

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.Supp.011

不同初始含水率条件下的微咸水入渗实验*

吴忠东¹ 王全九²

(1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255049; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

【摘要】 针对矿化度均为 3 g/L 的微咸水入渗时, 土壤初始含水率对土壤入渗过程的影响, 采用室内均匀土柱一维垂直入渗实验方法, 分别对初始含水率为 2.25%、8.18%、13.12%、16.40% 的土柱入渗过程进行了研究。分析了不同土壤初始含水率对累积入渗量和湿润锋推进深度以及土柱剖面含水率的影响。采用 Kostiakov 模型对累积入渗量和时间的关系进行了拟合, 结果表明累积入渗量与初始含水率呈负相关关系。采用幂函数将初始阶段的湿润锋推进深度与时间关系进行拟合, 结果表明二者呈明显的幂函数关系, 且初始含水率越高湿润锋推进速度越慢。采用一维代数模型对土壤剖面含水率进行分析发现, 初始含水率越高, 模型的理论值越准确。总之微咸水在土壤中的入渗能力与初始含水率有着密切关系, 随着入渗过程的进行, 初始含水率对入渗能力的影响逐渐减小。

关键词: 微咸水 初始含水率 累积入渗量 湿润锋 一维代数模型

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)S0-0053-06

Saline Water Infiltration with Different Initial Moisture Contents

Wu Zhongdong¹ Wang Quanjiu²

(1. Institute of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract

The effect of the infiltration process with initial moisture contents of 2.25%, 8.18%, 13.12% and 16.40% was examined by indoor uniformity earth pillar experiments. The infiltration water mineralization degree was 3 g/L. Both cumulative infiltration and wetting front vs. time with different initial moisture contents infiltrated by saline water were analyzed. Fitting the relationship between cumulative infiltration and time with Kostiakov model, the results showed that the initial moisture content and soil infiltration capacity were negatively correlated. The relationship between wetting front advancing depth and time was fitted by power function. It proved that power function was obvious between them, the lower the initial moisture content was, the slower wetting front advancing rate would be. A 1-D algebraic model was used to analyze soil moisture profiles; it was found that theoretical values were more accurate as the initial moisture contents increased. In brief, there was an intimate connection between soil infiltration capacity and initial moisture contents infiltrated by saline water. As the infiltration process was carried out, the influence of initial moisture contents on infiltration capacity gradually decreased.

Key words Saline water, Initial moisture content, Cumulative infiltration, Wetting front, 1-D algebraic model

引言

土壤水分是联系地表水和地下水的纽带, 在水

资源的形成、转化与消耗过程中具有重要的作用, 与农业、水文、环境等学科领域都有密切的联系^[1]。土壤的初始含水率是大田土壤入渗能力和土壤入渗

收稿日期: 2010-07-01 修回日期: 2010-07-16

* 国家自然科学基金资助项目(50879067)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-003)和陕西省重点学科建设专项资金资助项目

作者简介: 吴忠东, 副教授, 博士, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: wuzhongdong@126.com

通讯作者: 王全九, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: wquanjiu@163.com

参数的重要影响因素之一,它主要是从入渗水流湿润区内的平均势梯度方面影响土壤水分的入渗能力^[2]。在缺水区,地下微咸水是灌溉区域非常重要的一种替代水源^[3]。由于微咸水中所含有的离子成分与土壤胶体和其他化学成分发生物理化学作用而改变土壤孔隙特征,而且土壤初始含水率的不同会影响土壤溶液和胶体颗粒上吸附离子数量,也会对土壤入渗性能产生影响,因此有必要研究不同初始含水率条件下微咸水入渗时的土壤入渗特性。

1 实验与方法

1.1 实验装置

实验装置包括实验土柱、供水设备、含水量和含盐量测定装置4部分。实验土柱采用5 mm厚有机玻璃材料制作,尺寸内径为8 cm,高为1 m。土柱侧面10 cm以下,每隔5 cm开一圆形取样口,其直径为15 mm,便于取土进行水盐分析。利用马氏瓶供水,其截面积为45 cm²,高为100 cm,供水水头控制

在1~2 cm。

1.2 实验材料

实验土壤取自中科院南皮生态试验站田间实验地,从表层至100 cm深度混合取土,该土样经过风干、碾压、均匀混合、过2 mm的筛后制备成室内实验土样。对土壤的基本物理化学特性进行测定,包括土壤比重、容积密度、颗粒组成等物理特征参数和土壤初始盐分组成等,按国际制土壤分类方法,实验土壤为粉质粘壤土。土壤基本物理化学性质如表1所示^[4]。供试土样容积密度1.40 g/cm³,每层5 cm,共20层。入渗微咸水水质如表2所示。

表1 土壤基本物理性质

Tab.1 Basic physical properties of soil

| 深度 /cm | 各级颗粒质量分数/% | | | 土壤质地 |
|-----------|------------------|----------------------------------|----------------|-------|
| | $d \geq 0.02$ mm | 0.02 mm $> d \geq$ 0.002 mm | $d < 0.002$ mm | |
| 0~67 | 60 | 22.5 | 17.5 | 砂质粘壤土 |
| 67~100 | 52 | 20.8 | 27.4 | 壤质粘土 |

表2 入渗实验水质分析结果

Tab.2 Water quality analysis of experimental water

| 参数 | $c(\text{HCO}_3^-)$ /mmol·L ⁻¹ | $c(\text{Cl}^-)$ / mmol·L ⁻¹ | $c(\text{SO}_4^{2-})$ /mmol·L ⁻¹ | $c(\text{Ca}^{2+})$ /mmol·L ⁻¹ | $c(\text{Mg}^{2+})$ /mmol·L ⁻¹ | $c(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ /mmol·L ⁻¹ | 总盐含量 /g·L ⁻¹ | SAR /(mmol·L ⁻¹) ^{0.5} |
|----|--|--|--|--|--|--|----------------------------|--|
| 数值 | 6.0 | 9.2 | 7.4 | 0.4 | 6.8 | 15.4 | 3.0 | 8.0 |

控制入渗水质均为矿化度为3 g/L左右,钠吸附比为8 (mmol/L)^{0.5}左右,土壤初始含水率共设4个水平,分别为2.25% (风干土)、8.18%、13.12%和16.40%时,控制湿润锋推进深度均为45 cm条件下,分析土壤初始含水率对微咸水入渗条件下土壤入渗能力和剖面含水率分布特征的影响。

1.3 观测内容和取样方法

在实验过程中观测湿润锋运移深度和马氏瓶水位,并记录马氏瓶刻度和湿润锋读数以及对应的入渗时间,由秒表进行入渗计时,由此可得累积入渗量和垂直湿润锋推进深度随入渗时间的变化。湿润锋推进到控制深度即45 cm时,停止供水,迅速吸干表层积水,从表层至湿润锋处每隔5 cm提取土样,进行含水量和含盐量分析,为保证实验结果的可靠性,每个处理设2次重复。

用烘干法测定土壤含水率,利用土壤浸提液滴定法测定水土比为5的土壤浸提液中各离子含量,采用DDS-307型电导率仪测定电导率,并换算成土壤总盐,CO₃²⁻和HCO₃⁻采用双指示剂中和法,SO₄²⁻采用EDTA容量法,Cl⁻采用AgNO₃滴定法,Ca²⁺和Mg²⁺采用EDTA络合滴定法,Na⁺+K⁺采用阴阳离子平衡法,土壤总盐量为八大离子之和。

2 结果及分析

2.1 初始含水率对累积入渗量的影响

图1为不同初始含水率条件下累积入渗量随时间的变化曲线。由图1可知,在矿化度为3.0 g/L,钠吸附比为8.0 (mmol/L)^{0.5}的微咸水入渗的条件下,当土壤初始含水率由2.25%逐步增加到16.40%时,累积入渗量与土壤初始含水率呈负相关关系;这一结果说明土壤初始含水率对土壤积水入渗过程有着重要影响。当初始含水率为2.25%和8.18%时,相同历时的累积入渗量与初始含水率呈正相关关系,而当初始含水率为13.12%和16.40%时,累积入渗量随初始含水率的变化不明显,说明当初始含水率较低时,微咸水带入土壤的盐分离子与土壤胶体及土壤原有的离子发生交换吸附作用,使土壤胶体上原吸附的Na⁺被微咸水带入的Ca²⁺、Mg²⁺所置换,导致土壤的孔隙特征发生了改变,大孔隙在一定范围内增加,但对于初始含水率较大的土壤入渗来说,由于土壤溶液浓度的降低,导致Ca²⁺、Mg²⁺的置换能力也随之降低,土壤的孔隙特征变化不明显,表现在累积入渗量方面则为入渗能力明显降低。

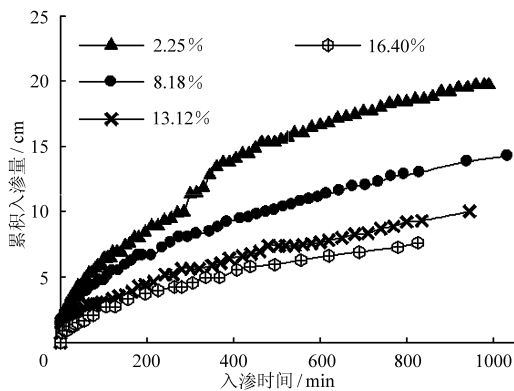


图1 不同初始含水率下累积入渗量随时间的变化曲线

Fig. 1 Cumulative infiltration curves vs. time with different initial soil moisture contents

随着入渗过程的进行,土壤的孔隙特征不断变化,为了定量分析初始含水率对土壤入渗性能的影响,采用 Kostiakov 模型对入渗数据进行分析,Kostiakov 模型认为累积入渗量和时间呈幂函数关系,即

$$I = Kt^\alpha \quad (1)$$

式中 I ——累积入渗量, cm

t ——入渗时间, min α ——入渗指数

K ——入渗系数, cm/min

计算结果如表 3 所示。

表 3 不同初始含水率的入渗系数和入渗指数

Tab. 3 Fitting coefficient and indexes of different initial moisture contents

| 拟合结果 | 初始含水率/% | | | |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 2.25 | 8.18 | 13.12 | 16.40 |
| $K/\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ | 0.659 2 | 0.623 7 | 0.630 8 | 0.624 1 |
| α | 0.514 9 | 0.508 0 | 0.452 4 | 0.402 1 |
| R^2 | 0.990 6 | 0.996 9 | 0.984 0 | 0.995 7 |

从表 3 可以看出,拟合的相关系数均在 0.98 以上,说明在 3 g/L 的微咸水入渗条件下,累积入渗量和入渗历时存在很好的幂函数关系。由表 3 还可知,用室内所配水质,入渗系数 K 可以近似看作是一个常数,指数 α 随土壤初始含水率的增加而减小,因此可以推断,在相同的入渗时间内,风干土的累积入渗量最大,初始含水率为 16.40% 的土柱累积入渗量最小,即累积入渗量与初始含水率负相关。对式(1)两边进行求导,得

$$I' = \alpha Kt^{\alpha-1} \quad (2)$$

式中 I' ——瞬时入渗率, cm/min

对 I' 起决定作用的是自变量 t 的指数 $\alpha - 1$, 根据表 3 的拟合结果,指数 α 均为小于 1 的值,因此 $\alpha - 1 < 0$, 由此可知,对于同一初始含水率的入渗过

程,瞬时入渗率随着时间的推移是递减的,由图 1 可以看出,累积入渗量曲线的切线斜率逐渐减小,并趋于一个稳定值。由于 α 是随着初始含水率递减的,因此 $\alpha - 1$ 也随之递减,那么当 t 相同时 ($t \geq 1$),瞬时入渗率也是随着初始含水率的增加而减小的。反之,当 $t < 1$ 时,瞬时入渗率与初始含水率正相关。因此对于长历时的入渗过程来说,初始含水率太高是不利于水分入渗的。

从土壤物理学的角度来说,决定入渗量大小的因素为土水势梯度和水力传导度^[5]。土壤含水率主要从入渗水流湿润区的平均势梯度方面影响土壤水分入渗能力^[6]。土壤含水率越高,水分入渗锋面的土水势越高,则水分入渗锋面与地表之间的平均势梯度越小,因此土壤的入渗通量越小,即土壤入渗能力越低。所以土壤初始含水率越高,土壤入渗能力越低。当入渗水为钠吸附比较低的微咸水的时候,微咸水带入的盐离子与土壤胶体及土壤原有的离子发生交换吸附作用,导致土壤的孔隙特征发生了改变,大孔隙比例在一定范围内增加^[7]。但微咸水对土壤孔隙特征的影响程度受土壤初始含水率的不同而有较大差异,因为随着土壤初始含水率的增加,微咸水入渗后的土壤溶液浓度随之降低, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的置换能力也随之降低,导致初始含水率高的土壤中孔隙特征受微咸水中盐离子的影响不如初始含水率较低的土壤所受的影响大,土壤入渗能力的增加也不明显。

2.2 初始含水率对入渗率的影响

为了能直观地观察入渗率随时间的变化规律,分别研究入渗后 50 min 和整个入渗过程入渗率随时间的变化,如图 2 所示。

从图 2a 可以看出,入渗开始后不同初始含水率的土壤入渗率均在短时间内以极快的速度下降到一个稳定值,之后入渗率随时间的变化趋于稳定,我们将这时的入渗率称为稳渗率,稳渗率与土壤初始含水率呈负相关关系,进一步说明土壤的入渗能力是随着初始含水率的增加而降低的。图 2b 则表现出随着土壤初始含水率的增加,同一时间内非稳定入渗阶段的入渗率迅速降低,达到稳渗率的时间缩短,该结论与其它研究结果具有一致性^[8]。从图 2b 还可以看出,初始含水率较低时 (2.25% 和 8.18%), 同一时间的入渗率差别较明显,而含水率较高时 (13.12% 和 16.40%), 同一时间的入渗率差别较小,以上现象说明干土与初始含水率较低的土壤入渗率有明显差异,但当土壤含水率均较高时,入渗率的差异却显著降低,即土壤初始含水率对于微咸水在土壤中的入渗能力有显著影响。

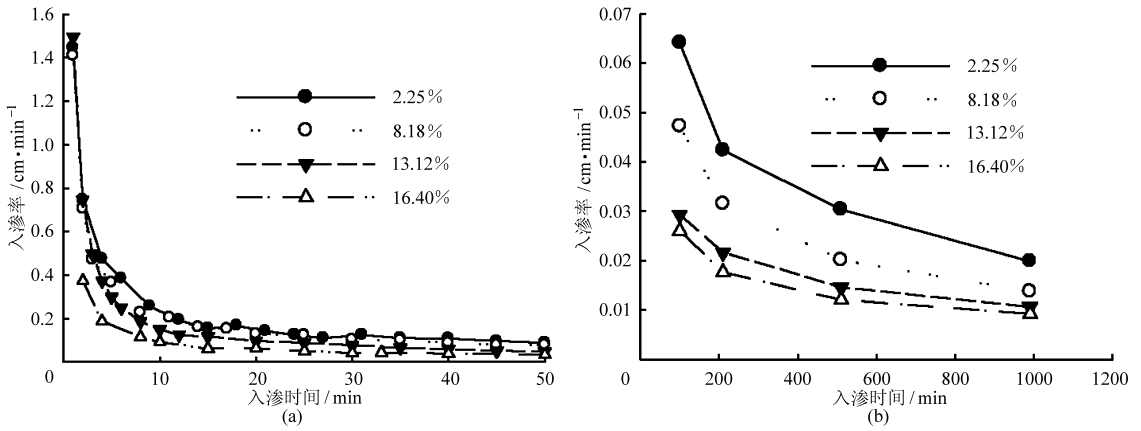


图2 不同初始含水率的土壤入渗率随时间的变化曲线

Fig.2 Infiltration rate vs. time with different initial moisture contents

(a) 0~50 min 的入渗过程 (b) 整个入渗过程

2.3 初始含水率对湿润锋推进速度的影响

初始含水率高的土柱湿润锋推进速度较慢,为了明显区分不同初始含水率的土柱湿润锋推进速度的差别,对入渗300 min 内的湿润锋推进深度随时间变化过程进行分析,如图3所示。

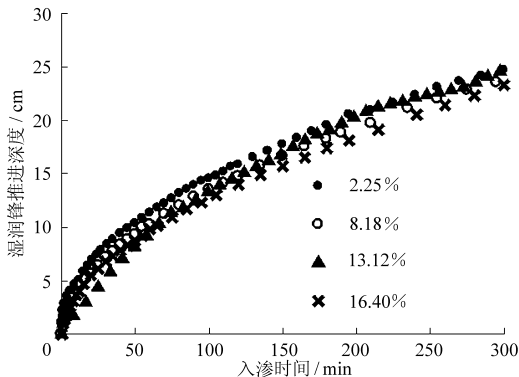


图3 入渗300 min 内湿润锋推进深度随时间的变化过程曲线

Fig.3 Wetting front curves vs. time within 300 min

土壤入渗率在数值上等于入渗水流在地表处的水分通量,所以其大小主要取决于入渗锋面处土壤的水力特性^[9]。随着入渗时间的延长,水势梯度减小,入渗率降低。在本文所述的实验条件下,积水入渗导致表层土壤具有较高的土壤含水率。入渗初期土壤初始含水率对土壤入渗性能影响较大,随着入渗的进行,土柱表层附近形成不断向下扩展的饱和区,土柱下部含水率条件差别较小,土壤初始含水率对入渗能力的影响逐渐减弱。由图3可以明显看出,随着入渗时间的延长,湿润锋推进深度随时间的变化曲线明显趋于平缓,湿润锋的推进速度随着初始含水率的升高而呈下降趋势,这也说明了土壤中的初始含水率较高时入渗微咸水对土壤溶液的稀释作用降低了微咸水对形成土壤团聚体的促进作用,增大了土壤颗粒之间的斥力,不利于水分在土壤中

的入渗。但随着时间的增长,湿润土体逐步增大,各处理的入渗率逐渐趋同,当入渗时间达到600 min 时,湿润锋最大值(初始含水率为2.25%)与最小值(初始含水率为16.40%)仅差5.48%,入渗800 min 时这个差别缩小到4.80%,主要原因是随着入渗时间的延长,湿润锋逐步下移,土壤剖面的含水率梯度逐步减小,含水率对土壤入渗能力的影响逐渐降低,因此到入渗后期各处理的湿润锋推进速度差别较小,因此在研究土壤初始含水率对湿润锋推进速度的影响时应分段分析,在初始入渗阶段,初始含水率对湿润锋的推进速度影响较为明显,但随着时间的延长这种影响逐渐减小到可以忽略。

以幂函数将入渗初始阶段的湿润锋推进深度 H 和时间 t 进行拟合,即

$$H = at^b \quad (3)$$

由表4可知,随着土壤初始含水率的增加,拟合系数 a 随之减小,拟合指数 b 变化不大,可以将拟合指数 b 视为与初始含水率无关的常数,那么可以认为湿润锋推进速度与初始含水率正相关,湿润锋推进速度可以采用求导的方式得出,即

$$H' = bat^{b-1} \quad (4)$$

式中 H' ——湿润锋瞬时推进速度, cm/min

表4 不同初始含水率湿润锋推进深度和入渗时间的关系拟合结果

Tab.4 Relationship between wetting front and infiltration time

| 拟合结果 | 初始含水率/% | | | |
|-------|---------|--------|--------|--------|
| | 2.25 | 8.18 | 13.12 | 16.40 |
| a | 1.4915 | 1.1980 | 1.1397 | 0.9305 |
| b | 0.4947 | 0.4963 | 0.4864 | 0.5018 |
| R^2 | 0.9998 | 0.9999 | 0.9997 | 0.9970 |

由于 b 可以看作是与初始含水率无关的常数,因此在相同的入渗历时内, H' 与 a 正相关,如前所述

a 与初始含水率负相关,因此 H' 与初始含水率负相关。即在入渗的初始阶段,初始含水率越高,湿润锋推进速度越慢,这与实验观察的结果相一致。

2.4 一维代数模型对含水率剖面的模拟结果

初始土壤含水率不同,入渗后土水分剖面差异很大^[10]。依据土壤水分运动的 Richards 方程,王全九等推求出了一维代数入渗模型,该模型适用于描述均质土壤在稳定水头下的一维积水入渗过程^[11]。累积入渗量与湿润锋推进深度的关系具体表示为

$$I = \frac{\theta_s - \theta_i}{1 + \beta} Z_f \quad (5)$$

式中 I ——累积入渗量,cm θ_s ——饱和含水率
 θ_i ——初始含水率 β ——综合形状系数
 Z_f ——湿润锋推进深度,cm

由式(5)可知, I 和 Z_f 之间是线性关系,并且模型中只有一个参数即综合形状系数,可由试验资料得到 β 值。根据式(5)对入渗数据进行分析,可得一维代数模型关于不同初始含水率的土壤入渗综合形状系数 β ,如表 5 所示。

表 5 一维代数模型对不同初始含水率的微咸水入渗拟合参数

Tab.5 Fitted parameters of 1-D algebraic model of different initial moisture contents

| 初始含水率/% | 2.25 | 8.18 | 13.12 | 16.40 |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| β | 0.324 0 | 0.454 4 | 0.614 7 | 0.432 8 |
| R^2 | 0.938 5 | 0.896 9 | 0.926 9 | 0.926 9 |

从表 5 拟合的结果可以看出,一维代数模型中的形状系数 β 随着土壤初始含水率的增大先增后减,4 种初始含水率的回归系数 R^2 均比较高,说明累积入渗量和湿润锋推进深度在入渗过程中符合线性相关,利用拟合的形状系数根据式(5)对土壤剖面含水率进行计算,土壤含水率分布公式为

$$\theta = \left(1 - \frac{Z}{Z_f}\right)^\beta (\theta_i - \theta) + \theta_i \quad (6)$$

式中 Z ——观测点与土柱上表面的垂直距离,cm
 将理论值与入渗结束后的含水率实测值进行对比,可得结果如图 4。

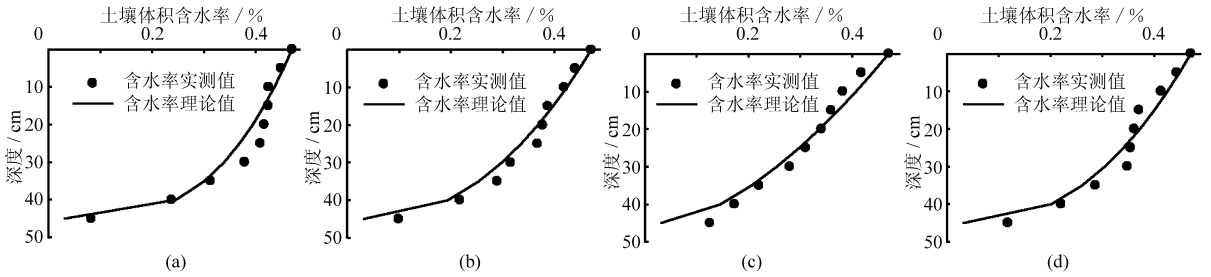


图 4 一维代数模型对不同初始含水率的土壤微咸水入渗后剖面含水率计算结果

Fig.4 Soil profile of different initial moisture contents by 1-D algebraic model

(a) 2.25% (b) 8.18% (c) 13.12% (d) 16.40%

从图 4 的模拟结果可以看出,一维代数模型对不同初始含水率的土壤微咸水入渗后剖面含水率拟合结果较为准确,经分析发现土壤深度大于 20 cm 的含水率实测值比理论值偏小,20 cm 之下的含水率实测值比一维代数模型的计算值普遍偏大。为评价模型的模拟效果,分别用均方根差和相对平均绝对误差来评价模型估计的精度。公式为

$$R_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \theta_a)^2 \quad (7)$$

$$R_A = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta_i - \theta_a|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_a} \times 100\% \quad (8)$$

式中 R_E ——均方根差 θ_i ——含水率的理论值
 θ_a ——含水率的实测值
 R_A ——相对平均绝对误差
 N ——监测次数,此处 $N = 10$

一维代数模型的理论值和对应的实测值计算误

差如表 6 所示。

表 6 不同初始含水率的土壤微咸水入渗后剖面含水率的统计分析

Tab.6 Statistical analysis of soil moisture content of different initial moisture contents

| 初始含水率/% | R_E | R_A /% |
|---------|--------|----------|
| 2.25 | 0.0346 | 10.18 |
| 8.18 | 0.0341 | 8.38 |
| 13.12 | 0.0281 | 7.61 |
| 16.40 | 0.0259 | 5.83 |

由表 6 的统计结果来看,随着土壤初始含水率的增加,均方根差和相对平均绝对误差均有减小趋势。原因可能是在微咸水入渗到土壤中时,入渗水中的离子对土壤的孔隙度产生了影响,因此在利用一维代数模型模拟微咸水入渗过程时都会产生误差,但随着土壤初始含水率的增加,微咸水中的离子对入渗过程的影响程度随之不同。从误差大小来看,初始含水率较高的处理误差较小,可能是因为入

渗前土壤孔隙中充满水分,因此入渗微咸水水质相同的条件下,孔隙内的水分越多,入渗水带入的盐分离子对土壤入渗性能的影响程度越小,微咸水的入渗过程越接近淡水入渗过程,反映在对模型的适用性方面则表现为均方根差和相对平均绝对误差均较小,即模型对高初始含水率土壤的微咸水入渗模拟结果更为准确。

3 结 束 语

土壤初始含水率对土壤入渗能力有明显影响,初始含水率越高,微咸水入渗后土壤中大孔隙比例越低,相同时间的累积入渗量越小,湿润锋推进速度有同样的变化规律。累积入渗量与初始含水率之间

存在负相关关系。稳渗率与土壤初始含水率呈负相关关系;随着入渗的进行,土柱表层附近形成不断向下扩展的饱和区,土柱下部含水率条件差别较小,土壤初始含水率对入渗能力的影响逐渐减弱。采用幂函数将入渗初始阶段的湿润锋推进深度 H 和时间 t 进行拟合发现,随着土壤初始含水率的增加,拟合系数 a 随之减小,可以将拟合指数 b 视为与初始含水率无关的常数。采用一维代数模型对不同初始含水率的微咸水入渗过程进行模拟后发现,形状系数 β 随着土壤初始含水率的增加呈先增后减的变化规律,将得到的形状系数 β 用于剖面含水率的模拟以后发现可以很好地描述土壤剖面的含水率分布情况,误差大小与土壤初始含水率呈负相关关系。

参 考 文 献

- 雷志栋,胡和平,杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展,1999,10(3):311~318.
Lei Zhidong, Hu Heping, Yang Shixiu. Soil water research and review[J]. Advances in Water Science, 1999,10(3):311~318. (in Chinese)
- 樊贵盛,郑秀清,潘光在. 地下水埋深对冻融土壤水分入渗特性影响的实验研究[J]. 水利学报,1999,30(3):21~26.
Fan Guisheng, Zheng Xiuqing, Pan Guangzai. Experimental study on the influence of the buried depth of groundwater level on the infiltration characteristics of freeze-thaw soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999,30(3):21~26. (in Chinese)
- 张兆吉,雒国中,王昭,等. 华北平原地下水资源可持续利用研究[J]. 资源科学,2009,31(3):355~360.
Zhang Zhaoji, Luo Guozhong, Wang Zhao, et al. Study on sustainable utilization of groundwater in North China Plain[J]. Resour Sci., 2009, 31(3):355~360. (in Chinese)
- 吴忠东,王全九. 微咸水波涌畦灌对土壤水盐分布的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(1):53~57.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect of saline water surge flow border irrigation on soil water-salt distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(1):53~57. (in Chinese)
- 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,2000,31(6):39~44.
Wang Zhirong, Wang Wenyan, Wang Quanjiu, et al. Experimental study on soil water movement from a point source[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,31(6):39~44. (in Chinese)
- 马东豪,王全九,苏莹,等. 微咸水入渗土壤水盐运移特征分析[J]. 灌溉排水学报,2006,25(1):62~66.
Ma Donghao, Wang Quanjiu, Su Ying, et al. Analysis of the characteristics of soil water and salt movement in saline water infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006,25(1):62~66. (in Chinese)
- 李小刚,曹靖,李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报,2004,35(1):64~72.
Li Xiaogang, Cao Jing, Li Fengmin. Influence of salinity sodicity and organic matter on some physical properties of salt-affected soils[J]. Chinese Journal of Soil Science,2004,35(1):64~72. (in Chinese)
- 李长兴. 陕北黄土室内土柱入渗实验研究[M]//沈晋,王文焰,沈冰,等. 动力水文实验研究. 西安:陕西科学技术出版社,1991:145~161.
- 王全九,来剑斌,李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报,2002,18(2):13~16.
Wang Quanjiu, Lai Jianbin, Li Yi. Comparison of Green-Ampt model with Philip infiltration model[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2):13~16. (in Chinese)
- 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.
Chen Hongsong, Shao Mingan, Wang Kelin. Effects of initial water content on hillslope rainfall infiltration and soil water redistribution[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(1):44~47. (in Chinese)
- Quanjiu Wang, Robert Horton, Mingan Shao. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution[J]. Soil Science, 2003,168(10):671~676.