

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.044

基于 HYDRUS - 3D 模型的微润灌溉土壤水分入渗模拟

冀荣华 刘秋霞 陈振海 郑立华

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 掌握土壤水分入渗规律对于合理制定灌溉方案、设置灌溉参数和改进灌溉技术有重要意义。为探究微润灌溉条件下土壤水分入渗规律,利用 HYDRUS - 3D 有限元模型对微润灌溉下土壤水分入渗进行了数值模拟,讨论了初始压力水头和土壤质地对土壤水分入渗的影响。数值模拟结果显示:在土壤水分入渗的垂直剖面上湿润体以微润管为中心呈同心圆状向外扩散,扩散速率与初始压力水头呈正相关。模拟试验周期为 36 h,分 3 个时间段进行土壤水分扩散速率的计算,0 ~ 5 h 内土壤水分平均入渗速率为 1.85 cm/h,6 ~ 15 h 内的平均入渗速率为 0.79 cm/h,16 ~ 36 h 内的平均水分入渗速率为 0.59 cm/h。土壤含水率最大值出现在微润管周围,向外围呈减小趋势。相同时间内土壤湿润峰运移距离随初始压力水头的增大而增大,微润灌溉下水分入渗速率在 3 种质地的土壤(砂壤土、壤土、粘壤土)中依次增大,并测得在压力水头为 -180 cm 时整个模拟周期中 3 种质地土壤的平均水分扩散速率分别为:0.69、0.53、0.46 cm/h。研究表明,土壤含水率和水分扩散速率随压力水头的增大而增大,随土壤黏粒含量的增大而减小。

关键词: 微润灌溉; 水分入渗; Hydrus - 3D; 数值模拟

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)S0-0290-06

Numerical Simulation of Soil Water Infiltration Based on HYDRUS - 3D
Finite Element Model under Moistube-irrigation

Ji Ronghua Liu Qiuxia Chen Zhenhai Zheng Lihua

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: It is important to master the law of soil water infiltration for the rational development of irrigation scheme, setting irrigation parameters and improving irrigation technology. In order to explore the law of soil water infiltration under the condition of moistube-irrigation, HYDRUS - 3D finite element model was used to simulate the soil water infiltration under micro-irrigation. The effects of initial pressure head and soil texture on soil water infiltration were discussed. The numerical simulation results showed that the wetting body was diffused around the micro-tube in the vertical section of soil water infiltration, and the diffusion rate was positively correlated with the initial pressure head. The average infiltration rate of soil water was 1.85 cm/h in the first 5 hours, the average infiltration rate was 0.79 cm/h between the 6th hour to 15th hour, and the average water infiltration rate in the period from 16th hour to 36th hour was 0.59 cm/h. The maximum soil moisture content appeared around the micro fabricated tube and tended to decrease to the periphery. The migration distance of soil wetting peak increased with the increase of initial pressure head. The infiltration rate of micro-irrigation increased in three soil layers (sandy loam, loam, loam loam). When the pressure head was -180 cm, the average water diffusion rates of the three soils were 0.69 cm/h, 0.53 cm/h and 0.46 cm/h, respectively.

Key words: moistube-irrigation; water infiltration; Hydrus - 3D; numerical simulation

引言

掌握土壤水分入渗规律,可以为制定灌溉方案、

设置灌溉参数提供依据,对于改进灌溉技术有重要意义^[1]。目前对土壤水分入渗规律的研究主要从试验研究和数值模拟计算两方面展开。试验和模拟

收稿日期: 2017-07-17 修回日期: 2017-11-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201500-2017YFD0201501)和国家自然科学基金项目(31471409)
作者简介: 冀荣华(1973—),女,副教授,主要从事农业信息化和精准节水灌溉技术研究,E-mail: jessie1212@cau.edu.cn
通信作者: 郑立华(1969—),女,教授,主要从事农业智能装备研究,E-mail: zhenglh@cau.edu.cn

相互补充。其中,试验结果可以用来验证模型的可靠性;通过改变模型参数对不同情况进行模拟计算从而获得土壤水分入渗规律。

目前对灌溉土壤水分入渗进行的数值模拟研究从多个维度展开。其中,采用积分^[3]和有限差分^[4]等方法对一维水平非饱和土壤水分入渗进行数值模拟。在二维研究方面,建立了二维土壤水分入渗模型,模拟结果再现出田间、室内土箱的土壤水分入渗过程,且误差均在 5% 以内^[2-4]。随着对灌溉土壤水分入渗进行的数值模拟研究不断深入,利用有限元计算机模型模拟了土壤水分和溶质的三维运动^[5],并且其生成的模型能真实反映水分和溶质入渗过程。

灌溉方式对土壤水分入渗规律影响较大。目前应用较多的节水灌溉方式包括滴灌、微喷、渗灌等。针对滴灌的研究主要从滴头间距^[6]和不同土壤质地^[7]等影响土壤水分入渗的因素等方面开展。从不同带长的微喷带^[8]和不同喷射角度^[9]等方面研究了微喷灌溉下土壤水分入渗规律。渗灌条件下的土壤水分入渗规律的研究主要集中在供水压力^[10]、渗灌管埋深^[11]等因素。

微润灌溉是在地下滴灌基础上发展而来的新型节水灌溉技术。微润灌溉能够实现按照作物对水分需求自动获取,属于主动灌溉^[12]。目前对微润灌溉下土壤水分入渗规律的研究方式主要是通过田间^[13]或室内^[12]试验,通过数值模拟计算进行研究的较少。

Hydrus-3D 是一个有限元计算模型,可以用来模拟土壤水流和溶质三维运移^[14]。被广泛应用于对农田灌溉、室内土箱条件下土壤水盐运移的数值模拟研究。

掌握土壤水分入渗规律是指导灌溉系统改进的主要理论基础。微润灌溉属于地下线源灌溉方式,不同于传统意义上的滴灌和渗灌。Hydrus-3D 作为一个非常成熟的土壤水分运移模拟软件,可以有效模拟不同灌溉方式下土壤水分入渗规律。为此,本文应用 Hydrus-3D 对微润灌溉下室内土箱内土壤水分入渗变化规律进行数值模拟,以期发现微润灌溉参数对土壤水分入渗的影响,从而指导微润灌溉系统的改进。

1 土壤水分入渗模型

1.1 土壤水分入渗模拟试验装置

为掌握不同质地土壤在不同微润灌溉条件下土壤水分入渗规律,在室内进行微润灌溉土壤水分入渗试验,试验布置如图 1 所示。左上方带刻度的容

器为马氏瓶,右下方六面体为土箱,土箱内部的管道是微润管。其中土箱为 110 cm × 60 cm × 60 cm 的长方体。微润管铺设于土箱内,距土箱底面 10 cm 处的水平剖面中心处。微润管是一种以半透膜为核心材料制成的软管状给水器,具有双层结构,内层为高分子半透膜,该半透膜厚度为 0.06 mm。膜壁上有直径为 10 ~ 900 nm 的微孔,膜上微孔密度约为 10⁵个/cm²,水分子通过这些微孔向管壁外迁移。微润管公称直径为 16 mm,折径为 (25 ± 1.5) mm,壁厚为 (0.9 ± 0.1) mm。

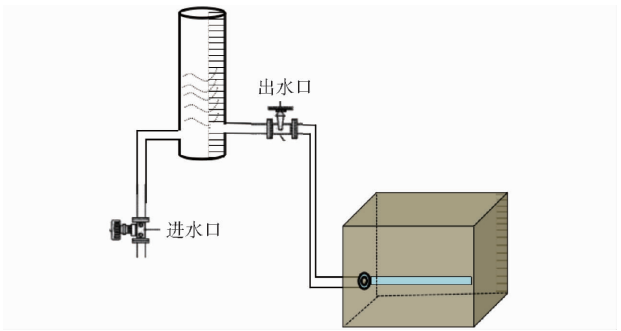


图 1 试验布置

Fig. 1 Layout of the experiment

1.2 土壤水分入渗规律数学模型

土壤水分入渗过程可采用 Richards 方程描述。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

式中 θ ——土壤体积含水率, cm³/cm³

ψ_m ——非饱和土壤总水势

$D(\theta)$ ——非饱和土壤扩散率, cm³/cm³

$K(\theta)$ ——非饱和土壤导水率, cm/min

t ——时间

HYDRUS-3D 中有 van Genuchten、Brooks-Corey、Modified van Genuchten、Kosugi 和 Dual-porosity 5 种模型用于模拟土壤水分入渗过程。其中 van Genuchten 模型主要用于描述常规条件下土壤吸湿过程。

本文旨在研究室内土箱常规条件下的微润灌溉土壤水分入渗规律, van Genuchten 模型更为适合。van Genuchten 模型为

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$K(\theta) = K_s S_e^A \left[1 - (1 - S_e^m)^{\frac{1}{m}} \right]^2 \quad (3)$$

式中 θ_r ——土壤剩余含水率, cm³/cm³

θ_s ——土壤饱和含水率, cm³/cm³

h ——土壤吸力, cm
 K_s ——土壤非饱和导水率, cm/h
 S_e ——土壤有效含水率
 α 、 λ 、 m 、 n ——经验参数

模拟试验选用砂壤土、壤土和粘壤土 3 种质地的土壤进行研究。表 1 为 3 种质地土壤的水力特性参数。

表 1 土壤水力特性参数

Tab. 1 Soil hydraulic characteristics parameters

土壤类型	$\theta_r /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_s /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\lambda /$ m^{-1}	$K_s /$ ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
砂壤土	0.065	0.41	0.075	4.420 8
壤土	0.078	0.43	0.036	1.040 0
粘壤土	0.095	0.41	0.019	0.260 0

以上参数可以直接使用 HYDRUS-3D 软件中的数据,也可以将土壤颗粒数据和容重作为输入,利用 HYDRUS-3D 软件中人工神经网络计算出以上参数。

1.3 数值模拟条件设置

1.3.1 模型边界条件设置

利用 HYDRUS-3D 中 Geometry 模块构建水分入渗模拟区域^[15-17]。根据室内土箱土壤水分入渗试验布置情况,设置模拟区域为六面体区域,长 110 cm,宽 60 cm,高 60 cm。

所建模型的边界主要包括土箱上边界、下边界和四周 3 部分,具体边界条件的设置如下:

上边界不考虑降雨和蒸发,有

$$-K(\theta)\frac{\partial(h-z)}{\partial z}=0 \tag{4}$$

s. t. $\begin{cases} 0 \leq x \leq 60 \text{ cm} \\ 0 \leq y \leq 60 \text{ cm} \\ z = 110 \text{ cm} \end{cases}$

土箱四周边界代表土箱无水量交换,因此设

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial z} = 0 \end{cases} \tag{5}$$

s. t. $\begin{cases} 0 \leq x \leq 60 \text{ cm} \\ 0 \leq y \leq 60 \text{ cm} \\ 0 \leq z \leq 110 \text{ cm} \end{cases}$

底面边界为土箱壁,可视为不透水边界,即

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 1 \tag{6}$$

s. t. $z = 0$

1.3.2 有限单元网格划分

利用 Hydrus-3D 进行数值模拟,需要将仿真模型进行空间离散化,即有限元模型网格化,将仿真空间划分为许多互连网格,对每一网格求解其近似解,再求解出整个仿真空间的解,进而得到仿真结果。

网格疏密程度将影响计算结果的精度和计算规模。在保证计算精度的前提下,降低计算规模,需要进行变密度网格划分。对于波动大的空间区域设置高密度网格,而对于波动较小的空间区域设置稀疏网格。

微润灌溉土箱水分入渗,依据土壤与水源(即微润管)的距离不同,其水分入渗变化速率不同。水源附近的模拟区域在入渗初期水分入渗速率较快,且微润管与整个模拟区域相比非常小,所以在微润管模拟区的边界曲线上设置最小数量节点数为 15,将会使围绕微润管区域的有限单元网格局部细化^[18],从而确保在数值解中精确地表示相对较小的微润管以及该处的水分入渗情况。其他区域的网格尺寸设置为 3 cm。

在 HYDRUS-3D 利用 Geometry 模块构建土壤水分入渗模拟区域后,在 Generate Finite Element Mesh 命令调用 MESHGEN-3D 模块,将所绘制的长方体区域离散成不规则的三棱柱单元。在 FE-Mesh Parameters 模块设置 Minimum Number of Points Boundary Curves 的数量,以实现变密度网格划分。结果如图 2 所示。

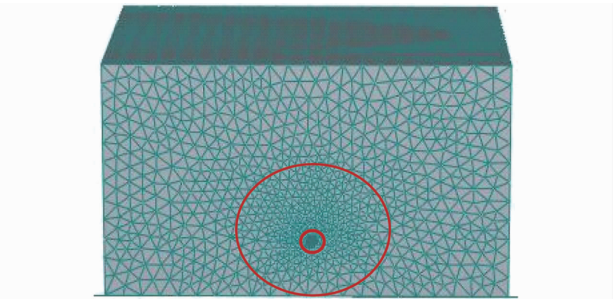


图 2 模拟区域网格划分
Fig. 2 Mesh generation in simulated region

其中内圆表示微润管,内圆与外圆之间为高密度单元网格,其它区域为低密度单元网格。

1.3.3 模拟时间设置

由于室内土箱的体积较小,土壤水分入渗一般 2 d 左右,因此将数值模拟时间设为 36 h。利用所建模型模拟 36 h 内整个数值模拟区域土壤水分入渗情况,从而掌握土壤水分在模拟区域内空间分布及其随时间变化规律。模拟时间步长设置为变时间步长,其中初始时间步长为 0.1 h,最小时间步长为 0.002 4 h(采用默认最小时间步长),考虑到土壤水

分在入渗后期水分入渗速率比较慢,变化不明显,故最大时间步长设置为 2 h。

2 Hydrus-3D 数值模拟与结果分析

2.1 Hydrus-3D 数值模拟

影响微润灌溉条件下土壤水分入渗的因素有很多,包括表面蒸发潜在速率、初始压力水头和土壤质地^[19]等。室内土箱试验不考虑表面蒸发,主要考虑初始压力水头和土壤质地两种因素对土壤水分入渗规律的影响。

为了研究不同初始压力水头和土壤质地对微润灌溉下土壤水分入渗影响,本试验涉及 3 种初始压力水头以及 3 种土壤质地,且两者之间具有一定耦合关系,为此设计考虑互作用的两因素三水平的正交试验,正交试验表如表 2 所示。

表 2 正交试验
Tab.2 Orthogonal experiment

试验号	初始压力水头/cm	土壤质地
1	-100	砂壤土
2	-100	壤土
3	-100	粘壤土
4	-180	砂壤土
5	-180	壤土
6	-180	粘壤土
7	-250	砂壤土
8	-250	壤土
9	-250	粘壤土

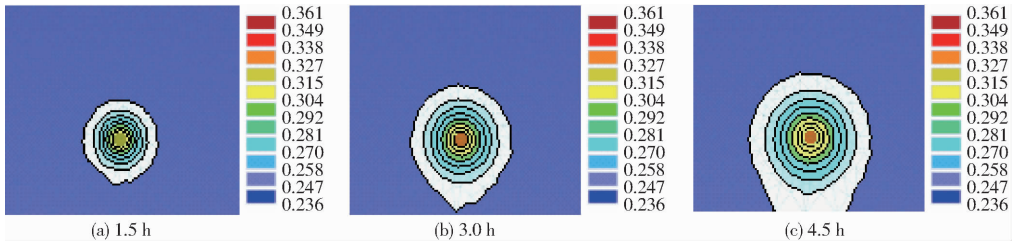


图 3 不同时刻的土壤水分入渗垂直剖面图

Fig.3 Vertical profile of soil water infiltration at different moments

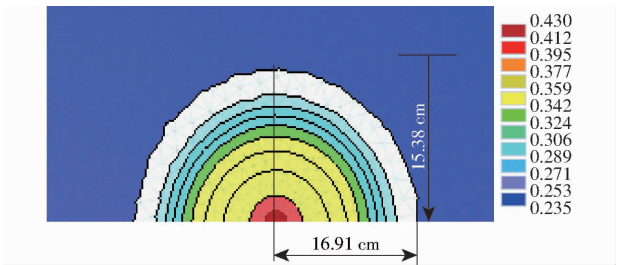


图 4 土壤水分入渗的垂直剖面图

Fig.4 Vertical profile of soil water infiltration

分入渗的影响,因此本文选择 -100、-180、-250 cm 3 种初始压力水头进行数值模拟,分析在相同时间内不同压力水头下土壤水分入渗规律,

2.2 结果分析与讨论

2.2.1 土壤水分入渗规律

在微润灌溉条件下,土壤水分入渗属于线源主动入渗。现对模拟区域水分入渗的垂直剖面进行分析。

图 3 是在初始压力水头为 -100 cm、土壤质地为壤土条件下的土壤水分入渗模拟垂直剖面图,显示出土壤水分入渗的动态过程。随入渗时间的推移,土壤湿润体面积不断扩大,但土壤水分入渗速率逐渐减小:0~5 h 内土壤水分平均入渗速率为 1.85 cm/h,6~15 h 内的平均入渗速率为 0.79 cm/h,16~36 h 内的平均水分入渗速率为 0.59 cm/h。湿润体内含水率等值线是以微润管为中心的同圆心,并且土壤含水率从图 3 入渗中心到边缘逐渐减小。

为探究土壤水分入渗规律在垂直方向和水平方向的差异,本文分析了相同时间内土壤水分在垂直和水平方向上的入渗距离,图 4 为土壤水分入渗 15 h 时的垂直剖面图。图 4 显示土壤水分在垂直向上方向的入渗距离为 15.38 cm,在水平方向的入渗距离为 16.91 cm。这种在不同方向上入渗距离的差异可能是重力因素影响的结果。

2.2.2 不同初始压力水头下土壤水分入渗

初始压力水头影响土壤水分入渗,文献分析发现,学者们对压力水头的研究主要针对的是管道压力,并且得出结论:适宜压力水头范围为 100~250 cm。由于本文研究的是初始压力水头对土壤水

图 5 为不同压力水头下土壤水分入渗 6 h 时的垂直剖面图。

图 5 显示了相同时间、同一土壤质地(壤土)下,土壤水分入渗速率在不同初始压力水头下的差异。随着初始压力水头的增大,土壤中湿润体扩散面积逐渐增大,并且扩散速率也逐渐增大,在整个模拟周期内,3 种初始压力水头在壤土中的平均扩散速率分别为:0.47、0.53、0.82 cm/h。

针对 3 种初始压力水头下土壤水分在垂直方向上入渗至距离微润管 10 cm 处所用时间做比较。由模型计算结果可以得出,在初始水头设置为 -100、-180、-250 cm 时,土壤水分入渗至距离微润管

10 cm 时所需时间分别为 4.0、9.0、11.0 h。

在同一方向入渗距离相同的情况下,随初始压力水头的增大,所需时间逐渐减小,因此适当增大初

始压力水头可以提高水分在土壤中的入渗速率。

图 6 为不同初始压力水头下入渗 11 h 时距离微润管 10 cm 的水平剖面图。

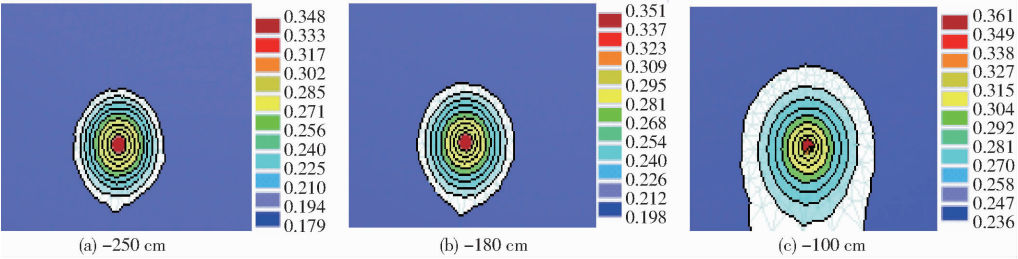


图 5 不同压力水头下土壤水分入渗垂直剖面图

Fig. 5 Vertical profile of soil moisture infiltration under different pressure

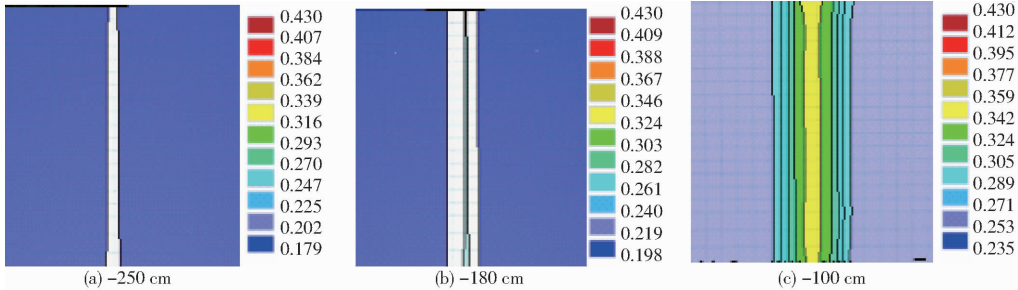


图 6 不同初始压力水头下土壤水分入渗水平剖面图

Fig. 6 Horizontal profile of soil water infiltration under different initial pressure

2.2.3 不同土壤质地地下土壤水分入渗

不同土壤质地具有不同的持水能力,对水分入渗速度和累积入渗量影响显著。粘壤土土壤颗粒表面孔隙多且小,比表面积大,毛细现象较为明显,因此对水分的吸附力作用大,持水能力强^[20]。

通过表 1 可知,砂壤土、壤土和粘壤土的导水能

力差异显著,因此本文选用这 3 种质地的土壤分别做数值模拟,进而探讨不同土壤质地对土壤水分入渗的影响。如图 7 所示,在相同时间(3.5 h)和初始压力水头(−100 cm)下,不同土壤质地的湿润体面积有显著差异,粘壤土の入渗速率最大,壤土次之,砂壤土最小。

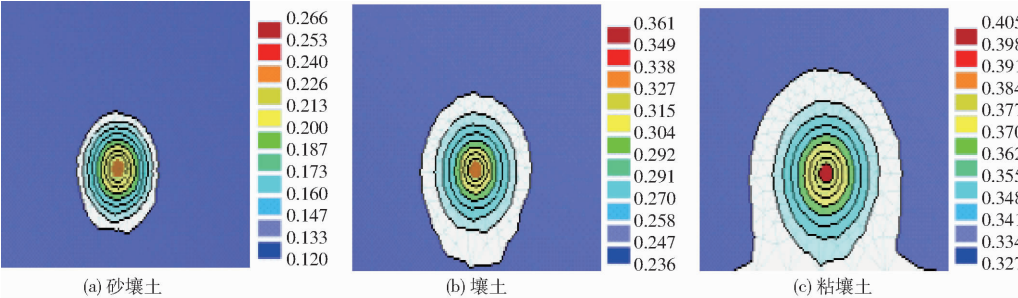


图 7 不同质地土壤水分入渗垂直剖面图

Fig. 7 Vertical profile of soil water infiltration under different soil texture

3 结论

- (1)在土壤水分入渗过程中湿润体内含水率等值线是以微润管为中心的同心圆,并且从入渗中心到边缘,土壤含水率逐渐减小。随入渗时间的推移,土壤湿润体面积不断扩大,但土壤水分入渗速率逐渐减小,整个模拟周期中(36 h)的平均水分入渗速率为 0.82 cm/h。
- (2)在相同时间和土壤质地下,土壤水分扩散速率与初始压力水头(−250、−180、−100 cm)呈正

- 相关,并测得在壤土条件下的整个模拟周期中土壤水分平均扩散速率分别为:0.47、0.53、0.82 cm/h。
- (3)在相同时间和初始压力水头下,不同土壤质地的湿润体面积有显著差异。粘壤土の入渗速率最大,壤土次之,砂壤土最小,并测得在压力水头为 −180 cm 时 3 种质地土壤在整个模拟周期中的平均扩散速率分别为:0.69、0.53、0.46 cm/h。
- (4)由于受重力因素的影响,微润灌溉条件下土壤水分水平方向的入渗距离比垂直向上方向的土壤水分入渗距离大。

参 考 文 献

- 1 罗金耀, 李少龙. 我国设施农业节水灌溉理论与技术研究进展[J]. 节水灌溉, 2003(3):11-13.
LUO Jinyao, LI Shaolong. Research progress of water saving irrigation theory and technique of facility agriculture in China[J]. Water Saving Irrigation, 2003(3):11-13. (in Chinese)
- 2 冀荣华, 王婷婷, 祁力钧, 等. 基于 HYDRUS-2D 的负压灌溉土壤水分入渗数值模拟[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 113-119.
JI Ronghua, WANG Tingting, QI Lijun, et al. Numerical simulation of soil moisture infiltration under negative pressure irrigation based on HYDRUS-2D[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):113-119. (in Chinese)
- 3 薛万来, 牛文全, 张俊, 等. 压力水头对微润灌土壤水分运动特性影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6):7-11.
XUE Wanglai, NIU Wenquan, ZHANG Jun, et al. Effects of hydraulic head on soil water movement under moisture-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6):7-11. (in Chinese)
- 4 任慧慧. 植物混掺条件下二维土壤水分运移试验及模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- 5 迟卉, 白云, 汪海涛, 等. HYDRUS-3D 在土壤水分入渗过程模拟中的应用[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(5):531-535.
CHI Hui, BAI Yun, WANG Haitao, et al. HYDRUS-3D in the soil water infiltration process simulation[J]. Computers and Applied Chemistry, 2014, 31(5):531-535. (in Chinese)
- 6 王维娟, 牛文全, 孙艳琦, 等. 滴头间距对双点源交汇入渗影响的模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4):219-225.
WANG Weijuan, NIU Wenquan, SUN Yanqi, et al. Simulation study on the effects of dripper spacing on soil water infiltration conditions under surface drip irrigation with two point-source emitter[J]. Journal of Northwest A&F University, 2010, 38(4):219-225. (in Chinese)
- 7 AL-OGAIDI A A M, WAYAYOK A, ROWSHONSHON M K, et al. Wetted patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176:203-213.
- 8 满建国, 王东, 于振文, 等. 不同带长微喷带灌溉对土壤水分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8):2186-2196.
MAN Jianguo, WANG Dong, YU Zhenwen, et al. Effects of irrigation with different length micro-sprinkling hoses on soil water distribution, water consumption characteristics of winter wheat, and its grain yield [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8):2186-2196. (in Chinese)
- 9 满建国, 王东, 张永丽, 等. 不同喷射角微喷带灌溉对土壤水分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(24):5098-5112.
MAN Jianguo, WANG Dong, ZHANG Yongli, et al. Effects of irrigation with micro-sprinkling hoses of different sprinkling angles on soil water distribution and water consumption characteristics and grain yield of winter wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(24):5098-5112. (in Chinese)
- 10 任改萍, 吴普特, 张林, 等. 供水压力对微孔陶瓷渗灌土壤水分运移的影响[J]. 节水灌溉, 2016(7):13-17.
REN Gaiping, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Effect of water supply pressure on soil movement under ceramic emitter infiltration [J]. Water Saving Irrigation, 2016(7):13-17. (in Chinese)
- 11 诸葛玉平. 保护地渗灌土壤水分调控技术及作物增产节水机理的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2001.
ZHUGE Yuping. Study on percolation irrigation technology of soil water control and its yield-increasing and water-saving mechanisms in vegetable protected field[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- 12 薛万来. 微润灌溉条件下土壤水盐运移规律研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2014.
XUE Wanlai. Water and salt transport characteristic under moistures irrigation[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- 13 陈高听, 郭凤台, 王利书, 等. 基于 HYDRUS 的微润灌溉线源入渗数值模拟[J]. 人民黄河, 2016, 38(4):144-148.
CHEN Gaoting, GUO Fengtai, WANG Lishu, et al. Numerical simulation of line source infiltration under moisture irrigation by HYDRUS [J]. Yellow River, 2016, 38(4):144-148. (in Chinese)
- 14 马增辉, 韩霁昌, 解建仓, 等. 基于 Hydrus3D 的陕西卤泊滩水盐运移建模方法研究[J]. 陕西农业科学, 2011, 57(1): 62-65.
- 15 VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- 16 BUFON V B, LASCANO R J, BEDNARZ C. Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus-2D model [J]. Irrigation Science, 2012, 30(4):259-273.
- 17 李耀刚, 王文娥, 胡笑涛. 基于 HYDRUS-3D 的涌泉根灌土壤入渗数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 546-552.
LI Yaogang, WANG Wene, HU Xiaotao. Numerical simulation of soil infiltration under bubbled root irrigation based on HYDRUS-3D[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6):546-552. (in Chinese)
- 18 张珂萌. 微灌技术要素对土壤水分运动影响的数值模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
ZHANG Kemeng. Influence of water movement in soil under micro-irrigation by using numerical simulation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- 19 张国祥, 申丽霞, 郭云梅. 微润灌溉条件下土壤质地对水分入渗的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7):35-39.
ZHANG Guoxiang, SHEN Lixia, GUO Yunmei. Effects of soil structure on water infiltration under moisture irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7):35-39. (in Chinese)
- 20 余小弟, 刘小刚, 朱益飞, 等. 土壤质地和供水压力对竖插式微润管入渗的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(1): 71-79.
YU Xiaodi, LIU Xiaogang, ZHU Yifei, et al. Effects of soil texture and water pressure on moisture infiltration in vertical inserting mode[J]. Journal of Irrigation Mechanical Engineering, 2017, 35(1):71-79. (in Chinese)