

用水平土柱与 Green-Ampt 模型方法测量土壤入渗性能的原理与误差

毛丽丽¹, 张心平¹, 雷廷武^{1,2*}, 刘 汗¹, 史晓楠¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 现代精细农业系统综合研究重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验, 杨凌 712100)

摘 要: 土壤入渗是自然界水循环中的一个重要环节。研究提出了一种新的方法, 根据水量/物质平衡原理和水平土柱中土壤剖面含水率分布所遵循的 Green-Ampt 模型中的活塞假定, 测量和计算土壤入渗性能。用天然容重下的风干砂壤土, 通过室内水平土柱试验, 说明了获取数据的实验方法、过程, 并利用提出的数学模型计算得到土壤入渗性能曲线。利用测量得到的土壤入渗性能回归计算得到的入渗水量分别与实际供水量和由土壤含水率的实际分布计算得到的入渗水量进行对比, 得到相对误差分别为 11.5%、15.89%, 而实际供水量与由土壤含水率实际分布计算得到的水量之间的相对误差只有 1.02%, 说明了该方法的测量精度以及方法精度有进一步提高的可能性。该方法与传统的土壤入渗率测量方法相比, 可以测量出土壤初始很高的入渗率, 而且试验操作简单, 省水, 省时, 为相关研究提供了有力的工具。

关键词: 入渗性能; 测量方法; Green-Ampt 模型; 水平土柱

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)12-0006-05

毛丽丽, 张心平, 雷廷武, 等. 用水平土柱与 Green-Ampt 模型方法测量土壤入渗性能的原理与误差[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 6-10.

Mao Lili, Zhang Xinping, Lei Tingwu, et al. Principles and errors of measuring infiltrability with horizontal soil column and Green-Ampt model[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 6-10. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

入渗是指水分进入土壤的过程, 是自然界水循环中的一个重要环节。如地表产流, 灌溉或降雨后土壤水分分布, 化肥、农药及污染物随水分迁移等, 都涉及到土壤入渗。因此研究土壤的入渗过程具有非常重要的实用价值^[1]。

土壤对水的吸渗能力常用入渗率(单位时间内通过地表单位面积入渗到土壤中的水量)或累计入渗率(一定时段内通过单位面积的总水量)来衡量^[2]。大量试验和理论分析说明土壤入渗率是随时间变化的。入渗过程中, 最初的入渗率很大, 随着时间的推移, 入渗率逐渐降低, 当入渗进行了一段时间后, 入渗率稳定在一个比较固定的水平上, 即达到稳定入渗率^[3]。

土壤的入渗过程受供水能力和土壤本身性质的影响。当供水强度(供水速率)小于土壤入渗能力时, 土壤入渗率由供水速率控制。当供水速率超过土壤入渗能力时, 地表出现积水, 土壤入渗由土壤的吸渗能力控制^[4]。这也是测量土壤入渗能力所要满足的基本条件, 即只有满足了充分供水的条件, 试验中测得的土壤入渗率才是土壤的实际入渗性能。

目前, 有很多测量土壤入渗率的方法, 如双环法^[5]、模拟降雨法^[6]、马力奥-双环法^[7]、圆盘入渗仪法^[8]等。其中使用比较广泛的是双环法: 利用同心圆环, 通过人工注水的方式测量土壤入渗率随时间变化的规律。这种方法在野外操作比较简单, 但是不能应用于坡地, 而且由于受到人工注水的限制, 在最初土壤入渗性能很大的时候不能满足充分供水的条件, 因此也就不能测量初始很高的土壤入渗率。另外双环入土的过程会破坏原状土的土壤结构, 测量的土壤入渗率也就不能真实的反应土壤的这一物理性质。模拟降雨法受雨强的限制在最初阶段也不能满足充分供水的要求, 而且若加大雨强, 雨滴的打击作用会使土壤表面更容易形成结皮, 影响了测量的准确性^[9,10]。马力奥-双环法对传统双环法进行了改良, 通过加入探头等装置提高了精度, 但同时装置变得非常复杂, 造价比较高, 为其野外应用增加了很多不便。圆盘入渗仪法虽然方法简单, 但是在测量过程中会出现

收稿日期: 2007-02-08 修订日期: 2007-08-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40635027); 国家 973 项目(2002CB111502)资助

作者简介: 毛丽丽(1983-), 女, 博士生, 主要从事农业水土工程方面的研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院 251 信箱, 100083。Email: leoam@126.com

*通讯作者: 雷廷武(1958-), 男, 湖北洪湖人, 教授, 博士生导师, CSAE 高级会员, 主要从事农业水土工程研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院 151 信箱, 100083。

Email: ddragon@public3.bta.net.cn

侧渗,影响测量精度^[11]。

综合而言,上述这些方法都在测量准确性以及野外测量的应用上存在较大的缺陷。本项研究的目的是:1)提出一种测量土壤入渗性能的新方法;2)根据 Green-Ampt 模型中土壤含水率分布关系的假设,推导出由水平土柱中湿润锋推进距离随时间的变化过程来估计土壤入渗性能的数学模型;3)采用室内试验说明试验过程、记录数据的方法和计算土壤入渗性能的方法;4)基于水量平衡原理分析该方法的测量误差。

1 原理和计算模型

水平土柱测量方法的试验装置由供水容器(马氏瓶)、升降台、进气管、供水管、水平土柱和土样组成^[12-14](见图 1)。供水流量由马氏瓶控制的稳定供水水位和土柱的入渗速率控制。在试验中,进气口维持着出水口处水位的高度,当土柱的入渗使得水位降低时,马氏瓶自动供水维持供水的水位,因此供水流量实际由土柱的入渗性能控制(忽略重力的影响)。这满足了试验过程中充分供水的要求,即整个入渗过程是由土壤本身的入渗能力控制的。因此,测量得到的土壤实际入渗率为土壤入渗性能。

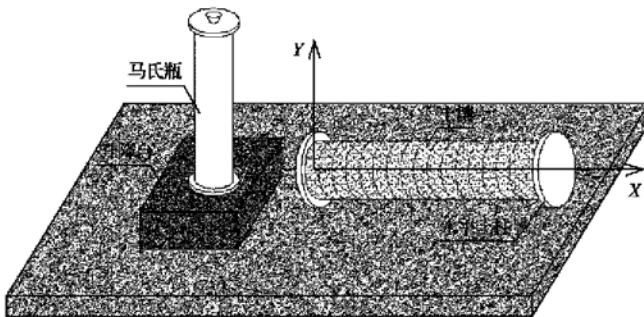


图 1 水平土柱入渗能力测量方法试验装置示意图

Fig. 1 Experimental apparatus for measuring infiltrability with horizontal soil column

入渗初期,土壤入渗性能很高,水流进入土壤的速度比较快,水平土柱内湿润锋沿 X 轴向前推进的速度也很快;随着时间的延长,土壤入渗性能逐渐降低,湿润锋推进速度减慢。最终土壤入渗性能达到稳定入渗率,对应于水平土柱内湿润锋推进达到稳定速度。因此测定出水平土柱内土壤湿润锋沿 X 轴推进速度的变化过程,可以计算得到土壤入渗性能曲线。这是本试验的基本原理。

根据 Green-Ampt 入渗模型中土壤含水率分布的基本假定,将水平土柱入渗过程中土壤水分布简化为理想的活塞模型。假定土壤入渗时存在明确的湿润锋面,湿润锋面将土壤分为完全饱和区和完全未湿润区。完全

饱和区保持恒定的土壤含水率(饱和含水率),运动的湿润锋保持常量的基质势头(0 Pa)。通过这种假定将土壤入渗过程中比较复杂的土壤入渗(含水率)剖面简化为只存在两种情况-完全饱和与完全未湿润的土壤水参数,这样可以比较容易的描述土壤入渗过程。根据 Green-Ampt 模型简化后的土壤入渗过程中土壤含水率沿土柱(X 轴)分布见图 2。

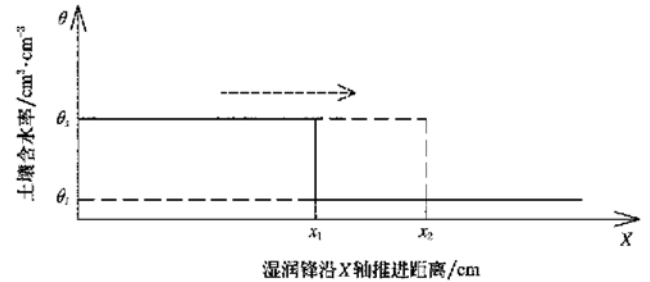


图 2 入渗过程中土壤含水率在 X 轴方向分布曲线

Fig. 2 Soil water distribution in X axis direction during infiltration under Green-Ampt model

从图 2 中可以看出,在理想活塞模型中,水平土柱在土壤入渗过程中只存在两种含水率-饱和含水率 θ_s 和土壤初始含水率 θ_0 。随着入渗过程的持续,土壤含水率分布变化类似于活塞的推动(图 2)。因此在湿润前后土壤含水率的变化是恒定的,为 $(\theta_s - \theta_0)$ 。对这一过程运用水量平衡原理,得到 Δt 时段内进入土柱的水量等于湿润锋从 x_1 推进到 x_2 处增加的水量。

利用水量平衡原理,通过记录土壤湿润锋推进距离随时间的变化过程,得到时段内进入土壤的水量即土壤的累计入渗量,进而利用土壤累计入渗量和土壤入渗率之间的转换关系得到土壤的入渗性能。

利用水量平衡原理得到试验中 Δt 时段内入渗进入到土柱的水量和土壤湿润锋推进之间的关系

$$\Delta I = (\theta_s - \theta_0) \times \Delta x \quad (1)$$

式中 ΔI ——时段内累计入渗量,mm; θ_s ——土壤饱和含水率; θ_0 ——土壤初始含水率; Δx ——时段内湿润锋推进距离,mm。式(1)表明某一时段内入渗的总水量 ΔI 与土壤湿润锋的推进距离呈比例。

累计入渗量和入渗率之间具有如下关系

$$i = \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

式中 I ——累计入渗量,mm; i ——入渗率,mm/h; t ——时间,h。式(2)表明,任意时刻的入渗率等于时段内累计入渗量 I 对时间的导数。

将式(1)代入式(2)得到入渗率 i 和土壤湿润锋推进速度之间的关系为:

$$i = (\theta_s - \theta_0) \times \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

式中 x ——湿润锋推进距离, mm。式(3)表明某一时刻土壤入渗率等于该时刻土壤湿润前后含水率变化值与湿润锋推进速度的乘积。这样通过试验记录土壤湿润锋推进过程就可以得到土壤的入渗性能曲线。

2 材料与方法

为说明利用推导的试验计算方法测量土壤入渗性能的过程:包括试验数据收集与记录、土壤入渗性能的计算方法与表达,进行了室内试验。

试验所用土壤为砂壤土,其中砂粒(2~0.05 mm)占 69.19%,粉粒(0.05~0.002 mm)占 17.40%,黏粒(<0.002 mm)占 13.41%。土样为风干土(含水率 1.75%),过 2 mm 筛,装土容重为 1.26 g/cm^3 ,2 cm 一层分层装入土柱中。在装入下一层土之前,先将前次装入的土层表面用工具打毛,以避免上下土层之间出现结构和水动力学特性突变等不必要的内边界。水平土柱是由 40 个相同的内径为 5 cm,长为 1 cm 的小圆环封闭连接而成,总长度为 40 cm。试验采用马氏瓶恒压供水,试验前先标定马氏瓶流量以便于试验过程中记录各时段内的供水量。马氏瓶进气口与出水口高度基本一致,实现无压供水,并满足充分供水的条件。

试验过程中以图 1 中标出的 $X - Y$ 轴坐标系为标准,记录水平土柱内土壤湿润锋沿 X 轴方向推进的位置以及对应的时间,得到湿润锋推进的过程;同时读取马氏瓶的刻度,得到供水量随时间的变化过程。每次试验持续时间一般为 1.5~2 h(达到土壤稳定入渗率所需要的时间)。停止供水后,将水平土柱内的土壤从湿润锋处开始迅速取土,每个小圆环作为一层分别取出,用烘干法测量每层土壤的含水率,得到土柱内土壤含水率的分布情况。取水平土柱进水口最近的 3 个圆环内的土壤含水率的平均值 40.8% 作为土壤的饱和含水率 θ_s ,将试验前土样的风干含水率 1.75% 记为 θ_0 。

3 结果与分析

3.1 结果讨论

试验中,湿润锋沿 X 轴推进距离 x 随时间 t 的增加而增加,最终推进速度趋于稳定,如图 3 所示。从图中可以很明显的看出土壤湿润锋推进速度的这种变化趋势,对应于最终趋于稳定的土壤入渗率的变化过程。

土壤入渗率具体的计算公式为式(3),在处理试验数据时,采用数值近似的方法,取 x 方向 1 cm 为一个步长。式(3)转换为

$$i = (\theta_s - \theta_0) \times \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4)$$

试验过程中记录的时段内马氏瓶供水量 q 等于土

壤在该时段内的累计入渗量。因此,在水量平衡的基础上,利用累计入渗量与入渗率之间的导数关系以及记录的马氏瓶读数也可以计算出另一条土壤入渗率曲线。这种计算方法并没有利用到活塞模型的假定,因此,由此得到的结果也更接近土壤的真实入渗性能。具体计算公式为

$$i = \frac{1}{A} \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (5)$$

式中 A ——水平土柱横截面积, cm^2 。两种方法计算得到的土壤入渗率随时间变化见图 4。

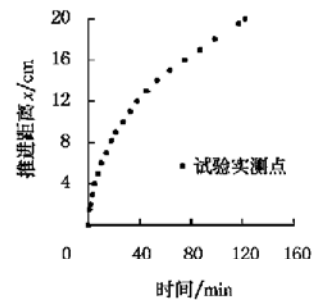


图 3 累计湿润锋推进距离随时间变化图

Fig. 3 Variation of the wetted distance with time

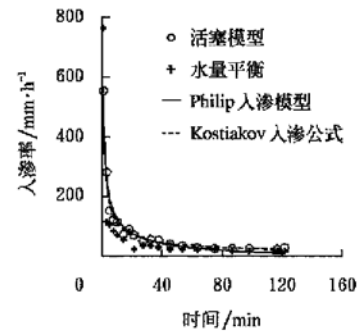


图 4 土壤入渗性能随时间的变化曲线

Fig. 4 Infiltrability curves as a function of time

从图 4 中可以明显的看出,得到的测量结果很好地表达了土壤入渗性能曲线随时间变化规律的概念:在入渗过程的最初阶段,土壤具有很高的入渗率,随着时间的推移,土壤的入渗性能迅速降低,当入渗进行一段时间后,入渗率稳定在一个低且比较固定的水平上,即土壤的稳定入渗率。测量结果利用 Philip 入渗模型^[15]以及 Kostiakov 入渗公式^[16]进行拟合,结果见表 1。拟合结果表明该方法测量得到的土壤入渗性能曲线与这两种入渗模型非常接近,决定系数均大于 0.98。而且通过比较看出利用测量得到的流量数据并基于水量平衡原理得到的土壤入渗率总体上要比利用活塞模型计算得到的数值低。因此得出:采用 Green-Ampt 模型计算得到的入渗性能较实际偏大。

表 1 Philip 入渗模型与 Kostiakov 入渗公式拟和结果

Table 1 Fitted results of infiltrability by using Philip model and Kostiakov formula

	A	B	R ²
Philip 入渗模型 $i = A \times t^{-0.5} + B$	516.28	- 37.33	0.982
Kostiakov 入渗公式 $i = A \times t^B$	487.60	- 0.634	0.988

3.2 误差分析

误差分析的基本原理为水量平衡。具体方法为比较由式(2)计算得到的整个试验持续时间内的土壤入渗量和实际供水量之间的差异。即将理论入渗总水量 Q_1 与试验中记录的马氏瓶的总供水量 Q_2 比较,最后得出试验误差,具体公式如下

总入渗量为

$$Q_1 = (\theta_s - \theta_i) \times V_f \quad (6)$$

式中 V_f ——总湿润体积, cm^3 。

马氏瓶的供水量由试验中马氏瓶的初始和最终读数的差值得到为

$$Q_2 = |R_i - R_f| \quad (7)$$

式中 R_i 和 R_f ——分别为马氏瓶的最初和最终读数, cm^3 。

试验误差 δ_1 为

$$\delta_1 = \left| \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \right| \times 100\% \quad (8)$$

试验测量得到的土壤含水率沿 X 轴分布曲线与模型假定含水率分布曲线比较见图 5。利用试验得到的含水率分布曲线计算得到的实际入渗水量 Q_1' 与由活塞模型假定的含水率沿 X 轴分布得到的入渗水量 Q_2' (即由入渗性能计算得到的水量) 比较(图 5), 得到这两者之间的相对误差 δ_2 。具体数值见表 2 所示。

表 2 误差分析结果列表

Table 2 Values of the parameters used in error analysis

参数	Q_1/cm^3	Q_2/cm^3	$\delta_1/\%$	Q_1'/cm^3	Q_2'/cm^3	$\delta_2/\%$
数值	153.4	137.6	11.5	139.0	161.1	15.89

上面提供的试验数据以及计算结果表明测量结果具有较高的精度。同时 $Q_1 > Q_2$, 再次说明采用 Green-Ampt 模型计算得到的入渗性能较实际偏大。 Q_1' 与 Q_2' 之间的相对误差为 15.89%。这个误差结果非常接近于利用水量平衡原理计算得到的误差 11.5%。由实际含水率分布获得的入渗水量与实际供水量间的误差仅为 1.02%。

分析整个试验操作过程以及计算模型可以得出试验误差的来源主要有以下几个方面:

1) 读数产生的误差, 包括土壤湿润锋推进距离读

数、秒表读数、马氏瓶刻度读数;

2) 试验数据处理过程中产生的误差, 包括数据的近似取值和用式(4)代替入渗率求解式(3)时引进的误差;

3) 活塞模型假定引进的误差。

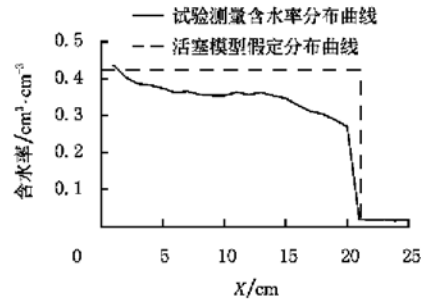


图 5 实测与模型含水率分布曲线比较图

Fig. 5 Comparison between the model values and the measured ones

从图 5 中可以看出, 水平土柱内实际土壤含水率分布曲线并不是绝对的活塞模型, 含水率沿 X 轴是逐渐降低至它的风干含水率。因此, 应用活塞模型实际上是夸大了土壤湿润锋推进过程中土柱内增加的水量, 并且从图 4 中也可以看出利用活塞模型计算得到的土壤入渗率要比利用流量读数得到的结果偏大。通过分析证实这种假设是导致由模型计算出的总水量 Q_1 大于试验过程中马氏瓶的实际供水量 Q_2 的主要原因。这说明计算误差主要来源于含水率分布为活塞模型(Green-Ampt)的假定。因此通过对假定的修正可提高入渗性能测量的精度。

4 结论

基于水量平衡原理和活塞模型假定, 提出了一种测量土壤入渗性能的新方法。通过水平土柱内土壤湿润锋沿水平方向推进距离的变化过程推导出计算土壤入渗性能的模型。利用室内试验, 采用天然容重下的风干土说明了试验测量方法、数据处理方法以及试验结果。

试验结果表明: 水平土柱测量土壤入渗性能的方法是可行的。利用水量平衡原理, 比较实际供水量和试验数据计算的总水量得到试验的相对误差为 11.5%。说明该方法具有较高的精度。与现在几种常用的方法相比, 该测量方法比较简单, 省时, 省水而且克服了其他方法不能测量土壤入渗性能初始很高的缺点。

[参 考 文 献]

[1] Warren V, Jr Gary L, Lewis. Introduction to hydrology [M]. Addison-Wesley Educational Publishers, Inc. 1995: 45- 78.

- [2] Hillel D. Environmental Soil Physics [M]. New York: Academic Press, 1998: 385– 426.
- [3] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 77– 130.
- [4] Scott H Don. Soil Physics [M]. Ames: Iowa State University Press, 2000.
- [5] Bouwer H. Intake rate: Cyliner infiltrometer [M]. In: Klute A, ed. Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Am Soc Agron Madison, WI. 1986: 760– 784.
- [6] Peterson A E, Bubenzer G D. Intake rate: sprinkler infiltrometer [M]. In: Klute, A. ed., Methods of Soil Analysis., Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Am. Soc. Agron. Madison, WI, 1986: 784– 810.
- [7] 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.
- [8] Perroux K M, White I. Design for disc permeameters [J]. Soil Science Society of American Journal, 1988, 52: 1205– 1215.
- [9] Morin J, Van Winkel J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation [J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60: 1223– 1227.
- [10] Ogden C B, Van Es H M, Schindelbeck. Miniature rain simulator for measurement of infiltration and runoff [J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61: 1041– 1043.
- [11] 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试验研究 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 54– 58.
- [12] 杨诗秀, 雷志栋. 水平土柱入渗法测定土壤导水率 [J]. 水利学报, 1991, 22(5): 1– 7.
- [13] 杨 艳, 王全九, 樊 军, 等. 利用同一土柱测定土壤水分和保守性溶质运移参数 [J]. 水利学报, 2007, 38(1): 120– 126.
- [14] 白军红, 王庆改. 天然盐碱化湿地土壤水分扩散率的分析 [J]. 吉首大学学报, 2004, 25(3): 40– 43.
- [15] Philip J R. The theory of infiltration [J]. Soil Science, 1957, 83: 345– 357.
- [16] Kostiakov A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amchoration [A]. Transactions of 6th Congress of International Soil Science Society [C]. Moscow, Part A. 1932: 17– 21.

Principles and errors of measuring infiltrability with horizontal soil column and Green-Ampt model

Mao Lili¹, Zhang Xinping¹, Lei Tingwu^{1,2*}, Liu Han¹, Shi Xiaonan¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research,

College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China)

Abstract: Infiltration is an important component of natural water circulation. A new method was advanced to experimentally measure and theoretically compute the soil infiltrability based on the water/mass balance and the assumption of Green-Ampt distribution of soil moisture content in the infiltrating horizontal soil column. A sandy loamy soil was used to illustrate the experimental method and procedures as well as the algorithms for estimating infiltrability from the experimental data. Comparisons of the cumulative infiltrated water amount as computed with the estimated infiltrability with the total supplied water and that estimated from the actual changes in the moisture contents of the soil column indicate that the relative estimation errors are 11.5% and 15.89% respectively, and the relative error between the actual supplied water volume and water derived from the actual water contents measured in the experiment is only 1.02%, which demonstrates a relatively high accuracy of the method and also the possibility to improve the accuracy of this method. The results show that the method can well conceptually represent the very high initial soil infiltrability compared with the conventional methods. This method is convenient for faster field determination of soil infiltrability with much less water required. It will find its wide applications of future study in this direction.

Key words: infiltrability; measured method; Green-Ampt model; horizontal soil column