

矮化密植香梨园灌水均匀度评价与模拟

王宏鑫^{1,2},王春霞^{1,2},岳绚丽³,梅华⁴,
张景瑞^{1,2},李彦杰^{1,2},俞芷若^{1,2}

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆石河子832003; 2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆石河子832003;
3.新疆天业集团节水灌溉股份有限公司,新疆石河子832000; 4.新疆生产建设兵团第九师水文水资源管理中心,新疆塔城834601)

摘要:明确不同灌水技术参数对香梨园灌水均匀性的影响可为库尔勒香梨节水技术的使用提供数据参考与技术支撑。以7年生库尔勒幼龄香梨为研究对象,设置小管出流(一行两管)和地表滴灌(一行三管、一行四管)处理,测定0~100 cm土层土壤含水率,设定27种灌水技术参数组合(灌水量Q1、Q2、Q3;滴灌管布置方式D1、D2、D3;滴灌管间距S1、S2、S3)并用HYDRUS-2D模拟灌水后24 h时土壤水分变化,通过计算灌水均匀度优选滴灌技术参数组合。结果表明:灌溉结束后24 h内,土壤含水率随土层深度增加而逐渐升高;通过对比土壤含水率的实测值与模拟值,HYDRUS-2D模型模拟的RMSE值均大于0.01 cm³·cm⁻³、NRMSE值均低于20.5%、MAE值均不大于0.02 cm³·cm³、NSE值均高于0.65,模拟精度较高;HYDRUS-2D模型模拟上述情景结果显示:土壤含水率与灌水量和滴灌管数量呈正相关关系、与滴灌管间距呈负相关关系,在滴灌管下方位置处不同深度的土壤含水率随时间的增加呈先增加后降低趋势;当滴灌管布置方式与间距一定时,灌水量与土壤水分分布均匀度变化率呈负相关关系。综上,一行三管+布置间距30 cm组合与一行四管+布置间距40 cm组合的6种处理(Q1D2S1、Q2D2S1、Q3D2S1、Q1D3S2、Q2D3S2、Q3D3S2)下,香梨根系集中区域内的含水率较高且水分分布均匀,可为库尔勒香梨滴灌技术应用提供参考依据。

关键词:矮化密植香梨;滴灌管布置方式;土壤水分分布;灌水均匀度;HYDRUS-2D

中图分类号:S275.6 文献标志码:A

Evaluation and simulation of irrigation uniformity in dwarf and densely planted fragrant pear orchard

WANG Hongxin^{1,2}, WANG Chunxia^{1,2}, YUE Xuanli³, MEI Hua⁴,
ZHANG Jingrui^{1,2}, LI Yanjie^{1,2}, YU Zhiruo^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;
2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 3. Tianye Water-Saving Irrigation Co. Ltd., Shihezi, Xinjiang 832000, China;
4. Hydrology and Water Resources Management Center of the Ninth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Tacheng, Xinjiang 834601, China)

Abstract: The aim of this study was to clarify the impact of various irrigation technical parameters on the uniformity of irrigation in fragrant pear orchards, providing data references and technical support for the implementation of water-saving technology in Korla balsam pear cultivation. Taking 7-year old Korla young fragrant pear as the research object, set small tube outflow (one row of two tubes) and surface drip irrigation (one row of three tubes and four tubes) to determine the soil moisture content of 0~100 cm. Setting 27 irrigation technical parameters (irrigation amount Q1, Q2, Q3; drip irrigation pipe arrangement D1, D2, D3, drip irrigation pipe spacing S1, S2, S3) combination and using the HYDRUS-2D to simulate the changes in soil moisture within 24 h after irrigation. Optimizing the change of soil moisture technical parameters was achieved by calculating the uniformity of

收稿日期:2024-03-25

修回日期:2024-05-28

基金项目:新疆重点产业创新发展支撑计划项目(2022DB020);国家自然科学基金项目(52369012)

作者简介:王宏鑫(2001-),男,甘肃平凉人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:2318062934@qq.com

通信作者:王春霞(1979-),女,山东郓城人,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:410443356@qq.com。

irrigation. The results showed that within 24 h after the completion of the irrigation, soil moisture content gradually increased with the increase of soil layer depth. By comparing the measured and simulated values of soil moisture content, all the *RMSE* values simulated by the HYDRUS-2D model were greater than $0.01 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. The *NRMSE* values were all lower than 20.5%. The *MAE* values were not greater than $0.02 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. The *NSE* values were all higher than 0.65, reaching high simulation accuracy. The results of the above scenario of HYDRUS-2D model showed that the soil moisture content was positively correlated with the amount of irrigation and the number of drip irrigation pipes and a negative correlation with drip irrigation tube spacing. The moisture content of the soil at different depths below the drip irrigation pipe showed a trend of increasing first and then decreasing along with the increasing time. When the drip irrigation pipe was arranged and separated from a certain distance, irrigation amount was negatively correlated with the rate of uniformity of soil moisture distribution. In summary, six treatments (Q1D2S1, Q2D2S1, Q3D2S1, Q1D3S2, Q2D3S2, Q3D3S2) involving one row of three tubes with 30 cm spacing and one row of four tubes with 40 cm spacing resulted in a higher and more uniform concentration area of the balsam pear root system within the moisture distribution. This can provide an important reference for the application of drip irrigation technology to Korla balsam pear.

Keywords: dwarf and densely planted fragrant pear; drip irrigation pipe arrangement; soil moisture distribution; irrigation uniformity; HYDRUS-2D

新疆地区由于“三山夹两盆”的特殊地形地貌导致气候干旱,生态环境脆弱,水资源匮乏,尤以南疆更为严重^[1]。作为全国林果产业的主要产区之一,新疆特色林果产业不仅推动了农民增收,而且起到防风固沙、改善生态环境的作用。然而受水资源短缺和水分利用率低下的制约,加之林果种植面积逐年增加,农业用水需求也在不断提高^[2]。为缓解这一问题,除优化水资源配置、建立水资源管理体系等方法,还应大力推广节水灌溉技术^[3]。节水灌溉技术能够适时适量地灌溉作物,提高水资源利用率,发掘农业节水潜力,对新疆经济社会的可持续发展具有深远影响^[4-5]。库尔勒地区作为香梨的主产区之一,多年来灌溉方式以传统漫灌为主,经济成本较高且易造成水资源浪费,为改善这种情况,库尔勒地区逐渐开始采用矮化密植型栽培模式,这种栽培模式可以减少土壤表面蒸发,若结合节水技术如滴灌、喷灌等,将水分精确输送至植物根系附近,不但能够提高果实的产量与品质,还能提高土壤水分利用效率,对于库尔勒地区的农业生产具有重要意义^[6]。

灌水均匀度是评价灌溉系统性能的关键指标,用于评价灌溉系统的完整性^[7]。评价灌水均匀度的方法有两类,一是通过建立与流量偏差系数、流量偏差率、压力偏差率等的关系来评估^[8];二是根据灌水后土壤水分分布的均匀情况来计算,常用克里斯琴森均匀系数作为衡量标准^[9]。关于灌水均匀性对土壤水分分布影响的研究已广泛展开,李明

思等^[9]发现,沿滴灌管方向的土壤湿润均匀度随灌水量增大而增大、随滴头间距增大而减小;孙海燕等^[10]发现距离滴头越远,土壤含水率越低,湿润锋交汇处的土壤含水率通常高于同深度土壤;周方等^[11]发现随着滴灌时长和灌水量的增加,土壤含水量和湿润体均增大;Chen 等^[12]研究指出,砂土含量的增加会扩大土壤湿润带,但降低土壤含水量,而垂直湿润锋则随着灌水量和土壤初始含水量的增加而增加。

目前,对于土壤水分运动的研究多集中于室内试验,田间试验受限于周期长、土壤条件与气候环境复杂等原因导致研究条件有限^[13],采用数值模拟对灌水技术参数和土壤参数等进行优化是一种经济且高效的手段^[14]。HYDRUS 软件能准确地模拟不同情景下的土壤水分运动,已广泛应用于制定灌溉方案与设计灌溉系统^[15]。黄凯等^[16]通过 HYDRUS-3D 模型分析滴灌参数对滴灌灌水均匀性的影响,确定了红糖蔗区滴头流量、滴头间距和灌水时间;代智光^[17]通过室内土箱试验与 HYDRUS 模型验证,发现模拟结果与实测值误差较小,可为涌泉根灌系统设计提供依据;Fan 等^[18]利用 HYDRUS-2D 建立了土壤水分运动数学模型,并提出了预测能力强的估算模型;彭星凯等^[19]利用 HYDRUS-2D 模拟不同灌溉情景,发现最优环沟内径为 20 cm 时,灌溉水利用效率最高,能确保水分被根系充分吸收。

为改善传统香梨园灌溉用水效率低、水资源浪费严重等问题,拟开展土壤水分运动规律的数值模

拟研究,进而提出相应的灌溉策略,对实现传统香梨园转型具有重要意义。本研究以矮化密植香梨为研究对象,分析地表滴灌与小管出流灌溉方式单次灌水前后土壤含水量的变化规律,利用 HYDRUS-2D 模拟不同灌水技术参数组合情景灌后 24 h 土壤含水量,对灌水均匀度进行量化分析,明确适宜的灌水技术参数。旨在为库尔勒香梨园节水灌溉提供理论依据与参考方案,进而指导农户生产实践。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022—2023 年 4—10 月在新疆维吾尔自治区库尔勒市 29 团 10 连香梨示范园进行田间试验(41°78'N,85°88'E),试验区位于欧亚大陆与新疆的核心地带,干旱少雨,属温带大陆性干旱气候,年平均气温 11.4℃,年平均降雨量 58.6 mm,年日照时长 2 990 h,年辐射总量 6 000 $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$,无霜期 210 d。

试验区选材为 7 a 生香梨树,栽培模式为矮化密植型,种植模式株行距为 1 m×4 m,试验区土壤为砂壤土,上下土层土质均匀,0~100 cm 土层土壤平均容重为 1.47 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土壤饱和含水量、田间持水量分别为 0.39、0.29 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,土壤 pH 为 7.31,有机质含量 14.37 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷、速效钾含量分别为 24.51、142.73 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮、铵态氮含量分别为 25.5、6.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,地下水埋深 9.1 m,气象数据见图 1。

1.2 试验设计

在 2022、2023 年香梨开花期各选取一个灌水周期测定土壤含水率,灌水定额为 21 $\text{m}^3 \cdot 667\text{m}^{-2}$,灌水持续时间为 7 h。试验采用水肥一体化微灌系统,管材使用 PE 管,滴头流量为 4 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$,供水支管采用 $\Phi 75$ 软带,毛管采用 $\Phi 16$ PE 管,试验设计两种灌水技术(滴灌、小管出流),滴灌带滴头间距 30 cm;考虑到香梨根系集中分布区与田间管理等因素,滴灌一行三管布置方式为两条滴灌管分别布设在树行两侧,距树行 30 cm,一条滴灌管紧贴树干,布设在树行下;一行四管布置方式为四条滴灌管分别布设在树行两侧,其中内侧滴灌管距树行 30 cm,外侧滴灌管距树行 60 cm;小管出流的布置方式为一行双管,布置方式为两条 PE 管分别布设在树行两侧,距树行 30 cm,每根 PE 管在靠近香梨树的位置处打孔 2 个,通过灌水器与出流管连接,各处理设 3 个重

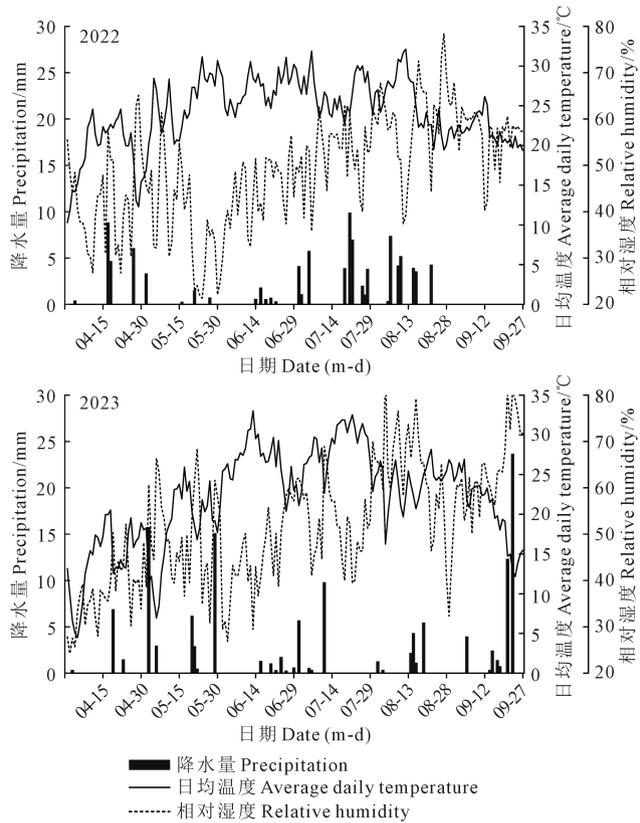


图 1 2022—2023 年香梨生育期气象数据

Fig.1 Meteorological data on the fertility of balsam pear during 2022–2023

复,布置方式如图 2 所示。

1.3 测定指标

在不同滴灌管布置方式处理下,选择 3 棵长势均匀的香梨树,在灌水开始前和灌水结束后 24 h 测定土壤含水率,取样点距离最外侧滴灌管 0、30、60 cm(图 2)。0~20 cm 土层间隔 10 cm 取样,20~100 cm 土层间隔 20 cm 取样。采用烘干法计算土壤质量含水率并将其转换为土壤体积含水率^[20]。

1.4 HYDRUS-2D 模型模拟

1.4.1 土壤水分运动基本方程 假设土壤各向同性,土质分布均匀,忽略土壤水分滞后效应,不考虑溶质势和温度势对水分运动的影响,按照轴对称问题处理,土壤水流运动过程可用 Richards 方程^[21]来描述:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

式中, ψ 为总水势(MPa); $K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); θ 为土壤体积含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); t 为水分运动时间(min); x, z 为二维空间坐标(cm)。

1.4.2 土壤蒸散发基本方程 采用 Penman-Monteith 公式^[22]估算每日参考作物蒸发蒸腾量:

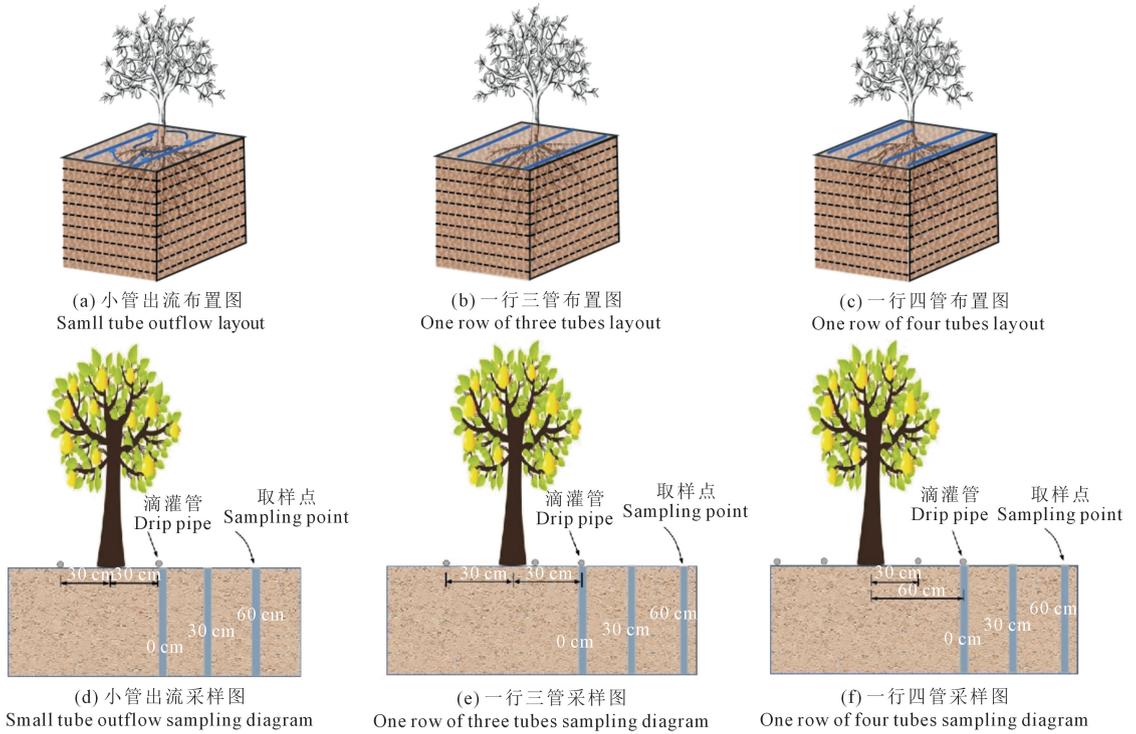


图 2 滴灌管布置方式与取样点示意图

Fig.2 Schematic diagram of drip irrigation pipe layout and sampling point

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)} \quad (2)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量 (mm); R_n 为田间净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为日平均空气温度 ($^{\circ}\text{C}$); γ 为温度计常数 ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); μ_2 为一定高度处的平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); Δ 为饱和蒸汽压曲线斜率 ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

1.4.3 定解条件

(1) 初始条件. 模拟区域几何边界如图 3 所示, 根据土样采集深度与情景模拟为滴灌管布置形式一行四管、滴灌管布置间距 50 cm 时取样点的位置, 确定模型几何边界尺寸为 $270 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$ (长 \times 高), 求解方程的初始条件为:

$$h(x, z, t) = h_0(x, z) \quad 0 \leq x \leq X, 0 \leq z \leq Z, t = 0 \quad (3)$$

式中, $h(x, z, t)$ 表示模拟区域的土壤初始负压水头 (cm); x, z 分别为模拟区域横向、垂向距离 (cm).

(2) 边界条件. 上边界条件: 滴头位置为水流通量随时间变化的线源入渗, 因此在滴灌管处的边界条件为变通量边界条件, 在直接与空气接触的土壤表面, 在没有积水的条件下选择大气边界条件;

下边界条件: 因地下水位较深, 下边界条件选择自由排水边界; 左、右边界条件: 由于果树行距较宽且水量有限, 所研究区域与相邻处理边界之间的水流难以抵达, 因此左右边界条件选择零通量边界. 具体如下:

1) 上边界条件: 假定地表无积水, 在滴头处:

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) + E = q \quad (4)$$

式中, q 为滴头流量 ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$); E 为土壤表面蒸发强度 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$).

在滴头以外:

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) + E = 0 \quad (5)$$

假定地表有积水, 饱和区: $h = 0$; 非饱和区:

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) + E = 0 \quad (6)$$

2) 下边界条件: 采用自由排水边界.

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0, z = Z, 0 \leq t \leq T \quad (7)$$

3) 左、右边界条件: 假定边界对称, 边界上的水分通量为 0.

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, x = 0, x = X, 0 \leq z \leq Z, t > 0 \quad (8)$$

1.4.4 模型离散化 模型模拟时长为 24 h, 采用变时间步长, 起始时间步长为 0.01667 h, 最小和最大时间步长分别为 0.083 h 和 0.167 h.

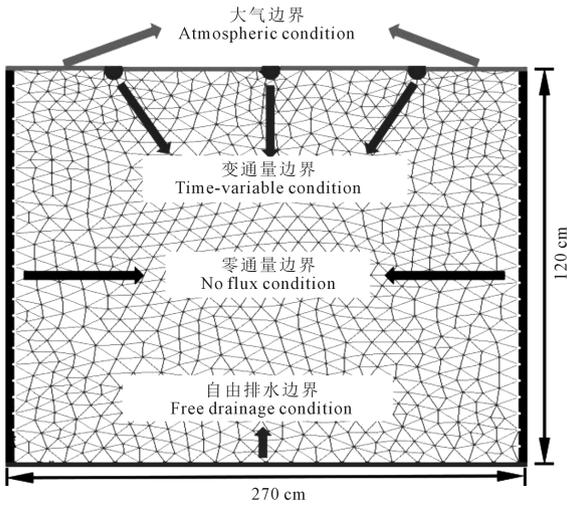


图3 边界条件示意图

Fig.3 Schematic diagram of boundary conditions

模拟区域采用不等间距三角形网格进行离散化处理,每间隔 1 cm 划分一个网格节点,共划分 10895 个节点,生成 21788 个三角形网格。

1.4.5 模拟结果评价 对模型的准确性进行验证,采用决定系数(R^2)、均方根误差($RMSE$)、标准均方根误差($NRMSE$)、平均绝对误差(MAE)和纳什效率系数(NSE)对模型进行评价(式 9~13)。 R^2 值越接近于 1 说明模型拟合程度越好; $RMSE$ 、 $NRMSE$ 值越小, MAE 值越接近于 0,说明模型拟合程度越好; NSE 越接近于 1 表示模型模拟值越接近于实测值,模型精度越高。

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})^2 \right]}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (10)$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{P}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \times 100\% \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (12)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (13)$$

式中, n 代表总体数据的个数; O_i 代表模拟值; P_i 代表实测值; \bar{O} 代表模拟值的均值, \bar{P} 代表实测值的均值。

1.5 情景设置与模型模拟

在验证模型的基础上,为探究不同灌水技术参

数下灌水结束 24 h 后香梨园的土壤水分分布,基于 HYDRUS-2D 模型率定的土壤水分特征参数,设计 27 种模拟情景,灌水定额为 $Q_1 = 15$ mm、 $Q_2 = 30$ mm、 $Q_3 = 45$ mm,滴灌管布置方式为 D1(一行双管)、D2(一行三管)、D3(一行四管),滴灌管布置间距为 $S_1 = 30$ cm、 $S_2 = 40$ cm、 $S_3 = 50$ cm,其余灌水技术参数与大田试验保持一致。

1.6 灌水均匀度评价指标

采用克里斯琴森均匀系数评价滴灌管灌水均匀情况^[23]。

$$C_{uw} = 1 - \frac{\Delta\bar{\theta}}{\bar{\theta}} \quad (14)$$

$$\Delta\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^N |\theta_i - \bar{\theta}|}{N} \quad (15)$$

式中, C_{uw} 为土壤水分分布均匀度; $\Delta\bar{\theta}$ 为实际土壤含水率与平均土壤含水率之差绝对值的平均值; $\bar{\theta}$ 为土壤平均含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_i 为第 i 个取样点的土壤含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); N 为观测点总数。

$$\Delta C_{uw} = (C_{uw2} - C_{uw1}) \times 100\% \quad (16)$$

式中, ΔC_{uw} 为土壤水分分布均匀度变化率(%); C_{uw1} 为灌前土壤水分分布均匀度; C_{uw2} 为灌后土壤水分分布均匀度。

1.7 数据分析

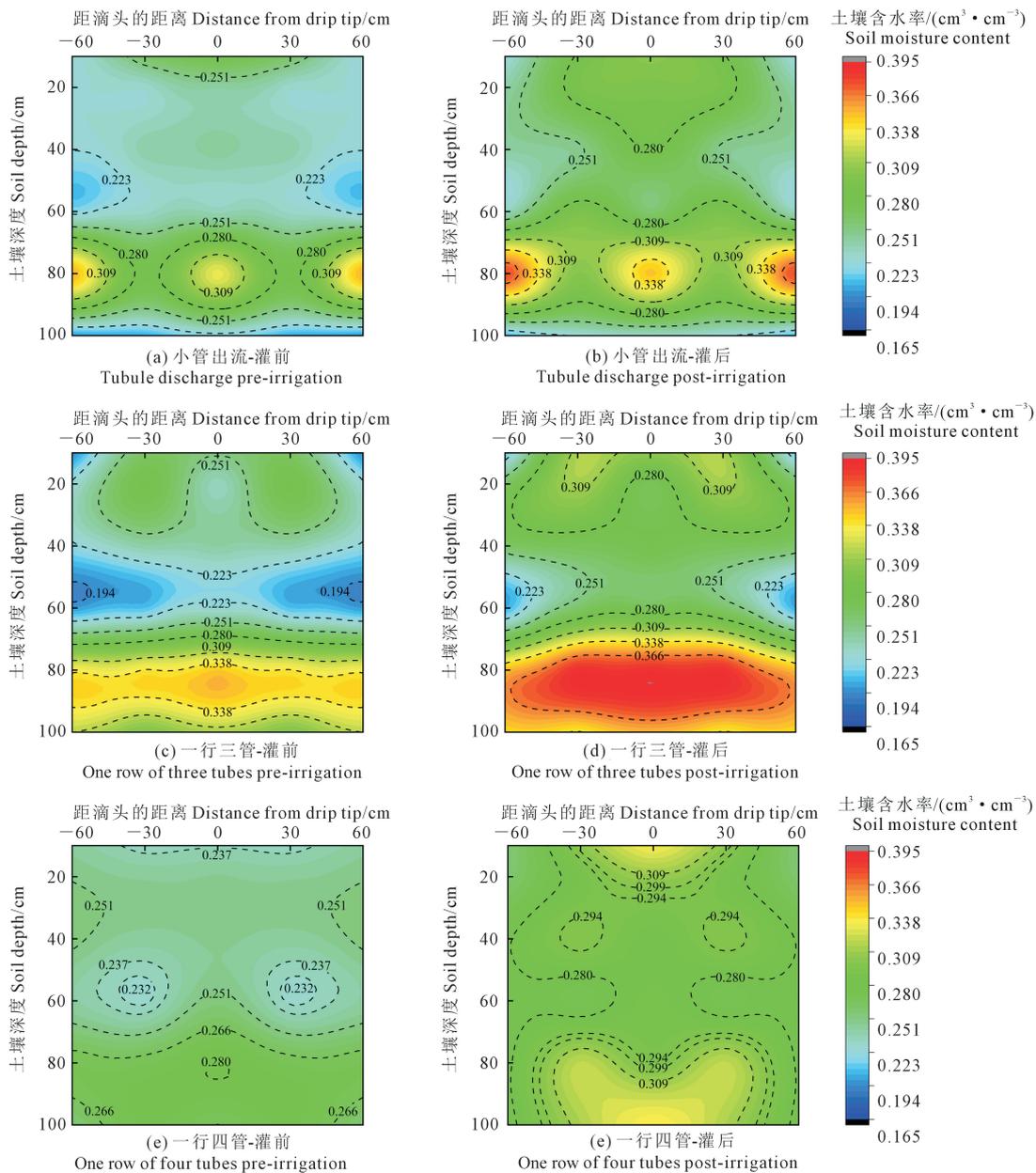
采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理,采用 OriginPro 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同灌水技术下土体剖面含水量分布

2022 年单次灌水开始前和灌水结束 24 h 后,不同灌水技术下土体剖面含水量分布如图 4 所示。不同灌水技术下的土壤含水率在 0~100 cm 土层深度上的垂直变化存在显著差异。随着土层深度的增加,土壤含水率整体呈逐渐增加趋势,同时在 60~70 cm 处明显呈现分层现象。以滴灌管滴头为中心的土壤水分呈对称分布,因此仅对滴头右侧剖面部分的水分进行详细描述。

在距滴头水平距离 0~30 cm、土层深度 0~60 cm 的范围内,小管出流灌后土壤平均含水率较灌前增长 2.5%,土壤含水率以滴头为中心,随距离增加呈逐渐减少趋势;一行三管灌后土壤平均含水率增长 3.3%,土壤含水率分布较均匀;一行四管灌溉后土壤平均含水率增长 3.6%,在灌前土壤含水率以滴头为中心呈逐渐减少趋势。



注:滴灌管滴头位置位于(0,0)点,X轴刻度正负号表示方向,(0,-30)和(0,-60)表示地表距离滴灌管滴头左侧30 cm与60 cm的位置,(0,30)和(0,60)表示地表距离滴灌管滴头右侧30 cm与60 cm的位置。

Note: The drip irrigation pipe head is located at (0,0), the X-axis scale only indicates the direction, (0, -30) and (0, -60) indicate the surface 30 cm and 60 cm from the left of the drip irrigation pipe head, (0,30) and (0,60) indicate the position of 30 cm and 60 cm from the right of the drip irrigation head.

图 4 灌水前后的土壤水分分布

Fig. 4 Soil moisture distribution before and after irrigation

在距滴头水平距离0~30 cm、土层深度60~100 cm的范围内,小管出流灌后土壤平均含水率增长2.7%,土壤含水率呈现出随土层深度先增加后降低趋势;一行三管灌后土壤平均含水率增长3.8%,灌水前后土壤含水率均随着土层深度的增加而增加,灌溉后在80 cm土层处出现水分聚集现象;一行四管灌后土壤平均含水率增长3.9%,灌前与灌后的土壤含水率均随土层深度增加而增加,在70~100 cm

土层深度内,灌溉前后土壤含水率分布均匀,灌前平均土壤含水率为 $0.253 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,灌后平均土壤含水率为 $0.293 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

在距滴头水平距离30~60 cm、土层深度0~60 cm的范围内,小管出流土壤含水率灌前分布较为均匀,灌后土壤含水率随滴头距离的增加呈减少趋势,灌后含水率较灌前增长2.5%;一行三管灌前土壤含水率分布较为均匀,灌后含水率较灌前增长

3.3%,灌后距水平距离 60 cm 处,土壤含水率垂直方向出现先增后减的趋势;一行四管灌前土壤含水率随土层深度的增加而降低,灌后含水率较灌前增长 3.5%。在距滴头距离 30~60 cm、土层深度 60~100 cm 的范围内,土壤含水率分布较均匀。

2.2 HYDRUS-2D 模型率定与验证

2.2.1 参数率定 利用 HYDRUS-2D 中的 Rosetta Lite 模块,输入土壤颗粒组成和容重信息,得到 van Genuchten 模型的土壤水力参数,通过 2022 年实测数据对土壤水力参数进行率定,用 2023 年实测数据进行验证,率定前后水力参数变化如表 1 所示。

2.2.2 实测值与模拟值对比 三种布置方式灌水 24 h 后土壤含水率实测值与模拟值的偏差情况如图 5 所示,在土壤深度 0~20 cm 的范围内,距滴灌管 0 cm 和 30 cm 水平位置处,三种布置方式的土壤含水率实测值均高于模拟值,特别在土壤深度 10 cm 的位置,模拟偏差最为明显,其原因可能是所用滴头流量较大,在灌溉过程中,实际田间土壤构成复杂,地面不平整易在滴头位置处形成积水,而模型假定土壤均质且各向同性,模拟时将土壤表面设定为形状光滑的大气边界,这种假设与实际情况不符。在土壤深度 40~60 cm 范围内,距离滴灌管不同水平位置处的土壤含水率实测值与模拟值之间的偏差较小,表示模拟效果良好。在土壤深度 60~100 cm 范围内,除小管出流外,其他两种布置方式下的土壤含水率实测值与模拟值之间存在显著差异,且实测值大多高于模拟值,这可能是由于该土层的土壤质地不同所致。在三种灌水布置方式下,除一行四管的情况

外,其余两种布置方式下,80 cm 土层深度处,土壤含水率均发生突变,且这种变化趋势是一致的。

整体来看,土壤含水率实测值的测点分布在模拟值曲线的两侧,造成这种情况的原因可能是模型的局限性与实际土壤水分的空间变异性有关,在实际田间环境中,土壤水分在时间和空间尺度上具有高度的变异性,HYDRUS 模型可能无法完全捕捉到这种变异性。

2.2.3 模型验证 三种布置方式下土壤体积含水率实测值与模拟值分布在 1:1 线附近,决定系数 $R^2 > 0.72$,其中一行四管布置土壤含水率的实测值与模拟值尤为接近,显示模型模拟的一致性较好(图 6)。模型评价指标显示,小管出流、一行三管、一行四管的 $RMSE$ 值分别为 0.042、0.059、0.019 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; $NRMSE$ 值分别为 15.59%、20.03%、6.98%; MAE 值分别为 0.012、0.016、0.005 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, NSE 值分别为 0.677、0.831、0.834,表明 HYDRUS-2D 模型能准确模拟滴灌条件下土壤水分的分布状况。

2.3 情景设定及灌水技术参数优选

2.3.1 不同设定情景下土壤水分变化规律 为探究不同灌溉技术参数下的土壤水分状况,本研究构建了 27 种不同的模拟方案,涵盖了灌水量、布置形式和滴灌管布置间距的不同组合。通过对比灌溉结束后 0~24 h 内的水分变化,观测同一灌水量的不同滴灌管布置形式下距离滴灌管 0、30、60 cm 水平位置处不同深度的土壤含水率。由于篇幅有限,因此本文以一行三管布置方式为例来对土壤含水率的变化情况进行描述。

表 1 van-Genuchten 模型相关参数

Table 1 Parameters related to the van-Genuchten model

土层深度 Soil depth /cm	土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	模型率定 Model calibration	θ_r /($\text{cm}^3 \cdot$ cm^{-3})	θ_s /($\text{cm}^3 \cdot$ cm^{-3})	α /(cm^{-1})	n	K_s /($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	l
0~60	砂壤土 Sandy loam	1.47	率定前 Pre-calibration	0.038	0.36	0.01	1.60	42.74	0.5
			率定后 Post-calibration	0.040	0.39	0.01	1.63	42.92	0.5
60~80	砂壤土 Sandy loam	1.42	率定前 Pre-calibration	0.044	0.40	0.01	1.48	28.52	0.5
			率定后 Post-calibration	0.042	0.43	0.01	1.49	28.74	0.5
80~100	砂粉土 Sandy silt	1.44	率定前 Pre-calibration	0.042	0.36	0.01	1.56	27.57	0.5
			率定后 Post-calibration	0.040	0.37	0.01	1.60	27.63	0.5

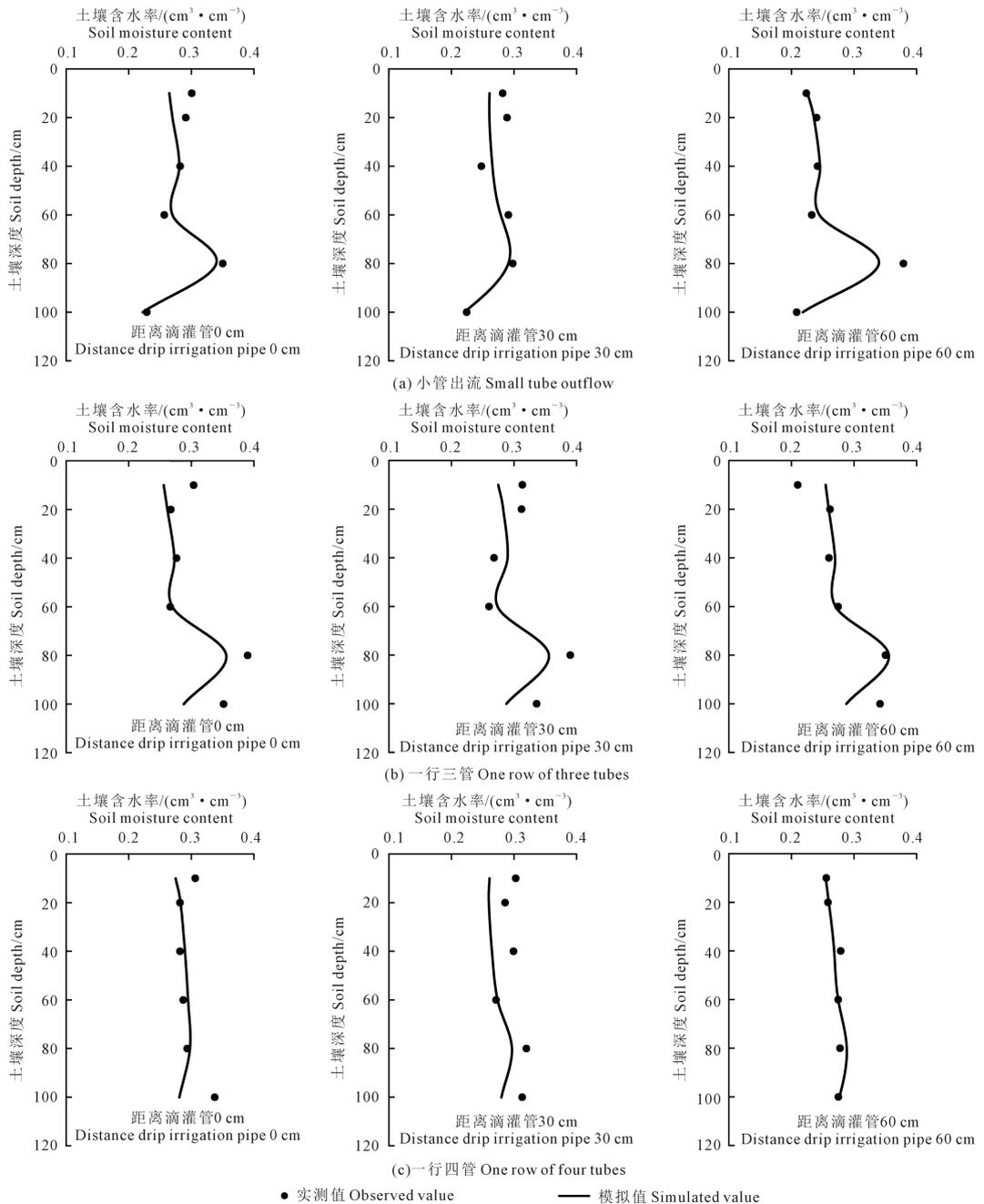
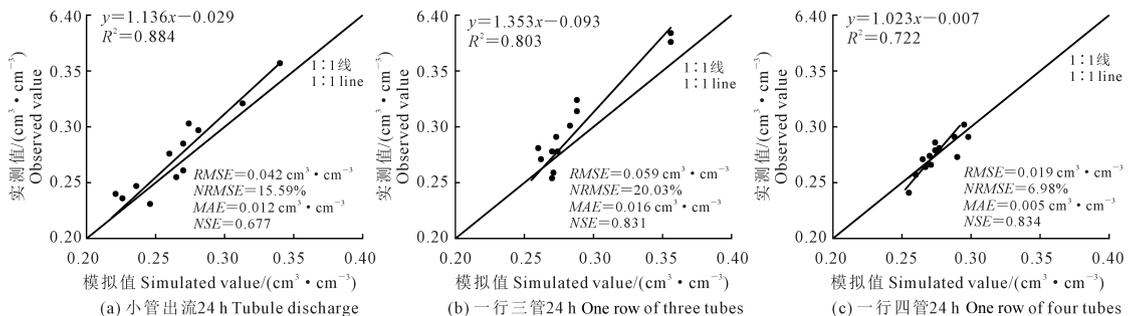


图 5 不同布置方式下土壤含水率实测值与模拟值

Fig.5 Measured and simulated values of soil moisture content under different arrangements



注: $RMSE$ 为均方根误差, $NRMSE$ 为标准均方根误差, MAE 为平均绝对误差, NSE 为纳什效率系数。

Note: $RMSE$ denotes the root mean square error, $NRMSE$ denotes the normalized root mean square error, MAE denotes the mean absolute error, NSE denotes the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient.

图 6 模型模拟结果验证

Fig.6 Validation of the model simulation results

图7为一行三管布置中15 mm灌水量下不同滴灌管布置间距下,距滴灌管水平距离0、30、60 cm处不同土层深度的土壤含水率变化,在不同深度的土壤含水率均随时间呈先增加后减少趋势,最终趋于稳定。Q1D2S1处理下,以距滴灌管水平30 cm、垂直深度80 cm处在灌水结束后2.2 h左右土壤含水率达到峰值,为 $0.3890 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,灌水结束24 h后,距离滴灌管水平0 cm、垂直深度40 cm处的土壤含水率最大,为 $0.3231 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,滴灌管水平距离60 cm、垂直深度60 cm处的土壤含水率最小,为 $0.3005 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;Q1D2S2处理中距离滴灌管水平30 cm、垂直深度100 cm处在灌水结束后2.2 h左右土壤含水率达到峰值,为 $0.3863 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,灌水结束24 h后,距离滴灌管水平0 cm、垂直深度40 cm处的土壤含水率最大,为 $0.3227 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,距离滴灌管水平60 cm、垂直深度40 cm处的土壤含水率最小,为 $0.3008 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

在一行三管布置下,在30 mm灌水量时,不同滴灌管布置间距下距离滴灌管水平距离0、30、60 cm处不同土层深度的土壤含水率变化如图8所示,在不同深度的土壤含水率均随时间呈先增加后减少趋势,最终趋于稳定。Q2D2S1处理在滴灌管水平距离30 cm、垂直深度80 cm时在灌水结束后0.43 h土壤含水率达到饱和,垂直深度100 cm时在灌水结束后1.43 h土壤含水率达到饱和,灌水结束24 h后,滴灌管水平距离0 cm、垂直深度40 cm处的土壤含水率最大,为 $0.3261 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,距滴灌管水平60 cm、垂直深度60 cm处的土壤含水率最小,为 $0.3051 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;Q2D2S2处理滴灌管水平距离30 cm、垂直深度20 cm时,在灌水结束后2.02 h和垂直深度100 cm时,灌水结束后0.68 h土壤含水率均达到饱和,灌水结束24 h后距滴灌管水平距离0 cm、垂直深度40 cm处的土壤含水率最大,为 $0.3250 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,距滴灌管水平距离30 cm、垂直深度100 cm处的土壤含水率最小,为 $0.3054 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;Q2D2S3处理距滴灌管水平距离30 cm、垂直深度60 cm,在灌水结束后0.85 h和水平距离0 cm、垂直深度100 cm处,在灌水结束后1.02 h土壤含水率均达到饱和,灌水结束24 h后,距滴灌管水平距离60 cm、垂直深度20 cm处的土壤含水率最大,为 $0.3265 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,距滴灌管水平距离0 cm、垂直深度80 cm处的土壤含水率最小,为 $0.3040 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

一行三管布置中45 mm灌水量下不同滴灌管布置间距下,距滴灌管水平距离0、30、60 cm处不同土层深度的土壤含水率变化如图9所示,在不同深

度的土壤含水率均随时间呈先增后减的趋势,最终趋于稳定。与15 mm和30 mm灌水量相比,45 mm灌水量在不同水平位置的不同土层深度处土壤含水率达到饱和的曲线更多,Q3D2S1处理在灌水结束24 h后,距滴灌管水平距离0 cm、垂直深度40 cm处的土壤含水率最大,为 $0.3278 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,距滴灌管水平距离60 cm、垂直深度60 cm处的土壤含水率最小,为 $0.3066 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;Q3D2S2处理在灌水结束24 h后,距滴灌管水平距离60 cm、垂直深度20 cm处的土壤含水率最大,为 $0.3280 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,滴灌管水平距离60 cm、垂直深度40 cm处的土壤含水率最小,为 $0.3052 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;Q3D2S3处理在灌水结束24 h后,距滴灌管水平距离60 cm、垂直深度20 cm处的土壤含水率最大,为 $0.3281 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,距离滴灌管水平距离30 cm、垂直深度60 cm处的土壤含水率最小,为 $0.3057 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

在研究一行三管布置下不同位置灌水结束后0~24 h内土壤含水率变化后,结合一行两管与一行四管的对比分析,发现在滴灌管布置方式(D)与布置间距(S)一定时,同一深度处土壤含水率随着灌水量的增大而增大;在滴灌管布置方式(D)与灌水量(Q)一定时,滴灌管布置间距与土壤含水率之间没有明显的变化规律;在灌水量(Q)与滴灌管布置间距(S)一定时,同一深度的土壤含水率随着滴灌管个数的增加而增大。

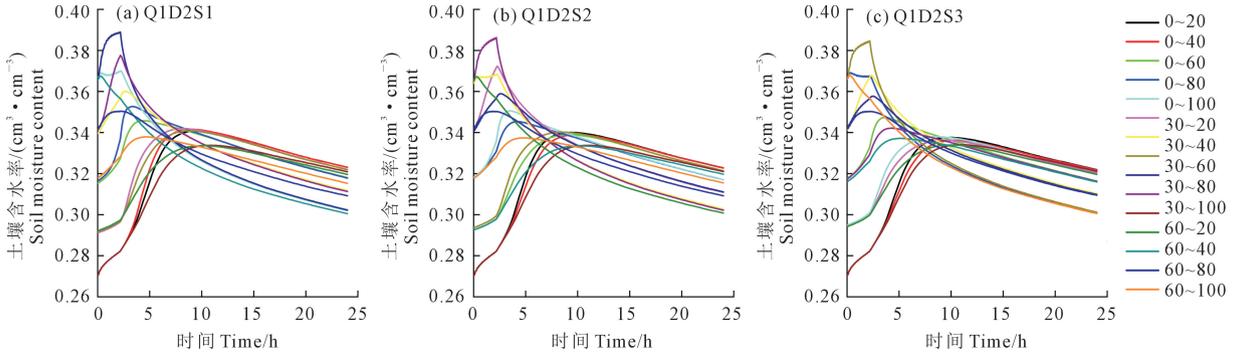
2.3.2 灌水技术参数优选 在滴灌管布置间距(S)一定时,土壤水分分布均匀度变化率 ΔC_{uv} 的峰值出现时的滴灌管布置方式与土层深度不一(表2、3、4)。当 $S=30 \text{ cm}$ 时,一行两管与一行三管在40 cm深度处 ΔC_{uv} 最大,表明土壤水分分布均匀度提高最多,水分分布最为均匀;一行四管在20 cm深度处 ΔC_{uv} 最大。当 $S=40 \text{ cm}$ 时,一行两管在20 cm深度处的 ΔC_{uv} 最大;一行三管与一行四管在40 cm深度时 ΔC_{uv} 最大;当 $S=50 \text{ cm}$ 时,一行两管与一行四管在20 cm深度处 ΔC_{uv} 最大,一行三管在40 cm深度处 ΔC_{uv} 最大。

滴灌管的布置方式(D)对土壤水分分布均匀度有显著影响,且不同布置方式在不同土层深度下对 ΔC_{uv} 的影响程度不同。当滴灌管布置方式(D)与布置间距(S)一定时,随着灌水量的增加,土壤水分分布均匀度变化率 ΔC_{uv} 逐渐降低;当灌水量(Q)与滴灌管布置方式(D)一定时,当间距S从30 cm增加至40 cm时,各土层深度的灌后 ΔC_{uv} 无明显变化规律,当间距S从40 cm增加至50 cm时,各土层深度的灌后 ΔC_{uv} 均呈增加趋势,表明当间距 $S=30 \sim 40$

cm 的布置间距范围内,土壤水分分布均匀度并未明显增加,而当间距 $S = 40 \sim 50$ cm 的范围内,随着间距的增大,土壤水分分布均匀度逐渐提高。当灌水量(Q)与滴灌管布置间距(S)一定时,滴灌管布置方式D从一行两管变为一行三管,除土层深度 80 cm 处,其它土层深度的 ΔC_{uv} 均呈减少趋势;而当滴灌管布置方式D从一行三管变为一行四管,20 cm 和 100 cm 深度处 ΔC_{uv} 有所增加,其它土层深度的

ΔC_{uv} 均减少,这表明随着滴灌管数量的增加, ΔC_{uv} 从整个土体剖面来看呈减少趋势。

邓永辉等^[24]研究发现,幼龄香梨树根系主要集中在 20~60 cm 土层,而在水平方向分布相对均匀。为提高灌溉效率,防止水分无效流失,选择在 20~60 cm 土层深度内灌后土壤水分分布均匀度较高的处理,经过模型验证发现,滴灌处理组合为 Q1D2S1、Q2D2S1、Q3D2S1、Q1D3S2、Q2D3S2、Q3D3S2 在根系



注: 图例中的数值前者表示距离滴灌管的距离,后者表示垂直土层深度,如 0~20 表示距离滴灌管 0 cm 处,垂直深度 20 cm 土层的土壤含水率。下同。

Note: The former of the values in the legend indicates the distance from the drip irrigation pipe and the latter indicates the vertical soil depth, such as 0~20 indicates the moisture content of the soil at a distance of 0 cm from the drip irrigation pipe and a vertical depth of 20 cm of soil layer. The same below.

图 7 不同滴灌管间距 15 mm 灌水量下的土壤含水率变化情况

Fig. 7 Change of soil moisture content under different drip irrigation pipe spacing with 15 mm irrigation amount

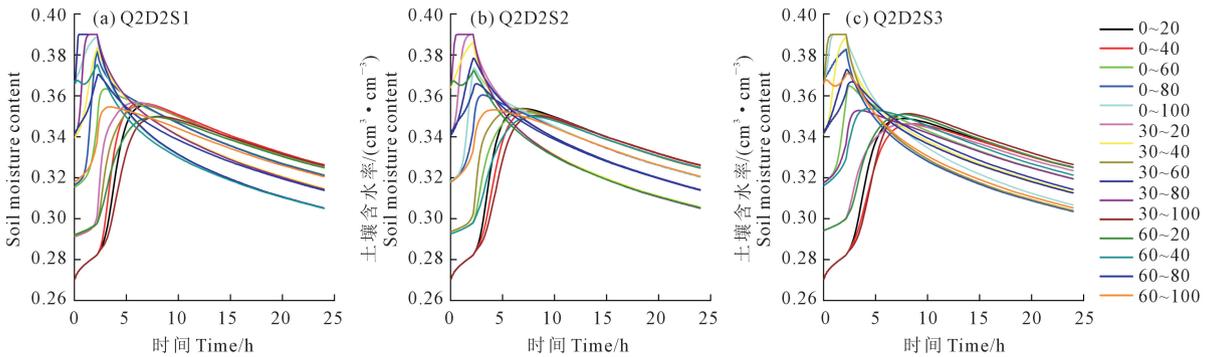


图 8 不同滴灌管间距 30 mm 灌水量下的土壤含水率变化情况

Fig.8 Change of soil moisture content under different drip irrigation pipe spacing with 30 mm irrigation amount

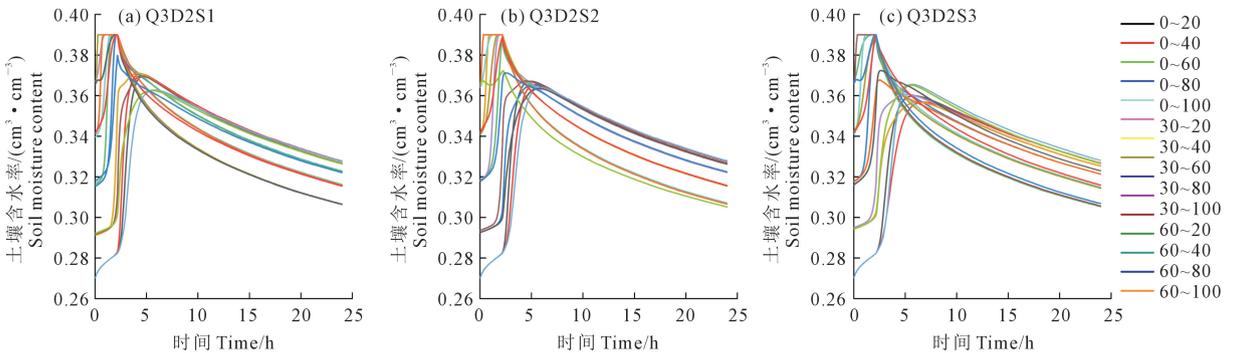


图 9 不同滴灌管间距 45 mm 灌水量下的土壤含水率变化情况

Fig. 9 Change of soil moisture content under different drip irrigation pipe spacing with 45 mm irrigation amount

表2 一行两管情景下土壤含水率均值与灌水均匀度变化

Table 2 Mean value of soil moisture content and irrigation uniformity change under one row of two tubes

情景 Scenario	土层深度 Soil depth /cm	灌前	灌后	ΔC_{uw}	情景 Scenario	土层深度 Soil depth /cm	灌前	灌后	ΔC_{uw}
		Pre-irrigation	Post-irrigation				Pre-irrigation	Post-irrigation	
		均匀度 Uniformity C_{uw1}	均匀度 Uniformity C_{uw2}				均匀度 Uniformity C_{uw1}	均匀度 Uniformity C_{uw2}	
Q1D1S1	20	0.9620	0.9961	3.41	Q2D1S1	20	0.9620	0.9960	3.40
	40	0.9229	0.9815	5.87		40	0.9229	0.9813	5.84
	60	0.9801	0.9987	1.86		60	0.9801	0.9987	1.86
	80	0.9841	0.9974	1.32		80	0.9841	0.9973	1.32
	100	0.9628	0.9920	2.92		100	0.9628	0.9918	2.89
Q1D1S2	20	0.9610	0.9959	3.49	Q2D1S2	20	0.9610	0.9958	3.48
	40	0.9771	0.9987	2.15		40	0.9771	0.9986	2.15
	60	0.9995	0.9995	0.00		60	0.9995	0.9996	0.01
	80	0.9816	0.9968	1.53		80	0.9816	0.9968	1.52
	100	0.9998	0.9998	0.01		100	0.9998	0.9998	0.01
Q1D1S3	20	0.9242	0.9824	5.82	Q2D1S3	20	0.9242	0.9823	5.81
	40	0.9255	0.9832	5.77		40	0.9225	0.9830	5.75
	60	0.9817	0.9971	1.54		60	0.9817	0.9970	1.53
	80	0.9603	0.9913	3.10		80	0.9603	0.9911	3.08
	100	0.9824	0.9951	1.27		100	0.9824	0.9949	1.25
Q3D1S1	20	0.9620	0.9960	3.41	Q3D1S2	20	0.9610	0.9958	3.48
	40	0.9229	0.9812	5.83		40	0.9771	0.9986	2.15
	60	0.9801	0.9987	1.86		60	0.9995	0.9997	0.02
	80	0.9841	0.9973	1.31		80	0.9816	0.9967	1.52
	100	0.9628	0.9917	2.88		100	0.9998	0.9998	0.01
Q3D1S3	20	0.9242	0.9822	5.80	Q3D1S3	80	0.9603	0.9910	3.08
	40	0.9255	0.9830	5.74		100	0.9824	0.9949	1.24
	60	0.9817	0.9970	1.54					

表3 一行三管情景下土壤含水率均值与灌水均匀度变化

Table 3 Mean value of soil moisture content and irrigation uniformity change under one row of three tubes

情景 Scenario	土层深度 Soil depth /cm	灌前	灌后	ΔC_{uw}	情景 Scenario	土层深度 Soil depth /cm	灌前	灌后	ΔC_{uw}
		Pre-irrigation	Post-irrigation				Pre-irrigation	Post-irrigation	
		均匀度 Uniformity C_{uw1}	均匀度 Uniformity C_{uw2}				均匀度 Uniformity C_{uw1}	均匀度 Uniformity C_{uw2}	
Q1D2S1	20	0.9813	0.9991	1.78	Q1D2S2	20	0.9415	0.9906	4.92
	40	0.9431	0.9911	4.80		40	0.9261	0.9841	5.80
	60	0.9806	0.9970	1.65		60	0.9991	1.0000	0.09
	80	0.9637	0.9875	2.38		80	0.9829	0.9953	1.24
	100	0.9821	0.9923	1.03		100	0.9654	0.9880	2.26
Q1D2S3	20	0.9787	0.9987	1.99	Q2D2S1	20	0.9813	0.9992	1.79
	40	0.9419	0.9910	4.91		40	0.9431	0.9910	4.79
	60	0.9646	0.9877	2.31		60	0.9806	0.9971	1.65
	80	0.9829	0.9925	0.97		80	0.9637	0.9873	2.36
	100	0.9816	0.9968	1.52		100	0.9821	0.9924	1.03
Q2D2S2	20	0.9415	0.9904	4.89	Q2D2S3	20	0.9787	0.9988	2.00
	40	0.9261	0.9839	5.79		40	0.9419	0.9907	4.88
	60	0.9991	0.9999	0.09		60	0.9646	0.9875	2.29
	80	0.9829	0.9951	1.22		80	0.9829	0.9926	0.97
	100	0.9654	0.9878	2.24		100	0.9816	0.9968	1.53
Q3D2S1	20	0.9813	0.9992	1.79	Q3D2S2	20	0.9415	0.9905	4.91
	40	0.9431	0.9912	4.80		40	0.9261	0.9839	5.79
	60	0.9806	0.9971	1.65		60	0.9991	0.9999	0.09
	80	0.9637	0.9873	2.35		80	0.9829	0.9951	1.22
	100	0.9821	0.9923	1.02		100	0.9654	0.9878	2.24
Q3D2S3	20	0.9787	0.9989	2.01	Q3D2S3	80	0.9829	0.9927	0.98
	40	0.9419	0.9907	4.88		100	0.9816	0.9969	1.54
	60	0.9646	0.9875	2.29					

表 4 一行四管情景下土壤含水率均值与灌水均匀度变化

Table 4 Mean value of soil moisture content and irrigation uniformity change under one row of four tubes

情景 Scenario	土层深度 Soil depth /cm	灌前		ΔC_{uu}	情景 Scenario	土层深度 Soil depth /cm	灌前		ΔC_{uu}
		Pre-irrigation	Post-irrigation				Pre-irrigation	Post-irrigation	
		均匀度 Uniformity C_{uu1}	均匀度 Uniformity C_{uu2}				均匀度 Uniformity C_{uu1}	均匀度 Uniformity C_{uu2}	
Q1D3S1	20	0.9414	0.9906	4.92	Q1D3S2	20	0.9787	0.9988	2.01
	40	0.9595	0.9956	3.61		40	0.9597	0.9958	3.61
	60	0.9995	0.9998	0.03		60	0.9634	0.9919	2.85
	80	0.9826	0.9971	1.45		80	0.9652	0.9880	2.28
	100	0.9615	0.9915	2.99		100	0.9830	0.9928	0.98
Q1D3S3	20	0.9248	0.9833	5.85	Q2D3S1	20	0.9414	0.9905	4.91
	40	0.9787	0.9989	2.02		40	0.9595	0.9958	3.62
	60	0.9813	0.9970	1.58		60	0.9995	0.9998	0.02
	80	1.0000	0.9999	0.00		80	0.9826	0.9972	1.46
	100	0.9653	0.9880	2.27		100	0.9615	0.9912	2.97
Q2D3S2	20	0.9787	0.9988	2.02	Q2D3S3	20	0.9248	0.9832	5.84
	40	0.9597	0.9957	3.61		40	0.9787	0.9989	2.02
	60	0.9634	0.9919	2.84		60	0.9813	0.9970	1.57
	80	0.9652	0.9878	2.26		80	1.000	1.000	0
	100	0.9830	0.9929	0.99		100	0.9653	0.9878	2.25
Q3D3S1	20	0.9414	0.9905	4.91	Q3D3S2	20	0.9787	0.9989	2.02
	40	0.9595	0.9958	3.63		40	0.9597	0.9958	3.61
	60	0.9995	0.9998	0.02		60	0.9634	0.9919	2.85
	80	0.9826	0.9974	1.48		80	0.9652	0.9878	2.25
	100	0.9615	0.9914	2.98		100	0.9830	0.9929	0.98
Q3D3S3	20	0.9248	0.9833	5.85	Q3D3S3	80	1.000	1.000	0.00
	40	0.9787	0.9989	2.02		100	0.9653	0.9877	2.24
	60	0.9813	0.9970	1.57					

集中分布区域 20~60 cm 内,土壤水分分布均匀度均大于 0.991,在根系稀疏的区域,土壤水分分布均匀度相对较低。当布置方式为一行三管、布置间距 30 cm 或布置方式为一行四管、布置间距为 40 cm 时,灌溉水能够在香梨根系集中区实现均匀分布,从而最大化提高水分利用效率。

3 讨论

3.1 HYDRUS-2D 模型准确度分析

本研究通过对土壤含水率的测定,利用 HYDRUS-2D 模型对其进行验证,并模拟不同灌水参数下的土壤水分运动情况。对不同布置方式下土壤含水率实测值与模拟值的精度进行分析,研究结果整体上模型精度与李豆豆等^[13]、Fan 等^[18]、张颢晖等^[25]研究无较大差异,本试验对土壤表层(0~20 cm)的土壤含水率模拟值与实测值偏差较大,原因可能是由于未考虑到根系吸水,且土壤水分入渗过程受到土壤质地、土壤容重、初始土壤含水率、灌水参数等多种因素的影响,第二是模型本身对土壤结构和水分迁移过程的简化造成的。田间灌后精准预测不同布置方式下土壤水分分布还是较为困难^[25]。由于田间试验成本较高,操作困难,且难以实现连续监测,因此大部分学者^[17, 26-27]对于土壤水分运动的研究都是通过室内玻璃箱来进行观测,然而,室内玻璃箱试验中的土壤均为均质土壤,不能

很好地反映大田实际情况。在今后对 HYDRUS-2D 模型应用时应考虑到溶质运移、根系吸水等因素对土壤水分运动的影响。

3.2 HYDRUS-2D 不同情景水分模拟

27 种情景模拟下的土壤含水率在灌水后均随时间的推移呈现“先增后减”的趋势。在滴灌管水平距离 0 cm 位置处,各土层深度的土壤含水率均高于水平距离 30 cm 处的对应值,这一现象归因于滴灌管水平距离为 0 cm 时,滴头直接位于土壤表面上方,使灌溉水直接与土壤表面接触,从而促进了土壤对水分的快速吸收。当滴灌管水平距离增加到 30 cm 时,滴头与土壤表面之间的距离增加,滴入的水分需要穿过一定的空气层才能接触到土壤表面。这可能导致部分水分在到达土壤表面之前就已经蒸发或散失,从而降低了土壤含水率。此外,滴头与土壤表面间距增加,使得水分在土壤中的扩散和渗透范围扩大,可能导致水分在更深层次的土壤中分布更广泛,进一步降低了各层土壤的含水率。

27 种情景模拟的初始含水率设置一致,随着土层深度的增加,土壤含水率呈上升趋势。因此,在灌溉后 1.5 h,部分土层土壤含水率达到饱和含水率,土壤含水率随着时间的均匀变化可归因于以下几个因素:一是 HYDRUS-2D 数值模型采用离散化的手段解析连续的物理过程,避免了离散数据中的剧烈波动;二是模型通过迭代计算各网格点上的水

流及溶质迁移情况,并依次更新网格点的土壤含水率。由于计算基于离散化网格进行,故得到的土壤含水率随时间变化曲线通常较为平滑;三是模型所采用的时间步长较小,能够更频繁地更新网格点的土壤含水率数据,从而生成更平滑的曲线,若模拟时间步长过大,则可能导致曲线呈现较大的波动。

3.3 灌水技术参数对土壤水分分布均匀度的影响

为了实现有效灌溉,确保作物得到均匀灌溉至关重要,灌溉不均可能导致作物生长不均,而过度灌溉则会造成水资源浪费。通过对比灌溉前后不同灌水技术参数情景下的土壤体积含水率,可以评估土壤水分的分布均匀度。

在滴灌管布置方式和滴灌管间距一定的情景模拟中,灌后土壤水分分布均匀度随灌水量的增加略有下降。其中在 15 mm 灌溉量下土壤水分分布均匀度达到峰值,而后随灌水量的增加而降低,其原因可能为:一是初始土壤含水率的线性变化设置影响了灌溉后土壤水分分布均匀度。较高的初始含水率有助于提高土壤水分的分布均匀度。二是灌溉量的增加导致不同土层含水率提高,土壤水分分布均匀度计算公式可导致计算出的水分分布均匀度值减小。

当灌水量与滴灌管布置方式一致时,不同滴灌管布置间距下,土壤水分分布均匀度未表现出明显的整体性增加或降低趋势。其原因可能为滴灌管间距的增加扩大了控制的灌溉面积,导致水分在土壤中的扩散范围变大。然而,由于砂壤土对水分的吸附和保持能力有限,较大的铺设间距可能会使水分扩散和渗透过程更加困难,导致土壤水分分布不均,这与衣若晨等^[28]研究结论基本一致。

在一定的灌水量与滴灌管布置间距下,不同的滴灌管布置方式对不同土层深度的土壤水分分布均匀度并无明显整体性增加或降低的规律,主要受到灌溉方式和降水的影响,这与张泽锦等^[29]研究结论相似。当从一行两管变为一行三管时,在特定土层深度处的土壤水分分布均匀度表现出增加或减少的趋势,这直接受滴灌管数量及滴头分布密度的影响。在相同灌溉量下,增加滴灌管数量意味着滴头数量增加,水分释放点更加密集,促进土壤水分均匀分布,因而提高了土壤水分的均匀度,这与衣若晨等^[28]研究结果一致。

4 结 论

1)在 0~100 cm 土层内,土壤含水率随土层深度的增加整体呈逐层增加趋势;在距滴灌管 0~60

cm 水平距离内,土壤含水率随滴灌管数量的增加而增大。

2)HYDRUS-2D 模型对不同滴灌管布置方式下 20~100 cm 土层灌后的土壤含水率实测值与模拟值的模型评价指标发现, $R^2 = 0.722 \sim 0.884$, $RMSE = 0.019 \sim 0.059 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, $NRMSE = 6.98\% \sim 20.03\%$, $MAE = 0.005 \sim 0.016 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, $NSE = 0.677 \sim 0.834$,表明模型对于土壤水分运移的模拟精度较高。

3)使用 HYDRUS-2D 模型对 27 种情景进行模拟后发现,当滴灌管数量与滴灌管间距不变时,同一土层深度的土壤含水率随灌水量的增大而增大;当灌水量与滴灌管间距不变时,同一土层深度的土壤含水率随滴灌管数量的增加而增大。

4)通过对 27 种情景下土壤水分分布均匀度对比,发现滴灌管布置方式为一行三管、滴灌管间距为 30 cm 组合与布置方式为一行四管、滴灌管间距为 40 cm 的组合,在香梨根系集中区域内的平均灌水均匀度最大,分别为 0.9958 和 0.9955。

参 考 文 献:

- [1] 张振龙,孙慧. 新疆区域水资源对产业生态系统与经济增长的动态关联——基于 VAR 模型[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5273-5284.
ZHANG Z L, SUN H. Research on the dynamic relationship between water-intensive industrial ecosystem and economic growth in Xinjiang based on VAR model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5273-5284.
- [2] 桑巴叶,陈启民,阿通古丽·买买提,等. 库尔勒香梨种植区地下井式灌溉条件下土壤水分运移规律研究[J]. 防护林科技, 2021, (6): 24-26, 32.
SANG B Y, CHEN Q M, A Tong Gu Li - Mai Mai Di, et al. Soil moisture migrations regularity of Korla fragrant pear under well type irrigation [J]. Protection Forest Science and Technology, 2021, (6): 24-26, 32.
- [3] 王京晶,蒋之宇,吴川东. 中国水资源开发利用现状的问题及解决对策[J]. 居舍, 2018, (13): 197-198.
WANG J J, JIANG Z Y, WU C D. The problems and solutions of the current situation of water resources development and utilization in China [J]. Residence, 2018, (13): 197-198.
- [4] 保卫志. 农业水利工程中高效节水灌溉的技术关键点分析[J]. 农业开发与装备, 2022, (5): 119-120, 141.
BAO W Z. Analysis of key technical points for efficient water-saving irrigation in agricultural water conservancy engineering[J]. Agricultural Development and Equipments, 2022, (5): 119-120, 141.
- [5] 李晓渊. 新疆干旱区农业高效节水灌溉技术示范经济评价研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010.
LI X Y. Research on the economic evaluation of agricultural efficient water saving irrigation technology demonstration in arid areas of Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2010.
- [6] 孙明德,武亨飞,田海青,等. 覆膜隔沟交替灌溉对梨树生长、产量和果实品质的影响[J]. 中国果树, 2017, (3): 28-32.
SUN M D, WU H F, TIAN H Q, et al. Effects of alternate irrigation with film mulching and furrow separation on the growth, yield, and fruit quality of pear trees[J]. China Fruits, 2017, (3): 28-32.
- [7] 宰松梅,仵峰,温季,等. 大田地下滴灌土壤水分分布均匀度评价方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 51-57.

- ZAI S M, WU F, WEN J, et al. Evaluation method of soil water distribution uniformity under conditions of field subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 51-57.
- [8] 郑耀泉, 陈渠昌. 微灌均匀度参数之间的关系及其应用[J]. 灌溉排水, 1994, (2): 7-10.
- ZHENG Y Q, CHEN Q C. The relationship and application of uniformity parameters in micro irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1994, (2): 7-10.
- [9] 李明思, 谢云, 崔伟敏. 线源滴灌土壤湿润均匀性的影响因素试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(6): 11-14, 33.
- LI M S, XIE Y, CUI W M. Experimental study on factors influencing soil moisture uniformity under linear source drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(6): 11-14, 33.
- [10] 孙海燕, 王全九. 滴灌湿润体交汇情况下土壤水分运移特征的研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 115-118.
- SUN H Y, WANG Q J. Research for soil water movement from drip irrigation interference infiltration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 115-118.
- [11] 周方, 席奇亮, 薛刚, 等. 不同滴灌施肥策略对植烟土壤水、盐运移及再分布的影响[J]. 节水灌溉, 2023, (11): 99-106, 114.
- ZHOU F, XI Q L, XUE G, et al. Effects of different fertigation strategies on soil water and salt movement and redistribution in tobacco-growing soil[J]. Water Saving Irrigation, 2023, (11): 99-106, 114.
- [12] CHEN R, LI H, WANG J, et al. Evaluating soil water movement and soil water content uniformity under sprinkler irrigation with different soil texture and irrigation uniformity using numerical simulation[J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130356.
- [13] 李豆豆, 席本野, 唐连峰, 等. 砂壤土下滴灌毛白杨幼林土壤水分运移规律与模拟[J]. 林业科学, 2018, 54(12): 157-168.
- LI D D, XI B Y, TANG L F, et al. Patterns of soil water movement in drip-irrigated young *Populus tomentosa* plantations on sandy loam soil and their simulation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(12): 157-168.
- [14] XI B Y, BLOOMBERG M, WATT M S, et al. Modeling growth response to soil water availability simulated by HYDRUS for a mature triploid *Populus tomentosa* plantation located on the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 243-254.
- [15] QIN H P, PENG Y N, TANG Q L, et al. A HYDRUS model for irrigation management of green roofs with a water storage layer[J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 399-408.
- [16] 黄凯, 蔡德所, 潘伟, 等. 广西赤红壤甘蔗田间滴灌带合理布设参数确定[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 136-143.
- HUANG K, CAI D S, PAN W, et al. Determination of drip tapes layout parameters for irrigation of sugarcane in latosolic red soil in Guangxi autonomous region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 136-143.
- [17] 代智光. 基于 Hydrus-2D 的红壤区涌泉根灌自由入渗土壤水分运移数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 27-31.
- DAI Z G. Numerical simulation of soil water movement in free infiltration under surge-root irrigation in red soil region based on Hydrus-2D[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 27-31.
- [18] FAN Y W, YIN W F, YANG Z W, et al. Moisture content distribution model for the soil wetting body under moistube irrigation[J]. Water SA, 2023, 49(1): 73-91.
- [19] 彭星凯, 蔡守华. 基于 Hydrus-2D 的果树涌泉灌溉环沟技术要素优化研究[J]. 水科学与工程学报, 2021, (6): 9-15.
- PENG X K, CAI S H. Optimization study on technical elements of circular ditch of fruit tree bubbler spring irrigation based on Hydrus-2D [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2021, (6): 9-15.
- [20] 王德维, 徐立燕, 周云, 等. 土壤墒情自动监测与人工烘干法比例研究[J]. 江苏水利, 2017, (7): 68-72.
- WANG D W, XU L Y, ZHOU Y, et al. Study on comparing measurement of soil moisture automatic monitoring and artificial drying method [J]. Jiangsu Water Resources, 2017, (7): 68-72.
- [21] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.
- [22] 武梦晗, 王弋. 新疆莎车灌区农作物需水量和产量特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2023, 42(8): 1858-1868.
- WU M H, WANG Y. Characteristics and influencing factors of crop water demand and yield in Shache irrigation area of Xinjiang [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(8): 1858-1868.
- [23] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(892): 1-8.
- [24] 邓永辉, 乔攀, 郑强卿, 等. 漫灌下幼树期库尔勒香梨根系分布特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(8): 1563-1572.
- DENG Y H, YAN P, ZHENG Q Q, et al. Distribution of young Korla fragrant pear treeroots under flooding irrigation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2023, 29(8): 1563-1572.
- [25] 张颢晖, 严海军, 惠鑫, 等. 移动滴灌系统土壤水分入渗试验与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 158-168.
- ZHANG H H, YAN H J, HUI X, et al. Experiments and numerical simulations of soil water movement under mobile drip irrigation system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(6): 158-168.
- [26] 李耀刚, 蒋存仁. 滴灌双点源土壤水分入渗特性数值模拟研究[J]. 节水灌溉, 2021, (1): 33-38.
- LI Y G, JIANG C R. Numerical simulation of soil water infiltration under drip irrigation with double point source emitter[J]. Water Saving Irrigation, 2021, (1): 33-38.
- [27] 傅建平, 兰再平, 孙尚伟, 等. 滴灌条件下杨树人工林土壤的水分运移[J]. 林业科学, 2013, 49(6): 25-29.
- FU J P, LAN Z P, SUN S W, et al. Soil water movement in a poplar plantation under drip irrigation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(6): 25-29.
- [28] 衣若晨, 申孝军, 李松敏, 等. 豫北地区冬小麦滴灌灌水技术参数研究[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 208-216.
- YI R C, SHEN X J, LI S M, et al. Research on drip irrigation technical parameters of winter wheat in northern Henan province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 208-216.
- [29] 张泽锦, 唐丽, 李跃建, 等. 滴灌带布置方式对宽厢栽培茼蒿土壤水盐分布及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 23-27, 47.
- ZHANG Z J, TANG L, LI Y J, et al. The effect of drip irrigation tape layout on soil water and salt distribution and yield of lettuce in wide box cultivation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 23-27, 47.