

基于 HYDRUS - 2D 的负压微润灌土壤水分运动模拟

徐俊增^{1,2} 刘玮璇¹ 卫琦¹ 王可纯¹ 王海渝¹ 周姣艳³

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098;

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

3. 昆山市城市水系调度与信息管理处, 昆山 215300)

摘要: 为研究负压微润灌不同技术参数组合下的土壤水分运动过程,以土箱试验实测含水率为依据,构建并验证了基于 HYDRUS - 2D 的负压微润灌土壤水分运动反演模型,并结合反演模型对负压微润灌多种组合情景的土壤湿润体模拟结果和典型设施作物根系分布特征及需水规律,探究适宜于不同设施作物的负压微润灌技术参数组合。结果表明:采用 HYDRUS - 2D 反演模型能够较好地模拟负压微润灌不同供水水头条件下的土壤湿润体特征,土壤湿润距离(水平距离、垂直向上距离和垂直向下距离)、含水率及累积入渗量模拟值与实测结果之间的决定系数和 NSE 分别达到 0.98 和 0.77 以上。试验及模拟结果均表明,负压微润灌条件下供水水头与土壤含水率、累积入渗量及不同方向的湿润距离均呈负相关关系。此外,基于反演模型对负压微润灌不同湿润体的情景模拟结果和典型设施作物根系分布特征及需水规律,拟定了不同设施作物适宜的负压微润灌技术参数范围。本研究对农业生产中负压微润灌技术参数的选择及新型节水微润灌技术的推广具有指导意义。

关键词: 负压微润灌;湿润体特征;土壤水分入渗;HYDRUS - 2D 模型

中图分类号: S275

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)08-0287-10

OSID:



Simulation of Soil Moisture Movement under Negative Pressure
Micro-irrigation Based on HYDRUS - 2D

XU Junzeng^{1,2} LIU Weixuan¹ WEI Qi¹ WANG Kechun¹ WANG Haiyu¹ ZHOU Jiaoyan³

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

3. Urban Water Scheduling and Information Management Department of Kunshan, Kunshan 215300, China)

Abstract: It has important guiding significance for the selection of technological parameters of negative pressure micro-irrigation for different crops, by understanding the characteristics of soil water movement under different combinations of technical parameters of negative pressure micro-irrigation. The soil water movement inversion model under negative pressure micro-irrigation based on HYDRUS - 2D model was constructed and validated by parameter inversion based on the measured moisture data in the soil bin test. The combination of negative pressure micro-irrigation technical parameters suitable for different facility crops was explored by combining the simulation results of the inverse model for much wetter characteristics of negative pressure micro-irrigation and the root distribution characteristics and water demand pattern of typical facility crops. The results showed that the HYDRUS - 2D inversion model can better simulate the characteristics of the soil wetter under different water supply heads of negative pressure micro-irrigation. The determination coefficients and NSE between simulated and measured values of soil wetting distance (horizontal distance, vertical upward distance and vertical downward distance), water content and cumulative infiltration reached above 0.98 and 0.77, respectively. Both experimental and simulation results showed that there was a negative correlation between the negative pressure of the water supply head and soil water content, the cumulative infiltration and wetting distance in different directions under negative pressure micro-irrigation conditions. In addition, a suitable range of technical parameters

收稿日期: 2021 - 04 - 06 修回日期: 2021 - 05 - 11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809077)

作者简介: 徐俊增(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论及其农田生态效应研究,E-mail: xjz481@hhu.edu.cn

通信作者: 卫琦(1986—),男,副研究员,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: weiqi8855116@163.com

for negative pressure micro-irrigation for different facility crops was formulated, based on the simulation results of the inverse model for different wetting bodies of negative pressure micro-irrigation and the root distribution characteristics and water demand pattern of typical facility crops. These results were important for the selection of technical parameters for negative pressure micro-irrigation in agricultural production and the promotion of new water-saving irrigation techniques.

Key words: negative pressure micro-irrigation; wetted soil characteristic; soil moisture infiltration; HYDRUS-2D model

0 引言

随着人口数量的增长和经济社会的快速发展,人均水资源可利用量不断锐减,水资源短缺问题已经成为制约我国经济发展的重要因素^[1]。在水资源供需矛盾日益突出的背景下,发展新型节水灌溉技术对提高灌溉用水效率、缓解农业用水危机具有重要的现实意义^[2]。

负压微润灌是一种通过土壤基质吸力将灌溉水由低处向高处运移而自动补充土壤水分、维持根区稳定土壤水分、以保证作物需水的灌溉方式^[3],其最主要的特点是连续微量供水、维持稳定的土壤水分分布^[1]、减少地表无效蒸发和下渗损失,从而实现水资源高效利用^[1,4]。负压微润灌技术具有节水、节能、促进作物生长、改善土壤环境等优势,是一种极具发展潜力的新型节水灌溉技术^[5-6]。随着灌水器材料与制备工艺的日趋成熟,负压微润灌技术受到了越来越多的关注,但受供水压力、灌水器导水率及埋深等因素的影响,仍缺乏较为系统的负压微润灌技术设计标准或参考依据。因此,在实际推广应用上受到一定的限制^[2]。

土壤湿润体决定作物的水分利用效率和生长特性^[7],准确把握负压微润灌的土壤湿润体特征,对于选择具有高效用水效率的负压微润灌技术参数具有重要指导意义。在诸多影响负压微润灌土壤湿润体特征的因素中,灌水器导水率 K_s 、供水水头 H 及灌水器埋深 D 是决定负压微润灌湿润体特征的重要因子。在通常情况下, K_s 决定了负压微润灌的供水速率, K_s 越大,意味着水分进入土壤的通道越多,在相同时间内累积入渗水量和湿润体也越大^[8]。 H 决定了灌水器的内外压力差, H 越小,意味着土壤水吸力和湿润体越小^[9-10],一般认为,作物适宜的负压微润灌供水水头主要维持在 $-10\sim 0\text{ kPa}$ 范围内^[2]。灌水器埋深也显著影响土壤湿润体的分布特征,是实现与作物根系有效匹配的关键因素^[11]。

数值模拟方法可以定量描述土壤水分运动过程,因此被广泛应用于节水灌溉研究中^[12]。由美国国家盐土实验室开发的 HYDRUS 模型具有模拟精度高、算法种类丰富等优点,是目前应用最为广泛的

水分运动模拟模型之一^[13-15]。已有学者针对该模型在负压微润灌条件下的土壤水分运移规律进行了模拟研究。冀荣华等^[14]研究了不同灌水器半径(8、10、12 cm)对负压微润灌土壤水分入渗的影响,结果表明,灌水器半径是影响土壤水分入渗的显著性因素,且水分入渗速率随灌水器半径的增大而增加。WANG 等^[8]通过土箱试验与 HYDRUS-2D 模型相结合的方法研究了灌水器导水率、土壤初始含水率、灌水器埋深以及供水压力对土壤水分入渗的影响,并基于上述参数建立了负压微润灌累积灌水量的半机理半经验的数学计算表达式。目前,关于负压微润灌土壤湿润体的研究主要采用土箱试验和模型模拟相结合的方法,探究不同灌水器埋深和供水水头对湿润体最大湿润距离及其水分含量的影响^[16],而将负压微润灌土壤长期稳定的湿润体特征与作物根系分布特征相匹配,探求不同作物适宜的负压微润灌技术参数范围等方面的研究还鲜见报道。

本文以负压微润灌为研究对象,以 3 种负压控制下的土箱实测土壤水分数据为依据,通过反演土壤和灌水器水力特征参数构建基于 HYDRUS-2D 的负压微润灌模型,研究负压微润灌不同灌水器导水率和供水压力水头条件下土壤有效湿润距离(满足作物正常生长所需要的最低土壤水分的运移距离,包括水平距离、垂直向上距离和垂直向下距离)的变化规律,并结合负压微润灌不同情景模拟下土壤湿润体特征和典型设施作物根系分布特征及需水规律,探究常见设施作物适宜的负压微润灌技术参数范围。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本试验于 2019 年 4—6 月在河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室($32^{\circ}3'24''\text{N}$, $118^{\circ}45'\text{E}$)进行。供试土壤取自南京市蔬菜花卉科学研究所塑料温室,采集的土壤样本在自然条件下进行风干,经过研磨、过筛(4 mm)后分层填入规格为 $80\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ 土箱内,填土高度为 45 cm。供试土壤均源自表层(0~30 cm 土层)土壤,其基本物理特征参数如表 1 所示。

表 1 土壤基本物理特征参数
Tab.1 Soil basic physical properties

土层深度/ cm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	初始土壤含水 率/(cm ³ ·cm ⁻³)	粒径质量分数/%		
			砂粒	粉粒	黏粒
0~16.5	1.25	7.3	14.8	53.8	31.4
16.5~45.0	1.35				

试验采用陶土管负压微润灌系统进行供水(图 1)。其中负压微润灌系统采用顶空气压传感器测定内部压力,并通过单片机进行决策来控制排气泵对内部压力进行调整,使之稳定在设定的压力范围(-100~100 Pa)。试验采用黏土陶土管灌水器

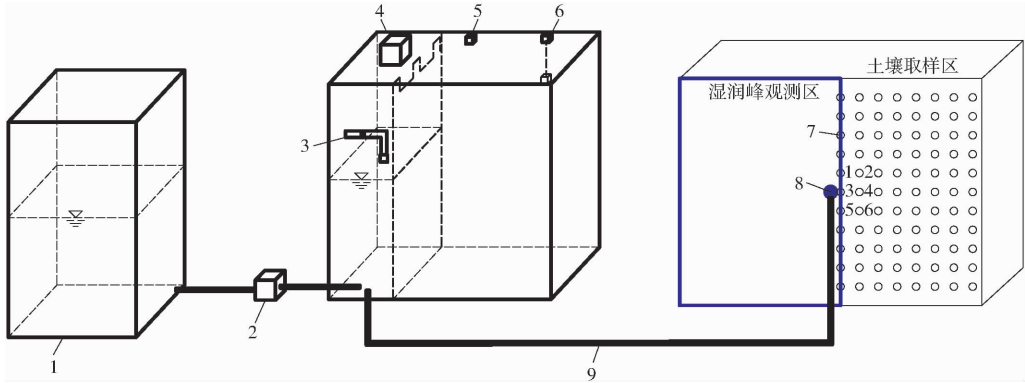


图 1 负压微润灌系统示意图

Fig.1 Schematic of negative pressure micro-irrigation system

1. 补水水箱 2. 蠕动泵 3. 液位浮球开关 4. 控制器 5. 排气泵 6. 气压传感器 7. 取土孔 8. 陶土灌水器 9. 出水管

试验共设置 3 个供水压力处理(供水水头 H 分别为 -2、-4、-6 kPa,表示为 T1、T2、T3),每个处理设置 3 个重复。试验过程中,分别在灌水后第 1 天内的 4、8、16、24 h,以及之后 6 d 内每间隔 24 h 记录湿润峰推进距离和土壤含水率。

1.2 模型构建

1.2.1 数值模型

负压微润灌沿水平方向均匀入渗,假设土壤均匀且各向同性,在灌水器左右两侧轴对称,因此按照二维水分运动的理念进行模型概化,使用 HYDRUS-2D 对不同负压供水条件下的土壤水分运动进行模拟分析,其水分运动方程为 Richards 方程^[15],即

$$c(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rK(h)\frac{\partial h}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K(h)\frac{\partial h}{\partial z}\right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z}$$
(1)

其中 $c(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$

式中 $c(h)$ ——比水容量(也称容水度), cm^3/cm^3
 θ ——土壤含水率, cm^3/cm^3
 h ——土壤水压力,kPa
 $K(h)$ ——非饱和土壤导水率, cm/min
 t ——时间,min
 r,z ——柱坐标下径向坐标和垂向坐标,cm

(外径 3 cm,内径 1.5 cm,长 40 cm)进行灌溉,陶土管在回填过程中置于土箱长边一侧的中线位置处(埋深为 15 cm)。试验过程中,土箱一侧用于记录不同时刻的湿润峰推进情况,另一侧用于取样测定不同时段和不同距离的土壤含水率,即取样侧在水平和垂直方向上每隔 5 cm 处设置取样孔(直径 d 为 1 cm)。本研究中,选择灌水器周围的 6 个取土点为观测点,并采用不锈钢土钻(外径 8 mm,内径 6 mm)对土壤样品进行采集,采用干燥法(100℃,8 h)对土壤质量含水率进行测定,并通过土壤质量含水率与土壤容重的乘积求得土壤体积含水率。

土壤水分入渗规律采用 VG 模型进行描述^[12],表达式为

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

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2$$
(3)

其中

式中 θ_s ——土壤饱和含水率, cm^3/cm^3
 θ_r ——土壤残余含水率, cm^3/cm^3
 $\theta(h)$ ——土壤相对饱和度, cm^3/cm^3
 K_s ——土壤饱和导水率, cm/h
 S_e ——土壤相对饱和度
 α ——经验常数,与进气压力成反比
 n ——与孔径分布相关的经验参数
 l ——经验形状系数

1.2.2 几何模型

由于陶土管灌水器管材为多孔材料,其水分运移理论上也可借助 HYDRUS 模型进行模拟,因此,在模型模拟过程中将陶土管假定为一种多孔材料(直径 3 cm,厚度 1.5 cm)。另外,考虑到土壤水分入渗过程土壤湿润体的左右对称性,本研究中仅针对土体右侧的湿润过程进行模拟^[8],即在模型构建

过程中将厚度为 1.5 cm 的半环形陶土管灌水器设置在计算模拟区域的左侧,用于模拟其土壤水分在土体右侧运移规律,因此其坐标系的原点位于土体下边界的最左侧(图 2)。此外,模型模拟过程中,考虑到上下层土壤容重的差异以及灌水器特殊的渗透性质,将模拟区域分为 0 ~ 16.5 cm 土层、16.5 ~ 45.0 cm 土层和灌水器 3 部分,分别设置水力特征参数,并在模拟区域中根据取土样点的位置同步设定 6 个土壤水分观测点(图 2)。

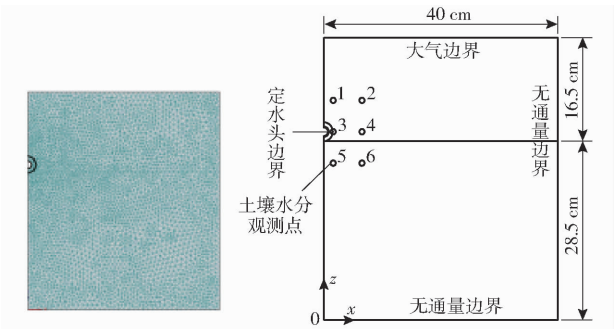


图 2 模型模拟区域示意图

Fig. 2 Schematic of model domain in HYDRUS-2D

1.2.3 边界条件设定

模型模拟区域为 40 cm × 45 cm 的矩形,目标网格大小为 1 cm,土壤剖面按深度分为 0 ~ 16.5 cm 和 16.5 ~ 45.0 cm 2 个土层。对于灌水器的多孔介质特性,为了使计算更加精确,在灌水器周围进行加密并按网格大小为 0.25 cm 进行划分,整个模型共划分成 4 388 个几何节点(图 2)。灌水器内壁边界为定水头边界(Constant pressure head),边界水头设定为实际压力水头,结合土壤初始含水率,通过土壤水分特征曲线获得土壤初始负水头为 -20 000 cm^[17]。忽略对称面的水平交换,左侧边界除灌水器外其余部分按不透水边界对待。上边界设置为大气边界(Atmospheric boundary)条件,由于试验在室内进行,

不考虑降雨量和蒸发蒸腾速率日变化的影响,因此,平均潜在蒸发量设置为 0.4 cm/d^[8]。另外,考虑到试验模拟期间土箱装置的不透水性且在试验模拟期间水分基本不会入渗到底部和右侧边界,所以右侧和底部均设定为无通量边界(No flux)。

1.3 模型水力特征参数反演

模型模拟结果的可靠性通常取决于土壤或灌水器水力特征参数的选择。目前,关于水力特征参数的选择主要通过基于土壤基本物理特征参数的 ROSETTA 模型预测、基于实测土壤水分特征曲线计算以及基于实测含水率结果的反演模型计算得到。例如,ZHANG 等^[18] 基于实测含水率数据和 HYDRUS-2D 模型反演并验证了反演模型的模拟精度,结果表明反演模型能够较好地模拟土壤水分运移特征,其均方根误差(RMSE)仅为 0.015 ~ 0.038 cm³/cm³。此外,还有部分学者通过研究地下滴灌系统及地下排水系统的水分迁移过程,认为反演参数越少,反演模型的模拟结果越精确^[16,19]。因此,为了得到与实测结果匹配性更高的模型,以往大部分文献主要先通过 ROSETTA 模型预测土壤初始水力特征参数,并选择其中的敏感参数基于实测结果进行反演计算,得到新土壤水力特征参数及反演模型,且证实了其模拟结果的可靠性^[8,20-22]。

基于供试土壤的颗粒级配与容重,以 HYDRUS-2D 模型内置 RETC 预测模块估算土壤初始水力特征参数(表 2)。并根据落差法(Falling head method)测量计算得到陶土管的饱和导水率 K_{s0} ^[22]。假设陶土管灌水器在试验初始阶段工作压力较小且处于饱和含水状态,故 α 取较小值 0.000 001 cm⁻¹。此外,假定管壁材料的不饱和参数 θ_s 、 θ_r 、 n 和 l 对模拟结果没有显著影响,其取值可借鉴 SIYAL 等^[22] 研究结果。

表 2 土壤和灌水器初始水力特征参数
Tab. 2 Soil and clay pipe initial hydraulic parameters

土层位置	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	α / cm^{-1}	n	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	$K_{s0} / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	l
0 ~ 16.5 cm 土层	0.056 5	0.396 1	0.005 7	1.648 5	1.064		0.5
16.5 ~ 45.0 cm 土层	0.056 3	0.395 1	0.005 7	1.646 8	1.041		0.5
灌水器	0.042 0	0.350 0	1×10^{-6}	1.300 0		0.003	0.5

以 T1 ($H = -2$ kPa) 处理实测的土壤含水率数据为依据对土壤水力特征参数进行反演计算,以 T2 ($H = -4$ kPa)、T3 ($H = -6$ kPa) 处理结果进行验证。基于土壤初始水力特征参数值,通过 HYDRUS-2D 内置 Marquardt-Levenberg 优化算法对土壤和灌水器参数 θ_r 、 α 、 n 和 K_s 进行反演计算。考虑到反演参数的数量越多对模型精度的影响越大^[19],因此,在

参数反演过程中,重点针对陶土管较为敏感的参数饱和导水率 K_{s0} 及土壤水分特征的敏感参数 θ_r 、 α 、 n 、 K_s 进行了反演,反演参数的设置区间主要参考 KARIMOV 等^[23] 研究结果,其具体范围如下: K_{s0} 、 K_s 为 0.000 1 ~ 5 cm/h, θ_r 为 0.35 ~ 0.6 cm³/cm³, α 为 0.003 1 ~ 0.036 8 cm⁻¹, n 为 1.3 ~ 2.42。此外,在对反演结果进行精度分析时,土壤含水率采用 6 个观

测样点的实测值与模拟值进行比较;累积入渗量由于模拟过程仅采用半柱体进行分析,故模拟值需加倍后再与实际灌水量进行比较分析,湿润距离(土壤水分的实际运移距离)则选取湿润体 3 个方向(水平方向、垂直向上方向和垂直向下方向)对不同时刻土壤实际观测的最大湿润边界及模型模拟值进行比较。

1.4 统计方法

为了评价模型的准确性,采用平均误差 (ME)、均方根误差 (RMSE) 和纳什效率系数 (NSE) 3 个指标对模型模拟结果进行评价。一般情况下,ME 和 RMSE 越小、NSE 越接近 1,说明模型精度越高。

1.5 情景模拟

影响负压微润灌土壤湿润体特征的因素主要包括土壤质地、灌水器材料、供水水头、灌水器埋深等^[2],因此,在土壤质地和作物种类确定的情况下,灌水器材料和供水水头是影响负压微润灌土壤湿润峰最主要的因素。为进一步明确影响负压微润灌土壤湿润体特征的灌水器导水率和供水水头临界范围,本研究以土箱试验 T1 处理的负压微润灌技术参数为基础,通过 HYDRUS-2D 反演模型模拟负压微润灌不同灌水器导水率(0.000 1~0.005 cm/h)和不同供水水头(-10~0 kPa)条件下土壤湿润体分布特征,统计分析有效湿润距离(对应能够满足作物生长所需

的最低土壤水分(本研究取 0.15 cm³/cm³)的湿润距离),建立不同灌水器导水率和供水水头与有效湿润距离之间的定量关系。并结合该定量关系,以典型设施作物主要根系分布特征和适宜的供水压力范围^[2]为参考,通过设置不同负压微润灌技术参数组合,借助反演模型模拟更多情景组合下土壤湿润体特征。此外,为更好模拟原状土的特征以及考虑到实际回填过程中因夯土对灌水器产生的影响,本研究模型模拟过程中,以不同灌水器埋深 D(5、10、15、20 cm)所对应的土层为临界土层,并分别将模拟区域临界土层上下部分土壤水力特征参数设定为基于 HYDRUS-2D 的负压微润灌水分模型反演后的上下两层(0~16.5 cm 和 16.5~45.0 cm)的土壤水力特征参数值。

2 结果与讨论

2.1 基于 HYDRUS-2D 的负压微润灌模型参数反演与验证

2.1.1 模型参数反演

由土壤初始水力特征参数(表 2)和模型反演参数结果(表 3)可以看出,反演后的土壤水力特征参数 K_s 较其初始值有了显著降低,即分别由 1.064、1.041 cm/h 降低为 0.012、0.008 cm/h,而其余参数的变化相对较小。

表 3 反演后的土壤和灌水器水力特征参数
Tab.3 Inversion results of soil and irrigator hydraulic characteristics

土层位置	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	α/cm^{-1}	n	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{h}^{-1})$	$K_{s0}/(\text{cm}\cdot\text{h}^{-1})$	l
0~16.5 cm 土层	0.056 5	0.419 6	0.005 8	2.100 2	0.012		0.5
16.5~45.0 cm 土层	0.056 3	0.391 0	0.005 6	1.705 8	0.008		0.5
灌水器	0.042 0	0.350 0	1×10^{-6}	1.300 0		0.001 4	0.5

此外,基于土箱试验 T1 ($H=-2$ kPa) 处理的实测数据对反演模型的准确性进行验证,相关评价指标结果见图 3。可以看出,反演模型模拟的 T1 处理的土壤含水率、累积入渗量和湿润距离(水平距离、垂直向上距离、垂直向下距离)与实测结果之间具

有较好的一致性,其决定系数(R^2)均达到了 0.98 以上,ME 分别为 0.37 cm³/cm³、0.09L 和 1.09 cm, RMSE 分别为 3.49 cm³/cm³、0.22L 和 1.73 cm, NSE 分别为 0.910 8、0.951 2 和 0.778 5。结果表明, HYDRUS-2D 模型能够较好地模拟负压微润灌土

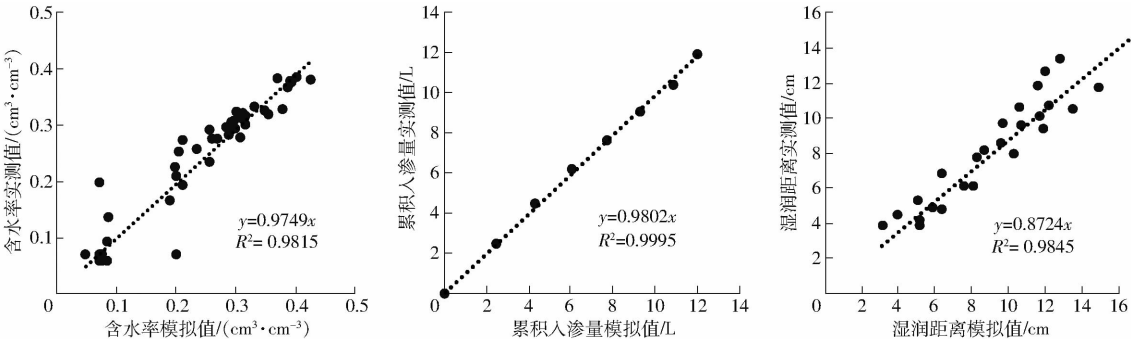


图 3 T1 处理 ($H=-2$ kPa) 模拟值与实测值对比
Fig.3 Comparison of simulated and measured values of T1 ($H=-2$ kPa)

壤水分运移特征。

2.1.2 模型验证

为进一步验证反演模型对负压微润灌不同负压状态下模拟结果的精度,针对验证数据 T2($H = -4$ kPa)和 T3($H = -6$ kPa)处理对模拟结果进行了分析(表 4 和图 4)。结果表明,反演模型对 T2 和 T3 处理的模拟结果与实测结果之间的 R^2 均达 0.98 以上,NSE 均在 0.77 以上,ME 和 RMSE 虽较 T1 处理有所增大,但均在可接受范围内。研究结果还发现,随着负压微润灌供水压力的减小,反演模型对土壤含水率的模拟值与实测值之间的误差越小,而累积入渗量和湿润距离模拟结果与实测结果之间的误差则越大。整体上,反演模型对负压微润灌不同供水水头条件下的土壤水分运移特征(含水率、累积入渗量和湿润距离)均具有较高的模拟精度,可以

作为模拟更多灌水器参数组合下土壤水分动态的工具。

表 4 模拟值与实测值的误差分析

Tab.4 Error analysis of simulated and measured values					
项目	负压水头/kPa	评价指标	ME	RMSE	NSE
反演	-2	土壤含水率	0.003 7	0.034 9	0.910 8
		累积入渗量	0.09	0.22	0.951 2
		湿润距离	1.09	1.73	0.778 5
验证	-4	土壤含水率	0.019 2	0.047 5	0.831 3
		累积入渗量	0.44	0.62	0.959 5
		湿润距离	1.49	1.46	0.771 3
	-6	土壤含水率	0.003 0	0.021 2	0.964 3
		累积入渗量	0.77	1.04	0.899 5
		湿润距离	2.05	2.32	0.881 1

注:土壤含水率、累积入渗量、湿润距离的 ME、RMSE 单位分别为 cm^3/cm^3 、L 和 cm。

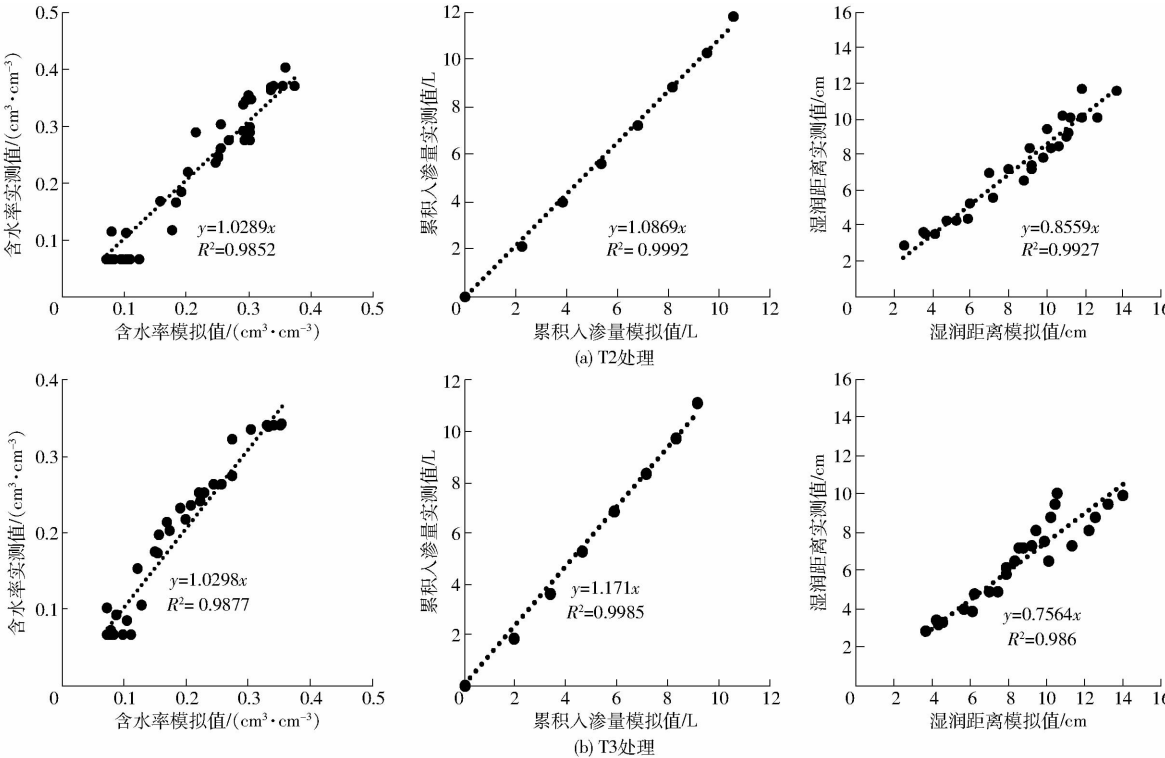


图 4 T2($H = -4$ kPa)和 T3($H = -6$ kPa)处理模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison of simulated and measured values of T2($H = -4$ kPa)and T3($H = -6$ kPa)

2.2 基于 HYDRUS-2D 的负压微润灌模型应用

2.2.1 负压微润灌技术参数范围选择

通过反演模型对不同灌水器饱和导水率(0.000 1~0.005 cm/h)的土壤湿润体特征的模拟结果(图 5,**表示差异极显著)可以看出,灌水器饱和导水率与土壤有效湿润距离(包括水平距离、垂直向上距离和垂直向下距离,下同)之间呈显著的对数关系($p < 0.001$),决定系数均达到 0.99 以上,拟合关系极好。整体上,有效湿润距离随灌水器饱和导水率的增大呈现先快速增加后缓慢增加趋

势,且有效湿润距离在灌水器饱和导水率小于 0.001 4 cm/h 时,距离的斜率变化随灌水器饱和导水率变化较为显著。

另外,通过模拟不同供水水头(−10~−0.1 kPa)条件下的土壤有效湿润特征可以发现(图 5),土壤有效湿润距离随负压水头绝对值的增大而减小,二者之间呈显著的指数关系($p < 0.001$),决定系数达到 0.98 以上。整体上,负压水头绝对值与有效湿润距离之间的决定系数略小于灌水器饱和导水率与有效湿润距离之间的值。

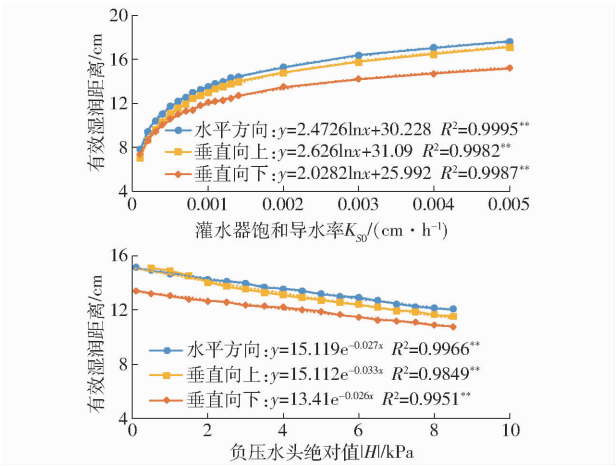


图 5 不同灌水器饱和导水率及供水水头下土壤有效湿润距离变化曲线

Fig. 5 Regularities of soil effective wetting distance under different irrigator hydraulic conductivities and water supply head conditions

2.2.2 不同组合情景负压微润灌土壤有效湿润体特征情景模拟

由模拟结果可得,不同灌水器饱和导水率、供水水头及灌水器埋深组合情景下的土壤湿润体主要呈现 3 种典型湿润体形式(A、B、C 型,图 6),且其明显折线处所对应的土层位置也有所差异,可能是由于不同灌水器埋深对应的临界土层及其上下土层的土壤容重差异所导致的。进一步分析发现 A 型湿润体主要出现在浅层灌水器埋深和高压力水头条件下,即包括灌水器埋深为 5 cm 时的所有供水水头以及灌水器埋深为 10 cm 的高压力水头(−2 kPa)所形成的湿润体。通常情况下,A 型湿润体的主要特点为垂直湿润距离较短(0~20 cm),但由于其在地表的湿润范围较大,往往导致地表蒸散发量大、土壤水分利用效率低。B 型湿润体一般出现在灌水器中等埋深(10~15 cm)和高灌水器饱和导水率条件下,其主要特点是垂向湿润距离较 A 型更大(0~30 cm),最大水平湿润距离出现在灌水器所在位置的同一水平面上,地表湿润范围较 A 型较小,造成地表蒸发少、土壤水分利用效率较 A 型略强。C 型湿润体主要出现在中等灌水器埋深(10~15 cm)和高灌水器饱和导水率条件下、以及深层灌水器埋深(20 cm)的所有的灌水器饱和导水率条件下,其最大垂直湿润距离(0~35 cm)较 A 型和 B 型湿润体有所增大,而地表湿润范围则有所减小,甚至不产生地表湿润,因此,其地表蒸发损失最低,节水效果最好。

2.2.3 基于 HYDRUS-2D 的典型设施作物负压微润灌技术参数筛选

结合 HYDRUS-2D 模型对负压微润灌不同灌

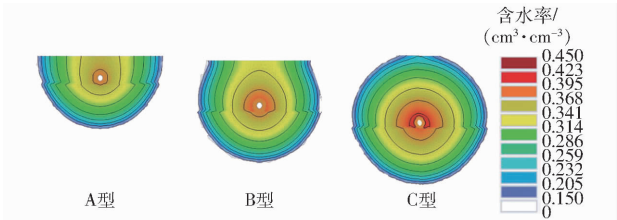


图 6 不同情景模拟下土壤典型湿润体特征

Fig. 6 Typical wetting body characteristics of soil under different scenario simulations

水器参数组合下的土壤湿润体模拟结果,选择 6 种灌水器饱和导水率参数(0.000 2、0.000 4、0.000 8、0.001 4、0.002、0.004 cm/h)、5 种供水压力水头(−2、−4、−6、−8、−10 kPa)和 4 种灌水器埋深(5、10、15、20 cm)进行组合,借助反演模型模拟了 120 种情景组合下土壤湿润体特征。根据典型设施作物根系分布特征(表 5),以土壤湿润体的湿润距离与根系分布层的匹配情况以及生产实践中作物对根区水分的正常需求为判断依据,确定了不同根系设施作物适宜的负压微润灌湿润体特征类型及其对应的技术参数范围(表 6)。

表 5 典型设施作物根系形状和灌溉组合

Tab. 5 Root shape and irrigation mix of typical facility crops

典型作物	香葱	黄瓜	大蒜	菠菜、辣椒	番茄
根系类型	浅须根系	中间须根系	深须根系	浅/中直根系	深直根系
根系形状 ^[24]					
湿润峰类型	A型	B型	C型	A型或B型	C型

由表 5 可以看出,浅须根系作物由于其主要根系分布层较浅、水平根系较宽,因此与 A 型湿润体较为匹配。中间须根系作物由于其主要根系在土壤中层位置的分布较宽,根系垂向范围略大于水平方向范围,因此与 B 型湿润体较为匹配。深须根系和深直根系由于其根系在垂向的分布显著大于水平方向的分布,因此与 C 型湿润体更为匹配。浅直根系由于其存在根系主要分布层较浅、垂向分布显著大于水平分布等特点,因此与 A 型或 B 型均较为匹配。

此外,进一步分析不同设施作物的负压微润灌技术参数推荐范围(表 6)可以看出,由于香葱和菠菜的根系分别属于浅须根系和浅直根系,所以符合 A 型湿润体对应的负压微润灌技术参数范围,即灌水器饱和导水率主要维持在 0.000 2~0.002 cm/h 范围内,供水水头和灌水器埋深范围分别为 −8~

表 6 作物根系分布、生长需水量及其负压微润灌技术参数推荐范围

Tab. 6 Recommended range of technical parameters for crop root distribution, growth water demand and its negative pressure micro-irrigation

作物	深度/cm	宽度/cm	根区需水下限/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$K_{s0}/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	$ H /\text{kPa}$	D/cm
番茄 ^[25]	0 ~ 30	0 ~ 20	15	0.001 4 ~ 0.004	2 ~ 4	15 ~ 20
大蒜 ^[26]	5 ~ 25	15 ~ 30	15	0.001 4 ~ 0.004	2 ~ 4	15 ~ 20
辣椒 ^[27~28]	0 ~ 14	7 ~ 19	15	0.001 4 ~ 0.002	2 ~ 6	5 ~ 10
黄瓜 ^[29~30]	0 ~ 8	6 ~ 8	24	0.000 4 ~ 0.000 8	2 ~ 6	5 ~ 10
香葱 ^[31]	0 ~ 5	3 ~ 5	21	0.000 2 ~ 0.002	4 ~ 8	0 ~ 5
菠菜 ^[32~33]	0 ~ 5	3 ~ 5	21	0.000 2 ~ 0.002	4 ~ 8	0 ~ 5

-4 kPa和0 ~ 5 cm。与香葱和菠菜相比,黄瓜和辣椒的根系属于中间须根系或者中直根系,所以符合B型湿润体对应的负压微润灌技术参数范围,因此其供水水头和灌水器埋深主要维持在-6 ~ -2 kPa和5 ~ 10 cm范围内,但考虑到黄瓜的根系水平和垂直分布范围略小于辣椒,因此其灌水器饱和导水率(0.000 4 ~ 0.000 8 cm/h)较辣椒(0.001 4 ~ 0.002 cm/h)有所减小。对于番茄、大蒜来说,由于其根系垂向深度和水平宽度主要维持在20 cm以上,因此可参考C型湿润体对应的负压微润灌技术参数范围,结合情景参数的设置和模拟结果分析发现,其灌水器饱和导水率和供水水头相对固定,分别为0.001 4 ~ 0.004 cm/h和-4 ~ -2 kPa,灌水器埋深为15 ~ 20 cm。

2.3 讨论

土壤水力特征参数的精确与否决定了模型模拟结果的可靠性。关于土壤水力特征参数及其对模型模拟精度的评价等方面的研究,国内外相关学者已经通过多种方法开展了部分研究工作。例如,ZHANG等^[18]通过研究预测模块、实测土壤持水曲线及模型反演3种方法计算的土壤水力特征参数对模拟结果的可靠性,结果表明采用反演模块计算的土壤水力特征参数值的模拟结果精确最高,且反演后的土壤饱和导水率 K_s 变化最为明显,即0 ~ 21.5 cm和21.5 ~ 70 cm土层的 K_s 分别由35.31、34.88 cm/d增加到176.9、50.72 cm/d。本研究结果表明,基于HYDRUS-2D模型反演模块计算的土壤水力特征参数能够较好地模拟负压微润灌不同供水水头条件下的土壤湿润体特征,且由模型预测(RETC)模块和反演模块计算的土壤饱和导水率 K_s 之间也存在较大差异,这一结果与文献[18]较为相似。此外,本研究还发现,基于实测数据和模型反演得到的土壤0 ~ 16.5 cm和16.5 ~ 45.0 cm土层的 K_s 分别为0.012、0.008 cm/h,与文献[18]中 K_s 结果存在显著差异,这一现象可能是由土壤质地的差异所导致。例如,WANG等^[8]基于实测土壤水力特征曲线

计算得到壤土的 K_s 为0.011 cm/h;毛乾屹等^[34]基于HYDRUS-2D模型率定的砂壤土、壤土和砂土的土壤 K_s 分别为63.01、24.04、81.52 cm/d。

灌溉技术的创新与发展推动了现代农业的进步,基于模型模拟的土壤水分入渗过程能够较好地阐述负压微润灌土壤水分运动特征。以往关于负压微润灌的文献主要基于土箱试验和模型模拟研究了不同供水水头、灌水器埋深对土壤水分迁移特征及作物生长产量的影响^[10],未能将负压微润灌土壤湿润体特征与实际生产中作物根系分布特征及根区需水规律进行有效衔接。且受灌水器参数、供水水头以及土壤质地等因素的影响,在实际应用过程中仍缺乏较为完整的负压微润灌技术参数选择标准,限制了其更广泛的应用。本研究以土壤湿润体有效湿润距离为目标,以土壤湿润体与作物根系匹配情况以及作物根系对水分的需求为筛选依据,确定了典型设施作物适宜的负压微润灌技术参数范围,研究结果对于生产实践过程不同作物负压微润灌参数的选择以及负压微润灌技术的大面积推广应用提供了技术指导。然而,考虑到负压微润灌土壤湿润体的左右对称性,本研究中仅针对右半个陶土灌水器及其在右侧土体的土壤水分入渗过程进行了模拟,且重点研究了以供水水头为变量因子的土壤水分运移特征,考虑到模型模拟过程中仅需考虑的土壤水吸力作用(土壤基质势差值产生)对模型相关参数和模拟结果无较大影响,因此,本研究中确定的负压微润灌技术参数(灌水器饱和导水率、供水水头和灌水器埋深)在由半柱体向全柱体推广过程中具有较好的适用性。然而,若在推广过程中涉及到累积灌水量等参数,其全柱体下的实际灌水量应为基于半柱体模拟灌水量结果的2倍。

此外,在模拟过程中还发现,土壤湿润体垂直向下的湿润距离小于垂直向上和水平方向的湿润距离,这一结果与范严伟等^[35]研究发现的土壤湿润体垂直向上距离小于水平距离和垂直向下距离

等结果并不一致。分析其原因可能为, 本研究中 $0 \sim 16.5 \text{ cm}$ 和 $16.5 \sim 45.0 \text{ cm}$ 土层的土壤容重分别为 1.25 、 1.35 g/cm^3 , 下层较高的土壤容重减小了土壤颗粒间孔隙, 限制了土壤水分的迁移过程, 导致该现象产生^[17]。上述结果意味着分层容重可调控湿润体在不同方向的有效湿润距离, 为今后的负压微润灌发展提供新的研究方向。

本研究通过开展土箱试验, 并结合 HYDRUS-2D 模型模拟的方式实现了对不同负压微润灌技术参数组合(灌水器饱和导水率、供水水头和灌水器埋深)的土壤湿润体的模拟, 获得了相对可靠的结果, 可以在不同负压微润灌技术参数组合下予以应用和验证。但由于本研究局限于土箱试验, 且仅针对单一灌水器 and 特定土壤质地进行了不同负压微润灌技术参数条件下的湿润体特征模拟; 而在田间尺度上还存在多个灌水器、不同质地土壤等情况, 这些均可能导致土壤湿润体模拟结果的差异。因此, 在下一步研究中应结合田间试验与多种质地土壤开展负压微润灌技术参数临界值验证和优化等方面工作。

3 结论

(1) 基于负压微润灌不同供水水头 (-2 、 -4 、 -6 kPa) 处理下的土壤水分特征(土壤含水率、累积水分入渗量和湿润距离) 实测值为依据, 对 HYDRUS-2D 模型进行了反演与验证, 构建了适用于负压微润灌条件下的 HYDRUS-2D 模型, 验证结果表明该模型能够较好地模拟负压微润灌不同供水水头条件下土壤含水率、累积入渗量和湿润距离(水平和垂直方向)的同步变化规律。

(2) 基于反演模型对不同灌水器饱和导水率和负压微润灌供水水头条件下的湿润距离模拟结果表明, 灌水器饱和导水率和供水水头与土壤湿润距离分别呈对数和导数关系, 且其决定系数均达到 0.98 以上, 相关性均达到极显著水平。

(3) 基于反演模型对负压微润灌 120 种技术参数组合(不同灌水器饱和导水率、供水水头以及灌水器埋深)情景的土壤水分模拟结果, 并结合常见设施作物根系分布及其根区需水特征, 确定了不同设施作物适宜的负压微润灌技术参数范围。

参 考 文 献

- [1] 徐俊增, 程衡, 卫琦, 等. 基于饱和和土壤埋深调控的水稻节水灌溉技术研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 345-352.
XU Junzeng, CHENG Heng, WEI Qi, et al. Water-saving irrigation technology of rice based on regulation of depth of saturated soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 345-352. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201039&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.039. (in Chinese)
- [2] 龙怀玉, 武雪萍, 张淑香, 等. 作物主动汲水技术内涵与研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 139-152.
LONG Huaiyu, WU Xueping, ZHANG Shuxiang, et al. Connotation and research progress of crop initiate water drawing technology [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 139-152. (in Chinese)
- [3] GAO X, ZHANG S, ZHAO X, et al. Evaluation of potassium application on tomato performance and rhizosphere bacterial communities under negative pressure irrigation of greenhouse-grown [J]. Journal of Plant Nutrition, 2020, 43(3): 317-326.
- [4] XIAO J, GUO X, GAO X, et al. Effect of negative pressure irrigation on characteristic parameters of wetted soil volume [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(2): 30-32, 36.
- [5] LI Y, WANG L, XUE X, et al. Comparison of drip fertigation and negative pressure fertigation on soil water dynamics and water use efficiency of greenhouse tomato grown in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2017, 184:1-8.
- [6] DIRWAI T L, SENZANJE A, MABHAUDHI T. Moistube irrigation (MTI) discharge under variable evaporative demand [J]. Plos One, 2020, 15(12): e0236211.
- [7] 苏李君, 蔺树栋, 王全九, 等. 土壤水力参数对点源入渗湿润体形状的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 264-274.
SU Lijun, LIN Shudong, WANG Quanjiu, et al. Influence of soil hydraulic parameters on soil wetting pattern shape of point source infiltration [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 264-274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200129&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.029. (in Chinese)
- [8] WANG J, LONG H, HUANG Y, et al. Effects of different irrigation management parameters on cumulative water supply under negative pressure irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2019, 224:105743.
- [9] YANG P, BIAN Y, LONG H, et al. Comparison of emitters of ceramic tube and polyvinyl formal under negative pressure irrigation on soil water use efficiency and nutrient uptake of crown daisy [J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105830.
- [10] XIANG Y, HUANG Y, LONG H, et al. Effects of different negative pressures on the growth and water use efficiency of pepper plants [J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(1): 161-168.
- [11] 牛文全, 张俊, 张琳琳, 等. 埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 128-134.
NIU Wenquan, ZHANG Jun, ZHANG Linlin, et al. Effects of buried depth and pressure head on water movement of wetted soil during moistube-irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 128-134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131221&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.021. (in Chinese)
- [12] 周青云, 李松敏, 孙书洪, 等. 基于 Hydrus-2D 的负压灌溉水分动态模拟[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 133-136.
ZHOU Qingyun, LI Songmin, SUN Shuhong, et al. Simulation of soil water dynamic based on Hydrus-2D under negative pressure irrigation[J]. Yellow River, 2017, 39(8): 133-136. (in Chinese)
- [13] RAMAHI O M, SEYDOU F. A closed form solution of the Helmholtz equation for a class of chaotic resonators[M]. New York: IEEE, 2004.

- [14] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 113-119. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150417&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.017. (in Chinese)
- [15] 范严伟, 邵晓霞, 王英, 等. 垂直线源灌土壤湿润体尺寸预测模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 336-346.
FAN Yanwei, SHAO Xiaoxia, WANG Ying, et al. Empirical model for predicting wetted soil dimensions under vertical line source irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 336-346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181038&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.038. (in Chinese)
- [16] 俞明涛, 张科锋. 基于 HYDRUS-2D 软件的土壤水力特征参数反演及间接地下滴灌的土壤水分运动模拟[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(3): 458-468.
YU Mingtao, ZHANG Kefeng. Identification of soil hydraulic parameters based on HYDRUS-2D software and simulation of soil water movement under indirect subsurface drip irrigation [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(3): 458-468. (in Chinese)
- [17] 夏天, 田军仓. 基于黏粒量的土壤水分特征曲线预测模型[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 9-14.
XIA Tian, TIAN Juncang. Using clay content to estimate soil water characteristic curve [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 9-14. (in Chinese)
- [18] ZHANG Y L, FENG S Y, WANG F X, et al. Simulation of soil water flow and heat transport in drip irrigated potato field with raised beds and full plastic-film mulch in a semiarid area [J]. Agricultural Water Management, 2018, 209(9): 178-187.
- [19] 杨文元, 刘昭, 张玉雪, 等. 确定田块尺度土壤水力参数不同方法的比较研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(4): 1-7.
YANG Wenyu, LIU Zhao, ZHANG Yuxue, et al. Comparison of methods for estimating soil hydraulic parameters at field scale [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(4): 1-7. (in Chinese)
- [20] SAKAGUCHI A, YANAI Y, SASAKI H. Subsurface irrigation system design for vegetable production using HYDRUS-2D [J]. Agricultural Water Management, 2019, 219(18): 12-18.
- [21] CHEN N, LI X, SIMUNEK J, et al. Evaluating the effects of biodegradable film mulching on soil water dynamics in a drip-irrigated field [J]. Agricultural Water Management, 2019, 226: 105788.
- [22] SIYAL A A, SKAGGS T H. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 893-904.
- [23] KARIMOV A K, HANJRA M A, SIMUNEK J, et al. Can a change in cropping patterns produce water savings and social gains: a case study from the Fergana Valley, Central Asia [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2018, 66(2): 189-201.
- [24] 严小龙. 根系生物学原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [25] 张军. 番茄根系分布与土壤水分变化区域间的关系研究[D]. 咸阳: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.
ZHANG Jun. Research on relationship between tomato roots distribution and soil water variation area [D]. Xianyang: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education), 2015. (in Chinese)
- [26] 刘静. 不同大蒜品种及鳞芽播种朝向对生长特性与品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
LIU Jing. Effects of different garlic varieties and bulbil seeding directions on growth characteristic and quality [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [27] 周佳, 黄秀芬, 谷守宽, 等. 两种土壤改良剂对辣椒生长和产量的影响试验初报[J]. 南方农业, 2020, 14(7): 15-17.
ZHOU Jia, HUANG Xiufen, GU Shoukuan, et al. Preliminary report on the effects of two soil modifiers on pepper growth and yield [J]. South China Agriculture, 2020, 14(7): 15-17. (in Chinese)
- [28] 马甜, 郭睿, 范兴科, 等. 苗期土壤水分控制对线辣椒生长和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 119-121.
MA Tian, GUO Rui, FAN Xingke, et al. Effect of soil moisture deficit at capsicum (*Capsicum annuum* L.) seedling stage on its growth and water use efficiency [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(3): 119-121. (in Chinese)
- [29] 毛丽萍, 赵婧, 仪泽会, 等. 水分亏缺和栽培模式对设施黄瓜根系分布的影响[J]. 北方园艺, 2020(8): 38-43.
MAO Liping, ZHAO Jing, YI Zehui, et al. Effects of water deficit and cultivation mode on the distribution of cucumber root system [J]. Northern Horticulture, 2020(8): 38-43. (in Chinese)
- [30] 郑志伟, 王仰仁, 汪绍盛, 等. 温室膜下滴灌条件下黄瓜经济灌溉制度及其下限值的研究[J]. 节水灌溉, 2016(7): 36-39, 43.
ZHENG Zhiwei, WANG Yangren, WANG Shaosheng, et al. Research on cucumber economical irrigation schedule and irrigation low limit with drip irrigation under plastic mulch in greenhouse [J]. Water Saving Irrigation, 2016(7): 36-39, 43. (in Chinese)
- [31] 段红菊. 祥云县香葱高产栽培技术[J]. 云南农业科技, 2012(1): 31-32.
DUAN Hongju. High-yielding cultivation technology of parsnip in Xiangyun County [J]. Yunnan Agricultural Science and Technology, 2012(1): 31-32. (in Chinese)
- [32] 张黎明, 王栋, 金小平, 等. 南方气候区冬菠菜需水量分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(4): 1516-1517, 1525.
ZHANG Liming, WANG Dong, JIN Xiaoping, et al. Study on water requirement of the winter spinach in the southern climatic region [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(4): 1516-1517, 1525. (in Chinese)
- [33] 郭淑霞. 番茄和菠菜生长对盐分胁迫和氮素的响应[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
GUO Shuxia. Response of tomato and spinach growth salt stress and nitrogen [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [34] 毛乾屹, 刘环玉. 基于 Hydrus-2D 模型的膜下滴灌对降雨入渗影响研究[J]. 水资源开发与管理, 2018(9): 55-60.
MAO Qianyi, LIU Huanyu. Research on the influence of drip irrigation under film on rainfall infiltration based on Hydrus-2D model [J]. Water Resources Development and Management, 2018(9): 55-60. (in Chinese)
- [35] 范严伟, 赵彤, 白贵林, 等. 水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D 模拟及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 115-124.
FAN Yanwei, ZHAO Tong, BAI Guilin, et al. HYDRUS-2D simulation of soil wetting pattern with horizontal moistube-irrigation and analysis of its influencing factors [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 115-124. (in Chinese)