

# 不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响

朱延凯<sup>1,2</sup>, 王振华<sup>1,2</sup>, 李文昊<sup>1,2</sup>

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000)

**摘要:** 为探明不同程度轻度盐胁迫对滴灌棉花光合生理、生长指标及产量的影响, 采取桶栽的方式人为设置不同土壤含盐量, 研究了6种不同盐胁迫(CK: 1.5 g/kg, T1: 3.0 g/kg, T2: 4.0 g/kg, T3: 5.3 g/kg, T4: 6.2 g/kg, T5: 7.3 g/kg)处理下棉花的生理生长及产量的变化规律, 为新疆轻度盐碱地棉花栽培管理提供理论基础。结果表明, 随着盐胁迫程度的增加及胁迫时间的延长, 棉花光合生理指标均呈下降趋势( $P < 0.01$ )。T1、T2处理对棉花净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、细胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )及叶片水分利用效率(WUE)的影响不显著( $P > 0.05$ ), 而T3、T4及T5处理对光合生理指标具有显著抑制性( $P < 0.05$ ); 生育前期盐胁迫下 $P_n$ 与 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 均呈下降趋势, 而 $L_s$ 值随着盐胁迫的增加呈升高趋势。吐絮期的 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $L_s$ 均小于蕾期, 而 $C_i$ 却大于蕾期; 株高、叶面积在生育前期受到盐胁迫的影响显著, 到生育后期T2、T3处理株高、叶面积增长迅速, 最大值均为T3处理; T1、T2较CK处理对棉花产量及单株铃数、单铃质量影响不大, T3处理产量迅速降低, 通过分段耐盐函数得到棉花在0—40 cm土层全生育期的耐盐临界值为5.441 9 g/kg( $S_e$ )、耐盐极限值为44.201 6 g/kg( $S_0$ ); 产量与 $P_n$ 、WUE、株高( $H$ )、叶面积( $S$ )拟合程度较好, 相关系数分别为0.69、0.73、0.50和0.72。综合分析, 与中、重度盐胁迫相比, 轻度盐胁迫下导致棉花光合速率下降的原因生育前期为气孔限制因素, 生育后期为非气孔限制因素, 光合参数与盐胁迫程度关系密切, 而棉花产量又表现出与光合作用指标具有较好的相关关系。

**关键词:** 滴灌棉花; 盐胁迫; 光合作用; 生长特性; 产量

**中图分类号:** S274.1; S562

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)02-0298-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.044

## Effects of Different Salt Stress on Physiological Growth and Yield of Cotton Under Drip Irrigation

ZHU Yankai<sup>1,2</sup>, WANG Zhenhua<sup>1,2</sup>, LI Wenhao<sup>1,2</sup>

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832000)

**Abstract:** In order to find out the effects of mild salt stress on photosynthetic physiology, growth index and yield of cotton under drip irrigation, six different salt stress (CK: 1.5 g/kg, T1: 3.0 g/kg, T2: 4.0 g/kg, T3: 5.3 g/kg, T4: 6.2 g/kg, T5: 7.3 g/kg) were applied in barrel cultivated cotton, and the changes in physiological growth and yield were studied to provide the theoretical basis for cultivation and management of cotton in salinity soil. The results showed that with the increase of salt stress and the extension of stress time, the photosynthetic physiological indexes of cotton showed a downward trend ( $P < 0.01$ ). The effect of T1 and T2 on cotton net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ) and leaf water use efficiency (WUE) were not significant ( $P > 0.05$ ), while the effect of T3, T4, and T5 on photosynthetic physiological indexes showed significant inhibition ( $P < 0.05$ );  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ , and  $C_i$  in early growth under salt stress were decreased, and  $L_s$  value increased with increasing salt stress.  $P_n$ ,  $G_s$ , and  $L_s$  in the opening stage were less than in the bud stage, and  $C_i$  was greater in the opening stage than in the bud stage. Plant height and leaf area in the early stage was significantly affected by salt stress, increased rapidly in the later stage in T2 and T3, and maximized in T3. Compared

收稿日期: 2017-10-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(51369027, 51741908); 国家科技支撑计划项目(2015BAD20B03)

第一作者: 朱延凯(1990—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zykg9118@163.com

通信作者: 王振华(1979—), 男, 河南扶沟人, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: wz2002027@163.com

with CK, T1 and T2 did not affect yield, cotton boll number per plant, and boll quality, but the yield in T3 decreased rapidly. Through the sub salt tolerance function, the salt critical value of cotton in the whole growth period of 0—40 cm soil was  $5.4419 \text{ g/kg}$  ( $S_t$ ), and the salt tolerance limit was  $44.2016 \text{ g/kg}$  ( $S_0$ ). Yield had a good fitting degree with  $P_n$ , WUE, plant height ( $H$ ), and leaf area ( $S$ ), the correlation coefficients were 0.69, 0.73, 0.50 and 0.72, respectively. In conclusion, mild salt stress led to the photosynthetic rate decline of cotton through stomatal limitation in growth stage, and through non stomatal limitation factors in late growth stage compared with moderate and severe salt stress. Photosynthetic parameters and salt stress degree were closely related, and cotton yield and photosynthetic indexes showed a good correlation.

**Keywords:** drip irrigation cotton; salt stress; photosynthesis; growth characteristics; yield

棉花(*Malvaceae Gossypium* Spp),喜光热,忌阴湿,属较耐盐农作物,不仅是重要的纺织原材料,其棉籽可以榨油,棉杆可以制造纤维麻袋和高强度纸张,是我国重要的经济作物之一<sup>[1]</sup>。新疆是我国主要的产棉区,近几年每年种植面积达到 $(1.7\sim 2.4)\times 10^6 \text{ hm}^2$ ,约占新疆农作物总播种面积的40%<sup>[2]</sup>。由于粮食安全问题备受重视及粮棉争地矛盾日益突出,发展盐碱地植棉技术对稳定我国棉花生产意义重大<sup>[3]</sup>。根据资料统计,新疆平原区宜农、林、牧面积 $2.15\times 10^7 \text{ hm}^2$ ,盐碱地约为 $0.8\times 10^7 \text{ hm}^2$ ,占全部可垦荒地面积的40%<sup>[4]</sup>,而在石河子灌区、玛纳斯灌区轻度盐碱地所占比例较大,分别为 $753.3 \text{ km}^2$ (73.2%)和 $1\,249.5 \text{ km}^2$ (91.2%)<sup>[5]</sup>。因此,研究轻度盐胁迫对灌区棉花光合特性及产量的影响,对提高轻度盐碱地棉花产量及植棉技术具有重要意义。

近年来,国内外学者对棉花的耐盐性进行了一定研究,冯棣等<sup>[6]</sup>研究表明当灌溉水矿化度达到 $4 \text{ g/L}$ 后会抑制棉花营养生长,但较少影响生殖生长(蕾期和花铃期);Zhong等<sup>[7]</sup>认为盐胁迫使棉花叶面积减少,茎部变细,干物质质量降低;张雷等<sup>[8]</sup>发现随土壤盐分水平的升高,棉花功能叶的蒸腾速率、含水量和净光合速率均下降,叶片温度升高;张国明等<sup>[9]</sup>发现利用 $3 \text{ g/L}$ 的海冰水灌溉,棉花的气孔导度、净光合速率及细胞间 $\text{CO}_2$ 体积分数均达到最高水平;吴晓东等<sup>[10]</sup>得出当土壤含盐量为0.4%时,叶片光合作用受到抑制,相对光合速率下降;陈兵林等<sup>[11]</sup>研究表明随着土壤盐分水平的升高,棉株干物质累积量、单株铃数、铃重、皮棉产量均呈下降趋势;Sharma等<sup>[12]</sup>得出初始盐分为 $7.7 \text{ dS/m}$ 棉花产量开始降低,盐度增加 $1 \text{ dS/m}$ 产量降低5.2%;杨晓英等<sup>[13]</sup>研究表明在含盐量为 $3.0 \text{ g/kg}$ 时,棉花生长受到明显抑制,产量降低。虽然前人对盐碱地棉花种植进行了一些研究,但是大部分研究开展在中度及重度盐胁迫方面,对轻度盐胁迫下棉花的生理生长变化规律研究较少,且棉花的耐盐性比较复杂,受很多其他因素的影响(遗传特性、环境、栽培措施),研究结果也不尽相同,缺乏定量

研究。因此,本文采取桶栽试验,对轻度盐胁迫下滴灌棉花生理生长特性及产量的变化进行系统研究,明确轻度盐胁迫对棉花光合、生长指标的限制机理,为优化新疆轻度盐碱地植棉技术提供理论依据。

## 1 材料方法

### 1.1 试验区概况

试验在2016年4—10月在现代节水灌溉兵团重点实验室试验基地暨石河子大学节水灌溉试验站进行。试验站位于石河子市西郊石河子大学农试验场二连( $85^\circ 59' 47'' \text{E}$ ,  $44^\circ 19' 28'' \text{N}$ ),海拔 $412 \text{ m}$ ,平均地面坡度为6%,地下水埋深在 $5 \text{ m}$ 以下;年均日照时间 $2\,865 \text{ h}$ ,多年平均降水量 $198 \text{ mm}$ ,平均蒸发量 $1\,340 \text{ mm}$ , $\geq 10^\circ \text{C}$ 积温 $3\,463.5^\circ \text{C}$ , $\geq 15^\circ \text{C}$ 积温 $2\,960.0^\circ \text{C}$ ,无霜期 $170 \text{ d}$ ;年平均风速 $1.5 \text{ m/s}$ ,静风占32%,偏东风占14%,偏西风17%,偏南风占22%,偏北风占15%。

### 1.2 试验方法

选取当地棉花品种“农丰133”,采用桶栽试验,试验用塑料桶为高 $0.55 \text{ m}$ ,顶部内径 $0.45 \text{ m}$ ,底部内径 $0.35 \text{ m}$ ,在桶的底部打孔。供试土壤自然晾干碾碎、去除石块等杂物,采用0,20%,40%,60%,80%,100%的盐碱土(取自石河子市大学农试场2连)与中壤土(取自试验场2连)均匀掺和,按 $1.40 \text{ g/m}^3$ (容重)分层装土 $50 \text{ cm}$ ,每个处理重复3次。按照文献<sup>[14]</sup>中土壤盐化程度的分级指标,设计对照处理CK及5种不同的土壤盐分含量处理(CK: $1.5 \text{ g/kg}$ ; T1: $3.0 \text{ g/kg}$ ; T2: $4.0 \text{ g/kg}$ ; T3: $5.3 \text{ g/kg}$ ; T4: $6.2 \text{ g/kg}$ ; T5: $7.3 \text{ g/kg}$ )。

2016年4月22日采用“干播湿出”方式播种,播种深度为 $3\sim 4 \text{ cm}$ ,4月29日出苗,各处理10月11日均吐絮结束。使用塑胶软管和螺旋止水夹模拟滴灌,精确控制每个桶的灌水、施肥量,滴头流量 $1.8 \text{ L/h}$ 。各处理所采用的水、肥管理措施相同,灌溉定额 $385 \text{ mm}$ ,灌水11次,灌溉用水矿化度为 $0.87 \text{ g/L}$ 。施肥量为尿素(N: $46.4\%$ ) $600 \text{ kg/hm}^2$ ,磷酸二氢钾( $\text{P}_2\text{O}_5$ : $51.5\%$ ) $300 \text{ kg/hm}^2$ ,其他农艺措施与大田相同(表1)。

表 1 棉花各生育期灌水及施肥处理

| 生育阶段  | 日期<br>(月-日) | 灌水处理   |      | 施肥处理                                                          |                                                             |          |
|-------|-------------|--------|------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------|
|       |             | 灌水量/mm | 灌水次数 | CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> /<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> /<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 施肥<br>次数 |
| 播种一出苗 | 04-22—04-30 | 30     | 1    | —                                                             | —                                                           | —        |
| 苗期    | 05-01—06-15 | 25     | 1    | 30                                                            | 15                                                          | 1        |
| 蕾期    | 06-16—07-03 | 70     | 2    | 90                                                            | 45                                                          | 2        |
| 花铃期   | 07-04—08-18 | 200    | 5    | 450                                                           | 225                                                         | 5        |
| 吐絮期   | 08-19—10-16 | 60     | 2    | 30                                                            | 15                                                          | 1        |
| 全生育期  | 174 d       | 385    | 11   | 600                                                           | 300                                                         | 9        |

1.3 测试项目与方法

1.3.1 土壤盐分测定 将土样在室内自然风干,磨碎过 1 mm 筛,取 100 mL 蒸馏水和 20 g 土放入三角瓶中,配制土水质量比为 1 : 5 的澄清液<sup>[15]</sup>,采用 DDS11-A 型数显电导率仪测定电导率,水溶性盐总量采用烘干—残渣法测定,拟合电导率与含盐量的方程式为:

$$S=0.0018EC+0.7795(R^2=0.980\ 5)$$
 (1)

式中:S 为土壤含盐量(g/kg);EC 为电导率值(μS/cm)。

1.3.2 光合生理指标 使用美国生产的 CI-340 型手持光合测量仪在棉花蕾期(6 月 20 日)、花铃期(8 月 15 日)、吐絮期(9 月 6 日)测定其光合特性。测定项目包括光合有效辐射(PAR)、大气温度( $T_a$ )、大气 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_a$ )等气象环境因子指标以及棉花蒸腾速率( $T_r$ )、净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、细胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )和气孔限制值( $L_s$ )等光合生理指标。选取棉花功能叶在每个生育期晴朗无云的一天,从 10:00 时开始测量至 20:00 结束,时间间隔为 2 h,各处理连续测量 3 株,取平均值。由数据计算叶片水分利用效率(WUE)及光合作用气孔限制值( $L_s$ ),计算公式<sup>[16-17]</sup>为:

$$WUE=P_n/T_r$$
 (2)

$$L_s=1-C_i/C_a$$
 (3)

1.3.3 生长指标 株高  $H$  和叶面积指数 LAI:分别在棉花苗期(6 月 15 日)、蕾期(7 月 10 日)、花铃期(8 月 5 日)及吐絮期(9 月 5 日),每个处理各选 3 株具有代表性植株进行标记,用卷尺测量棉花株高及叶片的长度和宽度,计算叶面积及叶面积指数。

棉花单株叶面积(cm<sup>2</sup>)=叶长(cm)×叶宽(cm)×0.84<sup>[18]</sup> (4)

LAI=单株叶面积×单位土地面积株数/单位土地面积<sup>[19]</sup> (5)

1.3.4 棉花产量指标 每桶棉花实行单打单收,测定单株铃数、单铃质量及籽棉产量。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2013 对数据进行整理,使用 SPSS 17.0 软件进行方差分析,利用 Origin 8.5 绘图。

2 结果与分析

2.1 生育期主要气象环境因素变化规律

大气温度( $T_a$ )、光照有效辐射(PAR)、大气 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_a$ )是影响植物进行光合作用的主要环境因素,分别在棉花的蕾期(6 月 20 日)、花铃期(8 月 15 日)、吐絮期(9 月 6 日)进行光合测量,此 3 项环境因素随生育期的变化规律及其统计分析见表 2。随着生育进程的推进, $T_a$ 、PAR 和  $C_a$  均表现出先增加后减小的趋势,与花铃期环境因子的值相比,其他 2 个生育期环境因子的值均表现出显著性差异( $P<0.05$ )。3 个生育期 PAR、 $T_a$  及  $C_a$  的最大值均出现在花铃期,分别为 1 788.25 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、35.49 ℃ 及 490.22 μmol/mol,最小值分别为蕾期的 1 653.84 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、31.59 ℃ 及吐絮期的 425.01 μmol/mol。

表 2 各生育期环境因素变化规律

| 生育期           | 光照有效辐射/<br>(μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 大气<br>温度/℃         | 大气 CO <sub>2</sub> 浓度/<br>(μmol·mol <sup>-1</sup> ) |
|---------------|-----------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------|
| 蕾期(6 月 20 日)  | 1653.84 <sup>a</sup>                                | 31.59 <sup>a</sup> | 471.84 <sup>b</sup>                                 |
| 花铃期(8 月 15 日) | 1788.25 <sup>b</sup>                                | 35.49 <sup>b</sup> | 490.22 <sup>c</sup>                                 |
| 吐絮期(9 月 6 日)  | 1747.15 <sup>bc</sup>                               | 31.78 <sup>a</sup> | 425.01 <sup>a</sup>                                 |

注:同列数值后不同字母表示不同生育期差异显著( $P<0.05$ )。

2.2 土壤盐分对滴灌棉花光合生理指标的影响

2.2.1 盐分胁迫对滴灌棉花净光合速率( $P_n$ )和蒸腾速率( $T_r$ )的影响 从表 3 可以看出,不同盐分处理间棉花净光合速率存在明显差异( $P<0.01$ ),各处理净光合速率较对照均有所减小,并随着盐胁迫程度的增加,净光合速率下降程度增大。与 CK 相比,T1、T2 处理净光合速率出现小幅度下降( $P>0.05$ ),而 T3 至 T5 处理各值逐渐减小,T5 处理达到最小,表现出明显的差异性( $P<0.05$ ),说明低盐处理对棉花  $P_n$  影响不大,当超过棉花的耐盐临界值净光合速率显著下降;盐胁迫下棉花不同生长阶段净光合速率( $P_n$ )变化不同,各处理  $P_n$  随着生育期的推进呈现出先增加后减小的趋势。在花铃期之前表现为增加趋势,净光合速率最大值出现在花铃期(6 月 20 日),高达 31.31 μmol/(m<sup>2</sup>·s),最小值为吐絮期(9 月 6 日)的 13.20 μmol/(m<sup>2</sup>·s),这可能是由于长时间的盐

分胁迫使气孔导度的应激诱导进一步降低所致。

从表 3 还可看出,不同盐分处理下滴灌棉花各生育期的蒸腾速率( $T_r$ )变化规律与净光合速率( $P_n$ )趋势一致,随着盐分胁迫程度的增加,棉花各生育期蒸腾速率大致呈现出下降趋势。随着生育期的推进,蒸腾速率呈先增加后减小的趋势,花铃期最大,蕾期次之,吐絮期最小。然而,各生育期不同盐分水平下又表现出其他的特点。各生育期 T1、T2 处理较 CK 无显著性差异( $P>0.05$ ),T3 至 T5 处理蒸腾速率与 CK 处理表现出显著性差异( $P<0.05$ ),表明不同程度的盐分胁迫对蒸腾速率有不同的影响,但均使棉花根系吸水困难,导致植株体内缺水使蒸腾速率下降。

2.2.2 盐分胁迫对滴灌棉花气孔导度( $G_s$ )、细胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )及气孔限制值( $L_s$ )的影响

空气中水分及  $\text{CO}_2$  通过气孔进出植物体内,对植物的光合速率及蒸腾速率等具有调节作用,而气孔导度反映了气孔开放程度的大小。由表 4 可知,盐分胁迫使棉花气孔导度( $G_s$ )呈下降趋势,不同盐分处理间具有极显著性差异( $P<0.01$ ),各生育期 T1、T2 处理处理较对照(CK)差别不大,随着盐分胁迫程度的增加,棉花气孔导度明显下降,与 CK 相比均达到差异显著性水平( $P<0.05$ )。但整体上随棉花生育阶段呈现出“上升—下降”的变化趋势,蕾期至花铃期气孔导度值增加,而后花铃期至吐絮期气孔导度值下降,这与净光合速率变化趋势一致,表明 T3~T5 处理的盐分含量显著抑制了棉花叶片气孔导度的大小。

从表 5 可以看出,盐分胁迫对棉花  $C_i$  影响显著,表现出与净光合速率( $P_n$ )基本一致的变化规律。各处理  $C_i$  与对照相比均下降,且具有显著性差异( $P<0.01$ ),随着盐分胁迫程度的增加  $C_i$  下降程度增大,其中 T1 和 T2 处理较对照稍有减小( $P>0.05$ ),T3~T5 处理呈显著下降趋势( $P<0.05$ )。盐分胁迫下棉花不同生育期  $C_i$  具有不同的变化规律,整体上呈现出“上升—下降”的趋势,峰值出现在花铃期,最小值出现在蕾期,表明不同盐胁迫程度及盐胁迫时间对棉花叶片细胞间  $\text{CO}_2$  浓度产生了不同程度的抑制效果。

试验测得的不同盐分胁迫对滴灌棉花各生育期的气孔限制值( $L_s$ )的结果见表 5。从表 5 可以看出,各盐分处理  $L_s$  与对照相比均呈升高趋势,且存在明显差异( $P<0.01$ ),随着盐胁迫程度的加大  $L_s$  增加幅度变大,其中 T1、T2 处理略有升高( $P>0.05$ ),T3~T5 处理较对照处理升高程度加大( $P<0.05$ ),说明 T3 处理以下盐分含量对棉花气孔限制值影响较大。但是,整体上随生育阶段呈现下降的趋势,棉花蕾期  $L_s$  最大,吐絮期最小,这可能与棉花在长时间盐分胁迫下降低了叶肉细胞光合活性有关。

判断植物光合作用是否为气孔限制因素的基础是细胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )和气孔限制值( $L_s$ )的变化规律<sup>[20]</sup>。由以上分析可知,生育前期盐分胁迫下棉花功能叶的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  均显著降低,而  $L_s$  显著升高,这是由于盐分胁迫导致植物吸水困难,为了减少自身水分的大量散失,迫使部分气孔关闭,导致进入细胞间的  $\text{CO}_2$  浓度减少,近而使  $L_s$  值升高;吐絮期的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $L_s$  均小于蕾期,而  $C_i$  却大于蕾期,可能是由于长时间盐胁迫抑制了卡尔文循环酶(如 Rubisco、PECP 等)的活性,从而导致  $P_n$  下降。因此,轻度盐胁迫下导致棉花光合速率下降的原因生育前期为气孔限制因素,生育后期为非气孔限制因素。

2.2.3 盐分胁迫对滴灌棉花叶片水分利用效率(WUE)的影响

叶片水分利用效率是指通过蒸腾作用散失单位水量时光合作用创造的有机物量,称为水分利用效率的理论值<sup>[21]</sup>。由表 4 可知,与 CK 相比,T1、T2 处理棉花叶片水分利用效率略有升高( $P>0.05$ ),而从 T3 处理开始下降,T3~T5 处理均与对照呈显著性差异( $P<0.05$ ),随着盐胁迫程度的增加表现出“升高—降低”的趋势,各生育期 T5 处理水分利用效率最低。说明棉花具有一定的耐盐能力,当盐胁迫程度较低时对其光合作用影响不大,超过耐盐临界值则会对光合作用产生抑制。在棉花的不同生育阶段呈现出“升高—降低”的趋势,花铃期最高,吐絮期最低,这可能是由于花铃期棉花生理活动较活跃,对盐胁迫具有一定的抵抗力。

表 3 不同盐分处理对棉花净光合速率和蒸腾速率的影响

| 盐分处理          | 净光合速率/( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |                         |                         | 蒸腾速率/( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |                        |                         |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|
|               | 6 月 20 日                                                          | 8 月 15 日                | 9 月 6 日                 | 6 月 20 日                                                       | 8 月 15 日               | 9 月 6 日                 |
| CK            | 25.22±0.13 <sup>a</sup>                                           | 31.33±0.66 <sup>a</sup> | 23.16±1.58 <sup>a</sup> | 4.78±0.16 <sup>a</sup>                                         | 5.38±0.06 <sup>a</sup> | 4.73±0.11 <sup>a</sup>  |
| T1            | 25.12±0.04 <sup>a</sup>                                           | 31.25±0.78 <sup>a</sup> | 22.97±0.20 <sup>a</sup> | 4.64±0.08 <sup>a</sup>                                         | 5.26±0.10 <sup>a</sup> | 4.68±0.03 <sup>a</sup>  |
| T2            | 25.17±0.04 <sup>a</sup>                                           | 31.31±0.54 <sup>a</sup> | 23.12±0.17 <sup>a</sup> | 4.56±0.04 <sup>a</sup>                                         | 5.30±0.03 <sup>a</sup> | 4.66±0.01 <sup>ab</sup> |
| T3            | 20.74±0.37 <sup>b</sup>                                           | 22.77±0.03 <sup>b</sup> | 18.60±1.65 <sup>b</sup> | 3.93±0.11 <sup>b</sup>                                         | 4.76±0.07 <sup>b</sup> | 3.88±0.08 <sup>b</sup>  |
| T4            | 19.47±1.54 <sup>bc</sup>                                          | 19.64±0.08 <sup>c</sup> | 14.50±0.78 <sup>c</sup> | 3.78±0.11 <sup>bc</sup>                                        | 4.39±0.06 <sup>c</sup> | 3.61±0.02 <sup>bc</sup> |
| T5            | 18.59±0.58 <sup>c</sup>                                           | 18.69±0.06 <sup>d</sup> | 13.20±1.00 <sup>c</sup> | 3.64±0.07 <sup>c</sup>                                         | 3.98±0.03 <sup>d</sup> | 3.46±0.01 <sup>c</sup>  |
| 显著性检验( $F$ 值) | 40.911 <sup>**</sup>                                              | 335.580 <sup>**</sup>   | 42.218 <sup>**</sup>    | 45.882 <sup>**</sup>                                           | 171.363 <sup>**</sup>  | 187.156 <sup>**</sup>   |

注: \* 表示差异显著( $P<0.05$ ), \*\* 表示差异极显著( $P<0.01$ );同列数值后不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

表 4 不同盐分处理对棉花气孔导度和水分利用效率的影响

| 盐分处理      | 气孔导度/(mmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |                           |                           | 水分利用效率/(μmol·mmol <sup>-1</sup> ) |                        |                        |
|-----------|-----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------|
|           | 6月20日                                         | 8月15日                     | 9月6日                      | 6月20日                             | 8月15日                  | 9月6日                   |
| CK        | 280.50±2.12 <sup>a</sup>                      | 412.50±0.71 <sup>a</sup>  | 202.17±2.38 <sup>a</sup>  | 5.28±0.20 <sup>a</sup>            | 5.82±0.18 <sup>a</sup> | 4.89±0.22 <sup>a</sup> |
| T1        | 276.67±0.47 <sup>a</sup>                      | 403.00±2.83 <sup>b</sup>  | 197.20±2.55 <sup>ab</sup> | 5.42±0.09 <sup>a</sup>            | 5.94±0.26 <sup>a</sup> | 4.91±0.01 <sup>a</sup> |
| T2        | 274.17±1.65 <sup>a</sup>                      | 408.00±2.83 <sup>ab</sup> | 201.30±1.13 <sup>bc</sup> | 5.52±0.04 <sup>a</sup>            | 5.91±0.13 <sup>a</sup> | 4.96±0.05 <sup>a</sup> |
| T3        | 256.17±4.48 <sup>b</sup>                      | 367.50±2.12 <sup>c</sup>  | 193.17±1.17 <sup>c</sup>  | 4.78±0.23 <sup>b</sup>            | 4.78±0.07 <sup>b</sup> | 4.79±0.32 <sup>a</sup> |
| T4        | 234.33±2.36 <sup>c</sup>                      | 347.17±2.59 <sup>d</sup>  | 134.14±1.92 <sup>d</sup>  | 4.36±0.12 <sup>c</sup>            | 4.47±0.04 <sup>b</sup> | 4.02±0.16 <sup>b</sup> |
| T5        | 217.83±3.07 <sup>d</sup>                      | 331.83±1.65 <sup>c</sup>  | 124.50±2.12 <sup>c</sup>  | 4.29±0.08 <sup>c</sup>            | 4.70±0.02 <sup>b</sup> | 3.81±0.06 <sup>b</sup> |
| 显著性检验(F值) | 185.121**                                     | 465.796**                 | 675.838**                 | 28.477**                          | 45.317**               | 16.854*                |

表 5 不同盐分处理对棉花细胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和气孔限制值的影响

| 盐分处理      | 细胞间 CO <sub>2</sub> 浓度/(μmol·mol <sup>-1</sup> ) |                          |                           | 气孔限制值                   |                        |                         |
|-----------|--------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
|           | 6月20日                                            | 8月15日                    | 9月6日                      | 6月20日                   | 8月15日                  | 9月6日                    |
| CK        | 367.84±4.87 <sup>a</sup>                         | 402.84±3.19 <sup>a</sup> | 369.84±5.38 <sup>a</sup>  | 0.22±0.04 <sup>a</sup>  | 0.18±0.03 <sup>a</sup> | 0.13±0.03 <sup>a</sup>  |
| T1        | 360.67±4.39 <sup>ab</sup>                        | 398.83±5.37 <sup>a</sup> | 363.17±5.49 <sup>a</sup>  | 0.24±0.03 <sup>ab</sup> | 0.19±0.04 <sup>a</sup> | 0.15±0.03 <sup>a</sup>  |
| T2        | 356.84±4.70 <sup>b</sup>                         | 396.31±2.07 <sup>a</sup> | 358.34±4.58 <sup>ab</sup> | 0.24±0.02 <sup>b</sup>  | 0.19±0.02 <sup>a</sup> | 0.16±0.03 <sup>ab</sup> |
| T3        | 316.67±1.66 <sup>c</sup>                         | 354.66±2.33 <sup>b</sup> | 316.00±1.71 <sup>c</sup>  | 0.33±0.02 <sup>c</sup>  | 0.28±0.01 <sup>b</sup> | 0.26±0.01 <sup>c</sup>  |
| T4        | 291.34±2.03 <sup>d</sup>                         | 329.67±1.59 <sup>c</sup> | 299.17±1.32 <sup>d</sup>  | 0.38±0.01 <sup>d</sup>  | 0.33±0.01 <sup>c</sup> | 0.30±0.02 <sup>d</sup>  |
| T5        | 265.33±2.23 <sup>e</sup>                         | 302.18±1.72 <sup>d</sup> | 274.84±1.77 <sup>e</sup>  | 0.44±0.01 <sup>e</sup>  | 0.38±0.01 <sup>d</sup> | 0.35±0.02 <sup>e</sup>  |
| 显著性检验(F值) | 276.550**                                        | 150.378**                | 209.628**                 | 276.589**               | 150.486**              | 209.674**               |

2.3 土壤盐分对滴灌棉花生长的影响

2.3.1 土壤盐分对滴灌棉花株高的影响 株高是表征作物地上部分的生育指标,反映了棉花的生长状态。从图 1 可以看出,随着土壤含盐量的增加,株高表现出明显的下降趋势。除 T1 处理外,苗蕾期各处理株高均与 CK 具有显著差异( $P<0.05$ );花铃期及吐絮期 T1、T2、T3 处理株高较 CK 变化不大( $P>0.05$ ),但 T4、T5 处理株高与 CK 相比差异显著( $P<0.05$ )。整个生育期中棉花株高逐渐增加,最大值出现在吐絮期的 T2 处理,最小值为苗期的 T5 处理。在生育前期(苗蕾期),T2 处理以下对株高均有显著影响,生育后期(花铃期、吐絮期),只有 T4、T5 处理对株高抑制作用明显,而 T2、T3 处理对株高的抑制作用减弱,表明不同生育期不同盐分胁迫对株高有不同程度的影响。

2.3.2 土壤盐分对滴灌棉花叶面积指数的影响 叶面积指数(LAI)是反映作物冠层结构合理性的重要指标,对干物质累积量有直接影响,合理的叶面积指数可以提高光能利用效率,使作物产量增加。从图 2 可以看出,随着生育期的推进,各处理的叶面积指数均呈先增加后减小的趋势,在花铃期达到峰值。其中 T3 处理的叶面积指数在花铃期达到最大值,表现出强的反弹生长能力。在棉花生育前期(苗蕾期),除 T1、T2 处理,各处理叶面积指数较 CK 差异显著( $P<0.05$ );而在生育后期,T4、T5 处理对叶面积影响显著( $P<0.05$ ),说明土壤盐分对棉花生育前期抑制作用明显,生育后期低盐分对叶片的抑制作用不显

著,同时一定程度上缓解了高盐分对叶片生长的限制作用。

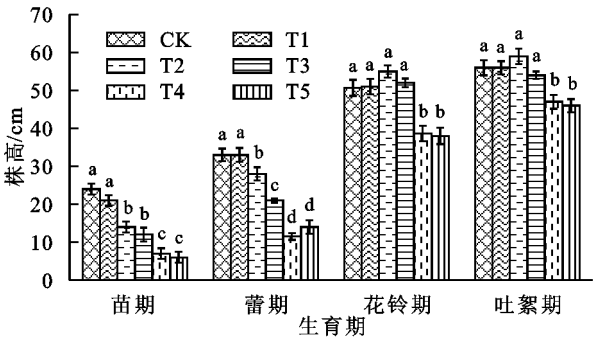


图 1 不同盐分处理对棉花株高的影响

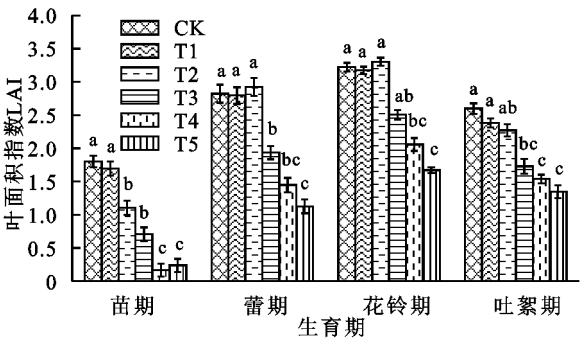


图 2 不同盐分处理对棉花叶面积指数的影响

2.4 土壤盐分对滴灌棉花产量的影响

2.4.1 棉花产量及其构成要素 不同盐分处理对棉花产量及其构成因素的影响见表 6。由表 6 可知,盐胁迫对单株铃数、籽棉产量的影响在 0.01 水平下具有统计学意义,对单铃质量的影响在 0.05 水平下具有统计学意义。其中,与对照相比,当土壤含盐量小于 T2 处理时,单株铃数及单铃质量差异不显著( $P<$

0.05)。从 T3 处理开始差距明显增大,T5 处理达到最大,单株铃数及单铃质量最小值分别为 T5 处理的 5.67,4.95,较对照组分别减少了 4.57,0.66;T1、T2 处理籽棉产量较 CK 无显著差异,T3 处理产量开始显著降低,T3、T4 及 T5 处理籽棉产量较 CK 处理分别降低了 11.63%,18.47%,28.37%。由此表明,整体上土壤盐分与棉花产量及其构成因素呈显著负相关,但当土壤含盐量较低时对产量影响不大,超过一定量后对棉花产量产生严重抑制。说明棉花存在一个耐盐临界值,实际生产中控制土壤盐分在临界值以下可以得到较高产量。

| 表 6 不同盐分处理下产量及其构成因素的变化 |                         |                        |                           |        |
|------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|--------|
| 盐分处理                   | 单株铃数/个                  | 单铃质量/g                 | 籽棉产量/(g·株 <sup>-1</sup> ) | 相对产量/% |
| CK                     | 10.24±0.84 <sup>a</sup> | 5.61±0.16 <sup>a</sup> | 57.45±3.72 <sup>a</sup>   | 100    |
| T1                     | 9.64±0.51 <sup>b</sup>  | 5.81±0.25 <sup>a</sup> | 56.01±2.41 <sup>a</sup>   | 97.49  |
| T2                     | 9.67±0.58 <sup>ab</sup> | 5.75±0.23 <sup>a</sup> | 55.60±1.25 <sup>a</sup>   | 96.78  |
| T3                     | 8.22±0.19 <sup>c</sup>  | 4.96±0.10 <sup>b</sup> | 50.77±0.70 <sup>b</sup>   | 88.37  |
| T4                     | 6.56±0.20 <sup>d</sup>  | 4.96±0.07 <sup>c</sup> | 46.84±0.52 <sup>c</sup>   | 81.53  |
| T5                     | 5.67±0.33 <sup>e</sup>  | 4.95±0.03 <sup>d</sup> | 41.15±1.32 <sup>d</sup>   | 71.63  |
| 显著性检验(F 值)             | 43.14**                 | 50.582*                | 88.419**                  | —      |

2.4.2 棉花耐盐函数 作物耐盐函数是指同等条件下不同盐分含量土壤作物产量与非盐碱土上作物产量的关系。采用分段式线性耐盐函数<sup>[22]</sup>,根据桶栽试验产量数据与全生育期 0—40 cm 土层深度的土壤含盐量进行拟合,初步确定出全生育期滴灌棉花耐盐性指标。分段式线性盐分生产函数模型为:

$$Y_r = \frac{Y}{Y_m} = \begin{cases} 1, & S \leq S_i \\ 1 - C(S - S_i), & S_i < S \leq S_0 \\ 0, & S > S_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:Y<sub>r</sub> 为相对产量(g);Y 为抑制区作物产量(g);Y<sub>m</sub> 为对照组作物产量(g);C 为增加单位含盐量产量下降系数;S 为土壤含盐量(g/kg);S<sub>i</sub> 为开始抑制作物生长的土壤含盐量阈值(g/kg);S<sub>0</sub> 为产量为零的土壤含盐量(g/kg)。

根据表 6,通过分段耐盐方程式(6),运用 SPSS 17.0 软件进行回归分析,得到棉花耐盐函数参数及其耐盐方程。在本试验条件下,棉花的耐盐临界值(S<sub>i</sub>)为 5.441 9 g/kg,当土壤含盐量超过 5.441 9 g/kg 时,棉花产量开始减产;耐盐极限值 S<sub>0</sub> 为 44.201 6 g/kg,当土壤含盐量超过此值时,棉花产量为零;作物产量下降系数 C 为 0.025 8。因此,得到棉花耐盐方程:Y<sub>r</sub>=1-0.0258(S-5.4419),其决定系数为 0.850。

2.5 棉花产量与其他指标间的相关关系

棉花产量是营养生长与生殖生长相互竞争的结果,在不同盐分处理下,生理、生长指标对产量表现

出不同的内在联系。图 3 为棉花籽棉产量与叶片净光合速率和水分利用效率的相关关系,图 4 为产量与株高 H 和叶面积 S 之间的相关关系。由图 3 可知,棉花籽棉产量与净光合速率(P<sub>n</sub>)呈二次函数关系,R<sup>2</sup>=0.69;棉花籽棉产量与叶片水分利用效率(WUE)呈三次函数关系,R<sup>2</sup>=0.73。由图 4 可知,棉花籽棉产量与株高 H 呈线性关系,R<sup>2</sup>=0.50;产量与叶面积 S 呈三次函数关系,R<sup>2</sup>=0.72。由此得出产量与 P<sub>n</sub>、WUE 及 S 之间具有较好的相关性,与株高的关系不太密切,表明 P<sub>n</sub>、WUE 及叶面积 S 能够在一定程度上反映棉花产量。

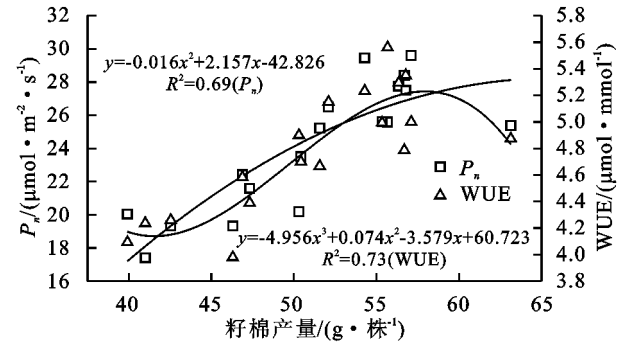


图 3 棉花产量与 P<sub>n</sub> 和 WUE 的相关关系

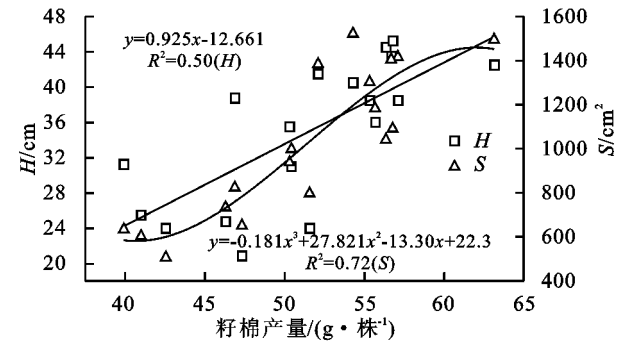


图 4 棉花产量与株高 H 和叶面积 S 的相关关系

3 讨论

棉花光合作用是棉花生长过程中较重要的生理活动指标,是分析盐胁迫下影响棉花生理代谢的主要手段。在新疆大规模轻度盐碱地这一背景下,研究轻度盐胁迫对棉花光合生理指标、生长指标的变化特点及其机理,对新疆轻度盐碱地的改良具有现实意义。

光合作用是植物体内重要的代谢过程,其强弱对植物的生长、产量及其抗逆性具有重要影响<sup>[23]</sup>。盐胁迫可能通过离子毒害、渗透胁迫及糖分积累等途径抑制植物的正常光合作用<sup>[24]</sup>。本试验研究表明,低盐分对棉花光合性能影响不大,当盐胁迫程度达到 T3 处理时显著降低了棉花叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、细胞间 CO<sub>2</sub> 浓度及叶片水分利用效率的数值,但是使气孔限制值呈升高趋势。前人对盐胁迫下棉花光合作用机理进行了大量的研究,由于光

合作用的复杂性,至今还没有形成统一的定论。有研究表明,盐胁迫下,棉花叶片光合作用降低的主要因素为气孔关闭,导致  $\text{CO}_2$  供应受阻的气孔限制因素及 RuBP 羧化酶有效性降低和 Rubisco 的活性下降导致的非气孔限制因素<sup>[25]</sup>;也有研究得出,在低盐分条件下光合作用下降是因为气孔限制因素,而高盐胁迫下光合能力下降的原因为非气孔限制因素<sup>[26]</sup>;还有研究表明,盐胁迫在短期和长期都会影响光合作用,且可通过抑制光合作用而间接影响生长<sup>[27]</sup>。本试验结果表明,各生育期盐分胁迫下棉花功能叶的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  均显著降低,而  $L_s$  则显著升高,表现出一定的线性关系,随着生育期的推进,吐絮期的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $L_s$  均小于蕾期,而  $C_i$  却大于蕾期。表明轻度盐胁迫下导致棉花光合速率下降的原因生育前期为气孔限制因素,生育后期为非气孔限制因素,这与 Acosta-Motos 等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。

盐胁迫会显著抑制作物正常生长发育,最终导致作物产量降低。本试验结果表明,低盐胁迫对株高、叶面积的生长影响不明显,高盐胁迫对其只有抑制作用,这与 Munns 等<sup>[29]</sup>的研究结果一致;Ashraf<sup>[30]</sup>研究得出,盐分含量的增加使得棉花落铃率升高,近而导致单株铃数的减少,这与本文研究基本一致。有研究表明,棉花产量随着盐胁迫程度的增加而显著降低<sup>[31]</sup>。本研究得出,棉花存在一个耐盐临界值,盐分含量超过临界值后作物产量降低,并根据分段式耐盐函数拟合得到本试验条件下棉花耐盐临界值、极限值分别为 5.441 9, 44.201 6 g/kg,这与张豫等<sup>[32]</sup>的研究结论具有差异,原因可能与试验环境及作物品种有关。

盐胁迫下棉花各光合生理指标之间具有密切的相关关系,净光合速率与蒸腾速率、气孔导度、细胞间  $\text{CO}_2$  浓度及气孔限制值具有紧密联系,说明棉花光合作用是一个综合过程,各个光合因子之间互相作用,土壤盐分通过控制棉花蒸腾速率、细胞间  $\text{CO}_2$  浓度及气孔导度来影响净光合速率的大小。通过对棉花产量与其他指标的函数拟合,得出产量与  $P_n$ 、WUE 及叶面积  $S$  的拟合相关系数分别为 0.69、0.73 及 0.72,说明产量与三者的关系密切,这与 Antony 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。棉花产量与株高拟合程度不高,说明株高对棉花产量影响不大。

## 4 结论

(1)盐分胁迫对棉花净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、细胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )、气孔限制值( $L_s$ )及叶片水分利用效率(WUE)均影响显著。3.0,4.0 g/kg 盐分含量处理下,棉花叶片  $P_n$  等生理

指标与 1.5 g/kg 盐分含量处理没有统计学意义( $P>0.05$ );5.3,6.2,7.3 g/kg 盐分处理下,棉花叶片各生理指标与 1.5 g/kg 盐分处理具有显著性差异( $P<0.05$ )。生育前期盐分胁迫下  $P_n$  与  $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  均呈下降趋势,而  $L_s$  值随盐胁迫的增加呈升高趋势,对光合作用表现出明显的气孔限制作用;吐絮期的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $L_s$  均小于蕾期,而  $C_i$  却大于蕾期,可能是由于长时间盐胁迫抑制了卡尔文循环酶(如 Rubisco、PECP 等)的活性,从而导致  $P_n$  下降,说明轻度盐胁迫下导致棉花光合速率下降的原因生育前期为气孔限制因素,生育后期为非气孔限制因素。

(2)在棉花生育前期,盐胁迫对株高、叶面积指数抑制作用明显;而在棉花生育后期,由于植物的自我调节机制,6.2,7.3 g/kg 盐分处理对株高、叶面积的抑制作用明显,而 4.0,5.3 g/kg 盐分处理对其抑制作用减弱。

(3)3.0,4.0 g/kg 盐分处理下棉花籽棉产量、单株铃数及单铃质量均与 1.5 g/kg 盐分处理没有差异性,当盐分含量 $\geq 5.3$  g/kg 时,棉花产量、单株铃数及单铃质量均开始显著下降,7.3 g/kg 盐分处理与 1.5 g/kg 盐分处理相比差异达到显著水平( $P<0.05$ )。说明棉花具有一个耐盐临界值,超过这个值产量将显著降低。以产量为因变量,盐分函数为自变量,通过分段式耐盐函数拟合得到本试验棉花的耐盐临界值为 5.441 9 g/kg ( $S_i$ ),耐盐极限值为 44.201 6 g/kg ( $S_0$ )。

(4)棉花产量与净光合速率、水分利用效率及叶面积关系密切,相关系数  $R^2$  分别为 0.69、0.73 及 0.72,表明净光合速率、水分利用效率及叶面积可以作为鉴定棉花产量的指标;而产量与株高的拟合度不高( $R^2=0.50$ ),说明株高不能作为判别棉花产量好坏的标准。

## 参考文献:

- [1] 崔光莲. 新疆棉花产业发展问题研究[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,2002:3-11.
- [2] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,2015:363-368.
- [3] 韩勇,衡丽,李华,等. 盐碱地棉花产量和品质的形成特点及其生理机制[J]. 湖北农业科学,2016,55(22):5735-5739,5754.
- [4] 李冬冬,王海江,吕新. 滴灌棉田不同盐分土壤水分变化规律及其利用效率研究[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(3):90-94.
- [5] 谷海斌,盛建东,武红旗,等. 灌区尺度土壤盐渍化调查与评价:以石河子灌区和玛纳斯灌区为例[J]. 新疆农业大学学报,2010,33(2):95-100.
- [6] 冯棣,张俊鹏,孙池涛,等. 不同生育阶段盐分胁迫对棉

- 花生长和水分生理指标的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1195-1199.
- [7] Zhong H, Lauchli A. Changes in cell wall composition and polymer size in primary roots of cotton seedlings under high salinity[J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(26): 773-778.
- [8] 张雷, 张国伟, 孟亚利, 等. 盐分条件下棉花相关生理特性的变化及水分胁迫指数模型的构建[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3768-3775.
- [9] 张国明, 张峰, 吴之正, 等. 不同盐质量浓度海冰水灌溉对土壤盐分及棉花产量的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(1): 72-75.
- [10] 吴晓东, 王巍, 金路路, 等. 盐胁迫对棉花光合作用和生理指标的影响[J]. 中国棉花, 2013, 40(6): 24-26.
- [11] 陈兵林, 李建亮, 张贺, 等. 滨海棉田土壤盐分时空分布特征及对棉花产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 182-187.
- [12] Sharma S K, Gupta I C. Saline environment and plant growth[M]. India: Agro Botanical Publishers, 1986.
- [13] 杨晓英, 杨劲松, 李冬顺. 盐胁迫条件下不同栽培措施对棉花生长的调控作用研究[J]. 土壤, 2005, 37(1): 65-68.
- [14] 罗家雄. 新疆垦区盐碱地改良[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1985: 74-75.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 179-180.
- [16] Chaum S, Kirdmanee C. Effect of glycinebetaine on proline, water use, and photosynthetic efficiencies, and growth of rice seedlings under salt stress[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2010, 34(6): 455-479.
- [17] Larocque G R. Coupling a detailed photosynthetic model with foliage distribution and light attenuation functions to compute daily gross photosynthesis in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) stands[J]. Ecological Modelling, 2002, 148(3): 213-232.
- [18] 洪继仁, 方光华, 陈如梅, 等. 棉花实验方法[M]. 北京: 农业出版社, 1985.
- [19] 赵波, 王振华, 李文昊. 滴灌方式及定额对北疆冬灌棉田土壤盐分分布及次年棉花生长的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 139-148.
- [20] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [21] 李全起, 沈加印, 赵丹丹. 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 33-36.
- [22] 王振华, 裴磊, 郑旭荣, 等. 盐碱地滴灌春小麦光合特性与耐盐指标研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 65-72, 104.
- [23] 惠红霞, 许兴, 李前荣. 外源甜菜碱对盐胁迫下枸杞光合功能的改善[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2137-2142.
- [24] 阿曼古丽·买买提阿力, 王立红, 郑慧, 等. 盐胁迫对海岛棉幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 121-126, 200.
- [25] 王东明, 贾媛, 崔继哲. 盐胁迫对植物的影响及植物盐适应性研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(4): 124-128.
- [26] 孙璐, 周宇飞, 李丰先, 等. 盐胁迫对高粱幼苗光合作用和荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3265-3272.
- [27] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(3): 324-349.
- [28] Acosta-Motos J, Ortuño M, Bernal-Vicente A, et al. Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms[J]. Agronomy, 2017, 7(1): 18.
- [29] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.
- [30] Ashraf M. Salt tolerance of cotton: Some new advances[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2002, 21(1): 1-30.
- [31] 侯振安, 李品芳, 龚江, 等. 膜下滴灌条件下不同土壤盐度和施氮量对棉花生长的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 681-686.
- [32] 张豫, 王立洪, 孙三民, 等. 阿克苏河灌区棉花耐盐指标的确定[J]. 中国农业科学, 2011, 44(10): 2051-2059.
- [33] Antony E, Singandhupe R B. Impact of drip and surface irrigation on growth, yield and WUE of capsicum (*Capsicum annum* L.) [J]. Agricultural Water Management, 2004, 65(2): 121-132.