

微润灌多重变水头下土壤水分动态演变与数值模拟

王 策¹ 叶津阳¹ 邢 栋² 许 瑞¹ 滕梓灵¹ 陈婧莹¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100; 2. 中水淮河规划设计研究有限公司, 合肥 230601)

摘要: 为研究水头多重调控下微润管出流与土壤水分运移规律,进行了不同水头调控模式下微润灌入渗试验,设置调增(0→1 m(水头由0 m调节到1 m,以下类推)、0→2 m、1→2 m)和调减水头(1→0 m、2→0 m、2→1 m),研究微润管出流、湿润体及含水率变化规律;将微润管假定为多孔介质重黏土,利用 HYDRUS 2D 模型对水头多重调控下微润管出流和土壤水分运移进行了模拟,据此分析了多重变水头情景下微润灌土壤水分动态规律。结果表明,水头调节显著改变累积入渗量、入渗率与时间关系曲线,累积入渗量曲线呈折线型,曲线斜率随着调增或调减而有规律增减;水头调节导致入渗率发生骤增或骤降,稳定入渗率与水头存在线性正相关关系。调增水头时湿润锋内含水率骤升,正向反馈显著;水头调减后管周含水率微弱下降后逐渐回升。将微润管模拟为质地黏重的多孔介质,基于 HYDRUS 2D 模型较好地模拟了微润管出流及水分运移,优度较好(决定系数 $R^2 \geq 0.90$,纳什效率系数(NSE)大于等于0.70,相对标准偏差(RSR)趋近于0)。构建了多重水头调控模式(0→1→2 m、0→2→1 m、1→0→2 m、1→2→0 m、2→0→1 m、2→1→0 m),分析了多情景下微润灌土壤水分动态规律,发现水头调增后入渗率随时间呈现“指数减小后稳定”规律,而调减后入渗率表现为“指数增加后稳定”;连续调增0→1→2 m方案下,最终累积入渗量最大;连续调减下(2→1→0 m)累积入渗量较调增方案降低3.7%,可通过调控水头控制湿润锋推移和湿润体内含水率分布,且微润管附近含水率对水头调控响应更为显著。研究可为微润灌动态水头调控提供科学依据,并与智慧灌溉相融合实时调控水头,适量地补给作物需水并维系根区适宜水分环境,实现精准灌溉。

关键词: 微润灌溉; 工作水头; 动态调控; 土壤水分运移; 湿润锋

中图分类号: S274.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)11-0306-13

OSID:



Mechanisms of Soil Water Dynamics in Moistube Irrigation under Regulated Multiple-variable Working Pressure Heads and Corresponding Simulation

WANG Ce¹ YE Jinyang¹ XING Dong² XU Rui¹ TENG Ziling¹ CHEN Jingying¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

2. China Water Huaihe Planning Design and Research Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: Moistube continuously fertigrates the crop-root zone through the nano pores on the Moistube, as required by the crop water demands. To investigate the Moistube discharge and water movement, a series of Moistube irrigation experiments was conducted under different regulated working pressure heads (WPH) in Moistube. The scenarios of WPH increase (0→1 m, 0→2 m and 1→2 m) and WPH decrease (1→0 m, 2→0 m and 2→1 m) adjustments were designed. The Moistube discharge, wetting front advance and soil water dynamics were studied. The HYDRUS 2D model was used to simulate the Moistube discharge and soil moisture transport under regulated WPH, by assuming the Moistube as a porous medium clay. After the model performance was validated, the soil moisture dynamics of moistube irrigation under scenarios of multiple WPH adjustments were analyzed accordingly. The results showed that regulation of WPH significantly changed the cumulative infiltration volume and infiltration rate with respect to time. The curve of cumulative infiltration with time was manifested as a fold line comprising of two interaction lines. The slope of lines was increased or decreased regularly with WPH adjustment.

收稿日期: 2023-05-08 修回日期: 2023-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109053)、国家科技奖后备培育项目(20212AEI91011)、江苏省自然科学基金项目(BK20200523)、江西省水利科学院开放基金项目(2021SKTR03)、中国博士后科学基金项目(2021M690874)和江西省科技+水利联合项目(2023KSG01002)

作者简介: 王策(1989—),男,教授,博士,主要从事节水灌溉理论及技术和微润灌节水提质增效研究,E-mail: wangce@hhu.edu.cn

WPH adjustments gave rise to sudden increases or decreases in infiltration rate, and the stabilized infiltration rate was linearly correlated with the adjusted WPH. With increase of WPH, the moisture content within the wetting front was sharply risen, displaying significantly positive feedback. When the WPH was decreased, the water content around the Moistube was slightly decreased, and then rose gradually as the moisture redistributed. The Moistube was treated as a clay porous medium, and the Moistube discharge and water flow transport was well simulated based on the HYDRUS 2D model. The model performances were rated as ‘good’, with coefficient of determination (R^2) greater than 0.90, the Nash – Sutcliffe efficiency (NSE) was not less than 0.70 and RSR approached 0. Multiple WPH regulation scenarios (0→1→2 m, 0→2→1 m, 1→0→2 m, 1→2→0 m, 2→0→1 m and 2→1→0 m) were formulated. The soil-water dynamics around the Moistube under all scenarios were analyzed. It was found that the infiltration rate showed exponentially decreasing and subsequent stabilizing trend with respect to time after the WPH was increased. However, following a decrease in WPH, the infiltration rate showed an exponential increase followed by stabilization. The final cumulative infiltration volume was maximum under the consecutive incremental WPH scenario (for instance, 0→1→2 m); and the consecutive decremental WPH scenario (2→1→0 m) resulted in a minimum cumulative infiltration, which was reduced by 3.7% compared with the 0→1→2 m treatment. It was feasible to regulate the wetting front advance and the moisture condition within the wetting front by adjusting WPH. The moisture condition around the Moistube was more sensitive in response to the regulation of WPH. The results provided scientific and theoretical basis for dynamically regulating the working pressure head of Moistube. The Moistube irrigation technique could also be integrated with intelligent irrigation by automatically adjusting the WPH, in order to maintain an appropriate water environment within the root zone and to conduct precise irrigation.

Key words: Moistube irrigation; working pressure head; dynamic regulation; soil water movement; wetting front

0 引言

随着世界人口膨胀和经济发展,人均水资源用量不断减少。我国农业用水约占淡水总用水量的 61.5%,水资源供需矛盾日益突出。发展新型绿色节水技术,对于提高水分生产效率、缓解农业用水矛盾具有显著意义^[1-3]。兼顾作物产量-品质的双重需求,高度关注品质发展,是农业水土及节水灌溉未来发展方向^[4]。微润灌溉是近年来研发的地理、线源、地下灌溉技术,具有节水节能减排、技术系统简单、精准高效等优势,该技术不仅可以适时、适量补给作物需水,还具有与智慧灌溉融合的优势^[5-6]。

微润管材料是高分子聚合物半透膜,其在管内工作水头和管外土壤基质吸力共同驱动下,将灌溉水肥溶液输送至作物吸水根区,实现精准灌溉^[7]。整个微润带作为灌水器,分布有密集的灌水微孔,每平方厘米纳米孔数量约为 10^5 个,纳米孔直径为 10 ~ 900 nm。试验测得,微润管单位出流量通常不大于 $50 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,生产商推荐工作水头应小于 10 m。灌溉期间土壤湿润体形态决定了作物水分利用效能和根系生长特性,精准量化微润管出流及其湿润体特征,对于设计微润灌溉技术参数具有指导意义^[8]。影响微润灌溉技术参数的指标包括土壤内因,例如土壤质地、容重和导水特性^[7,9],以及微润

灌溉外因,包括微润管工作水头、埋深和布局、间距等^[10]。研究表明,微润灌溉湿润体内含水率保持在田间持水率的 90% 左右,湿润体内含水率均匀度较高^[11-12]。微润灌溉在砂质土和黏质土中湿润体形态分别呈倒梨形和圆形,质地影响下的土壤持水能力显著改变湿润体特征。微润管出流量随工作水头增加而增大,与微润管埋深则呈负相关关系^[13]。然而在设计埋深时,并非单根据流量择优选择埋深参数,而应适宜地匹配作物需水量及其根系分布规律,从而提高根系层对灌溉水的汲取效率。工作压力是决定微润管出流、湿润锋形态和含水率分布的重要参数,提高工作水头可有效增加微润管出流,促进湿润锋推移,提升湿润体内含水率均值^[14-15]。QI 等^[7] 试验测定并数值模拟了工作水头对微润管出流能力的影响,发现增加工作水头可扩大微润管内、外压差,从而促进微润管出流速率和湿润体面积。微润管工作压力水头并非一定是正值,WANG 等^[16] 开发了一种负压微润灌溉装置,用以精准连续调节负压水头,从而维持理想的湿润锋形态。针对地下滴灌,过高的水头导致灌水器出流量大于土壤导水和扩散能力,从而产生“Back pressure”现象,在灌水器外形成正压,从而抑制出流^[17]。此外,过高的工作水头或出流速率亦可造成土壤团聚体结构破坏,进而堵塞灌水器。

针对微润灌溉水分运移规律研究与模型,主要从原位试验、数值模拟和物理模型等方面展开^[11,18-19]。依据试验和模拟相互补充从而验证模型有效性,并基于模拟模型设置灌溉情景,进行水分运移预测或设计参数优化。在物理模型方面,WANG等^[5]提出了一种基于极坐标 Green - Ampt 模型,用于描述微润管累积入渗量、入渗率和湿润锋推移的半经验半物理模型,模型优度较高;在数值模拟方面,利用 HYDRUS 2D 软件可有效、精准地模拟微润灌溉土壤水分运移过程,并可用于技术参数对湿润体影响的分析和评测^[7]。

目前,微润灌溉研究主要采用蒸渗仪试验和数值模拟相结合的方法,探索不同埋深和初始含水率下的微润灌溉湿润体形态及其含水率特征。针对不同气象条件和作物生育期,微润灌溉需适时调节工作水头,从而满足作物蒸腾蒸发需求,并避免地表无效蒸发和深层渗漏,维持作物根区水分最优状态。由于微润灌溉工作水头处于低压状态,水头调节操作方便。因此,微润管水头调节与智慧灌溉融合技术具有广阔的前景,形成智慧灌溉水头调控模式,从而适时、适量补给根区水分。目前,微润管出流机理、湿润锋推移规律及湿润体内含水率分布,对于动态调控水头的响应过程尚不清晰,相关模型亟需构建。本文以多重变工作水头调控下的微润灌溉机理为研究对象,研究微润灌湿润体、微润管出流和微润管周含水率分布对于变工作水头调控的响应,采用 HYDRUS 2D 数值模拟变水头下微润管累积入渗量、入渗率及土壤含水率演化特性,评价模型优度及其可靠性,设置多重水头调控情景模式,探索微润灌溉变水头调控下土壤水分动态演化机理。

1 材料与方法

1.1 变水头调控微润灌试验

1.1.1 供试土壤属性

基于微润灌试验探索变水头调控下微润管出

流特征、湿润锋演化、湿润体内含水率变化规律。该试验于2022年9—11月在河海大学农业工程实验中心进行,土壤试样取自河海大学节水园区稻麦轮作大田0~20 cm表土层。供试土壤隶属长江中下游黏棕壤,总孔隙率约为51.2%,试验区年均蒸发量为900 mm,年均降雨量约为1 106 mm,年均日照时长为2 017.2 h。表层土壤经旋耕后过5 mm筛,除去土壤中腐解根系、砂砾石等杂质,在自然通风条件下风干后备用。土壤机械组成采用 Bettersize 2000 型激光粒度仪测定。土壤物理水力参数如表1所示。

表 1 微润灌试验中供试土样土壤物理-水力特征	
Tab.1 Physical - hydraulic properties of tested soil	
参数	数值
干容重/(g·cm ⁻³)	1.30
土壤颗粒密度/(g·cm ⁻³)	2.62
初始体积含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	6.0
饱和体积含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	50.4
砂粒(粒径大于等于0.02 mm)质量分数/%	38.1
粉粒(粒径0.002~0.02 mm)质量分数/%	36.3
黏粒(粒径0~0.002 mm)质量分数/%	25.6
饱和导水率/(cm·h ⁻¹)	0.979

1.1.2 试验步骤及变水头调控试验处理

微润灌试验在恒温、恒湿的室内进行,以消除外界温度差异对微润管出流的影响。微润灌试验装置系统如图1a所示,包括微润灌土箱、可调节工作水头的马氏瓶、时域反射仪(TDR 土壤水分/水势监测系统)、CCD摄影机与数码相机、计算机。其中,试验土箱由亚克力板制成,尺寸(长×宽×高)为60 cm×30 cm×70 cm。土箱前侧用于拍照监测湿润锋形态,后侧打孔采用TDR监测土壤含水率(图1b),孔径为1 cm,间距为5 cm,微润管平行于宽度方向布置,埋设于土壤表层深度以下20 cm。微润管采用深圳市微润灌溉技术有限公司生产的第3代微润管,管径1.5 cm,微润管壁厚度为1 mm,每

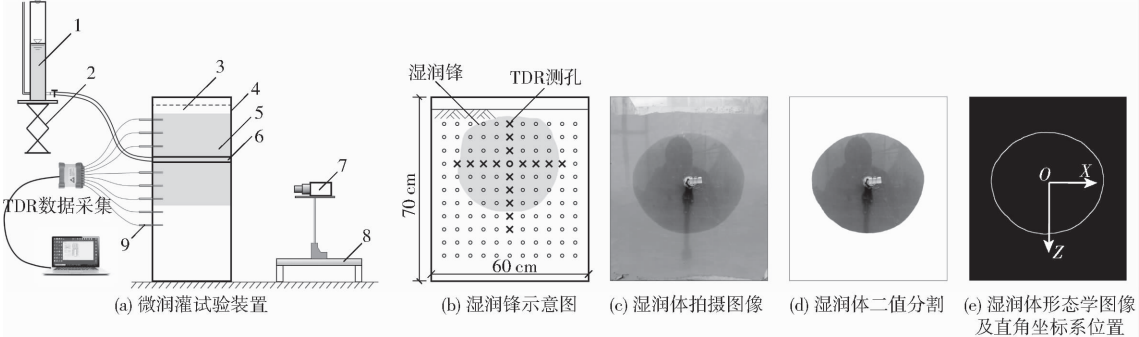


图 1 微润灌装置及湿润体图像处理示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of Moistube irrigation system and wetting body image processing

1. 马氏瓶 2. 水头调节装置 3. 土壤试样 4. 有机玻璃蒸渗仪 5. 湿润体 6. 微润管 7. 数码相机 8. 滑动杆 9. TDR 探针

平方厘米微润管上分布纳米孔约 10 000 个。微润管连接马氏瓶供水,可通过调整马氏瓶高度的方法,对微润管进行工作水头调控。

微润灌持续时间设定为 160 h,微润灌调控水头处理分别为:调增工作水头 0→1 m(0 m 调节到 1 m,其他类推)、0→2 m、1→2 m,处理编号设为 INC(0→1)、INC(0→2)、INC(1→2);调减工作水头 1→0 m、2→0 m、2→1 m,处理编号设为 DEC(1→0)、DEC(2→0)、DEC(2→1),每个处理设置 3 次重复,分别表示为 R1、R2 和 R3。微润管工作水头调整时间节点设定为 72 h 左右,可通过调整马氏瓶高度瞬间完成。在微润灌过程中,采用数码相机对湿润锋进行监测记录;通过监测马氏瓶读数,推算微润管累积入渗量和入渗率,探求变水头调控下微润管出流机理;在纵向相对于微润管 -15、-10、-5、5、10、15、20、25 cm 位置,埋设 TDR 探针连续监测土壤体积含水率,其中前 12 h 设定每隔 2 h 监测一次,在 12 ~ 160 h 每隔 4 h 监测一次。

1.1.3 湿润体图像处理与参数提取

采用数字图像处理与形态学算法对湿润锋进行提取和参数计算。步骤如下:采用 Photoshop 6.0 截取研究区域图像(尺寸 60 cm×60 cm),并将湿润体图像重置为 6 000 像素×6 000 像素。因湿润锋与土壤干燥区存在显著的颜色深度差异,因此可采用灰度化和灰阶分割的方法,根据颜色深度将图像分割为湿润体图像(1 值区域)和干燥土壤区图像(0 值区域)。将湿润体二值图像导入 Matlab R2018a,基于 Matlab 数字图像处理模块,计算湿润体相关参数。图像处理过程如图 1c~1e 所示。微润灌入渗特征监测数据包括:单位宽度累积入渗量(I , cm^3/cm)和入渗率(q , $\text{cm}^3/(\text{cm}\cdot\text{h})$),TDR 记录土壤不同层深处体积含水率及其随时间演化规律。

1.2 微润灌溉 HYDRUS 2D 数值模型

1.2.1 土壤水分运动 Richards 模型

微润灌隶属线源灌溉方法,管壁出流缓慢,管中水流沿管长度方向流速微小,同时该研究中试验所用管长度仅为 30 cm,因此,沿管方向水流的沿程与局部水头损失较小,故可假设微润灌出水通量与水头沿管方向均匀分布。可将微润灌溉线源水分运移

问题简化为垂直于微润灌溉线源的二维水分运移问题,假定土壤均质且各向同性(各方向水力-物理性质相一致)。在直角坐标系下构建微润灌土壤水分运动 Richards 二维物理模型,表示为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}$$

(1)

式中 θ ——土壤体积含水率, cm^3/cm^3
 ψ_m ——土壤基质势, cm
 t ——微润灌入渗时间, h
 $K(\theta)$ ——土壤变饱和导水率, cm/h
 x, z ——空间水平坐标和竖直坐标, cm

设定向下为正。

土壤持水特征曲线和变饱和导水率拟采用经典的 VG-Mualem 模型进行描述,即

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

(2)

$$K(\theta) = K_s S_e^L [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m]^2$$

(3)

其中

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

(4)

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

(5)

式中 θ_s ——土壤饱和体积含水率, cm^3/cm^3
 θ_r ——土壤残余体积含水率, cm^3/cm^3
 α, m, n ——土壤持水-导水特征参数,其中 α 为进气值的倒数, cm^{-1}
 n ——与孔径分布相关的经验参数
 K_s ——饱和导水率, cm/h
 S_e ——有效饱和度
 L ——孔隙连通性相关参数,取 0.5

1.2.2 数值模拟土壤物理水力参数设定

通过 HYDRUS 2D 软件内嵌的神经网络预测模块(RETC),输入土壤机械组成各分量砂粒、粉粒、黏粒含量,以及土壤干容重等物理参数,可输出 van-Genuchten 模型参数,依据实测的土壤水力参数(例如饱和导水率 K_s),率定输入软件的水力-物理参数。供试土壤水力特征参数见表 2。

表 2 供试土壤试样与微润管介质的 VG-Mualem 模型水力特征参数
Tab.2 Hydraulic parameters of tested soil and Moistube based on VG-Mualem model

参数	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	α/cm^{-1}	n	L	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{h}^{-1})$
土壤	0.045	0.504	0.026	1.51	0.5	0.979 0
微润管	0.010	0.300	6.00×10^{-10}	1.10	0.5	0.001 3

1.2.3 计算区域、初始和边界条件设定

采用 HYDRUS 2D 软件中几何定义模块构建研

究区域,图 2 为模拟微润管及土壤区域示意图。根据土壤水分入渗试验装置及土壤研究区,同时考虑

微润管入渗对称性特征,可将研究区域定义为高 60 cm、宽 30 cm 的矩形区域。其中,微润管内径为 1.5 cm、外径为 1.7 cm,取对称半圆环作为水头调控边界,埋深基于试验设置为 20 cm。由于微润管附近水势梯度变化较大,因此增大圆环内部及附近区域有限单元网格密度,设置有限元目标尺寸 $T_s = 0.17\text{ cm}$,其他区域 $T_s = 1.7\text{ cm}$,形成左密右疏的有限元划分模式。土壤干容重为 1.30 g/cm^3 ,实测土壤初始质量含水率为 0.046 g/g ,换算为体积含水率约 $0.060\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。微润灌过程中,上边界设定为大气边界,不考虑蒸发的影响(可忽略不计),下边界设置为自由出流边界,微润管内壁为变水头边界,左边界的非微润管区域为对称边界,通量设置为零,右边界为亚克力板不透水边界,同样设为零通量边界。

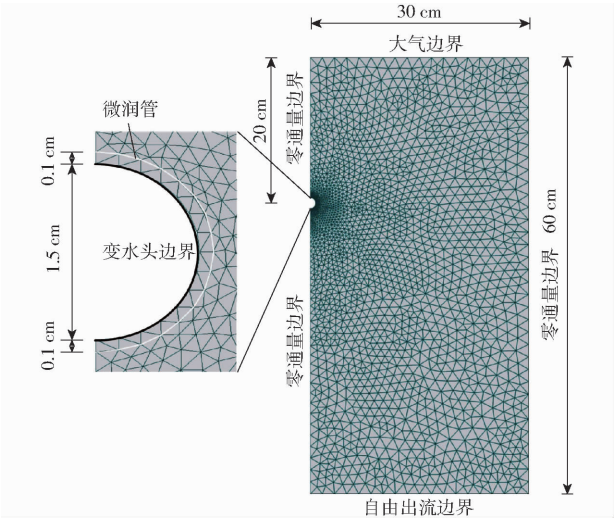


图2 微润灌研究区域数值模拟图

Fig.2 Diagrammatic sketch of Moistube domain and soil matrix domain during simulation

1.2.4 微润管水力参数

将微润管假定作为一种质地黏重的黏土材料(黏土尺寸:内径 1.5 cm,管壁厚度 0.1 cm)。CAI 等^[20]采用数值法模拟陶瓷灌溉时,发现可将陶瓷灌水器假定作为一种黏性土壤,且该种陶瓷黏土的饱和含水率和残余含水率参数对模拟结果来说为非敏感因素。借鉴上述思路,本研究中微润管介质的饱和含水率 θ_s 和残余含水率 θ_r ,根据经验可赋值为 0.30、0.01 cm^3/cm^3 ,因微润管壁厚度较小,充水后极易饱和,故参数值 α 可取较小值,为 $6.0 \times 10^{-10}\text{ cm}^{-1}$ 。根据 VG-Mualem 模型可知,参数 n 决定了持水特征曲线拐点位置及曲线形态,微润管为纳米管材料,其孔隙持水能力较强,因此可取 n 为 1.10。微润管介质的水力参数见表 2;各调增/调减水头处理和水头调控时间等参数见表 3。

表3 动态水头调控试验方案中的水头调增或调减工况处理
Tab.3 Scenarios, number denotations and adjustment time points for all treatments of regulated working pressure heads

处理	重复组 编号	水头调节 时间/h	初始水头/ m	调节后水 头/m
INC(0→1)	R1	72	0	1
	R2	92		
	R3	83		
INC(0→2)	R1	72	0	2
	R2	90		
	R3	114		
INC(1→2)	R1	72	1	2
	R2	72		
	R3	120		
DEC(1→0)	R1	72	1	0
	R2	72		
	R3	73		
DEC(2→0)	R1	72	2	0
	R2	72		
	R3	72		
DEC(2→1)	R1	73	2	1
	R2	71		
	R3	72		

1.2.5 多重水头调控情景下微润管水分动态演化数值模拟

在微润灌溉工作水头动态调控的实践应用中,可根据作物需水量和气象数据推算工作水头调控模式,其工作水头在作物生育期可设定为动态变化的。在微润灌溉 HYDRUS 2D 模型模拟得以充分验证后,拟针对变水头调控下土壤水分运移规律进行应用分析,探索多重水头调控情景下微润管出流特征、湿润锋形态及湿润体内含水率变化。拟设定 6 组水头调控情景,分别为 0→1→2 m、0→2→1 m、1→0→2 m、1→2→0 m、2→0→1 m 和 2→1→0 m,其中 0、1、2 表示工作水头,→表示调节过程。调控处理 0→1→2 m 中,0→1→2 指微润管内水头在第 48 小时由 0 m 调节至 1 m,在第 96 小时由 1 m 再调节至 2 m;其他情景模拟编号同理,调控方案见表 4。情景模拟中土壤研究区域及水力参数与 1.2.2 节和 1.2.3 节相同。

1.3 模型优度评价

采用决定系数(Coefficient of determination, R^2)、纳什效率系数(Nash - Sutcliffe efficiency, NSE)和相对标准偏差(RMSE-observation standard deviation ratio, RSR)评价数值模拟模型优度,揭示试验测定和数值模拟的一致性。其中, R^2 和 NSE 越接近于 1,RSR 越接近于 0,则模型优度越高。各参数的模型优度评价方案如表 5 所示。

表 4 微润灌水头调控情景模拟方案

Tab.4 Scenarios of regulated working pressure heads for simulations of Moistube irrigation

情景	初始	调节	初次	调节	再次	灌溉 结束
	工作	时间	调节水	时间	调节	
	水头/m	点/h	头/m	点/h	水头/m	时间/h
0→1→2 m	0		1		2	
0→2→1 m	0		2		1	
1→0→2 m	1	48	0	96	2	144
1→2→0 m	1		2		0	
2→0→1 m	2		0		1	
2→1→0 m	2		1		0	

表 5 模型参数评价方案

Tab.5 Criteria for model performance

评价	R^2	NSE	RSR
极好	(0.70, 1.0]	(0.75, 1.00]	(0, 0.50]
较好	(0.60, 0.70]	(0.65, 0.75]	(0.50, 0.60]
满意	(0.50, 0.60]	(0.50, 0.65]	(0.60, 0.70]
不满意	≤ 0.50	≤ 0.50	> 0.70

2 结果与分析

2.1 变水头调控下微润灌土壤水分运移与模拟

恒定水头下的微润管出流速率与工作水头呈显著正相关关系^[21]；然而，作物需水规律随生育期是逐渐变化的，需探讨恒定水头下的微润管是否能够充分补给需水临界期作物腾发量。针对变调控水头下微润灌进行了试验和数值模拟，其累积入渗量和入渗率实测值和模拟值分别如图 3 和图 4 所示。结

果表明，累积入渗量随时间呈现线性变化趋势，入渗规律与其他灌溉方法差异较大，例如薄层定水头入渗下的重力灌溉，其累积入渗量规律呈迅速增加后稳定增长的趋势，而微润灌累积入渗量迅速跳过指数增加阶段，呈匀速增长趋势。分析变调控水头下累积入渗量可知，调增或调减下的累积入渗曲线斜率在水头调节点发生明显变化，呈现不同斜率直线相交的模式。该现象亦说明，调增或调减后的累积入渗量同样跳过指数变化阶段。为错开试验高峰，各重复组试验未能精准控制在第 72 小时调控水头；然而，该操作发现，水头调节后微润管累积入渗量变化趋势与水头调整时的初始含水率无显著相关关系。其证据在于，不同重复组（例如 R1、R2 和 R3）的调控时间存在差异，然而调增或调减后累积入渗量曲线几乎平行，说明相同工作水头下累积入渗量或入渗率变化趋势较为相似；此外，INC(0→2)与 INC(1→2)处理组的后半段，累积入渗量曲线几乎平行，进一步验证了上述结论。

变水头调控下的微润管出流流量随时间变化曲线如图 4 所示。水头调增或调减前，入渗率或微润管出流流量随时间呈现微弱减小趋势，该趋势相对于入渗率可忽略不计。当微润管水头调增或调减后，入渗率在调节点呈现骤增或骤减趋势，无明显入渗缓冲阶段。由图 5 可知，不同工作水头下的平均入渗率在既定工作水头下几乎为恒定值，入渗率与工作水头存在显著线性正相关（图 6），与调控模式（调增或调减）和调控时间点（72、83、92 h 等）并无

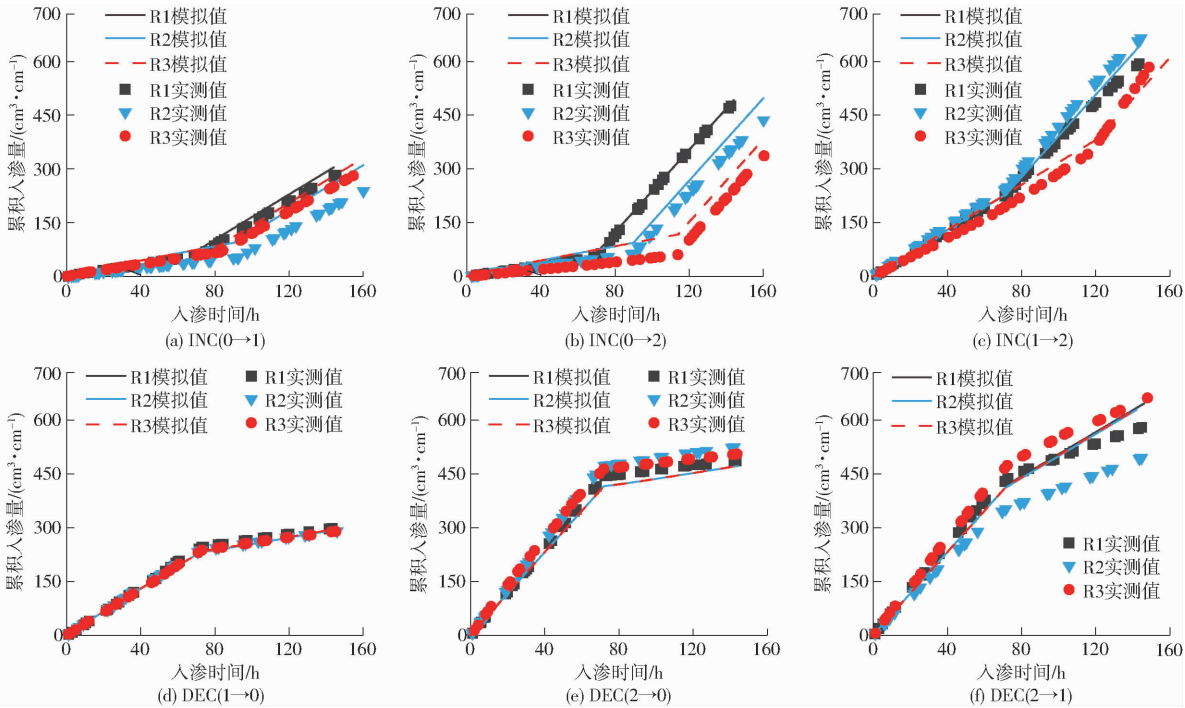


图 3 变调控水头下微润灌累积入渗量实测值和模拟值

Fig.3 Observed and simulated cumulative infiltration volume under regulated working pressure heads in Moistube irrigation

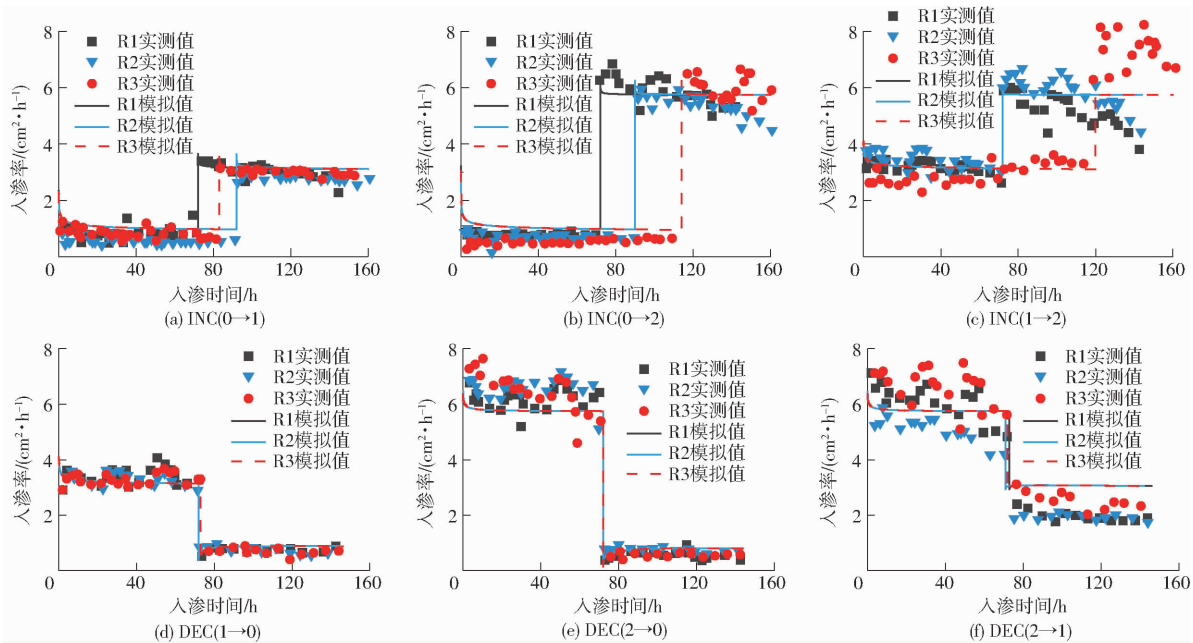


图4 变调控水头下微润灌入渗率实测值和模拟值

Fig.4 Observed and simulated infiltration rate under regulated dynamic working pressure heads in Moistube irrigation

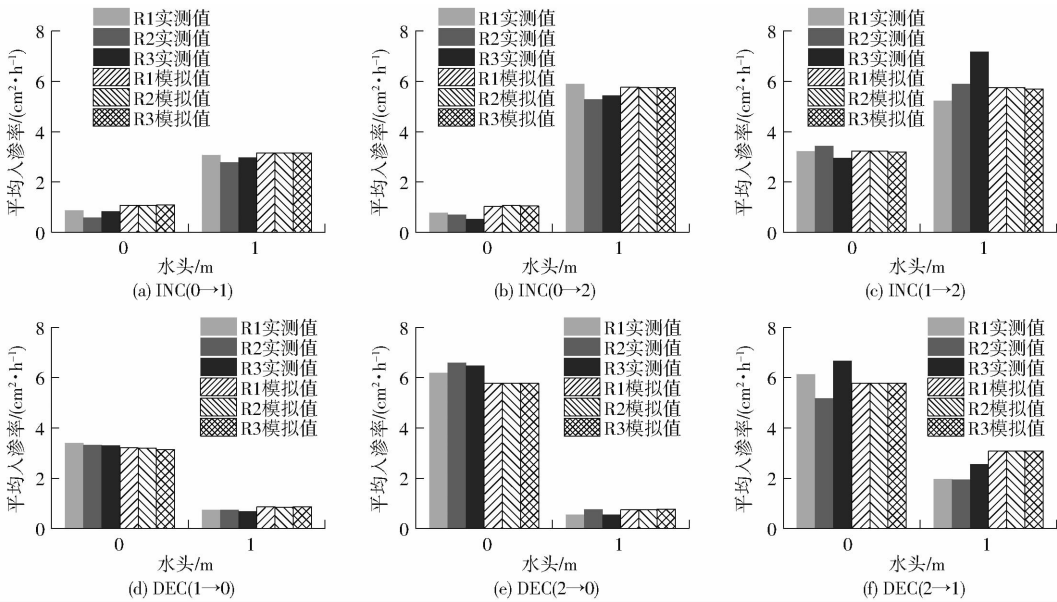


图5 微润灌各调控模式下平均入渗率的实测值和模拟值

Fig.5 Observed and simulated mean infiltration rate under treatments of regulated working pressure heads for Moistube irrigation

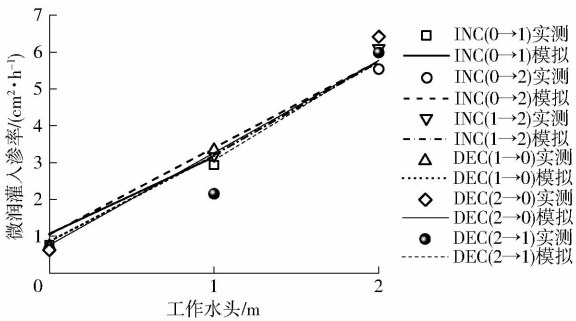


图6 各调控模式下微润灌入渗率实测值、模拟值和工作水头的关系曲线

Fig.6 Relations between observed or simulated infiltration rate and working pressure head under all regulated scenarios

明显关系。该现象说明,工作水头是决定微润管出流规律的敏感性参数。由模拟可知,微润管作为多孔介质材料,在入渗过程中几乎饱和;此时,入渗率与微润管导水属性、管周土壤水分扩散能力或土壤质地有关,该试验揭示了微润管出流特征或出流工况与工作水头的显著相关性。

恒定水头下微润灌水分运移模拟精度较好^[22],然而变水头调控下微润灌初始与边界条件多变且复杂,需进一步探索能否将微润管模拟为黏土多孔介质进行 HYDRUS 模拟。分析变水头调控下模拟入渗率和累积入渗量可知,实测和模拟的累积入渗量和入渗率的模型优度较好(表6),模型评价参数 R^2

和 NSE 均趋近于 1,RSR 趋近于 0,表明试验实测值与 HYDRUS 数值模拟值吻合较好。因此,微润管作为黏土材料模拟水分运移是合理可行的,采用 HYDRUS 2D 预测土壤水分运移是可靠的。然而,针对 INC(0→1)处理中的 R2 重复组,INC(1→2)处理中的 R1 和 R3 重复组,以及 DEC(2→1)处理中的 R2、R3 重复组,入渗模拟评价指标 NSE 偏小,但 R^2 较大,反映了模拟和实测结果趋势相一致,但数值存在差异性。该现象可解释为:①试样重塑过程中土壤水力特征的异质性,数值模拟时设置的土壤水力参数与试验土壤参数存在差异。②微润管试验中马氏瓶读数和数据监测或存在误差,尤其针对 DEC(2→1)处理的 3 个重复组,绘制入渗率和工作水头曲线后(图 6),DEC(2→1)处理组数据偏差较为显著。

表 6 微润灌累积入渗量和入渗率 HYDRUS 数值模拟
优度评价

Tab.6 Model performances of HYDRUS-simulated
cumulative infiltration and infiltration rate under
Moistube irrigation

处理	重复组	累积入渗量			入渗率		
		R^2	NSE	RSR	R^2	NSE	RSR
INC(0→1)	R1	0.99	0.97	0.026	0.96	0.94	0.039
	R2	0.99	0.74	0.069	0.98	0.82	0.058
	R3	0.99	0.95	0.030	0.98	0.94	0.034
INC(0→2)	R1	0.99	0.99	0.010	0.98	0.97	0.025
	R2	0.99	0.95	0.028	0.98	0.95	0.029
	R3	0.99	0.91	0.039	0.92	0.89	0.046
INC(1→2)	R1	0.99	0.99	0.011	0.85	0.74	0.073
	R2	0.99	0.99	0.014	0.90	0.88	0.050
	R3	0.99	0.98	0.022	0.93	0.70	0.074
DEC(1→0)	R1	0.99	0.99	0.015	0.96	0.95	0.040
	R2	0.99	0.99	0.007	0.98	0.97	0.032
	R3	0.99	0.99	0.005	0.92	0.92	0.050
DEC(2→0)	R1	0.99	0.99	0.019	0.99	0.97	0.026
	R2	0.99	0.94	0.041	0.99	0.94	0.040
	R3	0.99	0.95	0.040	0.97	0.93	0.047
DEC(2→1)	R1	0.99	0.98	0.024	0.95	0.82	0.075
	R2	0.99	0.79	0.084	0.97	0.70	0.106
	R3	0.99	0.96	0.034	0.94	0.79	0.083

图 7 为各水头调整模式下第 72 小时及调整后第 144 小时下,Surfer 绘制的土壤体积含水率分布图。颜色越深,含水率越高。结果表明,水头调增后湿润体面积逐渐变大,且湿润体内含水率升高。对于调增 INC 处理组,在低水头条件下(例如 0 m 水头)湿润锋及含水率推进缓慢,当施加调增水头后,湿润体内含水率重分布,含水率显著提升;对于调减 DEC 处理组,初始高水头使湿润锋快速迁移,湿润

体内形成高含水率状态,而当水头调减后,调整初期管周含水率有微弱降低趋势,随着时间进行,含水率开始增加并重分布。

由上述结果可知,无论正压工作水头高低,湿润锋及含水率随时间均呈增长趋势,增长速率与工作水头呈显著正相关。水头调增时,湿润体内含水率骤升并形成正反馈;水头调减时,含水率有瞬时降低趋势,随时间推移含水率重分布。

2.2 变水头调控情景下微润管出流及湿润体变化规律

基于 HYDRUS 2D 数值模拟软件,分析了多重水头调控模式下微润管出流及土壤水分变化趋势。水头调控情景如表 4 所示。图 8、9(微润灌水头经两次调控,调控时间节点分别为第 48、96 小时)分别为多重调控情景下累积入渗量和入渗率随时间演化曲线。结果表明,与 2.1 节试验结果相一致,水头调增或调减显著改变累积入渗量随时间变化过程,呈现出“折线型”推进过程。在既定水头下,微润灌溉入渗率在初期(0 h)表现出指数型减小后稳定的规律,该现象与传统入渗规律相似。当水头调增时,微润灌入渗率骤增,且调增后的入渗率同样表现出“指数型减小后稳定”的趋势,如图 9a 中 48~96 h 入渗率规律;然而当水头调减后,入渗率变化规律与调增存在显著差异,调减后入渗率呈现“指数型增加后稳定”的规律,如图 9c 中 48~96 h 入渗率随时间变化规律。该现象可解释为,水头由高向低调减,此时高水头下湿润体内含水率较大,调低瞬间高含水率抑制入渗,导致入渗率降低甚至趋于 0 的瞬间,例如图 9e 中 48~96 h。随时间推移,水分在湿润体内重分布,微润管入渗率增加后趋向稳定。

由此可知,水头调增与调减下入渗率呈现出“入渗率对称”现象,即调增过程中入渗率规律服从传统的“水分进入干燥土壤环境”中的入渗规律,呈现指数减小规律(例如考斯加可夫模型);而调减过程相反,水分由微润管进入“土壤湿润环境”,微润管出流流量暂时减小或降至 0,待湿润体内水分重分布后,微润管出流能力恢复至与其水头相匹配的入渗率附近。

图 10a 为不同水头调控情景下的累积入渗量终值,图 10b、10c 为水头 0、1、2 m 下的入渗率稳定值和入渗率均值。依据试验方案,不同调控情景下,水头 0、1、2 m 的持续时间一致为 48 h。由图 10a 可知,不同水头调控方案下累积入渗量存在微弱差异,0→1→2 m 持续调增水头下的入渗量最大,2→1→0 m 持续调减水头下的入渗量最小,该现象可归因于水头调节前初始含水率对入渗的影响。0→1→2 m 方

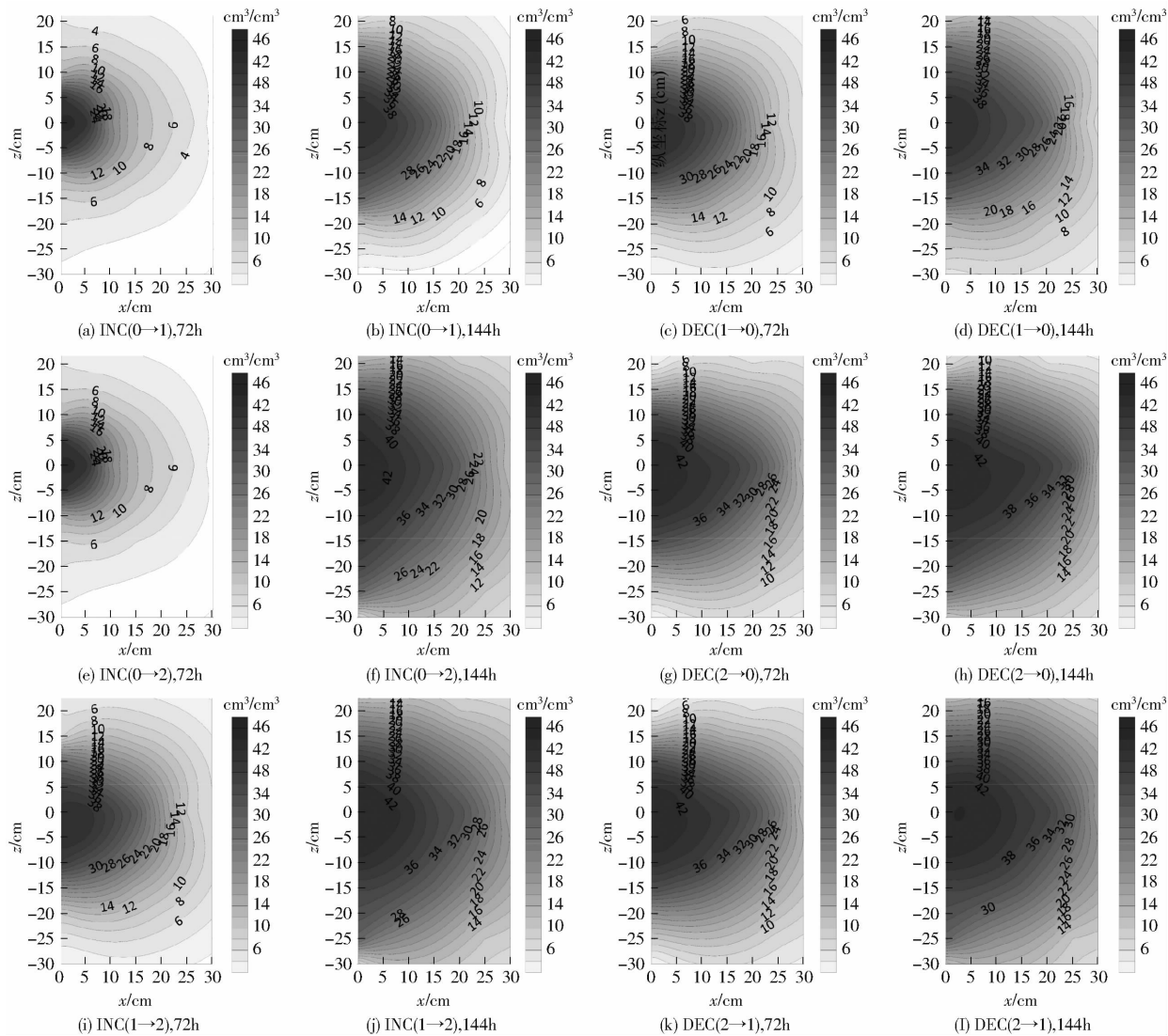


图 7 工作水头调整前(72 h)和调整后(144 h)微润管周土壤体积含水率分布

Fig. 7 Volumetric water content of soil before (72 h) and after (144 h) adjustments of working pressure heads during Moistube irrigation

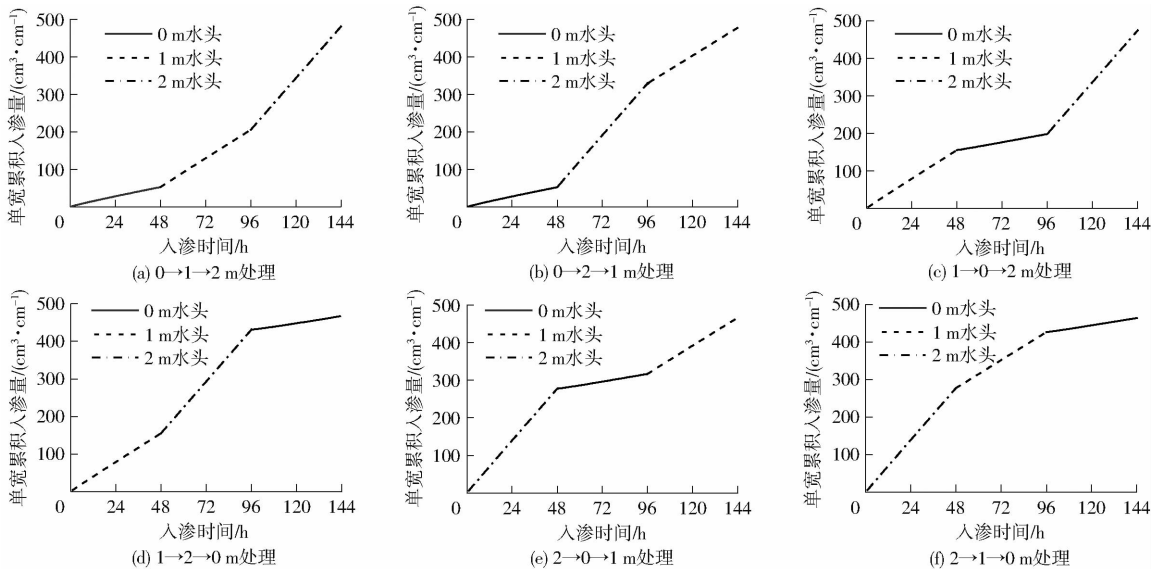


图 8 不同水头调控情景模下单宽累积入渗量随时间变化曲线

Fig. 8 Cumulative infiltration volume per unit width with respect to time under different treatments of regulated working pressure heads

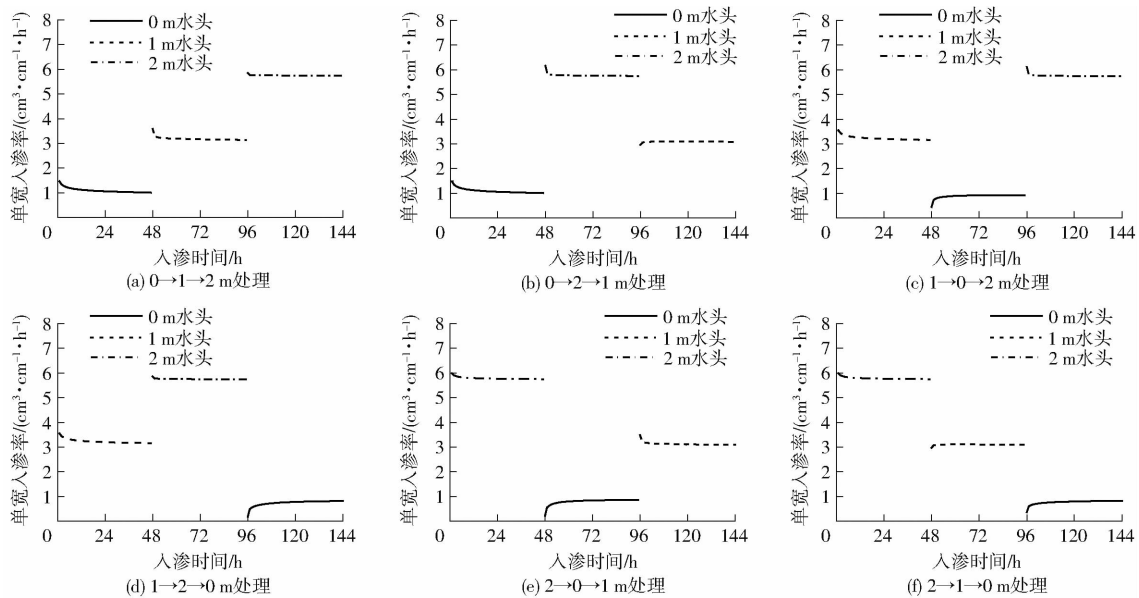


图 9 不同水头调控情景模式下单宽入渗率随时间变化曲线

Fig. 9 Infiltration rate per unit width with respect to time under different treatments of regulated working pressure heads

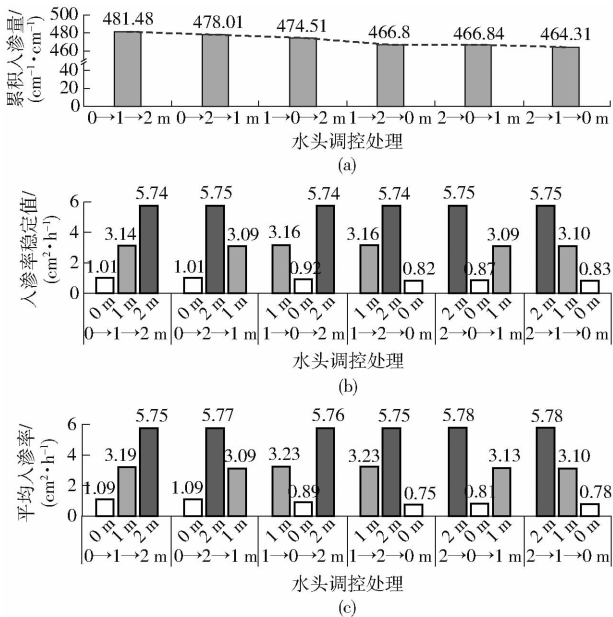


图 10 不同水头调控情景模式下累积入渗量最终值及入渗率稳定值和均值

Fig. 10 Final values of cumulative infiltration volume, stabilized and mean value of infiltration rate under different regulated working pressure head treatments

案下湿润锋含水率逐渐增加,水头调整前湿润体内含水率相对较小,因此促进后续入渗;而 2→1→0 m 方案下,水头调节前的含水率较高,因此抑制后续入渗过程,故水头持续调减方案的累积入渗量较调增降低 3.7% 左右。水头调增和调减混合方案的累积入渗量趋于中间水平。

该现象对于指导微润灌调控策略具有重要价值,即当微润管可有效补充作物需水量的前提下,可通过瞬间提高水头后(例如 2~3 m),再进行降水头调控方案,以降低微润管出流,节约管出流量。

图 11 为多重水头调控情景下不同层深土壤含水率随时间演化规律,其中含水率监测深度分别为微润管竖直方向上的 -20、-15、-10、-5、5、10、15、20 cm,设置向下为正,例如 -5 cm 和 5 cm 分别为微润管上方 5 cm 和下方 5 cm。由图 11 可知,在既定水头下,湿润锋经过监测点时,含水率随时间呈现出骤增后稳增状态。水头调节可明显改变土壤含水率状态,调增水头显著提升湿润体内含水率;然而,水头调减后骤降趋于稳定。接近于微润管的土壤含水率对于调增或调减响应更为显著。随着时间推移,各层深土壤含水率曲线逐渐汇集,且该含水率“曲线束”与微润管工作水头显著正相关。此外,与微润管同距离的上方和下方含水率存在差异,由变水头调控方案下的微润管数值模拟结果可知,微润灌初期,相同距离下管上方含水率高于管下方;而随着微润灌溉时间持续(例如 144 h 趋稳定状态),微润管正下方含水率高于相同距离微润管正上方处含水率,例如距微润管 -5 cm 处含水率小于 5 cm 处。该现象可解释为,水分驱动势能中(毛管势和重力势),毛管力几乎等同条件下,重力势能对水分的驱动效应,即管上方水分需克服重力向上运移。

3 讨论

3.1 变水头调控下微润管出流机理及其含水率变化规律

微润灌系统设计、管理及其技术参数选择决定了其灌溉效益水平,其参数设计需统筹考虑微润灌溉入渗规律、作物需水强度、土壤属性等因素^[22-24]。工作水头决定微润管出流机理和支配性

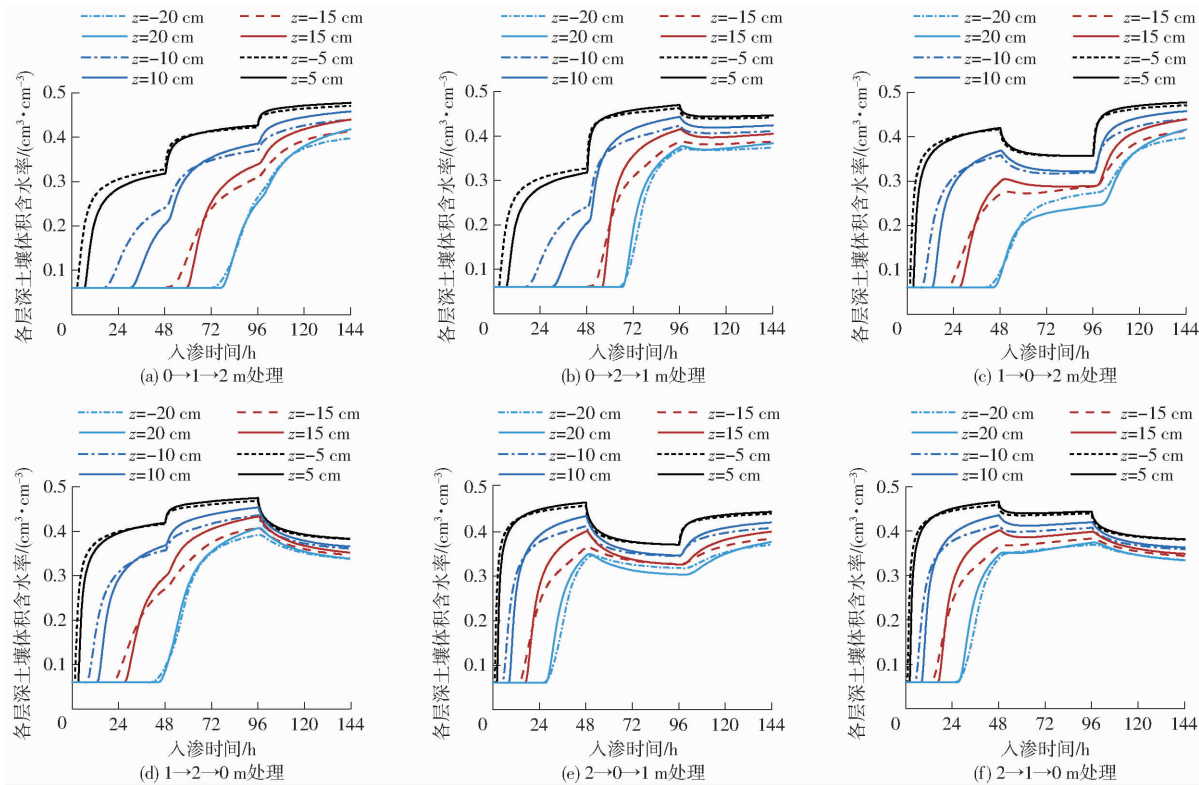


图 11 多重水头调控情景模式不同层深土壤含水率随入渗时间变化曲线

Fig. 11 Soil water content under different soil layer depths for treatments of different multiple regulated working pressure head

参数^[10,25],其机理与其他微灌方式差异显著。例如在滴灌与微喷灌中,灌水器的工作水头通常决定于灌水器工作水头、水泵扬程、管内沿程和局部水头损失等因素,调控难度相对较大;而微润灌作为一种低压、线源、小流量的灌溉方式,其出流速率缓慢,管内沿程或局部水头损失几乎可忽略不计,其低压控水状态决定了其调控具有易操作性^[5]。作物在不同的生育期(例如小麦苗期和灌浆期腾发量)的需水规律差异显著^[26],因此,可通过调节工作压力而调控根区水分状况和管出流量,使作物根系吸水和出流达到动态平衡^[21],同时使管周含水率适时处于作物根区最优阈值区间。

实测值和模拟值共同表明,压力水头决定了微润管累积入渗量和入渗率,且不同水头调控模式均显示,出流流量与工作水头呈显著线性正相关^[21-22,27]。微润管作为纳米管材料,虽然其表面分布大量纳米级微孔,然而其管壁水力特征亦服从Darcy流的层渗流范畴。灌溉水分在管内工作水头和管外基质势共同驱动下,从纳米微孔渗入土壤到达根际^[7,22]。试验可知,管内压力水头在微润管出流中起着决定性作用;分析既定工作水头下的管出流流量可知,出流速率随时间有微弱减小趋势,表明了管外基质势亦对入渗产生微弱且抑制的影响。微润管半透膜结构决定了出流流量与管周基质势的动态响应性,入渗率随入渗时间具有减小趋势,然而该

趋势与重力灌溉入渗规律不同,未发生数量级的减小,因此,通过调控水头改变微润管出流量或管周土壤入渗率的理念是可行的。研究微润管工作压力与出流流量和湿润体含水率的关系,可有效指导灌溉实践。压力过低则供水强度不够,无法满足作物蒸腾蒸发需求;然而,工作水头过大,则造成湿润体过大,湿润体内含水率过高,造成无效灌溉和深层渗漏^[22]。针对压力调节,徐俊增等^[1]提出了负压灌溉模式,通过有效湿润体半径匹配作物根系形态及适宜负压,作为负压微润灌技术参数,对不同作物的实践生产应用提供了技术指导。因此,在农业生产实践中,可动态调控微润管工作水头,调控范围可设置负压至正压10 m(或约为100 kPa)^[11,28-29],实现调节微润管出流量和湿润体内含水率状况,从而满足作物即时需水要求,后续亦可与智慧灌溉相融合,自动根据气象进行水头智慧动态调控。

3.2 多重水头调控模式下 HYDRUS 2D 数值模拟 优度及其情景分析

掌握微润灌土壤水分入渗规律,是灌溉系统管理与改进的重要理论基础^[23]。HYDRUS 作为美国国家实验室开发的土壤水分-溶质运移模拟软件,具有模拟精度高、算法种类丰富等优势^[1,17,30-32],模型已在地下滴灌土壤水分运移等方面得以认证^[9,23,32]。本研究将微润管假定为质地黏重的黏性土壤层,对微润管出流机理、含水率分布和湿润锋推

移机理进行了数值模拟,获得了较为可靠的模拟结果, HYDRUS 2D 模型优度较好。不同于其他恒定条件下的微润灌 HYDRUS 数值模型,变调控水头下管周初始与边界条件发生显著变化,加剧了模拟难度。

微润灌土壤水分入渗过程可认为在两种连续介质中运移^[5],前者为微润管纳米材料多孔介质,由管内外的水势差驱动将灌溉水从管内压到管外;后者为土壤多孔介质,一般采用 Darcy - Richards 方程描述水分运移。本研究假定达西定律在极小的纳米孔隙中依然适用,因此,为了简化研究,将微润管设定为一种黏土材料并运用 Darcy - Richards 方程进行数值模拟。结果表明,在多重水头调控模式下,入渗率、累积入渗量、湿润锋和含水率的模拟结果与试验结果吻合较好,表明了“微润管可作为黏土进行水力计算”的假设是完全可靠的^[22]。然而,因纳米级别孔隙数量难以精确控制,故针对不同微润管的饱和导水率 K_s 不尽相同。因此,在模拟过程中需对微润管导水参数进行调试。此外, WANG 等^[5]同样将微润管假定为黏土多孔介质,采用 Green - Ampt 极坐标物理模型推演了微润管出流规律,该物理模型有效描述了入渗率、累积入渗量和湿润锋随时间推移特征,精度较好^[5]。

研究表明,暴露在大气环境中的微润管入渗率低于埋在土壤中的入渗率^[7,21],侧向验证了土壤基质通过吸收管外水分从而增大管内外水势梯度的结论,加速微润管水分流出。影响微润管流量的设计参数包括:工作水头、管外土壤基质吸力和土壤上覆层压力^[24],其中,工作水头是控制微润管流量的决定因素,在本研究中已得到充分验证;管外土壤基质吸力对微润管出流亦产生微弱影响,因管附近土壤基质吸力促进微润管出流(即微润管的自适应效应),土壤含水率随入渗时间而逐渐增大,管外基质吸力逐渐减小且趋向 0,管内外水势差减小导致管

周入渗率降低,这解释了微润管入渗率曲线在稳定入渗阶段微弱减小的现象。基于试验观测,本文认为,入渗过程中管外基质吸力对入渗的促进作用存在两方面:①管外基质吸力通过增加管内外水势差从而增大水势梯度,从而促进出流。②管外土壤通过吸附管壁“出汗式”水滴,进而加速管壁出流。通过定量分析可知,作用①影响相对较小,可归因于,虽然管外基质吸力较大,然而其吸附能力或入渗能力决定于管出流能力,即微润管在既定水头下的导水能力。因此,土壤水吸力对入渗的影响相对较小,管内工作水头在土壤水分运移驱动中占主导作用。

4 结论

(1)微润管水头调增或调减后,累积出流量随时间在调节点发生显著变化;微润管入渗率在水头调节点前呈现“指数减小后稳定”的规律,调增或调减导致入渗率骤增或骤减。管周入渗率稳定值与工作水头呈线性正相关关系。水头调增时,湿润体内含水率骤升,对水头形成正反馈;水头调减时,管周含水率有微弱降低趋势,并随时间推移趋于稳定回升。

(2)灌溉水在微润管中穿透规律符合达西定律和连续方程范畴,将微润管模拟为多孔介质重黏土材料,并赋予其水力特征参数,模拟微润灌土壤水分运移规律是可行的。模型精准模拟了变调控水头下微润灌入渗规律, R^2 和 NSE 趋近于 1, RSR 趋近于 0,模型优度较好。

(3)分析了多重水头调控模式下微润管出流及水分入渗规律。水头调增后入渗率呈现“指数型减小后稳定”趋势,水头调减后入渗率表现为“指数型增加后稳定”。调增 0→1→2 m 方案下累积入渗量最大,调减 2→1→0 m 方案下累积入渗量较 0→1→2 m 方案降低 3.7%。调控水头可有效改变湿润体内含水率分布,靠近微润管周的土壤含水率对调增或调减响应更为显著。

参 考 文 献

- [1] 徐俊增,刘玮璇,卫琦,等.基于 HYDRUS-2D 的负压微润灌土壤水分运动模拟[J].农业机械学报, 2021, 52(8): 287-296.
XU Junzeng, LIU Weixuan, WEI Qi, et al. Simulation of soil moisture movement under negative pressure micro-irrigation based on HYDRUS-2D[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 287-296. (In Chinese)
- [2] APPELS W M, KARIMI R. Analysis of soil wetting patterns in subsurface drip irrigation systems—indoor alfalfa experiments [J]. Agricultural Water Management, 2021, 250: 106832.
- [3] AYARS J E, FULTON A, TAYLOR B. Subsurface drip irrigation in California—here to stay? [J]. Agricultural Water Management, 2015, 157: 39-47.
- [4] 康绍忠. 农业水土工程学科路在何方[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 1-8.
KANG Shaozhong. Where is the way of agricultural soil and water engineering discipline[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 1-8. (in Chinese)
- [5] WANG C, YE J Y, ZHAI Y M, et al. Dynamics of Moisture discharge, soil-water redistribution and wetting morphology in response to regulated working pressure heads[J]. Agricultural Water Management, 2023, 282: 108285.
- [6] SUN G Z, LI Y L, LIU X G, et al. Effect of Moisture fertigation on infiltration and distribution of water-fertilizer in mixing

- waste biomass soil[J]. Sustainability, 2019, 11(23): 16.
- [7] QI W, ZHANG Z, WANG C, et al. Prediction of infiltration behaviors and evaluation of irrigation efficiency in clay loam soil under Moistube (R) irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2021, 248: 106756.
- [8] KANDA E K, SENZANJE A, MABHAUDHI T. Calibration and validation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2021, 124: 102941.
- [9] 范严伟, 杨志伟, 胡五龙. 均质土微润灌湿润体模型构建及验证[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 83–91.
FAN Yanwei, YANG Zhiwei, HU Wulong. Establishment and validation of wetting pattern model of Moistube irrigation in homogeneous soil[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 83–91. (in Chinese)
- [10] 刘小刚, 朱益飞, 余小弟, 等. 不同水头和土壤容重下微润灌湿润体内水盐分布特性[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 189–197.
LIU Xiaogang, ZHU Yifei, YU Xiaodi, et al. Water-salinity distribution characteristics in wetted soil of Moistube irrigation under different pressure heads and soil bulk densities[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 189–197. (in Chinese)
- [11] KANDA E K, SENZANJE A, MABHAUDHI T. Modelling soil water distribution under moistube irrigation for cowpea (*Vigna unguiculata*(L.) Walp.) crop(dagger)[J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69(5): 1116–1132.
- [12] DIRWAI T L, MABHAUDHI T, KANDA E K, et al. Moistube irrigation technology development, adoption and future prospects: a systematic scoping review[J]. Heliyon, 2021, 7(2): e06213.
- [13] 张少文, 郭向红, 毕远杰, 等. 微润灌管带埋深及压力水头对土壤水分累积入渗量的影响与模拟[J]. 节水灌溉, 2018(3): 19–22, 26.
ZHANG Shaowen, GUO Xianghong, BI Yuanjie, et al. Effects of tube depth and pressure head on soil water cumulative infiltration under Moistube-irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2018(3): 19–22, 26. (in Chinese)
- [14] KACIMOV A R, OBNOSOV Y V. Tension-saturated and unsaturated flows from line sources in subsurface irrigation: Riesenkauf's and Philip's solutions revisited[J]. Water Resources Research, 2016, 52(3): 1866–1880.
- [15] 吾尔开西·库热西, 翟亚明, 王策, 等. 微润灌溉变工作水头调控下土壤水分运移及湿润体胀缩机理研究[J]. 节水灌溉, 2022(12): 81–91.
WUERKAIXI·Kurexi, ZHAI Yaming, WANG Ce, et al. Study on the mechanism of soil moisture transport and wet body expansion and contraction under the control of variable working water head in Moistube irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2022(12): 81–91. (in Chinese)
- [16] WANG K C, WANG H Y, XU J Z, et al. An automatic control device for negative pressure irrigation for continuous low-rate water supply at constant soil wetting[J]. Biosystems Engineering, 2022, 213: 175–181.
- [17] LAZAROVITCH N, SIMUNEK J, SHANI U. System-dependent boundary condition for water flow from subsurface source[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(1): 46–50.
- [18] KANDA E K, SENZANJE A, MABHAUDHI T. Soil water dynamics under Moistube irrigation[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2020, 115: 102836.
- [19] 赵彤, 范严伟, 赵廷红. 水平微润灌土壤水分运动数值模拟与验证[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 28–34.
ZHAO Tong, FAN Yanwei, ZHAO Tinghong. Numerical simulation and verification of soil water movement under horizontal Moistube-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 28–34. (in Chinese)
- [20] CAI Y H, WU P T, ZHANG L, et al. Prediction of flow characteristics and risk assessment of deep percolation by ceramic emitters in loam[J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 901–909.
- [21] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 128–134. (in Chinese)
- [22] 齐伟, 张展羽, 王策, 等. 基于水势差驱动出流机制的微润灌水分运动模型构建及模拟[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1091–1102.
QI Wei, ZHANG Zhanyu, WANG Ce, et al. Model construction and simulation of soil water movement under Moistube irrigation based on water potential difference-driven outflow mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1091–1102. (in Chinese)
- [23] 冀荣华, 刘秋霞, 陈振海, 等. 基于 HYDRUS-3D 模型的微润灌溉土壤水分入渗模拟[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 290–295.
JI Ronghua, LIU Qiuxia, CHEN Zhenhai, et al. Numerical simulation of soil water infiltration based on HYDRUS-3D finite element model under Moistube-irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 290–295. (in Chinese)
- [24] 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)

Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[31] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 2版. 北京:中国农业出版社, 2013.

[32] TUZET A, PERRIER A, LEUNING R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration[J]. Plant, Cell and Environment, 2003, 26(7): 1097 – 1116.

[33] TONG B, GUO J P, XU H, et al. Effects of soil moisture, net radiation, and atmospheric vapor pressure deficit on surface evaporation fraction at a semi-arid grass site[J]. Science of the Total Environment, 2022, 849: 157890.

[34] 孙晨娜,张晶,鲁志云,等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林冠层温度变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2023,29(1): 197 – 203. SUN Chenna, ZHANG Jing, LU Zhiyun, et al. Characteristics of canopy temperature in a subtropical evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain[J]. Chinese Journal Applied and Environmental Biology, 2023, 29(1): 197 – 203. (in Chinese)

[35] 吴天奎. 作物冠层温度变化及其对环境因子的滞后效应分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022. WU Tiankui. Analysis of crop canopy temperature variation and its hysteresis effect to environmental factors[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[36] 王城城,叶文伟,赵从举,等. 热带桉树树干液流的时滞效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 25 – 32. WANG Chengcheng, YE Wenwei, ZHAO Congju, et al. Sap flow in the stem of *Eucalyptus* and changes in meteorological factors are not consistent[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 25 – 32. (in Chinese)

[37] ZHANG Q, MANZONI S, KATUL G, et al. The hysteretic evapotranspiration-vapor pressure deficit relation[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(2): 125 – 140.

[38] 王瑛,刘美君,杜盛. 树干液流时滞特征及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(2): 507 – 514. WANG Ying, LIU Meijun, DU Sheng. Research progress in the characteristics and driving factors of time lags in stem sap flow [J]. Chinese Journal Applied and Environmental Biology, 2023, 29(2): 507 – 514. (in Chinese)

[39] XU S Q, YU Z B. Environmental control on transpiration: a case study of a desert ecosystem in Northwest China[J]. Water, 2020, 12(4): 1211.

[40] HONG L, GUO J B, LIU Z B, et al. Time-lag effect between sap flow and environmental factors of *larix principis-rupprechtii* Mayr[J]. Forests, 2019, 10(11): 971.

[41] WULLSCHLEGER S D, HANSON P J, TSCHAPLINSKI T J. Whole-plant water flux in understory red maple exposed to altered precipitation regimes[J]. Tree Physiol, 1998, 18(2): 71 – 79.

[42] 梅婷婷,赵平,倪广艳,等. 树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7018 – 7026. MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al. Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7018 – 7026. (in Chinese)

(上接第 318 页)

[25] 李慧敏,申丽霞,王瑞军,等. 微润灌施下压力水头对湿润锋及土壤水氮运移的影响[J]. 节水灌溉, 2022(9): 81 – 86, 92. LI Huimin, SHEN Lixia, WANG Ruijun, et al. Effects of pressure head on moisture front and soil water and nitrogen transport under Moistube irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2022(9): 81 – 86, 92. (in Chinese)

[26] SUN H Y, LIU C M, ZHANG X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1 – 2): 211 – 218.

[27] 徐嘉惠,齐伟,刘俊,等. 农田干缩裂隙对微润灌土壤水氮运移及分布的影响[J]. 节水灌溉, 2022(7): 15 – 21. XU Jiahui, QI Wei, LIU Jun, et al. Effects of farmland desiccation crack on water and nitrogen transport and distribution under moistube irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2022(7): 15 – 21. (in Chinese)

[28] LI Y K, WANG L C, XUE X Z, 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.

[29] CAI Y H, YAO C P, WU P T, et al. Effectiveness of a subsurface irrigation system with ceramic emitters under low-pressure conditions[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106390.

[30] SIMUNEK 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.

[31] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN M T, SEJNA M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(7): 25.

[32] KANDELOUS M M, SIMUNEK 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.