

土壤表面积水深度对入渗的影响

陆东旭, 刘金涛*, 尚慢廷, 于 朋

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用 HYDRUS-1D 模型, 对积水入渗问题进行了数值模拟, 并分析了积水深度变化对入渗的影响。采用土柱降雨入渗的观测数据进行模型参数率确定及验证, 结果表明 HYDRUS-1D 模型具有良好的模拟效果。进而, 使用 HYDRUS-1D 模型模拟不同积水深度下的土壤含水量变化情况, 分析发现, 在不同的积水深度情况下, 土柱表面入渗通量有较明显的差异, 积水深每降低 0.5 cm, 同一时间相同观测点位置处土壤含水量减少 1.2%~2.8%, 当上表面水头逐渐增大时这种现象更加明显。

关键词: 土壤; 入渗; 积水深度; HYDRUS-1D

中图分类号: S152.7⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)01-0140-03

当供水强度大于土壤入渗能力时, 水分在土壤表面累积, 积水发生前, 入渗主要受土壤质地及前期条件等的影响, 而非积水情况相比, 积水入渗还是积水深度的函数。在以往的数学模拟研究中, 土壤上表面积水深度通常忽略不计^[1~3]。如 Mein 及 Chu 等所推导的入渗公式中均不考虑积水深度的动态变化及其对入渗的影响。这些研究通常存在一个假定, 即积水入渗过程中土壤基质势梯度对入渗的影响要更大一些^[4]。针对这种情况, 本研究主要模拟不同积水深度情况下的土壤入渗通量变化, 以讨论土壤表面积水深度对入渗影响的程度, 初步给出定量分析。数值模拟使用 HYDRUS-1D 模型^[5], HYDRUS 是专业的模拟非饱和土壤水分运动的软件工具, 能够较好地模拟水分在土壤中的运动过程。研究采用室内实验与数学模拟相结合的方法, 以数学模拟为主。

1 模拟的基础理论

HYDRUS-1D 模型使用 Richard 平衡方程描述土壤非饱和水分运动, 方程如下^[2]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

其中: h 是水头差 (cm); θ 是土壤体积含水量 (%); t 是时间 (s); x 是向上为正的坐标 (cm); $K(h, x)$ 是土壤水力传导率 (cm/s), 计算公式如下:

$$K(h, x) = K_s(x) K_r(h, x) \quad (2)$$

式中: K_r 是残留水力传导率 (cm/s); K_s 是饱和水力传导率 (cm/s)。

2 实验装置

取两种不同性质的土壤, 将它们分层装入实验装置中。采用针式降雨器进行降雨实验, 各层土壤的含水率用时域反射计 (TDR) 收集。

土柱的结构如下图 1 所示, 该土柱高 100 cm,

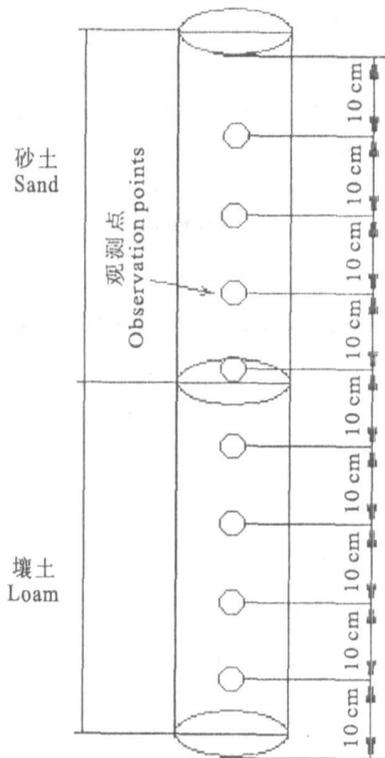


图 1 土柱结构示意图

Fig. 1 Schematic of soil column

收稿日期: 2007-06-28

基金项目: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目 (2006411811)

作者简介: 陆东旭 (1984-), 女, 辽宁盘锦人, 学士, 主要从事水文土壤学研究。E-mail: dongdonglu600@sina.com。

通讯作者: 刘金涛, 男, 河北唐山人, 助理研究员。E-mail: jltiu@hhu.edu.cn。

直径 15 cm, 其中下部 90 cm 装土, 上部空出 10 cm 做降雨模拟, 土柱底部预留通气孔与大气连通。土体的上层 45 cm 装入砂土, 下层 45 cm 装入壤土。然后在土柱的预定位置设计插入 TDR。顶部安放降雨器进行人工降雨。降雨器是一个与土柱直径相同的圆柱, 其中底面插满 9 号针头。

3 模拟运算

3.1 时空离散和边界条件

模拟时将土柱按 0.5 cm 等间隔剖分成 180 个单元。模拟时间共 12 628 s, 采用变时间剖分方式, 根据收敛的迭代次数调整时间间隔。初始时间间隔为 1 s, 最小时间间隔为 0.1 s, 最大时间步长为 10 s。上边界为开放边界, 接受降水入渗。在 HYDRUS-1D 中采用上边界通量随时间变化的处理方式。下边界不能自由排水, 故设定下边界为零通量。

3.2 模型中土壤水分参数的确定

根据实测土壤颗粒组成和干密度, 并结合实测饱和含水率, 利用软件提供的神经网络模型预测土壤水分特征曲线参数^[2]。识别后参数如下:

表 1 土壤水力学性质

Table 1 Hydraulic characters of the tested soil

参数 Parameters	砂土 Sand	壤土 Loam
残留含水量(%) Residual moisture	1.7	2.4
饱和含水量(%) Saturated moisture	46	45
Van Genuchten 方程经验常数 Constant <i>a</i> of Van Genuchten equation	0.041	0.015
Van Genuchten 方程经验常数 Constant <i>n</i> of Van Genuchten equation	2.403	1.327
饱和导水率(cm/h) Saturated hydraulic conductivity	11.10	0.45

4 模拟运算与结果分析

4.1 非恒定降雨强度下的入渗规律

试验开始时上层砂土的初始含水率为 1.7%, 初始降雨强度为 0.001775 cm/s。在积水出现以前, 降雨全部入渗到土柱里, 湿润锋下移。降雨持续到 3 842 s 时, 调整降雨强度为 0.00205 cm/s, 地表含水率达到相对饱和, 地表开始积水入渗, 此后湿润锋面继续下移, 积水逐渐加深。在 5 697 s 时调整雨强至 0.002614 cm/s, 此后积水加深至 3 cm 出流, 积水深保持在 3 cm。9 073 s 时湿润峰到达两层土的分界面。10 090 s 时减小雨强至 0.0004861 cm/s, 此后积水逐渐减少, 湿润锋下移速度减慢。12 628 s 实

验结束, 湿润锋到达 50 cm 深的土层, 积水深 1.7 cm。

利用 Hydrus-1D 模拟剖面上观测点的含水量变化(如图 2); 模拟数据曲线与实测数据曲线拟合良好, 并且模拟数据曲线能够比较准确地反映土柱含水量随时间变化的情况。上面观测点处在上层砂土中, 渗透性良好, 渗流量较大, 土壤含水量随时间变化明显, 并且最终达到饱和状态。处在与砂土区交接的壤土中的观测点的土壤含水量较晚才发生变化。壤土的渗透性较差, 不容易产生渗流。最下层的观测点处在壤土区, 整个实验过程中湿润峰未到达此处, 所以含水量不随时间变化, 始终处于初始含水量状态中。

模拟值与实测值存在一些误差, 误差值在 0%~3% 间波动。最大误差值出现在土壤接近饱和状态时, 非饱和土壤的渗水受到很多其他因素的影响^[2], 比如在填土过程中各层土壤的比重可能会有出入, 从总体上来说, 误差值在实验允许范围中。

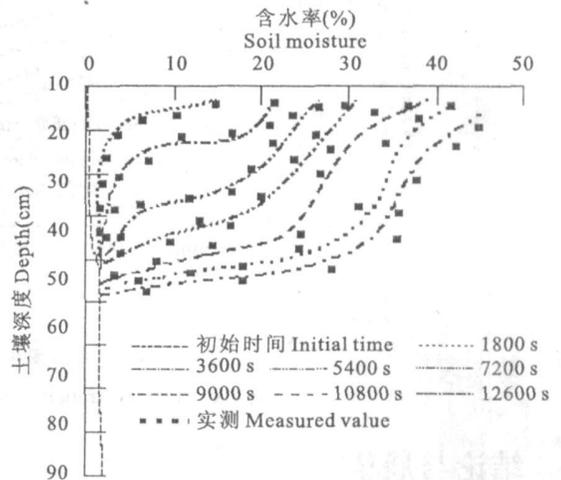


图 2 土柱剖面含水量变化模拟与实测数据对比
Fig. 2 Observed and simulated soil-moisture profile

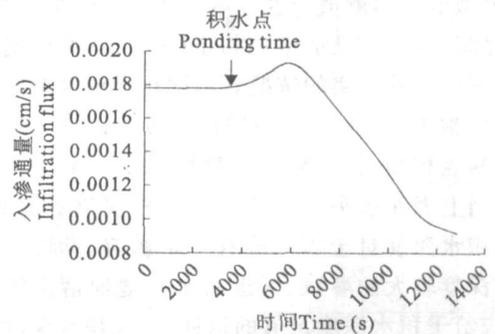


图 3 土壤上表面入渗通量变化曲线
Fig. 3 Surface soil infiltration flux curve

土柱入渗率随时间的变化曲线如图 3 所示。入渗初期由于土柱比较干燥,土柱的入渗能力非常强。因此,开始入渗后的一段时间内,实际的入渗率即为降雨强度。在出现积水时,土壤尚未达到饱和,积水的出现使表层入渗量增加^[3]。随着雨水入渗到土柱内,土柱的入渗能力逐渐下降,在接近饱和和以后土柱的入渗能力开始小于降雨强度,部分多余雨水形成地表径流。当整个上层土柱含水率达到饱和时,入渗率即为表层土壤的饱和渗透系数。

4.2 积水深度对入渗的影响

将上表面边界积水深度分别设定为 0.1 cm, 0.5 cm, 1 cm, 1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm, 3 cm 这几种情况,进行在充分供水条件下的定水头边界情况的降雨模拟。经过模拟分析发现,在不同的积水深度情

况下,土柱上层的砂土上表面入渗通量有较明显的差异。如图 4 所示,积水深度每增加 0.5 cm,同一时间相同观测点位置处土壤含水量增大 1.2%~2.8%。并且当上表面水头逐渐增大时这种现象更加明显。即积水深度变化对砂土入渗通量有着直接影响。随着砂土层含水量逐渐增大,这种现象逐渐减弱。当整个砂土层含水量接近饱和状态时,上表面水头每增加 0.5 cm,砂土相同观测点位置处土壤入渗量增加 0.5%~1%。下层壤土入渗通量受表面积水影响很小,并且壤土只有与砂土接触的上部土壤含水量发生变化。随着砂土层逐渐趋于饱和,下部壤土的入渗量逐渐缓慢增加。积水深度每增加 0.5 cm,壤土入渗通量增加 0.2%~0.5%,积水深度的改变对壤土入渗通量并未有显著的影响。

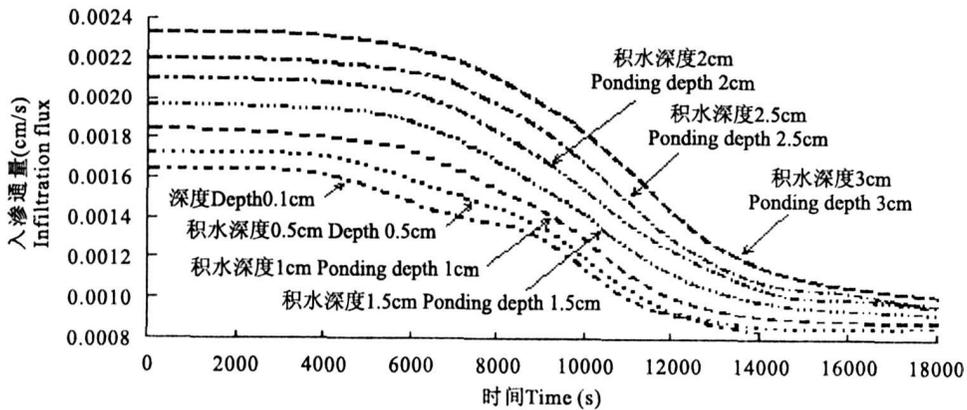


图 4 不同积水深度的土壤入渗通量曲线

Fig. 4 The infiltration flux curve under different surface ponding

5 结论与展望

对室内降雨试验进行模拟后,可以看到模拟数据曲线与实测数据曲线拟合良好,并且模拟数据曲线能够比较准确地反映土柱含水量随时间变化的情况,模拟值与实测值存在一些误差,误差值在 0%~3%之间波动,可见运用 HYDRUS-1D 进行模拟可以较好地反映真实的情况。不同积水深度对入渗影响的模拟中,积水深度每增加 0.5 cm,同一时间相同观测点位置处土壤含水量增大 1.2%~2.8%。并且当上表面水头逐渐增大时这种现象更加明显,可见积水深度对土壤入渗有一定影响。因此,对于积水深度较大的灌溉、河道涨水及湿地蓄水等入渗时,应给予积水深度足够的重视,考虑积水深度的动态变化,确保估算出的入渗量更加符合实际情况。

参考文献:

- [1] Mein R G, Larson C L. Modeling the infiltration during a steady rain[J]. Water Resour Res. 1973, 9, 384-394.
- [2] 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, 57-87.
- [3] Chu X F, Marino M A. Determination of ponding condition and infiltration in layered soils under unsteady rainfall[J]. J Hydrol. 2005, 313, 195-207.
- [4] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44-47.
- [5] J. Simunek, M. Th. van Genuchten and M. Šejna. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media[M]. California: Department of Environmental Sciences University Of California Riverside, 2005, 25-30, 87.

(英文摘要下转第 156 页)

5 结 语

本文以农业经济用水量为研究对象,在分析“农业经济用水量”概念及其内涵的基础上,从系统科学的角度探讨了农业经济用水量的决策层次,结合农业经济用水量数据的复杂性特点,构建了农业经济用水量决策支持系统,对系统的设计目标、系统的功能、数据库、模型库进行了设计,并探讨了系统可能实现的途径。决策层次和系统设计模型虽仍需进一步扩充和完善,但其已为农业经济用水的综合分析利用提供了比较便捷的分析软件,实现了数据的自动化分析,可为干旱地区农业经济用水量决策支持系统的构建及下一步的开发提供重要借鉴。

参 考 文 献:

[1] 山 仑. 能否实现大量节约灌溉用水? 我国节水农业现状与

展望[J]. 资源环境与发展, 2006, (1): 1-4.

[2] 李祥东. 论水资源的利用和保护[J]. 科技信息, 2007, (5): 229.

[3] 新疆统计局. 新疆统计年鉴(1990~2006)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1990~2006.

[4] 甘肃统计局. 甘肃统计年鉴(2000~2007)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000~2007.

[5] 吴普特, 赵西宁, 冯 浩, 等. 农业经济用水量与我国农业战略节水潜力[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(6): 13-16.

[6] 李小琴. 黑河流域水资源优化配置研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.

[7] 吴扬俊, 刘维峰, 范子文. 农业节水决策支持系统[J]. 决策与支持系统, 1996, 6(2): 31-36.

[8] 张绍峰, 王先锋, 牛永生, 等. 黄河流域水资源保护决策支持体系研究[J]. 人民黄河, 2005, 27(9): 34-36.

[9] 吴佳鹏, 党志良, 周卫军. 多级提水灌区水资源管理决策支持系统建设[J]. 水资源保护, 2006, 20(1): 60-63.

Design for decision-making levels and support system of economical agricultural water consumption

NAN Ji-qin^{1,2}, ZHAO Xi-ning^{1,2}, SHANG Hu-jun¹, WANG Yu-bao^{1,2}, WANG You-ke^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China)

Abstract: Economical agricultural water consumption research has become important content of optimizing allocation of regional water resources and scientific management. On the basis of analyzing the concept and connotation of economical agricultural water consumption, decision-making levels of economical agricultural water consumption is put forward, they are macro decision-making, middle decision-making and micro decision-making. And the structure and function of decision support system of economical agricultural water consumption are emphatically elaborated, including seven functions: data management, inquiry service, analysis and statistics, model management, decision support, strategy evaluation and system help. It also designs the data base and model base and investigates the approach to establish the system.

Key words: economical agricultural water consumption; decision-making level; decision support system

(上接第 142 页)

Effects of soil surface ponding depth on infiltration

LU Dong-xu, LIU Jin-tao*, SHANG Man-ting, YU Peng

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hehai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: HYDRUS-1D model was used to simulate soil moisture profiles under artificial rainfall and good results were obtained. Then it was also used to simulate infiltration under different surface ponding. The simulation results showed that the infiltration rate differs from each other with different surface ponding. When the depth of surface ponding reduces 0.5 cm, soil moisture reduces 1.2%~2.8% at the same observing location. This phenomenon becomes more apparent when the head of water on the surface increases.

Key words: soil; infiltration; surface ponding; HYDRUS-1D