

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.017

基于 HYDRUS - 2D 的负压灌溉土壤水分入渗数值模拟*

冀荣华¹ 王婷婷¹ 祁力钧² 杨知伦²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 依据土壤水动力学理论, 结合负压灌溉条件下土壤水分运动特征, 建立了土壤水分入渗模型。利用 HYDRUS - 2D 对所建模型求解, 并模拟在负压地下灌溉下, 水分在土壤垂直剖面随时间的入渗变化规律。将模拟结果与试验测量结果进行对比验证, 结果表明, 两者相对误差为 2% ~ 4%, 所建模型可以有效描述负压地下灌溉条件下土壤水分入渗规律。利用该模型模拟研究了不同灌水器半径(8、10、12 cm)和不同土质(北京地区土壤和基质)下土壤水分的入渗情况。结果表明: 灌水器半径是影响土壤水分入渗的显著性因素。灌水器半径越大, 水分入渗速率越快。灌水器尺寸对入渗起始时的入渗延迟有较大影响, 灌水器半径越大, 延迟越小。土壤水分入渗速率与灌水器半径呈正相关。

关键词: 土壤水分入渗 负压地下灌溉 HYDRUS - 2D 灌水器

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0113-07

Numerical Simulation of Soil Moisture Infiltration under Negative Pressure Irrigation Based on HYDRUS - 2D

Ji Ronghua¹ Wang Tingting¹ Qi Lijun² Yang Zhilun²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the theory of unsaturated soil water dynamics and characteristics of soil moisture movement under negative pressure irrigation, a moisture infiltration model was proposed. The time-varying rules of moisture infiltration at the vertical soil profile on condition of negative pressure irrigation were simulated by moisture infiltration model of HYDRUS - 2D. Result showed that the relative error between simulated and measured value was 2% ~ 4%, which was within a reasonable range. The soil moisture infiltration rules under the negative pressure irrigation can be described effectively by the model. Moisture infiltration with different soils (soil and matrix in Beijing area) and different sizes of emitters (radius varied 8, 10 and 12 cm) were simulated. The simulation results indicated that emitter size was a significant influence factor for soil moisture infiltration. The initial moisture migration rate was faster with larger emitter than that with smaller emitter. Meanwhile, the delay at the beginning of infiltration was shorter with larger emitter. There was a positive correlation between infiltration rate and emitter size, and water infiltration rate increased with the increase of the radius of emitter.

Key words: Soil moisture infiltration Negative pressure irrigation HYDRUS - 2D Irrigation emitter

引言

非饱和土壤水分运动是指水分未充满土壤全部

孔隙时的运动, 属于多孔介质中流体运动的一种重要形式^[1]。掌握土壤水分的运动规律对改进灌溉技术、合理利用水资源以及提高作物产量具有重要

收稿日期: 2014-07-02 修回日期: 2014-09-10

* 国家自然科学基金资助项目(31101609)和中国农业大学基本科研业务经费资助项目(2011JJS144)

作者简介: 冀荣华, 副教授, 博士, 主要从事节水灌溉技术研究, E-mail: jrhc@cau.edu.cn

通讯作者: 祁力钧, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术和植物保护研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

意义。土壤作为一种多孔介质,由无数形状不规则且排列错综复杂的固体颗粒组成,因此水分在土壤中的运动是复杂且多变的^[2]。目前土壤水分运动的数值模拟研究从一维、二维模拟逐渐深入到三维空间的模拟。其中,Piver等使用积分方法求解了一维水平非饱和土壤水分运动问题^[3];雷志栋等利用里兹法有限元对非饱和土壤水一维流动问题进行了数值计算^[4];Kandelous等和Skaggs等使用HYDRUS-2D软件对滴灌条件下土壤中水分二维分布运动进行了实验研究和数值模拟^[5-6];王维娟等利用HYDRUS-3D模型模拟了点源交汇条件下的水分分布规律^[7],并较为详尽地介绍了土壤水分运动三维模拟的研究。

水分入渗有两种形式,一种是因降雨或灌溉从地表垂直向下进入土壤,如传统的大田浇灌^[8];另一种是通过沟渠或用于灌溉的地下渗水管渗入到土壤,如地下滴灌^[9]、渗灌^[10]等节水灌溉。掌握水分在土壤中的运动规律对改进灌溉技术有重要的意义^[11],目前传统的节水灌溉技术可以分为点源(如滴灌)和线源灌溉(如地下渗灌)。Elmaloglou等^[12]、李耀刚等^[13]分别进行了滴灌和渗灌条件下土壤水分运动的实验研究和数值模拟。

有别于传统的灌溉方式,负压地下灌溉技术将灌水器埋于地下,利用灌水器与周围土壤之间的水势梯度差,使得灌水器内的水流入土壤,属于主动灌溉技术^[14]。负压地下灌溉利用灌水器实施灌溉。灌水器一般为一个圆形物体(可为吸水布或吸水盘),属于面源灌溉。由于土壤中湿润体的大小、形状及土壤含水率均影响着作物的生长状况,因此研究负压地下灌溉条件下土壤水分运动规律尤为重要^[15-17]。邹朝望等^[18-19]对负水头下土壤水分的一维水平运动进行了理论与实验研究。

以上研究成果为土壤水分运动的模拟提供了很好的参考依据。文献分析发现,目前主要针对传统灌溉(即点源或面源)方式下的土壤水分运动进行数值模拟,而针对面源(如负压地下灌溉)条件下土壤水分入渗的数值模拟研究较少。本文将针对负压地下灌溉条件下土壤水分入渗规律进行二维数值模拟,其模拟结果可以定量获得不同时刻的土壤水分空间分布特征,可为合理确定负压地下灌溉技术要素提供参考依据。

1 土壤水分入渗模型建立的原理

1.1 土壤水分入渗规律数学模型

负压灌溉属于面源入渗,即轴对称三维入渗。在假定土壤均质、各向同性的条件下,在柱坐标下可

以简化为二维入渗,相应柱坐标系下的Richards方程^[5]为

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

式中 θ ——土壤体积含水率, cm^3/cm^3
 $D(\theta)$ ——土壤水扩散率, cm^3/cm^3
 $K(\theta)$ ——非饱和土壤导水率, cm/min
 t ——时间, min
 r ——柱坐标系下的径向坐标, cm
 z ——垂直方向坐标, cm

采用流体建模有限元分析软件HYDRUS-2D模拟负压灌溉条件下的土壤水分入渗过程^[20]。HYDRUS-2D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。本文目标是研究在没有作物的情况下土壤中水分入渗规律, van Genuchten模型更为适合,因此采用van Genuchten模型描述土壤水分入渗规律。van Genuchten模型为

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

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

式中 θ_r ——土壤剩余含水率, cm^3/cm^3
 θ_s ——土壤饱和含水率, cm^3/cm^3
 K_s ——饱和导水率, cm/min
 S_e ——土壤有效含水率, cm^3/cm^3
 h ——土壤吸力, cm
 α, λ, m, n ——经验参数

1.2 模型初始条件和边界条件的设置

负压地下灌溉水分入渗属于面源入渗,不同于滴灌等传统灌溉条件下的点源入渗。根据负压地下灌溉的特点,设置土壤水分运动模拟区域如图1所示。

图中 O 为坐标原点,设置于灌水器出水面中心; $ABCD$ 为数值模拟区域; AB 为模拟区域的宽度; BC 为模拟区域的高度; Ob 为灌水器半径。考虑到实际土壤水分入渗的复杂性和模型模拟结果的准确性,模拟区域取 $ABCD$ 整个区域。

1.2.1 模型初始条件

求解土壤水分运动方程的初始条件为

$$h(x, z, t) = h_0(x, z) \quad (-X \leq x \leq X, 0 \leq z \leq Z, t = 0) \quad (4)$$

式中 $h_0(x, z)$ ——初始土壤负压水头, cm

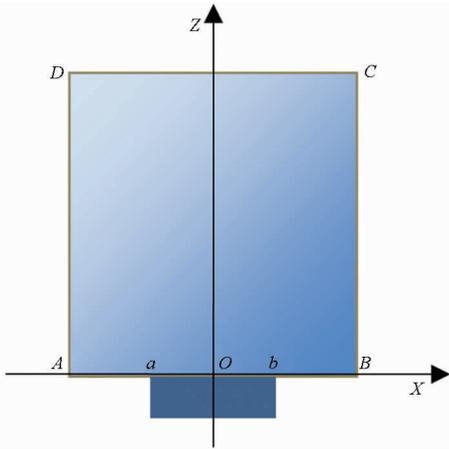


图1 土壤水分运动模拟区域

Fig. 1 Numerical simulation of soil water movement

X ——模拟计算区域的水平最大长度, cm

Z ——模拟计算区域的垂直最大长度, cm

根据所使用的负压地下灌溉系统, 设定初始负压水头为 -50 cm。 X 和 Z 则根据所用试验土箱的实际尺寸设定, 以 O 为坐标原点设 $X = \pm 15$ cm, $Z = 40$ cm。

1.2.2 模型的边界条件

由于是室内试验, 上边界 CD 不考虑蒸发和降水, 则

$$-K(\theta) \frac{\partial(h-z)}{\partial z} = 0 \quad (-15 \leq x \leq 15, z = 40) \quad (5)$$

边界 AD 、 BC 代表土箱壁无水量交换, 因此设

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (x = \pm 15, 0 \leq z \leq 40, t > 0) \quad (6)$$

边界 Aa 、 bB 为土箱壁, 可视为不透水边界, 即

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 1 \quad (-15 \leq x \leq 15, z = 0) \quad (7)$$

边界 ab 设为定水头出流边界 ($h = -0.5$ m), 为模拟灌水器直径对入渗过程的影响, 通过改变 ab 值来模拟灌水器直径的变化。

1.3 土壤水分入渗规律数值模拟

根据确定的土壤水分运动模型, 在 HYDRUS-2D 中对所建模型进行数值模拟。首先 HYDRUS-2D 利用 Geometry 模块构建水分运动模拟区域^[21-22], 模拟区域为矩形 (图 2)。其次, 通过 Generate Finite Element Mesh 来调用 MESHGEN-2D 模块, 将所绘制的矩形区域离散成不规则的三棱柱单元。由于负压地下灌溉条件下, 水源位于底部, 模拟区域下端水分运动速率较快, 因此将模拟区域下端精细离散; 远离水源的模拟区域上端则稀疏离散。为更精细模拟土壤水分的入渗规律, 将数值模拟区域网格按照 3 种不同密度分别离散化, 其中底部区

域 1 的网格划分直径设 $d = 0.05$ cm, 区域 2 网格划分直径设为 $d = 0.2$ cm, 区域 3 网格划分直径设 $d = 0.5$ cm, 如图 2 所示。

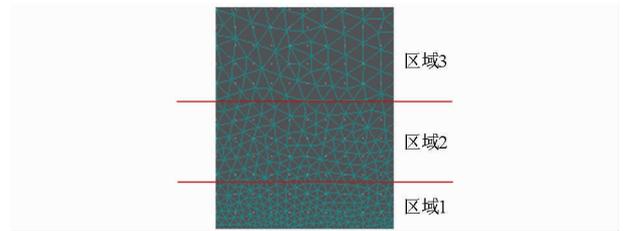


图2 模拟区域网格划分

Fig. 2 Meshing simulation area

数值模拟时间设为 3 d, 时间步长采用等间隔划分, 设为 20 min。利用所建模型模拟 3 d 内整个数值模拟区域水分的入渗情况, 从而掌握土壤水分在模拟区域的空间分布及其随时间的动态变化。

2 负压灌溉土壤水分入渗试验

2.1 试验装置与试验方法

本次试验装置如图 3 所示, 由灌水器、供水器、土箱、调压管和输水管组成。其中供水器 (半径 \times 高: 5 cm \times 80 cm) 提供恒压供水, 土箱 (半径 \times 高: 15 cm \times 20 cm) 用于装土。灌水器由持水力很强的持水布与吸水力较强的吸水布组成, 放置于土箱底部。持水布的半径分别设置为 12、10 和 8 cm。采用内径为 6 mm 的橡胶水管将各装置紧紧接牢, 使得整个系统在试验过程中处于严格密封状态。

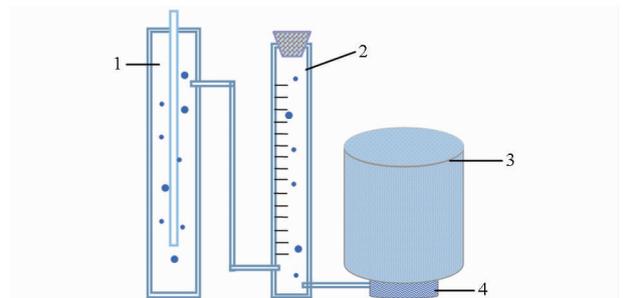


图3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

1. 调压管 2. 供水器 3. 土箱 4. 灌水器

试验过程中用供水器的进水口与灌水器水平面的高度差来控制负压灌溉的供水水头, 同时在供水器侧面标上刻度, 可以实时读取刻度以记录累计入渗量。采用土壤水分传感器实时监测土壤湿润体内不同点处含水率的动态变化。

2.2 试验方案

选取北京地区田间栽培用土壤和基质 (栽培用土壤选自中国农业大学西校区试验田土壤, 基质采用适合栽培番茄的复合基质, 其配比为: 有机质质量分数 22.54%, 全氮质量分数 0.958%, 全磷质量比

4.32 mg/kg,全钾质量比 330 mg/kg),土壤和基质颗粒组成如表 1 所示。

表 1 土壤及基质的物理颗粒组成

Tab.1 Particle composition of soil and matrix

土质类型	颗粒组成/%		
	粘粒 (粒径 0 ~ 0.002 mm)	粉粒 (粒径 0.002 ~ 0.02 mm)	砂粒 (粒径 0.02 ~ 2 mm)
土壤	17.97	35.25	46.78
基质	4.84	21.58	73.58

依据所用土壤的物理颗粒组成和基质的配比,利用 HYDRUS-2D 中自带神经网络分别预测其土壤水分特征参数^[23]如表 2 所示。

表 2 土壤水分特征参数

Tab.2 Soil moisture characteristic parameters

参数	$\theta_r /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_s /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$K_s /$ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	$\alpha /$ cm^{-1}	n	m	λ
土壤	0.078	0.43	24.96	0.036	1.56	0.36	0.5
基质	0.045	0.43	0.5	0.145	2.68	712.8	0.5

试验前将风干土过 2 mm 筛,按容重 1.25 g/cm³ 分层装土,每层高 5 cm,共 4 层。装土过程中埋设土壤水分传感器,由于土箱底部离水源较近,其水分变化较大,为了更为精确地测定土壤中水分变化情况,各层土壤中传感器布置个数由下至上分别设置为 7、5、5、3 个,共 20 个,如图 4 所示。图中数字 1~4 代表 4 个土层。

试验共设置 6 组,每组重复 3 次,实测值取 3 次试验的平均值^[24]。具体试验设计见表 3。

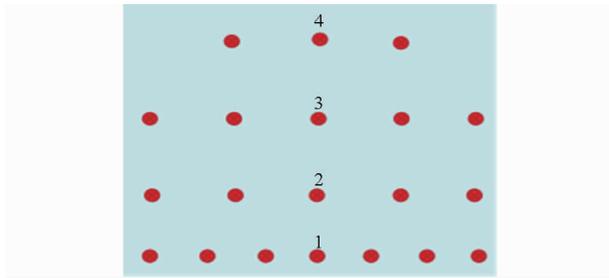
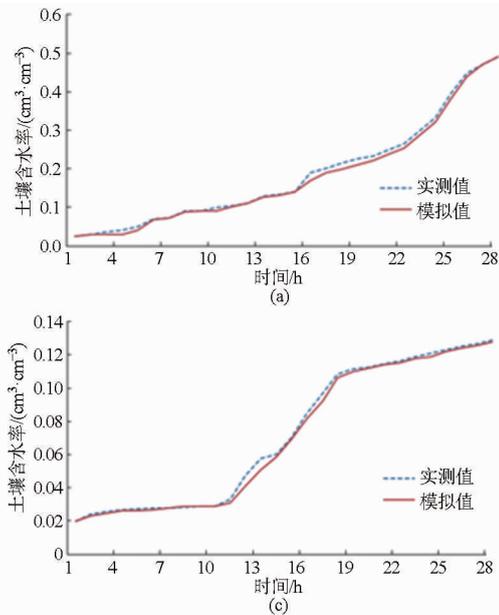


图 4 土壤水分传感器布置

Fig.4 Arrangement of soil moisture sensors

表 3 试验设计

Tab.3 Experimental design

试验序号	1	2	3	4	5	6
灌水器半径/cm	8	8	10	10	12	12
土壤质地	土壤	基质	土壤	基质	土壤	基质

3 结果分析

3.1 土壤水分入渗模拟模型有效性验证

土壤含水率随时间变化的情况反映了负压地下灌溉水分的入渗规律。为验证土壤水分入渗模拟模型有效性,对比分析在负压地下灌溉下,土壤水分入渗过程中土壤含水率的模拟值和实测值。图 5 为灌水器半径 12 cm 时,土壤中各层中心位置处传感器在整个水分入渗过程中(0~28 h),检测的土壤含水率以及 HYDRUS-2D 中对应位置含水率的模拟值。由于灌水器位于土箱底部中心位置,因此土箱中心位置处土壤水分变化最快,图 5 的结果可以验证所建土壤水分入渗模拟模型的有效性。

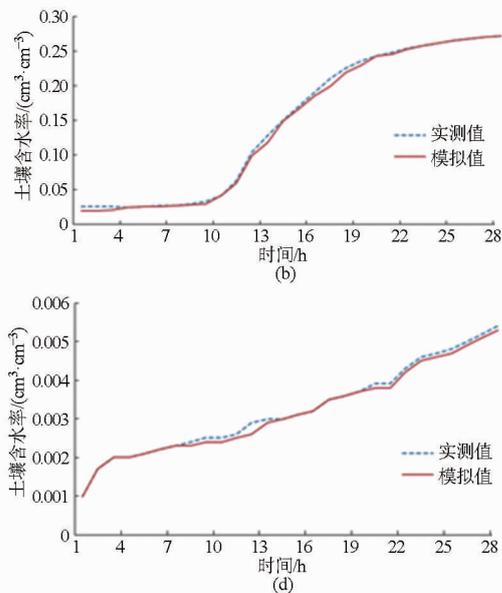


图 5 不同土层中土壤含水率实测值与模拟值的对比

Fig.5 Comparison of soil moisture content between measured and simulated values

(a) 0~5 cm (b) 5~10 cm (c) 10~15 cm (d) 15~20 cm

从图 5 中可以看出在不同土层中土壤含水率的模拟值与实测值曲线拟合度很好。表 4 为水分入渗过程 4 个土层含水率模拟值与实测值的相对误差。

表 4 各土层土壤水分入渗相对误差

Tab. 4 Relative error of soil moisture infiltration

土层/cm	0 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20
相对误差/%	3.96	2.97	4.47	4.59

可以发现,相对误差均小于 5%。因此所建立的土壤水分入渗模拟模型可以较为真实地反映负压地下灌溉土壤水分入渗规律。

3.2 土壤水分入渗影响因素分析

本文主要考虑灌水器半径和土质 2 种因素对土壤水分入渗规律的影响。将试验结果进行方差分析,方差分析结果如表 5 所示。

表 5 土壤水分入渗影响因素方差分析

Tab. 5 Analysis of soil moisture infiltration affecting factors

方差来源	偏差平方和	自由度	F	p
灌水器半径	52 450	2	35.02	0.000 3
土质	3 433.2	1	3.44	0.101 2
误差	2 995.5	14		
总和	58 878.7	17		

由表 5 方差分析可以发现,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,土质影响下 $p = 0.101 2 > 0.05$,而灌水器半径影响下 $p = 0.000 3 < 0.05$,即灌水器半径是负压地下灌溉条件下影响土壤水分入渗的显著性因素,而土质是不显著性影响因素。

3.3 灌水器半径对土壤水分入渗的影响

在负压灌溉条件下,土壤水分入渗属于面源主动入渗,不同于以往的点源和线源入渗方式,面源大小由灌水器半径 R 决定,因此灌水器半径是影响土壤水分入渗规律的重要因素,这与方差分析结果相一致。为研究灌水器半径对土壤水分入渗的影响,分别模拟了 3 种灌水器半径(8、10、12 cm)条件下土壤水分入渗情况。图 6 表示 t 为 10 h 时,不同尺寸的灌水器半径下,土壤中水分分布情况。

从图 6 可以看出,在入渗过程中,经过相同时间,灌水器半径越大,湿润锋在水平和垂直方向的运移距离越大,即湿润体体积越大土壤水分入渗越快。因此增大灌水器半径可以提高水分在土壤中的入渗速率。

3.4 灌水器半径对累计入渗量及土壤含水率的影响

由于灌水器半径是影响土壤水分入渗的显著因

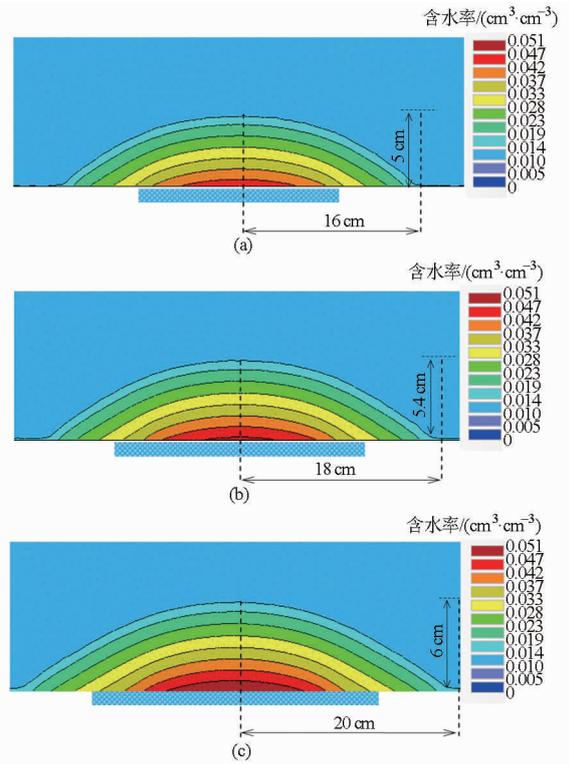


图 6 不同灌水器半径下土壤水分入渗模拟

Fig. 6 Simulation of soil moisture infiltration under different sizes of irrigation emitter

(a) $R = 8$ cm (b) $R = 10$ cm (c) $R = 12$ cm

素,分析灌溉过程中累计入渗量和土壤含水率随时间的变化可以掌握负压地下灌溉土壤水分的入渗规律。

图 7 为不同灌水器半径(8、10、12 cm)下,同一采样点(垂直距离 10 ~ 15 cm)土壤中累计灌水量随时间的变化曲线。

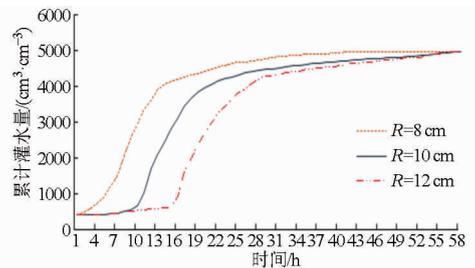


图 7 不同灌水器半径下土壤累计灌水量曲线

Fig. 7 Cumulative infiltration under different sizes of irrigation emitter

由图 7 可知无论何种规格的灌水器半径,其累积入渗量都随时间 t 的增加而增大,达到一定程度后累计入渗量趋于稳定,其变化趋势基本一致。在相同灌溉时间内,半径越大累计入渗量越大。

图 8 为不同灌水器半径在同一采样点(垂直距离 5 ~ 10 cm)土壤含水率随时间的变化曲线。

由图 8 可知,同一采样点不同尺寸灌水器对土壤含水率的变化趋势影响是一致的。当入渗过程结

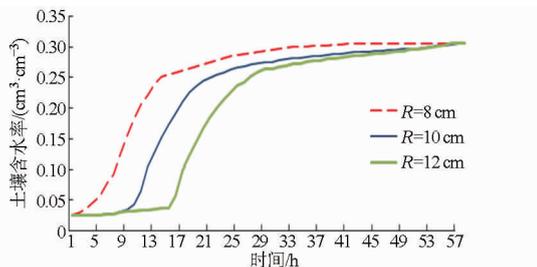


图8 不同灌水器半径下土壤水分含水率曲线

Fig.8 Soil moisture content under different sizes of irrigation emitter

束时,对于同一采样点,不同尺寸灌水器的土壤含水率相同,均为 $0.3207 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,说明灌水器尺寸不影响灌溉结束时土壤含水率。由图8可知灌水器尺寸对土壤水分入渗速率有较大影响。灌溉开始时均有一段时间的延迟,入渗开始后,土壤水分入渗速率较快,入渗速率与灌水器半径呈正相关,继而水分入渗速率减慢,并逐渐趋于平缓达到稳定。 $R=12 \text{ cm}$ 时入渗延迟时间为2 h,土壤水分快速入渗所持续的时间为10.5 h, R 为10 cm时入渗延迟时间为8 h,土

壤水分快速入渗所持续的时间为12 h, R 为8 cm时入渗延迟时间为17 h,土壤水分快速入渗所持续的时间为13.5 h。因此灌水器半径越大入渗延迟时间越短,同一位置土壤含水率达到峰值所用的时间也越短。

4 结论

(1)各土层土壤水分入渗模拟值和实测值的相对误差均小于5%,因此所建立的土壤水分入渗模拟模型能够很好地模拟负压灌溉条件下土壤水分运动规律,可以用于研究负压灌溉条件下土壤水分入渗的变化规律。

(2)经过方差分析,灌水器尺寸是影响土壤水分入渗的显著因素,在利用负压地下灌溉系统栽培作物时应考虑灌水器半径对土壤水分入渗的影响。

(3)负压地下灌溉条件下,土壤水分入渗开始时均有一段时间的延迟。灌水器半径越大延迟时间越短,水分入渗平均速率越大,土壤含水率达到峰值所用的时间越短。

参 考 文 献

- 侯宪东,汪志荣,张建丰.非饱和土壤水分运动数值模拟研究综述[J].水资源与水工程学报,2006,17(4):41-45.
Hou Xiandong, Wang Zhirong, Zhang Jianfeng. Review on the numerical simulation of the movement of unsaturated soil-water[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2006, 17(4): 41-45. (in Chinese)
- 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2005.
- Piver W T, Lindstrom F T. Mathematical models for describing transport in the unsaturated zone of soils[M]. Springer Berlin Heidelberg: Water Pollution Press, 1991.
- 雷志栋,杨诗秀.非饱和土壤水一维流动的数值计算[J].土壤学报,1982,19(2):141-152.
Lei Zhidong, Yang Shixiu. Numerical method of one-dimensional flow through unsaturated soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 1982, 19(2): 141-152. (in Chinese)
- Kandelous M M, Šimůnek J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(7): 1070-1076.
- Skaggs T H, Trout T J, Šimůnek J, et al. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(4): 304-310.
- 王维娟,牛文全,孙艳琦.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. 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: Natural Science Edition, 2010, 38(4): 219-225. (in Chinese)
- 刘冠丽.智能化浇灌系统的设计与实现[J].现代电子技术,2012,35(23):195-198.
Liu Guanli. Design and implementation of intelligent watering system [J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(23): 195-198. (in Chinese)
- 黄兴法,李光永.地下滴灌技术的研究现状与发展[J].农业工程学报,2002,18(2):176-181.
Huang Xingfa, Li Guangyong. Present situation and development of subsurface drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 176-181. (in Chinese)
- 王淑红,张玉龙,虞娜,等.渗灌技术的发展概况及其在保护地中应用[J].农业工程学报,2005,17(增刊1):92-95.
Wang Shuhong, Zhang Yulong, Yu Na, et al. Development status of infiltration irrigation technology and its application in protected field [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 17(Supp. 1): 92-95. (in Chinese)
- 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,2003,19(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, 19(3): 11-13. (in Chinese)

- 12 Elmaloglou S, Diamantopoulos E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(11): 1587 - 1595.
- 13 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 Wen'e, Hu Xiaotao. Numerical simulation of soil water infiltration under bubbled root irrigation based on HYDRUS-3D [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(6): 546 - 552. (in Chinese)
- 15 Mitchell W H, Sparks D L. Influence of subsurface irrigation and organic additions on top and root growth of field corn [J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74(6): 1084 - 1088.
- 16 雷廷武, 江培福, Vincent F Bralts, 等. 负压自动补给灌溉原理及可行性试验研究 [J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 298 - 302.
Lei Tingwu, Jiang Peifu, Vincent F Bralts, et al. A simple infiltration method for estimating soil hydraulic properties of unsaturated soils [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 298 - 302. (in Chinese)
- 17 江培福, 雷廷武, Vincent F Bralts, 等. 土壤质地和灌水器材对负压灌溉出水流量及土壤水运移的影响 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(4): 19 - 22.
Jiang Peifu, Lei Tingwu, Vincent F Bralts, et al. Effects of soil textures and emitter material on the soil water movement and efficiency of negatively pressurized irrigation system [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(4): 19 - 22. (in Chinese)
- 18 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎. 负水头灌溉原理与装置 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 17 - 22.
Zou Chaowang, Xue Xuzhang, Zhang Renduo. Principle and equipment of negative pressure irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 17 - 22. (in Chinese)
- 19 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎. 基于负水头下土壤水分一维水平运动理论与实验研究 [J]. *土壤通报*, 2006, 37(5): 841 - 846.
Zou Chaowang, Xue Xuzhang, Zhang Renduo. Hydraulic characteristics of one-dimensional horizontal soil water flow [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 841 - 846. (in Chinese)
- 20 Šimůnek J, van Genuchten M T, Sejna M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes [J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 587 - 600.
- 21 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.
- 22 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.
- 23 Pang Liping, Close M E, Watt J P C, et al. Simulation of picloram, atrazine, and simazine leaching through two New Zealand soils and into groundwater using HYDRUS-2D [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 44(1): 19 - 46.
- 24 张东, 赵娟, 鲍露, 等. SPSS 软件在试验设计与分析课程教学中的应用 [J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(23): 9847 - 9849.
Zhang Dong, Zhao Juan, Bao Lu, et al. Exploration of teaching reform on curriculum of experimental design and analysis based on statistical softwares [J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(23): 9847 - 9849. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 69 页)

- 11 Fish F E. Biomimetics: determining engineering opportunities from nature [J]. *Proc. SPIE 7401, Biomimetics and Bioinspiration*, 2009: 740109.
- 12 Fish F E, Paul W Weber, Mark M Murray, et al. the tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2001, 51: 203 - 213.
- 13 孙久荣, 戴振东. 非光滑表面仿生学 (II) [J]. *自然科学进展*, 2008, 18(7): 727 - 733.  
Sun J R, Dai Z D. Bionic non-smooth surface (II) [J]. *Progress in Nature Science*, 2008, 18(7): 727 - 733. (in Chinese)
- 14 田丽梅, 王银慈, 高栳桦, 等. 镶嵌式仿生耦合功能表面流体介质控制机制研究 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(6): 324 - 328.  
Tian Limei, Wang Yinci, Gao Zhihua, et al. Fluid control mechanism of mosaic bionic coupling functional surface [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(6): 324 - 328. (in Chinese)
- 15 Tian L M, Gao Z H, Ren L Q, et al. The study of the efficiency enhancement of bionic coupling centrifugal pumps [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2013, 35(4): 517 - 524.
- 16 Lee Y C, Thompson H M, Gaskell P H. Thin film flow over flexible membranes containing surface texturing: bio-inspired solutions [J]. *Proc. IMech E, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2009, 223: 337 - 345.
- 17 Fish F E. Influence of hydrodynamic-design and propulsive mode on mammalian swimming energetics [J]. *Australian Journal of Zoology*, 1994, 42(1): 79 - 101.
- 18 田丽梅, 卜兆国, 陈庆海, 等. 肋条状仿生非光滑表面铸造成型方法 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 189 - 194.  
Tian Limei, Bu Zhaoguo, Chen Qinghai, et al. Casting method of rib-like bionic non-smooth surface [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 189 - 194. (in Chinese)