text{mm}/\text{min}$

$A$ ——入渗环的面积,  $\text{mm}^2$

该时段平均入渗率  $\bar{i}_j$  可以根据定积分的中值定

理得到

$$\bar{i}_j = i(t_\zeta) = \frac{\bar{q}_j}{A} = \frac{1}{A(t_j - t_{j-1})} \int_{t_{j-1}}^{t_j} q(t) dt = \frac{q(t_\zeta)}{A} \quad (4)$$

( $t_{j-1} < t_\zeta < t_j$ )

根据《水土流失测验与调查》<sup>[41]</sup>,各时间步长测量得到的 $\bar{i}_j$ 放在时段的结束处,坐标为( $t_j, \bar{i}_j$ )。由于 $i(t)$ 为时间的单调减函数,因此

$$\bar{i}_j > i(t_j) \quad (5)$$

即:由数值计算得到的测量结果,当按照标准规定取坐标点时,入渗率高于实际值,如图1所示,时间步长越大,差异越大。

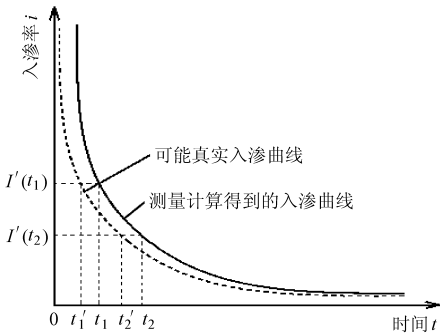


图1 计算赋值方式对测量得到的入渗性能曲线的影响

Fig.1 Impact of locating computed infiltration rate on measured soil infiltrability

由于实际操作上的原因,在试验中通常取3 min或5 min或更长的时间作为测量间隔。Moroke等<sup>[42]</sup>测量土壤入渗时,在4 h的测量阶段采用每5 min测量一个数据的方法。Carrier<sup>[43]</sup>采用3 min的时间间隔模拟土壤的入渗过程。在各时间步长上用该时间段内总的入渗水量除以入渗环的面积和时间长度,得到平均入渗率。坐标点为时间段的结束点和平均入渗率。当时间步长较大时,由于入渗率为单调减函数,所以当时间步长增大,计算得到的平均入渗率数值降低,但由于赋值点采用计算时间步长的终点,由此得到的入渗率在入渗曲线上却显著上升。如图2所示,在 $t_1$ 时刻的入渗率实际为 $i(t_1)$ ,但平均入渗率作为时段 $0 \sim t_1$ 间的平均值 $i'(t_1)$ 显著大于 $i(t_1)$ 。从而入渗率的这种计算赋值方法,过高地估计了入渗率,产生系统的测量误差。

环式入渗仪测量土壤入渗率时,入渗率曲线还依赖于测量和/或计算时间步长的选取。时间步越长造成测量结果的误差越显著。当采用较短测量时间步长时,极大地增大了用环式入渗仪测量的困难。当时间步长较短时,计算得到的入渗数值增大。但如前所述同样的赋值方式下,数据点所对应的时间提前,从而得到入渗曲线整体上在时间坐标上向左移动,所得到的入渗曲线反而整体降低。时间步长越短,入渗曲线越是在时间坐标上向左运动,测量

得到的入渗过程越降低,但入渗率随时间缩短而降低的速度下降。理想状态下,测量时间间隔无限短时,这种降低的速度趋于零,而得到的入渗率逼近真实的入渗率。因此说明,测量时间间隔越短越好。如图2所示。

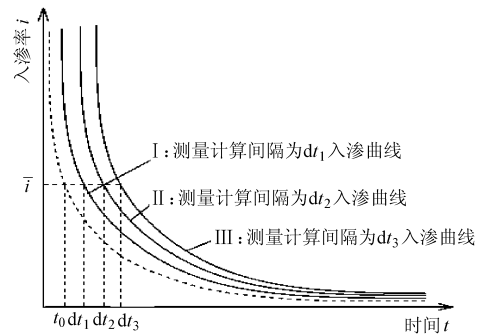


图2 不同时间步长对测量得到的土壤入渗性能曲线的影响

Fig.2 Impact of time interval on measured soil infiltrability

图3显示了在不同赋值方式和/或测量时间步长不同情况下土壤的入渗性能曲线。由前面分析可知,入渗曲线I是最接近真实入渗性能的曲线。在 $t_m$ 时刻,曲线I的入渗率为 $i_m$ ,而同时刻曲线II的入渗率可能比曲线I大约一倍或更多,而曲线III则更大得多。而在 $t_n$ 时刻,曲线I的入渗率为 $i_n$ ,同时刻曲线II的入渗率比曲线I的大约三分之一,而曲线III的则比其大一倍多。随着入渗时间推延,不同时间步长和不同赋值方式下测量得到的入渗率逐渐趋于一致,即测量时间步长和赋值方式对测量得到的入渗率的影响逐渐减小。测量时间步长和赋值方式对入渗初始时估算的土壤入渗性能影响较大。

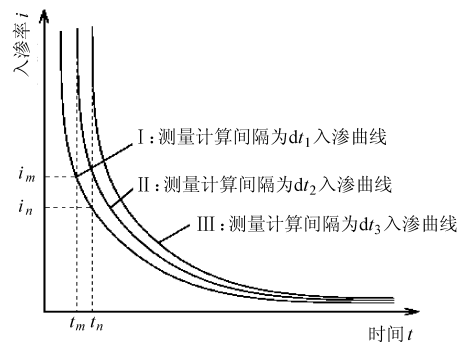


图3 不同时间步长和/或赋值方式引起的入渗测量误差示意图

Fig.3 Impact of time interval and/or numerical computation on measured infiltration rate

### 3 结束语

对已有环式入渗仪测量结果进行分析表明,以往研究报道中同样土地利用方式下,环式入渗仪的测量结果最大值和最小值相差几倍或更高。不同研

究者对同样土壤和土地利用测量得到的入渗性能研究表明,环式入渗仪测量结果均远远大于人工降雨法。分析了环式入渗仪测量的入渗性能偏大原因,优先流可能是重要原因之一。从数值计算赋值方式

和计算时间步长分析了环式入渗仪计算得到的入渗率偏大的原因,指出测量时间步长越大,计算得到的土壤入渗率数值降低,但入渗率曲线增高。测量时间步长趋于零,才能得到真实的入渗率。

### 参 考 文 献

- 1 Bouwer H. Intake rate: cylinder infiltrometer [M] // Klute A. Methods of soil analysis. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1986:825 ~ 843.
- 2 Hillel D. Environmental soil physics [M]. New York: Academic Press, 1998.
- 3 Brooks K N, Ffolliott P F, Gregersen H M, et al. Hydrology and themanagement of watersheds[M]. Ames:Iowa State University Press, 1997.
- 4 Mao L L, Bralts V F, Pan Y H, et al. Methods for measuring soil infiltration: State of the art [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2008,1(1):22 ~30.
- 5 Scott H D. Soilphysics[M]. Ames: Iowa State University Press, 2000.
- 6 Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics, part I—the flow of air and water through soils[J]. Agricultural Science, 1911, 4(1):1 ~24.
- 7 Kostiaikov A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Trans. Sixth Comm. Int. Soc. Soil Sci., 1932, 6: 17 ~21.
- 8 Horton R E. Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration-capacity[J]. Transactions of the American Geophysicists, Union, Part IV, 1939: 693 ~694.
- 9 Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1941, 5(C): 399 ~417.
- 10 Philip J R. An infiltration equation with physical significance[J]. Soil Science, 1954, 77(2): 153 ~158.
- 11 Philip J R. The theory of infiltration: I. The infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345 ~358.
- 12 Philip J R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Science, 1957, 84(3): 257 ~ 264.
- 13 Ogden C B, van Es H M, Schindelbeck R R. Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(4): 1 041 ~ 1 043.
- 14 Perroux K M, White I. Designs for disc permeameters[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(5): 1 205 ~1 215.
- 15 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, 42.  
Yuan Jianping, Jiang Dingsheng, Wen Miaoxia. Research on rainfall penetration testing device of slopeland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(1): 24 ~27, 42. (in Chinese)
- 16 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.
- 17 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.
- 18 Levy G J, Levin J, Shainberg I. Pre-wetting rate and aging effect on seal formation and interrill soil erosion[J]. Soil Science, 1997, 162(2): 131 ~139.
- 19 Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 203 ~209.
- 20 Morin J, van Winkel J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4): 1 223 ~1 227.
- 21 Janeau J L, Bricquet J P, Planchon O, et al. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand[J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54(3): 543 ~554.
- 22 薛绪掌, 张仁铎. 用盘式负压入渗仪数据计算土壤导水参数[J]. 水利学报, 2001(10): 12 ~18.  
Xue Xuzhang, Zhang Renduo. Calculation of hydraulic properties using the data measured by disc infiltrometers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(10): 12 ~18. (in Chinese)
- 23 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 54 ~58.  
Xu Mingxiang, Liu Guobin, Bu Chongfeng, et al. Experimental study on soil infiltration characteristics using disc permeameter [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4): 54 ~58. (in Chinese)
- 24 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.
- 25 王文焰, 张建丰. 田间土壤入渗试验装置的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(4): 38 ~44.  
Wang Wenyan, Zhang Jianfeng. Research on soil water penetration testing device[J]. Journal of Soil and Water Conservation,

- 1991,5(4): 38~44. (in Chinese)
- 26 Prieksat M A, Ankeny M D, Kaspar T C. Design for an automated, self-regulating, single-ring infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(5): 1409~1411.
- 27 王富庆,沈荣开. 新型智能土壤入渗特性测试仪[J]. 中国农村水利水电, 1998(10): 10~11.
- Wang Fuqing, Shen Rongkai. New intelligent tester for soil infiltration[J]. China Rural Water and Hydropower, 1998(10): 10~11. (in Chinese)
- 28 Milla K, Kish S. A low-cost microprocessor and infrared sensor system for automating water infiltration measurements[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 53(2): 122~129.
- 29 丁文峰,张平仓,任洪玉,等. 秦巴山区小流域水土保持综合治理对土壤入渗的影响[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 11~14.
- Ding Wenfeng, Zhang Pingcang, Ren Hongyu, et al. Effect of comprehensive watershed control on infiltration rate in the Qinba Mountain Area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1): 11~14. (in Chinese)
- 30 林代杰,郑子成,张锡洲,等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 33~36.
- Lin Daijie, Zheng Zicheng, Zhang Xizhou, et al. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 33~36. (in Chinese)
- 31 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- 32 吴发启,赵西宁,崔卫芳. 坡耕地土壤水分入渗测试方法对比研究[J]. 水土保持通报, 2003, 23(3): 39~41.
- Wu Faqi, Zhao Xining, Cui Weifang. Comparative study on determining methods of soil infiltration of slope farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(3): 39~41. (in Chinese)
- 33 王翠萍,廖超英,张长忠,等. 黄土地表生物结皮对土壤贮水性能及水分入渗特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 54~59, 64.
- Wang Cuiping, Liao Chaoying, Zhang Changzhong, et al. Effects of biological soil crusts on soil water storage capability and permeability in loess area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 54~59, 64. (in Chinese)
- 34 Fattah H A, Upadhyaya S K. Effect of soil crust and soil compaction on infiltration in a Yolo loam soil[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(1): 79~84.
- 35 Li X Y, González A, Solé-Benet A. Laboratory methods for the estimation of infiltration rate of soil crusts in the Tabernas Desert badlands[J]. Catena, 2005, 60(3): 255~266.
- 36 蒙宽宏. 土壤水分入渗测定方法及影响因素[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2006.
- 37 冶运涛,伍靖伟,王兴奎. 双环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 measurement on hydraulic conductivity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(3): 14~18. (in Chinese)
- 38 来剑斌,罗毅,任理. 双环入渗仪的缓冲指标对测定土壤饱和导水率的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 19~25.
- Lai Jianbin, Luo Yi, Ren Li. Effects of buffer-index of the double-ring infiltrometers saturated hydraulic conductivity measurements[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(1): 19~25. (in Chinese)
- 39 程金花,张洪江,史玉虎,等. 长江三峡花岗岩地区优先流对渗流和地表径流的作用[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 18~23, 42.
- Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, Shi Yuhu, et al. Effects of preferential flow on infiltrated flow and surface runoff in the granite area of the Three Gorges[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(2): 18~23, 42. (in Chinese)
- 40 Mosley M P. Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand[J]. Journal of Hydrology, 1982, 55(1): 65~92.
- 41 李智广. 水土流失测验与调查[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- 42 Moroke T S, Dikinya O, Patrick C. Comparative assessment of water infiltration of soils under different tillage systems in eastern Botswana[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2009, 34(4): 316~323.
- 43 Carlier E. A probabilistic investigation of infiltration in the vadose zone: proposal for a new formula of infiltration rate[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(21), 2845~2849.