

棚内微咸水覆膜滴灌下带间土壤水盐分布特征模拟

陆培榕 邢玮麟 杨玉杰 刘文龙 罗 纨

(扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

摘要: 微咸水覆膜滴灌在发挥节水效益的同时应避免土壤盐分的积聚,在缺乏大水淋洗的设施大棚内,覆膜对土表局部蒸发的抑制伴随滴灌湿润体的交汇,加剧了滴灌带带间水盐分布的不规则性,导致土壤积盐的潜在风险增加。针对上述问题,以布设形式为“两膜两行”的覆膜滴灌田间小区为试验对象,通过 HYDRUS 模型构建了不同滴头流量(0.5~3.0 L/h)及膜间裸地间距(0~50 cm)组合情景下的二维土壤剖面模拟域,并针对滴头处的带间区域进行水盐动态分布的模拟研究。结果表明,所建模型能较为精确地描述带间剖面内水盐的分布状况,且模拟精度随与滴头水平距离的减小而提升。当膜间裸地间距从 50 cm 缩小至 0 cm 时,带间剖面土壤的平均含水率从 25.12 cm³/cm³ 上升至 28.76 cm³/cm³,平均土壤盐分质量浓度从 9.53 g/L 下降至 6.25 g/L;滴头流量对带间区域内土壤水盐含量的影响程度相对较低,流量 0.5、3.0 L/h 下土壤体积含水率及盐分质量浓度的最大差异仅分别为 0.14 cm³/cm³ 和 0.22 g/L,且均出现在膜间裸地间距为 50 cm 的情景下。经多轮灌水蒸发后,带外区积聚的盐分将向带间区扩散,并随膜间裸地间距的减小,土壤含盐量最低值的水平位置将从滴头处向带间区推移。研究成果可为设施大棚环境下选取适宜的低盐作物栽种位置提供理论依据。

关键词: 微咸水;覆膜滴灌;土壤水盐分布;数值模拟

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)07-0360-12

OSID:



Simulation of Soil Water and Salt Distribution Characteristics within Area between Drip Tapes under Mulched Brackish Water Drip Irrigation in Greenhouses

LU Peirong XING Weilin YANG Yujie LIU Wenlong LUO Wan

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Film-mulched drip irrigation with brackish water should avoid soil salt accumulation to maximize the benefits of water-saving. However, soil leaching by rainfall or flood irrigation is lack under greenhouses condition, the partial inhibition of surface evaporation by film mulching combined with the wetted volume intersection due to double-point source drip irrigation exacerbates the irregularity of water and salt distribution in the area between drip tapes (ABDT), which is not conducive to the effective implementation of salt control measures. Therefore, taking the field experimental plot of mulched drip irrigation with the layout of “two films and two rows” as the research object, and using the HYDRUS – 2D model to simulate the dynamic distributions of soil water and salt in ABDT based on the two-dimensional simulation domains considering different drip discharge fluxes (0.5~3.0 L/h) and bare soil spacing between films (0~50 cm). The results indicated that the established model can accurately describe the water and salt distribution in ABDT, and reducing the horizontal distance from the emitter could obtain a high simulation accuracy. As the bare land between the films was decreased from 50 cm to 0 cm, the average moisture content of the soil in ABDT was increased from 25.12 cm³/cm³ to 28.76 cm³/cm³, and the average soil solute concentration in ABDT was decreased from 9.53 g/L to 6.25 g/L. The effect of drip discharge fluxes on soil water-salt distribution in ABDT was relatively low, the maximum differences in soil volume moisture content and salt mass concentration between treatments

收稿日期: 2023-04-25 修回日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109068)、中国博士后科学基金面上项目(2022M712690)、江苏省博士后科研计划项目(2021K220B)和扬州市科技计划项目(YZU202101)

作者简介: 陆培榕(1992—),男,讲师,博士,主要从事农田土壤水盐运移研究,E-mail: lupeirong@yzu.edu.cn

通信作者: 罗纨(1967—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水资源与环境保护研究,E-mail: luowan@yzu.edu.cn

with discharge fluxes of 0.5 h/L and 3.0 h/L were only 0.14 cm³/cm³ and 0.22 g/L, respectively, and both occurred in the bare soil spacing between films of 50 cm. Additionally, after long-term dry-wet alternation, salt accumulated on the outside of the drip belt might diffuse inward to ABDT, and with the decrease of bare soil spacing between films, the horizontal position of the lowest soil salinity would move from the location of dripper to ABDT. Findings of this research can provide a theoretical basis for selecting suitable low-salinity planting locations for crop cultivation in greenhouse condition.

Key words: brackish water; mulched drip irrigation; soil water-salt distribution; numerical simulation

0 引言

覆膜滴灌是将具有保水保墒作用的地表覆膜与局部控制性供水的滴灌方式相结合的高效节水技术^[1]。由于覆膜限制了土壤与外部大气的接触,降低了灌后土壤的水分蒸发及溶质上溯,使得即便在湿润淋洗程度有限的滴灌模式下,微咸水也能作为有效的灌水资源^[2-3]。然而,滴灌属于典型的点源入渗,灌水受土壤基质势的影响将以湿润体的形式分布于土壤内,在蒸发过程中,微咸水输入的盐分将滞留于湿润体外侧,并随灌水次数增加而逐渐积聚^[4],导致土壤中水分和盐分的动态分布过程存在明显的不一致性,当涉及地表覆膜时,土表蒸发与非蒸发面交替存在,水盐动态运移的复杂程度将进一步加剧^[5],尤其在缺乏雨水和漫灌淋洗的设施大棚内,盐分的积聚将存在局部叠加,对作物生长造成胁迫^[6]。

现阶段,随着农业种植模式的多样化以及设施大棚内滴灌布设模式的集约化,针对覆膜滴灌条件下的水盐运移研究由单点源入渗扩展至多点源交汇。研究的对象以多点源入渗形成的交汇型湿润体几何形态、收缩及扩张速率、脱盐及积盐区的划分为主。虎胆·吐马尔白等^[7]以室内砂壤土土槽试验为基础,研究了滴头间距为 30 cm 时不同滴头流量和灌水量下湿润体交汇区的盐分分布特性,发现滴头下方的脱盐深度大于交汇区的脱盐深度,且脱盐深度的差异随滴头流量的减小而增大。王卫华等^[8]以采用膜下滴灌的粉壤土棉田为研究区域,发现膜下湿润体交汇区的含水率随滴头流量的增大而增大,且两滴头间湿润体交汇区径向宽度与灌水历时呈幂函数关系。齐智娟等^[9]在轻度盐渍化的玉米田中对比了滴头间全膜覆盖和半膜覆盖的处理方式,发现使用微咸水滴灌时全膜覆盖处理中两滴头间 0~30 cm 的土层内形成了明显的脱盐带,而在半膜覆盖的条件下土壤脱盐区仅存在于膜下局部区域。为进一步可视化、量化地描述土壤水盐的分布特征,数值模拟方法伴随计算机技术的发展得以在滴灌湿润体交汇下土壤水盐动态变化的研究中发挥作用,并以 HYDRUS 数值模型为主取得了一系列

成果。例如,王维娟等^[10]运用 HYDRUS 模型,对不同间距下的双点源滴灌湿润体交汇轮廓进行了三维状态下的动态模拟,结果显示,交汇区湿润体形状从初期的 1 个半球体逐步演变为 2 个分离的近似半球体。CHEN 等^[11]模拟研究了间作模式下采用膜下滴灌时土壤水盐的运移特征,分别对不同作物的膜下根系区以及膜间裸地进行子区划分,分析了各子区内的水分及溶质的动态形式以及各子区间的通量交互,发现瞬时的水平向通量交互多发生于灌水阶段,而缓慢的垂向通量交互主要存在于灌后蒸发阶段。GUO 等^[12]模拟了全膜覆盖形式下湿润体存在交汇时棉田内土壤水盐的分布变化,结果表明,土壤盐分的垂向分布差异随灌水次数的增加而逐步显现,而改变滴头流量造成的影响在不同生育期内表现不一。上述模拟研究表明,覆膜滴灌形成的湿润体交汇下水盐的分布变化具有瞬时性和局部性,在灌后蒸发过程中的变化则较为缓慢且一致。然而,个别的灌水蒸发过程对土壤水盐分布的改变不足以对长期的作物生长造成显著影响。因此,进行针对湿润体交汇区域内水分总体变化趋势以及盐分累积分布特征的研究将更具实用意义。

本文以设施大棚内田间小区试验为基础,结合 HYDRUS 模型对微咸水膜下滴灌时土壤二维剖面内的水盐动态进行数值模拟。同时,为充分考虑滴头间湿润体交汇程度在灌水和蒸发过程中的空间多变性,采用剖面子区分析的方式,将存在滴头的滴灌带带间区域作为主要的分析对象,探究在不同覆膜宽度及滴头流量下带间剖面水盐分布的动态变化及累积特征,以期为设施环境微咸水覆膜滴灌模式下创造适宜作物根系生长的低盐环境提供理论支撑与方案参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验设计

试验于江苏省扬州市沙头镇现代农业产业园(32°17'N,119°29'E)内的设施大棚中进行。棚内 0~100 cm 土层的质地为砂壤土,平均砂粒(粒径 0.05~2 mm)占比为 55.36%,粉粒(粒径 0.002~0.05 mm)占比 31.78%,粘粒(粒径 0~0.002 mm)

占比为 12.86% ;平均土壤容重为 1.41 g/cm³,饱和导水率为 47.28 cm/d,饱和含水率和田间持水率分别为 0.42 cm³/cm³和 0.25 cm³/cm³。试验期间棚内地下水埋深的波动范围为 1.63 ~ 1.97 m。该设施大棚长期抽取地下水(平均电导率 1.37 dS/m)进行滴灌,且缺乏雨水或漫灌的淋洗,导致棚内土壤呈轻度盐渍化,试验前 0 ~ 100 cm 土层的平均含盐量为 1.52 g/kg。

以田间小区试验为研究基础,在棚内划分 2 m × 2 m 的地块,采用“两膜两行”滴灌布置模式(图 1),膜宽 20 cm,滴头间距为 35 cm,两条滴灌带间距 80 cm,由外接马氏瓶对小区内的滴灌系统进行恒压供水,并采用压力补偿式灌水滴头将流量统一控制为 1.6 L/h。同时,由于取水井内地下水含盐量存在波动,故使用产业园内提供的自来水(平均电导率 0.22 ~ 0.30 dS/m)与氯化钠晶体(分析纯)配比质量浓度固定为 3 g/L 的盐溶液进行灌水。各小区中均嵌入张力计,用于监测地表以下深度 15 cm 处的土壤水势,试验设计两组灌水处理 T20 和 T40,分别对应上一轮灌水后土壤基质势降至 -20 kPa 和 -40 kPa 时进行下一轮滴灌的灌水制度,两组处理每轮的灌水持续时间均为 2 h。此外,每组处理重复 3 次,在棚内共计划分 6 块滴灌小区。试验于 2021 年 7 月中旬开始至 10 月下旬结束,总时长为 90 d,为避免作物根系随机性的扩张对土壤水盐动态分布的影响,试验期内未涉及作物的种植。试验过程中,设施大棚仅开启两侧部分的通风口,无降雨或其他形式的灌水。

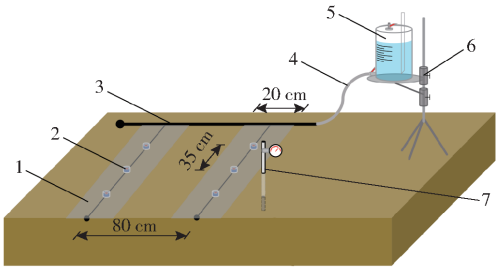


图 1 试验小区覆膜滴灌布设形式示意图
Fig.1 Schematic of mulched drip irrigation layout pattern in each experimental pot

1. 地膜 2. 灌水滴头 3. 聚乙烯输水管 4. 橡胶软管 5. 供水马氏瓶 6. 高度调节托架 7. 张力计

1.2 观测指标与换算方法

在每轮灌水前选用内径为 2 cm 的土钻对与滴头水平距离 10、20、30、40 cm 处,深度 10、20、30、40 cm 处的点位进行取样,用于测定含水率及电导率。由于小区内各滴头对应的流量及灌水量相同,故每轮取样时选取不重复的滴头对相应的位置进行取样。每次取样完毕后,使用试验小区内的土壤对

取土孔进行回填,防止大孔隙优先流对灌水及蒸发过程中土壤水分及溶质运移的影响。采用干燥法测定不同取样点位的土壤质量含水率,并根据土壤容重换算成相应的体积含水率。部分取回的土样经风干、碾磨、过筛(孔径 1 mm)后,与蒸馏水混合(土水质量比 1 : 5),制备土壤浸提液。采用电导率仪(DDBJ-350 型,上海雷磁创益仪器有限公司)室温(20℃)下测定浸提液的电导率,并与蒸发结晶法进行比对,得出土壤含盐量与电导率的关系式为

S = 4.12EC_{1:5} + 0.23 (1)

式中 S——土壤含盐量,g/kg
EC_{1:5}——土水质量比为 1 : 5 的土壤浸提液电导率,dS/m

土壤潜在蒸发量通过小型蒸发皿(DF-AM3 型,内径 20 cm,北京东方鑫鸿科技有限公司)的蒸发量进行估测。根据已有研究理论,当土壤含水率较高(大于 70% 田间持水率)时,土壤处于非限制性蒸发状态,相应的蒸发量与大气蒸发力成正比,可用水面蒸发量乘以相应的系数进行估测^[13-14]。然而,在实际田块中,维持大体积土壤的高含水率,并持续地监测蒸发造成的水分耗散量,实现起来较为困难。故采用 100 mL 圆柱形环刀进行土壤取样(20 组),在环刀内饱和后底部加盖,埋置于田块中,并保证顶部与表土齐平。每隔 3 h 对环刀进行称量,并换算成相应的蒸发量,直至环刀内土壤含水率小于田间持水率时停止观测。随后,将观测时段内土样的蒸发量与棚内的小型蒸发皿对应的蒸发量建立拟合关系式

E_s = 0.63E_{pan} (2)

式中 E_s——棚内土壤潜在蒸发量,mm
E_{pan}——小型蒸发皿蒸发量,mm

试验期内,棚内蒸发皿的日蒸发量及 T20 和 T40 两组处理的灌水量如图 2 所示。

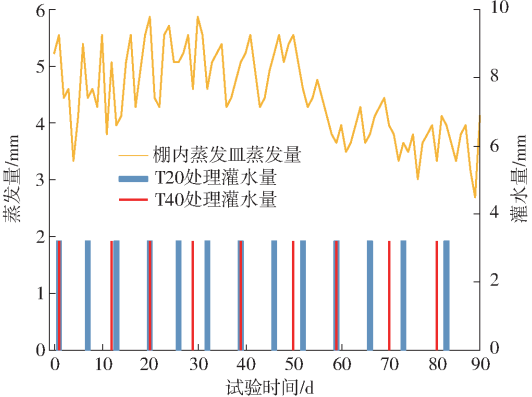


图 2 试验期棚内蒸发皿蒸发量及 T20 和 T40 处理灌水量
Fig.2 Pan evaporation in experimental greenhouse and irrigation amount of treatments T20 and T40 during experimental duration

1.3 HYDRUS-2D 模型构建

1.3.1 模型原理及基本方程

HYDRUS-2D 是以有限元计算为基础的数值模型,可用于模拟二维条件下,变饱和介质中水分、热量及溶质的动态分布状况及边界处的瞬时及累积通量^[15]。由于滴灌对应的点源入渗将在土壤中形成趋于轴对称的半椭球状湿润体^[16],故滴灌对应的含水率分布模拟可简化至二维垂向剖面内。基于此,以土壤均匀且各项同性为基本假设,并忽略土壤水分变化的滞后效应,模型采用修正后的 Richards 方程^[17]描述二维模式下的土壤水分运动,即

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right) - S(h) \quad (3)$$

式中 θ ——土壤体积含水率, cm^3/cm^3
 h ——压力水头, cm
 x ——横向坐标, cm
 z ——纵向坐标, 向上为正, cm
 t ——时间, h
 $K(h)$ ——当土壤内的压力水头为 h 时的土壤导水率, cm/h
 $S(h)$ ——根系吸水项, h^{-1} , 本研究没有涉及作物栽培, 故该项忽略

同时,模型采用 van Genuchten 模型^[18]来描述土壤含水率、基质势以及导水率的相互关系,即

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (5)$$

其中 $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (n > 1) \quad (7)$$

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
 α ——进气吸力的倒数, cm^{-1}
 K_s ——土壤饱和导水率, cm/h
 S_e ——土壤相对饱和度
 l ——孔隙关联度系数, 取 0.5^[19]
 m, n ——土壤水分特征曲线形状系数

本研究中,灌溉用水均为氯化钠溶液,未涉及到具有反应性溶质的化肥或农药的输入。因此,在模拟过程中,将土壤中的溶质统一简化为保守性溶质,模型选用的保守性溶质条件下描述溶质运移的对流弥散方程的二维形式为^[5]

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_T \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_L \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial(q_x C)}{\partial x} - \frac{\partial(q_z C)}{\partial z} \quad (8)$$

式中 C ——土壤溶液质量浓度, g/L
 q_x, q_z ——横向、纵向通量, cm/h
 D_T, D_L ——横向、纵向弥散系数, cm

1.3.2 边界及初始条件设置

以灌水滴头正下方 0 ~ 100 cm 的土壤剖面为对象建立二维模拟域。如图 3 所示,模拟域水平长度与试验小区一致设为 200 cm,垂向深度为 100 cm。模拟域由约 30 000 个三角形有限单元组成,对存在蒸发和灌水的上边界加密节点的分布,并按照试验取样点位在模拟域上设置观测点位。模拟域的上边界可分为覆膜区、无膜裸地以及滴头进水区。模拟时假设地膜完全隔绝土壤表面与外部空气的接触,故将覆膜区设置为零通量边界。无膜裸地设置为大气边界,由于棚内试验无降雨及作物蒸腾,因此,模拟域的大气边界上仅输入估测所得的土壤潜在蒸发量 E_s 。滴头进水区的范围取决于滴头的流量及土壤的水分特征,已有研究表明,滴灌时较快的出流会在土壤表面形成趋于圆形的稳定进水区域,采用该进水区域作为入渗边界,能较为精确地描述二维形式下滴灌形成的土壤水分动态过程^[20-21],相应的进水区域半径可近似表示为

$$R_s = \left(\frac{4}{\alpha^2 \pi^2} + \frac{q}{\pi K_s} \right)^{1/2} - \frac{2}{\alpha \pi} \quad (9)$$

式中 R_s ——进水区域半径, cm
 q ——滴头流量, cm^3/h

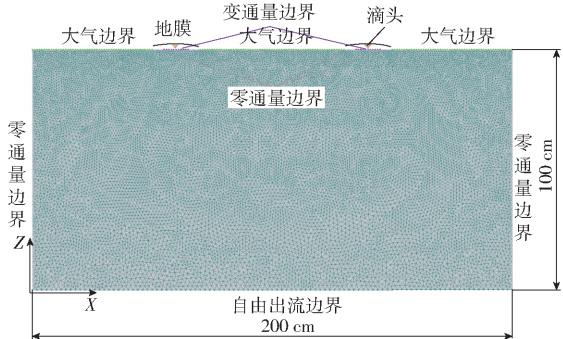


图 3 HYDRUS-2D 构建的试验小区土壤剖面模拟域示意图

Fig. 3 Schematic of HYDRUS-2D spatial model domain for soil profile of field experimental plot

进水区设置为变通量边界,长度为 $2R_s$,非灌水时通量为零,灌水时通量由滴头流量和相应的通量边界尺寸确定^[11]。试验过程中,棚内各小区相对独立,除滴灌外无其他形式的水分输入,故模拟域的左右两侧设置为零通量边界。此外,在试验过程中,地

下水的观测时间间隔较长,而模拟中以“小时”为时间步长,使得边界的赋值难以动态匹配。结合现有的研究结论,当地下水埋深超过 1 m 时,裸地相较于作物耕地的潜水上溯蒸发量将显著下降^[22-23]。本研究未考虑作物生长,且观测深度集中在 0~40 cm,故模拟过程中忽略地下水波动对近地表土壤水盐分布的影响,将模拟域底边设置为自由出流边界。

模拟域剖面的初始水分及盐分根据试验前的实测值分层对应设置。在输入含盐量时,土壤含盐量转换为 HYDRUS-2D 模型采用的溶质液相浓度^[24],关系式为

$$S_e = \frac{S_p}{\theta} \tag{10}$$

式中 S_e ——土壤体积含水率为 θ 时土壤的盐分质量浓度, g/L

ρ ——土壤干容重, g/cm³

初始的土壤水分参数除实测所得的饱和含水率 θ_s 及饱和导水率 K_s ,其余参数均根据设施大棚内土壤的颗粒级配及容重通过 HYDRUS 内置的 Rosetta 软件进行推演。溶质运移相关的纵向弥散系数 D_L 及横向弥散系数 D_T 与模拟域对应的空间尺寸相关。参照有关 HYDRUS-2D 对土壤剖面水盐运移的模拟研究^[25-26],将 D_L 的初始值设为模拟域深度的

1/10,且 $D_T = D_L/10$ 。本研究以小时(h)为时间步长模拟土壤剖面内水分及溶质在灌水及蒸发过程中的运移状况,模拟时长为 90 d,共计 2 160 h。

1.3.3 模型检验

通过对比不同取样点处水盐含量的实测值与模拟值的差异来分析所建模型的模拟精度,进而对相关土壤水分及溶质运移参数进行率定和验证,并采用均方根误差(Root mean square error, RMSE)、纳什效率系数(Nash-sutcliffe efficiency coefficient, NSE)、平均相对误差(Mean relative error, MRE)作为量化模拟值与实测值差异程度的评价指标。RMSE 和 MRE 越接近 0,说明模拟值与实测值的差异越低;NSE 的波动范围为 $-\infty \sim 1$,该值越接近 1 说明模拟值与实测值的一致性越高,通常当 NSE 大于 0.5 时,可认为模拟结果满足精度要求^[27]。

2 结果与分析

2.1 模型率定与验证

采用 T20 处理条件下与滴头水平距离为 10、20、30、40 cm 处 0~40 cm 土层内每轮灌水前土壤的体积含水率和电导率 $EC_{1:5}$ 对模型参数进行率定,随后,采用 T40 处理下相应的观测值对率定后的参数进行验证。如图 4 所示,在率定和验证过程中,T20 和 T40 处理对应的土壤体积含水率及电导率的模拟

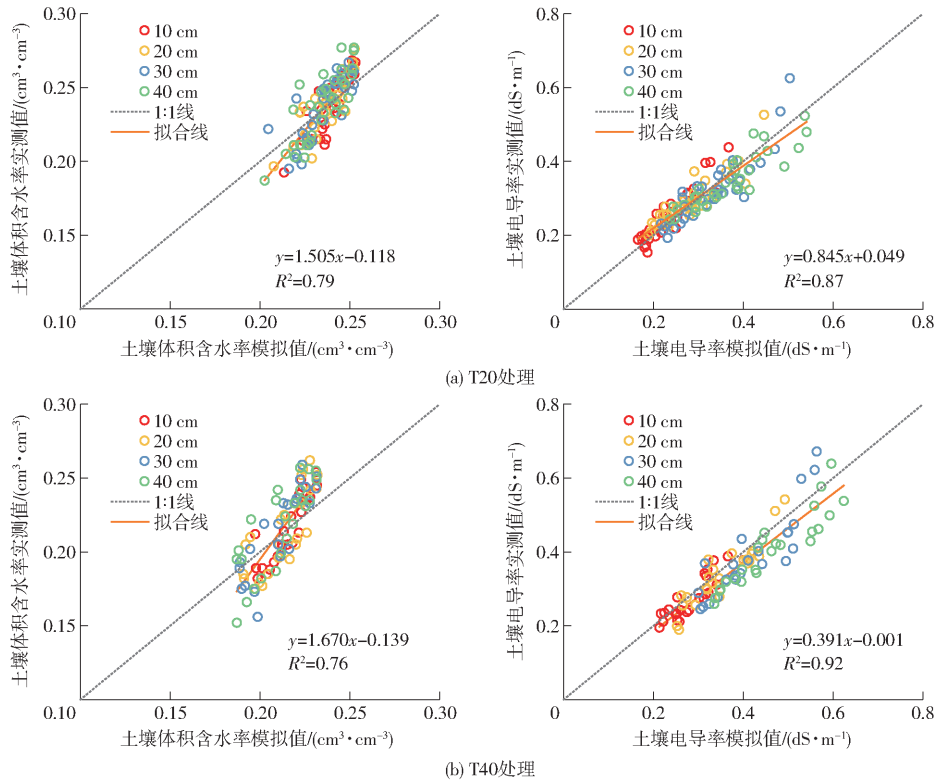


图 4 T20 处理和 T40 处理下距滴头不同水平位置处深度 0~40 cm 内土壤含水率及电导率模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of simulated and measured values of soil water content and $EC_{1:5}$ among 0~40 cm depth at different horizontal locations from emitter under T20 and T40 treatments

值和实测值基本集中分布在 1:1 线附近。T20 和 T40 处理的含水率模拟值和实测值的拟合线斜率均大于 1,而土壤电导率模拟值和实测值的拟合线斜率略小于 1,说明两组处理中含水率实测值 (T20: 0.18 ~ 0.27 cm³/cm³;T40:0.19 ~ 0.23 cm³/cm³) 的波动范围均大于模拟值 (T20:0.20 ~ 0.25 cm³/cm³; T40:0.15 ~ 0.26 cm³/cm³),而土壤电导率实测值 (T20:0.17 ~ 0.62 dS/m;T40:0.19 ~ 0.67 dS/m) 的波动范围略高于模拟值 (T20:0.16 ~ 0.56 dS/m; T40:0.21 ~ 0.62 dS/m)。表 1 中,率定和验证阶段土壤含水率 RMSE 波动范围为 0.01 ~ 0.02 cm³/cm³,NSE 为 0.52 ~ 0.63,MRE 为 4.39% ~ 8.53%;土壤电导率对应的 RMSE、NSE 和 MRE 在相同取样位置处较含水率均有所提升,波动范围分别为 0.03 ~ 0.07 dS/m,0.53 ~ 0.82 以及 8.36% ~ 13.42%。同时,RMSE 和 MRE 随与滴头水平距离的增加而有所提升,且 NSE 随之减小,说明土壤水分和盐分的模拟精度随与滴头水平距离的增加而逐渐下降。总体而言,RMSE 接近于 0,MRE 较低,NSE 均大于 0.5,表明在构建的二维模拟域中,所输入的土壤水分及溶质运移参数能够较为准确地模拟微咸水膜下滴灌时土壤水盐的动态变化。经率定及验证,选定的土壤残余含水率 θ_r 及饱和含水率 θ_s 分别为 0.047 cm³/cm³和 0.415 cm³/cm³,土壤进气吸力倒数 α 为 0.02 cm⁻¹,土壤水分特征曲线形状系数 n 为 1.5,饱和导水率 K_s 为 1.97 cm/h,孔隙关联度系数 l 为 0.5,纵向和横向弥散系数 D_L 和 D_T 分别为 30 cm 和 3 cm。

2.2 模型应用

2.2.1 土壤剖面内水分及盐分的变化特征

在试验及模拟过程中,T20 和 T40 处理单次灌水水量一致,但总灌水次数不同(图 2)。因此,本

表 1 滴头不同水平位置处深度 0 ~ 40 cm 内土壤含水率及电导率模拟精度评价指标

Tab.1 Correlation analysis between simulated and measured values of soil water content and EC_{1:5} among 0 ~ 40 cm depth at different horizontal positions from drip emitter

处 理	与滴头 水平距 离/cm	土壤含水率			土壤电导率		
		RMSE/ (cm ³ ·cm ⁻³)	NSE	MRE/ %	RMSE/ (dS·m ⁻¹)	NSE	MRE/ %
T20	10	0.01	0.61	4.77	0.03	0.76	10.72
	20	0.01	0.63	4.39	0.03	0.74	9.68
	30	0.01	0.59	5.03	0.04	0.82	10.09
	40	0.02	0.58	5.47	0.04	0.68	8.36
T40	10	0.01	0.61	5.86	0.03	0.76	9.16
	20	0.02	0.54	7.80	0.04	0.81	9.08
	30	0.02	0.56	7.28	0.06	0.69	13.42
	40	0.02	0.52	8.53	0.07	0.53	12.03

文以两组处理在第 5 次灌水后的 1、3、6 d 的模拟剖面含水率分布为对象,对比分析在带间区域和滴灌带外侧区域(滴头和试验小区边界侧之间,以下简称“带外区”)土壤水分的变化特征。如图 5 所示,由于 T40 处理的灌水时间间隔长,剖面上含水率的差异较 T20 处理更大。在灌水后 1 d,两组处理均在滴头下方形成了含水率较高的圆形湿润体,且湿润体的边缘存在交汇,使得膜间裸地下方的含水率相应提升。在灌后第 3 天和第 6 天,受土表蒸发的影响,覆膜区和裸地的含水率差异逐渐体现,同时,土壤剖面内的局部含水率较高的湿润体逐渐消失,剖面内水平向的含水率趋于一致。

在土壤含盐量变化方面,本文通过 HYDRUS-2D 模拟的土壤盐分质量浓度来反映土壤溶质的分布及运移状况,并针对 T20 和 T40 处理在模拟过程中第 30、60、90 天的剖面盐分分布进行分析。由图 6 可知,由于 T20 处理在相同时段内的淋洗次数

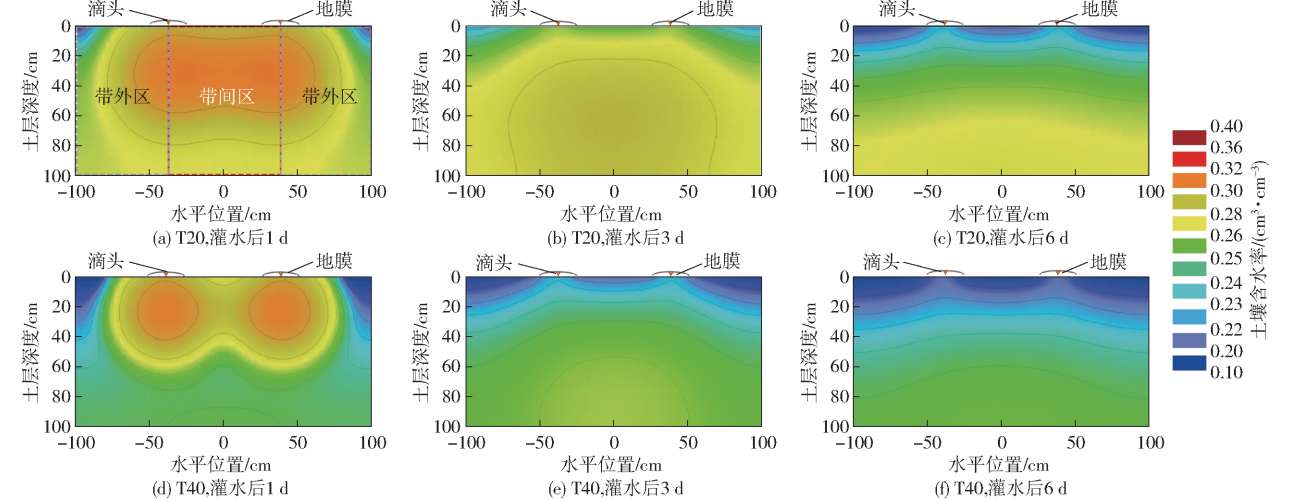


图 5 T20 和 T40 处理灌水后 1、3、6 d 土壤剖面含水率分布

Fig. 5 Water content distributions of soil profile at 1 d, 3 d, and 6 d after irrigation for T20 and T40

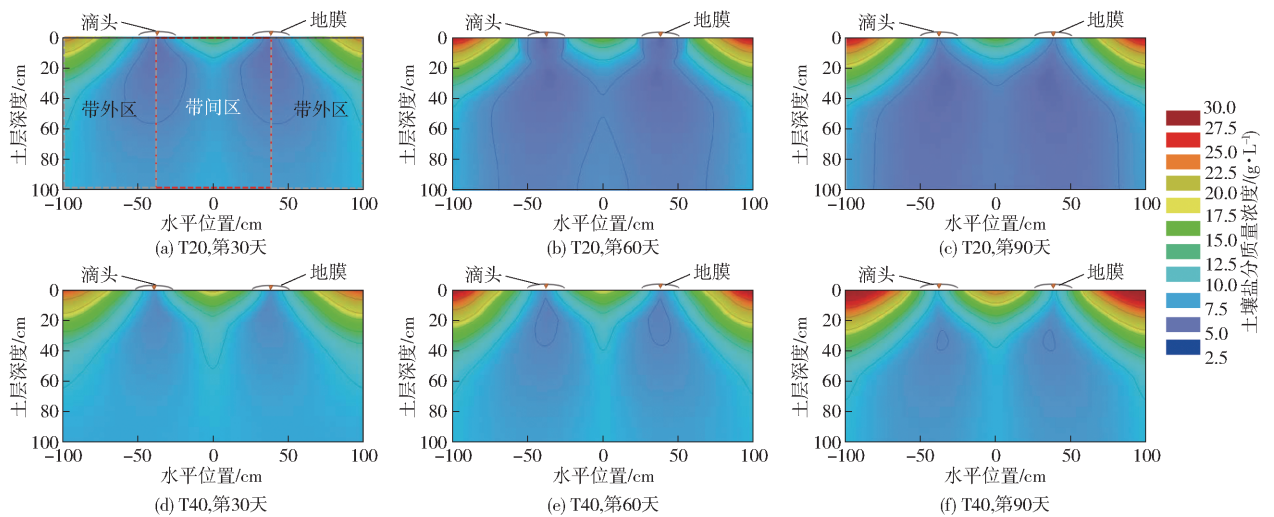


图 6 T20 和 T40 处理在第 30、60、90 天土壤剖面盐分分布

Fig. 6 Salt distributions of soil profile at 30 d, 60 d, and 90 d of simulation period for T20 and T40

多于 T40 处理,使得 T20 处理在整个剖面的盐分质量浓度均低于 T40 处理;两组处理受灌水淋洗作用,盐分质量浓度在 10 g/L 以下的区域自滴头向下逐渐扩张;在土表裸地处,土壤内容质随水分蒸发而逐渐表聚,且带间区盐分的表聚程度和范围均低于模拟域两侧的带外区。可见,土壤剖面内盐分的分布状况受滴灌后湿润体交汇及扩散的影响,虽然灌水次数较多的 T20 处理中剖面输入的盐分更多,但灌水次数较低的 T40 处理条件下盐分的表聚程度更为明显。

此外,为进一步比对带间区与带外区内沿水平方向的盐分动态变化特征,对 T20 和 T40 处理土壤剖面分别距滴头两侧 10、20、30、40 cm 水平位置处 0~40 cm 的常规耕作土层的水盐含量变化进

行模拟分析。如图 7 所示,在土壤含水率变化方面,与滴头的水平距离越小,灌水前后土壤含水率的波动范围越大,但带间区和带外区相同水平位置处含水率的差异越小;同时,在不同水平位置处,各处理中每轮灌水前后土壤含水率的变化幅度趋于一致,没有明显的总体上升或下降趋势。此外,距滴头 10、20、30 cm 水平位置处带外区与带间区在灌水后含水率的峰值基本相同,而在 40 cm 位置处 T20 和 T40 处理带间区的含水率峰值分别比带外区高 11.55%~17.78% 和 13.34%~16.52%,说明在 40 cm 处两滴头形成的湿润体发生交汇重合,造成含水率上升。

在土壤含盐量变化方面,HYDRUS-2D 模型通过土壤盐分质量浓度波动来反映观测点位含盐量的

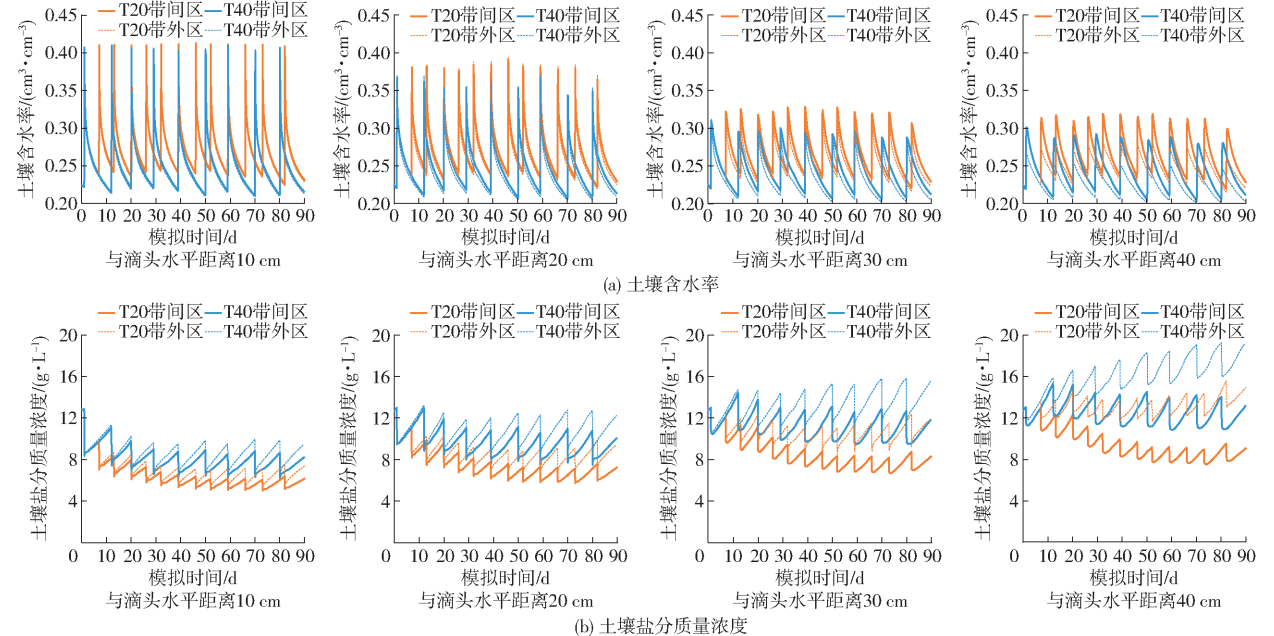


图 7 与滴头不同水平位置处 0~40 cm 土层平均土壤含水率与盐分质量浓度变化曲线

Fig. 7 Soil water content and solute concentration among 0~40 cm depth at different horizontal locations from drip emitter

变化。T20 的带间区与带外区的含盐量均低于 T40 处理,且差异随水平距离的增加而逐渐扩大;两组处理内各水平位置处外侧区域的含盐量均高于带间区,且差异随灌水次数的增加而扩大。距滴头 10、20、30、40 cm 水平位置处 T20 处理带间区的土壤含盐量总体呈下降趋势,模拟时段末的土壤含盐量均低于初始值。相比之下,在 T40 处理下带间区内距滴头水平位置 30、40 cm 处土壤盐分呈总体上升趋势,尤其在距离 40 cm 处灌水淋洗后土壤含盐量的最低值与初始值几乎一致。上述现象表明,相比于带外区,湿润体的交汇能够抑制土壤盐分的集聚程度,但当灌水频率降低时带间区内膜间裸地的积盐程度随之上升。

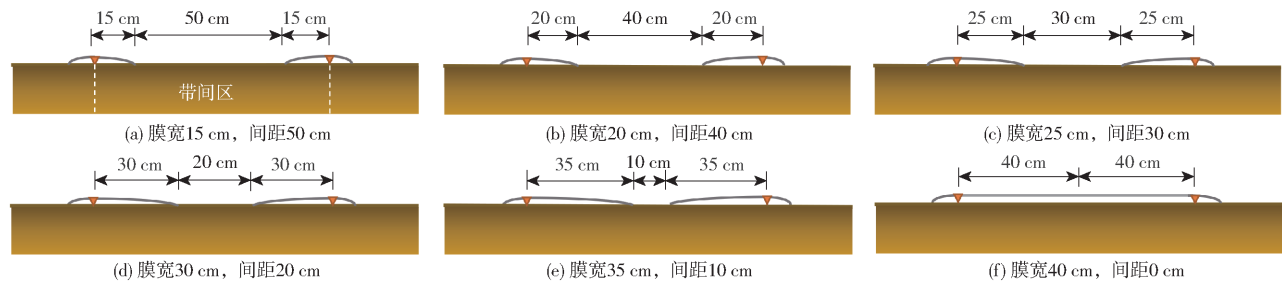


图 8 不同覆膜宽度的设计情景

Fig. 8 Simulated scenarios of different film mulching widths

(1)带间区土壤水盐总体变化趋势

图 9 为设计的 36 组模拟情景下带间区内深度 0 ~ 40 cm 范围内土壤含水率及盐分质量浓度在 90 d 内的变化过程。图 9 中,滴头流量对带间区内的含水率影响程度较低,不同覆膜宽度下带间区内的含水率在每轮灌水前后的变化量基本一致,仅有 $0.02 \sim 0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的差异。带间区内土壤含水率随膜间裸地间距的缩小而略有上升,平均含水率最高值 ($28.76 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 在裸地间距为 0 cm 的处理中,最低值 ($25.12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 在膜间裸地间距 50 cm 的处理中。相比之下,带间区的含盐量随灌水次数的增加呈逐步下降趋势,且下降程度随膜间裸地间距的减小而增大,当膜间裸地间距由 50 cm 减至 0 cm 时,平均土壤盐分质量浓度由 9.53 g/L 下降至 6.25 g/L 。此外,不同的滴头流量仅在灌水间歇期内土壤含水率和盐分质量浓度呈轻微差异,所有情景中平均土壤含水率和盐分质量浓度的最大差异仅为 $0.14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 和 0.22 g/L ,出现在膜间裸地间距 50 cm 时流量为 0.5 L/h 和 3.0 L/h 的处理之间。上述模拟结果表明,带间区在多轮滴灌后均能得到盐分淋洗,且淋洗程度随地膜间距的增大而增加,但滴头流量对水盐分布的影响相对较弱。

2.2.2 情景模拟

为进一步探究带间区内土壤水盐变化受滴灌强度和覆膜宽度的影响,本研究以率定及验证后的模型参数和 T40 处理的灌水制度为基础,利用 HYDRUS-2D 模型模拟了不同设计情景下带间区深度 0 ~ 40 cm 范围内土壤水盐的变化过程。共设计了 6 组滴头流量 (0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.0 、 2.5 、 3.0 L/h) 递增的情景,且各流量情景对应的单次灌水量 (3.2 L)、模拟期内总灌水量 (28.8 L) 以及灌水含盐量 (3 g/L) 均与 T40 处理保持一致。覆膜宽度的情景同样为 6 组,在带间区一侧的膜宽分别为 15、20、25、30、35、40 cm,相应的带间区内膜间裸地间距分别为 50、40、30、20、10、0 cm (图 8)。

(2)膜间裸地及滴头流量对带间区土壤盐分分布的影响

以试验结束的时间(第 90 天)为分析对象,图 10 (图中不同颜色的实线为不同滴头流量下相同膜间裸地间距对应的平均值,实线周边的阴影为相应的标准偏差)为各模拟情景下土壤盐分质量浓度在深度 0 ~ 40 cm 处带间区盐分的垂向分布形式。由图 10 可知,在相同的膜间裸地间距内滴头流量的改变对盐分垂向分布造成的差异较小,所有模拟情景中最大偏差出现在深度 5 cm 处裸地间距为 50 cm 的处理中,仅为 0.046 g/L 。此外,除膜间裸地间距为 0 cm 的处理外,其余情景中土壤的含盐量均随深度增加而降低,随膜间裸地间距的扩大而增大。各类覆膜宽度条件下土壤盐分质量浓度的差异随深度的加深而逐渐缩小,在深度 5 cm 处每增加 10 cm 的膜间裸地,土壤盐分质量浓度将提升约 1.73 g/L ,而在深度 40 cm 时,提升幅度降为 1.34 g/L 。

以带间区水平向的中点为原点,分析从中点至两侧滴头处深度 0 ~ 40 cm 土壤盐分质量浓度在各类情景下的分布状况(图 11)。由图 11 可知,不同水平位置处的土壤盐分质量浓度随膜间裸地间距的增加而降低;除膜间裸地间距为 0 cm 处理外,土壤盐分质量浓度在不同的覆膜宽度处理下的最大值均出现在中点位置,并向两侧滴头处逐渐降低。此外,不同滴头

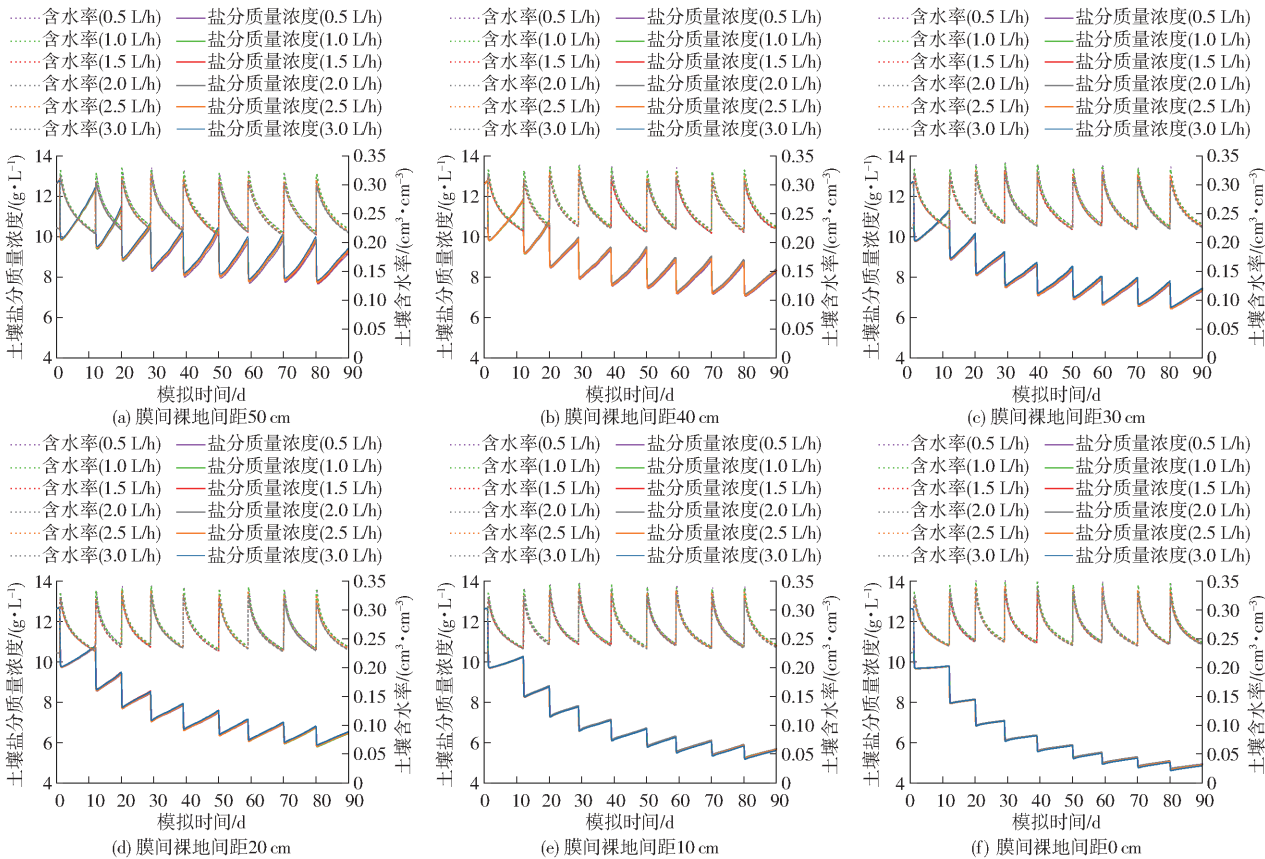


图9 不同设计情景下带间区深度0~40 cm内土壤含水率及盐分质量浓度变化曲线

Fig. 9 Variation of soil water content and solute concentration of area between drip tapes within 0 ~ 40 cm soil depth under different simulation scenarios

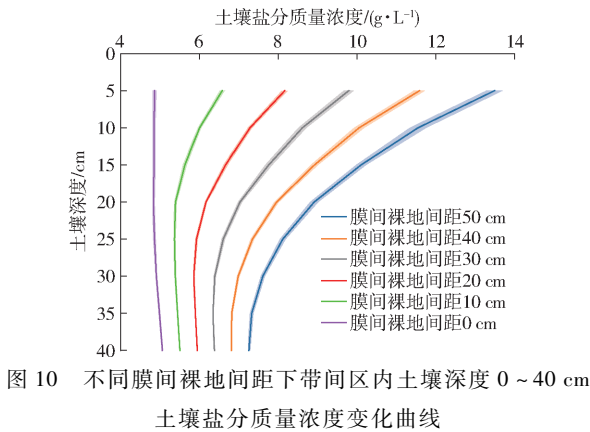


图10 不同膜间裸地间距下带间区内土壤深度0~40 cm土壤盐分质量浓度变化曲线

Fig. 10 Effect of bare soil spacing between mulched films on solute concentration among 0 ~ 40 cm soil profile of interference area

流量下土壤盐分的分布趋势基本一致,相应的差异主要存在于中点处,且盐分浓度随滴头流量的增加而增加。例如,在膜间裸地间距为50 cm处理中,中点处的盐分质量浓度从流量3.0 h/L对应的12.82 g/L逐渐降至流量0.5 h/L对应的12.15 g/L。随着膜间裸地间距的降低,含盐量将在靠近两侧滴头处呈现抬升,并在距两侧滴头10~20 cm处回落。该现象主要是由带外区的覆膜宽度较窄(图8),集聚的盐分逐步扩散,并推进至带间区所致。

3 讨论

采用数值模型的方式对土壤水盐动态进行模拟是当前分析及评估滴灌实施效益的重要方式^[28],而所建模型的模拟精度保障是决定模拟研究充分可行的前提条件。在本研究的模型率定与验证过程中,含水率模拟值的变化量小于实测值的变化量,原因是模型假设土壤的剖面为均质且各向同性,而实地条件下,由于取样或土壤干缩裂缝等因素容易在土体局部形成优先流^[29],导致土壤中模拟与实测的含水率差异扩大。同时,浅层地下水波动会引起上层土壤水分分布的变化,而在模拟域构建时将下边界简化为自由出流边界,这将导致模拟时水分的下渗速率过高,影响了对水分分布的模拟效果。模拟所得的土壤含盐量略高于实际观测值,原因可能是在模拟域构建过程中,含盐量假设为自上而下均匀线性分布的状态,与实际取样所得的观测值之间必然存在差异,进而影响后续的模拟精度。另外,在膜下滴灌时,土壤的盐分迁移与水分运动并不同步^[8],灌水和蒸发造成的湿润体交汇与收缩,加剧了土壤水盐运移及分布的复杂性,使得越接近带间区中间部位的模拟结果误差越大(表1)。考虑到相应的误

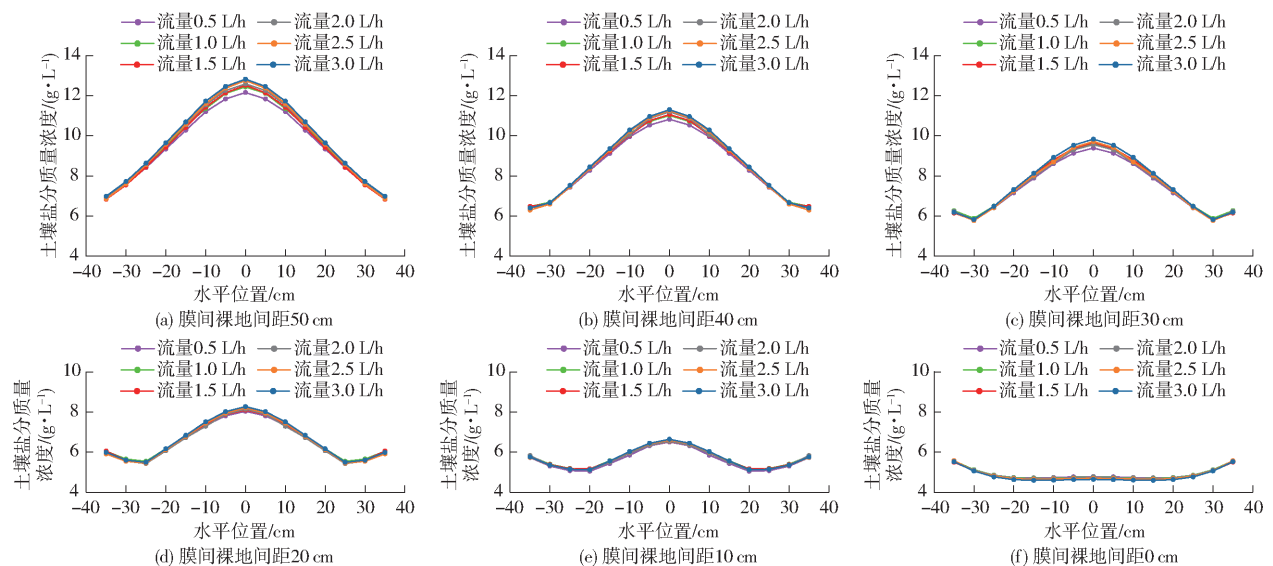


图 11 滴头流量和膜间裸地间距对带间区内不同水平位置处深度 0 ~ 40 cm 土壤盐分质量浓度的影响

Fig. 11 Effect of dripper discharge flux and bare soil spacing between films on soil solute concentration at different horizontal locations among 0 ~ 40 cm soil depth in area between drip tapes

差分析指标 (RMSE、NSE、MRE) 均处于精度可接受的范围内,表明验证后的模型能够有效描述微咸水膜下滴灌过程中的水盐分布状况。

现有的试验及数值模拟研究均证实,滴灌过程中湿润体交汇程度越高,对应的带间区内土壤含水率的提升程度越大^[10,30-31]。本研究中,不同覆膜宽度下,每轮灌水过程中带间区内含水率的抬升程度趋于一致,说明覆膜宽度的变化对湿润体交汇程度的影响较小。原因可能是灌水历时较短,期间的水分蒸发量不足以体现地膜抑制蒸发的效果。在盐分分布方面,SELIM 等^[4]以两滴头间距为 40 cm 的壤砂土剖面为对象,同样利用 HYDRUS 模型模拟了微咸水 (0 ~ 2 dS/m) 滴灌下水盐的分布状况,发现以滴头流量 1.0 L/h 灌水后,将在湿润体交汇区以下 10 ~ 40 cm 范围内形成了超过初始含盐量 2 ~ 4 倍的锥形积盐区。然而,在本研究中,滴灌形成的湿润体交汇区下方并未出现明显的积盐区 (图 6),主要原因可能是设置的土壤初始含水率较低,滴灌使用的微咸水浓度低于土壤的盐分质量浓度;另一方面,在灌水后的蒸发阶段,地表覆膜抑制了土壤水分的散失^[32],限制了溶质的上溯,减缓了湿润体外围积盐区的扩张。在模拟末期,由于带外区覆膜宽度较窄,外侧裸地集聚的盐分向膜内扩散,使得部分模拟情景中,含盐量的最低值出现在距滴头 10 ~ 20 cm 的范围内。该现象说明覆膜虽能够抑制蒸发导致的垂向盐分上溯,但并不能限制盐分在土壤剖面内的侧向扩散,尤其在淋洗强度和范围有限的滴灌模式下,盐分的空间分布由早期的“膜外表聚型”逐渐向后期的“膜内底聚型”转变^[33]。

灌水量一致的情况下,不同滴头流量下带间区内的总体含水率变化幅度的差异较低,且水分的差异将随膜间裸地面积的降低而进一步缩小;土壤盐分的差异则主要集中在膜间裸地内,且积聚程度随滴头流量的增大而增加 (图 11),原因是滴头流量越大形成的湿润体深度范围越小,但水平向范围越大^[34],使得滴头流量较大的处理中土壤盐分的淋洗深度有限。同时,在点源入渗过程中,土壤中湿润体的扩张速率和含水率随与滴头距离的增加而降低^[35],即便当两滴头形成的湿润体存在交汇时土壤水平向的淋洗程度也相对有限,导致灌水间歇期内滴头流量较高处理的蒸发返盐程度高于滴头流量较低的处理。另外,本研究的灌水制度是根据设计的土壤含水率阈值而制定的,由于研究中没有考虑根系吸水的情况,土壤达到含水率阈值主要依靠灌后的表层蒸发,这将导致灌水间歇期相对延长,加剧了蒸发造成的土壤盐分集聚,且模拟过程中土壤的潜在蒸发是根据小型蒸发皿估算所得,造成与实际耕种时土壤水盐环境的偏差。同时,带间区内垂向及水平向的水分及溶质通量交换有待进一步细化,并加强对浅层地下水波动形式的高频动态监测,从而提升模型的实用性以及棚内微咸水覆膜滴灌方案设计的合理性。

4 结论

(1) 以 HYDRUS-2D 软件为基础构建了“两膜两行”的微咸水覆膜滴灌二维土壤剖面有限元模拟域,并引用设施大棚内的蒸发状况作为大气边界条件模拟棚内环境。率定及验证的结果表明,构建的土壤水盐模型精度可靠,在滴灌带带间区内土壤含

水率及含盐量的均方根误差、纳什效率系数以及平均相对误差均在合理的范围内波动,模拟精度随与滴头水平距离的减小而增加,且含水率的模拟精度较含盐量高。

(2)针对不同膜间裸地间距及滴头流量展开的情景模拟结果表明,随灌水次数的增加,带间区域的土壤含盐量总体呈下降趋势,裸地间距越小下降程度越大;当灌水量不变时,不同滴头流量下带间区内土壤水盐含量的差异较低,且膜间裸地间距越小差

异将进一步减小。

(3)多轮微咸水滴灌后,膜间裸地间距越大土壤的近地表积盐现象越突出,不同滴头流量造成的土壤盐分含量差异在膜间裸地内较为明显,且提升滴头流量将加剧积盐程度;在膜间裸地距离为 0 ~ 30 cm 处理中,带外区积聚程度较高的土壤盐分将向含盐量较低的带间区扩散,使得水平向的含盐量最低值并非出现在淋洗程度最大的滴头处,而存在于与滴头水平距离 10 ~ 20 cm 范围内。

参 考 文 献

[1] QIN Shujing, LI Sien, KANG Shaozhong, et al. Can the drip irrigation under film mulch reduce crop evapotranspiration and save water under the sufficient irrigation condition? [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 177: 128 – 137.

[2] LI Xianwen, JIN Menggui, HUANG Jinou, et al. The soil-water flow system beneath a cotton field in arid north-west China, serviced by mulched drip irrigation using brackish water[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(1): 35.

[3] 栗现文, 靳孟贵. 不同水质膜下滴灌棉田盐分空间变异特征[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 180 – 187.
LI Xianwen, JIN Menggui. Spatial variability of cotton field salinity under mulched drip irrigation with brackish and fresh water [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 180 – 187. (in Chinese)

[4] SELIM T, BERNDTSSON R, PERSSON M, et al. Influence of geometric design of alternate partial root-zone subsurface drip irrigation (APRSDI) with brackish water on soil moisture and salinity distribution[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 103: 182 – 190.

[5] QI Zhijuan, FENG Hao, ZHAO Ying, et al. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 219 – 231.

[6] RAMESHWARAN P, TEPE A, YAZAR A, et al. Effects of drip-irrigation regimes with saline water on pepper productivity and soil salinity under greenhouse conditions[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 199: 114 – 123.

[7] 虎胆·吐马尔白, 弋鹏飞, 王一民, 等. 干旱区膜下滴灌棉田土壤盐分运移及累积特征研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(5): 144 – 150.
HUDAN·Tumaerhai, YI Pengfei, WANG Yimin, et al. Research on transport and accumulation characteristics of soil salinity of cotton field under film mulched drip irrigation in arid areas[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(5): 144 – 150. (in Chinese)

[8] 王卫华, 王全九, 刘建军, 等. 膜下滴灌湿润体交汇区土壤水盐运移特征田间实验研究[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 558 – 564.
WANG Weihua, WANG Quanjiu, LIU Jianjun, et al. Field experimental study of soil water-salt transport characteristics in the interference area of wetted volume under the mulched drip irrigation[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 558 – 564. (in Chinese)

[9] 齐智娟, 冯浩, 张体彬, 等. 河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 301 – 308.
QI Zhijuan, FENG Hao, ZHANG Tibin, et al. A study on soil salinity movement of drip irrigation under different film mulching treatment in Hetao Irrigation District[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 301 – 308. (in Chinese)

[10] 王维娟, 牛文全, 孙艳琦, 等. 滴头间距对双点源交汇入渗影响的模拟研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(4): 219 – 225, 234.
WANG Weijuan, NIU Wenquan, SUN Yanqi, et al. Simulation study on the effects of dripper spacing on soil water infiltration conditions under surface drip irrigation with two point-source emitter[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.)*, 2010, 38(4): 219 – 225, 234. (in Chinese)

[11] CHEN Ning, LI Xianye, ŠIMUNEK J, et al. Evaluating soil nitrate dynamics in an intercropping dripped ecosystem using HYDRUS-2D[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137314.

[12] GUO Leilei, WANG Zaimin, ŠIMUNEK J, et al. Optimizing the strategies of mulched brackish drip irrigation under a shallow water table in Xinjiang, China, using HYDRUS-3D[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 283: 108303.

[13] 蒋俊明. 土壤蒸发、蒸散模型的研究[J]. *四川林业科技*, 1995(4): 20 – 25.
JIANG Junming. Research on the evaporation and transpiration models of soil[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 1995(4): 20 – 25. (in Chinese)

[14] 李艳, 刘海军, 黄冠华. 麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 98 – 106.
LI Yan, LIU Haijun, HUANG Guanhua. Modeling resistance of soil evaporation and soil evaporation under straw mulching [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(1): 98 – 106. (in Chinese)

[15] ŠIMUNEK 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.

[16] SKAGGS T H, TROUT T J, ŠIMUNEK J, et al. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130(4): 304 – 310.

[17] HANSSON K, ŠIMUNEK J, MIZOGUCHI M, et al. Water flow and heat transport in frozen soil: numerical solution and

- freeze-thaw applications[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(2): 693 – 704.
- [18] 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(5): 892 – 898.
- [19] LIU Yi, AO Chang, ZENG Wenzhi, et al. Simulating water and salt transport in subsurface pipe drainage systems with HYDRUS – 2D[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125823.
- [20] 陈帅, 毛晓敏. 地表滴灌条件下土壤湿润体运移量化表征[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 285 – 292.
CHEN Shuai, MAO Xiaomin. Quantification of soil wetted volume development under surface drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 285 – 292. (in Chinese)
- [21] BRESLER E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems[J]. *Irrigation Science*, 1978, 1: 3 – 17.
- [22] 黄梦琪, 蔡焕杰, 黄志辉. 黄土地区不同埋深条件下潜水蒸发的研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(3): 233 – 237.
HUANG Mengqi, CAI Huanjie, HUANG Zhihui. Research on the evaporation of underground water in different burying depth conditions on the Loess area[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.)*, 2007, 35(3): 233 – 237. (in Chinese)
- [23] YANG Tingting, ALA M, GUAN Dexin, et al. The effects of groundwater depth on the soil evaporation in Horqin sandy land, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2021, 31(4): 727 – 734.
- [24] 薄丽媛, 赵引, 毛晓敏, 等. 农田水盐运移与作物生长对亏水滴灌的响应和模拟研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(1): 248 – 255, 237.
BO Liyuan, ZHAO Yin, MAO Xiaomin, et al. Response and simulation of farmland water salt transport and growth of crops to deficit drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(1): 248 – 255, 237. (in Chinese)
- [25] PHOGAT V, MAHADEVAN M, SKEWES M, et al. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design[J]. *Irrigation Science*, 2012, 30: 315 – 333.
- [26] PHOGAT V, PITT T, STEVENS R M, et al. Assessing the role of rainfall redirection techniques for arresting the land degradation under drip irrigated grapevines[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 125000.
- [27] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885 – 900.
- [28] MORIANOU G, KOURGIALAS N N, KARATZAS G P. A review of HYDRUS 2D/3D applications for simulations of water dynamics, root uptake and solute transport in tree crops under drip irrigation[J]. *Water*, 2023, 15(4): 741.
- [29] CHEN Rui, WANG Zhenhua, DHITAL Y P, et al. A comparative evaluation of soil preferential flow of mulched drip irrigation cotton field in Xinjiang based on dyed image variability versus fractal characteristic parameter [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 269: 107722.
- [30] 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 Haiyan, WANG Quanjiu. Research for soil water movement from drip irrigation interference infiltration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 115 – 118. (in Chinese)
- [31] 张林, 吴普特, 范兴科. 多点源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 40 – 45.
ZHANG Lin, WU Pute, FAN Xingke. Numerical simulation of soil water movement with drip irrigation of multiple point source [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(9): 40 – 45. (in Chinese)
- [32] 陈慧, 蔡甲冰, 陈敏建. 覆膜和降雨强度对玉米耗水过程及土壤水分入渗的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(增刊 2): 11 – 19.
CHEN Hui, CAI Jiabing, CHEN Minjian. Effects of mulching and rainfall intensity on soil water infiltration and water consumption for maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(Supp. 2): 11 – 19. (in Chinese)
- [33] 陈文娟, 李明思, 秦文豹, 等. 水平翻耕措施对覆膜滴灌土壤水盐分布调控效果研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(3): 276 – 286.
CHEN Wenjuan, LI Mingsi, QIN Wenbao, et al. Effect of horizontal tillage measures regulatory on soil water and salt distribution under mulched drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3): 276 – 286. (in Chinese)
- [34] ZHANG Youliang, FENG Shaoyuan, WANG Fengxin, et al. Effects of drip discharge flux and soil wetted percentage on drip irrigated potato growth with film mulch[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 272: 107847.
- [35] 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]. *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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 264 – 274. (in Chinese)