

用水平土柱估算土壤入渗性能和水分布简化模型方法*

毛丽丽 雷廷武

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

【摘要】 在对 Green-Ampt 修正模型研究的基础上, 根据水量平衡原理, 提出了在水平土柱试验供水量、土壤初始与饱和含水率、土壤含水率线性分布假定的基础上计算土壤入渗性能的简化模型方法。用本研究提出的简化算法计算得到的土壤入渗性能与其他方法得到的结果非常接近。将该简化方法计算得到的土壤含水率分布与实测值进行比较表明, 平均误差为 4.18%, 证明该方法估算的土壤含水率分布与实测值非常接近。结果表明该方法可以较为准确地估算土壤入渗性能在时间上及含水率在空间上的分布, 能方便地应用到相关研究与应用中。

关键词: 水平土柱 Green-Ampt 入渗模型 土壤含水率 修正模型

中图分类号: S152.7⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0049-05

Simplified Method for Soil Water Distribution and Infiltrability Estimations

Mao Lili Lei Tingwu

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

Abstract

A simplified mathematic model was formed to estimate the soil infiltrability from the total water supply, the initial and saturated soil water content and the linear assumption of the soil water distribution based on the study of modified Green-Ampt model and the mass/water balance principle. The soil infiltrability estimated with this new simplified method is very close to the values calculated with the other methods. Comparisons were made between the predicted and measured soil water distribution. The average relative error was 4.18% which verified that the predicted one was very close to the measured values. The results showed that the newly suggested model could predict the soil water distribution along the horizontal soil column as a function of time very accurately. This new model is readily applicable to the related studies and applications. It has great importance for the study of hydrologic circulation studies.

Key words Horizontal soil column, Green-Ampt infiltration model, Soil water content, Modified model

引言

土壤入渗过程是水文循环中的重要环节。土壤入渗性能决定了降雨转化为地表水的数量, 地表侵蚀程度以及污染物和化肥等随水分迁移的过程等^[1]。

入渗初期, 水分进入土壤的速度很快, 土壤具有

很高的初始入渗性能; 随着时间的推移, 土壤的入渗性能逐渐降低并最终趋于一个稳定值, 即稳定入渗率^[2]。

土壤入渗性能受供水强度的影响, 当供水流量超过土壤的本征入渗性能时, 土壤入渗过程受土壤入渗性能的控制; 当供水不充分, 供水流量低于土壤入渗性能时, 土壤的入渗过程受试验供水流量的控

收稿日期: 2009-12-10 修回日期: 2010-01-06

* 国家自然科学基金资助项目(40635027)

作者简介: 毛丽丽, 博士生, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: leoam@126.com

通讯作者: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: ddragon@public3.bta.net.cn

制^[3]。

本文在 Green-Ampt 修正模型的基础上,对水平土柱含水率分布进行估计;将模型计算得到的土壤含水率分布与试验实际测量得到的结果进行比较;利用得到的土壤含水率分布估算土壤入渗性能随时间的变化过程;将计算得到的土壤入渗性能与活塞模型及修正 Green-Ampt 模型计算得到的结果进行比较,分析估算方法的精度。

1 原理与研究基础

目前土壤入渗率测量方面常用的方法主要有双环法^[4]、模拟降雨法^[5]、圆盘入渗仪法^[6]、降雨入流流出法^[7]、线源入流测量法^[8]和水平土柱测量法^[9]等。双环法,在双环入土的过程中,地表土壤结构遭到破坏;双环法和模拟降雨法在测量过程中均出现地表结皮现象,大大低估了土壤的真实入渗性能,影响了测量精度^[10-11]。由于供水条件的限制,不能测量土壤初期很高的入渗性能。圆盘入渗仪法轻便,简单,省水,但是不能在坡地使用,并且在入渗过程中稍有侧渗,同样影响了测量精度^[12]。降雨入流流出法^[7,13]和线源入流测量法^[8]在降雨/无降雨的条件下,利用地表湿润面积与土壤入渗性能之间的相互关系,通过测量地表水流/湿润面积的推进过程计算土壤入渗性能。这两种方法均能满足充分供水的条件,可以测量得到土壤完整的入渗性能曲线。

毛丽丽等^[9]提出的水平土柱测量法,利用 Green-Ampt 入渗模型中对土壤含水率分布的活塞模型假定,即将水平土柱入渗过程中土壤水分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。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2种——完全饱和与完全未湿润的土壤水参数。通过测量水平土柱内湿润锋推进过程计算土壤入渗性能。该方法操作简单,试验持续时间短,需水量少,适合室内试验研究。

由于活塞模型对土壤含水率分布的夸大,导致计算得到的土壤入渗率比土壤实际入渗性能偏大。毛丽丽等^[14]提出了对水平土柱内土壤含水率分布模型的线性假定(图1)。

修正的土壤含水率分布模型由2条直线组成。一条直线代表湿润面处含水量急剧下降的过程($\theta_2(x)$),另一直线代表湿润锋面后传导区的土壤

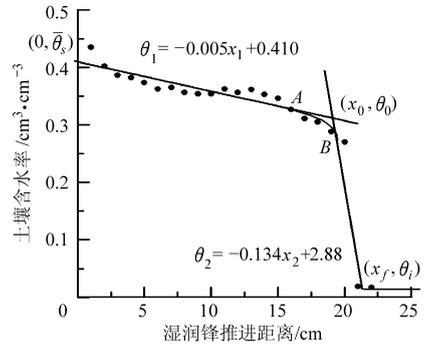


图1 土壤含水率分布的 Green-Ampt 修正模型拟合结果

Fig.1 Soil water distribution under modified Green-Ampt model

水分布($\theta_1(x)$)(图1)。该修正模型更好地表达了实际含水率分布。

图1中的黑点为测量得到的土壤含水率,组合起来成为水平土柱土壤含水率分布图。从图1中可以看出,Green-Ampt 修正模型(实线)可以很好地表征土壤含水率(黑点)分布。用该模型计算得到的土壤入渗率非常接近于土壤的实际入渗性能。根据水量平衡原理,计算得到的试验相对误差为0.66%。这证明了修正的 Green-Ampt 模型,即土壤含水率线性分布模型的精度和相关假定的合理性。

虽然 Green-Ampt 修正模型较活塞模型假定在精度上有了很大的提高,但在实际水平土柱试验过程中,测量土壤含水率分布的工作量仍较大。水平土柱需要分成20~25个厚度为1cm的小土柱,测量每个小土柱的含水率,得到整个水平土柱的土壤含水率分布曲线,该过程非常费时。

本研究在毛丽丽等提出的修正 Green-Ampt 模型对土壤含水率线性假定的基础上,将测量计算方法进一步简化。具体如下。

如图2所示,湿润锋前后端点的坐标 x_f 与 x_0 之间的距离约为1cm,在实际中更小。在本研究中,为了简化模型及计算过程,将这段距离内的含水率忽略。湿润锋作为分割土壤湿润区和非湿润区的边界,没有具体的厚度。由此导致的误差在下面进一步分析。湿润锋后的土壤含水率假定为线性分布;水平土柱内湿润锋在推进过程中,湿润锋处的含水率假定不变。由此,土柱内的含水率分布由图1进一步简化为如图2所示。

由上述土壤水的分布计算得到水平土柱内累积入渗量随时间的变化过程,由饱和含水率 $\bar{\theta}_s$ 、临界含水率 θ_0 、初始含水率 θ_i 以及湿润锋的推进距离得到

$$F = I = K \frac{x(\bar{\theta}_s + \theta_0 - 2\theta_i)}{2} \quad (1)$$

式中 F ——土壤含水率分布线与纵轴和直线 $\theta = \theta_i$ 围成的面积,mm

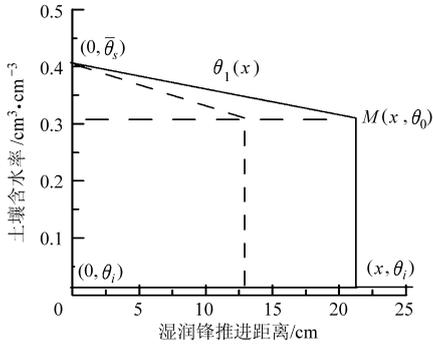


图 2 土壤含水率分布简化模型

Fig. 2 Simplified model of the soil water distribution

I ——简化修正模型下的累积入渗量, mm

K ——单位转换系数, 10

θ_0 ——临界含水量, cm^3/cm^3

$\bar{\theta}_s$ ——饱和含水率, cm^3/cm^3

θ_i ——初始含水率, cm^3/cm^3

x ——湿润锋沿水平方向推进的距离, cm

式(1)表明,土壤累积入渗量与土壤湿润锋推进距离成比例。Green-Ampt 修正模型中, θ_0 是从整个水平土柱含水率分布的拟合过程中得到的。该拟合过程,需要以整个土柱的含水率分布为依据。在本研究中,利用水量平衡原理和累积入渗量与水平土柱内湿润锋推进过程的关系建立数学模型,对该点含水率进行估算。

利用水量平衡原理得到时段内的累积入渗量等于时段内的马氏瓶供水量,即

$$I = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

式中 Q ——马氏瓶的累积供水量, mm^3

A ——水平土柱的横截面积, mm^2

将式(1)代入式(2),得到

$$Q = AI = A \frac{x(\bar{\theta}_s + \theta_0 - 2\theta_i)}{2} \quad (3)$$

式(3)中,马氏瓶累积供水量 Q 、水平土柱横截面积 A 、湿润锋推进距离 x 以及土壤初始、饱和含水率 θ_i 、 $\bar{\theta}_s$ 均可以直接从试验中测量得到。由测量得到的上述参数及式(3),可以快速地估算出湿润锋处的临界含水率为

$$\theta_0 = \frac{2Q}{Ax} - \bar{\theta}_s + 2\theta_i \quad (4)$$

土壤湿润锋处的临界含水率在湿润锋推进过程中假定保持不变。也就是图 2 中, M 点的运动轨迹保持为一条水平直线 ($\theta = \theta_0$)。在估算出 θ_0 的基础上,可以推算出湿润锋推进过程中,水平土柱内的含水率分布。由式(3)可计算出每个湿润锋位置点处的累积入渗量,进而计算出对应时刻的土壤入渗性能。

2 材料与方法

为了验证所提出的土壤含水率分布模型估算结果,本文利用室内水平土柱试验,获取相关参数。为了与之前水平土柱试验中应用的活塞模型和修正的 Green-Ampt 计算模型得到的土壤入渗性能进行比较,本研究选用了文献[9, 13]所用数据。具体试验步骤和试验方法如下: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,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 3 中标出的 X 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作为土壤的饱和含水率 $\bar{\theta}_s$,将试验前土样的风干含水率记为 θ_i 。

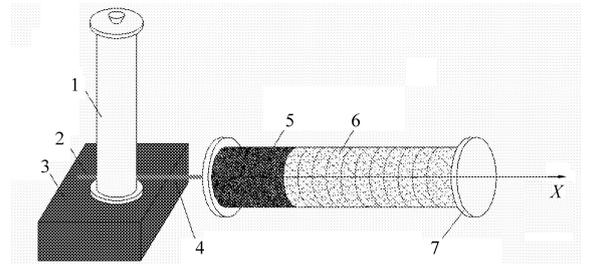


图 3 水平土柱入渗能力测量方法试验装置示意图

Fig. 3 Experimental apparatus

1. 马氏瓶 2. 进气口 3. 升降台 4. 导水管 5. 湿土 6. 干土
7. 水平土柱

3 结果与讨论

试验过程中测量得到的各个参数值为:总供水

量 $Q = 137.6 \text{ cm}^3$; 水平土柱横截面积 $A = 19.635 \text{ cm}^2$; 土壤饱和含水率 $\bar{\theta}_s = 0.41 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; 土壤初始含水率 $\theta_i = 0.0175 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; 水平土柱总湿润长度 $x = 20 \text{ cm}$ 。

将上述测量结果代入式(4),得到的水平土柱内土壤含水率分布线与实际测量和修正 Green-Ampt 模型得到的分布线进行对比,如图4所示。

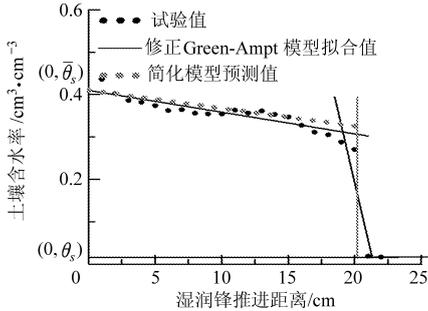


图4 土壤含水率分布实测结果与模型预测结果

Fig.4 Measured and predicted soil water content distributions

如图4所示,本研究提出的简化模型预测结果与试验实测值和修正的 Green-Ampt 线性模型非常接近。与坐标轴围成的面积,即累积入渗量也相差无几。对湿润锋厚度的简化所导致的累积入渗量的变化几乎可以忽略。简化模型与修正的 Green-Ampt 线性模型的含水量分布线性方程表达式为

$$\theta = -0.005x + 0.41 \quad (5)$$

$$\theta = -0.00421x + 0.41 \quad (6)$$

将该简化模型预测出的各个位置处的土壤含水率值与水平土柱试验过程中的实测值进行比较,与1:1的参考线对照如图5所示。

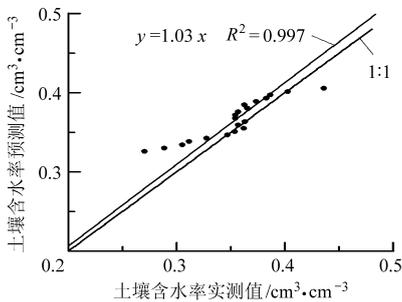


图5 土壤含水率预测值与实测值与1:1直线比较

Fig.5 Comparisons of the soil water content distributions

图5中,拟合方程系数为1.03,非常接近于1。这表明简化模型的预测结果与实际土壤含水率分布非常接近。

将水平土柱内每个位置点处(以1cm为单位)的简化模型预测值与试验实测值进行比较并计算预测的相对误差沿土柱水平方向的变化如图6所示。利用简化模型预测出的土壤含水率与试验实测值的相对误差为0.038%~20.52%。预测结果的平均

误差为4.18%。

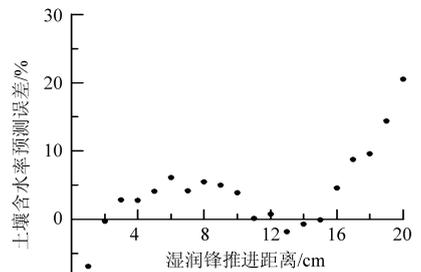


图6 土壤含水率预测误差

Fig.6 Relative errors of the predicted soil water contents

由于在土壤含水率测量过程中也不可避免地存在一些操作上的误差,图6所示的结果表明本研究提出的预测土壤含水率分布的模型具有较高的精度。

累积入渗量和入渗率之间的关系可以表示为

$$i = \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

式中 i ——入渗率,mm/h

t ——时间,h

式(7)表明,任意时刻的入渗率等于时段内累积入渗量 I 对时间的导数。

利用土壤累积入渗量与土壤入渗率之间的转换关系,将式(6)代入式(7),得到利用土柱内湿润锋推进距离和含水率估算土壤入渗率的公式为

$$i = \left(\frac{\theta_0 + \bar{\theta}_s}{2} - \theta_i \right) \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

将计算得到的土壤湿润锋处的含水率代入式(8)计算得到土壤入渗性能曲线如图7所示,除 Green-Ampt 模型中的活塞假定计算结果偏大外,本文提出的简化计算方法与 Green-Ampt 修正模型计算方法得到的结果非常接近。

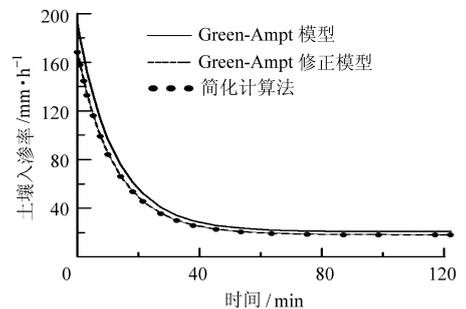


图7 土壤入渗性能计算结果

Fig.7 Soil infiltrabilities estimated with different models

本研究提出的简化模型是由水量平衡原理提出的,将该简化模型计算出的土壤入渗性能作为横轴,将 Green-Ampt 活塞模型及修正 Green-Ampt 模型计算得到的结果作为纵轴与之进行比较,并加入1:1的直线。具体比较结果如图8中所示。图8更清楚地显示了修正模型计算结果与简化模型结果的关系。两

者之间的比较结果非常接近图中的 1:1 直线。

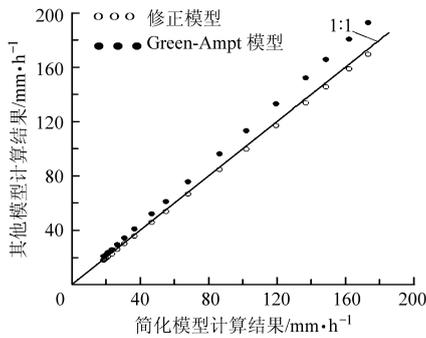


图 8 模型计算结果比较

Fig. 8 Comparisons of the soil infiltrability estimated with different models

Green-Ampt 活塞模型计算得到的结果与另外两种模型的计算结果差别较大。通过上述讨论,这是由于活塞模型夸大了土壤本身的含水率分布,因此计算得到的结果比实际值偏大。图 7 和图 8 证明了本文提出的简化计算方法在简化测量过程,节省时间的同时,保证了模型计算结果的精度。

4 结束语

本文在土壤含水率分布的修正 Green-Ampt 线

性模型基础上,忽略湿润锋面的影响,利用水量平衡原理,建立了土壤含水率分布预测模型,并进而提出推算土壤入渗性能的方法。利用水平土柱室内试验得到的数据对模型进行验证。结果表明,该简化模型预测得到的土壤含水率分布与实测值非常接近,平均误差为 4.18%。该方法只需测量土壤的初始与饱和含水率,试验总供水量和土壤湿润锋的推进过程即可计算得到土壤的入渗性能。不需要测量土柱内含水率分布,测量与计算过程均非常简单,而且省时省力。将得到的结果与 Green-Ampt 模型中的活塞模型以及修正 Green-Ampt 模型得到的结果进行比较,表明本研究提出的计算模型得到的结果与修正 Green-Ampt 模型计算结果非常接近。由于该简化计算模型是直接由总供水量计算出来的,因此可以作为水平土柱试验测量土壤入渗性能的标准与 Green-Ampt 模型和修正模型得到结果进行比较。

本研究提出的该简化模型,可以应用到土壤含水率分布的预报中,简化相关试验的测量步骤。为降雨过程中地表产流过程,土壤侵蚀过程以及水分入渗过程等的研究提供参考。

参 考 文 献

- 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- 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.
- Scott H D. Soil physics[M]. Ames: Iowa State University Press, 2000.
- Bouwer H. Intake rate; cyliner infiltrometer[M] // Klute A. Methods of soil analysis, Monograph No. 9. Am. Soc. Agron. Madison, WI, 1986.
- Peterson A E, Bubenzer G D. Intake rate; sprinkler infiltrometer[M] // Klute A. Methods of soil analysis. Monograph No. 9. Am. Soc. Agron. Madison, WI, 1986.
- Perroux K M, White I. Design for disc permeameters[J]. Soil Science Society of American Journal, 1988, 52(5): 1 205 ~ 1 215.
- 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 Ser D: Earth Sciences, 2006, 49 (2): 193 ~ 201.
- 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 ~ 2): 49 ~ 58.
- 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (12): 6 ~ 10. (in Chinese)
- 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(4): 1 223 ~ 1 227.
- 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.

参 考 文 献

- 1 陈智,麻硕士,赵永来,等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. 农业工程学报,2010,26(1):118~122.
Chen Zhi, Ma Shuoshi, Zhao Yonglai, et al. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(1):118~122. (in Chinese)
- 2 陈智. 阴山北麓农牧交错区地表土壤抗风蚀能力测试研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.
Chen Zhi. Testing study on resistance to wind erosion of land surface soil in the cross region between farmland and grassland in Yinshan Mountain area [D]. Huhhot:Inner Mongolia Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 3 孙悦超,麻硕士,陈智,等. 北方农牧交错区草原地表土壤风蚀原位测试技术[J]. 农业机械学报,2010,41(6):49~52,60.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. In situ testing on soil erosion of grassland surface in the northern farming-pastoral zone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):49~52,60. (in Chinese)
- 4 范贵生. 可移动式风蚀风洞设计及其空气动力学性能研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.
Fan Guisheng. Study on design and aerodynamic performance of movable wind erosion tunnel [D]. Huhhot:Inner Mongolia Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 5 孙悦超. 内蒙古后山地区不同地表覆盖条件下土壤抗风蚀效应测试研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
Sun Yuechao. Test research on soil resistance to wind erosion effect in the different surface coverage in Houshan area of Inner Mongolia [D]. Huhhot:Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 6 孙悦超,麻硕士,陈智,等. 保护性耕作农田风沙流空间分布规律研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(4):180~184.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Testing and research on space distribution rule of drifting sand flux on farmland with conservative tillage [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4):180~184. (in Chinese)
- 7 郝青振,邹学勇,董光荣. 室内沙风洞空洞条件下流场规律[J]. 中国沙漠,1998,18(4):334~339.
Hao Qingzhen, Zou Xueyong, Dong Guangrong, et al. The flow field law under empty tunnel condition in indoor wind tunnel [J]. Journal of Desert Research,1998,18(4):334~339. (in Chinese)
- 8 Wang X, Wang T, Dong Z, et al. Nebkha development and its significance to wind erosion and land degradation in semi-arid northern China [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65(1):129~141.
- 9 Maurer T, Herrmann L, Gaiser T, et al. A mobile wind tunnel for wind erosion field measurements [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 66:257~271.
- 10 Borak S B, Jasinski M F, Crago R D. Time series vegetation aerodynamic roughness fields estimated from moths observations [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 135(1~4):252~268.
- 11 Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Gong Jirui, et al. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel [J]. Soil & Tillage Research, 2004,75(1):53~59.
- 12 Daniel E Buschiazzo, Ted M Oobeck, Bascal S A. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 69(1):29~39.

(上接第 53 页)

- 12 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.
Xu Mingxiang, Liu Guobin, Bu Chongfeng, et al. Experimental study on soil infiltration characteristics using disc permeameter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4):54~58. (in Chinese)
- 13 Lei T W, Liu H, Pan Y 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(1~4): 216~226.
- 14 毛丽丽, 雷廷武, 刘汗, 等. 用水平土柱和修正的 Green-Ampt 模型确定土壤入渗性能的方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 35~38.
Mao Lili, Lei Tingwu, Liu Han, et al. An algorithm method for infiltrability determination with horizontal soil column and modified Green-Ampt model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 35~38. (in Chinese)