

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.009

非充分供水与充分供水入渗模型参数间关系试验*

李雪转^{1,2} 樊贵盛³

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西水利职业技术学院水利工程系, 运城 044004;
3. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

【摘要】 基于均质土壤的非充分供水与充分供水入渗试验数据,分析了非充分与充分供水入渗过程之间的关系,建立了非充分与充分供水入渗 Kostiakov 三参数模型参数之间的关系。结果表明:非充分供水积水后入渗过程以充分供水入渗过程为渐近线;非充分与充分供水入渗参数 α 的比值 m 随着供水强度的增加而增大、随着黏粒含量的增加而增加、随着砂粒含量的增加而减小、随着土干密度的增加而增加、随着初始含水率的增加而减小,它们之间都较好地符合乘幂函数关系;非充分供水稳定入渗率等于同条件下的充分供水稳定入渗率;非充分供水入渗系数 K_1 等于供水强度与稳定入渗率之差。

关键词: 非充分供水 充分供水 Kostiakov 三参数模型 入渗参数

中图分类号: S152.7⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0044-06

Experiment on Relations of Infiltration Model Parameter in Non-sufficient and Sufficient Water Supplies

Li Xuezhuang^{1,2} Fan Guisheng³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
2. Hydraulic Engineering Department, Shanxi Water Conservancy Technical College, Yuncheng 044004, China
3. College of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract

On the basis of the non-sufficient and sufficient water supplied infiltration test of homogenous soil, the infiltration processes for both non-sufficient and sufficient water supplies were analyzed; the correlations of Kostiakov three model parameters for the non-sufficient and sufficient water supplies were established. The result shows that the ponding infiltration process with non-sufficient water supply accords with asymptotic curve of infiltration process with sufficient water supply; the infiltration parameter ratio m increases as the three elements of water supply, namely, intensity, clay content of soil grain and soil bulk density augment, while the parameter ratio m decreases as the two elements of sand content, and moisture content, the steady infiltration rate of non-sufficient water supply equals to steady infiltration rate of sufficient water supply; the infiltration coefficient K_1 of non-sufficient water supply equals to the value of the difference between water supplied intensity of water supply and steady infiltration rate.

Key words Non-sufficient water supply, Sufficient water supply, Kostiakov three parameter model, Infiltration model parameter

引言

非充分供水入渗过程类似于降雨或喷洒条件下

的土壤水分入渗,是水分进入土壤的一个很重要的过程,其入渗过程对降雨径流的产生、水土保持和喷灌技术参数的确定有重要意义。国内外学者对充分

收稿日期: 2009-10-30 修回日期: 2010-03-29

* 国家自然科学基金资助项目(40671081)和山西省自然科学基金资助项目(20051074)

作者简介: 李雪转, 博士生, 山西水利职业技术学院副教授, 主要从事水土环境控制技术研究, E-mail: lxz488@tom.com

通讯作者: 樊贵盛, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理、灌排理论与技术研究, E-mail: Fanguis5507@263.net

供水条件下的水分入渗特性、入渗模型进行了大量研究,各种试验设备、试验方法、各类入渗边界条件下的入渗模型已日臻完善^[1-7]。对非充分供水入渗的研究集中在降雨入渗方面,主要研究各种条件下的产流模型^[8-9],但从土壤入渗角度研究入渗模型及入渗参数的内容较少。在研究非充分供水入渗特性时,由于该试验设备相对复杂,试验过程中积水时刻的确定、积水时入渗过程的衔接、积水后入渗积水水层厚度的控制等关键点难于处理等,限制了非充分供水入渗理论的研究与发展。如果能找到非充分供水入渗与充分供水入渗参数之间的关系,就可利用充分供水入渗试验数据来预测非充分供水入渗过程,为非充分供水入渗模型参数的获取提供一种新的方法。

本文试图通过大量非充分供水入渗和充分供水入渗试验数据,利用概念较为明确而最常用的Kostiakov三参数模型^[10]对两种入渗过程进行分析,寻找表述非充分供水入渗与充分供水入渗两种入渗过程的Kostiakov三参数模型参数间的关系,建立非充分、充分供水入渗模型参数间的数学关系,以便利用充分供水入渗参数来获得非充分供水入渗参数,实现用充分供水入渗来预测非充分入渗过程。

1 材料与方法

1.1 试验土壤性质

试验选用山西省境内8种质地0~20 cm的表层土壤作为供试土壤,尽量涵盖常见土壤质地类型,土壤质地根据国际制划分^[11]。供试土壤砂粒含量变化范围为29%~91%,粉粒为5%~56%,黏粒为4%~25%,土壤干密度的变化范围为1.25~1.45 g/cm³,土壤初始含水率的变化范围为1.5%~16%(占干土质量的百分数)。

1.2 试验设备

1.2.1 充分供水入渗试验设备

充分供水入渗试验设备由充分供水马氏筒、内套和渗吸系统组成。充分供水马氏筒提供恒压供水和测量入渗水量;内套作用是用来提高入渗试验数据的准确性和精度;渗吸系统由渗吸筒和过滤层组成,渗吸筒采用直径为7 cm,高60 cm有机玻璃圆柱体,盛装试验用的土样,过滤层的作用是保证渗吸筒内的土壤通气性。试验设备简图如图1所示。

1.2.2 非充分供水入渗试验设备

非充分供水入渗试验设备由供水系统和渗吸系统两大部分组成。供水系统由非充分供水和充分供水装置组成,非充分供水装置由非充分供水马氏筒、调节板、滴水器和均衡器组成,调节板是调节控制供

水强度,滴水器是保证流量小的情况下均匀无压出流,均衡器的作用是保证滴水器流出的水量均匀渗入渗吸筒。充分供水装置作用是用来提高非充分供水入渗试验数据精度。渗吸系统与充分供水入渗的相同,试验设备简图如图2所示。

1.3 试验方案

非充分供水入渗试验针对供水强度、土壤结构、初始含水率、土壤质地4个变量进行;充分供水入渗试验针对土壤结构、初始含水率、土壤质地3个变量进行。为了便于对比分析,每种土壤质地设计5种干密度(1.25、1.30、1.35、1.40、1.45 g/cm³)水平,5种初始含水率(风干含水率、5.0%、9.0%、13.0%、16.0%)水平,供水强度设计5个水平(0.030、0.050、0.070、0.095、0.130 cm/min),共进行各种组合下的非充分供水入渗试验400组,充分供水入渗试验100组。

土样经过风干、碾压后过2 mm筛,按设计的含水率配好水后,静置24 h,分层(2 cm)按设计的干容重填装渗吸土柱,特别注意处理好土柱边缘土壤,确保无贴壁水流入渗的产生。在试验过程中记录入渗时间、时段入渗量和积水时刻、稳定入渗率。为使试验数据具有一致性,每组入渗试验共进行6 h。相对稳定入渗率采用最后两个测量阶段的平均入渗率作为它的估计值。

2 结果与分析

2.1 非充分、充分供水入渗过程分析

非充分供水入渗过程类似于降雨或喷洒条件下的土壤水分入渗,在入渗初期,供水强度小于土壤入渗能力,土壤表面不产生积水;随着入渗时间的增

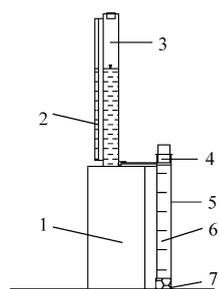


图1 充分供水入渗试验设备示意图

Fig.1 Schematic description of the experimental device used in sufficient water

supplied infiltration

1.平台支架 2.刻度尺 3.充分供水马氏筒 4.内套 5.渗吸筒 6.土柱 7.滤层

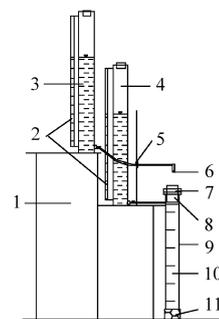


图2 非充分供水入渗试验设备示意图

Fig.2 Schematic description of the experimental device used in non-sufficient water

supplied infiltration

1.平台支架 2.刻度尺 3.非充分供水马氏筒 4.充分供水马氏筒 5.调节板 6.滴水器 7.均衡器 8.内套 9.渗吸筒 10.土柱 11.滤层

加,当土壤入渗率等于供水强度时,土壤表面开始产生积水,此时为积水时刻;积水以后,土壤入渗转化为无压条件下的积水入渗过程。充分供水入渗过程是指无压条件下的积水入渗过程。图3所示曲线为壤质黏土、初始含水率为5.05%、土壤干密度 1.3 g/cm^3 、供水强度(R_0)为0.069、0.095 cm/min和充分供水条件下土壤水分入渗率的变化曲线。

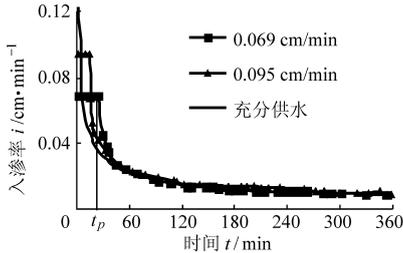


图3 充分与非充分供水条件下的土壤入渗率曲线

Fig.3 Infiltration rate curves of soils under sufficient and non-sufficient water supplies

由图3可看出:

(1)非充分供水入渗条件下,积水时刻(t_p)将入渗过程分为两个阶段,第一阶段是从土壤开始入渗到 t_p 时刻,由于供水强度小于土壤的入渗能力,实际发生的入渗率等于供水强度(R_0),称为供水强度控制阶段。第二阶段是从 t_p 时刻开始到入渗结束,供水强度大于土壤的入渗能力,土壤表面产生径流,此时实际发生的入渗率为 $i(t)$,入渗率随入渗时间增长而逐渐减小,最后趋于一个相对稳定的数值,称为土壤入渗能力控制阶段(简称土壤控制阶段)^[12]。

(2)在相同土壤条件下, t_p 时刻以后,非充分供水入渗曲线与充分供水入渗曲线类似。在入渗1 h前,非充分供水入渗率大于充分供水入渗率,非充分供水入渗率曲线比充分供水入渗曲线陡;同时随着供水强度的增加,入渗率曲线是越来越陡。入渗1 h

后,3条曲线基本重合,说明随着入渗时间的增长,非充分供水入渗曲线愈来愈接近充分供水入渗曲线,以充分供水入渗率曲线为渐近线。

在积水后入渗过程与充分供水入渗过程中,水分入渗主要受重力势梯度和基质势梯度作用,垂直入渗条件下的各点重力势不相等,但重力势梯度恒为1。两种入渗过程不同之处主要是所受基质势梯度不同,在土壤条件和入渗时间相同的情况下,非充分供水入渗时基质势比充分供水入渗时的基质势要大,即土水势梯度大,故非充分供水入渗率比充分供水入渗率大。

2.2 非充分、充分供水入渗模型

充分供水条件下的土壤水分入渗过程很好地符合Kostiakov三参数模型,已为很多人所认可。在非充分供水条件下,对 t_p 时刻后入渗时间进行“ $t-t_p$ ”处理后,利用Kostiakov三参数模型^[13]对8种土壤质地的400多组试验数据进行回归分析,由于篇幅所限,仅将3种质地9组试验数据的回归方程与相关系数列于表1进行分析。

非充分供水 t_p 后的入渗模型和充分供水入渗模型分别为:

非充分供水 t_p 后

$$i(t) = K_1(t-t_p)^{-\alpha_1} + f_{01} \quad (1)$$

充分供水

$$i(t) = Kt^{-\alpha} + f_0 \quad (2)$$

式中 K_1 、 K ——非充分、充分供水入渗系数

α_1 、 α ——非充分、充分供水入渗模型参数

f_{01} 、 f_0 ——非充分、充分供水入渗相对稳定入渗率, cm/min

式(1)、(2)模型结构完全相同,但模型参数不同,对于入渗时间实质上也是相同的,因为入渗时间

表1 不同供水强度条件下的入渗率拟合曲线方程

Tab.1 Function of fitting curves under different conditions of water supplied intensity

土壤质地	土壤颗粒组成 /%	土壤干密度 /g·cm ⁻³	初始含水率 /%	供水强度 /cm·min ⁻¹	积水后入渗率回归方程	相关系数 R^2
壤质黏土	砂粒 33	1.30	5.05	0.069	$i(t) = 0.0603(t-t_p)^{-0.3481} + 0.0100$	0.9511
	粉粒 42			0.095	$i(t) = 0.0834(t-t_p)^{-0.4807} + 0.0098$	0.9466
	黏粒 25			充分	$i(t) = 0.2802t^{-0.7899} + 0.0095$	0.9768
粉砂质黏壤土	砂粒 29	1.45	3.5	0.054	$i(t) = 0.0475(t-t_p)^{-0.4416} + 0.0074$	0.9788
	粉粒 56			0.098	$i(t) = 0.0918(t-t_p)^{-0.5869} + 0.0074$	0.9600
	黏粒 15			充分	$i(t) = 0.1891t^{-0.6723} + 0.0072$	0.9704
砂壤土	砂粒 66	1.49	1.5	0.053	$i(t) = 0.0249(t-t_p)^{-0.1980} + 0.0290$	0.9577
	粉粒 26			0.105	$i(t) = 0.0835(t-t_p)^{-0.4113} + 0.0280$	0.9824
	黏粒 8			充分	$i(t) = 0.7069t^{-0.7343} + 0.0260$	0.9596

在充分供水模型中从零开始,而非充分供水对入渗时间进行 $(t-t_p)$ 处理后,积水后入渗实质上也是从零开始。故入渗模型参数 K_1 与 K 、 α_1 与 α 、 f_{01} 与 f_0 之间具有一一对应。

2.3 非充分、充分供水入渗模型参数间关系

2.3.1 入渗模型参数 α 与 α_1 间关系

从表1中可以看出:不同供水强度、不同初始含水率、不同土壤干密度、不同土壤质地的非充分与充分供水入渗模型参数 α 的比值不同,说明入渗模型参数 α_1 和 α 之间的关系与供水强度、土壤质地、土壤初始含水率、土壤结构有关。为了便于分析非充分、充分供水入渗模型参数 α_1 与 α 之间的数量关系,引入变量 $m = \alpha_1/\alpha$,下面分析 m 与供水强度、土壤质地、土壤初始含水率、土壤结构的关系。

(1) m 与供水强度的关系

图4所示曲线为壤质黏土,土壤初始含水率为8.7%,供水强度在0.03~0.13 cm/min,干密度为1.25 g/cm³时非充分供水与充分供水入渗模型参数比值 m 随供水强度的变化曲线。

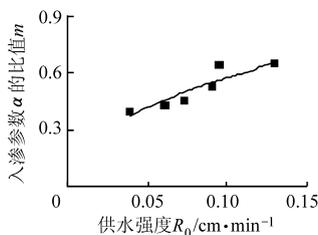


图4 入渗参数比值 m 随供水强度的变化曲线

Fig. 4 Changing curve of the ratio m of infiltration parameter with water supplied intensity

由图4可以看出,入渗模型参数比值 m 随供水强度的增加而增加,它们之间符合幂函数关系。根据试验数据拟合的曲线方程和相关系数为

$$m = 1.676R_0^{0.4668} \quad (R = 0.9160)$$

入渗模型参数 α_1 随供水强度的增大而增大,它们之间符合幂函数关系^[14],同土壤条件下充分供水入渗模型参数 α 值是一个不变的值, $m = \alpha_1/\alpha$ 值的变化趋势应该与 α_1 的变化趋势相同,故入渗模型参数比值 m 随供水强度增加而增大,它们之间符合幂函数关系。

(2) m 与土壤质地的关系

图5所示是土壤初始含水率为风干含水率、供水强度为0.10 cm/min、土壤干密度为1.40 g/cm³时,非充分与充分供水入渗模型参数比值 m 随土壤砂粒、黏粒含量的变化曲线。从图5中可以看出,两种入渗模型参数比值 m 随土壤砂粒含量的增加而减小,随着土壤黏粒含量的增加而增加,它们之间关系都符合幂函数关系。根据试验数据拟合的曲线方

程和相关系数为

$$m = 0.3097x_1^{-0.8308} \quad (R = 0.8354)$$

$$m = 2.3086x_2^{0.6784} \quad (R = 0.9312)$$

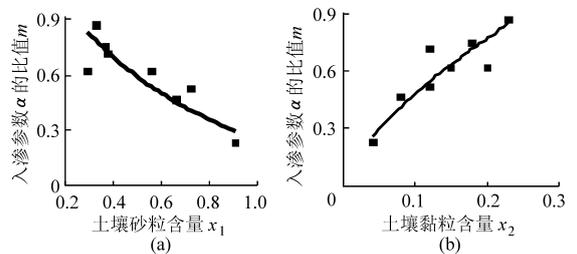


图5 入渗参数比值 m 随土壤质地的变化曲线

Fig. 5 Changing curve of the ratio m of infiltration parameter with the soil texture

(3) m 与土壤干密度的关系

图6所示曲线是质地为壤质黏土、土壤初始含水率为5.05%、供水强度为0.07 cm/min、土壤干密度的变化范围在1.20~1.45 g/cm³之间,非充分与充分供水入渗模型参数比值 m 随土壤干密度的变化曲线。由图6可看出,两种入渗模型参数比值 m 随土壤干密度的增加而增加,它们之间符合幂函数关系。根据试验数据拟合的曲线方程和相关系数为

$$m = 0.32\gamma_d^{2.6488} \quad (R = 0.8472)$$

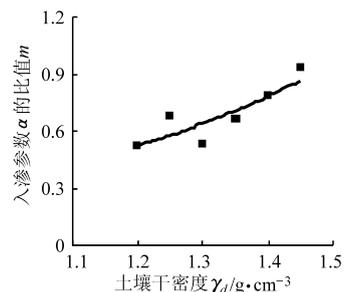


图6 入渗参数比值 m 随土壤干密度的变化曲线

Fig. 6 Changing curve of the ratio m of infiltration parameter with the soil bulk density

非充分与充分供水入渗模型参数比值 m 随土壤干密度的增加而增加,说明在两种入渗过程中,非充分供水条件下的人渗率随土壤干密度的增加而(与同条件下充分供水相比)衰减得更快。这是由于两种入渗过程在同土壤条件下,同一时刻进入土壤入渗界面的水量不同,充分供水入渗时进入土壤的水分多,下渗到土壤的水分较多,入渗率衰减得慢。而非充分供水入渗受供水强度的影响,进入土壤的水分相对较少,在地表积水以后,入渗过程才与充分供水相同,入渗率衰减得较快。

(4) m 与土壤初始含水率的关系

图7所示曲线是壤质黏土、土壤干密度为1.25 g/cm³、供水强度为0.07 cm/min、初始含水率变化范围在5.05%~16%之间,非充分与充分供水

入渗模型参数比值 m 随土壤初始含水率的变化曲线。由图7可以看出,两种入渗模型参数比值 m 随土壤初始含水量的增加而减小,它们之间较好地符合幂函数关系。根据试验数据拟合的曲线方程和相关系数为

$$m = 2.0827\theta_0^{-0.6689} \quad (R = 0.9504)$$

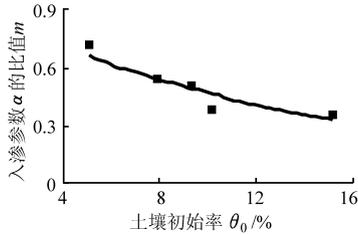


图7 入渗参数比值 m 随含水率的变化曲线

Fig.7 Changing curve of the ratio m of infiltration parameter with the moisture content

表2 入渗模型参数比值 m 预测模型参数估计及检验表

Tab.2 Parameter estimation of the forecasting model infiltration parameter ratio m

F	$F_{0.05}$	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	$t_{0.025}$	样本长度	相对误差/%
11.75	2.37	13.96	2.04	-7.05	15.02	16.16	1.96	380	15.3

由表2可以看出:根据试验数据计算的 F 值都大于相应的 $F_{0.05}$ 值、 T 值都大于 $t_{0.025}$ 值,说明该预测模型和所选自变量都是显著的;预测相对误差为 15.3%,说明用这 5 个变量来计算入渗模型参数比值 m 的误差较小。最后得到 m 与影响因素的经验公式为

$$m = -0.9552 + 0.8355\gamma_d - 0.1726\theta_0 - 0.2121x_1 + 1.6123x_2 + 2.669R_0$$

如果知道同土壤条件下的充分供水入渗模型参数 α 值,利用上式可得到同土壤条件下非充分供水入渗模型参数 α_1 ,计算公式为

$$\alpha_1 = (-0.9552 + 0.8355\gamma_d - 0.1726\theta_0 - 0.2121x_1 + 1.6123x_2 + 2.669R_0)\alpha \quad (3)$$

2.3.2 入渗模型系数 K 与 K_1 间关系

从表1可以看出:在非充分供水条件下,积水后入渗模型参数 K_1 值随供水强度的增加而增加,但其值都小于供水强度,以充分供水的 K 值为最大值。当 $t - t_p = 1 \text{ min}$ 时, $i(t)$ 在数值上基本与供水强度接近,即 K_1 与 f_0 之和在数值上与供水强度 (R_0) 相等,与非充分供水积水时入渗边界条件吻合,说明 K_1 值的大小与供水强度和稳定入渗率有关,与充分供水入渗参数 K 值之间没有一定的相关性,只是以充分供水入渗参数 K 为渐近值。经过对其他 400 组试验数据分析,也证实了上述的结果。入渗参数 K_1 是表示积水后入渗第一单位时间内的平均入渗速度,由

(5) m 与影响因素间的数量关系

由上述分析可知,入渗模型参数比值 m 与供水强度、土壤初始含水率、土壤质地和土壤结构具有较好的相关性。现根据室内 8 种土壤质地的 400 组非充分供水入渗试验和 100 组充分供水入渗试验数据,利用数理统计中的多元线性回归模型建立 m 与其影响因素之间的经验公式。自变量采用土壤干密度、土壤初始含水率、土壤砂粒含量、黏粒含量和供水强度等 5 个因子,预测量为入渗模型参数比值 m 。模型参数的估计采用数理统计中多元线性回归参数估计方法,回归模型的显著性检验采用方差分析方法进行。根据试验分析数据计算 F 值和给定的显著水平对应的 F_{α} 值、 T 值和给定显著水平的 $t_{\alpha/2}$ 值^[15]、预测相对误差和预测样本长度如表 2 所示。

于土壤表面积水时土壤入渗率(初始入渗率)等于供水强度,所以 K_1 值略小于供水强度,故非充分供水入渗参数为

$$K_1 = R_0 - f_0 \quad (4)$$

2.3.3 稳定入渗率 f_0 与 f_{01} 间关系

稳定入渗率 f_0 是入渗达到相对稳定时的水力传导度,也称饱和导水率,其值主要取决于入渗稳定时土壤孔隙的数量和大小^[16]。在土壤质地、干密度、含水率相同的条件下,不论供水强度如何,最后达到相对稳定时的入渗率应该相等,只是达到稳定入渗率所用的时间不同。从表 1 可看出,无论供水强度是大还是小,不论土壤质地如何, f_{01} 值都趋近于同土壤条件下的充分供水入渗的稳定入渗率 f_0 ,随着入渗时间的增长,非充分供水 t_p 时刻后的稳定入渗率等于充分供水稳定入渗率,即

$$f_{01} = f_0 \quad (5)$$

3 结论

(1) 在非充分供水条件下,积水后入渗率曲线随供水强度的增大而越来越陡,非充分供水入渗率曲线以充分供水入渗率曲线为渐近线。

(2) 在土壤相同条件下,非充分与充分供水入渗模型参数间具有较好的相关性,各非充分供水入渗模型参数值以充分供水入渗模型参数为渐近值。

(3) 非充分与充分供水入渗模型参数比值 m 随

着供水强度的增加而增加、随着砂粒含量的增加而减小、随着黏粒含量的增加而增加、随着土干密度的增加而增加、随着初始含水率的增加而减小,它们之

间都较好地符合幂函数关系。

(4)非充分供水入渗模型参数 $K_1 = R_0 - f_0$; 相对稳定入渗率 $f_{01} = f_0$ 。

参 考 文 献

- 1 赵西宁,吴启发.土壤水分入渗研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42~45.
Zhao Xining, Wu Qifa. Developments and reviews of soil infiltration research[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004,19(1):42~45. (in Chinese)
- 2 Ander C E Son, Shahghasemi E, Johnson H P. Modeling infiltration on crop-land including raindrop impact effects [J]. Trans. of ASAE, 1982, 24(5):332~340.
- 3 汪志荣,王文焰,王全九,等.点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J].水利学报,2002,33(6):39~45.
Wang Zhirong, Wang Wenyan, Wang Quanjiu, et al. Experimental study on soil water movement from a point source [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 33(6):39~45. (in Chinese)
- 4 Barry D A. Infiltration under ponded conditions: an explicit predictive infiltration[J]. Soil Sci., 1995,160(1):8~17.
- 5 Swartzendruber D. Derivation of a two-term infiltration equation from the Green-Ampt model[J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(3~4):247~251.
- 6 王文焰,汪志荣,王全九,等.黄土中 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J].水利学报,2003,34(5):30~34.
Wang Wenyan, Wang Zhirong, Wang Quanjiu, et al. Improvement and evaluation of the Green-Ampt model in loess soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,34(5):30~34. (in Chinese)
- 7 李毅,王文焰,王全九,等.非充分供水条件下滴灌入渗的水盐运移特征研究[J].水土保持学报,2003,17(1):1~4.
Li Yi, Wang Wenyan, Wang Quanjiu, et al. Experimental study on water and salt transport characteristics under infiltration of non-sufficient trickle irrigation [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(1):1~4. (in Chinese)
- 8 李裕元,邵安明.降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J].水利学报,2004,35(4):48~53.
Li Yuyuan, Shao Anming. Experimental study on characteristics of water transformation on slope land [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(4):48~53. (in Chinese)
- 9 高鹏,穆兴民,刘普灵,等.降雨强度对黄土区不同土地利用类型入渗影响的试验研究[J].水土保持通报,2006,26(3):1~5.
Gao Peng, Mu Xingmin, Liu Puling, et al. Effects of different types of land-uses and rainfall intensities on soil infiltration in loess plateau of China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(3):1~5. (in Chinese)
- 10 樊贵盛.冻融土壤水分入渗规律与冬灌灌水过程研究[D].北京:中国农业大学,2001.
- 11 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- 12 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.
- 13 李雪转,樊贵盛.非充分供水土壤水分入渗模型的试验研究[J].灌溉排水学报,2009,28(4):37~40.
Li Xuezhuan, Fan Guisheng. Experimental study on soil infiltration model in non-sufficient water supplied [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(4):37~40. (in Chinese)
- 14 李雪转,樊贵盛.供水强度对非充分供水入渗模型参数的影响[J].太原理工大学学报,2009,40(6):632~635.
Li Xuezhuan, Fan Guisheng. Influence of water supplied intensity on infiltration model parameter under non-sufficient water supplied[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(6):632~635. (in Chinese)
- 15 陈魁.应用概率统计[M].北京:清华大学出版社,2002.
- 16 解文艳,樊贵盛.土壤含水量对土壤入渗能力影响的研究[J].太原理工大学学报,2004,35(3):272~275.
Xie Wenyan, Fan Guisheng. Influence of moisture content on infiltration characteristics in field soils[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35(3):272~275. (in Chinese)