

南疆棉田微咸水膜下滴灌土壤水热盐二维运移规律及适宜灌溉制度

毕文平，林栋，毛晓敏^{*}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业水资源高效利用全国重点实验室南疆试验站, 阿拉尔 843300)

摘要: 为了解南疆膜下滴灌棉田土壤的水热盐动态分布规律, 该研究在新疆阿拉尔现代农业院士专家工作站进行了不同水盐灌溉处理下的田间试验, 试验设置 3 个灌水量(分别为灌溉需水量的 75%、100%、125%)和 3 个灌水矿化度(分别为 1.5、3.5、5.5 g/L), 共 9 个处理, 监测 0~80 cm 土壤的含水率、含盐量和温度, 结合 HYDRUS-2D 模型探究不同灌水量及灌水矿化度对膜下滴灌棉田土壤水热盐二维迁移与分布特征的影响, 通过情景模拟揭示不同灌溉制度下二维土壤盐分淋洗/累积机制, 并提出微咸水灌溉下适宜的灌溉制度。结果表明: 在生育前期, 土壤剖面水平方向上的水分呈现明显的差异, 表现为二维分布特征, 后期土壤二维剖面内水分分布逐渐均匀, 与 100% 作物灌溉需水量的灌水定额相比, 125% 的灌溉需水量不能提高根区土壤含水率; 在低灌水矿化度条件下, 随着灌水量的增加, 土壤盐分逐渐向深层和土壤膜间迁移, 中、高灌水矿化度则提高了滴灌带下、地膜中线位置的土壤盐分, 微咸水灌溉下较高的灌水量会提高膜下根区土壤含盐量; 覆膜对生育初期 0~40 cm 土壤增温效果显著。HYDRUS-2D 能可靠地模拟 0~60 cm 根区土壤的水热盐运移, 所有 R^2 均大于 0.56。情景模拟结果表明充分灌溉条件下, 保证膜下 0~40 cm 土壤不积盐的最高灌水矿化度为 3.2 g/L; 在 90% 的灌溉需水量下, 灌水矿化度 3.5 g/L 是保证膜下土壤根区盐分平衡的最大阈值。研究可为南疆水资源高效利用和防治土壤次生盐渍化提供参考。

关键词: 灌水; 土壤水分; 含盐量; 温度; 微咸水; 矿化度; HYDRUS-2D 模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404034

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-23-0155-14

毕文平, 林栋, 毛晓敏. 南疆棉田微咸水膜下滴灌土壤水热盐二维运移规律及适宜灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 155-168. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404034 <http://www.tcsae.org>

BI Wenping, LIN Dong, MAO Xiaomin. Two-dimensional transport of soil water, heat and salt with mulched drip irrigation under brackish water in cotton fields and appropriate irrigation schedule in southern Xinjiang of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(23): 155-168. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404034 <http://www.tcsae.org>

0 引言

南疆地处中国西北内陆干旱区, 光热资源充足, 是中国棉花的重要生产区^[1]。新疆盐碱土的面积为 2 184.4 万 hm², 约占全国盐碱土总面积的 1/3^[2], 其中南疆土壤盐渍化问题更为突出。南疆地区水资源总量 424.4 亿 m³, 地均水资源量为全国平均水平的 1/8, 而农业用水占比超过总量的 95%^[3], 水资源短缺和土壤盐渍化已经成为制约该地区农业发展的两大关键因素^[4]。利用微咸水灌溉可以缓解淡水资源短缺, 据统计, 新疆矿化度大于 3 g/L 的咸水资源约 100 亿 m³^[5], 南疆灌溉水矿化度普遍在 2~6 g/L, 适当的微咸水灌溉可以促进作物生长发育^[6], 但也可能造成土壤盐分在根区累积。因此, 探究微咸水灌溉对土壤水热盐运移的影响, 科学合理地制定微咸水灌

溉制度对该地区农业可持续发展具有重要意义。

近年来, 地膜与滴灌结合的膜下滴灌技术得到广泛应用, 具有减少蒸发和深层渗漏, 提高土壤温度^[7] 的优势, 有明显的节水增产效益。由于地膜阻碍土壤与近地面的气体交换, 使膜内和膜间土壤中的水分、热量、盐分在二维剖面上产生差异, 所以需要考虑水、热、盐在二维剖面的耦合运移。TIAN 等^[8] 通过室内土箱试验对膜下滴灌土壤水、热、盐运移进行了研究, 结果表明膜间的土壤比膜内更干, 土壤含盐量更高, 辐射升温幅度也更大。低滴灌强度的根区脱盐效率较高, 横向盐分布不均匀。吉光鹏等^[9] 研究南疆多次微量滴水技术分析土壤水热盐二维分布的影响, 得到了最佳土壤水热盐环境下的灌水量。孙贵芳等^[10] 的研究表明, 不同灌溉制度下土壤盐分均随水分由膜内向膜外地表裸露区定向迁移, 趋于膜外地表积累。微咸水与膜下滴灌结合的灌溉方式节水效果更好, 但在淋洗土壤盐分的同时会带入土壤新的盐分, 灌水矿化度较高时将导致土壤次生盐渍化。因此, 有必要进一步探究微咸水膜下滴灌条件下土壤水热盐二维运移机制。

田间试验受到环境的影响较大, 且费时费力, 而田

收稿日期: 2024-04-06 修订日期: 2024-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900801-01)

作者简介: 毕文平, 研究方向为农田水利。

Email: s20223091899@cau.edu.cn

※通信作者: 毛晓敏, 博士, 教授, 研究方向为水文水资源与农业水土工程。Email: maoxiaomin@cau.edu.cn

间试验与数值模拟相结合能够更方便有效地获取和预测农田土壤各项指标的动态。HYDRUS-2D 模型是由美国盐土实验室开发, 能够较好地模拟土壤水分、热量、溶质在二维可变饱和多孔介质中的运动过程^[11]。DOU 等^[12]利用 HYDRUS-2D 模拟了 3 种排水条件下的土壤水盐运移, 结果表明土壤水分主要分布在 0~40 cm 土层, 且在生育后期出现不同程度的次生盐渍化; ZHAO 等^[13]的研究表明, 覆膜提高了土壤水分和温度, HYDRUS-2D 可以有效模拟覆膜情况下二维土壤水热耦合运移。王在敏等^[14]基于田间数据构建的 HYDRUS-2D 模型, 优化了生育期内微咸水灌溉制度, 得到最佳滴灌制度为高频少量灌溉; LI 等^[15]模拟南疆膜下滴灌棉田不同灌水定额的土壤水热盐二维分布, 并提出了适宜的淡水灌溉制度。尽管前人验证了 HYDRUS-2D 模型模拟膜下滴灌农田土壤水热盐运动过程的适用性, 并根据模拟结果提出了适宜的灌溉制度, 但针对不同灌水量和灌水矿化度组合下的土壤水盐运移研究较少。为此, 本研究在南疆膜下滴灌棉田开展了不同水盐处理下的田间试验, 分析不同灌水量及灌水矿化度对膜下滴灌棉田土壤水热盐二维迁移与分布特征的影响, 并利用 HYDRUS-2D 进行模拟验证和情景预测, 从而确定南疆微咸水膜下滴灌适宜的灌溉制度, 以期为南疆水资源高效利用和防治土壤次生盐渍化提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2023 年 4—10 月在新疆阿拉尔现代农业院士专家工作站 (40°06'N, 81°02'E) 进行。该站位于新疆第一师阿拉尔市十团, 属于典型的大陆性暖温带干旱荒漠气候, 全年降雨稀少, 蒸发强烈, 生育期内 (2023 年 5 月 7 日—2023 年 10 月 15 日) 平均气温 23.47 ℃, 降雨总量为 15 mm, 参考作物潜在蒸散发量为 962.59 mm。该地区光热资源丰富, 属于纯灌溉农业^[16]。逐日气象数据来源于试验站内安装的 HOBO 自动气象站 (美国 Onset 公司), 生育期内降雨蒸发数据见图 1。试验区地下水埋深 2~3 m, 从地表至地下 80 cm 深度的土壤大致可分为 5 层, 土壤质地均为砂壤土, 其基本物理性质见表 1^[17]。

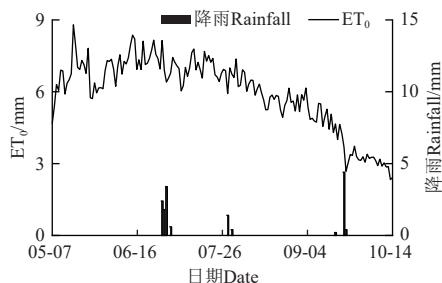


图 1 棉花生育期内降雨及参考作物腾发量

Fig.1 Rainfall and reference crop evapotranspiration (ET_0) in growing season of cotton

1.2 试验设计

田间试验共设置 3 个灌水量和 3 个灌水矿化度水平,

其中 3 个灌水量水平分别为作物灌溉需水量的 75% (W1)、100% (W2) 和 125% (W3), 3 个灌水矿化度水平分别为 1.5 g/L (S1, 当地灌溉用水)、3.5 g/L (S2) 和 5.5 g/L (S3), 共 9 个处理, 每个处理设置 3 个重复, 共 27 个小区, 小区布置完全随机。试验小区长 10 m, 宽 6.84 m, 面积为 68.4 m²。试验作物为棉花, 品种为“塔河 2 号”, 棉花种植模式为“一膜两带六行”(图 2), 采用膜下滴灌的灌溉方式。滴灌带为贴片式滴灌带, 滴头间距 24 cm, 滴头流量 2 L/h。棉花播种日期为 4 月 24 日, 灌溉出苗水为淡水, 5 月 7 日进入苗期后, 进行不同水盐灌溉, 其中 1.5 g/L 的淡水和 3.5 g/L 的微咸水^[18] 分别为当地深层地下水和浅层地下微咸水, 矿化度 5.5 g/L 的咸水是在 3.5 g/L 的基础上根据研究区地下水离子组成人工配制而成 ($NaCl: CaCl_2 = 2: 1$), 每隔 7~10 d 灌水一次, 具体的灌溉制度见表 2。棉花播种采用机播, 株距 10 cm, 所有处理的施肥管理参照当地经验实行。

表 1 土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties

土壤深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	田间持水量 Field capacity/ (cm ³ ·cm ⁻³)	粒径组成 Particle composition/%		
			<0.002 mm	0.002~ 0.05 mm	>0.05~2 mm
0~20	1.60	0.21	2.43	41.49	56.08
>20~40	1.55	0.24	2.55	41.40	56.05
>40~60	1.58	0.25	2.89	42.82	54.29
>60~80	1.59	0.25	2.60	41.40	56.00

表 2 灌溉制度

Table 2 Irrigation schedule

生育阶段 Growth stage	灌水日期 Irrigation date	灌水量 Irrigation amount/mm		
		W1	W2	W3
苗期 Squaring	06-14	22.5	30.0	37.5
	06-23	30.0	40.0	50.0
蕾期 Bolling	07-03	34.5	46.0	57.5
	07-09	17.4	23.2	29.0
花铃期 Flowering	07-18	32.5	43.3	54.2
	07-26	36.8	49.0	61.3
	08-03	28.1	37.5	46.9
	08-10	33.8	45.0	56.3
	08-16	22.5	30.0	37.5
	08-26	33.8	45.0	56.3
总计 Total/mm		291.8	389.0	486.3

1.3 土壤水热盐的监测与方法

在生育期始末和灌水前后, 用土钻在每个小区对土壤进行取样, 分别在棉花的中间行 (地膜中线处)、滴灌带下、棉花边行和裸土中间 (以下简称“中行”“滴灌带下”“边行”“裸土”) 4 个位置处, 取样位置如图 2, 取样深度为 10、20、40、60 和 80 cm, 共 5 层。取得的土样通过烘干法 (105 ℃, 8~12 h) 得到各层土壤的质量含水率, 经土壤容重转换为体积含水率。将土样风干、碾碎后过 1 mm 筛, 采用 1:5 的土水比例制成土壤浸提液, 测量土水比 1:5 的土壤浸提液的电导率 ($S_{EC1:5}$ 电导率仪 DDSJ-308A, 上海精科仪器公司)。

在 W2 灌水量下的 3 个不同灌水矿化度处理中, 各随机选取 1 个试验小区, 在中行、滴灌带下、边行和裸

土这4个位置(与取样位置相同)的10、20、40、60和80 cm处, 分别插入土壤水热盐监测探头(TDR315N, 美国), 探头与数据采集器相连, 每隔1 h获取一次土壤体积含水率、电导率、温度等数据, 代表不同位置处0~10、>10~20、>20~40、>40~60、>60~80 cm

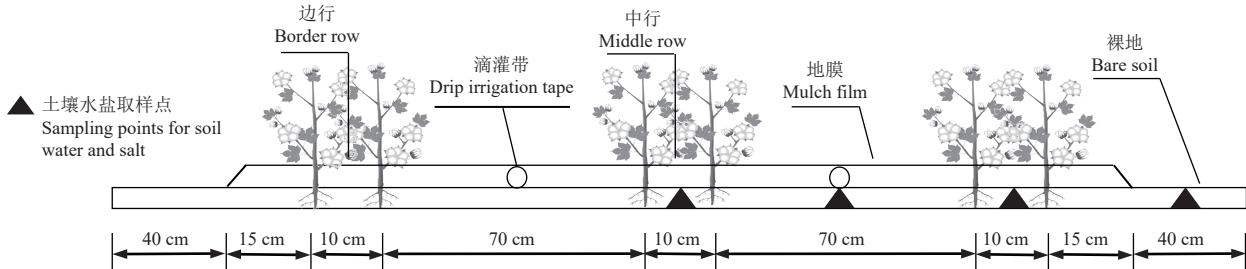


图2 棉花种植模式示意图
Fig.2 Schematic diagram of cotton planting pattern

1.4 土壤水热盐数值模拟

1.4.1 模型基本方程

1) 忽略与滴灌带平行方向上水分分布的差异, 采用与滴灌带垂直方向上的二维 Richards 方程描述土壤水分运移^[20]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S_0 \quad (2)$$

式中 θ 为土壤体积含水率, cm^3/cm^3 ; $K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率, cm/d ; h 为压力水头(基质势), cm ; t 为时间, d ; x 为横坐标; z 为纵坐标; S_0 为源汇项。式(2)中土壤含水率-基质势-导水率的关系采用 van Genuchten-Mualem 模型描述^[21]:

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

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中 K_s 为饱和导水率, cm/d ; θ_r 为土壤残余含水率, cm^3/cm^3 ; θ_s 为土壤饱和含水率, cm^3/cm^3 ; S_e 为相对饱和系数; l 为孔隙连通性参数; m 、 n 为土壤水分特征曲线形状系数。

2) 不考虑溶质的降解、吸附、沉淀等过程, 土壤盐分运移采用二维对流-弥散方程描述^[22]:

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta D_0 \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta D_0 \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \frac{\partial (q_x c)}{\partial x} - \frac{\partial (q_z c)}{\partial z} \quad (5)$$

$$\theta D_0 = D_T |q| \delta + (D_L - D_T) \frac{q_x q_z}{|q|} + \theta D_W \tau_w \delta \quad (6)$$

式中 c 为溶质质量浓度, mg/cm^3 ; D_0 为弥散系数, cm^2/d ; q_x 、 q_z 为体积通量, cm/d ; D_W 为溶质分子在水中的扩散系数, cm^2/d ; D_L 为纵向弥散度, cm ; D_T 为横向弥散度, cm ; δ 为 Kronecker 函数; τ_w 为液相弯曲系数。

3) 土壤热运移采用二维热传导方程描述^[23-25]:

$$C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - C_w q_x \frac{\partial T}{\partial x} - C_w q_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

深度的数据, 并用取土得到的实测数据对探头数据进行校准。

各采样点土壤含盐量(S_1 , g/kg)是将 $S_{EC1:5}$ 按照当地经验公式转换, 公式如下^[19]:

$$S_1 = 0.004 S_{EC1:5} + 1.029 \quad (1)$$

$$C(\theta) = C_n \theta_n + C_o \theta_o + C_v \theta + C_g \alpha_v \quad (8)$$

$$\lambda(\theta) = \lambda_T C_w |q| \delta + (\lambda_L - \lambda_T) C_w \frac{q_x q_z}{|q|} + \lambda_0(\theta) \delta \quad (9)$$

$$\lambda_0(\theta) = b_1 + b_2 \theta + b_3 \theta^{0.5} \quad (10)$$

式中 $C(\theta)$ 是总体积热容量, $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; T 为土壤热量, $^\circ\text{C}$; $\lambda(\theta)$ 是土壤表观热导率, $\text{W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$; C_n 、 C_w 、 C_o 分别为固相、液相、有机质的体积比热容, $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; θ_n 、 θ_o 分别为固相、有机质的含量, 在本研究中忽略有机质的影响, θ_o 取为 0; λ_L 为纵向导热弥散度, cm ; λ_T 为横向导热弥散度, cm ; $\lambda_0(\theta)$ 是热导系数, $\text{W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$; b_1 、 b_2 、 b_3 分别为热传导函数的参数, $\text{W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

4) 根系吸水采用修正的 Feddes 模型^[26] 描述:

$$S(h, h_\phi, x, z) = \alpha(h, h_\phi, x, z) b(x, z) S_t T_p \quad (11)$$

$$b(x, z) = \frac{b'(x, z)}{\int_{Q_R} b'(x, z) d\Omega_R} \quad (12)$$

式中 $S(h, h_\phi, x, z)$ 为根系吸水函数; $\alpha(h, h_\phi, x, z)$ 为水盐胁迫函数; h_ϕ 为渗透压力, cm ; $b(x, z)$ 为根系分布函数, $1/\text{cm}^2$; S_t 为与蒸腾有关的地表长度, cm ; T_p 为潜在蒸腾速率, cm/d ; Ω_R 为根系分布区域面积, cm^2 。

5) 由试验区实测的气象资料, 根据 Penman-Monteith 公式^[27] 计算参考作物腾发量 ET_0 , 通过作物系数 K_c ^[28] 计算作物潜在腾发量 ET_c , 并根据 Beer 定律划分为潜在蒸腾与棵间蒸发^[29]:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \mu_2)} \quad (13)$$

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (14)$$

$$T_p = ET_c \cdot (1 - e^{-\beta LAI}) \quad (15)$$

$$E_p = ET_c - T_p \quad (16)$$

式中 ET_0 为参考作物腾发量, mm ; R_n 为净辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; μ_2 为 2 m 高处的风速, m/s ; e_s 为饱和水汽压, kPa ; e_a 为实际水汽压,

kPa ; Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率, $kPa/^\circ C$; γ 为湿度计常数, $kPa/^\circ C$; K_c 为作物系数, 参考 FAO-56 的取值并考虑试验地气象、覆膜等情况进行调整^[28]; E_p 为潜在蒸发速率, cm/d ; T_p 为潜在蒸腾速率, cm/d ; β 为太阳辐射消光系数, 参考文献 [30] 取值; LAI 为叶面积指数, 根据试验实测取值。

1.4.2 模型构建

利用 HYDRUS-2D 模型模拟棉花整个生育期从 2023 年 5 月 7 日—2023 年 10 月 15 日共 162 d 的根区 0~60 cm 土壤水分、盐分和热运移的情况。试验小区在垂直于滴灌带的剖面上以地膜中线为轴, 呈左右对称 (图 2), 以膜中间划分, 对右侧进行模拟, 选取的模拟区域 (图 3) 长度为 120 cm, 高度为 80 cm (长度为膜宽的 1/2, 高度为棉花根系能达到的最大深度), 模拟区域内有 610 个节点, 1138 个有限元网格, 网格划分情况如图 3。

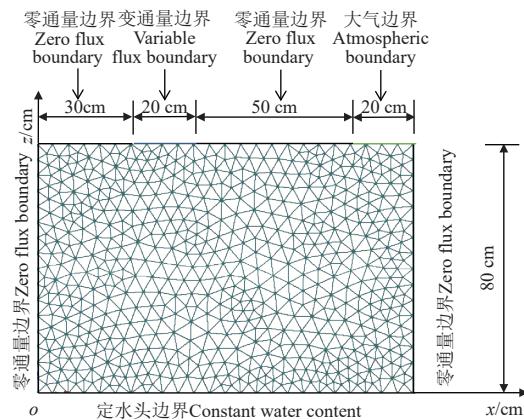


图 3 模拟区域及边界条件示意图

Fig.3 Schematic diagram of simulated region and boundary conditions

灌水量、灌水矿化度分别按照实际的水流通量^[31] 和盐分浓度输入^[12], 土壤上边界温度按照膜下和膜间两部分分别输入^[15]。在模拟中缺乏实测地表温度, 根据经验公式^[32], 由实测日平均气温得到 5 cm 深度的土壤平均温

度, 取日平均气温与 5 cm 土壤平均温度的平均值作为日平均地表温度。模拟的初始条件为土壤剖面上含水率、含盐量、温度的实测值。土壤水分运动上边界条件在滴头的湿润区^[33] 设为变通量边界 (图 3, 30~50 cm 处), 灌水期间滴头的湿润区, 根据灌水强度设置为通量边界, 非灌水期为零通量边界。膜间裸地设为包含降水和蒸散发的大气边界 (100~120 cm), 膜下其他位置 (0~30、50~100 cm) 蒸发较小忽略不计, 设为零通量边界, 下边界为定水头边界 (设置为土壤 80 cm 处的体积含水率); 土壤溶质运移的上下边界均为第三类边界; 土壤热运移的上下边界为第一类边界。左、右边界均为零通量边界。

1.4.3 模型参数

采用 W2S2、W1S3 和 W3S1 共 3 个不同的水盐梯度组合对 HYDRUS-2D 模型的适用性进行分析, 选取 W2S2 处理对模型进行参数率定, 以 W1S3 和 W3S1 处理验证模型。

土壤水分特征参数根据表 1 实测的土壤粒径组成和干容重, 利用 Rosetta 软件由 ANN 方法预测的 van Genuchten-Mualem 模型参数初始值^[34], 然后根据试验实测值进行调试, 得到最终的 van Genuchten-Mualem 模型参数见表 3。土壤溶质运移和热运移参数初始取值参考文献 [15,35], 经调试后的参数 $D_w=5.5 \text{ cm}^2/\text{d}$, $\lambda_L=5 \text{ cm}$, $\lambda_T=1 \text{ cm}$, $\theta_r=0.68$, 其他参数取值见表 4。

表 3 土壤水分特征参数

Table 3 Soil moisture characteristic parameters

土壤深度 Soil depth/cm	$\theta_r/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\theta_s/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	α/cm^{-1}	n	$K_s/(cm \cdot d^{-1})$	l
0~10	0.0269	0.3676	0.0296	2.1676	50.55	0.5
>10~20	0.0279	0.3456	0.0281	2.2141	49.34	0.5
>20~40	0.0277	0.3523	0.0372	2.1983	48.41	0.5
>40~60	0.0286	0.3657	0.0421	1.9152	40.48	0.5
>60~80	0.0272	0.3589	0.0474	2.1354	46.12	0.5

注: θ_r 为土壤残余含水率; θ_s 为土壤饱和含水率; α 和 n 为土壤水分特征曲线形状系数; K_s 为饱和导水率; l 为孔隙连通性参数。

Note: θ_r is the residual moisture content of soil; θ_s is the saturated moisture content of soil; α and n are the shape coefficient of soil water characteristic curve; K_s is the saturated water conductivity; l is the pore connectivity parameter.

表 4 土壤溶质运移和热特性参数

Table 4 Soil solute transport parameters and thermal parameters

土壤深度 Soil depth/cm	D_L/cm	D_T/cm	$b_1/(W \cdot cm^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$b_2/(W \cdot cm^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$b_3/(W \cdot cm^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$C_n/(J \cdot cm^{-3} \cdot ^\circ C^{-1})$	$C_w/(J \cdot cm^{-3} \cdot ^\circ C^{-1})$	$C_o/(J \cdot cm^{-3} \cdot ^\circ C^{-1})$
>0~10	65	45	8.67×10^{16}	8.53×10^7	5.89×10^8	1.43×10^{14}	1.87×10^{14}	3.12×10^{14}
>10~20	60	45	2.87×10^{17}	7.95×10^7	6.24×10^8	1.43×10^{14}	1.87×10^{14}	3.12×10^{14}
>20~40	45	40	6.57×10^{17}	7.83×10^7	7.49×10^8	1.43×10^{14}	1.87×10^{14}	3.12×10^{14}
>40~60	20	15	7.77×10^{17}	7.65×10^7	8.29×10^8	1.43×10^{14}	1.87×10^{14}	3.12×10^{14}
>60~80	20	15	4.57×10^{16}	2.53×10^7	9.89×10^8	1.43×10^{14}	1.87×10^{14}	3.12×10^{14}

注: D_L 为纵向弥散度; D_T 为横向弥散度; b_1 、 b_2 、 b_3 分别为热传导函数的参数; C_n 、 C_w 、 C_o 分别为固相、液相、有机质的体积比热容。

Note: D_L is longitudinal dispersion; D_T is lateral dispersion; b_1 , b_2 and b_3 are the parameters of the heat conduction function; C_n , C_w and C_o are the volume specific heat capacities of solid phase, liquid phase and organic matter, respectively.

1.4.4 模型评价指标

为了定量描述模型模拟的精度, 采用模拟值与实测值之间的均方根误差 (root mean squared error, RMSE)、平

均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和决定系数 (R^2) 对模型进行评价^[36]。其中, RMSE、MAE 越接近 0, R^2 越接近 1, 表明模拟值的变化趋势与实测值吻合程度越高。

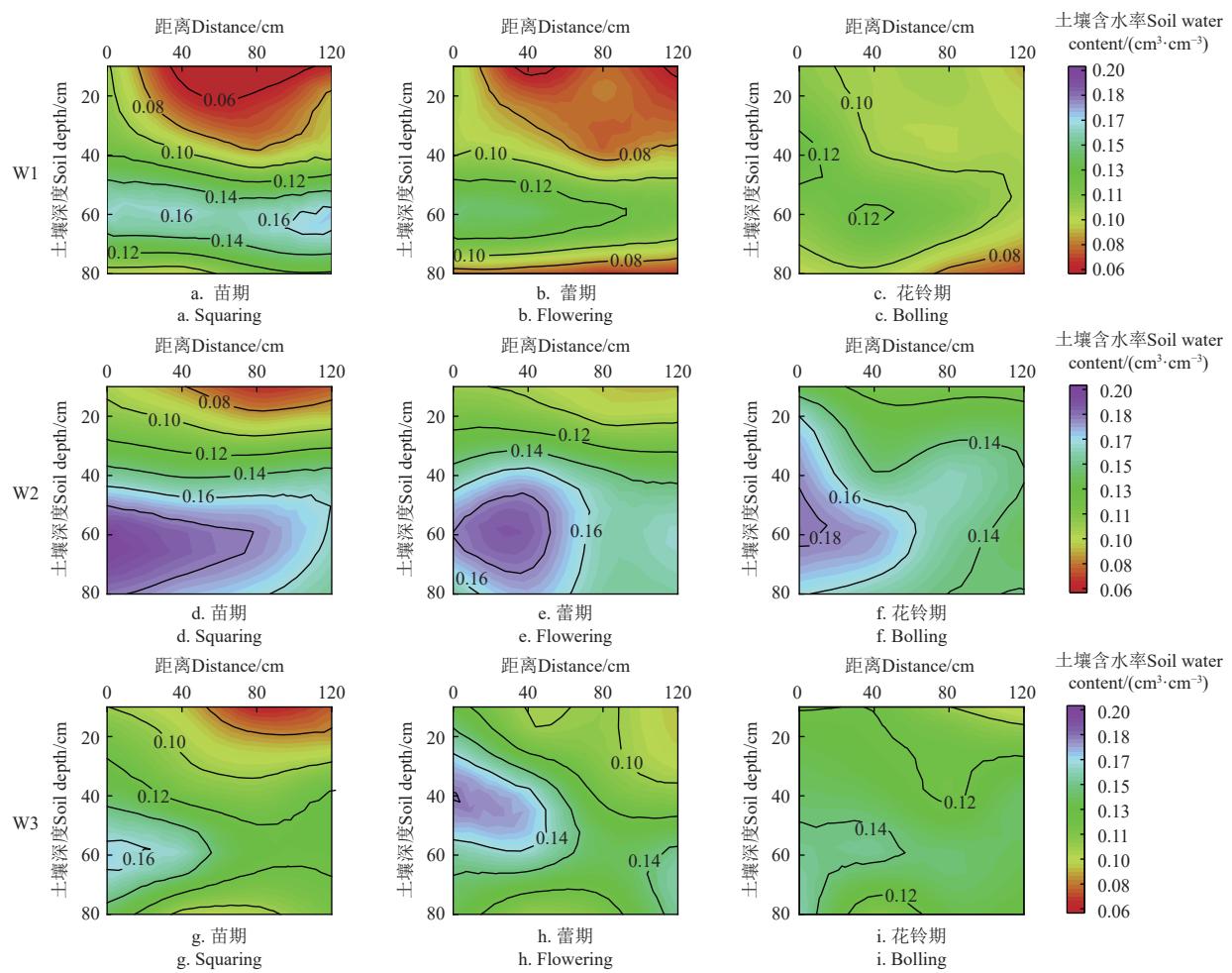
2 结果与分析

2.1 土壤水分二维运移及模拟

2.1.1 生育期内土壤水分二维运移及分布特征

在棉花生育期内土壤水分会伴随着灌水、土壤蒸发、植株蒸腾等过程运动, 影响土壤水分在剖面上的分布。选取棉花苗期(6月12日)、蕾期(7月15日)和花铃期(8月25日)3个时期代表生育进程中的前、中、后3个阶段(选取日期均为相应生育阶段末期最后一次灌水前取土日期), 分析生育期内不同灌水量下土壤水分的二维运移及空间分布(图4), 图中距离(水平坐标)表示与覆膜中间的水平距离, 其中0、40、80、120 cm的距离分别代表中行、滴灌带下、边行、裸土。

由图4可知, 苗期和蕾期土壤水分二维分布的差异性较大, 由于裸间蒸发耗水严重, 土壤表层0~20 cm含水率最低, 在0.05~0.11 cm³/cm³之间, 40~60 cm含水率在整个剖面中最高, 可达到0.14~0.18 cm³/cm³, 土壤含水率随深度的增加先增大后减小, 水平方向上表现为



注: S1 为灌水矿化度 1.5 g·L⁻¹。

Note: Mineralization is 1.5 g·L⁻¹ in irrigation water

图4 S1 处理不同灌水量下土壤水分二维分布
Fig.4 Two-dimensional distribution of soil moisture under various irrigation amounts of S1 treatment

2.1.2 生育期始末二维土壤剖面水分变化

以W2S1处理(当地常规灌溉)为例分析不同位置

由膜下向膜间裸土逐渐递减的变化趋势。随着灌水量的累加和植株发育, 冠层遮蔽降低了膜间裸土蒸发, 生育后期土壤剖面上含水率的分布逐渐均匀(图4c、图4f、图4i)。生育期内灌水对0~40 cm深度土壤水分的影响显著^[37], 从苗期到花铃期, 3个灌水量下土壤含水率均增加, W1、W2、W3的0~40 cm平均含水率分别增加了21.84%、29.13%、32.37%, 40~80 cm均略有降低。总的来说, 土壤含水率在二维剖面内呈现出随深度增加先增大后减少, 由膜内向膜间递减的分布规律。

由图4a和图4b可以发现, 在低灌水量下, 土壤水分主要分布在水平0~20 cm和垂直40~60 cm, 高灌水量下(图4g和图4h), 土壤水分主要分布在水平0~60 cm和垂直30~80 cm, 随着灌水量的增加, 土壤湿润区域增大。对比W2S1和W3S1处理, 在苗期(图4d和图4g)、蕾期(图4e和图4h)和花铃期(图4f和图4i), W2S1土壤40~80 cm含水率均保持在大于W3S1的水平, 过量的灌溉定额会增加植株蒸腾, 这表明过量灌水不一定提高根区土壤含水率。

土壤含水率在生育期始末的变化(生育期末-生育期初), 如表5。

生育期内土壤含水率在灌溉、植株蒸腾和土壤蒸发影响下不断波动，但生育期结束后的总体土壤含水率低于初始值。覆膜春灌的非生育期盐分淋洗模式有效提升了生育期初的土壤含水率，但膜间裸土含水率提高较少，同时生育期内的灌水也较少转移到膜间，因此裸土水分降低最少， $0\sim 80\text{ cm}$ 土层平均降低 $0.029\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ；而边行和中行初始含水率较高，同时在棉花旺盛的蒸腾作用下导致土壤水分降低最多，分别为 0.046 、 $0.041\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ；生育期内频繁的灌水使得滴灌带下 60 cm 处始终处在湿润锋边缘，同时棉花根系吸水和土壤蒸发影响较小，使其土壤含水率在生育期末上升 $0.024\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

2.1.3 不同水盐处理下 $0\sim 60\text{ cm}$ 土壤水分动态

图 5 为不同水盐处理下根区 $0\sim 60\text{ cm}$ 土壤含水率模拟值与实测值的比较结果，在每次灌水之后土壤水分得到补充，随着作物耗水和土壤蒸发缓慢下降，各层土壤

水分呈现锯齿状波动，其中土壤 $0\sim 20\text{ cm}$ 波动较深层大。土壤含水率的模拟效果较好， R^2 、RMSE、MAE 分别在 $0.64\sim 0.85$ 、 $0.01\sim 0.03\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、 $0.01\sim 0.03$ 之间，深层土壤含水率模拟效果优于表层。

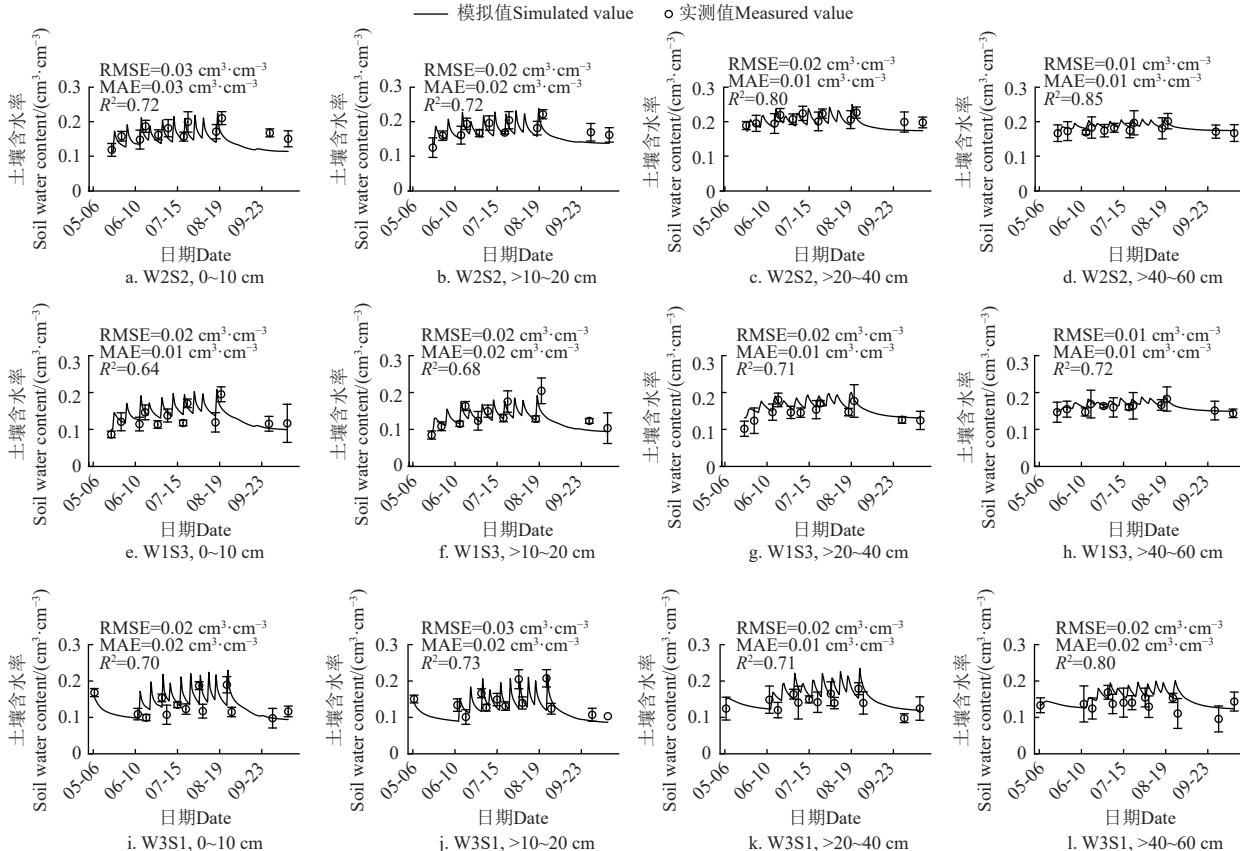
表 5 生育期始末土壤含水率变化

Table 5 Changes of soil moisture from the initial to the end of growth stage

土壤深度 Soil depth/cm	中行 Middle row/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	滴灌带 Drip irrigation tape/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	边行 Border row/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	裸土 Bare soil/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)
$0\sim 10$	-0.038	-0.082	-0.040	-0.013
$>10\sim 20$	-0.044	-0.053	-0.048	-0.015
$>20\sim 40$	-0.041	-0.033	-0.049	-0.037
$>40\sim 60$	-0.037	0.024	-0.045	-0.046
$>60\sim 80$	-0.045	-0.011	-0.047	-0.034
平均值 Average	-0.041	-0.031	-0.046	-0.029

注：负号表示生育期末土壤含水率下降。

Note: The negative sign indicates that the soil moisture content decreases at the end of the growth period.



注：RMSE 为均方根误差。MAE 为平均决定误差。S2 和 S3 中，灌水矿化度分别为 3.5 和 $5.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

Note: RMSE is root mean square error. MAE is mean relative error. Irrigation mineralization is 3.5 and $5.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ for S2 and S3 respectively.

图 5 不同水盐处理下 $0\sim 60\text{ cm}$ 土壤含水率模拟值与实测值的比较

Fig.5 Comparison of simulated and measured water content in $0\sim 60\text{ cm}$ soil depth under different water and salinity treatments

2.2 土壤盐分二维运移及模拟

2.2.1 单次灌水前后土壤剖面盐分动态

本文以棉花生育中期的第 5 次灌水事件（灌水日期为 7 月 18 日，灌水量见表 2）为例，分析不同灌水量下单次灌水前后土壤剖面上的盐分运移（图 6）。灌水前，垂直方向上土壤盐分主要分布在深层，W1S1 处理（图 6a）盐分在土壤 $40\sim 80\text{ cm}$ 深度累积，平均盐含量是 $0\sim$

40 cm 的 2.4 倍，而 W2S1（图 6b）和 W3S1（图 6c）处理主要分布在土壤 $60\sim 80\text{ cm}$ 深度，平均盐含量是 $0\sim 60\text{ cm}$ 的 1.91 、 2.26 倍；水平方向上，W1、W2 处理土壤盐分在边行和裸土的 $20\sim 40\text{ cm}$ 累积，W3 处理在 $30\sim 60\text{ cm}$ 累积，灌水量增加提高了低矿化度处理下的洗盐效率，导致土壤积盐深度增大。灌水后，由于滴灌的点源入渗特性，在滴头下方形成一个半圆形脱盐区，土层加深淋

洗作用减弱, 40~80 cm 土层土壤盐分在 W1 时基本不变, W2、W3 盐分向下迁移而呈现降低趋势。S1 矿化度低, 0~40 cm 土层中行和滴灌带下的盐含量均小于灌水前, 以盐分淋洗为主, 而对于不同的灌水量, 边行和裸土的

盐分变化不同, 低灌水量下边行盐分增加, 积盐率为 11.55%, 中、高灌水量下盐分在裸土增加, 积盐率分别为 5.53%、15.21% (图 6d~图 6f), 表明随着灌水量增大, 盐分淋洗到较深的土层中, 脱盐区域向膜外移动扩展。

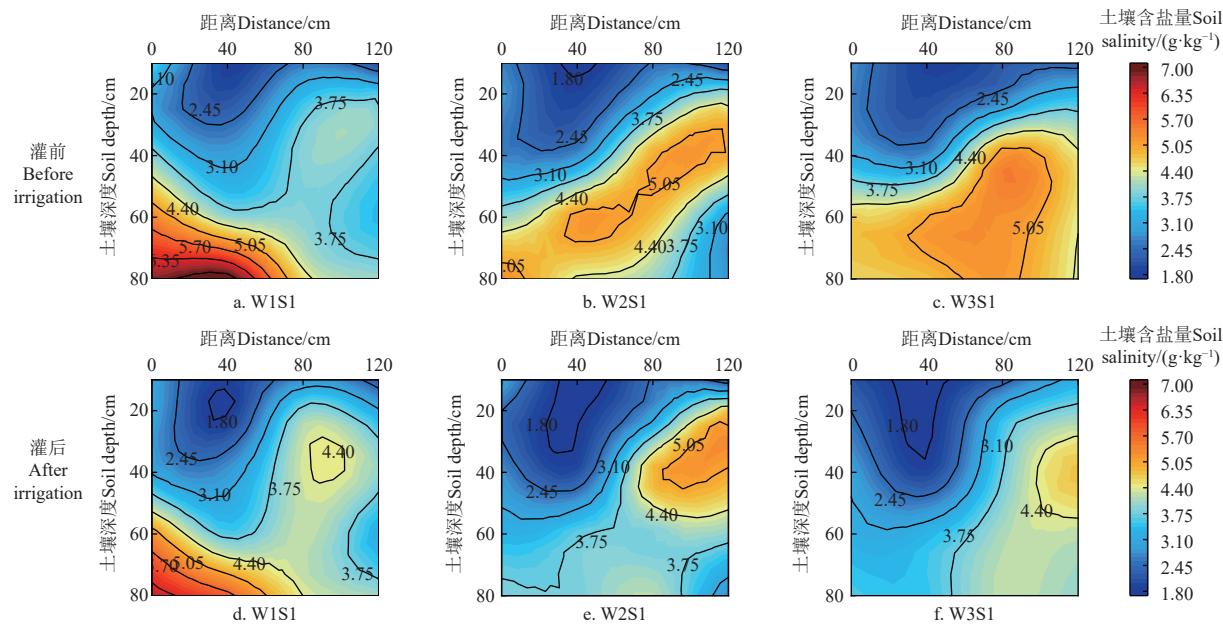


图 6 S1 处理不同灌水量下灌水前后土壤盐分的剖面分布

Fig.6 Distribution of soil salinity before and after irrigation under various irrigation amounts of S1 treatment

2.2.2 全生育期土壤剖面盐分的二维运移特征

微咸水灌溉能够淋洗土壤中的盐分, 同时也会将灌水将盐分带入土壤中, 不同灌溉量下盐分淋洗速率与累积速率的大小将影响土壤盐分的运移及分布。为了明晰生育期内 0~80 cm 土壤盐分的动态变化及运移趋势, 与土壤水分相同, 以棉花苗期 (6月 12 日)、蕾期 (7月 15 日) 和花铃期 (8月 25 日) 3 个阶段为生育前期、中期和后期进行分析。生育期内不同灌水矿化度下土壤剖面盐分的分布如图 7 所示。

苗期土壤盐分主要分布在 40~80 cm 土层, 盐分在上层土壤的水平方向上没有显著差异 (图 7a、图 7d、图 7g), 这是由于播前采用覆膜春灌的方式将盐分淋洗至深层土壤, 膜间裸土的蒸发对于膜内外盐分运移的影响较小。此时正处生育期的第 1 次灌水前, 不同矿化度之间的盐分分布无显著差异。

与生育初期相比, 蕾期 (图 7b、图 7e、图 7h) 的土壤盐分分布出现差异, 在此期间较高的灌水频率有利于盐分向下迁移并在湿润锋边缘积聚, 导致深层土壤的盐分升高。3 种灌水矿化度处理下 40~80 cm 土壤深度中行和滴灌带位置的盐分均相对较高, 其中, W2S2 和 W2S3 处理中行和滴灌带下的 40~80 cm 平均含盐量分别比苗期增加了 36.61% 和 31.07%, 这是在“一膜两带六行”的种植模式下, 中行位于两侧滴灌带形成的湿润峰交汇处, 高盐浓度时导致盐分在 40~80 cm 的中行和滴灌带下积聚。W2S1 处理在裸土的 0~40 cm 盐分累积, 0~40 cm 平均含盐量分别比苗期增加了 77.47%, 由于蒸发驱动的盐分向上迁移, 导致裸土的 40~80 cm 盐分有

所下降; 而 W2S2 和 W2S3 处理 0~40 cm 边行土壤含盐量要高于膜间裸土。

在花铃期 (图 7c、图 7f、图 7i), 不同灌水矿化度对盐分的空间分布产生显著的影响。与生育初期相比, S1 矿化度灌溉下的中行和滴灌带下 40~80 cm 深度土壤盐分分别降低了 45.71%、29.03%, 盐分淋洗效果明显, 而 S3 盐浓度较高, 中行和滴灌带下土壤 40~80 cm 盐分分别增加了 56.28%、80.14%。S1 处理 0~80 cm 土壤含盐量相对较低, 水平方向上主要在边行和裸土积聚; S2 处理 60~80 cm 深度为主要积盐区, 水平方向上除滴灌带下均发生积盐; S3 处理灌水矿化度较高, 在 40~80 cm 深度发生盐分累积, 水平方向上在边行和裸土处积盐。

2.2.3 生育期始末二维土壤剖面盐分变化

表 6 为 W2S1 处理土壤剖面上不同位置盐分在生育期始末的变化。灌溉是土壤盐分运移的主要驱动因素, 由表可知, 低矿化度的灌水淋洗滴灌带下 0~40 cm 土壤盐分, 其中表层 0~10 cm 土壤生育期末盐分降低 0.46 g/kg, 随着土壤深度的增加淋洗效果减弱, 盐分在 40~80 cm 积聚, 生育期末上升 1.51 g/kg; 边行 10~40 cm 处于湿润范围内盐分得到淋洗, 而 0~10 cm 处于湿润锋边缘, 生育期末盐分上升 0.30 g/kg; 膜间裸土是主要的积盐区, 田间土壤较砂且 10~40 cm 处于湿润锋边缘, 因此在生育期末膜间土壤 10~40 cm 盐分累积高于膜间 0~10 cm 土壤; 中行处于两根滴灌带造成的湿润锋重合处, 生育期末在中行 20~40 cm 处累积的盐分最多, 为 1.05 g/kg。

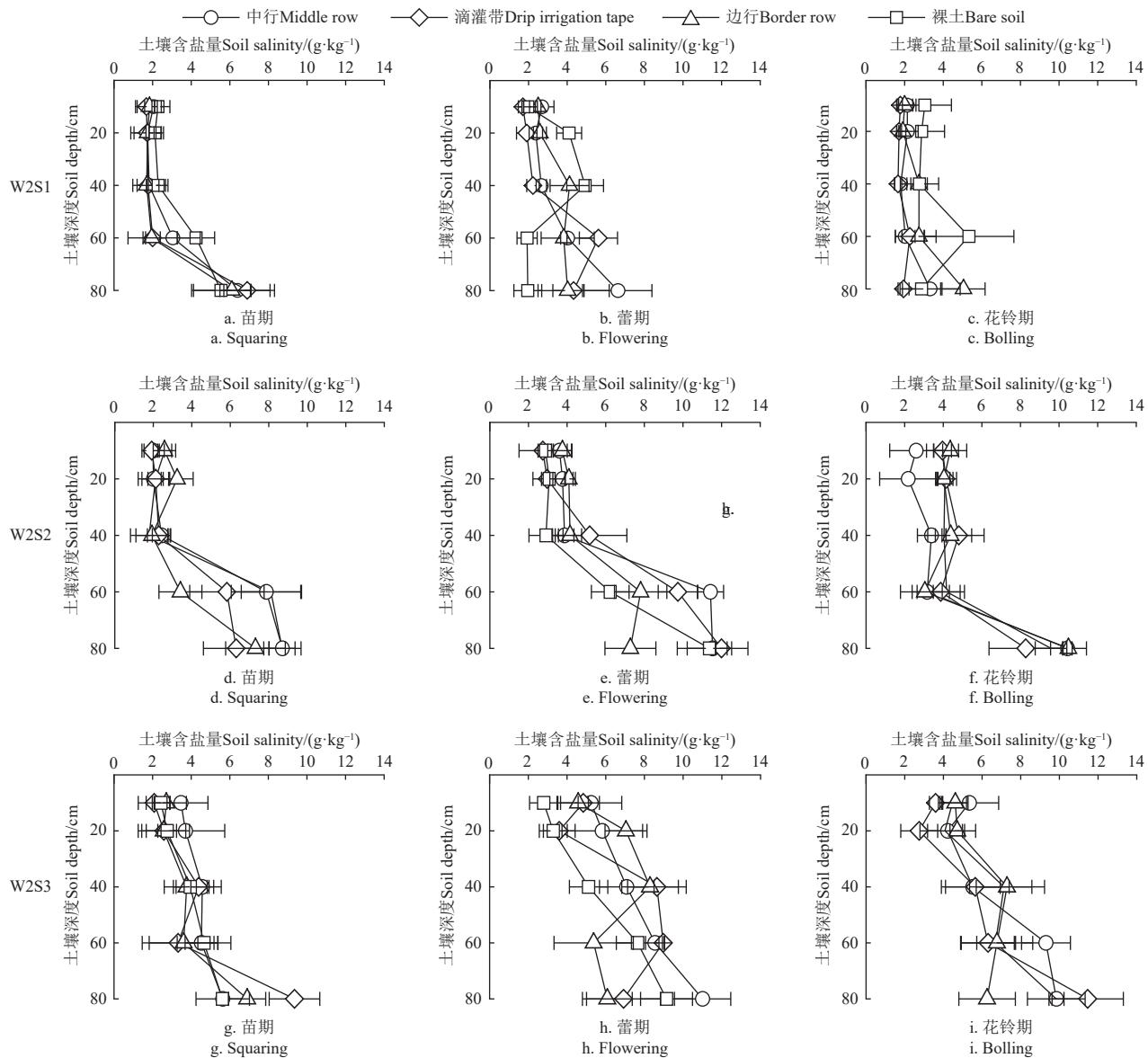


图 7 生育期内不同灌水矿化度下土壤盐分二维分布

Fig.7 Two-dimensional distribution of soil salinity in different growth stages under various irrigation salinity

表 6 生育期始末土壤含盐量变化

Table 6 Changes of soil salinity from the initial to the end of growth stage

土壤深度 Soil depth/cm	中行 Middle row/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	滴灌带 Drip irrigation tape/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	边行 Border row/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	裸土 Bare soil/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
0~10	0.60	-0.46	0.30	0.28
>10~20	0.42	-0.23	-0.02	0.91
>20~40	1.05	-0.07	-0.13	0.79
>40~60	0.07	1.04	0.39	0.46
>60~80	-0.20	0.47	0.17	-0.05
平均值 Average	0.39	0.15	0.14	0.48

注：负号表示生育期末土壤含盐量下降。

Note: The negative sign indicates that the soil salinity decreases at the end of the growth period.

2.2.4 不同水盐处理下 0~60 cm 土壤含盐量动态

生育期内 0~60 cm 土壤含盐量的动态变化模拟与实测值的比较如图 8 所示，模拟的盐分变化趋势与实际基本一致，图 8 展示的 3 个处理中，灌溉水矿化度大于 S2 时，0~40 cm 土壤盐分波动式上升，而 W3S1 处理的

含盐量基本不变，40~60 cm 含盐量均呈降低趋势。模拟结果较好， R^2 、RMSE、MAE 分别在 0.56~0.79、0.27~1.28 g/kg、0.25~1.24 之间。

2.3 土壤二维剖面的热运移及模拟

2.3.1 土壤剖面温度的动力学及分布特征

由于试验设置只在 W2S1、W2S2 和 W2S3 这 3 个处理下埋设土壤温度传感器，而经过比较发现在不同处理之间生育期内土壤温度差异较小，所以本文选择以 W2S1（当地常规灌溉）为例进行分析。通过分析各层土壤温度随棉花生育阶段的变化规律（图 9），可以发现各层土壤温度变化趋势一致，生育初期土壤温度迅速升高，进入蕾期后在冠层遮蔽和灌水的双重作用下，土壤温度呈波动式下降。进入吐絮期后土壤温度略有回升，此后随空气温度迅速降低。

土壤 0~40 cm 温度受外界环境影响较大引起波动幅度大，各生育阶段始末的平均温差在 3.56~8.41 °C 之间，

而土壤 40~80 cm 温度波动较小, 各生育阶段始末的平均温差在 1.61~4.55 °C 之间。从空间尺度上看, 随深度增加土壤平均温度逐渐降低, 0~80 cm 的土壤各层平均温度从 24.06 °C 降至 22.41 °C。覆膜可以显著提高生育

初期的土壤温度, 这种增温效果对 0~40 cm 土壤影响较大。棉花苗期由于覆膜导致 0~40 cm 的膜内外土壤平均温差为 1.35 °C, 此后随着冠层发育遮蔽土壤, 覆膜的增温效果减弱。

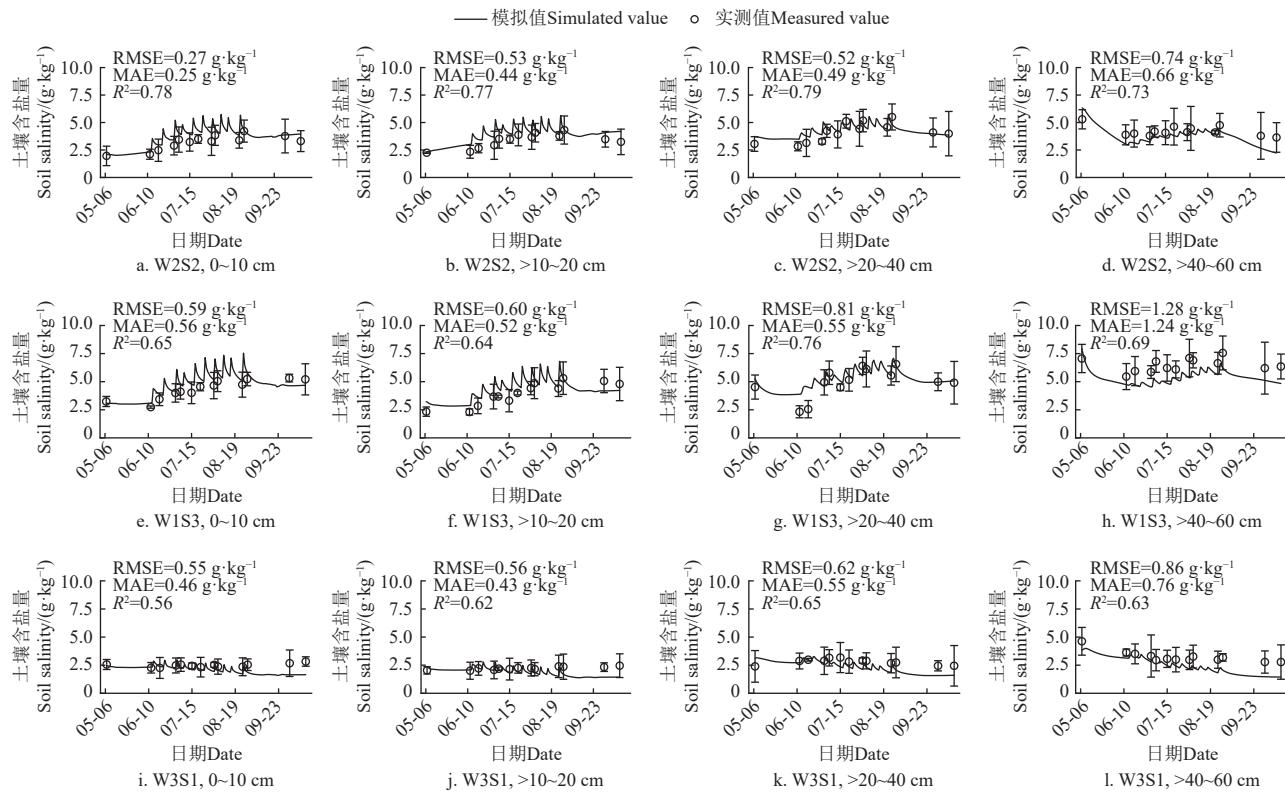


图 8 不同水盐处理下 0~60 cm 土壤含盐量模拟与实测的比较

Fig.8 Comparison of simulated and measured soil salinity in 0-60 cm soil depth under different water and salinity treatments

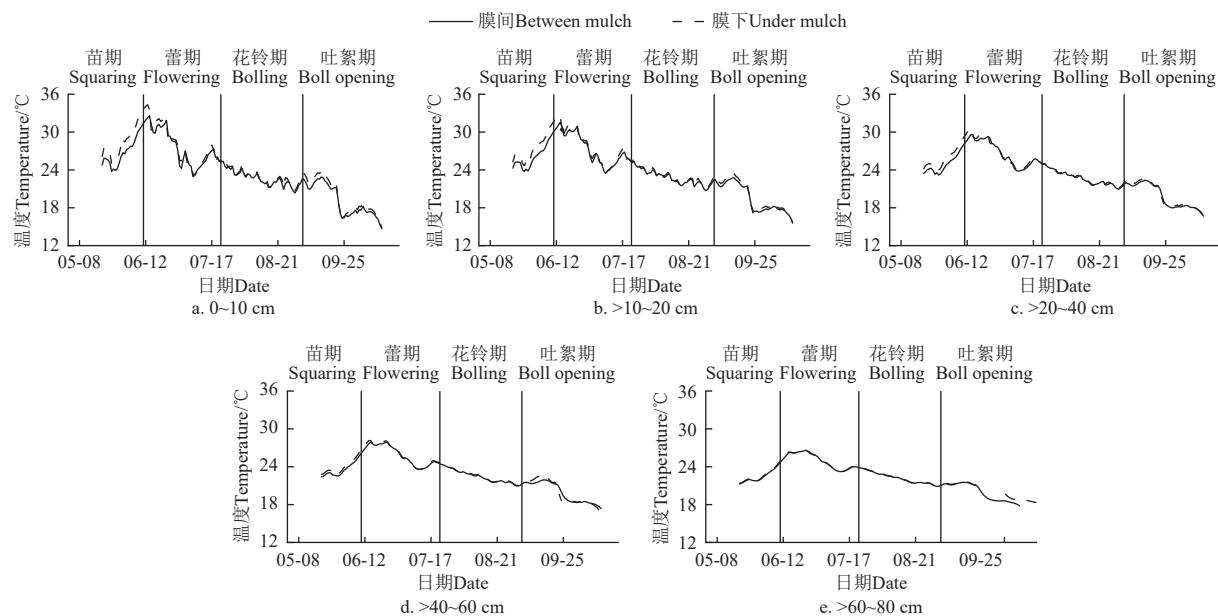


图 9 生育期内 0~80 cm 土层温度动态变化

Fig.9 Dynamic changes of soil temperature of 0-80 cm soil depth in different growth stages

2.3.2 全生育期 0~60 cm 土壤温度模拟和实测比较

在田间试验中只收集了 W2 灌水量下 3 个处理的温度实测值, 所以在土壤水热盐耦合模拟中, 仅对比了

W2S2 处理土壤温度的实测与模拟结果, 图 10 为 0~60 cm 土壤日平均温度的模拟值与实测值比较, 表现出良好的一致性, R^2 在 0.77~0.87 之间。

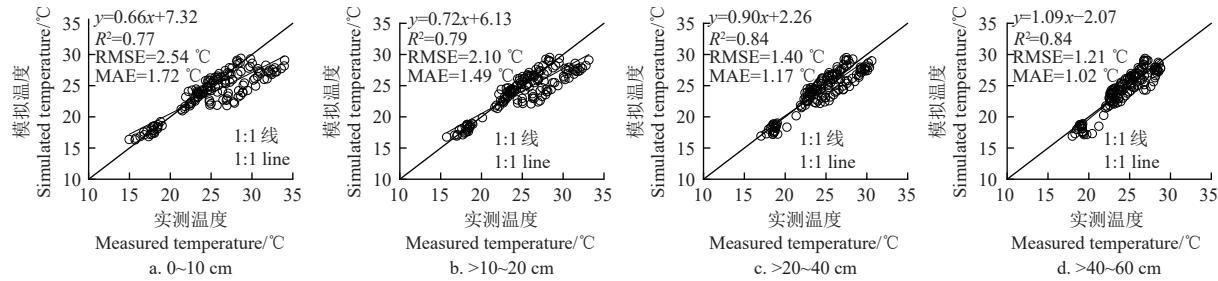


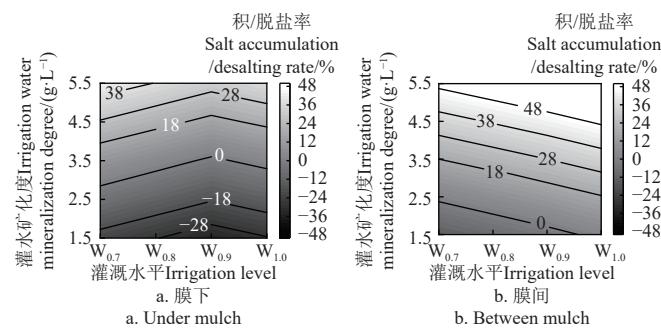
图 10 0~60 cm 土壤温度模拟值与实测值比较

Fig.10 Comparison of simulated and measured soil temperature in 0-60 cm soil depth

2.4 情景模拟

由以上模拟与实测值的对比可知, 本文建立的模型能够可靠地反映膜下滴灌农田不同水盐处理下的土壤水盐运移规律。进一步采用本模型进行情景模拟, 设置 $W_{0.7}$ 、 $W_{0.8}$ 、 $W_{0.9}$ 、 $W_{1.0}$ 共 4 个灌水量水平, 分别为灌溉需水量的 70%、80%、90%、100% 和 $S_{1.5}$ 、 $S_{2.5}$ 、 $S_{3.5}$ 、 $S_{4.5}$ 、 $S_{5.5}$ 共 5 个灌溉水矿化度水平, 分别为 1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 g/L, 以便模拟多水盐处理下膜下滴灌农田棉花根区的土壤水盐动态, 确定南疆适宜的膜下滴灌灌溉制度。情景模拟除灌水量和灌水矿化度的输入外, 模型设置均与以上模拟相同。

根据前人的研究, 膜下滴灌棉花根系分布主要集中在土壤 25~35 cm 之间^[38], 0~40 cm 是棉花的主根区, 因此情景模拟结果主要分析不同灌溉水盐条件下土壤 0~40 cm 膜下与膜间的土壤盐分迁移规律。生育期始末膜下和膜间的土壤积、脱盐率如图 11, 可以发现, 土壤盐分淋洗主要发生在膜下 (图 11a), 当矿化度小于 2.5 g/L 时, 4 个灌水量的膜下 0~40 cm 深度均没有积盐。同一灌水矿化度下, 随着灌水量的增加, 土壤湿润范围扩大, 膜下的盐分淋洗作用加强 (低矿化度时的脱盐率增大, 高矿化度时的积盐率减小), 向膜间迁移的盐分增加, 而在灌水量超过 $W_{0.9}$ 时, 膜下土壤脱盐率有所降低。



注: $W_{0.7} \sim W_{1.0}$ 分别为需水量的 70%、80%、90% 和 100%。
Note: $W_{0.7} \sim W_{1.0}$ are 70%, 80%, 90% and 100% of water demand, respectively.

图 11 0~40 cm 土壤膜内外积/脱盐率

Fig.11 Salt accumulation rate or desalting rate of 0-40 cm soil depth in and out of mulch

在相同的灌水量下, 随着灌水矿化度的增加, 土壤脱盐率减少, 积盐率逐渐增大, 当矿化度大于 3.5 g/L 时, 所有灌水量的膜下 0~40 cm 土壤均出现积盐。随着灌水量的增加, 更多的盐分淋洗至膜间 (图 11b), 灌水矿

化度为 1.5 g/L 条件下, 灌溉水量高于 $W_{0.95}$ 会导致膜间 0~40 cm 土壤出现盐分累积; 当灌水矿化度高于 2.5 g/L 时, 所有灌水量均会导致膜间土壤积盐。生育期内根区土壤盐分淋洗效率不会随着灌水量的增大而增加, 同一灌水矿化度下, 当灌水量为 $W_{0.9}$ 时, 可以达到膜下土壤最高的脱盐率或最小的土壤积盐率。充分灌溉条件下, 保证膜下 0~40 cm 土壤不积盐的最高灌水矿化度为 3.2 g/L; 在 90% 的灌溉需水量下, 保证膜下土壤根区不积盐的最高灌水矿化度为 3.5 g/L; 灌水矿化度低于 2.5 g/L 时, 所有灌溉水平均不会导致根区土壤出现盐分累积。

3 讨论

3.1 土壤水热盐二维运移及分布特征

本试验观测到土壤水分在垂直方向上呈现出先增大后减小的分布规律, 在 40~60 cm 土层含水率较高。这是由于南疆地区土壤质地偏砂性, 且地下水埋深多在 2.5 m^[16] 以下, 土壤水分主要靠灌溉进行补给, 由于覆膜滴灌单次灌水量少且灌水强度小, 生育期内灌水湿润深度多在 60 cm 左右, 而 0~40 cm 为棉花的主根区, 在植株蒸腾耗水影响下导致土壤水分在垂直方向上呈现先增大后减小的特征。这与 CHEN 等^[37] 得到的研究结果相同。“一膜两带六行”的种植模式下, 由于生育期内持续灌水使相互对称的两侧滴灌带湿润区在膜中间的中行处产生重叠, 在覆膜作用下蒸发较小, 而膜间裸土距离滴灌带较远且裸露土壤蒸发强烈, 水分散失快, 生育期内的少量降雨 (图 1, 单次降雨量在 0.2~4.4 mm 之间) 虽然会在短时间内提高膜间裸土含水率, 但对膜间 10 cm 以下土壤无显著影响, 同时在强烈的蒸发作用下膜间裸土含水率迅速降低, 单次降雨对土壤水分二维分布影响较小, 因此水平方向上土壤含水率呈现出从膜内中行到膜间裸土逐渐降低, 这也与以往研究一致^[39-40]。生育前期土壤水分有较大的分布差异, 随着灌水量的增加, 湿润体逐渐向膜外移动, 湿润区范围扩大 (图 4), 在生育后期土壤剖面上水分分布的均匀性增加, 这与 CHEN 等^[41] 的研究结果相同。125% 的灌溉需水量并不能提高根区土壤含水率 (图 4h、图 4i), 这是因为过量的灌溉定额促进作物生长发育, 旺盛的蒸腾作用在一定程度上降低了土壤含水率。

盐随水走, 随着裸土蒸发和定期灌溉, 土壤盐分在不同灌水量和灌水矿化度的影响下再分布。S1 矿化度下,

灌水量增加提高了此矿化度处理的洗盐效率。由灌前土壤盐分分布(图6)可知,低灌水量下,土壤水盐向下迁移,在40~80 cm深度积聚,较低的灌水量水盐横向运移较少(图6a);随着灌水量的增加,湿润区不断扩大,在膜间裸土蒸发作用下盐分被淋洗到膜间,而W3处理充足的灌溉水量也淋洗了裸土0~20 cm土壤盐分(图6b、图6c)。灌后土壤在滴灌带处出现明显的脱盐区(图6d、图6e、图6f),其中低(W1)灌水量处理盐分分布与灌前相同,高灌水处理盐分淋洗效果显著,盐分被淋洗至深层土壤,这与HOU等^[42]的研究结论相同。

随着生育期的进行,中、高矿化度灌水处理土壤盐分不断累积,累积位置主要在中行和滴灌带处的40~80 cm(图7e、图7h),这是因为“一膜两带六行”的模式下中行和滴灌带处为土壤主要湿润区,中、高矿化度的灌溉水在此累积提高了土壤盐分。进入花铃期,停止灌水后盐分的主要驱动力来自膜间裸土的蒸发,水平方向上边行和膜间裸土处出现盐分累积(图7c、图7f、图7i)。与前人研究结果^[42-43]不同的是,膜间0~20 cm含盐量低于20~40 cm,盐分表聚现象不明显,这是由于试验地土壤质地偏砂,导水率较大,垂直方向的盐分运移远高于水平方向,因此盐分在随湿润峰运移时导致膜间20~40 cm土壤盐分高于0~20 cm。同一灌水量下,随着灌水矿化度的增加,生育期内灌水对盐分的淋洗效果减弱,高矿化度的处理60~80 cm土壤积盐更加显著,灌水带入的盐分在此处产生积聚(图7)。灌水矿化度增大,盐分累积占主导,盐分累积深度降低。

苗期土壤温度随空气温度的升高迅速增高,进入蕾期后作物生长旺盛,同时频繁的灌水降低了土壤温度,使得进入蕾期后土壤温度开始降低,覆膜的增温效果减弱。进入吐絮期后停止灌水,棉花叶片脱落,土壤温度略有回升,此后又在空气温度影响下迅速降低。生育期内土壤温度的分布差异表现为膜内温度高于膜间温度,上层土壤温度高于下层。同时,覆膜的增温效应在棉花生育初期土壤表层(0~40 cm)表现更加明显,这是因为生育初期植株的遮蔽作用较弱,受太阳直射导致近地表的气体交换频繁,温度波动大,后期植株冠层发育遮蔽膜间裸土,导致覆膜的增温效减弱,这与孙贯芳等^[10, 44-45]的研究结果一致。

3.2 灌溉制度对土壤积/脱盐率的影响

随着灌水矿化度的增加,盐分累积趋势增大^[46],当矿化度小于3.5 g/L时,棉花主根区0~40 cm土壤盐分淋洗速率大,这与杨广等^[22]的研究得出的矿化度在4 g/L以下,盐分淋洗速率大于累积速率,结果基本一致。低矿化度下,膜内0~40 cm土壤脱盐率随灌水量的增加先增大后减小,高矿化度下,膜内土壤积盐率随灌水量的增加先减小后增大,这是由于灌水量增加提高了土壤淋洗深度,W_{0.9}对于根区0~40 cm土壤淋洗效果最好,而过量灌水湿润峰位置处于深层土壤,对根区土壤的淋洗效果与W_{0.9}相同,此外灌水的同时伴随着带入土壤中更多的盐分,除盐分横向运移外,也导致膜下土壤盐分增

加。膜间土壤盐分累积与灌水定额密切相关^[47],增大灌水量能够将更多盐分淋洗至膜间0~40 cm,在不同灌溉制度下膜间0~40 cm土壤主要以积盐为主。由于初始盐含量对盐分的变化有很大影响,情景模拟仅在轻度盐渍土上进行,在不同盐渍程度的区域,其适用性还需要进一步验证。

本文利用HYDRUS-2D模型能够较好地模拟膜下滴灌农田的土壤二维水热盐运移,但仍存在不足之处,例如模型将土壤含水率的覆膜边界在非灌水期简单设置为零通量边界,没有考虑到膜的破损导致的膜下土壤水分蒸发,导致在灌水后土壤湿润条件下,0~20 cm的土壤含水率被高估,峰值较高,而在土壤较干燥的时期,模拟值更加接近实测值。此外还缺少对地上作物生长的模拟,在模拟中采用了已知的土壤水热盐上边界条件。而在实际应用中,土壤的上边界温度往往是未知的,需要考虑根据气象观测结合下垫面能量平衡和水热传输过程来进行量化。

4 结 论

本研究通过田间试验和数值模拟,分析了南疆膜下滴灌农田土壤水热盐在二维剖面上的分布特征及运移规律,并通过情景模拟探究了不同灌水量和灌水矿化度对土壤积/脱盐率的影响,主要得到以下结论:

1) 生育前期土壤二维剖面内水分分布差异明显,后期逐渐均匀;125%的灌溉需水量不能提高根区土壤含水率;低灌水矿化度下土壤盐分累积位置随灌水量增大向深层、膜间土壤运移,中、高矿化度灌水提高了滴灌带下、中行位置处的土壤盐分;覆膜对生育初期0~40 cm土壤增温效果明显。

2) HYDRUS-2D模型能可靠模拟膜下滴灌棉田土壤水热盐二维运移,0~60 cm土层土壤含水率、含盐量、温度模拟值与实测值的动态变化表现出良好的一致性,R²均大于0.56。

3) 膜间土壤主要以积盐为主,微咸水灌溉下较高的灌水定额会提高膜下根区土壤含盐量。灌水矿化度小于2.5 g/L时,不同灌溉水量均不会造成膜下根区土壤在生育期末的盐分累积。充分灌水条件下,保证膜下0~40 cm土壤不积盐的最高灌水矿化度为3.2 g/L;在90%的灌溉需水量下,灌水矿化度为3.5 g/L时,是微咸水灌溉下保证膜下土壤根区不积盐的最大阈值。

[参 考 文 献]

- [1] 刘传迹,金晓斌,徐伟义,等.2000—2020年南疆地区棉花种植空间格局及其变化特征分析[J].农业工程学报,2021,37(16): 223-232.
LIU Chuanji, JIN Xiaobin, XU Weiyi, et al. Spatial pattern and change characteristics of cotton planting in southern Xinjiang from 2000 to 2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 37(16): 223-232. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李文昊,王振华,郑旭荣,等.新疆绿洲盐碱滴灌区域

- 荒地土壤盐分变化[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(8): 722-729.
- LI Wenhao, WANG Zhenhua, ZHENG Xurong, et al. Changes of soil salinity in wasteland in oasis salt-alkali drip irrigation area in Xinjiang[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(8): 722-729. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李江, 李志军, 张鲁鲁. 南疆农业节水潜力与措施分析[J]. *中国水利*, 2023(3): 30-34, 50.
- LI Jiang, LI Zhijun, ZHANG Lulu. Analysis of agricultural water-saving potential and measures in southern Xinjiang[J]. *China Water Resources*, 2023(3): 30-34, 50. (in Chinese with English abstract)
- [4] CHEN W, HOU Z, WU L, et al. Evaluating salinity distribution in soil irrigated with saline water in arid regions of northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 2001-2008.
- [5] 王琼, 尹飞虎, 何帅, 等. 新疆咸水资源现状及其利用分析[J]. *绿洲农业科学与工程*, 2018, 4(3): 55-60.
- WANG Qiong, YIN Feihu, HE Shuai, et al. Current situation and utilization of saline water resources in Xinjiang[J]. *Oasis Agricultural Science and Engineering*, 2018, 4(3): 55-60. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李金刚, 何平如, 陈菁, 等. 灌溉水盐分组成对番茄生长及土壤盐碱的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 423-436.
- LI Jingang, HE Pingru, CHEN Jing, et al. Effects of salinity composition of irrigation water salinity on tomato growth and soil salinity [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2024, 38 (2) : 423-436. (in Chinese with English abstract)
- [7] 田富强, 温洁, 胡宏昌, 等. 滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望[J]. *水利学报*, 2018, 49(1): 126-135.
- TIAN Fuqiang, WEN Jie, HU Hongchang, et al. Research progress and prospect of farmland water and salt transport and regulation under drip irrigation in arid region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(1): 126-135. (in Chinese with English abstract)
- [8] TIAN H, BO L, MAO X, et al. Modelling soil water, salt and heat dynamics under partially mulched conditions with drip irrigation, using HYDRUS-2D[J]. *Water*, 2022, 14(18): 2791.
- [9] 吉光鹏, 张栋海, 陈兵, 等. 多次微量滴水技术对南疆棉田土壤水热盐分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(S1): 26-32.
- JI Guangpeng, ZHANG Donghai, CHEN Bing, et al. Effects of multiple micro-drip technology on the distribution of water, heat and salt in cotton soil in southern Xinjiang[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(S1): 26-32. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 144-152.
- SUN Guanfang, QU Zhongyi, DU Bin, et al. Law of water, heat and salt transfer under film drip irrigation in Hetao irrigation district under different irrigation systems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(12): 144-152. (in Chinese with English abstract)
- [11] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M . The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media; Technical manual, version 1.0[R]. California: University of California-Riverside Research, 2006.
- [12] DOU X, SHI H, LI R, et al. Simulation and evaluation of soil water and salt transport under controlled subsurface drainage using HYDRUS-2D model[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 273: 107899.
- [13] ZHAO Y, ZHAI X, WANG Z, et al. Simulation of soil water and heat flow in ridge cultivation with plastic film mulching system on the Chinese Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 202: 99-112.
- [14] 王在敏, 何雨江, 斯孟贵等. 运用土壤水盐运移模型优化棉花微咸水膜下滴灌制度[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 63-70.
- WANG Zaimin, HE Yujiang, JIN Menggui, et al. Optimization of drip irrigation system of cotton under brackish water film using soil water and salt transport model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(17): 63-70. (in Chinese with English abstract)
- [15] LI Y, YU Q, NING H, et al. Simulation of soil water, heat, and salt adsorptive transport under film mulched drip irrigation in an arid saline-alkali area using HYDRUS-2D[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 290: 108585.
- [16] 林栋, 黄茜, 许尊秋, 等. 基于SHAW模型的南疆典型灌区适宜盐分淋洗定额空间分布[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(1): 70-80.
- LIN Dong, HUANG Xi, XU Zunqiu, et al. Spatial distribution of suitable salt leaching quota in typical irrigation areas of southern Xinjiang based on SHAW model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 39(1): 70-80. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李国辉. 南疆无膜滴灌棉花水氮耦合效应试验研究[D]. 塔里木: 塔里木大学, 2023.
- LI Guohui. Experimental Study on Water-nitrogen Coupling Effect of Cotton under Drip Irrigation Without Film in Southern Xinjiang[D]. Tarim: Tarim University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 117-126.
- WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Research progress of brackish water irrigation and soil water and salt regulation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 117-126. (in Chinese with English abstract)
- [19] 姚宝林. 南疆免冬春灌棉田土壤水热盐时空迁移规律与调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- YAO Baolin. Spatial-temporal Migration and Regulation of Soil Moisture, Heat and Salt in Cotton Field with No-winter and Spring Irrigation in Southern Xinjiang[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [20] RICHARDS L. Capillary conduction of liquids in soil through porous media[J]. *Physics*, 1931, 1: 318-333.
- [21] SIMUNEK J, VOGEL T, VAN GENUCHTEN M T H. The SWMS-2D Code for Simulation Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media

- (Version 1.2)[M]. USDA ARS: U. S. Salinity Laboratory, 1994.
- [22] 杨广, 李万精, 任富天, 等. 不同矿化度咸水膜下滴灌棉花土壤盐分累积规律及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 73-83.
YANG Guang, LI Wanjing, REN Futian, et al. Salt accumulation in cotton soil under saline film drip irrigation with different salinity and its numerical simulation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2019, 37(19): 73-83. (in Chinese with English abstract)
- [23] NASSAR I N, HORTON R. Simultaneous transfer of heat, water, and solute in porous media: I. Theoretical development[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(5): 1350-1356.
- [24] ŠIMUNEK J, SUAREZ D. Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 1. Model development[J]. Water Resources Research, 1993, 29(2): 487-497.
- [25] CHUNG S, HORTON R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J]. Water Resources Research, 1987, 23: 2175-2186.
- [26] FEDDES R, KOWALIK P, ZARADNY H. Simulation Of Field Water Use And Crop Yield[M]. New York: Wiley, 1978.
- [27] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper NO. 56. 1998, Rome: FAO.
- [28] YANG P, HU H, TIAN F, et al. Crop coefficient for cotton under plastic mulch and drip irrigation based on eddy covariance observation in an arid area of northwestern China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 171: 21-30.
- [29] 付玉娟, 李尧, 喻浩洋, 等. Hydrus-2D 模拟起垄覆膜处理对夏玉米生育期水量平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 76-87.
FU Yujuan, LI Yao, YU Haoyang, et al. Effects of Hydrus-2D simulated ridging and mulching treatment on water balance in summer maize growth stage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2019, 39(10): 76-87. (in Chinese with English abstract)
- [30] WU F, TANG Q, ZHANG L, et al. Reducing irrigation and increasing plant density enhance both light interception and light use efficiency in cotton under film drip irrigation[J]. Agronomy, 2023, 13(9): 2248.
- [31] 李仙岳, 陈宁, 史海滨, 等. 膜下滴灌玉米番茄间作农田土壤水分分布特征模拟[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 50-59.
LI Xianyue, CHEN Ning, SHI Haibin, et al. Simulation of soil water distribution characteristics in corn and tomato intercropping under drip irrigation under film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(10): 50-59. (in Chinese with English abstract)
- [32] 陈兵林. 棉花生长模拟与决策支持系统研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
CHEN Binglin. Research on Cotton Growth Simulation and Decision Support System [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [33] NING S, SHI J, ZUO Q, et al. Generalization of the root length density distribution of cotton under film mulched drip irrigation[J]. Field Crops Research, 2015, 177: 125-136.
- [34] SCHAAP M G, LEIJ F J, VAN GENUCHTEN M TH, et al. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(3-4): 163-176.
- [35] 虎军宏, 赵文举, 刘贵元, 等. 滴灌条件下水土温度对覆砂土壤水热运移影响的数值模拟[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 349-354, 360.
HU Junhong, ZHAO Wenju, LIU Guiyuan, et al. Numerical simulation of influence of soil and water temperature on water and heat transport in sand-covered soil under drip irrigation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 34(5): 349-354, 360. (in Chinese with English abstract)
- [36] 丁奠元, 赵英, 孙本华, 等. 根区水质模型在黄土高原旱区冬小麦氮肥管理中的适用性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 111-121.
DING Dianyuan, ZHAO Ying, SUN Benhua, et al. Application of root zone water quality model to nitrogen fertilizer management of winter wheat in arid region of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(23): 111-121. (in Chinese with English abstract)
- [37] CHEN W, JIN M, FERRE T P A, et al. Spatial distribution of soil moisture, soil salinity, and root density beneath a cotton field under mulched drip irrigation with brackish and fresh water[J]. Field Crops Research, 2018, 215: 207-221.
- [38] WANG Z, JIN M, ŠIMUNEK J, et al. Evaluation of mulched drip irrigation for cotton in arid Northwest China[J]. Irrigation Science, 2014, 32: 15-27.
- [39] 黄晓敏, 于宴民, 汪昌树, 等. 干旱区膜下滴灌棉田灌溉制度及土壤水盐运移规律研究[J]. 节水灌溉, 2017(4): 24-29.
HUANG Xiaomin, YU Yanmin, WANG Changshu, et al. Study on cotton field irrigation system and soil water and salt transport law under drip irrigation under film in arid region[J]. Water Saving Irrigation, 2017(4): 24-29. (in Chinese with English abstract)
- [40] 何平如, 张富仓, 侯翔皓, 等. 土壤水分调控对南疆滴灌棉花产量及土壤水盐分布的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 84-92.
HE Pingru, ZHANG Fucang, HOU Xianghao, et al. Effects of soil water regulation on cotton yield and soil water and salt distribution under drip irrigation in southern Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 84-92. (in Chinese with English abstract)
- [41] CHEN L J, FENG Q, LI F R, et al. A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water[J]. Agricultural Water Management, 2014, 146: 24-33.
- [42] HOU X, XIANG Y, FAN J, et al. Spatial distribution and variability of soil salinity in film-mulched cotton fields under various drip irrigation regimes in southern Xinjiang of China[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 223: 105470.
- [43] XIAO C, LI M, FAN J, et al. Salt leaching with brackish water during growing season improves cotton growth and productivity, water use efficiency and soil sustainability in southern Xinjiang[J]. Water, 2021, 13(18): 2602.
- [44] 王东旺, 王振华, 张金珠, 等. 滴灌带布置模式对北疆机

- 采棉生长及土壤水热盐分布特征的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊 1): 76-86.
- WANG Dongwang, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu, et al. Effects of drip irrigation belt layout on machine-picked cotton growth and soil moisture, heat and salt distribution in northern Xinjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp. 1): 76-86. (in Chinese with English abstract)
- [45] 张恒恒, 王香茹, 胡莉婷, 等. 不同机采棉种植模式和种植密度对棉田土壤水热效应及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 39-47.
- ZHANG Hengheng, WANG Xiangru, HU Liting, et al. Effects of different cotton harvesting patterns and planting density on soil hydrothermal effect and yield in cotton field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- [46] 李万精, 杨广, 雷杰, 等. 不同矿化度(微)咸水膜下滴灌棉田土壤水盐分布及棉花生长特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 95-103.
- LI Wanjing, YANG Guang, LEI Jie, et al. Study on soil water and salt distribution and cotton growth characteristics under drip irrigation with different salinity (slightly) salt water film [J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2012, 40(3): 95-103. (in Chinese with English abstract)
- [47] 张迎春, 张富仓, 范军亮, 等. 滴灌技术参数对南疆棉花生长和土壤水盐的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 107-117.
- ZHANG Yingchun, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Effects of drip irrigation parameters on cotton growth and soil water and salt in southern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(24): 107-117. (in Chinese with English abstract)

Two-dimensional transport of soil water, heat and salt with mulched drip irrigation under brackish water in cotton fields and appropriate irrigation schedule in southern Xinjiang of China

BI Wenping, LIN Dong, MAO Xiaomin[※]

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. National Key Laboratory of Efficient Use of Agriculture Water Resources in Southern Xinjiang, Alar 843300, China)

Abstract: This study aims to investigate the dynamics and distribution of soil water, heat, and salt in cotton fields under mulched drip irrigation in southern Xinjiang. The field experiment was conducted under different treatments of water and salt irrigation at Xinjiang Alar Modern Agriculture Academician and Expert Workstation in 2023. Three irrigation levels (75%, 100%, and 125% of crop irrigation water demand for cotton) and three levels of irrigation salinity (1.5, 3.5, and 5.5 g/L). The soil moisture content, soil salt content, and temperature of 0-80 cm layer were measured in the whole period of cotton growth. Then HYDRUS-2D model was used to explore the effects of irrigation amounts and salinity on the two-dimensional (2-D) migration and distribution of soil water, heat, and salt in the cotton field. Scenario simulation was implemented to reveal the mechanism of soil salt leaching/accumulation under different irrigation schedules. The appropriate irrigation schedule was proposed under brackish water irrigation. The main results were as follows. The horizontal moisture of the soil profile was unevenly distributed in the early stage of growth, indicating two-dimensional (2-D) distribution. The moisture content of the soil decreased gradually from the middle of the mulched area to the bare soil between the mulch in the horizontal direction. While there was a more uniform lateral distribution of soil moisture in the later stage. The wet range of soil and irrigation uniformity increased with the increase of irrigation quota. The higher irrigation quota, 125% of the irrigation water demand failed to increase the soil water content in the root zone, compared with 100% of irrigation water demand. The efficiency of soil salt leaching increased with the increase of irrigation amount. Salt accumulation position was shifted to the lower soil layer (40-80 cm) and bare soil under low irrigation salinity. While the moderate and high irrigation salinity levels increased the soil salinity beneath the drip tape and along the centerline of the plastic film. Higher water volumes under low irrigation salinity raised the salt content in the soil of the root zone under the mulch. Soil salt accumulation was dominated to decrease the depth of salt accumulation with the increase of irrigation salinity. The outstanding salt accumulation was observed at 60-80 cm depth under the mineralization degree of 5.5 g/L. Furthermore, the soil temperature under mulch was higher than that in the unmulched area in the whole growth period, where soil temperature decreased with the increase of soil depth. Mulching has significantly enhanced the soil warming at 0-40 cm depth in the early growth stages. HYDRUS-2D platform reliably simulated the transport of water, heat, and salt in cotton fields under mulched drip irrigation. Specifically, excellent consistency was found in the simulated and measured values of soil moisture content, salt content, and temperature within 0-60 cm, where all the R^2 values were higher than 0.56. Scenario simulation indicated that the highest salinity of irrigation water was 3.2 g/L to prevent salt accumulation in the soil beneath the film (0-40 cm) under full irrigation conditions. Once the irrigation amount was 90% of the irrigation water demand, the salinity of 3.5 g/L was the maximum threshold for the salt balance in the root zone soil beneath the film.

Keywords: irrigation; soil moisture; salinity; temperature; slightly saline water; mineralization degree; mineralization degree; HYDRUS-2D model