

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.01.033

基于 SHAW 模型的南疆典型棉田适宜冬春灌盐分淋洗策略

林 栋^{1,2} 王 峰³ 许尊秋^{1,2} 毛晓敏^{1,2}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 甘肃武威绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站, 武威 733000;
3. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002)

摘要: 为探究南疆地区棉田休闲期土壤水热盐运移过程及适宜的冬春灌盐分淋洗策略, 基于当地棉田测坑连续两年作物休闲期(2019—2020 年、2020—2021 年) 0 ~ 80 cm 的土壤水、热、盐监测数据, 对 SHAW 模型进行率定和验证; 并设置 64 个冬春灌情景, 包括 8 个冬灌定额(0、600、1 200、1 800、2 400、2 700、3 000、3 600 m³/hm²) 和 8 个春灌定额(0、300、600、900、1 200、1 800、2 100、2 400 m³/hm²), 进一步模拟了不同冬春灌组合模式下休闲期的土壤水热盐运移规律。结果表明: SHAW 模型能够较可靠地模拟南疆地区休闲期冻融土壤水热盐运移规律。其中, 土壤温度的模拟精度最高, 不同土壤深度 R² 均不小于 0.95; 而土壤含水率和含盐量受到土壤水分相变的影响导致模拟精度稍差, 最小 R² 分别为 0.61 和 0.73。不同冬灌处理在冻结期末冻水含量大幅降低, 冬灌定额越大的处理, 未冻水含量越少。冬灌水量越大, 冻结期表层土壤温度变化幅度越小, 且至融化期土壤增温缓慢, 但春灌后不同处理的温度差别减小。土壤表层含盐量在灌水后显著降低, 而在冻结过程中出现明显的上升现象, 且深层土壤盐分上升明显滞后于表层土壤。土壤冻结水融化后对表层土壤盐分进行了二次淋洗, 因此补充少量的春灌便可显著降低土壤表层含盐量, 满足棉花出苗期的盐分要求。综合考虑南疆地区水资源现状及不同冬春灌组合模式对播前土壤水热盐的影响, 推荐采用的节水灌溉模式为冬灌 + 少量春灌造墒, 适宜灌水定额为冬灌 2 250 m³/hm²、春灌 300 m³/hm²。提出的冬春灌组合盐分淋洗模式可为南疆地区农业水资源可持续利用和土壤次生盐渍化治理提供理论依据。

关键词: 南疆典型棉区; 最优冬春灌策略; 土壤水热盐; 冻融期; 盐分淋洗; SHAW 模型

中图分类号: S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0326-13 OSID: 

Appropriate Winter and Spring Irrigations for Salt Leaching in Typical Cotton Field of Southern Xinjiang Based on SHAW Model

LIN Dong^{1,2} WANG Feng³ XU Zunqiu^{1,2} MAO Xiaomin^{1,2}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National Field Scientific Observation and Research Station on Efficient Water Use of Oasis Agriculture in Wuwei of Gansu Province, Wuwei 733000, China

3. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of soil moisture, heat and salt migration and explore the optimal strategy of combined winter and spring irrigations in the cotton field of Southern Xinjiang during fallow season, the SHAW model was calibrated and verified by using monitored soil moisture, heat and salt data of 0 ~ 80 cm soil in the cotton test pits during two fallow seasons (2019—2020 and 2020—2021). Then 64 scenarios with eight winter irrigation treatments (0 m/hm², 600 m/hm², 1 200 m/hm², 1 800 m/hm², 2 400 m/hm², 2 700 m/hm², 3 000 m/hm² and 3 600 m/hm²) and eight spring irrigation treatments (0 m³/hm², 300 m³/hm², 600 m³/hm², 900 m³/hm², 1 200 m³/hm², 1 800 m³/hm², 2 100 m³/hm² and 2 400 m³/hm²) were simulated by SHAW to investigate the soil moisture, heat and salt transport behavior in fallow season under different winter and spring irrigation combinations. The results showed that SHAW model could reliably simulate the water, heat and salt transport in freezing-thawing soil in Southern Xinjiang during fallow period. The simulation accuracy of soil temperature was

收稿日期: 2022-02-19 修回日期: 2022-06-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900801-01)、国家自然科学基金项目(51790535)和国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51861125103)

作者简介: 林栋(1998—), 男, 博士生, 主要从事水文水资源与盐碱土治理研究, E-mail: lindong_lucky@qq.com

通信作者: 毛晓敏(1971—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源与农业水土工程研究, E-mail: maoxiaomin@cau.edu.cn

the highest, R^2 of different soil depths was not less than 0.95, while poor for soil water content and salt content with the minimum R^2 of 0.61 and 0.73, respectively. The unfrozen water content of different winter irrigation treatments was decreased significantly in the freezing period, and the unfrozen water content was decreased with the increase of winter irrigation quota. The greater the amount of winter irrigation was, the smaller the range of surface soil temperature in freezing period was. However, the larger the amount of winter irrigation was, the less fluctuation the soil surface temperature in frozen period and the slower the temperature increase in spring period were. However, the soil temperature tended to be similar after spring irrigation. The salt content of soil surface was decreased significantly after irrigation, but increased significantly during soil freezing period, and the increase of salt content in deep soil lagged behind that in surface soil. The frozen water in the soil melted in spring period which could leach the salt in topsoil, thus with supplement of a small amount of spring irrigation the surface soil salinity could decrease dramatically and satisfy the requirement of cotton germination. Considering the current situation of water resources in Southern Xinjiang and the influence of various combinations of winter and spring irrigations on soil moisture, heat and salt before sowing, the recommended water-saving irrigation mode was winter irrigation plus a small amount of spring irrigation to improve soil moisture, and the appropriate irrigation quota was winter irrigation of $2\ 250\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ and spring irrigation of $300\ \text{m}^3/\text{hm}^2$. The proposed strategy of combined winter and spring irrigations for salt leaching could provide theoretical basis for sustainable agricultural water utilization and soil secondary salinization control in Southern Xinjiang.

Key words: typical cotton field of Southern Xinjiang; optimal winter-spring irrigation strategy; soil water-heat-salt; freezing-thawing period; salt leaching; SHAW model

0 引言

土壤盐渍化是制约南疆农业可持续发展的关键因素。新疆地区现有耕地面积 $5.24 \times 10^6\ \text{hm}^2$, 盐渍化土壤面积达 $1.26 \times 10^6\ \text{hm}^2$, 占耕地面积的 24.11%^[1], 其中南疆五地州盐碱地面积占耕地面积平均为 41.21%, 远高于全疆盐渍化占比^[2], 土壤盐碱化程度更加突出。近年来随着节水灌溉的推广, 膜下滴灌已经成为南疆地区主要的灌溉技术。但膜下滴灌较小的灌溉定额不能满足盐分淋洗的要求, 在生育期内由于强烈的蒸发以及根系吸水作用使得盐分在根区处于不断累积的状态^[3], 造成土壤盐渍化。而土壤盐渍化会导致农田土壤肥力衰退, 棉田出苗率降低, 作物产量下降, 严重制约了南疆棉田的可持续发展^[4-7]。目前, 南疆地区主要采用在非生育期通过大定额漫灌进行大水压盐, 形成了生育期节水灌溉-非生育期大水洗盐特有的水盐调控模式。然而, 过量的冬春灌定额不仅造成水资源浪费、加剧水资源供需矛盾, 而且会抬高地下水水位, 造成春季土壤二次返盐^[8]。因此, 准确掌握南疆地区非生育期土壤水盐运移动态, 提出适合当地的冬春灌盐分淋洗模式, 成为南疆农业可持续发展的迫切需要。

由于田间试验的局限性, 难以全面反映不同灌溉处理对土壤水热盐运移的影响规律, 因此常采用田间试验与模型模拟相结合的方法。张万锋等^[9]构建了递进水盐嵌入神经网络 (Progressive salt-water embedding neural network, PSWE) 模型, 开展

了土壤水盐及夏玉米生产效益的模拟; 王雅丽等^[10]采用土壤水热盐迁移和作物生长耦合的模拟模型 (Layered soil water-solute-heat transport and crop growth model, WASH-C) 分析了咸水畦灌条件下油菜全生育期农田土壤水热盐运移动态; LI 等^[11]建立了根区水质模型 (Root zone water quality model, RZWQM) 和土壤水热模拟模型 (Simultaneous heat and water model, SHAW) 的耦合模型 RZ-SHAW, 并表明 SHAW 和 RZ-SHAW 模型均能很好地模拟不同冬灌处理对土壤含水量和温度的影响。文献[12-14]利用 SHAW 模型模拟了不同盐渍化冻融土壤的水热盐运移规律, 并通过覆盖、秋浇等处理提出了适用于河套灌区的节水灌溉制度。姚宝林^[2]通过在南疆进行大田试验, 指出 SHAW 模型可较好地模拟南疆滴灌棉田冻融期土壤水热运移过程。

在以上研究的基础上, 本研究基于在南疆棉田测坑进行的不同冬春灌处理的土壤盐分淋洗试验, 采用 SHAW 模型探究南疆地区休闲期不同冬春灌定额对棉田土壤水热盐运移规律的影响, 获取最适宜棉花出苗的冬春灌组合方式, 以期在南疆休闲期盐分淋洗策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

棉田测坑试验在新疆生产建设兵团第一师阿拉尔市水利局灌溉试验站 ($81^{\circ}11'42''\text{E}$, $40^{\circ}37'27''\text{N}$) 进行, 试验区属于暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,

冬季寒冷少雪,春季多风,昼夜温差大。雨量稀少,年降水量为 50 mm 左右,地表蒸发强烈,年潜在蒸发量为 2 000 mm 左右^[15]。棉田测坑为长 3.3 m、宽 2 m、深 2.5 m 的有底测坑,在 2019 年 11 月—2020 年 5 月及 2020 年 11 月—2021 年 4 月两个休闲期,开展了 7 个冬春灌组合的淋洗试验,试验处理分别为 W3600S300 (冬灌为 3 600 m³/hm²、春灌为 300 m³/hm²,下同)、W3000S300、W2400S300、W1800S300、W1200S300、W600S300、W0S300。棉花品种为新陆中 46,冬灌时间为稳定冻结期前的 11 月 28 日,春灌时间为融化期后的 4 月 4 日(与当地冬春灌时间一致),灌溉方式为漫灌,通过水表控制灌溉水量。

在土壤深度 10、20、40、60、80 cm 埋设 S-SMC-M005 型含水率传感器和 PT1000 型温度传感器,用于监测休闲期土壤含水率和土壤温度的变化规律。含盐量的测定利用土钻在冬春灌前后及冬灌至春灌期间的每个月取土,采样深度分别为 10、20、40、60、80 cm。将土样风干后过 2 mm 筛,按照土水质量比 1:5 配置混合液,静置后利用 DDSJ-308A 型电导率仪测量电导率,最后按照棉田测坑经验公式换算为含盐量^[2],计算公式为

$$S=0.003\ 7EC_{1:5}+1.029\ 1\quad (R^2=0.976)\quad (1)$$

式中 S ——土壤含盐量,g/kg
 $EC_{1:5}$ ——电导率,μS/cm

通过相对积脱盐率量化冬春灌的盐分淋洗效果,计算公式为

$$\Delta S=\frac{S_1-S_0}{S_0}\times 100\%\quad (2)$$

式中 ΔS ——相对积脱盐率,当 ΔS 大于 0 为积盐率, ΔS 小于 0 为脱盐率

S_0 、 S_1 ——时段初、末的土壤含盐量,g/kg

棉田测坑各层平均含盐量为 12.89~19.05 g/kg,按照新疆土壤盐碱化分级标准属于重度盐化土^[16]。试验区土壤各层理化性质如表 1 所示。

表 1 试验区各层土壤物理性质						
Tab.1 Soil physical properties of each soil layer in experimental area						
土壤	砂粒	粉粒	黏粒	容重/	田间持	含盐量/
深度/	质量分	质量分	质量分	度重/	水率/	度重/
cm	数/%	数/%	数/%	(g·cm ⁻³)	(cm ³ ·cm ⁻³)	(g·kg ⁻¹)
0~20	56.08	41.49	2.43	1.51	18.74	12.89
20~40	56.05	41.40	2.55	1.59	20.49	16.29
40~60	54.29	42.83	2.88	1.66	22.87	18.47
60~80	55.16	41.73	3.11	1.69	24.13	19.05

注:土壤颗粒分类标准采用美国制。

试验站安装有自记式集成气象站(Campbell 公司,美国),对田间气象数据进行连续观测。根据 2020—2021 年休闲期(11 月至次年 4 月)内日平均气温和 10 cm 土壤温度变化规律(图 1),可将冻融过程划分为冻结前期、稳定冻结期和融化期^[17]。因此,在本研究中冻结前期为 11 月 25 日—12 月 13 日(此阶段地表温度降至 0℃ 以下并开始出现冻结);稳定冻结期为 12 月 14 日—次年 2 月 20 日(此阶段地表温度迅速降低,冻结深度不断增大);融化期为 2 月 21 日—3 月 20 日(此阶段冻土从地表和最大冻结深度方向逐渐解冻)。

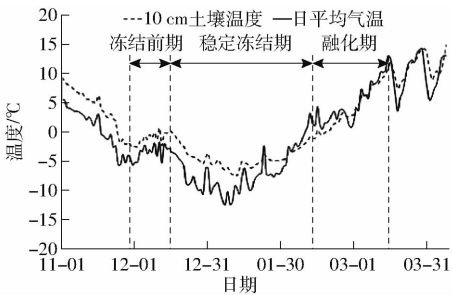


图 1 休闲期冻融过程划分

Fig.1 Division of freezing-thawing process in fallow period

1.2 SHAW 模型

SHAW 模型最初用于模拟土壤冻结和融化过程,模拟包含植物覆盖、残积层、积雪影响下的一维剖面中土壤水热盐运移问题^[18-20]。模型的特色在于:能够同时模拟土壤的水热盐运移;提供了土壤冻结-融化过程的模拟;可深入模拟多物种植被冠层蒸腾和水汽传输。

1.2.1 土壤中的水分运动

模型中考虑冻融条件的土壤水分通量方程为

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_l} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial q_v}{\partial z} + U \quad (3)$$

式中 θ_l ——体积含水率,m³/m³
 θ_i ——体积含冰量,m³/m³
 ρ_i ——冰密度,kg/m³
 ρ_l ——水密度,kg/m³
 K ——非饱和导水率,m/s
 ψ ——土壤基质势,m
 U ——水分的源汇项,m³/(m³·s)
 q_v ——水汽通量,kg/(m²·s)
 t ——时间,s
 z ——土壤深度,m

1.2.2 土壤中的热传输

SHAW 模型中关于土壤基质温度,考虑了冻结土层中由液态水带来的对流热传导以及蒸汽带来的潜热传递,其状态方程为

$$c_s \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_l L_f \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho_l c_l \frac{\partial q_l T}{\partial z} - L_v \left(\frac{\partial q_v}{\partial z} + \frac{\partial \rho_v}{\partial t} \right) \quad (4)$$

式中 c_s ——土壤体积热容量, J/(kg·℃)
 T ——土壤温度,℃
 L_f ——融化潜热, J/kg
 L_v ——蒸发潜热, J/kg
 k_s ——土壤导热率, W/(m·℃)
 c_l ——水比热容, J/(kg·℃)
 q_l ——液态水通量, m/s
 ρ_v ——土壤内的水蒸汽密度, kg/m³

1.2.3 土壤中的溶质运移

SHAW 模型考虑了溶质运移的主要过程,即对流、分子扩散和对流弥散,同时假设土壤基质对溶质可能产生线性吸附。其描述方程为

$$\rho_b \frac{\partial S}{\partial t} = \rho_l \frac{\partial}{\partial z} \left[(D_H + D_m) \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \rho_l \frac{\partial (q_l c)}{\partial z} - \rho_b V \quad (5)$$

其中 $S = \left(K_d + \frac{\rho_l \theta_l}{\rho_b} \right) c \quad (6)$

式中 ρ_b ——土壤容重, kg/m³
 S ——单位质量土壤中的溶质总量, mol/kg
 D_H ——机械弥散系数, m²/s
 D_m ——分子扩散系数, m²/s
 c ——土壤溶液中的溶质浓度, mol/kg
 V ——由于溶质降解和根系吸收产生的源汇项, mol/(kg·s)
 K_d ——土壤基质与土壤溶液之间分配系数, kg/kg

需要注意的是,南疆地区高盐条件下表层盐分可能存在结晶析出等现象,影响土壤结构和水盐运移。目前 SHAW 模型尚没有模块对此进行描述。由于越冬期蒸发较弱,地面少有表层盐分结晶,一般影响不大。但由于春季土壤表层的返盐现象,模拟结果可能会产生误差。

1.2.4 模型边界条件

模拟系统的上边界为地、气交界面,通过逐日或逐时的气象数据和土壤条件来定义模型的边界条件。其中上边界降水/灌溉时段采用实测降水量/灌溉量数据,为通量边界。土壤溶质运移为零通量边界。地面蒸发和热通量存在耦合,可根据气温、风速、相对湿度、净辐射、降雨量等气象观测数据,由能量平衡方程表示为

$$R_n = H + L_v E + G \quad (7)$$

式中 R_n ——净全波辐射, W/m²

H ——显热通量, W/m²

E ——来自土壤表面和植物冠层的总蒸发量, kg/(m²·s)

G ——土壤或地表热通量, W/m²

模型中下边界的含水率和土壤温度可以由用户指定也可以由模型估算,土壤含盐量下边界假设浓度梯度维持单位梯度不变。本研究中,下边界的土壤含水率和温度均通过实测数据给定。

1.3 模型相关参数

1.3.1 气象数据

模型可以选择输入逐时气象数据或者逐日气象数据,本研究中采用逐日气象数据。2019 年 10 月—2021 年 4 月的逐日气象数据来自试验站自记式集成气象站,主要包括:日最高气温(℃)、日最低气温(℃)、露点温度(℃)、平均风速(m/s)、日降雨量(mm)、日平均太阳辐射(W/m²)。

1.3.2 模拟站点基本参数

SHAW 模型所需站点的基本参数主要包括:模拟地点的纬度、坡度、海拔、干土反射率、计算湿土反射率指数等,其中纬度为 40°37'27"N,坡度为 0%,海拔为 975.61 m,干土反射率 α_d 为 0.25,计算湿土反射率指数 α_a 为 0.3。

1.3.3 土壤水力特征参数

SHAW 模型中的水力特征参数主要包括:饱和导水率 K_s (cm/h)、空气进气势 φ_e (m)、土壤孔隙分布指数 b 。由于这些参数直接测定较为困难,通常根据土壤各层的体积密度、颗粒分布等基本参数间接确定^[21]。

根据 CAMPBELL 在 1985 年提出的经验公式,可通过土壤的基本特性计算土壤颗粒的几何平均直径 d_g (mm)和几何标准差 σ_g (mm),即

$$d_g = \exp(x) \quad (8)$$

$$\sigma_g = \exp((y - x^2)^{1/2}) \quad (9)$$

其中 $x = m_c \ln 0.01 + m_{si} \ln 0.026 + m_{sa} \ln 1.025 \quad (10)$

$$y = m_c (\ln 0.01)^2 + m_{si} (\ln 0.026)^2 + m_{sa} (\ln 1.025)^2 \quad (11)$$

式中 m_c 、 m_{si} 、 m_{sa} ——土壤中黏粒、粉粒、砂粒的质量分数, %

根据上述经验公式求得土壤颗粒的几何平均直径 d_g (mm)和几何标准差 σ_g (mm)后,可按照经验公式继续求得土壤的水力特征参数。标准容重(1.3 g/m³)下的空气进气势 φ_{es} (m)为

$$\varphi_{es} = -0.2 d_g \quad (12)$$

土壤孔隙分布指数 b 、空气进气势 φ_e (m)、饱和导水率 K_s (cm/h)计算式为

$$b = -2\varphi_{es} + 0.2\sigma_g \tag{13}$$

$$\varphi_e = \frac{\varphi_{es}}{g} \left(\frac{\rho_b}{1.3} \right)^{0.67b} \tag{14}$$

$$K_s = 14.1 \left(\frac{1.3}{\rho_b} \right)^{1.3b} \exp(-6.9m_c - 3.7m_{si}) \tag{15}$$

1.3.4 土壤热传输参数

土壤导热率 k_s 通过 DE VRIES (1963 年) 提出的理论计算,其表述方程为

$$k_s = \frac{\sum m_j k_j \theta_j}{\sum m_j \theta_j} \tag{16}$$

式中 m_j 、 k_j 、 θ_j ——第 j 种土壤成分 (即砂粒、粉粒、黏粒、有机质等) 的权重、导热系数和体积分数

1.3.5 土壤溶质运移参数

机械弥散系数 D_H 和分子扩散系数 D_m 根据 CAMPBELL (1985 年) 和 BRESLER (1973 年) 提出的公式计算,即

$$D_H = \kappa q_l / \theta_l \tag{17}$$

$$D_m = D_0 \tau \theta_l^3 (T_K / 273.16) \tag{18}$$

式中 κ ——水动力弥散系数, m
 τ ——溶质分子扩散系数
 T_K ——温度, K
 D_0 ——0℃ 时溶质在水中的扩散系数, m^2/s

本研究中模拟点的土质和尺度与姚宝林^[2] 采用 SHAW 模型进行模拟的相近,因此 D_0 、 κ 、 τ 等经验参数选取文献[2] 中的值作为基础值进行率定。

1.4 模型精度评价指标

采用均方根误差 (RMSE)、纳什效率系数 (NSE)、决定系数 R^2 来评价模型模拟的精度。RMSE 越接近于 0, NSE、 R^2 越接近于 1, 模拟效果越好。

1.5 SHAW 模型率定验证与情景模拟

采用 2019—2021 年连续两年休闲期不同灌水处理的土壤水热盐动态监测数据对模型进行率定与验证,并应用验证后的模型,在 2020—2021 年气象数据和土壤水热盐数据基础上,设置 64 个情景,包括 8 个冬灌定额 (0、600、1 200、1 800、2 400、2 700、3 000、3 600 m^3/hm^2) 和 8 个春灌定额 (0、300、600、900、1 200、1 800、2 100、2 400 m^3/hm^2),模拟不同冬春灌组合下休闲期不同深度冻融土壤水热盐运移规律,并探求在当前土壤质地和含盐量条件下的最优盐分淋洗定额。

2 结果与分析

2.1 不同冬灌定额对休闲期土壤水热盐的影响

土壤休闲期的水热盐运移规律主要受到冬灌处

理的影响,因此以棉田测坑实测数据为基础,探讨不同冬灌定额对休闲期土壤水热盐动态的影响。由于冬灌 600 m^3/hm^2 的处理土壤水热盐数据规律性差,可能是由于水热传感器接触不良导致的,不具有代表性,故此处针对其余 6 个冬灌处理 (W3600S300、W3000S300、W2400S300、W1800S300、W1200S300、W0S300) 进行分析。

2.1.1 土壤含水率

由图 2a 可以看出,受冻结作用影响,不同冬灌处理土壤含水率在冻结期大幅度降低,而在消融期由于冻结水融化土壤含水率出现明显升高。冬灌定额较大的处理在冻结前和融化后保持了较高的土壤含水率,而未冬灌处理土壤含水率在冻融期间始终处于较低水平,即使进行相同定额的春灌,春季表层土壤含水率仍明显低于其他冬灌处理。不同冬灌处理对休闲期土壤含水率的运移规律影响不大,但受到土壤质地的影响,土壤含水率并没有表现出与冬灌定额成正比。

2.1.2 土壤温度

由图 2b 可以看出,不同冬灌定额对休闲期土壤温度的影响无明显差异,但冬灌定额越大,冻融期表层土壤温度的变化幅度越小。冻融期内未冬灌处理 20 cm 处土壤温度变化幅度最大,为 15.66℃,而冬灌 3 600 m^3/hm^2 处理 20 cm 处土壤温度变化幅度最小,为 11.89℃。这是因为较大的冬灌定额增加了表层土壤含水率,使土壤热容量增大,能够起到平缓休闲期土壤温度波动的作用^[22]。较大的冬灌定额导致春季融化期表层土壤增温缓慢,但春灌后土壤温度均有所降低且各处理的温度差别减小。

2.1.3 土壤含盐量

由图 2c 可以看出,表层 (20 cm) 土壤含盐量在冬灌处理后均显著降低,在之后的冻结期存在不同程度的返盐。受到初始含盐量的影响并未表现出冬灌定额越大表层土壤含盐量越低。未冬灌处理 20 cm 处土壤含盐量在冻结前期出现小幅下降,这是因为受到表层土壤冻结影响,土壤盐分随着未冻水向上迁移导致 20 cm 处土壤含盐量降低,此后随着冻结深度的加大,20 cm 处土壤含盐量又不断增加。未冬灌处理表层土壤盐分在休闲期内均处于较高水平,相同春灌定额下盐分淋洗效果远低于其他冬灌处理,这表明冬春全灌的模式更有利于盐分淋洗。

由图 2d 可以看出,不同冬灌定额相对脱盐率均表现出随着土壤深度的增加而减小,而冬灌定额越高,脱盐效果越明显,冬灌 3 600 m^3/hm^2 仍可使 0 ~ 80 cm 土壤脱盐 40% 以上。

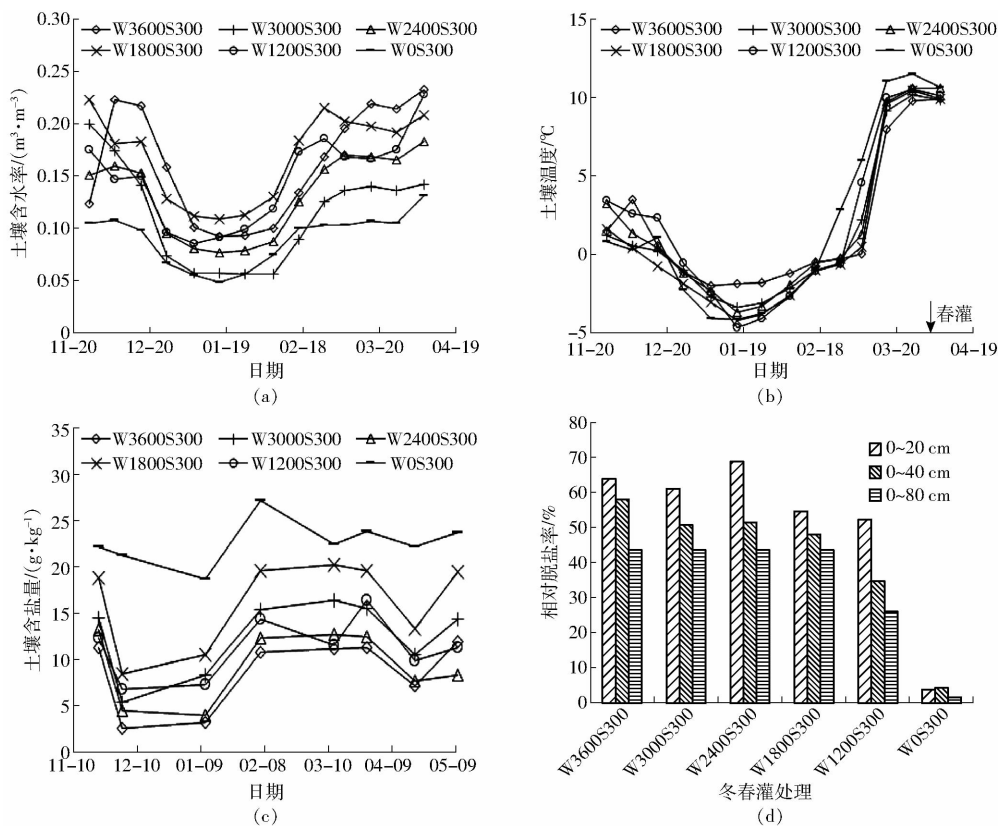


图2 2020—2021年休闲期不同冬灌处理棉田测坑20 cm深度土壤水热盐及不同深度相对脱盐率

Fig.2 Soil water, temperature and salinity at 20 cm depth under different winter irrigation treatments in cotton field during fallow period of 2020—2021 and relative desalination rate at different depths

2.2 SHAW 模型率定与验证

采用2020—2021年休闲期各层土壤水热盐数据对模型进行率定,2019—2020年休闲期各层土壤水热盐数据进行验证。通过试错法对模型参数进行调试,最终调试后的参数如表2所示。

表2 模型率定后的土壤水盐运动参数

土壤参数	土壤深度/cm				
	10	20	40	60	80
b	3.35	2.46	3.12	2.95	2.85
φ_s/m	-0.12	-0.20	-0.35	-0.45	-0.35
$K_d/(kg \cdot kg^{-1})$	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
$K_s/(cm \cdot h^{-1})$	3.55	2.12	1.25	1.21	1.21
τ	2.85	2.60	2.50	2.95	2.85
κ/m	0.11	0.09	0.09	0.16	0.14

图3a、3b分别为休闲期不同深度处土壤含水率的率定(以W0S300为例)和验证(以W2400S300为例)结果。由图3可以看出,SHAW模型对土壤含水率的模拟精度较高,模拟值与实测值之间的差异较小, RMSE均不大于 $0.037 m^3/m^3$, NSE在0.27~0.83之间, R^2 在0.61~0.92之间。纵观整个休闲期,模型对冻结前及融化后的土壤含水率模拟较好,而冻结和融化过程中的模拟精度稍差,这是由于在

土壤冻结和融化过程中,土壤中的水分发生相变,引起未冻水含量和基质势的变化,进而使得水分迁移更加难以准确预测^[23];此外,受土壤含水率传感器精度的限制,也导致土壤水分在相变过程中的测量精度稍差。

图4a、4b分别为休闲期不同深度处土壤温度的率定(以W0S300为例)和验证(以W2400S300为例)结果。由图4可以看出,SHAW模型对土壤温度的模拟精度最高,10 cm土层处土壤温度RMSE最大,为 $3.04^{\circ}C$,不同深度土壤温度NSE均在0.83~0.988之间, R^2 均不小于0.95。土壤深度越大,受空气温度等气象因素的影响越小,随机性减小,因此对土壤温度的模拟表现出随着土壤深度的增加模拟精度逐渐增大。

图5a、5b分别为休闲期不同日期土壤含盐量的率定(以W0S300为例)和验证(以W2400S300为例)结果。相比于土壤含水率和温度,土壤含盐量的模拟精度稍差, RMSE在 $0.88 \sim 7.44 g/kg$ 之间。这一方面因为盐分的空间变异性较强^[24]且监测数据本身误差大;另一方面是因为土壤在冻结、融化过程中水分和温度对土壤盐分的运移具有强烈的耦合作用,水分和热运移的误差会进一步影响盐分的模拟精度。另外在春季地表返盐明显,而模拟中未考

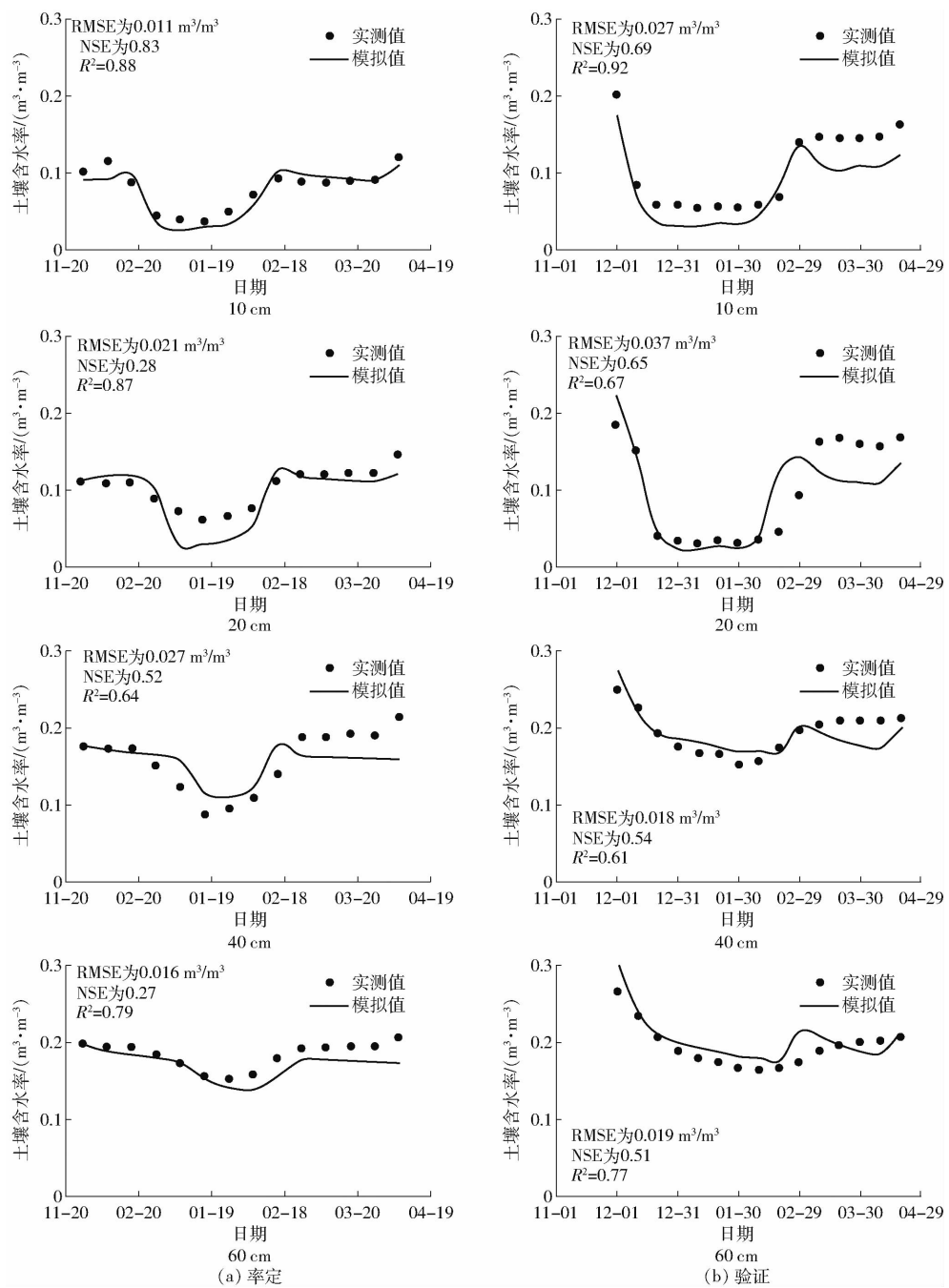


图3 土壤含水率率定与验证结果对比

Fig. 3 Comparison of soil water calibration and verification results

虑盐分的结晶析出(如1.2.3节所述),所以也会影响模拟效果。但整体来说NSE在0.23~0.96之间, R^2 均不小于0.73,这表明虽然模型对于土壤盐分的模拟精度较差,但基本能够反映土壤盐分的运移趋势。

以上不同灌溉处理下(W0S300和W2400S300)的率定和验证结果表明,SHAW模型对冻融期间土壤水热盐运移规律的模拟是可靠的,模型可用于不同冬春灌组合灌溉模式下最优盐分淋洗定额的模拟预测。

2.3 SHAW 模型情景模拟

由于田间试验和土壤水热盐监测方法的局限

性,仅依靠实测数据难以全面反映休闲期冻融土壤水热盐时空变化规律,也难以筛选出最适宜棉花出苗的冬春灌盐分淋洗组合。因此在对SHAW模型进行率定和验证的基础上,进一步设置64个情景模拟,分析休闲期全时段不同深度土壤水热盐运移规律以及适宜棉花出苗的冬春灌盐分淋洗模式。

2.3.1 休闲期冻融土壤水热盐运移规律

(1) 土壤含水率

图6以W0S900、W1200S900、W2400S900为例展示了不同冬灌处理全休闲期不同深度土壤液态水含量的变化。由图6可以看出,由于冻结作用导致不同冬灌处理在冻结期(12月14日—2月

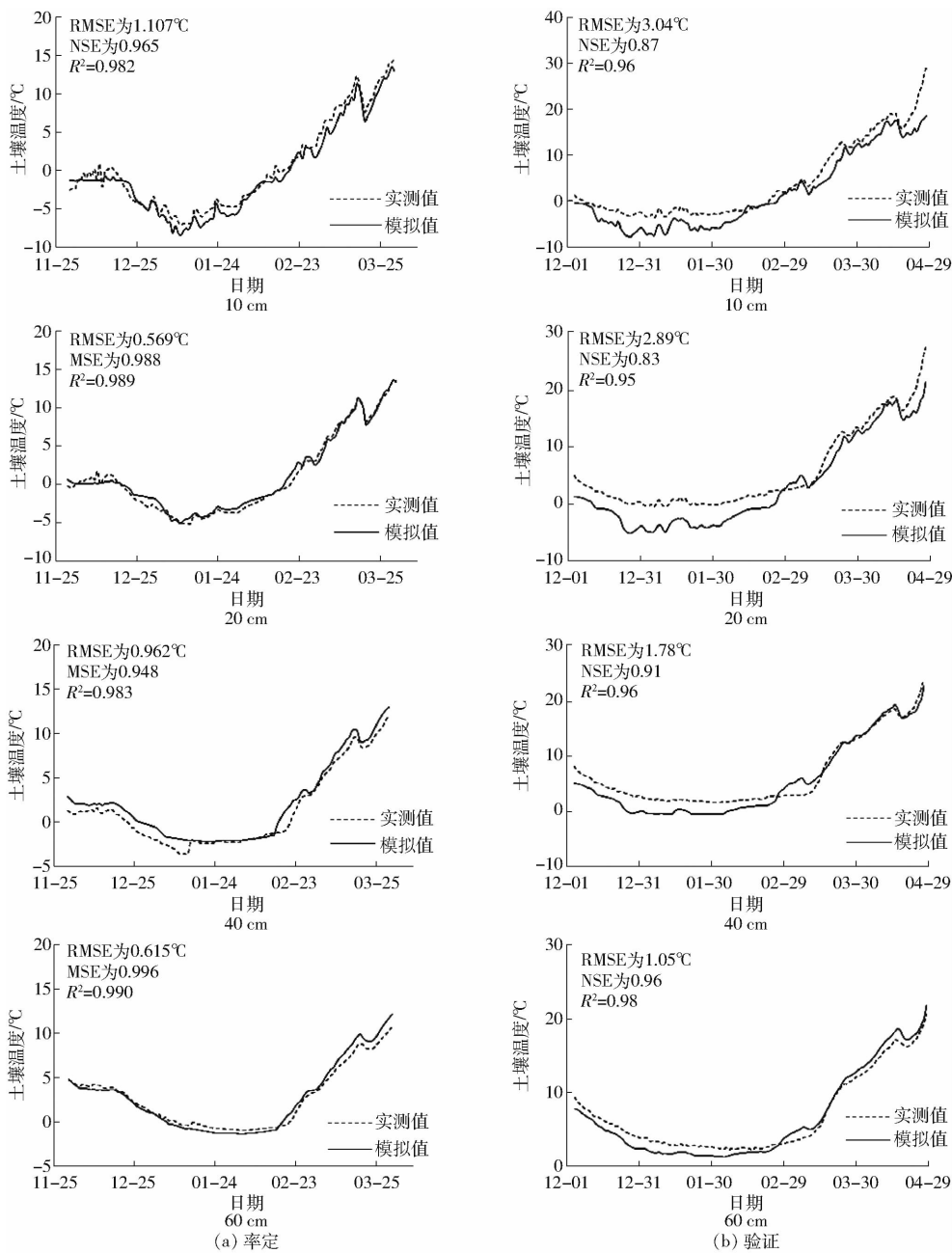


图 4 土壤温度率定与验证结果对比

Fig. 4 Comparison of soil temperature calibration and verification results

20 日)未冻水含量大幅度降低,冬灌定额越大的处理,由于土壤冻结导致未冻水含量减少,未冻水减少的土壤深度也越大。这是因为冬灌定额越大的处理土壤含盐量越小,而冻土的冰点(冻结温度)随含盐量的降低直线上升(即更容易发生土壤冻结),导致冻土中的未冻水含量随含盐量的减小而减小^[25]。在消融期(2 月 21 日—3 月 20 日),由于冻结水融化,各层土壤含水率增加,出现明显的“返墒”现象,这与郭占荣等^[26]的研究结果相同。但由于蒸发强烈,表层含水率不断下降。随着土壤深度的增加,含水率逐渐增大,不同冬灌处理引起的含水量差异减小。春灌改善了土壤墒情,有效补给了土壤水分。

(2) 土壤温度

由图 7 可以看出,与深层土壤相比,表层土壤日平均温度受空气温度影响较大,变化幅度也更剧烈,冻融期间最大变幅发生在 10 cm 土壤深度,为 19.5℃;而深层土壤(60~80 cm)温度主要受初始含水率影响,在整个冻融期变化较为平缓,最大变幅为 9.7℃,这与赵强等^[27]的结论相同。由不同冬灌处理 0℃等值线可以看出,冬灌定额对深层土壤温度的影响较小,但土壤冻结过程中存在冰点降低现象^[25],土壤的冻结温度均低于 0℃,最大冻结深度也达不到图示的 80 cm 左右。

(3) 土壤含盐量

由图 8 可以看出,土壤表层含盐量在冬灌

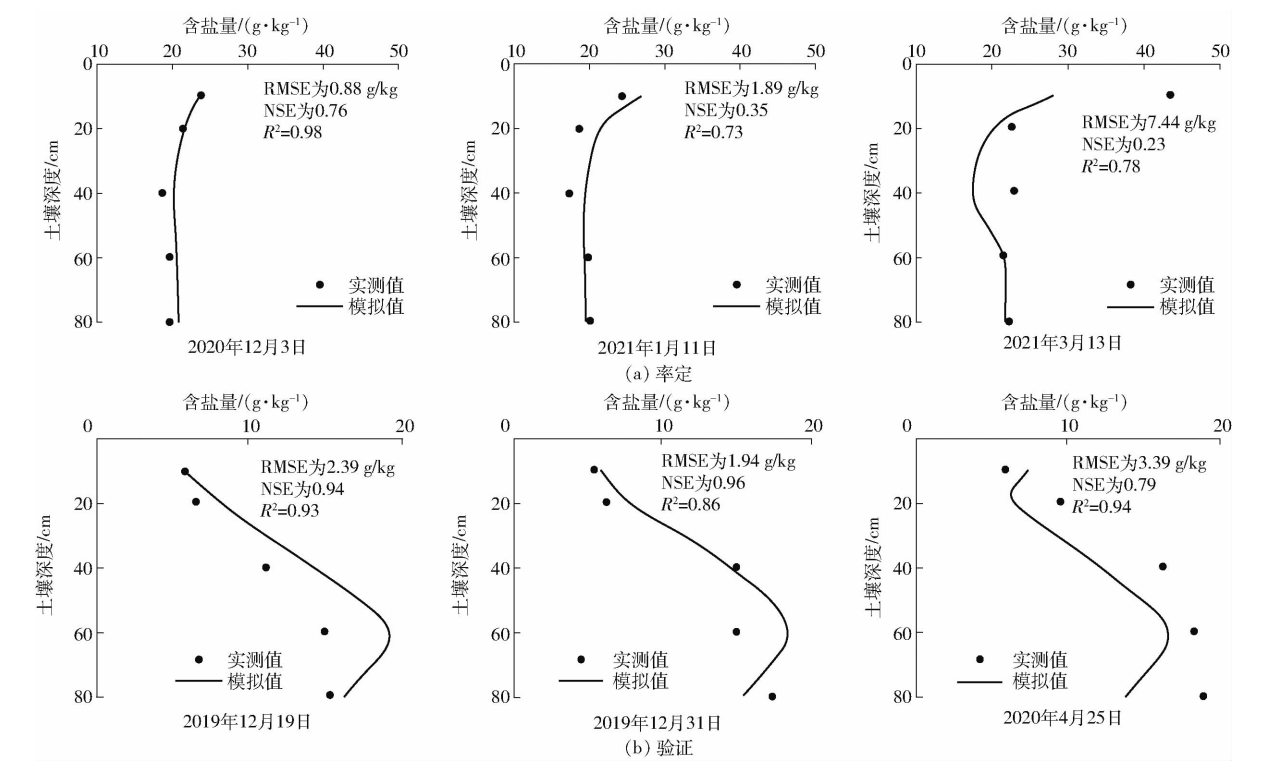


图 5 土壤含盐量率定与验证结果对比

Fig. 5 Comparison of soil salinity calibration and verification results

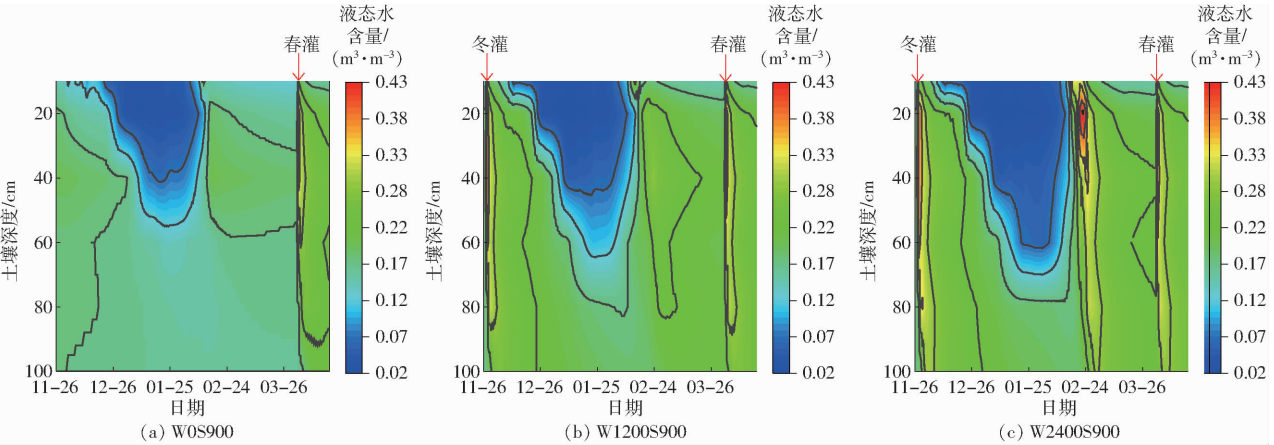


图 6 不同冬灌处理休闲期不同深度土壤液态水含量

Fig. 6 Soil liquid water content at different depths under different winter irrigation treatments during fallow period

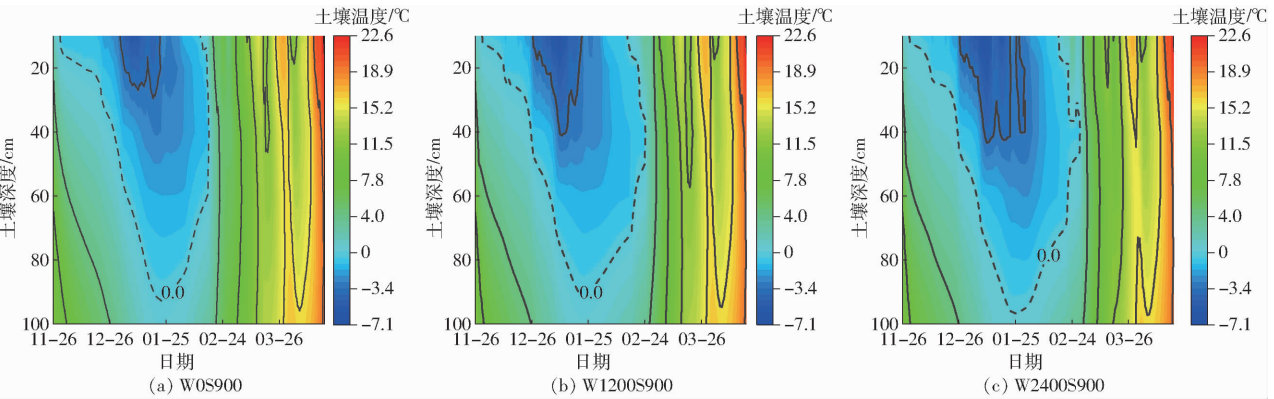


图 7 不同冬灌处理休闲期不同深度土壤温度

Fig. 7 Soil temperature at different depths under different winter irrigation treatments during fallow period

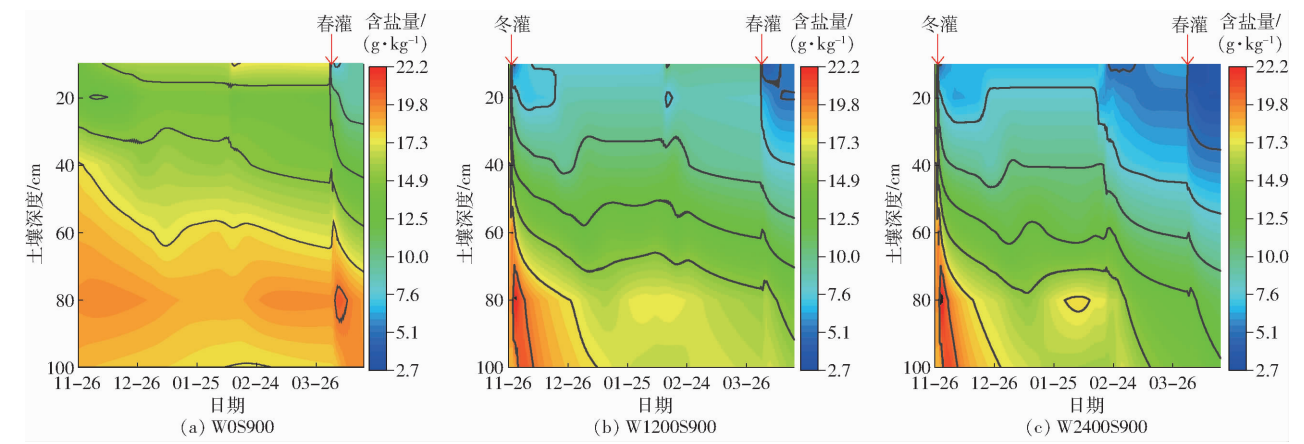


图 8 不同冬灌处理休闲期不同深度土壤含盐量
Fig. 8 Soil salinity at different depths under different winter irrigation treatments during fallow period

(11 月 28 日)和春灌(4 月 4 日)后显著降低,而在冻结过程中出现明显的上升现象,且深层土壤含盐量上升明显滞后于表层土壤。这是因为在水势梯度和强烈的蒸发作用下,深层土壤中的水分向上迁移,造成盐分在表层积聚,这与前人的研究结果一致^[28-31]。相同春灌定额下,冬灌定额越大的处理,春季盐分淋洗深度越大。此外,冬灌水量越大,春季表层土壤含盐量越低。这一方面是由于大量的冬灌水使盐分在冻结前淋洗到深层土壤,冻结期未能随着土壤水分上升到表层^[32];另一方面冻结水在融化后提高了土壤含水率,对表层盐分进行了二次淋洗。

2.3.2 适宜冬春灌淋洗模式情景模拟

南疆地区棉花播种深度为 4~5 cm,种子萌芽时根系总长度在 20 cm 以内^[33-34],因此在对实测和模拟得到的不同冬灌处理冻融土壤水热盐运移规律分析的基础上,进一步探讨不同冬春灌组合灌溉模式对播前(春灌后 7 d)0~20 cm 土壤水热盐的影响,并以适宜棉花出苗的土壤水热盐状况为目标,确定适宜的冬春灌盐分淋洗组合灌溉模式。

(1)播前 0~20 cm 深度土壤含水率

不同冬春灌组合灌溉模式对播前 0~20 cm 深度土壤含水率的影响如图 9a 所示。冬灌定额越大,冻结水融化后对土壤含水率的补充效果越好,结合适量的春灌水便可使土壤具有较高的墒情。春灌对于保持播前土壤含水率具有重要作用,但达到 2 100 m³/hm² 后,对播前土壤含水率的影响变化不大。

(2)播前 0~20 cm 深度土壤温度

不同冬春灌组合灌溉模式对播前 0~20 cm 深度土壤温度的影响如图 9b 所示。从图 9b 可以看出,春灌定额越大,播前 0~20 cm 深度土壤温度越低,但当春灌定额大于 600 m³/hm² 后,土壤温度变

化幅度逐渐减小。未冬灌处理土壤温度明显高于冬灌处理,当冬灌定额大于 1 200 m³/hm² 后,冬灌定额对播前 0~20 cm 深度土壤温度的影响不大。

(3)播前 0~20 cm 深度土壤含盐量

不同冬春灌组合灌溉模式对播前 0~20 cm 深度土壤含盐量的影响如图 9c 所示,对播前 0~20 cm 深度相对脱盐率的影响如图 9d 所示。可以看出,不同冬春灌组合灌溉下播前土壤含盐量差异较大,冬灌定额越大,只需要较少的春灌水便可使土壤含盐量处于较低范围,只春灌处理土壤含盐量在播前普遍偏高。当只春灌定额小于 300 m³/hm² 时,播前土壤处于积盐状态。灌水定额小于 900 m³/hm² 时,只冬灌处理对播前 20 cm 土壤的脱盐效果明显优于只春灌;但灌水定额大于 900 m³/hm² 时,春灌对播前 0~20 cm 土壤的脱盐效果优于冬灌。

(4)适宜冬春灌组合灌溉模式

由图 10 可知,在相同春灌定额(300 m³/hm²)下,冬灌定额越大,棉花出苗率越高。冬灌定额达 2 400 m³/hm² 后,棉花出苗率普遍在 80% 左右,且出苗率不再随着冬灌定额的增加而增加。休闲期灌水总额小于 900 m³/hm² 时,棉花出苗受水盐胁迫影响严重。

根据王兴鹏等^[35]、王春霞等^[36]的研究成果以及测坑棉田出苗含盐量阈值,认为当播前土壤含水率为 20%~24%、土壤含盐量少于 5.8 g/kg、土壤温度为 12~14℃ 时,最有利于棉花出苗。综合棉花播前 0~20 cm 深度土壤水热盐的模拟结果,可以推断:当只冬灌定额为 2 700 m³/hm² 时,可满足适宜棉花出苗的土壤水热盐条件;当只春灌定额为 1 650 m³/hm² 时,适宜棉花出苗;当春季进行少量春灌造墒(300 m³/hm²)时,适宜的冬灌定额为 2 250 m³/hm²。

冬灌对深层土壤盐分的淋洗效果优于春灌,可以有效缓解生育期土壤返盐对棉花生长的影响,而

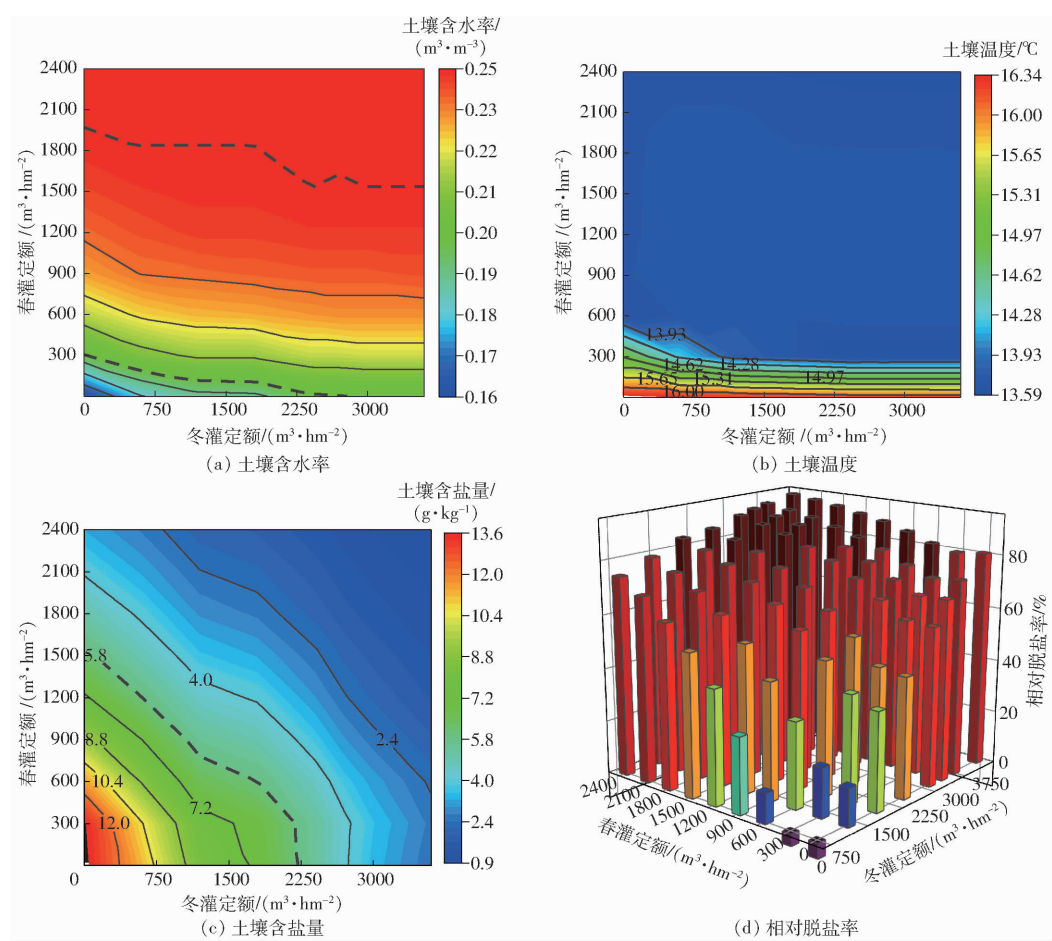


图9 不同冬春灌组合灌溉模式对播前0~20 cm深度土壤水热盐的影响

Fig.9 Effects of different winter and spring irrigation combinations on soil moisture, heat and salinity at 0~20 cm before sowing

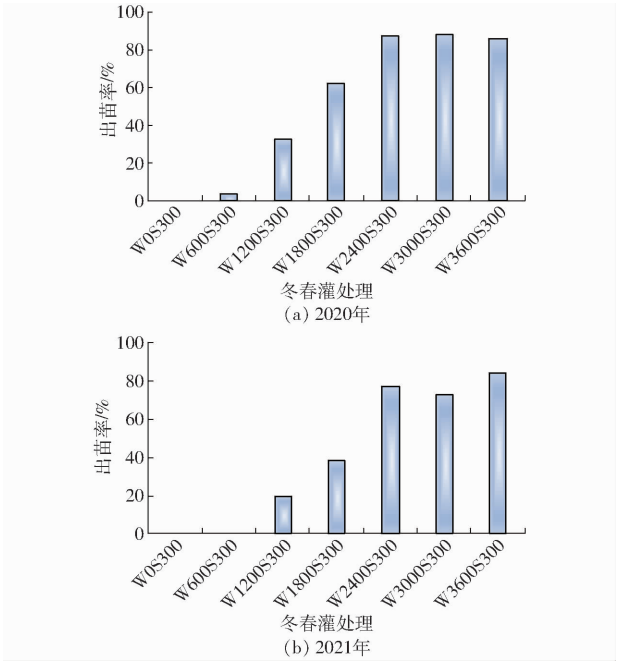


图10 棉田测坑2020年和2021年不同处理棉花出苗率

Fig.10 Cotton emergence rate of different treatments in 2020 and 2021

春灌对于保障土壤墒情,提高棉花出苗率具有重要作用。只春灌处理虽然可以使播前0~20 cm土壤

处于适宜棉花出苗的水热盐条件,但受到盐分淋洗深度的限制,生育期土壤盐分向上运移在一定程度上会影响棉花产量。张永玲等^[37]通过在南疆地区开展大田试验,认为冬灌定额200 mm、春灌定额100 mm(约为冬灌2000 m³/hm²、春灌1000 m³/hm²)的组合灌溉增产效果明显。但南疆地区冬季水量充足、春季缺水^[38],可用于淋洗盐分的水量逐年减少。随着以水定地的水资源刚性政策^[39]的落实,目前冬灌+少量春灌(300 m³/hm²)造墒已经成为当地主要的盐分淋洗模式。综合考虑南疆地区水资源现状以及冬春灌对播前土壤水热盐的影响,推荐采用的节水灌溉模式为冬灌+少量春灌造墒,适宜的灌水定额为冬灌2250 m³/hm²、春灌300 m³/hm²。

3 结论

(1)冬灌定额较大的处理在冻结前和融化后保持了较高的土壤含水率,在相同春灌定额下,未冬灌处理春季表层土壤含水率仍明显低于其他冬灌处理。较大冬灌定额下融化期土壤增温缓慢,但春灌后不同处理的温度差别减小。在相同春灌定额下,

未冬灌处理表层土壤盐分淋洗效果远低于其他冬灌处理,这表明冬灌加春灌的模式更有利于盐分淋洗。

(2)SHAW 模型对土壤温度的模拟精度最高,且深层土壤模拟精度优于表层;土壤含水率和含盐量的模拟精度稍差。总的来说,SHAW 模型能够反映棉田休闲期土壤水热盐运移规律,适用于南疆地区不同冬春灌组合灌溉模式的模拟。

(3)不同冬春灌组合的情景模拟表明,冬灌定额越大的处理,冻结期 0~60 cm 土壤未冻水含量越少,未冻水减少的土壤深度也越大。冬灌处理对深层土壤温度的影响较小,温度变幅在整个冻融期内较为平缓。土壤表层含盐量在灌水后显著降低,而在冻结过程中出现明显的上升现象,且深层土壤盐分上升明显滞后于表层土壤。冻结水融化后对表层

土壤盐分进行二次淋洗,导致冬灌定额越大,相同春灌定额下盐分淋洗效果越明显。

(4)冬灌对盐分淋洗的效果优于春灌,春灌可提高土壤播前墒情并对表层土壤盐分起到淋洗作用。考虑到南疆地区春季可用于盐分淋洗的水量较少,综合不同冬春灌组合模式对播前土壤水热盐的影响以及棉田测坑实测出苗数据,推荐采用的节水灌溉模式为冬灌+少量春灌造墒,适宜灌水定额为冬灌 2 250 m³/hm²、春灌 300 m³/hm²。

本研究受到土壤盐分较强时空变异性以及模型自身缺陷的影响,SHAW 模型对盐分的模拟精度不高。在今后的应用中可考虑丰富 SHAW 模型水-土-盐相互作用模块,使其更适合高盐渍化土壤冻融条件下水热盐运移机理的模拟研究。

参 考 文 献

[1] 新疆统计局.新疆统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.

[2] 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)

[3] 王振华,杨培岭,郑旭荣,等. 典型绿洲灌区长期膜下滴灌棉田根区土壤盐分及离子变化特征[J]. 水土保持学报,2014,28(3):158-165.
WANG Zhenhua, YANG Peiling, ZHENG Xurong, et al. Variation characteristics of soil salinity and ion in root zone by long-term drip irrigation under mulch in typical oasis irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(3):158-165. (in Chinese)

[4] 刘新路,彭杰,冯春晖,等. 基于电磁感应仪数据的南疆棉田土壤电导率反演模型研究[J]. 土壤学报,2020,57(3):646-655.
LIU Xinlu, PENG Jie, FENG Chunhui, et al. Inversion model for soil conductivity in cotton field in South Xinjiang based on EM38-MK2 data[J]. Acta Pedologica Sinica,2020,57(3):646-655. (in Chinese)

[5] PENG J, BISWAS A, JIANG Q S, et al. Estimating soil salinity from remote sensing and terrain data in Southern Xinjiang Province, China[J]. Geoderma, 2019, 337: 1309-1319.

[6] DONG Q G, YANG Y C, ZHANG T B, et al. Impacts of ridge with plastic mulch-furrow irrigation on soil salinity, spring maize yield and water use efficiency in an arid saline area[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 268-277.

[7] LI J G, PU L J, HAN M F, et al. Soil salinization research in China: advances and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5): 943-960.

[8] 栗现文,靳孟贵,袁晶晶,等. 微咸水膜下滴灌棉田漫灌洗盐评价[J]. 水利学报,2014,45(9):1091-1098,1105.
LI Xianwen, JIN Menggui, YUAN Jingjing, et al. Evaluation of soil salts leaching in cotton field after mulched[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(9):1091-1098,1105. (in Chinese)

[9] 张万锋,杨树青,胡睿琦,等. 基于 PSWE 模型的土壤水盐运移与夏玉米生产效益模拟[J]. 农业机械学报,2022,53(6):359-369.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, HU Ruiqi, et al. Simulation of soil-water migration and summer maize productivity based on PWSE model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(6):359-369. (in Chinese)

[10] 王雅丽,毛晓敏,陈帅,等. 咸水畦灌农田土壤水热盐动态及油葵生长的试验与模拟[J]. 农业工程学报,2021,37(8):76-86.
WANG Yali, MAO Xiaomin, CHEN Shuai, et al. Experiments and simulation of soil moisture, temperature and salinity dynamics and oil sunflower growth in saline border irrigated farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 76-86. (in Chinese)

[11] LI Z Z, MA L W, FLERCHINGER G N, et al. Simulation of overwinter soil water and soil temperature with SHAW and RZ-SHAW[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(5): 1548-1563.

[12] 李瑞平. 冻融土壤水热盐运移规律及其 SHAW 模型模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
LI Ruiping. Study on soil water-heat-salt transfer during freezing-thawing and its simulation by SHAW model[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2007. (in Chinese)

[13] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等. 基于 SHAW 模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J]. 农业工程学报,2010,26(2):31-36.
LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akae, et al. Scheme of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao irrigation district[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 31-36. (in Chinese)

- [14] 卢星航. 盐渍化土壤冻融机理与覆盖秋浇对盐渍化土壤水热盐迁移影响的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017.
LU Xinghang. Study on the mechanism of saline soil freezing-thawing and the effect of mulching after autumn irrigation on saline soil water-heat-salt transfer[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [15] 王兴鹏. 冬春灌对南疆土壤水盐动态和棉花生长的影响研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2018.
WANG Xingpeng. Effects of winter-spring irrigation on soil water-salt[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
- [16] 新疆农业厅,新疆土壤普查办公室. 新疆土壤[M]. 北京:科学出版社, 1996: 51 – 52.
- [17] 廖海, 栗现文, 陈俊英. 膜下滴灌棉田冻融期土壤剖面水盐热分布动态[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(11): 1161 – 1168.
LIAO Hai, LI Xianwen, CHEN Junying. Dynamic distribution of water, salt, and temperature in soil profile during freezing and thawing in cotton filed under mulch drip irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(11): 1161 – 1168. (in Chinese)
- [18] FLERCHINGER G N, SAXTON K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system I. Theory and development[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 565 – 571.
- [19] FLERCHINGER G N, HANSON C L, WIGHT J R. Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed [J]. Water Resources Research, 1996, 32(8): 2539 – 2548.
- [20] FLERCHINGER G N, SAUER T J, AIKEN R A. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface[J]. Geoderma, 2003, 116: 217 – 233.
- [21] LU X H, LI R P, SHI H B, et al. Successive simulations of soil water-heat-salt transport in one whole year of agriculture after different mulching treatments and autumn irrigation[J]. Geoderma, 2019, 344: 99 – 107.
- [22] 姚宝林, 李光永, 王峰. 冻融期灌水和覆盖对南疆棉田水热盐的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 114 – 120.
YAO Baolin, LI Guangyong, WANG Feng. Effects of winter irrigation and soil surface mulching during freezing-thawing period on soil water-heat-salt for cotton fields in South Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 114 – 120. (in Chinese)
- [23] HOU R, LI T, FU Q, et al. Research on the distribution of soil water, heat, salt and their response mechanisms under freezing conditions[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 196: 104486.
- [24] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 403 – 412.
LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akae, et al. Study on water-heat-salt transfer in soil freezing-thawing based on simultaneous heat and water model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4): 403 – 412. (in Chinese)
- [25] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [26] 郭占荣, 荆恩春, 聂振龙, 等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展, 2002(3): 298 – 302.
GUO Zhanrong, JING Enchun, NIE Zhenlong, et al. Analysis on the characteristics of soil moisture transfer during freezing and thawing period[J]. Advances in Water Science, 2002(3): 298 – 302. (in Chinese)
- [27] 赵强, 吴从林, 罗平安, 等. 冻融期东北农田土壤温度和水分变化规律及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 986 – 995.
ZHAO Qiang, WU Conglin, LUO Ping'an, et al. Variation and influencing factors of soil temperature and moisture during freezing and thawing period in a seasonal freezing agricultural area in Northeast China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 986 – 995. (in Chinese)
- [28] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 冻融期气温与土壤水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 70 – 74.
LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akae, et al. Characteristics of air temperature and water-salt transfer during freezing and thawing period[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 70 – 74. (in Chinese)
- [29] 靳志锋, 虎胆·吐马尔白, 牟洪臣, 等. 土壤冻融温度影响下棉田水盐运移规律[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 623 – 627.
JIN Zhifeng, HUDAN Tumabay, MOU Hongchen, et al. Soil water and salt migration in cotton field under soil freezing-thawing temperature[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 623 – 627. (in Chinese)
- [30] 倪东宁, 李瑞平, 史海滨, 等. 秋灌对冻融期土壤水盐热时空变化规律影响及灌水效果评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 141 – 145.
NI Dongning, LI Ruiping, SHI Haibin, et al. Temporal and spatial variation of soil water-salt-heat during freezing and thawing period and the irrigation effect under the autumn irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 141 – 145. (in Chinese)
- [31] EMAMI H, ASTARAEI A R, FOTOVAT A, et al. Effect of soil conditioners on cation ratio of soil structural stability, structural stability indicators in a sodic soil, and on dry weight of maize[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2014, 28(3): 325 – 339.
- [32] 胡宏昌, 田富强, 张治, 等. 干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期淋洗和多年动态[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1037 – 1046.
HU Hongchang, TIAN Fuqiang, ZHANG Zhi, et al. Soil salt leaching in non-growth period and salinity dynamics under mulched drip irrigation in arid area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1037 – 1046. (in Chinese)

- [13] OLEA R A, PAWLOWSKY V. Compensating for estimation smoothing in Kriging[J]. *Mathematical Geology*, 1996, 28(4): 407–417.
- [14] JOURNAL A G, KYRIAKIDIS P C, MAO S. Correcting the smoothing effect of estimators: a spectral postprocessor[J]. *Mathematical Geology*, 2000, 32(7): 787–813.
- [15] YAMAMOTO J K. Correcting the smoothing effect of ordinary Kriging estimates[J]. *Mathematical Geology*, 2005, 37(1): 69–94.
- [16] YAMAMOTO J K. On unbiased backtransform of lognormal Kriging estimates[J]. *Computational Geosciences*, 2007, 11(3): 219–234.
- [17] 段建军, 赖飞, 王小利, 等. 克里金插值平滑效应校正及凤冈县富硒茶园适宜区研究[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(3): 564–574.
DUAN Jianjun, LAI Fei, WANG Xiaoli, et al. Correction of Kriging's smoothing effect and suitability of selenium rich tea garden in Fenggang County of Guizhou Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(3): 564–574. (in Chinese)
- [18] WANG L, ZENG Y, CHEN T. Back propagation neural network with adaptive differential evolution algorithm for time series forecasting[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(2): 855–863.
- [19] 许景辉, 刘政光, 周宇博. 基于 IBAS-BP 算法的冬小麦根系土壤含水率预测模型[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 294–299.
XU Jinghui, LIU Zhengguang, ZHOU Yubo. Prediction model of root soil moisture content of winter wheat based on IBAS-BP algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 294–299. (in Chinese)
- [20] 吕雅慧, 鄢文聚, 张超, 等. 基于 TOPSIS 和 BP 神经网络的高标准农田综合识别[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(3): 196–204.
LÜ Yahui, YUN Wenju, ZHANG Chao, et al. Multi-characteristic comprehensive recognition of well-facilitated farmland based on TOPSIS and BP neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 196–2204. (in Chinese)
- [21] 黄林生, 江静, 黄文江, 等. Sentinel-2 影像和 BP 神经网络结合的小麦条锈病监测方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 178–185.
HUANG Linsheng, JIANG Jing, HUANG Wenjiang, et al. Wheat yellow rust monitoring method based on Sentinel-2 image and BPNN model[J]. *Transactions of the CASE*, 2019, 35(17): 178–185. (in Chinese)
- [22] WEN Y, SHANG S, RAHMAN K U. Pre-constrained machine learning method for multi-year mapping of three major crops in a large irrigation district[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 242.
- [23] SHOKRY A, ESPUNA A. The ordinary Kriging in multivariate dynamic modelling and multistep-ahead prediction[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2018, 43: 265–270.
- [24] WANG Z, SHI W. Mapping soil particle-size fractions: a comparison of compositional Kriging and log-ratio Kriging[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 526–541.
- [25] 李超. 土壤水分的空间变异特性分析和农田干旱评估[D]. 北京:清华大学, 2009.
LI Chao. Spatial variability analysis of soil moisture and field drought assessment[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)

(上接第 338 页)

- [33] 孙思敏, 韩贝, 陈林, 等. 棉花苗期根系分型及根系性状的关联分析[J]. *作物学报*, 2022, 48(5): 1081–1090.
SUN Simin, HAN Bei, CHEN Lin, et al. Root system architecture analysis and genome-wide association study of root system architecture related traits in cotton[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(5): 1081–1090. (in Chinese)
- [34] 王伟, 李光永, 傅臣家, 等. 水质与灌溉频率对棉花苗期根系分布的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(4): 603–608.
WANG Wei, LI Guangyong, FU Chenjia, et al. Effects of water quality and irrigation frequency on root distribution of cotton seedling[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2006, 37(4): 603–608. (in Chinese)
- [35] 王兴鹏, 辛朗, 杜江涛, 等. 基于 DSSAT 模型的南疆膜下滴灌棉花生长与产量模拟[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 314–321.
WANG Xingpeng, XIN Lang, DU Jiangtao, et al. Simulation of cotton growth and yield under film drip irrigation condition based on DSSAT model in Southern Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Society*, 2022, 53(9): 314–321. (in Chinese)
- [36] 王春霞, 王全九, 刘建军, 等. 灌水矿化度及土壤含盐量对南疆棉花出苗率的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 28–33.
WANG Chunxia, WANG Quanjiu, LIN Jianjun, et al. Effects of mineralization of irrigation water and soil salinity on cotton emergence rate in Southern Xinjiang Uygur Autonomous Region of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(9): 28–33. (in Chinese)
- [37] 张永玲, 王兴鹏, 陈开明, 等. 冬春灌条件下棉田水盐对产量的影响研究[J]. *塔里木大学学报*, 2013, 25(4): 18–23.
ZHANG Yongling, WANG Xingpeng, CHEN Kaiming, et al. Effect of water and salt on cotton yield under winter and spring irrigation[J]. *Journal of Tarim University*, 2013, 25(4): 18–23. (in Chinese)
- [38] 杨洋. 新疆水资源公报(2006—2012)[EB/OL]. <http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/4e2e9d54-e36c-4c42-b652-89954dd8bbe9/>.
- [39] 新疆维吾尔自治区总河(湖)长令. 关于强化水资源刚性约束 深入推进最严格水资源管理制度的通知[Z]. 2020-12-25.