农业资源与环境学报 CSCD核心期刊 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

新疆膜下滴灌棉田水盐运移规律与生产函数

邢绍妮, 张金珠, 王振华, 权震, 马占利

引用本文:
邢绍妮, 张金珠, 王振华, 等. 新疆膜下滴灌棉田水盐运移规律与生产函数[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1612–1623.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0612

邴绍妮, 张金珠, 王振华, 等. 新疆膜下滴灌棉田水盐运移规律与生产函数[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1612-1623.
BING S N, ZHANG J Z, WANG Z H, et al. Water and salt transport dynamics and production function of cotton fields under mulch drip irrigation in Xinjiang[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(6): 1612-1623.

开放科学 OSID

新疆膜下滴灌棉田水盐运移规律与生产函数

邴绍妮[1,2,3,4], 张金珠[1,2,3,4*], 王振华[1,2,3,4], 权震[1,2,3,4], 马占利[1,2,3,4]

(1.石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2.兵团盐碱地综合利用工程技术中心, 新疆 石河子 832003; 3.兵团农业水肥高效关键装备技术创新中心, 新疆 石河子 832003; 4.现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘 要:为综合探究不同土壤质地与气候条件下棉花产量与水分、盐分动态的关联机制,构建并验证新疆地区棉花种植水盐生产函数,本研究于2024—2025年通过人工气候室模拟南北疆典型灌区(石河子灌区与阿拉尔灌区)环境,开展壤土与砂土条件下新疆地区棉花种植的土壤水盐胁迫盆栽试验。试验设置7个土壤初始含盐量梯度S1(2 g·kg^{-1})、S2(4 g·kg^{-1})、S3(6 g·kg^{-1})、S4(8 g·kg^{-1})、S5(12 g·kg^{-1})、S6(16 g·kg^{-1})、S7(20 g·kg^{-1});3个土壤持水量水平W1(80%田间持水量)、W2(60%田间持水量)、W3(40%田间持水量)。通过上述试验设计,探索新疆膜下滴灌棉花土壤水盐运移规律并构建和验证了不同初始条件下的棉花水盐生产函数。结果表明:土壤水盐胁迫显著提升土壤含盐量,而土壤含水率随含盐量与持水量的增加呈协同升高趋势;壤土比砂土更利于获得更高的棉花产量,且当土壤初始含盐量高于8 g·kg^{-1}时或土壤含水率低于田间持水量的60%时均会导致产量急剧下降;棉花耐盐性随生育期推进而增强,盐分敏感指数(σ)排序:苗期>蕾期>花铃期>吐絮期;花铃期为水分最敏感阶段,水分敏感指数(λ)排序:花铃期>蕾期>吐絮期>苗期。研究表明,基于Jensen模型的水盐生产函数对于产量估算的精度较高(R^2>0.898、d>0.993),可为新疆盐碱地改良利用提供科学依据,助力农业可持续发展。

关键词:土壤;灌溉;膜下滴灌;水盐动态变化;产量预测;水盐生产函数

中图分类号:S562 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2025)06-1612-12 **doi**: 10.13254/j.jare.2025.0612

Water and salt transport dynamics and production function of cotton fields under mulch drip irrigation in Xinjiang

BING Shaoni[1,2,3,4], ZHANG Jinzhu[1,2,3,4*], WANG Zhenhua[1,2,3,4], QUAN Zhen[1,2,3,4], MA Zhanli[1,2,3,4]

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Engineering Technology Center for Comprehensive Utilization of Saline-Alkaline Land of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832003, China; 3. Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Innovative Technology for High-Efficiency Water and Fertilizer Equipment in Agriculture, Shihezi 832003, China; 4. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832003, China)

Abstract: This study focuses on cotton cultivation in the Xinjiang region, comprehensively investigating the correlation mechanism between cotton yield and the dynamics of soil water and salt under varying soil textures and climatic conditions. It aims to construct and validate water and salt production functions. From 2024 to 2025, artificial climate chambers were utilized to simulate the environmental conditions of typical irrigation districts in northern and southern Xinjiang, specifically the Shihezi and Alar Irrigation Districts. Pot

收稿日期:2025-06-23 **录用日期**:2025-09-04

作者简介:邴绍妮(2000—),女,山东莒县人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:bingshaoni@163.com

***通信作者**:张金珠 E-mail:xjshzzjz@sina.cn

基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2021YFD1900802);兵团重点领域科技攻关项目(2022AB011);兵团中央引导地方科技发展资金项目(2025YD17);石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZK202319)

Project supported: National Key Research and Development Program of the 14th Five-Year Plan (2021YFD1900802); Key Science and Technology Research Project of the Xinjiang Production and Construction Corps in Key Areas (2022AB011); Project of the Xinjiang Production and Construction Corps Central Guidance for Local Science and Technology Development (2025YD17); Research Start-up Project for High-level Talents of Shihezi University (RCZK202319)

experiments were conducted under loam and sandy soil conditions to assess the effects of soil water and salt stress. The experimental setup included seven initial soil salt content gradients: S1(2 g·kg^{-1}), S2(4 g·kg^{-1}), S3(6 g·kg^{-1}), S4(8 g·kg^{-1}), S5(12 g·kg^{-1}), S6(16 g·kg^{-1}), and S7(20 g·kg^{-1}), as well as three soil water-holding capacity levels: W1(80% of field capacity), W2(60% of field capacity), and W3(40% of field capacity). Through this experimental design, the study explored the transport dynamics of soil water and salt in cotton under sub-film drip irrigation in Xinjiang and established and verified water and salt production functions under different initial conditions. The results indicated that soil water and salt stress significantly increased soil salt content, while soil moisture content exhibited a synergistic upward trend with increasing salt content and water-holding capacity. Loam soil was more favorable for achieving higher cotton yields compared with sandy soil. Moreover, when the initial soil salt content exceeded 8 g·kg^{-1} or the soil moisture content fell below 60% of field capacity, cotton yield declined sharply. Cotton's salt tolerance increased as the growth stage progressed. The order of salt sensitivity index (σ) was as follows: seedling stage>bud stage>flowering and boll-setting stage>boll-opening stage. The flowering and boll-setting stage was the most sensitive to water stress. The order of water sensitivity index (λ) was: flowering and boll-setting stage>bud stage>boll-opening stage>seedling stage. The research demonstrates that the water-salt production function based on the Jensen model provides highly accurate yield estimation (R^2>0.898、d>0.993), offering a scientific basis for the improvement and utilization of saline-alkali land in Xinjiang and contributing to the sustainable development of regional agriculture.

Keywords: soil; irrigation; mulch drip irrigation; water-salt dynamic; yield prediction; water-salt production function

新疆地处我国西北内陆干旱区，气候干旱少雨，蒸发强烈，水资源匮乏[1]。新疆地区盐碱土占地面积达2.18×10^7 hm^2，约占全国盐碱土总面积的1/3[2]。其中，盐渍化耕地约1/3分布于北疆，约2/3分布于南疆[3]，土壤盐渍化程度及其空间分布范围均呈显著扩大趋势[4]。因此，土壤盐渍化与水资源匮乏是制约新疆农业发展的关键限制因素[5]。

棉花作为优质的天然纤维作物，是纺织工业的重要支柱原料[6]。同时，棉花产业也是新疆农业的主导产业[7]。根据国家统计局2024年发布的棉花产量数据，新疆棉花总产量达到5.69×10^6 t，占全国总产量的92.25%。随着膜下滴灌技术的推广，新疆高效节水灌溉面积达2.91×10^6 hm^2[8]，且依托该技术，新疆棉花总产、单产、种植面积连续30年位居全国第一[9]。新疆地域辽阔，地形地貌复杂，气候呈现多样性[10]。区域内各异的气象特征与土壤质地是塑造棉花产量格局的核心环境要素[11-12]。因此，亟需探明棉花对不同气候条件和土壤环境的影响规律。

水盐生产函数基于作物水分生产函数，引入盐分因子构建作物产量与土壤水盐的函数关系[13-14]。目前，反映作物产量与不同生育时期耗水量及含盐量关系的水盐生产函数主要有两类：一是以修正的Blank模型和Stewart模型为代表的加法模型；二是以修正的Jensen模型和Minhas模型为主的乘法模型[15-16]。其中，乘法模型中的Jensen模型克服了加法模型在实际应用中的缺陷，模拟效果更佳[17-18]。研究表明，基于Jensen模型构建的水稻、冬小麦、玉米和番茄等作物的水盐生产函数均具有较高的估算精度[19-20]。然而，现有水盐生产函数模型在棉花种植中仍缺乏对不同气候条件与土壤类型的普适性。当前研究多集中于微咸水灌溉、盐碱地改良或亏缺灌溉等单一场景，导致模型适用性受限。

因此，本研究采用人工气候室模拟南北疆棉花种植代表灌区（石河子灌区和阿拉尔灌区），开展壤土和砂土条件下土壤水盐胁迫盆栽试验，探究其对土壤水盐运移规律及棉花产量的影响，构建多情景条件下的棉花生产函数模型，旨在为新疆干旱区绿洲节水、抑盐、高产的棉花种植技术提供理论支撑，推动新疆绿洲农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究于2024年4月至2025年2月在石河子大学水利建筑工程学院农水大厅的人工气候室模拟南疆阿拉尔灌区和北疆石河子灌区气象环境，分别在壤土和砂土条件下开展土壤初始含盐量和土壤持水量的双因素完全组合盆栽试验，分别设置7个土壤初始含盐量水平：2（S1）、4（S2）、6（S3）、8（S4）、12（S5）、16 g·kg^{-1}（S6）和20 g·kg^{-1}（S7）（质量百分比）和3个土壤持水量水平：80% FC（田间持水量）（W1）、60% FC（W2）和40%FC（W3），共21个处理，每个处理重复3次。试验用盆栽规格为0.28 m×0.10 m×0.14 m（桶顶高×底部半径×顶部半径），盆栽下部带有孔隙，盆栽之间并排布置，放置于气候室中支架的台面。试验供试土样砂土和壤土分别取自新疆生产建设兵团第八师150团8连和农2连石河子大学节水灌溉试验站，

经过自然晾干、碾碎、过筛、去除碎石块等工序，装入盆中，土样具体土壤颗粒组成见表1。土壤初始盐量采用施加中性盐NaCl配置，土壤水分控制采用称质量补水法。以医用输液管模拟滴灌，定量维持盆栽土壤目标持水量，滴头流量1.8 L·h^{-1}，每周灌溉3次。试验设置施肥为：每千克土壤中施入0.2 g N（以尿素提供）、0.2 g P_2O_5和0.2 g K_2O（均以磷酸二氢钾提供）。整个生育阶段共进行10次追肥，肥料采用水肥一体化方式随灌溉水施入。其余田间管理措施均参照常规大田种植实践执行。

1.2 人工气候室设置

本研究选取了南北疆典型灌区作为棉花生育期农业气象模拟的研究区域，其中北疆以石河子灌区为代表，南疆以阿拉尔灌区为代表。为准确模拟两地区的气候条件，选取了温度、湿度和光照强度三个关键气象要素，并以2014—2023年近10年的日均值作为气候基准。采用长期平均值有助于更准确地反映地区的稳定气候特征，增强数据的代表性和实验的可靠性，避免单一年份波动带来的偏差。石河子灌区气象因子的平均值为：温度20.95 ℃（标准差为4.98 ℃）、湿度48.89%（标准差为5.00%）、光照强度1 188.24 μmol·m^{-2}·s^{-1}（标准差为178.26 μmol·m^{-2}·s^{-1}）。阿拉尔灌区气象因子平均值为：温度21.73 ℃（标准差为3.55 ℃）、湿度45.40%（标准差为8.85%）、光照强度1 172.06 μmol·m^{-2}·s^{-1}（标准差为161.70 μmol·m^{-2}·s^{-1}）。基于所收集的气象数据，在模拟环境中设置了上述气候参数，并每7 d进行一次动态调整，以更好地贴合实际气象变化过程。具体见图1。

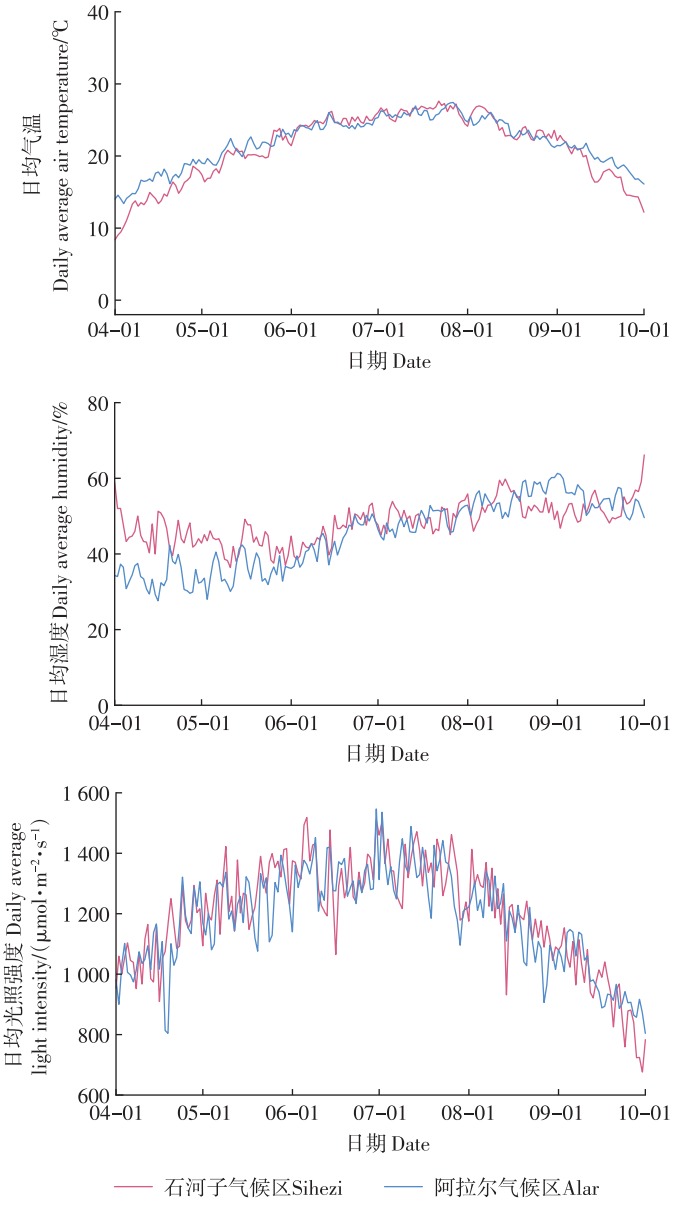


图1 气候区气象要素示意图

Figure 1 Diagram of meteorological elements in climatic zones

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤含水率和土壤含盐量

于棉花苗期、蕾期、花铃期和吐絮期生育时期末，在棉花盆栽中用特定土钻在0~10 cm和10~20 cm土层取土，采用烘干法测算土壤质量含水率，烘干后的土样进行碾磨，过2 mm筛，按照土水比1∶5（质量比）混合，并迅速搅拌5 min，澄清后吸取上清液，采用DDS-307A电导率仪（上海雷磁）测定电导率，最终转换为土壤含盐量。

1.3.2 棉花产量

在棉花吐絮期，对每个盆内棉花的铃数展开调查并详细记录，之后摘取纤维测定质量，通过计算得出单铃质量。完成相关数据记录后，将每盆棉花纤维分别标记并单独封装。

表1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

土壤质地 Soil texture	颗粒组成 Particle composition/%			土壤初始含盐量 Initial soil salinity/(g·kg^{-1})	田间持水量 Field capacity/%
	黏粒 Clay(<0.002 mm)	粉砂 Silt(0.002~0.02 mm)	砂粒 Sand(0.02~2 mm)		
砂土	2.23	9.36	88.41	2.37	26.59
壤土	11.21	26.32	62.47	2.09	27.13

1.3.3 作物耗水量

各个生育时期蒸散量由水分平衡公式计算得出，计算公式为：

$$ET=I+P+Q_e-\Delta W-Q_D-R \tag{1}$$

式中：ET为作物各生育阶段蒸散量，mm；I为灌水量，mm；P为降水量，mm；Q_e为毛细管水量，mm；ΔW为土壤含水量变化，mm；Q_D为排水量，mm；R为径流量，mm。由于在人工气候室内进行试验，因而降水量P可忽略。

1.4 水盐生产函数模型构建

1.4.1 模型介绍

作物产量对水盐动态过程响应十分复杂，以全生育期的耗水量和含盐量为变量模型无法详细阐明作物在不同生育时期与水盐胁迫的关系。同时，作物的各个生育时期均不能单独形成产量，对于水分的消耗同样是一个连续的不断变化的过程[21]。Jensen模型是具代表性的水分生产函数模型，且Jensen模型就是将作物的耗水量对相对产量影响作为一种连续的过程，其表达形式如下：

$$\frac{\gamma_a}{\gamma_m}=\prod_{i=1}^{n}\left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}}\right)^{\lambda i} \tag{2}$$

式中：γ_a为实际作物产量，kg·hm^{-2}；γ_m为作物在水分充足条件下的产量，kg·hm^{-2}；n为生育阶段数；i为生育阶段；ET_{ai}为作物在生育阶段i的实际耗水量，mm；ET_{mi}为作物在生育阶段i的最大耗水量，mm；λ_i为某一生育阶段缺水对产量影响的敏感性指数。

Maas-Hoffman模型在整个生育期使用单一盐胁迫因子[22]。然而，棉花植株对盐分的敏感性根据生育阶段的不同也有变化。因此，本研究引入盐胁迫函数$\gamma_\gamma(S)$，其盐胁迫敏感性指数为σ，该指数随生育时期的变化而改变，类似于Jensen模型的水分亏缺敏感性指数：

$$\gamma_\gamma(S)=\begin{cases}1 & S\leqslant S_{\gamma,\min}\\ \left(\dfrac{S_{\gamma,\max}-S}{S_{\gamma,\max}-S_{\gamma,\min}}\right)^{\sigma} & S_{\gamma,\min}<S\leqslant S_{\gamma,\max}\\ 0 & S>S_{\gamma,\max}\end{cases} \tag{3}$$

式中：σ为经验指数；$S_{\gamma,\min}$为最小土壤盐分，g·kg^{-1}；$S_{\gamma,\max}$为最高土壤盐分，g·kg^{-1}。当土壤盐分$S>S_{\gamma,\min}$时，作物产量开始受到影响；当土壤盐分$S>S_{\gamma,\max}$时，产量为0。

修改后的Jensen模型，即作物在水-盐耦合作用下的动态响应模型：

$$\frac{\gamma_a}{\gamma_m}=\prod_{i=1}^{n}g_i \tag{4}$$

$$g_i=\begin{cases}\left(\dfrac{ET_a}{ET_m}\right)_i^{\lambda i} & S_i\leqslant S_{\gamma i,\min}\\ \left(\dfrac{S_{\gamma,\max}-S}{S_{\gamma,\max}-S_{\gamma,\min}}\right)_i^{\sigma i}\times\left(\dfrac{ET_a}{ET_m}\right)_i^{\lambda i} & S_{\gamma i,\min}<S_i\leqslant S_{\gamma,\max}\\ 0 & S_i>S_{\gamma i,\max}\end{cases} \tag{5}$$

式中：g_i是第i生育阶段产量对水和盐度的响应系数；σ_i为作物在第i生育阶段土壤盐分对产量影响的敏感性指数。

1.4.2 条件约束

将土壤水分和土壤盐分进行优化进而求得相对产量最大化。约束条件包含根区土壤的水盐平衡、土壤含水量和含盐量、灌溉量、边界条件和非负约束条件。

水平衡限制：

$$W_{i+1}=W_i+P_i+I_i-ET_{ai}+Q_{ei}-Q_{Di}-R_i \tag{6}$$

盐平衡限制：

$$S_{ai+1}=S_{ai}+S_{Ii}+S_{Pi}+S_{ei}-S_{Di}-S_{Si} \tag{7}$$

灌溉量限制：

$$\sum_{i=1}^{n}I_i=M \tag{8}$$

边界条件约束：

$$\theta_{wp}\leqslant\theta_i\leqslant\theta_{fc} \tag{9}$$

$$\theta_{n+1}\geqslant\theta_{wp} \tag{10}$$

$$S_i\leqslant S_{i,\max} \tag{11}$$

$$S_{n+1}\leqslant S_r \tag{12}$$

$$W_1=W_0 \tag{13}$$

$$S_1=S_0 \tag{14}$$

非负约束：

$$I_1\geqslant 0 \tag{15}$$

$$S_i\geqslant 0 \tag{16}$$

式中：W_i和W_{i+1}为第i个生育阶段开始和结束时的土壤含水量，mm；ET_{ai}、I_i、P_i、Q_{ei}、Q_{Di}、R_i分别为第i个生育阶段的蒸散量、灌溉量、降水量、毛细管水量、排水量、径流量，mm；θ_i为土壤含水量，mm；S_{ai}和S_{ai+1}分别为第i个生育阶段开始和结束时根区土壤含盐量，g·kg^{-1}；S_{Ii}、S_{Pi}、S_{ei}、S_{Di}分别为第i个生长阶段灌溉水、降水、毛细管水和深层排水的含盐量，g·kg^{-1}；S_{ci}为植物吸盐量，g·kg^{-1}；M为灌溉定额，mm；θ_{wp}为凋萎系数；θ_{fc}为田间持水量；S_i和$S_{i,max}$为第i个生育阶段开始时的根系土壤含盐量和最大含盐量，g·kg^{-1}；S_r为生育阶段结束时的最大允许含盐量；W_0为初始含水量，mm；S_0为初始含盐量，g·kg^{-1}。

1.4.3 模型评价指标

模型的预测评价采用棉花产量实测值和模拟值决定系数R^2、均方根误差(*RMSE*)、一致性评价(*D*-index,*D*)模型验证结果。其中,当R^2和*D*越接近1,*RMSE*越接近0,表明模拟值和实测值之间吻合越好。

$$D\text{-index}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i-\overline{M}|+|M_i-\overline{M}|)^2} \quad (17)$$

式中:*M*和*S*分别是测量值和模拟值;$\overline{M}$和$\overline{S}$分别表示测量值和模拟值的平均值。

1.5 数据处理与分析

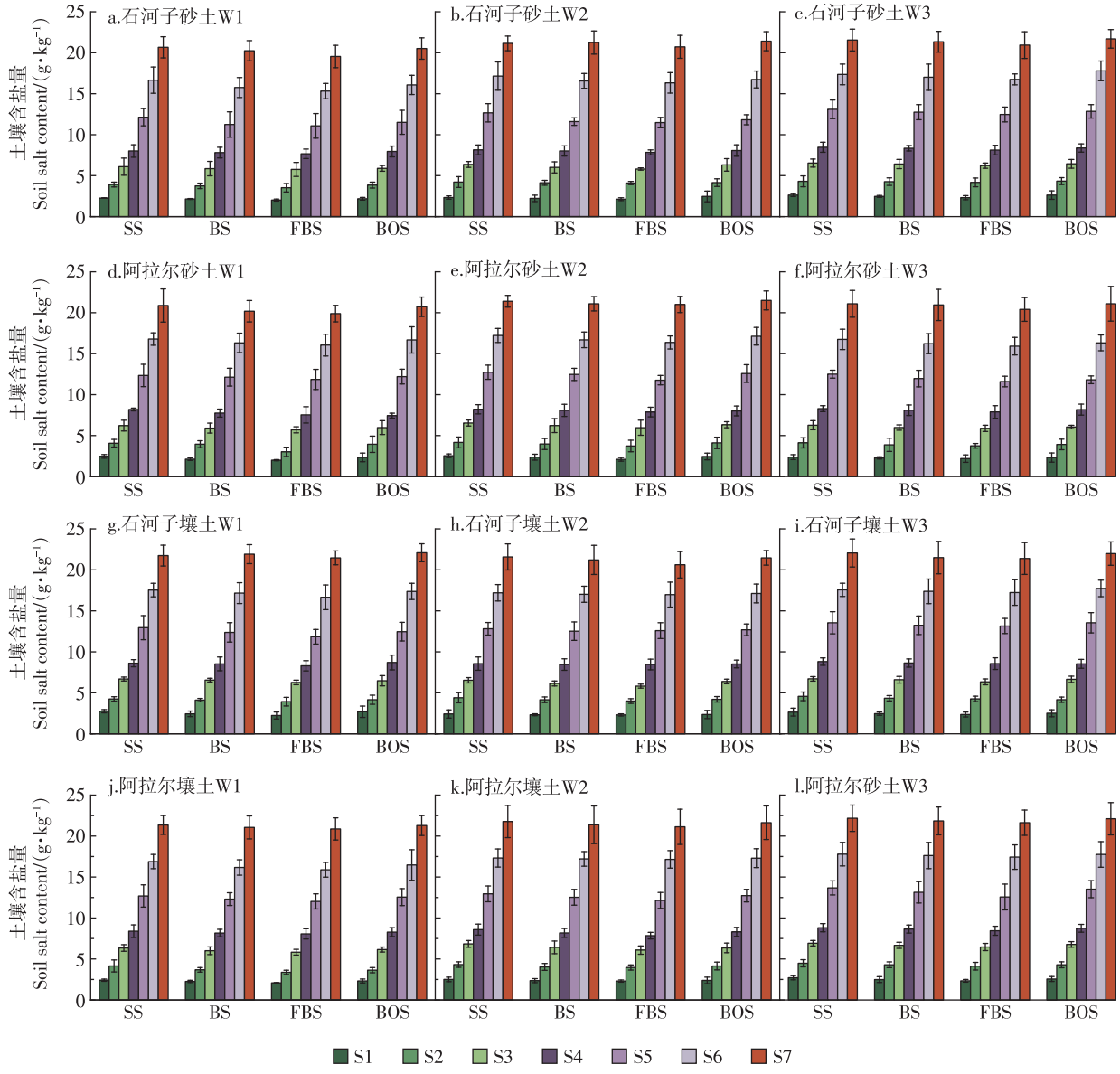
采用Excel软件进行数据整理,用Origin 2024进行绘图分析,SPSS统计软件进行显著性分析、方差分析、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 水盐胁迫下土壤水盐动态变化

2.1.1 盐分变化

图2为不同处理下棉花在各生育阶段的盐分变



SS、BS、FBS和BOS分别表示棉花的苗期、蕾期、花铃期和吐絮期。下同。

SS, BS, FBS, and BOS represent the seedling stage, bud stage, flowering and boll-setting stage, boll-opening stage of cotton, respectively. The same below.

图2 各生育时期土壤含盐量

Figure 2 Growth stage-specific soil salinity dynamics

化情况。随生育阶段推进，土壤盐分整体呈现先增加后降低的趋势。在石河子和阿拉尔气象模拟下，壤土平均土壤含盐量相较于砂土分别高0.43%~6.51%和0.04%~6.62%，在砂土和壤土条件下，阿拉尔气象模拟环境下土壤平均含盐量相较于石河子分别高0.32%~5.66%和0.32%~3.59%。土壤盐分随土壤初始含盐量增大而增大，相较于S1水平，S2~S7水平土壤含盐量增大，土壤水分胁迫会增大土壤含盐量，相较于W1水平，W2~W3水平下各处理土壤含盐量增大0.15%~30.04%。

2.1.2 水分变化

图3为不同处理下棉花在各生育阶段的土壤含

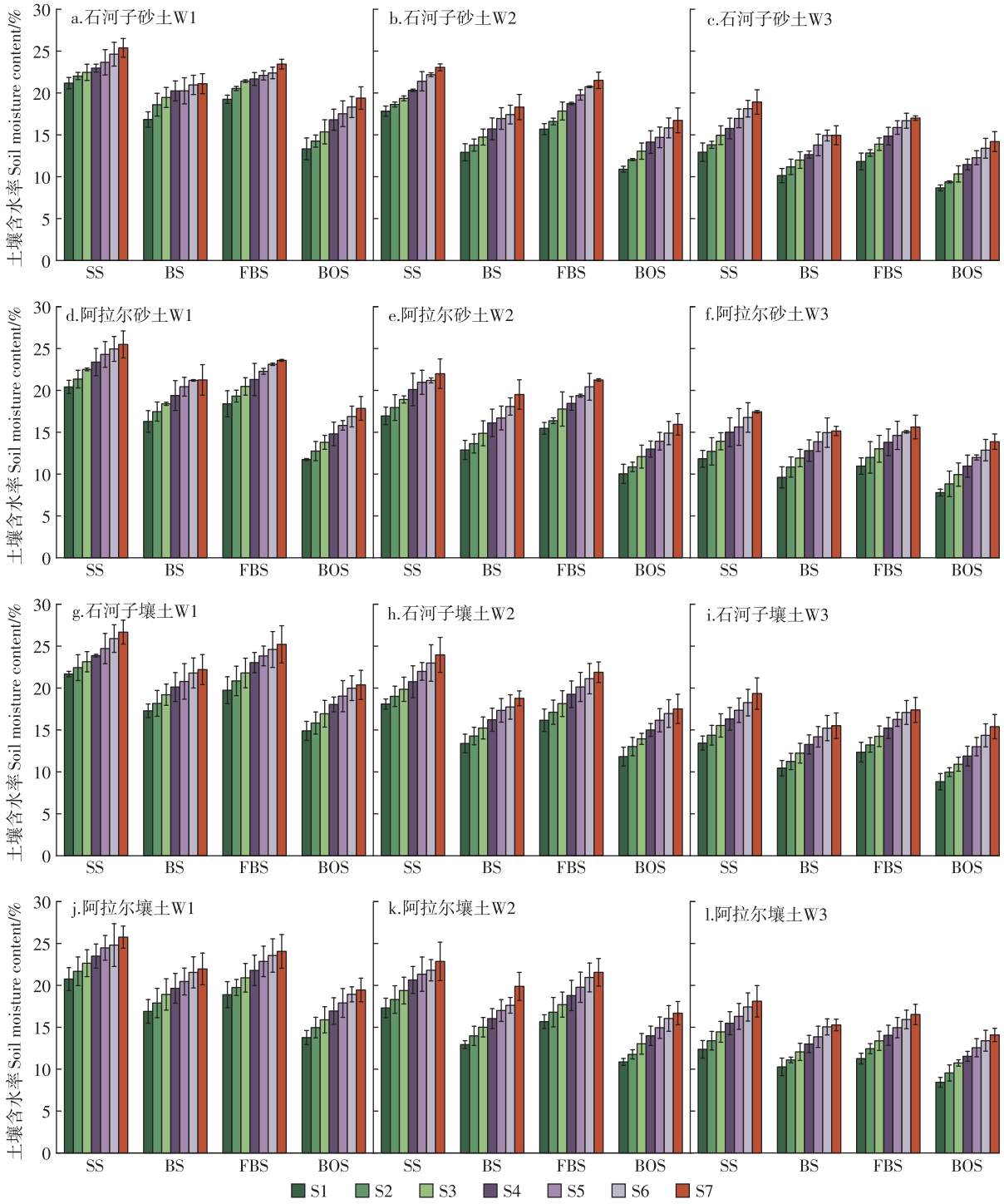


图3 各生育时期土壤含水率变化

Figure 3 Growth stage-specific soil moisture dynamics

水率变化情况。随着棉花生育阶段的不断推进，整体呈现出先下降再上升再下降的趋势。在石河子和阿拉尔气象模拟下，壤土条件下的各处理相较于砂土的土壤含水率平均增加0.58~11.77个百分点和0.12~17.37个百分点；在砂土和壤土条件下，石河子气象模拟环境的各处理土壤含水率相较于阿拉尔平均高0.77~8.50个百分点和1.44~6.19个百分点。当各处理受到水分胁迫时，土壤含水率也会呈现相应的下降趋势：相较于W1水平下，W2和W3的各处理平均下降7.37~25.91个百分点和22.28~42.06个百分点；相较于W2水平下，W3的各处理平均下降12.08~30.22个百分点。各处理整体呈现出随着土壤初始含盐量的不断递增，土壤含水率也会明显升高的趋势。

2.2 水盐胁迫下棉花产量

表2结果表明，不同处理显著影响了棉花产量（$P<0.05$）。方差分析显示，土壤初始含盐量对籽棉产量的影响极显著（$P<0.01$）；土壤持水量极显著影响棉花籽棉产量（$P<0.01$）；不同土壤含盐量及土壤持水量的交互作用极显著影响籽棉产量（$P<0.01$）。在石河子和阿拉尔气象模拟下，壤土条件下的籽棉产量相较于砂土下高0.70%~33.74%和1.18%~40.55%；砂土条件下和壤土条件下，阿拉尔气象模拟下的籽棉产量大部分高于石河子2.63%~32.69%和4.93%~28.33%。当植株受到水分胁迫时，其籽棉产量会产生明显的差异：相较于W1水平下，W2和W3各处理籽棉产量下降14.46%~56.76%和35.05%~80.13%。相较于W2水平，W3籽棉产量下降23.89%~57.06%。土壤初始含盐量低于或等于8 g·kg^{-1}（S1、S2、S3、S4），相较于上一土壤初始含盐量的处理，其籽棉产量下降5.31%~40.25%；高于8 g·kg^{-1}（S5、S6、S7），其籽棉产量则下降33.91%~84.32%。其中，由于在阿拉尔气候区，砂土下S6W3植株在蕾期枯萎，因而该处理下的籽棉产量

表2 不同条件下籽棉产量（kg·hm^{-2}）

Table 2 Seed cotton yield under different conditions（kg·hm^{-2}）

处理 Treatment	石河子砂土 Shihezi sand soil	阿拉尔砂土 Alar sand soil	石河子壤土 Shihezi loam soil	阿拉尔壤土 Alar loam soil
S1W1	5 776.90±112.95a	6 258.40±121.97a	5 817.52±406.02a	6 333.14±314.07a
S1W2	4 183.46±106.55c	5 250.99±154.53c	4 507.89±269.42c	5 578.66±167.05b
S1W3	2 920.40±103.99h	3 996.60±121.88f	3 219.92±248.83f	4 113.59±336.43d
S2W1	4 963.39±95.25b	5 655.03±157.96b	5 167.58±218.36b	5 831.06±51.54b
S2W2	3 791.33±135.77e	4 672.54±130.80d	4 268.49±344.65cd	4 792.24±153.65c
S2W3	2 502.27±196.04j	2 689.13±52.07h	2 734.09±25.19gh	3 010.31±224.66f
S3W1	3 981.43±107.26d	4 447.77±137.30e	4 072.97±86.01d	4 627.04±192.56c
S3W2	3 353.70±83.06g	3 938.10±105.68f	3 393.78±103.08ef	4 013.39±128.73d
S3W3	1 996.95±91.90l	2 271.55±83.03i	2 103.10±16.36i	2 312.17±71.88g
S4W1	3 548.68±109.90f	3 971.68±170.74f	3 638.05±78.45e	4 109.26±44.88d
S4W2	2 668.01±112.68i	3 475.02±126.24g	2 814.25±210.78g	3 614.76±103.29e
S4W3	1 193.18±66.17m	1 604.81±128.58j	1 406.04±188.72j	1 703.39±183.30h
S5W1	2 150.76±50.80k	2 360.91±158.80i	2 404.24±62.60hi	2 528.81±97.90g
S5W2	1 285.80±44.63m	1 320.46±108.88k	1 362.71±36.34j	1 464.53±40.34h
S5W3	658.07±52.58n	977.62±112.93l	724.68±628.07k	1 011.20±57.73i
S6W1	467.96±41.65o	628.82±51.92m	613.65±33.39jkl	739.31±345.86i
S6W2	280.02±75.73p	322.80±136.81n	345.55±46.42lm	372.63±86.35j
S6W3	180.90±156.67pqr	153.28±81.48nop	212.86±368.68m	257.81±225.39jk
S7W1	269.73±76.37pq	304.39±93.80no	317.93±63.54m	406.21±371.25j
S7W2	119.70±108.40qr	131.61±120.73op	150.03±259.86m	187.94±189.31jk
S7W3	55.79±96.63r	63.37±109.76p	67.70±117.26lm	80.70±139.78k
盐（S）	**	**	**	**
水（W）	**	**	**	**
盐×水（$S\times W$）	**	**	**	**

注：同列不同小写字母表示处理之间差异显著（$P<0.05$）；**：$P<0.01$。

Note：Different lowercase letters indicate significant differences among treatments（$P<0.05$）；**：$P<0.01$.

相较于同土壤质地条件下石河子气候的区籽棉产量略低。

2.3 水盐生产函数构建及验证

2.3.1 模型参数分析

水分敏感指数λ的值越大则说明棉花对应的某一生育时期对水分的敏感性越强,在该阶段缺水则会导致作物严重减产。根据表3可知,棉花生育期内水分敏感指数λ依次表现为花铃期>蕾期>吐絮期>苗期,故棉花花铃期对水分的敏感性最强,苗期对水分的敏感性最弱。盐分敏感指数σ表示棉花产量对土壤盐分敏感程度,σ值越大表示越敏感,当棉花受到盐分胁迫后减产越严重。由表3可知,棉花各个生育时期盐分敏感指数σ依次为苗期>蕾期>花铃期>吐絮期,表明棉花苗期对盐分敏感性最强,自蕾期开始棉花植株的敏感性逐渐开始降低,即耐盐能力逐步提高。

2.3.2 模型数值模拟评价

在不同的土壤质地与气候条件下,土壤含水量和土壤含盐量的*RMSE*分别小于0.006和1.154、R^2均大于0.969,模拟结果与实测值吻合程度较为良好,模拟结果同时能够较好地反映出土壤水分和盐分在不同的生育时期以及不同的生长条件下的变化情况(表4)。由图4可知,试验中的数据与预测的数据相对比,修改后的Jensen模型可较准确地预测棉花在水盐胁迫后的产量。本试验建立棉花水盐生产函数模型

表4 土壤含水量和土壤含盐量的模型预测精度

Table 4 Model prediction accuracy for soil water and salt content

变量 Variable	土壤质地 Soil texture	R^2	*RMSE*	*D*-index
土壤含水量	石河子砂土	0.983	0.005	0.984
	阿拉尔砂土	0.999	0.001	0.981
	石河子壤土	0.977	0.006	0.986
	阿拉尔壤土	0.989	0.005	0.986
土壤含盐量	石河子砂土	0.977	0.956	0.999
	阿拉尔砂土	0.977	0.975	0.999
	石河子壤土	0.973	1.067	0.999
	阿拉尔壤土	0.969	1.154	0.999

模拟值实测值决定系数R^2为0.993、0.995、0.996、0.996,说明模型对产量模拟效果较好,可用于棉花对产量模拟预测。

3 讨论

3.1 对水盐运移的影响

在本研究中,盆栽试验条件下的水盐运移规律受多种因素的影响。土壤水分运动是盐分迁移的关键驱动力[23]。苗期植株覆盖度低,土壤水分以向上蒸散为主。此过程将盐分携带至表土(0~20 cm),导致盐分上移积累,含盐量升高。蕾期气温升高,但灌水频率增加且叶面积增大抑制了土表蒸发。此时水分运动在灌溉驱动下趋于均衡,同时作物耗水增强,土壤

表3 修正后Jensen模型参数拟合

Table 3 Parameter fitting of the modified Jensen model

土壤质地 Soil texture	参数 Parameter	苗期 Seeding stage	蕾期 Bud stage	花铃期 Flowering-boll stage	吐絮期 Boll-opening stage
石河子砂土	λ	−0.073	0.327	0.440	0.247
	σ	0.843	0.612	0.246	−0.777
	$S_{et,min}$/(g·kg^{-1})	7.808	7.215	7.998	2.135
	$S_{et,max}$/(g·kg^{-1})	22.664	24.336	21.208	19.178
阿拉尔砂土	λ	−0.259	0.490	0.554	0.110
	σ	0.999	0.999	0.161	−0.972
	$S_{et,min}$/(g·kg^{-1})	3.897	8.204	5.773	7.786
	$S_{et,max}$/(g·kg^{-1})	20.622	20.492	23.974	21.837
石河子壤土	λ	0.118	0.285	0.486	0.240
	σ	0.996	0.361	0.119	−0.999
	$S_{et,min}$/(g·kg^{-1})	9.506	8.884	2.411	8.658
	$S_{et,max}$/(g·kg^{-1})	15.382	26.198	23.322	27.442
阿拉尔壤土	λ	0.009	0.178	0.771	0.030
	σ	0.997	0.805	0.369	−0.385
	$S_{et,min}$/(g·kg^{-1})	9.264	0.007	8.355	6.420
	$S_{et,max}$/(g·kg^{-1})	19.867	24.028	24.792	22.700

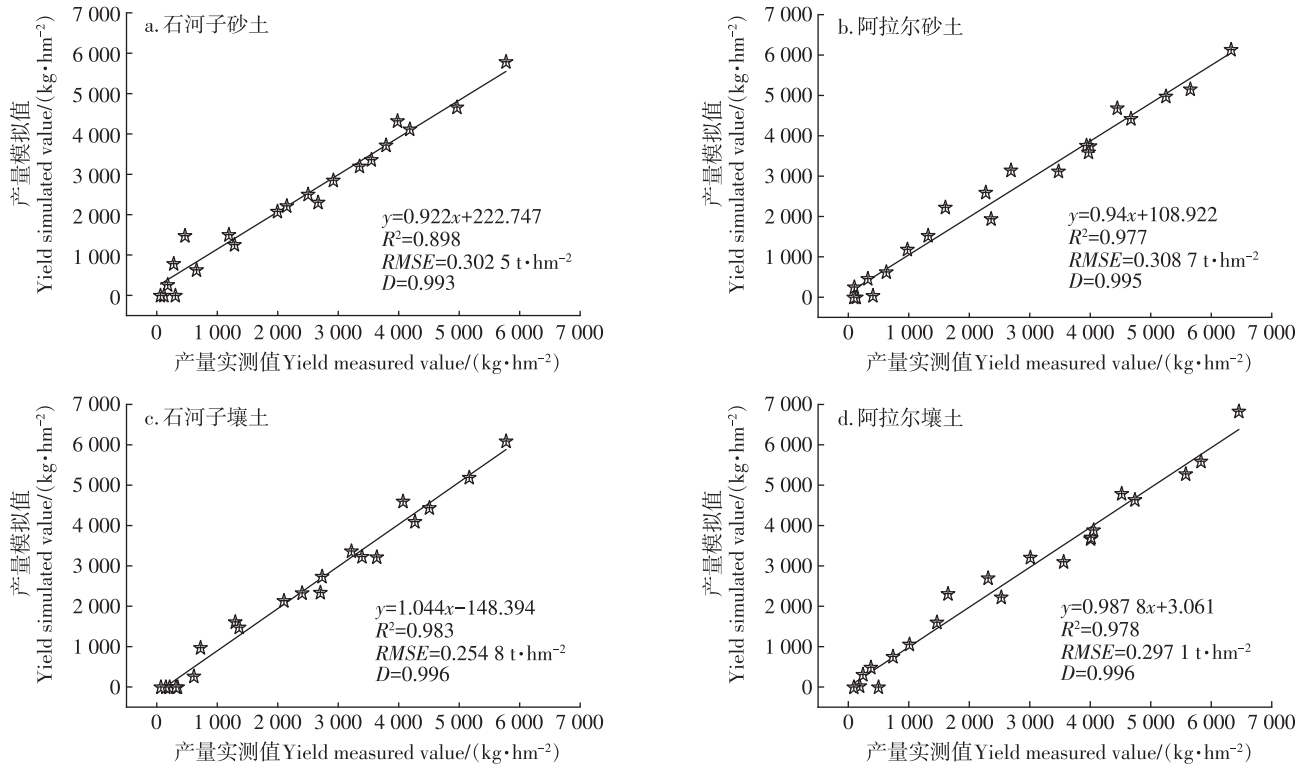


图4 修改后Jensen模型产量验证

Figure 4 Productivity verification of the revised Jensen model

含水率降低。盐分在灌溉增加和蒸发减弱综合作用下，呈现下降趋势。花铃期是需水高峰期，频繁大量灌水主导水分运动，形成强烈的向下淋洗水流。此过程将盐分有效淋洗至根区以下，导致盐分持续降低。同时，充足供水使土壤含水率回升。吐絮期停止灌溉，水分运动再次以强烈的向上蒸散为主。由于缺乏淋洗水流的抵消，盐分随水分蒸发而再次上移并在表土积累，导致含盐量回升。此阶段作物耗水仍强，土壤含水率因停水而显著下降。这一水盐耦合运移模式与牟洪臣等[24]在北疆棉田观察到的规律存在差异，可能由于本试验采用的幼苗移栽方式扰动土壤，影响了苗期初始水盐分布。研究表明，在较高盐分条件下，棉花种植区的土壤含水率反而高于低盐区域。这一现象可能与盐胁迫导致的棉花根系损伤有关。Chen等[25]的研究证实，当土壤处于高盐分且低含水量的环境条件下，棉花根系的发育会受到显著抑制，根系生物量明显减少。对比阿拉尔灌区与石河子灌区的环境特征可以发现，阿拉尔灌区由于具有较高的气温、较强的日照辐射以及较长的日照时长，导致其土壤水分蒸发量较大，因而土壤含水率普遍低于石河子灌区。同时，阿拉尔灌区的土壤盐分含量显著高于石河子灌区，这种高盐环境进一步加剧了对棉花根系的胁迫作用，从而形成了高盐分下土壤含水率相对较高的特殊现象。

3.2 对棉花产量的影响

棉花产量的形成受到水盐胁迫的显著影响，同时水盐相互作用会加剧产量下降[26]。研究表明，土壤含盐量对棉花产量有阈值效应，当土壤初始含盐量超过8 g·kg^{-1}时，棉花的产量显著下降。这一发现与Jisha等[27]和朱延凯等[28]的研究结果一致，盐分浓度超过一定限度后，棉花的根系生长和水分吸收能力受到抑制，从而导致生长发育受限。在盐分较低的情况下（低于4 g·kg^{-1}），盐分对产量的影响较小，表明棉花对低浓度盐分具有一定的适应性，能够维持正常的生长和产量。除了盐分，水分的供应也是棉花产量的决定性因素[29]。棉花在蕾期和花铃期对水分的需求较高，水分亏缺会导致棉铃脱落，从而降低产量[30-31]。研究表明，棉花在这些关键生育阶段对水分敏感，若在此期间出现水分亏缺，棉花的结铃数量和质量将受到显著影响。此外，适度的水分亏缺，尤其是在花铃后期，有时反而能促进棉花的产量，减少过量的营养生长，促进果实发育[32]。因此，合理的水盐管理对于棉花的高产至关重要。通过控制灌溉量和水盐浓度，可以有效减少水盐胁迫，提高棉花的结铃率和产量。此外，

土壤质地对棉花产量具有显著影响。通过盆栽试验发现，与砂土相比，壤土条件下的棉花产量普遍更高。这一现象与Sun等[33]的研究结论一致，即过高的土壤含砂量会限制棉花的产量潜力，这可能与砂土保水保肥能力较差、根系发育受限等因素有关。由此可见，土壤初始含盐量低于8 g·kg^{-1}更适合棉花生长，且在棉花蕾期和花铃期需提高灌溉频率和灌水量。同时，壤土相较于砂土更适合棉花的生长。

修正后的模型更好地考虑了土壤含盐量和水分供给之间的相互作用，并通过实测数据进一步优化了模型参数。在该模型中，吐絮期σ呈负值表明该生育时期盐胁迫与棉花产量呈正相关，这与Ma等[34]的研究一致，即吐絮期适度盐分胁迫可能通过促进蕾铃干物质积累而有利于提升棉花产量。研究发现，当土壤中盐分浓度较低时，水盐生产函数表现出较高的生产效率，但随着盐分浓度的增加，生产函数的效率显著降低。特别是当初始土壤盐分超过8 g·kg^{-1}时，水盐生产函数的效率急剧下降，这与实际观测到的棉花产量下降趋势一致。这一现象进一步验证了盐分对棉花生产的抑制作用，并为未来的水盐管理提供了理论依据。修正后的Jensen模型还表明，棉花对水分亏缺的敏感性在蕾期和花铃期达到最高，这与张慧等[35]的研究结论（蕾花铃期水分敏感）及王在敏等[36]的部分发现（花铃前期及蕾期敏感）基本吻合，关于水分敏感期存在一定差异，可能源于生育时期划分标准、土壤环境或气候条件的不同。此阶段是棉花营养生长与生殖生长的关键期，也是需水高峰期，水分亏缺会严重影响棉铃形成与发育，导致产量显著下降。本研究发现花铃后期可进行适量水分调控，但蕾期和花铃期整体需保证充足供水。本研究建立的修正Jensen模型能够更准确地量化水盐胁迫对棉花产量的影响效应。通过模型参数的优化与验证，可为不同生态区棉花种植的水盐调控提供理论依据与技术支撑。

综上所述，合理调控灌溉量，建议将土壤盐分含量尽量控制在临界水平以下（尤其是低于8 g·kg^{-1}），依据棉花生育阶段的需求差异，在水分敏感期（如蕾期和花铃期）或气温较高、日照较强等情况下，保证充足供水；此外，在土壤选择与管理方面，宜优先选用保水保肥性能较好的壤土，若处于砂质土壤区，则应通过添加有机质、改善土壤结构等方式提升其水肥保持能力。同时需要指出的是，本研究结果基于可控条件下的盆栽试验获得，虽与田间实际生产存在一定差异，但其建模方法和关键参数可为后续大田试验研究提供重要参考。未来研究可结合区域土壤水盐动态监测数据，进一步验证和完善模型在田间尺度上的适用性。

4　结论

（1）土壤水盐胁迫会增大土壤含盐量，而土壤含水率则随着土壤含盐量和持水量的升高而增大。相同条件下，阿拉尔灌区模拟条件下土壤含盐量相较石河子高，但含水率较石河子低；壤土条件下土壤含盐量和含水率均高于砂土。

（2）土壤水盐胁迫对棉花产量具有显著抑制作用。当土壤初始含盐量超过8 g·kg^{-1}，或土壤含水率低于田间持水量的60%时，棉花产量均出现急剧下降。在相同模拟条件下，阿拉尔灌区的棉花产量显著高于石河子灌区。此外，壤土栽培条件下的棉花产量也显著高于砂土。

（3）在修正的Jensen模型中，盐分敏感指数（σ）表现为苗期>蕾期>花铃期>吐絮期，水分敏感指数（λ）表现为花铃期>蕾期>吐絮期>苗期。这表明在花铃期需适当增加灌水量和灌水频率，在棉花苗期尽可能降低土壤含盐量。通过将盐分胁迫因子引入Jensen模型构建出的修正模型显著提高了棉花产量预测的精度。模型验证结果显示，其决定系数R^2>0.898，一致性指数d>0.993，表明该模型具有较好的拟合性能与预测可靠性。

参考文献：

[1] 宁松瑞, 左强, 石建初, 等. 新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 90-99. NING S R, ZUO Q, SHI J C, et al. Water use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(22): 90-99.

[2] 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. BI W P, LIN D, MAO X M. 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*, 2024, 40(23): 155-168.

[3] 胡明芳, 田长彦, 赵振勇, 等. 新疆盐碱地成因及改良措施研究进展[J]. 西北农林科技大学学报, 2012, 40(10): 111-117. HU M F, TIAN C Y, ZHAO Z Y, et al. Salinization causes and research progress of technologies improving saline-alkali soil in Xinjiang[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2012, 40(10): 111-117.

[4] 陈小芹, 王振华, 何新林, 等. 北疆棉田不同冬灌方式对土壤水分、盐分和温度分布的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):132-137. CHEN X Q, WANG Z H, HE X L, et al. Effects of winter irrigation method on soil moisture, salt and temperature distribution in cotton fields of north Xinjiang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):132-137.

[5] ABDELRAHEEM A, ESMAEILI N, O'CONNEL M, et al. Progress and perspective on drought and salt stress tolerance in cotton[J]. *Industrial Crops & Products*, 2019, 130:118-129.

[6] HUANG G, WU Z G, RICHARD P, et al. Genome sequence of *Gossypium herbaceum* and genome updates of *Gossypium arboreum* and *Gossypium hirsutum* provide insights into cotton A-genome evolution [J]. *Nature Genetics*, 2020, 52(5):516-524.

[7] 李忠婷, 胡杰, 陈钰秦, 等. 基于5年定位试验的新疆滴灌棉田土壤有效磷农学阈值及磷肥适宜用量[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(11):2063-2071. LI Z T, HU J, CHEN Y Q, et al. Agronomic threshold of soil available phosphorus and the appropriate rate of phosphate fertilizer for drip-irrigated cotton fields in Xinjiang based on a 5-year field experiment[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(11):2063-2071.

[8] 刘洪光, 李智杰, 李玲, 等. 粉垄深松深耕改善南疆重度盐碱土理化性质和棉花产量及其后效[J]. 农业工程学报, 2024, 40(13):45-57. LIU H G, LI Z J, LI L, et al. Effects of deep vertical rotary tillage depth on the improvement of soil physicochemical properties and cotton yield in the current year and the following year in severe saline land in southern Xinjiang of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(13):45-57.

[9] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2024:225-228. National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook [M]. Beijing:China Statistics Press, 2024:225-228.

[10] 刘鹏鹏, 李江博, 徐红军, 等. 新疆冬小麦品种资源蛋白组分及品质的遗传多样性[J]. 中国农业科学, 2025, 58(15):2948-2959. LIU P P, LI J B, XU H J, et al. Genetic diversity analysis of protein fractions and quality in Xinjiang winter wheat cultivar resources[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(15):2948-2959.

[11] FENG A J, ZHOU J F, VORIES E D, et al. Quantifying the effects of soil texture and weather on cotton development and yield using UAV imagery[J]. *Precision Agriculture*, 2022, 23(4):1248-1275.

[12] VORIES E, O'SHAUGHNESSY S, SUDDUTH K, et al. Comparison of precision and conventional irrigation management of cotton and impact of soil texture[J]. *Precision Agriculture*, 2020, 22(2):1-18.

[13] 王仰仁, 康绍忠. 基于作物水盐生产函数的咸水灌溉制度确定方法[J]. 水利学报, 2004(6):46-51. WANG Y R, KANG S Z. Saline water irrigation scheduling method based on crop-salt - water production function[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(6):46-51.

[14] 郭向红, 毕远杰, 孙西欢, 等. 西葫芦微咸水膜下滴灌土壤水盐运移对产量影响的预测模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8):167-175. GUO X H, BI Y J, SUN X H, et al. Prediction model of soil water and salt transport on yield of summer squash under mulch drip irrigation with brackish water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8):167-175.

[15] FOSTER T, BROZOVIĆ N. Simulating crop-water production functions using crop growth models to support water policy assessments[J]. *Ecological Economics*, 2018, 152:9-21.

[16] YETIK A K, CANDOĞAN B N. Optimisation of irrigation strategy in sugar beet farming based on yield, quality and water productivity[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2022, 68(8):358-365.

[17] 张和喜, 迟道才, 王永涛, 等. 黔中地区玉米水分生产函数模型适应性评价[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3):176-179. ZHANG H X, CHI D C, WANG Y T, et al. Evaluation on suitability of water production functions to maize in central area of Guizhou Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3):176-179.

[18] 吴训, 许艳奇, 石建初, 等. 基于根系加权土壤水分有效性的冬小麦水分生产函数[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8):124-134. WU X, XU Y Q, SHI J C, et al. Water production function of winter wheat based on root-weighted soil water availability[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(8):124-134.

[19] 王军涛, 李强坤. 黄河下游地区微咸水灌溉利用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5):149-151. WANG J T, LI Q K. Research on saline water irrigation technique in downstream area of Yellow River[J]. *Journal of Water Resources and Water*, 2013, 24(5):149-151.

[20] 程卫国, 卢文喜, 安永凯. 吉林省水稻水分生产函数模型的适应性研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2):61-66. CHENG W G, LU W X, AN Y K. Adaptability of water production function models for rice in Jilin Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(2):61-66.

[21] 苗世龙, 李仙岳, 史海滨, 等. 沿黄灌区水肥一体化条件下玉米水氮优化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(6):140-149. MIAO S L, LI X Y, SHI H B, et al. Optimization of maize water and nitrogen under the condition of integratedwater and fertilizer in the irrigation area along the Yellow River[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(6):140-149.

[22] MAAS E V, HOFFMAN G J. Crop salt tolerance-current assessment [J]. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1977, 103(2):115-134.

[23] 刘元超, 何帅, 乔长录, 等. 滴灌条件下土壤水盐运移规律及模拟研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(6):1459-1471. LIU Y C, HE S, QIAO C L, et al. The effect of soil water and salt transport and simulation under drip irrigation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(6):1459-1471.

[24] 牟洪臣, 虎胆·吐马尔白, 苏里坦, 等. 干旱地区棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7):18-22. MOU H C, HUDAN·TUMAERBAI, SU L T, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under mulchin arid region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(7):18-22.

[25] CHEN W, JIN M, FERRÉ P T, 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.

[26] LIAO Q, DING R, DU T, et al. Stomatal conductance modulates maize

yield through water use and yield components under salinity stress[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 294:108717.

[27] JISHA K C, VIJAYAKUMARI K, PUTHUR T J. Seed priming for abiotic stress tolerance:an overview[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(5):1381-1396.

[28] 朱延凯, 王振华, 李文昊. 不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2):298-305. ZHU Y K, WANG Z H, LI W H. Effects of different salt stress on physiological growth and yield of cotton under drip irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2):298-305.

[29] 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 P R, ZHANG F C, HOU X H, et al. Effects of soil water regulation on cotton yield and soil water-salt distribution under drip irrigation in southern Xinjiang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(2):84-92.

[30] 代健敏, 何庆雨, 谢玲, 等. 氮肥后移对花铃期水分亏缺棉花产量的补偿效应研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3):986-995. DAI J M, HE Q Y, XIE L, et al. Compensation effect of nitrogen fertilizer post-shift on water-deficient cotton yield at different stages[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(3):986-995.

[31] 王灵猛. 气候变化对新疆棉花生产的影响及其适应措施[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021. WANG L M. Impact and adaptation of climate change on cotton production in Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.

[32] 杜刚锋, 汪江涛, 孙雪冰, 等. 不同灌溉方式和灌水量对棉花冠层叶铃配置的影响[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(7):1177-1186. DU G F, WANG J T, SUN X B, et al. Effects of irrigation method and irrigation amount on cotton crown leaf boll configuration[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56(7):1177-1186.

[33] SUN Z H, WANG Z, LI J S. Identification and evaluation of the main constraints on cotton production within a collective drip irrigation system in southern Xinjiang, China[J]. *Agronomy*. 2025; 15(4):760.

[34] MA Y Y, WEI Z H, LIU J, et al. Growth and physiological responses of cotton plants to salt stress[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2021, 207(3):565-576.

[35] 张慧, 张凯, 陈冰, 等. 不同灌溉量对新疆棉花生长发育及产量形成的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6):1976-1985. ZHANG H, ZHANG K, CHEN B, et al. Effects of different irrigation rates on cotton growth and yield formation in Xinjiang[J] *Arid Zone Research*, 2022, 39(6):1976-1985.

[36] 王在敏, 汪丙国, 靳孟贵. 棉花膜下滴灌水盐胁迫研究[J]. 地质科技情报, 2013, 32(3):166-170. WANG Z M, WANG B G, JIN M G. Water and salt stress to cotton in the condition of drip irrigation under mulch[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2013, 32(3):166-170.