

不同土质下灌水盐度对滴灌棉花生理及产量品质的影响

王振华, 王菲, 吕德生, 刘健, 朱艳, 温越

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 石河子 832000;
3. 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室, 石河子 832000)

摘要: 在干旱、半干旱地区利用微咸水进行灌溉可以缓解淡水资源供需矛盾, 但其灌溉效果与土壤质地是否相关有待研究。该研究旨在探讨灌水矿化度对不同土壤质地滴灌棉花生长发育和籽棉产量、纤维品质的影响。2022 年进行桶栽试验, 设置 2 种玛纳斯河流域常见的棉田土壤质地(砂壤土 T1、砂土 T2)和 4 个灌水矿化度(0.85 (S0)、2.00 (S1)、5.00 (S2)、8.00 g/L (S3)), 共 8 个试验处理, 研究不同处理下棉花光合指标、株高、茎粗、产量及品质。结果表明: 随灌水矿化度增大, 在砂土中棉花苗期后株高、茎粗、净光合速率、蒸腾速率、单铃质量、单株铃数、产量、灌溉水利用效率和断裂比强度均呈现减小趋势, S3 处理的蒸腾速率在蕾期较 S0 降低 10.61%; 而在砂壤土条件下, 各指标呈先增后减趋势, S1 处理净光合速率较 S0 增加 8.40%。随灌水矿化度升高, 2 种土壤质地下棉花的最大荧光呈现减小趋势, 非光化学淬灭呈现增加趋势。通过回归分析可知, 砂土棉田棉花产量与灌水矿化度呈负相关关系, 而在砂壤土棉田中, 用小于 3.69 g/L 的灌溉水不会降低棉花产量。利用通径分析可知, 在砂壤土条件下, 棉花茎粗、蒸腾速率是影响产量的主要因素, 株高是影响马克隆值的主要因素。在砂土条件下, 非光化学淬灭系数、蒸腾速率是影响产量的主要因素, 株高、蒸腾速率是影响马克隆值的主要因素。该研究可为玛纳斯河流域不同土质棉田合理利用微咸水资源提供理论依据与技术支持。

关键词: 土壤质地; 灌溉; 棉花; 盐分; 膜下滴灌; 生理; 产量; 品质

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305181

中图分类号: 275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-24-0069-10

王振华, 王菲, 吕德生, 等. 不同土质下灌水盐度对滴灌棉花生理及产量品质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 69-78. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305181 <http://www.tcsae.org>

WANG Zhenhua, WANG Fei, LYU Desheng, et al. Effects of brackish water irrigation on the physiological characteristics, yield and quality of mulched drip irrigation cotton under different soil textures [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(24): 69-78. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305181 <http://www.tcsae.org>

0 引言

新疆地处西北内陆干旱区, 降雨量稀少, 蒸发量大, 如何高效利用水资源, 已成为新疆农业发展考虑的首要问题^[1]。滴灌可以提高水分利用效率, 自 20 世纪 80 年代引进以来, 得到广泛推广^[2]。地膜覆盖具有增温、保墒、抑制植株棵间蒸发、提高作物产量等功能^[3]。在 20 世纪 90 年代开始在玛纳斯河流域将覆膜与滴灌结合起来进行尝试取得显著成果, 膜下滴灌开始推广并得到长足的发展, 新疆膜下滴灌棉花种植面积不断攀升, 至今新疆地区膜下滴灌棉花种植面积占全国植棉面积 82.76%, 棉花产量占全国棉花产量的 85.76%, 是中国主要的棉花产区^[4-5]。但随耕地面积增长, 淡水资源匮乏制约着新疆农业的发展, 亟需替代的灌溉水资源。在干旱半干旱地区利用微咸水进行灌溉, 可以缓解淡水资源供需矛盾, 新疆微咸水资源丰富, 新疆微咸水天然补给量占西北内陆

区微咸水天然补给量 57.60%, 地下水资源丰富, 地下咸水分布面积 23.3 万~26.7 万 hm^2 , 含盐量在 3~30 g/L 之间, 可开发的微咸水、咸水资源量为每年 17.24 亿 m^3 ^[6-10]。

微咸水灌溉在干旱缺水地区越来越受到重视, 国内外学者进行了大量研究。ISKENDEROV 等^[11]在阿塞拜疆研究表明矿化度为 5~6 g/L 的咸水可用于棉花灌溉; 刘冉等^[12]发现灌溉水电导率升高对棉花幼苗根系有一定的抑制作用; 江柱等^[13]研究表明棉株各器官养分量和单株积累量随灌溉水矿化度的增大呈降低趋势; 郭仁松等^[14]发现在盛花期前用矿化度小于 3 g/L 的微咸水灌溉不影响棉花产量; 郑春莲等^[15]发现矿化度 2~4 g/L 微咸水灌溉对籽棉产量无显著影响; 王泽林等^[16]研究发现综合条件下小于 6 g/L 灌水矿化度不影响棉花产量; 刘雪艳等^[17]在南疆地区发现矿化度为 2.36~3.39 g/L 时, 棉株体内盐分累计较低, 对养分的吸收及棉花品质影响最小。综上, 适宜的微咸水灌溉对棉花产量并不会造成大的影响, 因此在淡水资源匮乏的地区常用微咸水进行农业灌溉, 节约了水资源, 有利于绿洲农业的可持续生产。

新疆农业是典型的绿洲农业, 随机械化的发展, 人工绿洲面积不断增长, 由于边缘绿洲区农田开垦利用年限的不同, 土壤性状在小区域尺度存在高度的变异性^[18-19]。而玛纳斯河流域是新疆开垦面积最大的人工绿

收稿日期: 2023-05-22 修订日期: 2023-10-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279040); 国家重点研发计划项目(2022YFD1900405、2021YFD1900802-2); 兵团重大科技项目(2021AA003-1)

作者简介: 王振华, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为节水灌溉理论与技术。Email: wzh2002027@163.com

洲,更是新疆维吾尔自治区最重要的粮、棉、糖生产基地之一。玛纳斯河流域土壤质地主要为砂土和壤土^[20]。土壤质地与植株的产量品质密切相关。大量学者针对不同土壤质地地下植株生长进行了大量研究。熊杰等^[21]研究发现玉米产量在砂质黏壤土最高,砂质壤土次之,砂土最低;贾立华等^[22]研究发现花生荚果产量、籽仁产量及有效果数呈现壤土大于砂土大于黏土的规律;曲杰等^[23]发现膜下滴灌条件下,砂壤土和壤土更加有利于花生荚果体积增长,黏土则限制了花生荚果膨大;史普想等^[24]研究发现花生荚果产量、子仁产量和有效果数均表现为壤土最大、砂土次之、黏土最小;刘芳婷等^[25]研究表明不同生育期棉花壤土和砂土的土壤 CO_2 浓度具有明显的差异,整体呈现出“上升-下降”的趋势;冯棣等^[26]研究发现中壤土和重壤土相较于砂壤土更适合于棉花咸水造墒播种;王萌萌等^[27]发现壤土中棉花的植株综合生长指标最好;张泽等^[28]研究发现壤土棉花根系分布均匀度优于砂、黏土。过往研究常聚焦于单一土壤质地微咸水对棉花产量品质的影响,几乎没有考虑到不同土壤质地地下微咸水灌溉是否对植株盐害程度存在差异。因此,本研究通过开展桶栽试验,探索不同土壤质地条件下灌水矿化度对棉花生理生长及产量品质的影响,明确不同土壤质地地下最合理的灌水矿化度,以期对玛纳斯河流域不同土质棉田合理利用微咸水资源提供理论依据与技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 4—9 月新疆生产建设兵团农八师石河子市石河子大学节水试验站 ($85^{\circ}59'47''\text{E}$, $44^{\circ}19'28''\text{N}$) 进行。试验站海拔 412 m, 平均地面坡度为 0.6%。平均年日照时数为 2 865 h。平均年降雨量为 198 mm, 平均年蒸发量为 1 340 mm, 大于 10°C 积温为 3 463.5 $^{\circ}\text{C}$, 大于 15°C 积温为 2 960.0 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期 170 d, 年平均风速为 1.5 m/s。2022 年逐日降水量、日最高温度、日最低温度及日平均气温见图 1。

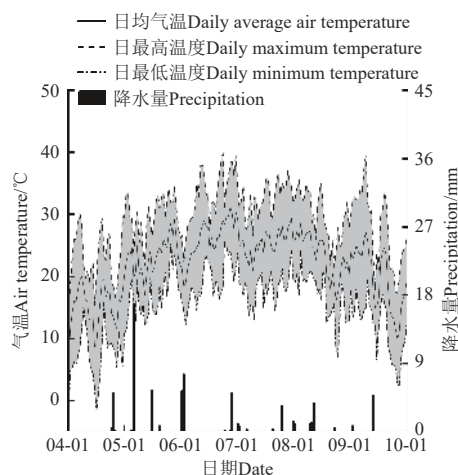


图 1 2022 年棉花种植期间降水量和气温

Fig.1 Precipitation and air temperature during cotton growth period in 2022

1.2 试验设计

本试验采用桶栽试验, 试验用桶规格为 $0.55\text{ m}\times 0.50\text{ m}\times 0.55\text{ m}$ (桶顶高 $\times$ 底部半径 $\times$ 顶部半径), 桶底已打孔, 桶与桶之间并排布置, 放置于 50 cm 深的试验用坑中。试验供试土样分别取自新疆石河子市农二连 (土壤质地为砂土) 和石河子大学节水灌溉试验站 (土壤质地为砂壤土), 经过自然晾干、碾碎、过筛、去除碎石块等工序 (土壤颗粒组成见表 1)。灌水量根据生产实践及前人研究^[29], 定为全生育期 $4\ 500\text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌水矿化度根据本课题组已有研究^[30], 设置为 0.85 (当地常用灌溉水矿化度)、2.00、5.00、8.00 g/L, 使用医用输液管模拟滴头以精确控制每桶水量, 滴头流量 1.8 L/h。试验所用肥料分别为尿素、磷酸一铵及硫酸钾。施肥量结合当地农艺措施, 磷酸一铵、硫酸钾及尿素施肥量均为 $300\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。全生育期灌水 11 次, 施肥 10 次, 肥随水入, 病虫害防治等其他农艺措施与大田一致。

表 1 不同质地土壤试验处理

土壤质地 (T) Soil texture	矿化度 (S) Irrigation water salinity/Treatment ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	处理 Treatment	颗粒组成 Particle composition/%		
			黏粒 Clay ($<0.002\text{ mm}$)	粉粒 Silt ($0.002\sim 0.02\text{ mm}$)	砂粒 Sand ($>0.02\sim 2\text{ mm}$)
砂壤土 Sand loam (T1)	2.00 (S1)	T1S1	11.21	26.32	62.47
	5.00 (S2)	T1S2			
	8.00 (S3)	T1S3			
	0.85 (S0)	T1S0			
砂土 Sandy soil (T2)	2.00 (S1)	T2S1	3.31	11.57	85.12
	5.00 (S2)	T2S2			
	8.00 (S3)	T2S3			
	0.85 (S0)	T2S0			

本试验以“新陆早 42 号”为材料, 于 4 月 20 日播种, 采用干播湿出方式, 桶内棉花播种按大田一膜三管六行方式为参考, 棉株间距 11 cm, 桶上覆膜, 覆膜范围与桶大小一致, 塑料地膜采用氧化-生物双降解地膜 (山东天沃环保有限公司生产), 主要为纤维素、淀粉等天然材料, 具有氧化降解和生物降解的优点。于 9 月 26 日吐絮期收获, 全生育期 159 d。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合指标参数测定

在棉花蕾期 (6 月 27 日)、花铃期 (8 月 1 日)、吐絮期 (9 月 1 日) 使用 LI-6800 便携式光合荧光测量仪 (Li-COR, USA), 选天气晴朗无云且在 11:00—13:00 的时间段测量棉花净光合速率 (P_n , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 和蒸腾速率 (T_r , $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$), 测定时采用开放气路, CO_2 气体采自相对稳定的 2~3 m 的空中, 流速设 $500\text{ }\mu\text{mol}/\text{s}$ 。每个处理选择生长及受光方向一致的倒三叶 (对叶片进行标记), 每个处理随机选取 3 株, 取平均值。

1.3.2 荧光指标测定

采用 MULTISPEQ 型便携式荧光测量系统 (Photosynq, USA) 分别在棉花蕾期 (6 月 20 日)、花铃期 (7 月 29 日)、吐絮期 (9 月 4 日) 测量叶片的叶绿素荧光参数, 各处理测量均在凌晨 00:00—02:00 进行。选取 3 株长势均匀棉花, 挑选 1.3.1 中已标记的功能叶测量棉花最

大荧光 (F_m)，非光化学淬灭系数 (Non-photochemical quenching, NPQ)，取 3 株荧光参数的平均值。

1.3.3 株高茎粗测定

株高 (H)：每个处理选择 3 株植株，并做好标记，在棉花苗期 (5 月 27 日)、蕾期 (6 月 20 日)、花铃期 (8 月 1 日) 及吐絮期末 (9 月 1 日) 利用卷尺测定株高。株高为棉株子叶节到主茎顶部的距离。

茎粗 (L)：每个处理选择 3 株植株，并做好标记。在棉花苗期 (5 月 27 日)、蕾期 (6 月 20 日)、花铃期 (8 月 1 日) 及吐絮期末 (9 月 1 日) 利用游标卡尺测定茎粗。茎粗为测量棉株子叶节上 1 cm 处的主茎直径。

1.3.4 棉花产量及纤维品质

2022 年 9 月 26 日，于各处理测取标记的 3 株棉花产量构成，记录单株铃数、单铃质量。按固定密度 21 万株/hm² 换算籽棉标准产量。每个处理籽棉产量挑选棉样 20 g (脱籽后)，委托农业农村部棉花品质监督检测检验中心 (安阳) 测定棉花纤维马克隆值、纤维长度、整齐度指数、断裂比强度及伸长率，使用 HFT9000 型棉花纤维检测仪 (精度±0.15~1.50) 进行检测。

1.3.5 灌溉水分利用效率

灌溉水分利用效率 (irrigation water use efficiency, IWUE, kg/m³) 为籽棉产量 (kg/hm²) 与灌溉定额 (mm) 的比值。

1.4 数据分析

采用 Excel 2021 进行数据分析，利用 OriginPro 2022 绘图，用 SPSS 26.0 等对试验数据进行显著性分析、方差分析、回归分析、相关性分析。

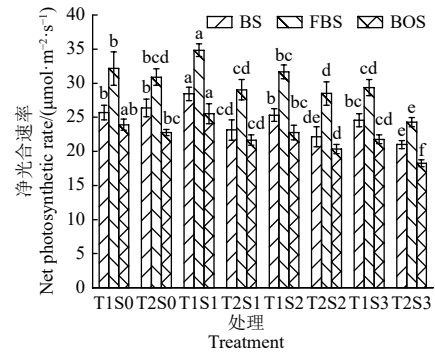
通径分析：通径分析是在相关性分析和回归分析的基础上，把自变量与因变量之间的表面相关性进行分解，研究自变量对因变量的直接影响和间接影响，探究各因素对因变量的影响程度，进而为统计决策提供可靠的依据。本文在不同土壤质地不同灌溉水矿化度处理下，利用通径分析法建立了产量及马克隆值与株高、茎粗、净光合速率、蒸腾速率、最大荧光及非光化学淬灭参数的回归方程，并求得了产量及马克隆值和株高、茎粗、净光合速率、蒸腾速率、最大荧光及非光化学淬灭的通径系数，最终确定了不同土壤质地不同灌溉水矿化度下株高、茎粗、净光合速率、蒸腾速率、最大荧光及非光化学淬灭参数对棉花产量及马克隆值的影响程度。

2 结果与分析

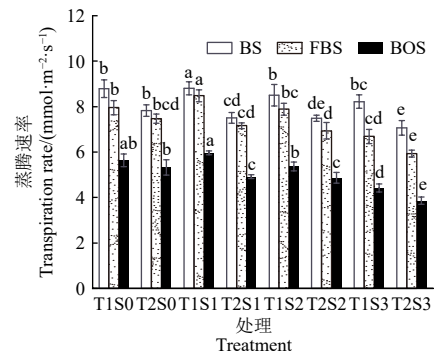
2.1 不同土壤质地灌水矿化度对棉花光合的影响

图 2 为各处理棉花不同生育时期下光合速率和蒸腾速率。由图 2a 可知，随生育时期推进，棉花叶片净光合速率 (P_n) 呈现先增大再减小的趋势，在花铃期棉花 P_n 达到最大，平均值为 30.09 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；吐絮期最小，平均值为 22.12 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，吐絮期相比较花铃期减少 36.02%。这是因为花铃期处于棉花生长最旺盛的阶段。砂壤土 (T1) 条件下，S1 微咸水对棉花 P_n 有促进作用，S3 咸水对棉花 P_n 在花铃期及吐絮期有抑制作用，呈现

S1>S0>S2>S3 规律，在花铃期 T1S1 处理相较 T1S0 处理增加 8.40%，T1S3 处理相较 T1S0 处理减少 9.48%；砂土条件下，随灌水矿化度增大，对棉花 P_n 抑制作用越明显，在花铃期 T2S3 处理相较 T2S0 处理减少 27.13%。矿化度相同水平时，棉花 P_n 呈现砂壤土优于砂土的规律，在花铃期，T1S1 处理相较于 T2S1 处理增加 20.03%，在吐絮期，T1S2 处理比 T2S2 处理增加了 11.90%。



a. 不同生育期各处理净光合速率
a. Net photosynthetic rate for each treatment under different growth stages



b. 不同生育期各处理蒸腾速率
b. Transpiration rate for each treatment under different growth stages

注：BS、FBS 和 BOS 分别表示棉花蕾期、花铃期和吐絮期。不同小写字母表示相同生育期内不同处理 5% 水平差异显著。下同。

Note: BS, FBS, and BOS represent cotton bud stage, flowering and boll stage, and boll opening stage, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences at the 5% level among different treatments during the same reproductive period. The same below.

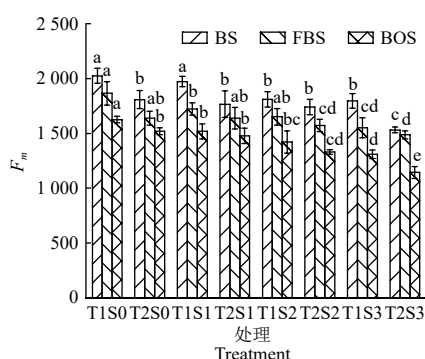
图 2 不同处理各生育时期光合指标

Fig.2 Photosynthetic indicators at different growth stages under different treatments

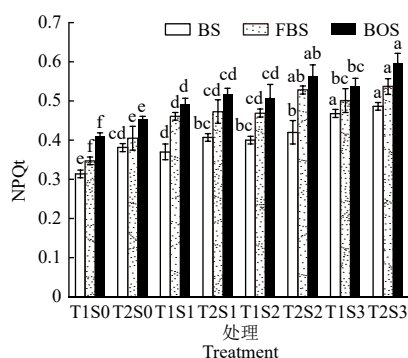
由图 2b 可知，棉花叶片蒸腾速率 (T_r) 随生育时期推进呈现逐渐减小的趋势，在蕾期棉花叶片 T_r 最高，平均值为 8.03 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，吐絮期棉花叶片 T_r 最低，平均值为 5.05 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，同比减少 59.01%。砂壤土条件下，总体呈现 S1>S0>S2>S3 规律，低灌水矿化度促进 T_r ，高灌水矿化度抑制 T_r ，在蕾期，T1S1 处理相较于 T1S3 处理增加 7.18%；砂土条件下，总体呈现 S0>S1>S2>S3 规律，在蕾期 T2S1 处理相较于 T2S0 处理减少 4.13%，T2S3 处理相较于 T2S0 处理减少 10.61%。矿化度相同且 ≥ 2.00 g/L 时，棉花 T_r 呈现砂壤土优于砂土的规律。在蕾期，S2 灌水矿化度下，T1 处理相较于 T2 处理增加 13.48%。

2.2 不同土壤质地下灌水矿化度对棉花荧光的影响

图3为各处理棉花不同生育时期下最大荧光和非光化学淬灭。由图3a可知, F_m 蕾期最大, 花铃期有所下降, 最小值出现在吐絮期。相同土壤质地下, 随灌水矿化度增大棉花 F_m 逐渐下降, T1 处理下, S0 处理相比 S3 处理在蕾期、花铃期、吐絮期增加了 12.66%、20.24%、24.24%, T2 处理下, S0 处理比 S3 处理在蕾期、花铃期、吐絮期增加了 18.00%、10.22%、32.75%; 相同灌水矿化度下, 砂壤土的最大荧光大多高于砂土的最大荧光。S3 处理下, T1 处理相比 T2 处理在蕾期、吐絮期增加了 17.37%、14.31%。



a. 不同生育期各处理最大荧光 (F_m)
a. Maximum fluorescence for each treatment under different growth stages



b. 不同生育期各处理非光化学淬灭
b. Non photochemical quenching (NPQt) for each treatment under different growth stages

图3 不同处理各生育时期荧光指标

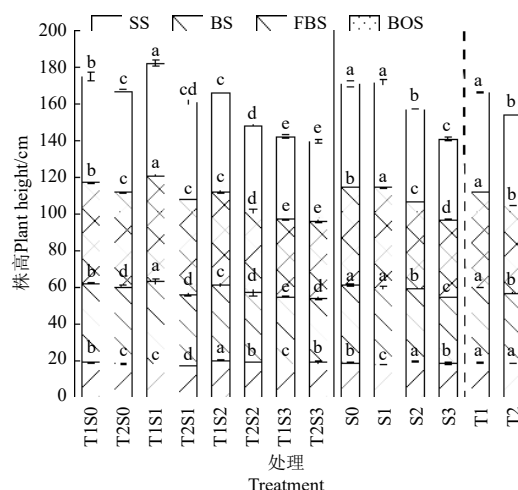
Fig.3 Fluorescence index of different treatments at each growth stage

由图3b可知, 滴灌棉花最高 NPQt 最高值出现在吐絮期, 平均值为 0.51; 花铃期次之, 平均值为 0.47; 最低值出现在蕾期, 平均值为 0.41。土壤质地相同时, 棉花 NPQt 随灌水矿化度增大而增加, 在 T1 处理下, S1 处理比 S2 处理在蕾期减少 3.35%。在灌水矿化度相同时, 砂壤土的最大荧光高于砂土的最大荧光, 在 S3 处理下, T1 处理比 T2 处理在花铃期、吐絮期减少 6.70%、9.88%。随着灌水矿化度增大, NPQt 逐渐增大, 砂土 NPQt 显著大于砂壤土。

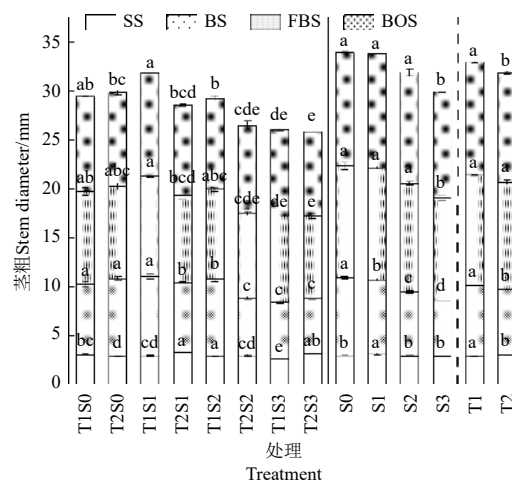
2.3 不同土壤质地下灌水矿化度对棉花株高茎粗的影响

不同土壤质地下灌水矿化度灌溉棉花株高见图4a。棉花株高日平均增长量在 0.32~0.45 cm/d, 增长量最高处理为 T1S1, 最低处理为 T2S3, 减少了 29.00%。棉花

株高在苗期后生育时期, 在砂壤土条件各处理呈现 S1>S0>S2>S3 处理, 砂土各处理呈现 S0>S1>S2>S3 处理。砂壤土条件下蕾期 T1S1 处理株高相较于 T1S0 处理增长 4.65%; 砂土条件下, 花铃期 T2S0 处理株高相较于 T2S3 处理增长 23.81%。当灌水矿化度相同时, 棉花株高在蕾期、花铃期、吐絮期日平均增长量呈现砂壤土株高于砂土的规律, 在 S1 灌水矿化度时, 吐絮期棉花株高 T1 处理生长速率比 T2 处理增加了 15.41%, 在 S0 处理时, T1 处理生长速率比 T2 处理增加 5.84%。



a. 不同生育期各处理棉花株高
a. Cotton plant height for each treatment under different growth stages



b. 不同生育期各处理棉花茎粗
b. Cotton plant stem diameter for each treatment under different growth stages

注: SS 表示棉花苗期。

Note: SS refers to cotton seedling stage.

图4 不同处理各生育时期棉花株高茎粗

Fig.4 Cotton plant height and stem thickness at each growth stage of different treatments

不同土壤质地灌水矿化度下棉花茎粗见图4b。棉花茎粗在苗期后生育时期, 砂壤土条件下呈现 S1 大于 S2 和 S3 的规律。在花铃期, T1S1 处理茎粗相较于 T1S3 处理增加 11.32%, T2S0 处理茎粗相较于 T2S3 增长 8.77%, T1S3 处理茎粗相较于 T1S0 处理减少 8.49%。在灌水矿化度相同时, 不同土壤质地下棉花茎粗有明显差

异，大体表现为砂土棉花茎粗长势差于砂壤土棉花茎粗长势，在花铃期，T1S2 处理茎粗相较于 T2S2 处理增加了 6.98%。

2.4 不同土壤质地下灌水矿化度对棉花产量的影响

由表 2 可知，灌水矿化度对各指标的影响达到显著或极显著水平 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$)；土壤质地仅仅极显著影响产量和灌溉水利用效率 ($P<0.05$)，且土壤质地与灌水矿化度对棉花产量及灌溉水利用效率有极显著交互作用 ($P<0.01$)。T1S1 处理棉花产量相较于 T2S1 处理增加 13.23%。在 T1 处理下，S0 处理产量相较 S2 增加 9.04%；在 T2 处理下，S0 处理灌溉水利用效率相较于 S3 处理增加 32.58%。在 S0 和 S3 时 T1 和 T2 处理产量无显著差异，但在 S2 时，T1 处理棉花籽棉产量相较于 T2 增加了 9.86%。

表 2 不同处理棉花产量和产量构成及灌溉水利用效率

Table 2 Yield and yield components and irrigation water use efficiency of cotton in different treatments

处理 Treatments	单株铃数 Bolls number of per plant	单铃质量 Single boll weight/g	籽棉产量 Seed cotton yield/(kg·hm ⁻²)	灌溉水利用效率 Irrigation water use rate/(kg·m ⁻³)
T1S0	6.43±0.09 ab	6.16±0.22 a	5 426.21±408.93 ab	1.21±0.04 ab
T1S1	6.67±0.16 a	6.19±0.35 a	5 773.13±227.22 a	1.28±0.08 a
T1S2	6.03±0.11 ab	5.95±0.27 b	4 976.52±119.75 cd	1.11±0.05 cd
T1S3	5.72±0.11 b	5.39±0.21 a	4 372.39±123.13 e	0.97±0.03 e
T2S0	6.39±0.13 ab	6.13±0.17 a	5 096.78±187.13 bc	1.18±0.04 bc
T2S1	6.16±0.14 ab	6.02±0.28 a	4 893.56±232.18 cd	1.09±0.04 cd
T2S2	5.91±0.05 ab	5.48±0.23 b	4 605.76±331.94 e	0.95±0.03 e
T2S3	5.52±0.22 b	5.32±0.30 b	4 293.47±122.96 de	0.89±0.03 d e
ANOVA 分析 F 值 F value of ANOVA analysis				
T	2.10ns	3.07ns	20.21**	20.21**
S	3.92*	11.04**	21.52**	21.52**
T×S	0.58ns	2.23ns	6.94**	6.94**

注 (Note): *, $P<0.05$; **, $P<0.01$ 。

2.5 不同土壤质地下灌水矿化度对棉纤维品质的影响

不同土壤质地灌水矿化度对棉花品质的影响如表 3 所示。棉花上半部平均长度受灌水矿化度，灌水矿化度及土壤质地交互影响均显著 ($P<0.05$)；T1S0 处理上半部平均长度为 27.10 mm，T1S2 处理为 27.70 mm；T2S0 处理棉花上半部平均长度为 27.30 mm，T2S1 处理为 27.70 mm。灌水矿化度、土壤质地及两者交互作用对棉花断裂比强度影响极显著 ($P<0.01$)；砂壤土处理断裂比强度优于砂土处理，T1S2 处理为 27.80 cN/tex，较 T2S2 (26.80 cN/tex) 提高 3.73%；砂壤土平均棉花断裂比强度为 28.43 cN/tex，砂土平均棉花断裂比强度为 26.65 cN/tex。灌水矿化度对棉花马克隆值影响显著 ($P<0.05$)；马克隆值随灌水矿化度的升高呈现增长的趋势，T1S0 处理马克隆值为 4.50，T1S3 处理马克隆值为 5.40，相比较增长 20%；T2S0 处理马克隆值为 4.60，T2S3 处理马克隆值为 5.50，相比较增长 20%。灌水矿化度及土壤质地互作对棉花断裂伸长率影响显著 ($P<0.05$)；T2S3 处理断裂伸长率为 4.70%，T1S1 处理断裂伸长率为 5.30%，增长约 13%。

通过回归分析得出灌水矿化度 (x_1 , g/L) 与棉花产量 (y , kg/hm²) 间关系式：

表 3 不同处理下棉花品质指标

Table 3 Cotton quality indicators under different treatments

处理 Treatments	上半部 平均长度 Mean length of upper part/mm	整齐度 Uniformity/ %	断裂比强度 Breakings strength/ (cN·tex ⁻¹)	马克隆值 Micronaire	断裂伸长率 Breaking elongation/%
T1S0	27.10±0.87 a	82.50±5.22 a	28.60±1.06 a	4.50±0.09 c	5.50±0.15 a b
T1S1	27.50±1.20 a	82.70±5.66 a	28.80±0.92 a	4.70±0.17 c	5.30±0.03 a
T1S2	27.70±0.43 a	82.00±1.60 a	27.80±0.89 ab	5.10±0.26 b	5.20±0.25 a
T1S3	27.20±0.83 a	79.90±2.57 a	28.50±1.00 a	5.40±0.18 ab	5.40±0.24 a
T2S0	27.30±0.92 a	82.00±3.31 a	28.50±0.54 a	4.60±0.21 c	5.20±0.21 a
T2S1	27.70±0.56 a	81.50±3.60 a	28.40±0.57 a	4.60±0.15 c	5.10±0.26 ab
T2S2	27.20±0.90 a	83.00±3.07 a	26.80±0.99 b	5.30±0.11 ab	5.30±0.34 a
T2S3	24.70±0.86 b	80.60±1.67 a	22.90±0.20 c	5.50±0.31 a	4.70±0.16 b
ANOVA 分析 F 值 F value of ANOVA analysis					
T	3.51ns	<0.01 ns	27.95**	0.86 ns	2.73ns
S	4.69*	0.49ns	16.52**	28.46**	1.01ns
T×S	3.39*	0.12ns	14.73**	0.60ns	4.96*

$$\begin{cases} y = 4.35 \times 10^3 + \left(\frac{6.68 \times 10^3}{3.69 \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times e^{\left(\frac{x_1 - 2.61}{7.38} \right)^2} \text{ (砂壤土, } R^2 = 0.93 \text{)} \\ y = 5.83 \times 10^3 - 174.76x_1 \text{ (砂土, } R^2 = 0.72 \text{)} \end{cases} \quad (1)$$

灌水矿化度与马克隆值 (x_2 , cN/tex) 的关系如下：

$$\begin{aligned} y &= 4.43 + 0.12x_2 \text{ (砂壤土, } R^2 = 0.82 \text{)} \\ y &= 4.44 + 0.14x_2 \text{ (砂土, } R^2 = 0.77 \text{)} \end{aligned} \quad (2)$$

通过式 (1) 可知砂壤土条件下在灌水矿化度 0.85~8.00 g/L 内，当灌水矿化度为 2.61 g/L 时，理论上棉花产量可以到 5 797.36 kg/hm²，当灌水矿化度为 3.69 g/L 时棉花产量显著降低；砂土条件下棉花产量呈现线性减小的趋势，当灌水矿化度为 0.85 g/L，棉花产量为 5 096.78 kg/hm²。砂土及砂壤土条件下棉花马克隆值呈现增长的趋势。

2.6 生理生长指标与棉花产量、马克隆值的关系

对棉花生理生长指标与产量及品质进行通径分析结果如表 4 所示。

由表 4 可知，在砂壤土条件下，茎粗对产量的直接影响最大，为 0.86，蒸腾速率对产量的间接影响最大，为 0.92；在砂土条件下，非光化学淬灭系数对产量的直接影响最大，为-0.95，蒸腾速率对产量的间接影响最大，为 1.40；在砂壤土条件下，株高对马克隆值的直接影响最大，为 0.78，株高对马克隆值的间接影响最大，为-1.58；在砂土条件下，株高对马克隆值的直接影响最大，为-0.80，蒸腾速率对马克隆值的间接影响最大，为-1.03。

3 讨论

微咸水、咸水在一定程度上可以缓解淡水资源供需矛盾，但不可避免地将盐分带入棉田中，不同土壤质地由于其特性差异造成对植株盐害程度不一，进而影响棉花光合^[31]。例如，刘芳婷等^[25]得出不同土壤质地棉花叶片净光合速率、蒸腾速率均表现为壤土大于砂土。本试验棉花光合特性 (P_n 、 T_r) 也呈现出砂壤土 (T1) 优于砂土 (T2) 的规律。这可能是由于砂土中砂粒含量较高，

颗粒间孔隙较大, 导水能力强, 持水能力差, 而砂壤土黏粒比例较高, 导水能力差, 持水能力强^[32], 砂土供应水分不足, 引起植株干旱缺水进而影响棉花叶片酶总量和酶活性显著降低, 叶绿体活力降低, 最终影响棉花叶片光合速率、蒸腾速率^[33-35]。微咸水、咸水灌溉在一定程度上节约淡水资源, 另一方面会给土壤环境带来盐分, 改变土壤中盐分分布, 进而影响植株生理状态, 合理范围内盐分可以促进植株生理状态。例如, REN 等^[34]研究表明, 随灌水矿化度增大, 棉花净光合速率呈现先增大再减小趋势, 蒸腾速率呈现下降趋势。本试验也表明,

在砂壤土条件下, 随灌水矿化度增大, 棉花净光合速率 (P_n), 蒸腾速率 (T_r) 呈现先增大后减小的趋势, 在砂土条件下, 随灌水矿化度增大, 棉花净光合速率 (P_n), 蒸腾速率 (T_r) 呈现减小的趋势。适宜的盐分可以促进光合, 这是因为低盐环境给光合作用中的化学反应提供有利条件; 当盐分超过一定浓度时则产生负效应, 盐分胁迫造成叶绿素生物合成及光合色素降解及相关酶活性下降, 进而造成光合作用的紊乱^[36-37]。因砂土保水性差, 当灌溉后, 带入土壤的盐分进一步加深植株干旱程度。

表 4 生理生长指标与产量及品质间接分析

Table 4 Pathway analysis between physiological growth index and yield and quality

土壤质地 Soil texture	指标 Indexes	自变量 Independent variable	简单相关系数 Single correlation coefficient	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient						
					H	L	F_m	NPQt	P_n	T_r	合计 Total
砂壤土 Sandy loam	产量 Yield	株高 (H)	0.92	0.22		0.75	-0.09	0.16	-0.02	-0.10	0.71
		茎粗 (L)	0.95	0.86	0.19		-0.06	0.06	-0.02	-0.09	0.09
		最大荧光 (F_m)	0.60	-0.12	0.16	0.41		0.21	-0.01	-0.05	0.72
		光化学淬灭系数 (NPQt)	-0.46	-0.29	-0.12	-0.18	0.09		0.01	0.04	-0.17
		净光合速率 (P_n)	0.74	-0.02	0.17	0.66	-0.04	0.06		-0.08	0.76
		蒸腾速率 (T_r)	0.81	-0.11	0.19	0.69	-0.06	0.10	-0.01		0.92
	马克隆值 Micronaire	株高 (H)	-0.80	0.78		-0.59	-0.20	-0.41	-0.13	-0.26	-1.58
		茎粗 (L)	-0.65	-0.68	0.68		-0.13	-0.16	-0.13	-0.23	0.03
		最大荧光 (F_m)	-0.79	-0.27	0.56	-0.33		-0.55	-0.06	-0.14	-0.51
		光化学淬灭系数 (NPQt)	0.80	0.75	-0.43	0.14	0.20		0.04	0.10	0.06
		净光合速率 (P_n)	-0.55	-0.17	0.61	-0.52	-0.09	-0.15		-0.22	-0.37
		蒸腾速率 (T_r)	-0.67	-0.29	0.69	-0.55	-0.13	-0.27	-0.13		-0.38
砂土 Sandy	产量 Yield	株高 (H)	0.92	0.33		-0.46	0.50	0.78	0.21	-0.44	0.60
		茎粗 (L)	0.81	-0.56	0.27		0.40	0.89	0.19	-0.38	1.36
		最大荧光 (F_m)	0.85	0.64	0.26	-0.35		0.63	0.20	-0.53	0.21
		光化学淬灭系数 (NPQt)	-0.89	-0.95	-0.27	0.52	-0.43		-0.18	0.41	0.05
		净光合速率 (P_n)	0.82	0.26	0.26	-0.40	0.49	0.65		-0.44	0.57
		蒸腾速率 (T_r)	0.86	-0.55	0.26	-0.39	0.62	0.71	0.21		1.40
	马克隆值 Micronaire	株高 (H)	-0.91	-0.80		0.02	-0.38	-0.01	0.08	0.19	-0.11
		茎粗 (L)	-0.72	0.02	-0.66		-0.31	-0.02	0.07	0.16	-0.74
		最大荧光 (F_m)	-0.81	-0.49	-0.63	0.01		-0.01	0.08	0.23	-0.32
		光化学淬灭系数 (NPQt)	0.74	0.02	0.66	-0.02	0.33		-0.07	-0.18	0.73
		净光合速率 (P_n)	-0.72	0.10	-0.64	0.01	-0.37	-0.01		0.19	-0.82
		蒸腾速率 (T_r)	-0.79	0.23	-0.64	0.01	-0.47	-0.01	0.08		-1.03

不同土壤质地下微咸水灌溉会对棉花造成胁迫, 而叶绿素荧光反应可以快速、灵敏和非破坏性地分析逆境胁迫对植株的影响, 因此常用荧光指标的变化表征受胁迫的程度。例如, 刘瑞显等^[38]发现水分亏缺使植物潜在最大光合能力降低, NPQt 增大, 丁怡人等^[39]发现最大荧光 (F_m) 随生育时期推进减小。本试验研究发现随灌水矿化度增大和生育时期推进 F_m 减小, NPQt 增大; 砂土 F_m 下降程度大于砂壤土, 砂土 NPQt 较砂壤土显著提升。这是由于植物通过 PS II 吸收光能, 盐分抑制植物叶片 PS II 吸收光能的效率, 使植株光能利用效率降低, 植株为了保护光合器官不受到伤害, 进而通过提高 NPQt 让多余的光能以热耗散的形式消弭, 胁迫越大则以热耗散消失的能量越多。 F_m 表征作物受胁迫情况, 受盐分胁迫程度越大, 下降幅度也越大^[40]。本研究中, 随生育时期推进, 灌水次数增加使进入棉田的盐分变多, 盐分胁迫效应逐渐变强, F_m 呈现随生育时期推进逐渐减小, NPQt 随生育时期推进逐渐升高的趋势。刘晓龙等^[41]研究发现盐分胁迫造成水稻 F_m 下降, 与本文研究一致。而孙文君等^[42]研究发现 F_m 随着盐分浓度增加呈现先增后

减的趋势, NPQt 逐渐增大, 与本研究发现略有差异, 这主要是因为此试验在人工气候箱内且只关注苗期荧光的变化。

不同土壤质地条件下, 棉花生理生长及产量品质等在一定程度上会受到影响。例如, 马君等^[43]研究表明, 较低盐分胁迫能够在一定程度上激发作物生长, 这与本试验结论一致, 在砂壤土条件下粗在蕾期、花铃期及吐絮期棉花株高在 2 g/L 大于 0.85、5 及 8 g/L 的规律。棉花是耐盐作物, 土壤盐分适当促进营养物质从营养器官向生殖器官的转移。在砂土条件下高灌水盐度灌溉对棉花株高、茎粗在蕾期、花铃期及吐絮期影响显著高于低灌水盐度的规律。不同土质株高、茎粗在蕾期、花铃期及吐絮期呈现砂土小于砂壤土的规律。这可能是由于砂土通透性好, 在生长前期由于植株需水量较少, 因此利于前期生长, 但在生长中后期由于作物需水能力增强, 但由于其保水保肥性能差, 不能及时提供植株所需的水分及营养, 因此生长速率较砂壤土差。株高、茎粗同单铃成铃密切相关。棉花株高茎粗直接反映棉花光能利用率, 进而影响棉花结铃和产量。宋继辉等^[44]在新疆南疆生态

条件下采用膜下滴灌, 在同一地块开展不同土质研究, 结果表明, 棉花单株成铃数和籽棉产量均表现为壤土大于砂土。李万精等^[35]研究发现, 4 g/L 的微咸水灌溉不会造成棉花减产。本试验砂壤土棉花产量大于砂土产量, 砂壤土呈现低灌水矿化度促进单株铃数及产量, 高矿化度抑制单株铃数及产量; 砂土条件下呈现随矿化度升高单铃质量及产量呈现下降的趋势。此外, 本试验研究发现, 灌水矿化度在 2.00~8.00 g/L 内, 随灌水矿化度升高棉花马克隆值呈现增长的趋势。冯泉清等^[45]研究发现盐分胁迫会导致棉花马克隆值升高, 品质下降, 与本试验研究一致。这是由于在高盐分条件下, 盐分抑制棉花细胞的分裂和内部结构来影响棉花的生长发育, 从而降低棉花纤维的质量^[46-47]。

不同土壤质地由于其保水性能的差异, 影响棉株的生理生长, 而微咸水尽管可以缓解水资源的供需矛盾, 但不可避免对棉株生长发育造成盐分胁迫, 进而造成棉株生理缺水, 影响其生长。本试验研究发现砂土条件下使用非淡水对棉花生理、生长均产生抑制作用, 随着灌水矿化度的增大抑制作用越增强。然而合理使用尿素可以有效减缓盐分对棉株造成的胁迫, 有关不同土壤质地灌水矿化度下不同施肥水平对棉花生理生长的影响有待进一步研究。本文结论是基于桶栽试验, 与当地大田试验仍存在差异, 但是可以为今后大田试验提供参考。

4 结 论

本文基于桶栽试验, 研究了不同土壤质地微咸水灌溉对棉花生理、生长特性及产量品质的影响。结论如下:

1) 在砂土条件下, 随灌水矿化度增大, 苗期后株高、茎粗、净光合速率及蒸腾速率呈现减小的趋势; 在砂壤土条件下, 随灌水矿化度增大, 苗期后株高、茎粗、净光合速率及蒸腾速率呈现先增后减的趋势。随灌水矿化度升高最大荧光呈现减小的趋势, 非光化学淬灭呈现增加的趋势。随生育时期推进, 棉花叶片净光合速率呈现先增后减的趋势, 花铃期为 $30.09 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 吐絮期为 $22.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 相比较减少 36.02%。棉花叶片蒸腾速率及最大荧光呈现减小的趋势, 棉花叶片非光化学淬灭呈现增大的趋势, 滴灌棉花最高非光化学淬灭最高值出现在吐絮期, 平均值为 0.51; 花铃期次之, 平均值为 0.47; 最低值出现在蕾期, 平均值为 0.41。

2) 在灌水矿化度 0.85~8.00 g/L 内, 在砂壤土条件下, 棉花产量与灌水矿化度呈现先增后减的趋势, 用小于 3.69 g/L 的微咸水灌溉不会对棉花产生显著减产效应; 砂土条件下, 棉花产量与灌水矿化度呈现线性减少的趋势; 2 种土质条件下, 棉花马克隆值与灌水矿化度呈现正相关的趋势。

3) 在砂壤土条件下, 棉花茎粗、蒸腾速率是影响产量的主要因素。株高是影响马克隆值的主要因素。在砂土条件下, 非光化学淬灭系数、蒸腾速率是影响产量的主要因素, 株高、蒸腾速率是影响马克隆值的主要因素。

【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 Songrui, ZUO Qiang, SHI Jianchu, 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 (Transactions of the CSAE), 2013, 29(22): 90-99. (in Chinese with English abstract)

[2] 杨培岭, 任树梅. 发展我国设施农业节水灌溉技术的对策研究[J]. 节水灌溉, 2001(2): 7-9.

YANG Peiling, REN Shumei. Study on the countermeasure to develop WSI of installed agriculture[J]. Water Saving Irrigation, 2001(2): 7-9. (in Chinese with English abstract)

[3] 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 Wanqing, REN Futian, et al. Soil salinity accumulation and model simulation of cotton under mulch drip irrigation with different salinity level water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 73-83. (in Chinese with English abstract)

[4] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

[5] 祝宏辉, 杜美玲, 尹小君. 节水农业技术对绿洲农业生态效率的影响: 促进还是抑制?—以新疆玛纳斯河流域绿洲农业为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 34-41.

ZHU Honghui, DU Meiling, YIN Xiaojun. Impact of water-saving agricultural technology on oasis agricultural ecological efficiency: Promote or inhibit?[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 34-41. (in Chinese with English abstract)

[6] 王振华, 韩美琪, 宋利兵, 等. 加气对西北旱区膜下滴灌棉花生长与水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 108-116.

WANG Zhenhua, HAN Meiqi, SONG Libin, et al. Effects of aeration on the growth and water use efficiency of cotton under mulched drip irrigation in the dry areas of Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(14): 108-116. (in Chinese with English abstract)

[7] 李军宏, 王军, 李楠楠, 等. 无膜棉花产量及其根区温湿盐对灌溉量的响应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 134-143.

LI Junhong, WANG Jun, LI Nannan, et al. Yield of non-film cotton and the response of temperature, humidity and salt in the root zone to irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 134-143. (in Chinese with English abstract)

[8] 王军, 李久生, 关红杰. 北疆膜下滴灌棉花产量及水分生产率对灌水量响应的模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 62-68.

WANG Jun, LI Jiusheng, GUAN Hongjie. Modeling response of cotton yield and water productivity to irrigation amount under mulched drip irrigation in North Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(3): 62-68. (in Chinese with English abstract)

- [9] 张妮, 左强, 石建初, 等. ANSWER 模型评估新疆咸水灌溉棉花产量与效益[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 78-79. ZHANG Ni, ZUO Qiang, SHI Jianchun, et al. Estimating the yields and profits of saline water irrigated cotton in Xinjiang based on ANSWER model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(2): 78-79. (in Chinese with English abstract)
- [10] 徐秉信, 李如意, 武东波, 等. 微咸水的利用现状和研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(36): 13914-13916. XU Bingxin, LI Ruyi, WU Dongpo, et al. Utilization status and research progress of brackish water[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(36): 13914-13916. (in Chinese with English abstract)
- [11] ISKENDEROV M Y. Effect of irrigation with saline water on some physiological and biochemical processes of cotton plants[J]. Russian Agricultural Sciences, 2016, 4: 317-320.
- [12] 刘冉, 王学成, 宋嘉雯, 等. 加气对微咸水灌溉棉花幼苗生长的影响[J]. 节水灌溉, 2022(8): 1-7. LIU Ran, WANG Xuecheng, SONG Jiawen, et al. Effect of aeration on the growth of cotton seedlings under irrigation with brackish water[J]. Water Saving Irrigation, 2022(8): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [13] 江柱, 张江辉, 白云岗, 等. 膜下咸水滴灌水肥盐调控对棉花盐离子、养分吸收及干物质分配的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 59-67. JIANG Zhu, ZHANG Jianghui, BAI Yungang, et al. The impact of mulched drip fertigation with saline water on uptake of ions and nutrients by cotton[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郭仁松, 林涛, 徐海江, 等. 微咸水滴灌对绿洲棉田水盐运移特征及棉花产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 211-216. GUO Rensong, LIN Tao, XU Haijiang, et al. Effect of saline water drip irrigation on water and salt transport features and cotton yield of oasis cotton field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 211-216. (in Chinese with English abstract)
- [15] 郑春莲, 冯棣, 李科江, 等. 咸水沟灌对土壤水盐变化与棉花生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 92-101. ZHENG Chunlian, FENG Di, LI Kejiang, et al. Effects of furrow irrigation with saline water on variation of soil water-salt, cotton growth and yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 92-101. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王泽林, 杨广, 王春霞, 等. 咸水灌溉对土壤理化性质和棉花产量的影响[J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 2019, 37(6): 700-707. WANG Zelin, YANG Guang, WANG Chunxia, et al. Effects of saline water irrigation on cotton yield and soil physicochemical properties[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2019, 37(6): 700-707. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘雪艳, 丁邦新, 白云岗. 微咸水膜下滴灌对棉花植株盐分、养分吸收及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 128-135. LIU Xueyan, DING Bangxin, BAI Yungang. Effects of drip irrigation with brackish water under film mulch on salinity, nutrients and quality of cotton plants[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 128-135. (in Chinese with English abstract)
- [18] 武建设, 陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 5-10. WU Jianshe, CHEN Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 5-10. (in Chinese with English abstract)
- [19] 苏永中, 杨荣, 杨晓, 等. 不同土壤条件下节水灌溉对棉花产量和灌溉水生产力的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1192-1201. SU Yongzhong, YANG Rong, YANG Xiao, et al. Effects of water-saving irrigation on cotton yield and irrigation water productivity relative to soil conditions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(6): 1192-1201. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吕廷波, 何新林, 辛明亮, 等. 玛纳斯河流域不同土壤质地土壤含盐量分析[J]. 节水灌溉, 2014(5): 4-6. LV Tingbo, HE Xinlin, XIN Mingliang, et al. Salinity analysis of different soil texture in Manas River Basin[J]. Water Saving Irrigation, 2014(5): 4-6. (in Chinese with English abstract)
- [21] 熊杰, 隋鹏, 石彦琴, 等. 土壤质地对玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(1): 128-131. XIONG Jie, SUI Peng, SHI Yanqin, et al. Effects of different soil textures on maize yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(1): 128-131. (in Chinese with English abstract)
- [22] 贾立华, 赵长星, 王月福, 等. 不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 684-690. JIA Lihua, ZHAO Changxing, WANG Yuefu, et al. Effects of different soil textures on the growth and distribution of root system and yield in peanut[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(7): 684-690. (in Chinese with English abstract)
- [23] 曲杰, 高建强, 程亮, 等. 膜下滴灌条件下土壤质地对花生生长发育及产量形成的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(1): 95-97. QU Jie, GAO Jianqiang, CHENG Liang, et al. Effects of soil texture on growth and yield formation of peanut with drip irrigation under plastic film[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(1): 95-97. (in Chinese with English abstract)
- [24] 史普想, 张晓军, 赵长星, 等. 土壤质地对花生叶片衰老特性和产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(7): 1649-1652. SHI Puxiang, ZHANG Xiaojun, ZHAO Changxing, et al. Effects of soil texture on the leaf senescence characteristics and yield of peanut[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(7): 1649-1652. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘芳婷, 范文波, 张金玺, 等. 盐分对棉花光合特性及根际土壤 CO₂ 浓度的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1):

- 206-212.
- LIU Fangting, FAN Wenbo, ZHANG Jinxi, et al. Effects of salinity on photosynthetic characteristics of cotton and CO₂ concent ration in rhizosphere soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 206-212. (in Chinese with English abstract)
- [26] 冯棣, 张俊鹏, 申孝军, 等. 不同质地土壤咸水造墒对棉花出苗及幼苗生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 12-14.
- FENG Di, ZHANG Junpeng, SHEN Xiaojun, et al. Effects of saline water irrigating before sowing on cotton emergence and seedling growth in different soil textures[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 12-14. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王萌萌, 何新林, 吕廷波, 等. 土壤质地对机采棉土壤水热状况及生长发育影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 28-33.
- WANG Mengmeng, HE Xinlin, LV Tingbo, et al. Effect of soil texture on soil water and temperature, as well as the growth of machine-harvest cotton[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(10): 28-33. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张泽, 马革新, 海兴岩, 等. 氮肥和土壤质地对滴灌棉花根系分布及产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 622-627.
- ZHANG Ze, MA Gexin, HAI Xingyan, et al. Effect of nitrogen fertilization and soil texture on cotton root traits and yields under conventional drip irrigation[J]. Soils, 2018, 50(3): 622-627. (in Chinese with English abstract)
- [29] 马凯, 王振华, 王天宇, 等. 水氮耦合对微咸水膜下滴灌棉花光合特性及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(5): 559-568.
- MA Kai, WANG Zhenhua, WANG Tianyu, et al. Effects of water and nitrogen coupling on photosynthetic characteristics and yield of film mulching cotton under brackish water drip irrigation[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(5): 559-568. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李燕强, 王振华, 叶含春, 等. 灌溉水矿化度对棉田土壤呼吸速率的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 392-402.
- LI Yanqiang, WANG Zhenhua, YE Hanchun, et al. Effect of the salinity of irrigation water on soil respiration rate in cotton field[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 392-402. (in Chinese with English abstract)
- [31] 寇小华, 王文, 郑国权. 土壤水分入渗的影响因素与试验研究方法综述[J]. 广东林业科技, 2013, 29(4): 74-78.
- KOU Xiaohua, WANG Wen, ZHENG Guoquan. Soil water infiltration mechanism and experiment: A review[J]. Forestry and Environmental Science, 2013, 29(4): 74-78. (in Chinese with English abstract)
- [32] 杨明凤, 王金梅, 吉春容, 等. 干旱胁迫对棉花生长发育和光合荧光参数的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(13): 22-28.
- YANG Mingfeng, WANG Jinmei, JI Chunrong, et al. Response of growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of cotton to drought stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(13): 22-28. (in Chinese with English abstract)
- [33] HU Y Y, ZHANG Y L, YI X P. The relative contribution of non-foliar organs of cotton to yield and related physiological characteristics under water deficit[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(5): 975-989.
- [34] REN F T, YANG G, LI W J, et al. Yield-compatible salinity level for growing cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under mulched drip irrigation using saline water[J]. Agricultural Water Management, 2021, 250: 106859.
- [35] 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. Soil water and salt distribution and cotton growth under film drip irrigation with different water salinity in cotton field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 95-103. (in Chinese with English abstract)
- [36] 张远兰, 胡鑫, 蔡金峰, 等. Na₂SO₄ 和 Na₂CO₃ 胁迫下苦楝幼苗的形态及光合生理特性[J]. 广西植物, 2021, 41(2): 195-205.
- ZHANG Yuanlan, HU Xin, CAI Jinfeng, et al. Morphological and photosynthetic physiological characteristics of melia azedarach seedlings under Na₂SO₄ and Na₂CO₃ stresses[J]. Guihaia, 2021, 41(2): 195-205. (in Chinese with English abstract)
- [37] 朱春艳, 宋佳伟, 白天亮, 等. NaCl 胁迫对不同耐盐性粳稻种质幼苗叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(13): 2509-2525.
- ZHU Chunyan, SONG Jiawei, BAI Tianliang, et al. Effects of NaCl stress on the chlorophyll fluorescence characteristics of seedlings of japonica rice germplasm with different salt tolerances[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(13): 2509-2525. (in Chinese with English abstract)
- [38] 刘瑞显, 王友华, 陈兵林, 等. 花铃期干旱胁迫下氮素水平对棉花光合作用与叶绿素荧光特性的影响[J]. 作物学报, 2008(4): 675-683.
- LIU Ruixian, WANG Youhua, CHEN Binlin, et al. Effects of nitrogen levels on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics under drought stress in cotton flowering and boll-forming stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008(4): 675-683. (in Chinese with English abstract)
- [39] 丁怡人, 李冬梅, 马露露, 等. 滴灌棉花叶绿素荧光参数与棉花生长指标反演模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 234-242.
- DING Yiren, LI Dongmei, MA Lulu, et al. Study on inversion model of cotton chlorophyll fluorescence parameters and cotton growth index under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(6): 234-242. (in Chinese with English abstract)
- [40] 于潇, 侯云寒, 徐征和, 等. 微咸水灌溉对冬小麦光合及荧光动力学参数的影响[J]. 节水灌溉, 2019(2): 102-106.
- YU Xiao, HOU Yunhan, XU Zhenghe, et al. Effects of brackish water irrigation on photosynthetic characteristics and fluorescence kinetics parameters of winter wheat[J]. Water Saving Irrigation, 2019(2): 102-106. (in Chinese with English abstract)

- [41] 刘晓龙, 徐晨, 徐克章, 等. 盐胁迫对水稻叶片光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 作物杂志, 2014(2): 88-92.
LIU Xiaolong, XU Chen, XU Kezhang, et al. Effects on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of rice under salt stress[J]. Crops, 2014(2): 88-92. (in Chinese with English abstract)
- [42] 孙文君, 江晓慧, 付媛媛, 等. 盐胁迫对棉花幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 23-28, 121.
SUN Wenjun, JIANG Xiaohui, FU Yuanyuan, et al. The effects of salt stress on chlorophyll fluorescence of cotton seedling leaves[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(7): 23-28, 121. (in Chinese with English abstract)
- [43] 马君, 师维军, 郭仁松, 等. 微咸水对滴灌棉花冠层光合特征及产量品质的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(24): 52-56.
MA Jun, SHI Weijun, GUO Rensong, et al. Saline Water: Effects on canopy photosynthetic characteristics, yield and quality of cotton under drip irrigation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(24): 52-56. (in Chinese with English abstract)
- [44] 宋继辉, 胡守林, 万素梅. 不同类型土壤棉花产量构成因素及棉铃空间分布研究[J]. 中国棉花, 2009, 36(3): 17-19.
- [45] 冯泉清, 高阳, 李云峰, 等. 水盐胁迫对南疆棉花生长发育及产量品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 73-81.
FENG Quanqing, GAO Yang, LI Yunfeng, et al. The effects of water and salt stresses on growth, yield and quality of cotton in southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(10): 73-81. (in Chinese with English abstract)
- [46] 叶武威, 刘金定, 樊宝相, 等. 盐分 (NaCl) 对陆地棉纤维性状的影响[J]. 中国棉花, 1997(3): 17-18.
- [47] MA K, WANG Z H, LI H Q, et al. Effects of nitrogen application and brackish water irrigation on yield and quality of cotton[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 264: 107512.

Effects of brackish water irrigation on the physiological characteristics, yield and quality of mulched drip irrigation cotton under different soil textures

WANG Zhenhua, WANG Fei, LYU Desheng, LIU Jian, ZHU Yan, WEN Yue

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832000, China; 3. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832000, China)

Abstract: Using brackish water for irrigation in arid and semi-arid areas can alleviate the supply-demand contradiction of freshwater resources. However, the correlation between its irrigation effect and soil texture remains to be studied. This study investigated the effects of irrigation mineralization on the growth and development of drip-irrigated cotton with different soil textures and the yield and fiber quality of seed cotton. In 2022, a barrel planting experiment was conducted to study two common cotton field soil textures (sandy loam soil T1 and sandy soil T2) and four irrigation mineralization degrees (0.85 (S0), 2.00 (S1), 5.00 (S2), and 8.00 g/L (S3)) in the Manas River Basin. Under different treatments, eight experimental treatments were used to study cotton photosynthetic indicators, plant height, stem diameter, yield, and quality. The results showed that as the mineralization degree of irrigation increased, the plant height, stem diameter, net photosynthetic rate, transpiration rate, single boll weight, number of bolls per plant, yield, irrigation water use efficiency, and fracture ratio intensity of cotton seedlings in sandy soil showed a decreasing trend after the seedling stage. The transpiration rate of S3 treatment decreased by 10.61% compared to S0 during the bud stage. Under sandy loam conditions, all indicators showed an increasing and decreasing trend. The net photosynthetic rate of S1 treatment increased by 8.40% compared to S0. As irrigation's mineralization degree increases, underground cotton's maximum fluorescence in two soil types decreases, while nonphotochemical quenching shows an increasing trend. It can be concluded through regression analysis that there is a negative correlation between cotton yield and irrigation mineralization in sandy soil cotton fields. However, irrigation water less than 3.69 g/L in sandy loam cotton fields will not reduce cotton yield. Using path analysis, it can be concluded that cotton stem diameter and transpiration rate are the main factors affecting yield under sandy loam conditions. Plant height is the main factor affecting the micronaire value. Under sandy soil conditions, the nonphotochemical quenching coefficient and transpiration rate are the main factors affecting yield. In contrast, plant height and transpiration rate are the main factors affecting micronaire value. This study can provide a theoretical basis and technical support for the rational utilization of brackish water resources in cotton fields with different soil types in the Manas River Basin.

Keywords: soil texture; irrigation; cotton; salinity; mulched drip irrigation; physiology; yield; quality