

# 推求土壤水分运动参数的简单入渗法\*

## II. 实验验证

邵 明 安

(中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100)  
水利部

王 全 九

(中国科学院水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; 西安理工大学水资源所, 西安 710048)  
水利部

Robert Horton

(Department of Agronomy, Iowa State University, Ames, Iowa, USA)

**摘 要** 预报土壤中水分流动需要的土壤导水特性可通过观测水平土柱的入渗过程来确定, 这一观测过程的分析是基于对 Richards 方程求积分解。土壤水分特征曲线中的参数由观测的水平土柱的特征湿润长度和吸力来确定, 非饱和土壤导水率由已确定的特征曲线中的参数和测定的饱和导水率导出。供试土壤有三种, 它们的质地从砂壤到粘壤。由这种方法所确定的这三种土壤的水分特征曲线与实测的特征曲线符合良好, 所确定的砂壤的非饱和导水率与实测值的比较令人满意。利用数值法和积分法分别计算了土壤含水量剖面, 计算结果吻合良好, 说明了这种方法的合理性。

**关键词** 简单入渗法, 土壤导水特性, 水平土柱实验

**中图分类号** S152.7

土壤导水特性包括: 土壤水分特征曲线(容积含水量( $\theta$ )与压力水头( $h$ )之间的关系), 土壤导水率( $k$ )和土壤水分扩散率( $D$ )。由于这三个参数由关系式  $k = D \frac{d\theta}{dh}$  联系起来, 所以三个参数中只有两个是独立的。通常认为: 土壤水分特征曲线和土壤导水率是两个最重要的导水特性。不幸的是, 非饱和土壤的导水特性难于测定或推求。几十年来, 人们投入了大量的精力来测定或推求土壤的导水特性<sup>[1-5]</sup>, 也提出了很多室内和田间方法, 其详细的评述可参见文献 [4, 6, 7]。多数方法缺乏精度、耗时、需昂贵的专用设备、需特殊的操作技能, 或者仅能提供很有限范围内的导水特性资料<sup>[8, 9]</sup>。因此, 如能从一个简单的实验或容易观测的特性而确定土壤的导水特性将对土壤物理学家有潜在的吸引力。

简单入渗法基于对水平入渗的 Richards 方程求解, 并应用 van Genuchten 所描述的土

\* 中国科学院重大项目(KZ951-B1-211)和国家自然科学基金资助课题(I和II均为49871039, 59879026)

壤导水特性的模式<sup>[10]</sup>。本文比较了由简单入渗法推求的和由实验测定的土壤导水特性,该方法的理论分析部分可参见文献 [11]。推求标定参数( $\alpha$ )和形状参数( $n$ )的方程分别为:

$$\alpha = \frac{2(n+1)\kappa_s}{n(\theta_s - \theta_r)d^2} \left[ \frac{1}{m} \left( \frac{\theta_s - \theta_i}{\theta_s - \theta_r} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$n = \frac{S}{d(\theta_s - \theta_r) - S} \quad (2)$$

式中,  $\theta_s$  是饱和含水量,  $\theta_r$  是残留含水量,  $\kappa_s$  是饱和导水率,  $S$  是吸渗率,  $\theta_i$  是初始含水量,  $m = 1 - 1/n$ ,  $d$  是湿润区的特征长度。方程 (1) 和方程 (2) 构成 van Genuchten<sup>[10]</sup> 导水特性模式中的参数推求表达式。

## 1 材料和方法

本研究用三种土壤来验证推求土壤导水特性的简单入渗法。前两种土壤为:从美国土壤制图 Flagler 系列的地块上采得的 Keswick 砂粘壤土和 Webster 粘壤土。第三种土壤是 Manawatu 细砂壤土,其导水特性资料取之于 Clothier 和 Scotter<sup>[12]</sup>。

实验中测定了前两种土壤的一些物理性质。土壤的比表面用吸附法测定<sup>[13,14]</sup>;土壤比重由比重瓶法测定<sup>[15]</sup>;土壤容重用涂蜡法测定<sup>[16]</sup>。这两种土壤的饱和含水量由土壤饱和时的重量含水量和容重确定。残留含水量由  $-15 \times 10^5 \text{ Pa}$  压力势时的含水量近似<sup>[10]</sup>。

前两种土壤的特征曲线由压力腔法测定。此外,在实验室内进行了传统的 Bruce-Klute 水平土柱入渗试验。将风干土装入 0.15m 长、直径 0.038m 的分段有机玻璃管中,其容重控制在  $1.30 \text{ Mg/m}^3$ 。有机玻璃管共由 15 段组成,每段为 0.01m。每段壁上穿有三个孔,再由三根螺丝杆联接而成。这样有利于试验后测定土壤含水量的剖面分布。在入渗过程中,水由一个联结在多孔板上的滴定管供给土柱。实验过程中,量测了湿润锋随时间的变化和入渗到土柱中的水量。当湿润锋到达土柱长度一半左右时,结束水平入渗试验。同时,利用定水头法<sup>[6]</sup>测定两种土壤的饱和导水率。

## 2 结果和讨论

两种土壤的比重( $\rho_s$ )、比表面(SS)和所有三种土壤的饱和含水量( $\theta_s$ )、残留含水量( $\theta_r$ )以及两种土壤的颗粒组成如表 1 所示。细砂壤土的饱和含水量取 Clothier 和 Scotter<sup>[12]</sup>所测

表 1 三种土壤的某些物理性质

Table 1 Selected physical properties of three soils

土壤 Soil	比表面 Specific surface ( $10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}$ )	土壤比重 Specific-gravity ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )	$\theta_s$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	$\theta_r$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
砂壤	—	—	0.44	0.00	—	—	—
砂粘壤	58	2.64	0.54	0.12	0.677	0.113	0.210
粘壤	141	2.57	0.57	0.13	0.321	0.392	0.287

特征曲线接近饱和时的三个实测含水量平均而得,因为他们的测定在饱和附近看起来不太很有规律。细砂壤土的残留含水量假定为零。这一假定对这一质地的土壤可能合理,因为采用 van Genuchten 模式<sup>[10]</sup>对实测特征曲线进行回归也得到残留含水量为零的结果。

三个推求  $\alpha$  和  $n$  的重要参数为吸渗率 ( $S$ )、饱和导水率 ( $\kappa_s$ ) 和特征湿润长度 ( $d$ )— Boltzmann 变量在湿润锋处的值,这里我们把三个参数称作水力参数。显然,这三个参数的重复性是很重要的。表 2 反映了砂粘壤土三个独立土柱获得的这三个参数的情况。这三个参数只有较小的变异,因而有较好的重复性。所有三种土壤的水力参数值如表 3 所示。

表 2 砂粘壤的水力参数

Table 2 The hydraulic parameters for sandy clay loam

土壤 Soil	$S$ ( $10^{-4}$ m/s <sup>1/2</sup> )	$\kappa_s$ ( $10^{-7}$ m/s)	$d$ ( $10^{-3}$ m/s <sup>1/2</sup> )
1	6.34	5.26	1.96
2	6.06	4.89	1.86
3	7.02	5.74	2.17
平均值	6.47	5.30	2.00
标准差	0.49	0.43	0.16

表 3 三种土壤的水力学参数

Table 3 The hydraulic parameter values for three soils

土壤 Soil	$S$ ( $10^{-4}$ m/s <sup>1/2</sup> )	$\kappa_s$ ( $10^{-7}$ m/s)	$d$ ( $10^{-3}$ m/s <sup>1/2</sup> )
砂壤土	14.70	201.00	6.05
砂粘壤	6.47	5.30	2.00
粘壤	5.16	3.36	1.55

三种土壤由简单入渗法计算的  $\alpha$  和  $n$  值与实测特征曲线拟合而得的  $\alpha$  和  $n$  值的比较见表 4。实测的饱和含水量和估计的残留含水量与曲线拟合的也列入表 4 中。无论是由简单入渗法获得的还是由实测特征曲线进行曲线拟合所得到的  $\alpha$  和  $n$  值均趋向于随质地变细而减小。

表 4 三种土壤的参数值(除  $\alpha$  为  $m^{-1}$  外,其余无量纲)Table 4 The parameter values for three soils (All the values are dimensionless except  $\alpha$  ( $m^{-1}$ ))

土壤 Soil	计算值 Calculated				拟合值 Fitted			
	$\alpha$	$n$	$\theta_r$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$\theta_r$	$\theta_r$
砂壤	2.65	3.15	0.44	0.00	2.63	3.05	0.43	0.00
砂粘壤	1.19	1.92	0.54	0.05	0.35	1.94	0.51	0.12
粘壤	0.98	2.84	0.56	0.11	1.23	1.38	0.54	0.13

砂壤土的水分特征曲线的比较数据取之于文献 [12, 17], 由简单入渗法获得的土壤水分特征曲线与实测数据的比较情况如图 1 所示。其余两种土壤由简单入渗法获得的土壤

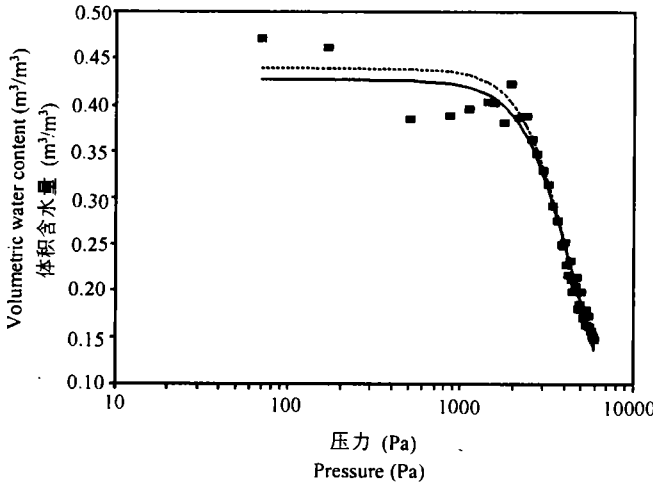


图1 砂壤土简单入渗法(---)、曲线拟合(—)和实测(■)土壤水分特征曲线的比较

Fig.1 Comparison of soil water characteristic curves obtained by the integral method (dash curve) and by curve-fitting (solid curve) with observed data (filled square) for fine sandy loam

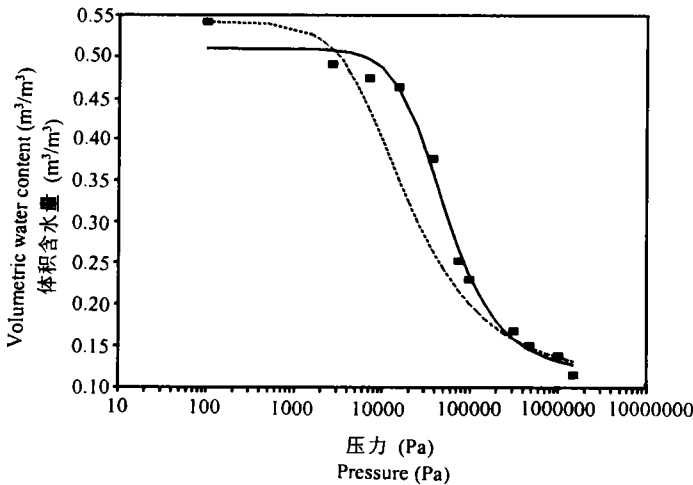


图2 砂粘壤土简单入渗法(---)、曲线拟合(—)和实测(■)土壤水分特征曲线的比较

Fig.2 Comparison of soil water characteristic curves obtained by the integral method (dash curve) and by curve-fitting (solid curve) with observed data (filled square) for sandy clay loam

水分特征曲线与由压力腔实测的特征曲线的比较情况见图2~3。同时,用 van Genuchten 闭合型土壤导水特性方程拟合实测数据的三种土壤的水分特征曲线也显示在图1~3中。总的来讲,由简单入渗法获得三种土壤的水分特征曲线与实测的水分特征曲线配合较好。

由积分方法所获得的 $\alpha$ 和 $n$ 值而后估算的砂壤土的导水率和由实测特征曲线用 Mualem 和 van Genuchten 模型<sup>[12,18]</sup>拟合所得 $\alpha$ 和 $n$ 值进而预报的导水率一并与该土壤实测的导水率(采用定通量法<sup>[12]</sup>)在图4进行了比较。当土壤水压力势在0~2000Pa,无论是由简单入渗法获得的导水率还是由曲线拟合得到的导水率几乎与实测的导水率相同。对

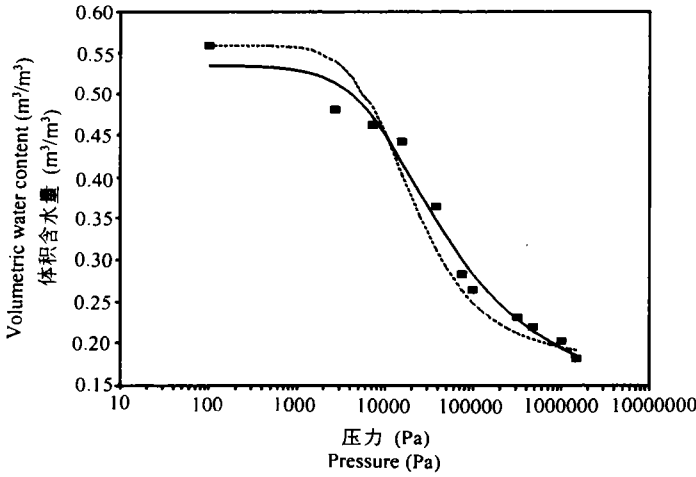


图 3 粘壤土简单入渗法(---)、曲线拟合(—)和实测(■)土壤水分特征曲线的比较

Fig.3 Comparison of soil water characteristic curves obtained by the integral method(dash curve) and by curve-fitting(solid curve) with observed data(filled square) for clay loam

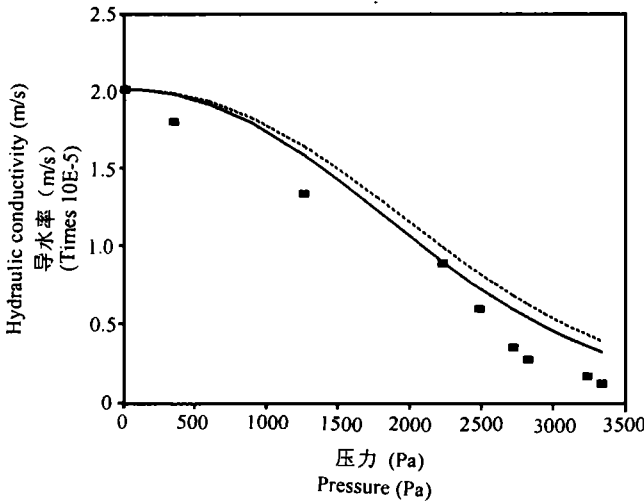


图 4 砂壤土简单入渗法(---)、曲线拟合(—)和实测(■)非饱和导水率的比较

Fig.4 Comparison of unsaturated hydraulic conductivities obtained by the integral method(dash curve) and by curve-fitting (solid curve) with observed data (filled square) for fine sandy loam

于较高的土壤压力势(高于 2000Pa),二者均比实测的导水率高。

### 3 积分法预报土壤含水量的准确性分析

本文确定土壤水分运动参数方法是用积分方法<sup>[11]</sup>求解一维水平 Richards 方程而提出的。为了验证这一方法的合理性和所确定的参数的可靠性,利用数值计算法和积分法分别推求土壤含水量。计算所采用土壤基本参数选自表 3、4,其中表 4 中的参数选取计算法

所得的数据,计算时刻和给定的初始土壤含水量如表 5 所示。

表 5 计算时刻和土壤初始含水量

Table 5 Calculation time and initial water content

土壤 Soil	计算时刻 Calculation time (min)	初始含水量 Initial water content (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	土壤 Soil	计算时刻 Calculation time (min)	初始含水量 Initial water content (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
砂壤	480	0.20	粘壤	960	0.20
砂粘壤	480	0.20			

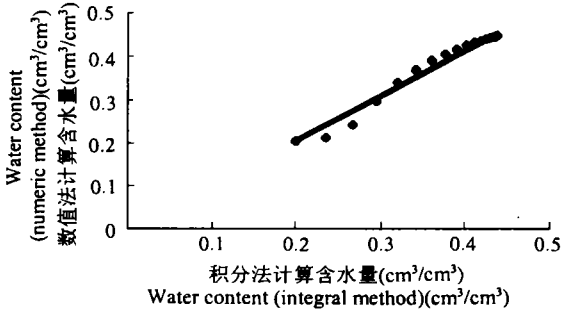


图 5 砂壤土含水量

Fig.5 Soil water content for fine sandy loam

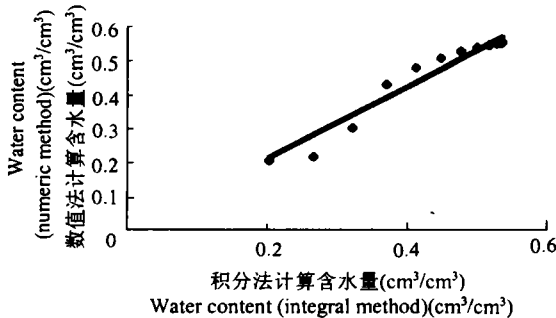


图 6 砂粘壤土含水量

Fig.6 Soil water content for sandy silt loam

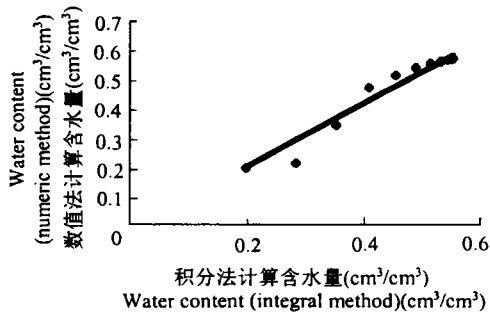


图 7 粉粘壤土含水量

Fig.7 Soil water content for silty clay loam

图 5、6、7 分别显示了两种方法所得的砂壤土、砂粘壤土和粘壤土的土壤含水量,并利用线性函数拟合两种方法所得的土壤含水量。拟合结果如下:

砂壤土:  $\theta_1 = 1.013\theta$   $R = 0.983$

砂粘壤:  $\theta_1 = 1.031\theta$   $R = 0.969$

粘壤土:  $\theta_1 = 1.021\theta$   $R = 0.973$

其中:  $\theta_1$ 为数值法计算的含水量,  $\theta$ 为积分法计算的含水量,  $R$ 为相关系数。由拟合结果可知,两者相关性很好。同时也可知两者的平均相对的误差分别为

1.3%、3.1%、2.1%,说明积分方法和用简单法所得的土壤含水量和参数是合理可靠的。

### 4 结 论

本研究提供的实验证据表明:简单入渗法能用来确定土壤的导水特性。由简单入渗法获得的 van Genuchten 闭合型导水特性模型描述的所有三种土壤的特征曲线均与观测值符合良好。同时通过数值法和积分法计算土壤含水量的比较分析,表明了该方法及所推求的参数的合理性和可靠性。

## 参 考 文 献

1. Bruce R R, Klute A. The measurement of soil moisture diffusivity. *Soil Sci. Am. Proc.*, 1956, 20:458~462
2. Rose C W, Stern W R, Drummond J E. Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil *in situ*. *Water Resour. Res.*, 1965, 3:1~9
3. Dirksen C. Determination of soil water diffusivity by sorptivity measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1975, 39:22~27
4. Green R E, Ahuja L R, Chong S K. Hydraulic conductivity, diffusivity, and sorptivity of unsaturated soils: Field methods. In Klute A. ed. *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph no. 9 (2nd edition). Agron. Soc. Am. and Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, 1986, 771~798
5. Sisson J B, van Genuchten M Th. An improved analysis of gravity drainage experiments for estimating the unsaturated hydraulic functions. *Water Resour. Res.*, 1991, 27:569~575
6. Klute A, Dirksen C. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In Klute A. ed. *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph no. 9 (2nd edition). Agron. Soc. Am. and Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, 1986. 687~734
7. van Genuchten M Th. On estimating the hydraulic properties of unsaturated soil. In: van Genuchten M Th *et al.* ed. *Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. Univ. of California, Riverside, California, 1992. 1~14
8. Plagge R, Roth C H, Renger M. A new laboratory method to rapidly determine the unsaturated soil hydraulic properties. In: van Genuchten M Th *et al.* ed. *Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. Univ. of California, Riverside, California, 1992. 653~663
9. De Jong R, Topp G C, Reynolds W D. The use of measured and estimated hydraulic properties in the simulation of soil water movement—a case study. In: van Genuchten M Th *et al.* ed. *Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. Univ. of California, Riverside, California, 1992, 569~584
10. van Genuchten M Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44:892~898
11. 邵明安, 王全九, Robert Horton. 推求土壤水导水运动参数的简单入渗法 I. 理论分析. *土壤学报*, 2000, 37(1): 1~8
12. Clothier B E, Scotter D R. Constant-flux infiltration from a hemispherical cavity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46:696~700
13. Chihacek L J, Bremner J M. A simplified ethylene glycol monoethyl ether procedure for assessment of soil surface area. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1979, 43:821~822
14. Carter D L, Mortland M M, Kemper W D. Specific surface. In: *Method of Soil Analysis*. ASA monograph, 1986. 9:413~423
15. Blake G R, Hartge K H. Particle density. In: *Method of Soil Analysis*. ASA Monograph, 1986. 9:377~382
16. Blake G R, Hartge K H. Bulk density. In: *Method of Soil Analysis*. ASA monograph, 1986. 9:363~375
17. Clothier B E, Wooding R A. The soil water diffusivity near saturation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1983, 47: 636~640
18. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 1976, 12:593~622

# A SIMPLE INFILTRATION METHOD FOR ESTIMATING SOIL HYDRAULIC PROPERTIES OF UNSATURATED SOILS

## II. EXPERIMENTAL RESULTS

Shao Ming-an

*(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,  
Yangling Shaanxi 712100)*

Wang Quan-jiu

*(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,  
Yangling Shaanxi 712100; Xi'an Institute of Water Resources, Xi'an 710048)*

Robert Horton

*(Department of Agronomy, Iowa State University, Ames, Iowa 50011-1010, USA)*

### Summary

To predict water flow, knowledge of soil hydraulic properties is required. Horizontal infiltration of water into soil columns can be observed in order to determine hydraulic properties. Required physical and mathematical analysis of the observation is based on an integral solution of Richards' equation. The parameters of the soil water characteristic curve are estimated by the observed characteristic length of wetted zone and sorptivity. Unsaturated hydraulic conductivity is estimated from the parameters determined in the soil water characteristic curve and the measurement of saturated hydraulic conductivity. Three soils ranging from sandy loam to clay loam are included in this research. Soil water characteristic curves for the three soils estimated by the infiltration method are in good agreement with measured soil water characteristic curves. Unsaturated hydraulic conductivity, estimated by the infiltration method for the sandy loam, also compares well with measured values. To further check the method, water content of the three soils are calculated through the numeric method and the integral method based on the calculated hydraulic parameters. The calculation results indicate that the method is accurate.

**Key words** A simple infiltration method, Soil hydraulic properties, Horizontal soil-column experiment