

加气滴灌与施氮对盐胁迫棉花生理特性、产量及氮素吸收利用的影响

王久久^{1,3}, 牛文全^{1,2}, 李田田^{1,3}, 王贺^{1,3}, 李燕妮^{1,3}, 杜娅丹^{1,3}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探明加气滴灌与施氮耦合提高作物耐盐胁迫的机制,本研究采用桶栽随机试验,设置2个盐胁迫水平6.2(S1)、12.3(S2) dS·m⁻¹和5个施氮(尿素)水平0(N0)、100(N1)、200(N2)、300(N3)、400(N4) kg·hm⁻²,以非盐渍化土壤、不加气及常规施氮量(300 kg·hm⁻²)为对照(CK),分析加气滴灌与施氮对盐胁迫棉花生长生理特性、产量及氮素吸收利用的影响。结果初步表明:盐胁迫显著降低棉花的光合作用,抑制棉花生长。随着施氮量的增加,S1处理的净光合速率(P_n)和干物质量显著提高了32.52%~53.30%和178.07%~264.37%,S2处理的 P_n 降低了13.27%~47.29%,干物质量提高了49.79%~178.72%。S2较S1处理根和茎中氮含量提高了4.78%~55.41%和17.65%~37.36%,而叶和铃中分别降低了9.21%~32.86%和7.39%~41.87%。加气滴灌下根据土壤盐分状况适量施氮,可以减轻盐胁迫造成棉花产量的下降。中盐胁迫(6.2 dS·m⁻¹)下,加气滴灌氮肥施用量为200 kg·hm⁻²时籽棉产量最高(2 359.92 kg·hm⁻²)。高盐胁迫(S2)处理棉花产量显著降低,且各施氮处理间无显著差异,加气滴灌结合低施氮量(100 kg·hm⁻²)可使产量最大化。

关键词:棉花;加气滴灌;盐胁迫;施氮;生长;氮肥利用

中图分类号:S562; S365; Q945.78 **文献标志码:**A

Effects of aerated drip irrigation and nitrogen application on physiological characteristics, yield and nitrogen uptake and utilization in salt-stressed cotton

WANG Jiujiu^{1,3}, NIU Wenquan^{1,2}, LI Tiantian^{1,3}, WANG He^{1,3}, LI Yanni^{1,3}, DU Yadan^{1,3}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To investigate the mechanism by which aerated drip irrigation coupled with nitrogen application improves crop tolerance to salt stress, this study employed a randomized bucket trial. The experiment included two salt stress levels, 6.2 dS·m⁻¹ (S1) and 12.3 dS·m⁻¹ (S2), along with five nitrogen (urea) application rates: 0 kg·hm⁻² (N0), 100 kg·hm⁻² (N1), 200 kg·hm⁻² (N2), 300 kg·hm⁻² (N3), and 400 kg·hm⁻² (N4). Non-salted soil, non-aerated irrigation, and conventional nitrogen application (300 kg·hm⁻²) served as the control (CK). The study analyzed the effects of aerated drip irrigation and nitrogen application on the physiological growth characteristics, yield, and nitrogen uptake and utilization in salt-stressed cotton. Preliminary results indicated that salt stress significantly reduced photosynthesis and inhibited cotton growth. However, increasing nitrogen application significantly enhanced the net photosynthetic rate (P_n) and dry matter mass by 32.52% to 53.30% and 178.07% to

收稿日期:2024-04-16

修回日期:2024-07-25

基金项目:“十四五”国家重点研发计划(2022YFD1900401)

作者简介:王久久(1999-),女,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉新技术。E-mail:2215953294@qq.com

通信作者:牛文全(1972-),男,甘肃天水人,研究员,主要从事农田灌溉用水以及水土资源高效利用方面的理论与技术研究。E-mail:nwq@vip.sina.com

264.37%, respectively, under the S1 treatment. In contrast, under the S2 treatment, P_n decreased by 13.27% to 47.29%, while dry matter mass increased by 49.79% to 178.72%. The nitrogen content in the roots and stems of the S2 treatment increased by 4.78% to 55.41% and 17.65% to 37.36%, respectively, compared to the S1 treatment, while the nitrogen content in the leaves and bolls decreased by 9.21% to 32.86% and 7.39% to 41.87%, respectively. Moderate application of nitrogen under aerated drip irrigation, tailored to soil salinity conditions, could help mitigate the reduction in cotton yield caused by salt stress. Under medium salt stress ($6.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$), the highest seed cotton yield was achieved when the nitrogen fertilizer application rate of aerated drip irrigation was $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. High salt stress (S2) treatment significantly reduced cotton yield, with no significant difference observed between the nitrogen treatments. Aerated drip irrigation with a low nitrogen application rate ($100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) was applied to maximize yield.

Keywords: cotton; aerated drip irrigation; salt stress; nitrogen application; growth; nitrogen fertilizer utilization

土壤盐分胁迫是干旱和半干旱地区作物生产和农业可持续性的主要制约因素之一^[1]。高盐浓度可通过渗透胁迫、营养失衡和特定离子毒性抑制植物生长^[2]。离子效应在叶片中表现得更为普遍,高浓度 Na^+ 和 Cl^- 在叶片积聚,并导致灼烧症状^[3]。盐胁迫通过改变植株组织的水分关系和电解质平衡,使植物难以吸收利用水分^[4]。

土壤盐分影响氮肥的水解、挥发和硝化等反应^[5],合理的氮肥供应可以减轻盐胁迫对棉花生长的负面影响,但氮肥的过量施用会增加土壤盐渍化程度,加剧盐分对作物的危害^[6]。因此,对于受盐分影响的土壤,调控氮肥的施用至关重要,可满足作物生理生长的需求,提高氮素利用效率,同时最大限度地减少环境污染。另外,盐碱地土壤含氧量低,影响作物根系吸收水分和养分,最终导致其产量和品质的下降^[7-9]。已有研究表明,加气灌溉可有效改善根系土壤通气性,缓解低氧胁迫^[10],提高作物产量、品质和水分利用效率^[11]。同时,加气灌溉促进作物生殖生长,增加作物氮积累量,提高氮素吸收效率^[12]。

然而,关于加气滴灌下不同盐胁迫程度与施氮量耦合作用对棉花生理生长的影响研究尚不充分。为此,本研究通过桶栽试验,研究了加气滴灌条件下不同盐胁迫与施氮量组合对棉花生长、生理特性、产量和氮素利用效率的影响,为盐渍化土壤棉花种植技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2023年在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室节水灌溉试验站的移动遮雨棚中($108^{\circ}04'E, 34^{\circ}17'N$)进行。该地区属于

暖温带季风半湿润气候区,海拔 524.7 m,多年平均温度为 12.9°C ,年平均降水量 635 mm(主要集中在 7~9 月),年平均蒸发量 1 500 mm。

1.2 试验设计

采用桶栽试验,设置盐胁迫与施氮量 2 个因素。2 个盐胁迫水平土壤的饱和泥浆提取液电导率(EC_e)分别为 $6.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $12.3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,分别用 S1 和 S2 表示,即为中度盐土和重盐土^[13];用尿素作为氮肥,根据尿素中 N 含量计算 5 个施氮量水平,分别为 0、100、200、300、400 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,用 N0、N1、N2、N3 和 N4 表示。

其中对照(CK)为不加气灌溉、非盐渍化土壤和常规施氮量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。加气灌溉试验以盐胁迫与施氮量两个因素进行组合,加上不加气(CK),共 11 个处理,每个处理 14 次重复。人工添加 NaCl 配制成中度盐土和重盐土,其 NaCl 含量分别为 $7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。氮肥(尿素, $N \geq 46.3\%$)按照比例施入(基肥:蕾期:初花期:盛花期=3:2:3:2),磷肥(过磷酸钙, $P_2O_5 \geq 16\%$)和钾肥(氯化钾, $K_2O \geq 62\%$)施用量分别为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,均作为基肥施入。

供试棉花为石河子地区主栽品种‘新陆早 63 号’,该品种增产潜力大,抗病性能好。试验所用塑料桶规格为 $30 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ (顶部直径×底部直径×高),为保证加气效果,桶底不打孔。桶外部采用隔热膜包裹,避免阳光直射造成温度升高对棉花生长产生影响。供试土壤取自陕西杨凌当地表层(0~30 cm)耕作土,土壤质地为重壤土,田间持水率为 23.3%(质量含水率),硝态氮含量为 $4.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 8.29,电导率为 $134.33 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。将试验用土碾碎风干后,过直径 5 mm 筛,按设计容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,每桶装 16 kg 试验土,桶内土深度约

22 cm,露土面积为 645 cm²。各处理灌水量相同,采用地下滴灌方式进行灌溉,使用 FRGW-10 型文丘里循环曝气装置进行加气试验,通过文丘里射流器加气,加气压力为 0.45~0.46 Mpa,形成乳白色气液混合物,微气泡直径约 15 μm,溶解氧量为 8.36~8.45 mg · L⁻¹。移植前铺设滴灌管(毛管埋深 15 cm),滴头间距 30 cm,滴头流量为 2 L · h⁻¹。试验采用穴盘育苗,于 2023 年 5 月 23 日选取 3 叶 1 心、长势均匀、无病虫害的健壮幼苗移植于桶内,每桶 2 株。试验于移动遮雨棚下进行,晴天打开,雨天关闭。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合指标 用 LI-6800 便携式光合仪(LI-COR,美国),测量棉花叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度。每个处理选取 3 株棉花,测定功能叶(棉株倒 4 叶),每片叶子测 3 次,取平均值。利用上述实测数据计算内在水分利用效率(WUE_i)和瞬时水分利用效率(WUE_{leaf})。公式如下:

$$WUE_i = \frac{A_n}{G_s} \tag{1}$$

$$WUE_{leaf} = \frac{A_n}{T_r} \tag{2}$$

式中,A_n表示净光合速率(μmol · m⁻² · s⁻¹),G_s表示气孔导度(mol · H₂O · m⁻² · s⁻¹),T_r表示蒸腾速率(mmol · m⁻² · s⁻¹)。

1.3.2 叶绿素相对含量 在棉花各生育阶段,用 SPAD-502 叶绿素仪(Konica Minolta,日本)测定功能叶(棉株倒 4 叶)SPAD 值,每个处理测定 3 片叶子,各处理间尽量选择相近叶位叶片。

1.3.3 叶面积指数 采用长宽系数法测定叶面积。在棉花各生育阶段,每个处理分别选取 3 株长势均一、具有代表性的棉花植株,用直尺测量棉花叶长和叶宽,叶长为叶基红心至叶尖的距离,叶宽为以叶片叶基红心为中心、垂直于叶长的距离,以折算系数 0.84 计算叶面积指数。

1.3.4 干物质质量 在棉花蕾期、花铃期和吐絮期采集植株样品,每个处理选取 3 株长势均一、具有代表性的棉花植株,从子叶节处剪断,采样后分离植株各器官,挖出植株完整根系,将棉花各器官分别装入信封放入烘箱中,105℃下杀青 30 min 后置于 75℃烘至恒重。用万分之一天平称量各部分质量,计算单株干物质质量。

1.3.5 棉花产量 棉花吐絮期,每个处理选取 6 株长势均一、具有代表性的棉花植株,统计每株样品的铃数及单铃重,将收获的籽棉放入烘箱,烘干称

重,计算籽棉产量和皮棉产量。

1.3.6 植株氮素吸收与利用效率 将棉花各部分样品研磨和筛分,采用 AA3 流动分析仪(SEAL Analytical GmbH,德国)测定植株全氮。植株总的氮素吸收量以植株氮素含量与植株生物量的乘积计算^[14]。氮肥利用效率是评估作物对氮素利用的重要指标,本研究采用了氮肥偏生产力(NPFP)、氮肥农学利用率(NUE_a)、氮肥表观利用率(ARE_N)和氮肥生理利用率(NUE_p)4 个指标。

$$NPFP = \frac{Y_A}{F_t} \tag{3}$$

$$NUE_a = \frac{Y_A - Y_0}{F_t} \tag{4}$$

$$ARE_N = \frac{N_{UA} - N_{U0}}{F_t} \tag{5}$$

$$NUE_p = \frac{Y_A - Y_0}{N_{UA} - N_{U0}} \tag{6}$$

式中,Y_A表示施氮处理籽棉产量(kg · hm⁻²),F_t表示施氮量(kg · hm⁻²),Y₀表示未施氮处理的籽棉产量(kg · hm⁻²),N_{UA}表示施氮处理的氮素吸收量(kg · hm⁻²),N_{U0}表示未施氮处理的氮素吸收量(kg · hm⁻²)^[15]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 整理计算数据,采用 SPSS Statistics 26 对数据进行 ANOVA 单因素方差分析和 Duncan 多重比较,采用 Origin 2024 绘图。

2 结果与分析

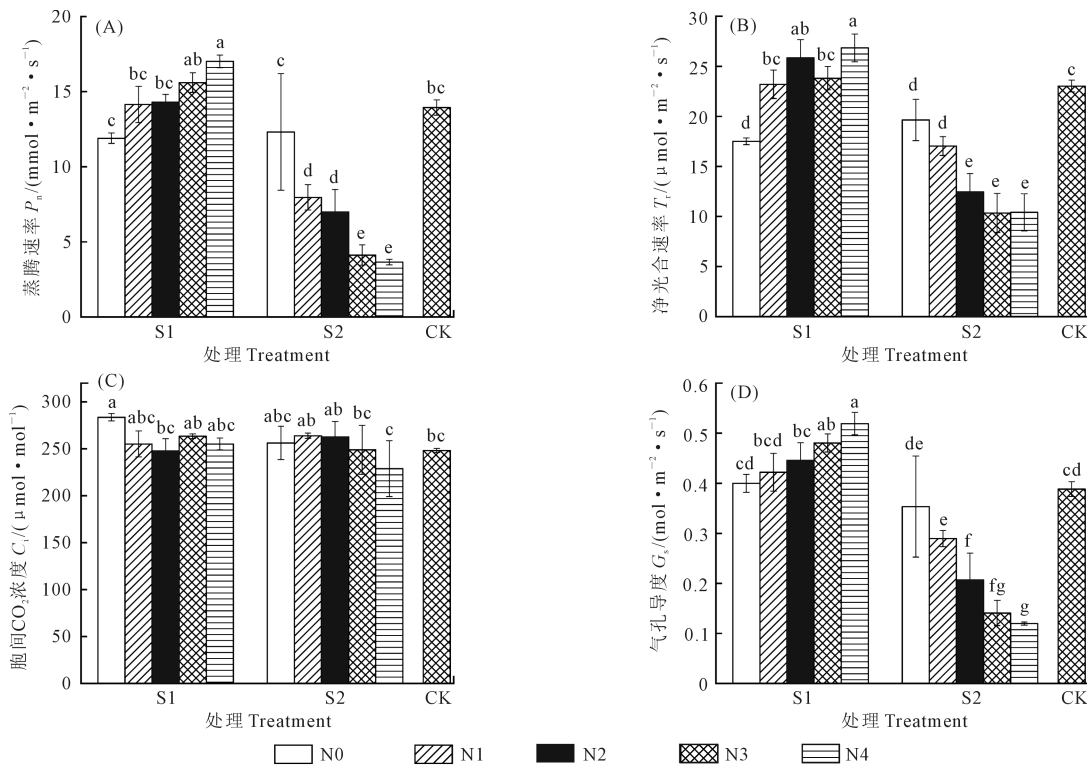
2.1 施氮与盐胁迫对棉花蕾期光合参数的影响

2.1.1 叶片气体交换 加气滴灌和施氮量显著影响不同盐胁迫下棉花光合作用(图 1)。盐胁迫显著降低叶片蒸腾速率(T_r)、净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)等光合参数(P<0.05),但盐胁迫与施氮量组合对胞间 CO₂ 浓度(C_i)无显著性影响(P>0.05)。不同盐胁迫下,氮肥施用量对棉花光合作用的影响不同。随着施氮量的增加,中盐胁迫(S1)处理的 T_r、P_n 和 G_s 均呈增加趋势(P<0.05),而高盐胁迫(S2)处理均呈显著下降趋势(P<0.05)。与 N0 处理相比,S1N1、S1N2、S1N3 和 S1N4 处理的 T_r、P_n 和 G_s 分别提高了 18.90%~43.07%、32.52%~53.30%和 5.54%~29.84%,S2N1、S2N2、S2N3 和 S2N4 处理的 T_r、P_n 和 G_s 分别降低了 35.38%~70.40%、13.27%~47.29%和 18.07%~66.15%。与对照(CK)相比,S1N3 处理的 T_r、P_n 和 G_s 分别比 CK 高 11.88%、3.41%

和 23.76%。而 S2 水平下, 各光合参数均低于 CK 处理, S2N3 处理的 T_r 、 P_n 和 G_s 分别比 CK 降低了 70.49%、55.03% 和 63.77%。结果表明, 加气滴灌条件下, 增加施氮量可以促进 (S1 水平) 棉花植株的光合作用, 当盐胁迫较大时 (S2 处理), 增加施氮量则会显著降低植株的光合作用。

2.1.2 叶片水分利用效率 加气滴灌和施氮量显著影响不同盐胁迫下棉花叶片水分利用效率 (图 2), S1 处理叶片水分利用效率显著低于 S2 处理 ($P < 0.05$), 可能由于高盐胁迫对 G_s 和 T_r 的抑制作用大

于 P_n 。不同施氮量对 S1 处理的棉花叶片内在水分利用效率 (WUE_i) 和瞬时水分利用效率 (WUE_{leaf}) 差异不显著 ($P > 0.05$), 对 S2 处理的 WUE_i 和 WUE_{leaf} 影响显著 ($P < 0.05$), 且随着施氮量的增加而升高, S2N4 处理获得最大值, 分别为 $87.25 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $2.85 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$, 与 CK 相比, S1N3 处理的 WUE_i 和 WUE_{leaf} 降低, S2N3 处理的 WUE_i 和 WUE_{leaf} 分别提高了 29.53% 和 53.42%。结果说明, 加气滴灌下, 土壤盐胁迫较低时植株根系水分吸收的能力强于叶片光合作用。



注: 不同字母表示所有处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。
Note: Different letters indicate significant differences between all treatments ($P < 0.05$), the same below.

图 1 施氮与盐胁迫对棉花叶片气体交换的影响

Fig.1 Effects of nitrogen application and salt stress on the gas exchange of cotton leaves

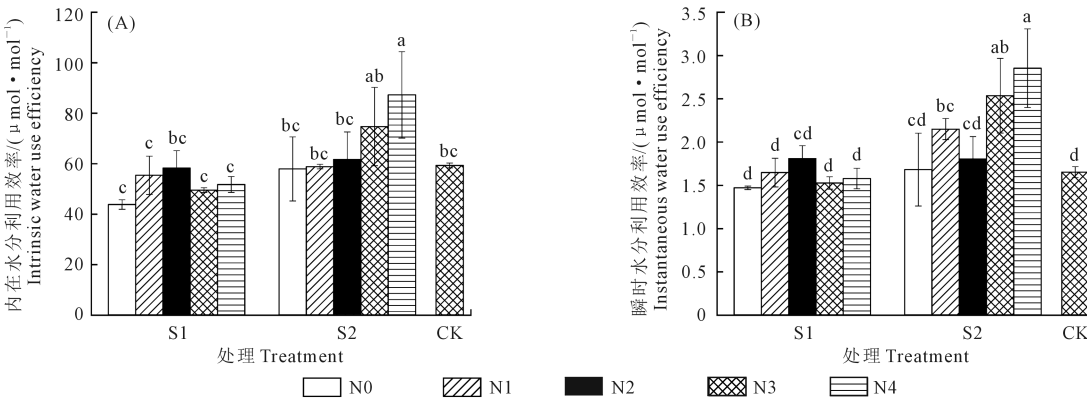


图 2 施氮与盐胁迫对棉花叶片水分利用效率的影响

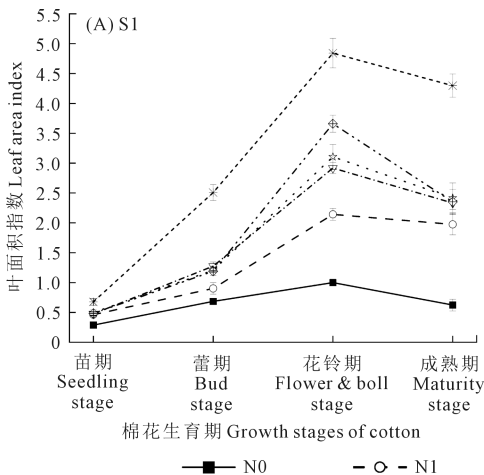
Fig.2 Effects of nitrogen application and salt stress on water use efficiency of cotton leaves

2.2 施氮与盐胁迫对棉花叶绿素相对含量的影响

加气滴灌和施氮量显著影响不同盐胁迫下棉花叶绿素相对含量(SPAD 值)(表 1)。盐胁迫显著影响 SPAD 值($P<0.001$),盐胁迫加剧,SPAD 值显著减小,以花铃期为例,S1 较 S2 处理的 SPAD 值高 1.96%~11.26%($P<0.05$)。施氮量对不同盐胁迫棉花 SPAD 值的影响趋势相同(除苗期),基本均随着施氮量的增加,SPAD 值呈先增后减的趋势。与 CK 相比,S1N3 处理的 SPAD 值增大了 3.42%~9.87%,S2N3 处理的 SPAD 值减小了 1.10%~14.08%。结果表明,加气滴灌促进了叶绿素的合成,但高盐胁迫抑制了其改善效果。

表 1 施氮与盐胁迫对棉花叶绿素相对含量的影响					
Table 1 Effects of nitrogen application and salt stress on the relative chlorophyll content of cotton					
处理 Treatment	施氮量 N level /(kg· hm ⁻²)	叶绿素相对含量 SPAD Chlorophyll relative content			
		苗期 Seedling period	蕾期 Bud period	花铃期 Flower & Boll period	吐絮期 Mature period
S1	N0	44.13cd	40.57ef	35.00e	32.00e
	N1	48.57b	45.83c	46.50b	45.70b
	N2	53.40a	48.00ab	48.73a	48.17a
	N3	54.20a	46.87bc	47.77a	45.40b
	N4	55.40a	46.60bc	46.73b	44.87b
S2	N0	40.50e	39.03f	33.73f	28.07f
	N1	42.70d	43.13d	42.87d	40.80d
	N2	45.73c	43.17d	43.80d	42.37cd
	N3	48.67b	41.93de	44.83c	40.30d
	N4	48.83b	41.43de	45.83bc	41.03d
CK		49.33b	48.80a	45.33c	43.90bc
P 值 P value					
盐胁迫 Salt stress (S)		** ** *	** ** *	** ** *	** ** *
施氮量 N level (N)		** ** *	** ** *	** ** *	** ** *
S×N		ns	*	** ** *	ns

注:同列不同小写字母表示所有处理间差异显著($P<0.05$)。
ns: $P\geq0.05$; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$ 。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among all treatments ($P<0.05$). The same below.



2.3 施氮与盐胁迫对棉花生长和产量的影响

2.3.1 叶面积指数 盐胁迫会显著降低棉花叶面积指数(LAI)(图 3),以花铃期为例,S1 较 S2 处理的 LAI 高 59.96%~181.36%。施氮量对棉花不同生长阶段 LAI 也有显著影响,随着施氮量的增加,棉花 LAI 呈增大趋势,在 S1 处理施氮量为 400 kg·hm⁻² 时最大,S2 处理施氮量为 200 kg·hm⁻² 时最大。不同盐胁迫时,棉花 LAI 最大所需的最佳施氮量不同,盐胁迫加剧,LAI 减小,最佳施氮量也降低。与 CK 相比,S1N3 和 S2N3 处理 LAI 分别降低了 29.63%~49.15%和 50.92%~72.46%。

2.3.2 干物质量 盐胁迫和施氮量显著影响单株干物质量(图 4),随盐胁迫加剧,单株干物质量显著降低($P<0.05$),花铃期和成熟期,S2 较 S1 处理单株干物质量分别降低了 46.31%~71.61%和 33.16%~70.76%。施氮量对不同生育期单株干物质量的影响趋势相似,而对不同盐胁迫单株干物质量的影响趋势不同。S1 水平下,随着施氮量的增加,单株干物质量呈增大趋势($P<0.05$);花铃期和成熟期,与 N0 处理相比,施氮处理的单株干物质量分别提高了 200.29%~264.37%和 178.07%~246.54%。而 S2 水平下,随着施氮量的增加,单株干物质量呈先增后减的趋势($P<0.05$);花铃期和成熟期,与 N0 处理相比,施氮处理的单株干物质量分别提高了 92.67%~178.72%和 49.79%~110.99%。然而,不同盐胁迫水平下加气处理的单株干物质量显著低于对照(CK),这表明加气处理不能完全缓解盐胁迫对棉花生长的不利影响。

2.3.3 棉花产量 盐胁迫和施氮量及其交互作用显著影响棉花生物产量、籽棉和皮棉产量($P<0.01$)

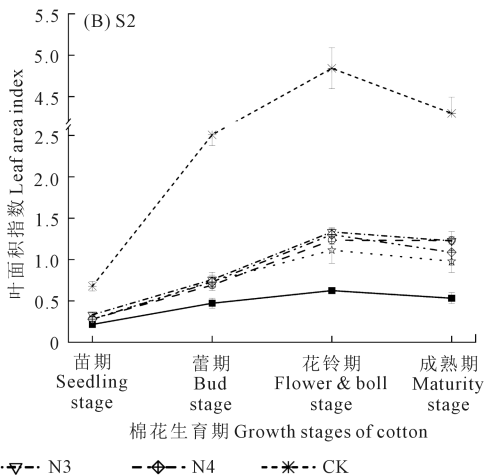


图 3 施氮与盐胁迫对棉花叶面积指数的影响
Fig.3 Effects of nitrogen application and salt stress on leaf area index of cotton

(表 2),S2 处理的棉花生物产量、籽棉和皮棉产量显著低于 S1 处理,S2 较 S1 处理棉花生物产量、籽棉和皮棉产量分别降低了 35.92%~71.08%、47.69%~78.60%和 48.67%~78.18%。S1 水平下,随着施氮量的增加,籽棉和皮棉产量呈增加趋势,且均低于 CK,而不同施氮量对 S2 处理的籽棉和皮棉产影响不显著($P>0.05$)。根据土壤盐胁迫程度调整氮肥施用量,在一定程度上可以减轻盐胁迫引起的生长抑制。中盐胁迫下,通过加气和 200 kg·hm⁻²施氮量可以最大程度地减小盐胁迫造成产量降低的幅度。而高盐胁迫下,棉花产量受到严重抑制用,低施氮(100 kg·hm⁻²)可使产量最大化。相反,盐胁迫和缺氮提高了棉花脱落率($P<0.01$),随着施氮量的增加,脱落率呈先减后增趋势。

2.4 施氮与盐胁迫对棉花氮素利用效率的影响

2.4.1 植株氮含量 盐胁迫显著影响植株各器官氮含量(图 5),随盐胁迫加剧,根和茎中氮含量呈增大趋势,而叶和铃呈减小趋势。S2 较 S1 处理根和茎中氮含量分别提高了 4.78%~55.41%和 17.65%~37.36%,S2 较 S1 处理叶和铃中氮含量分别降低了 9.21%~32.86%和 7.39%~41.87%。随着施氮量的增加,植株各器官中氮含量呈增大趋势。S1 水平下,与 N0 处理相比,施氮处理的根、茎、叶和铃中氮含量分别提高了 78.79%~109.73%、105.33%~172.67%、109.27%~162.76%和 180.59%~343.04%。与 CK 相比,S1N3 处理的叶和铃中氮含量相当,而根和茎中氮含量分别提高了 11.27%和 16.70%。同时,地上部叶和铃中氮含量较高,根部含量较低,说明更多

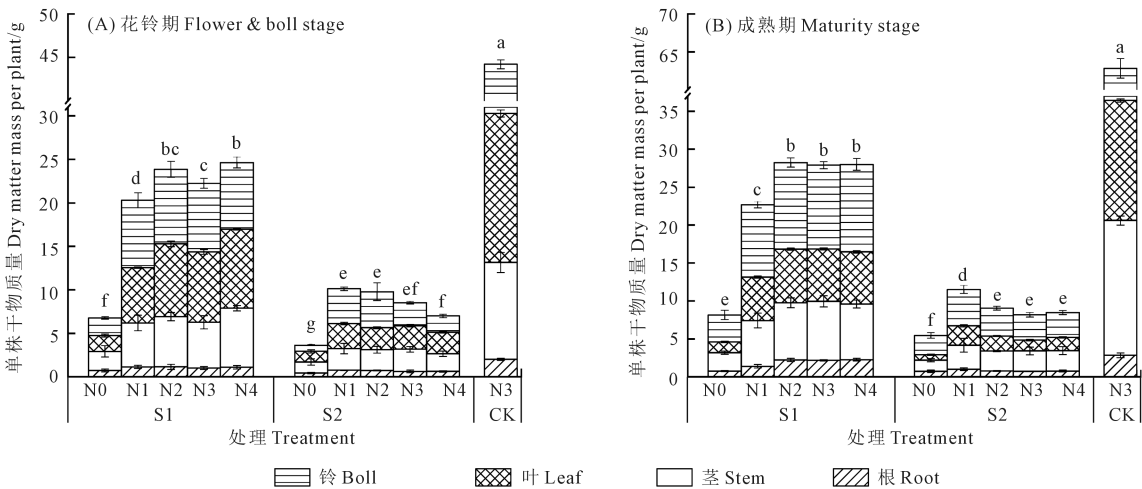


图 4 施氮与盐胁迫对棉花干物质量的影响

Fig.4 Effects of nitrogen application and salt stress on dry matter quality of cotton

表 2 施氮与盐胁迫对棉花产量的影响

Table 2 Effects of nitrogen application and salt stress on cotton yield

处理 Treatment	施氮量 N level /(kg·hm ⁻²)	生物产量 Biological yield /(kg·hm ⁻²)	籽棉产量 Seed cotton yield /(kg·hm ⁻²)	皮棉产量 Lint yield /(kg·hm ⁻²)	脱落率 Expulsion rate /%
S1	N0	1923.80e	745.97d	315.05d	52.78bc
	N1	5534.91c	1658.28c	702.47c	48.33cd
	N2	6766.30b	2359.92b	1042.00b	34.92d
	N3	6693.73b	2137.72b	907.03bc	44.17cd
	N4	6692.76b	2100.95b	861.17bc	59.82abc
S2	N0	1232.75f	390.20d	161.70d	75.00a
	N1	2729.07d	722.90d	321.08d	52.78bc
	N2	2148.09e	710.38d	324.68d	56.67bc
	N3	1935.87e	650.41d	273.20d	70.00ab
	N4	2006.74e	449.57d	187.92d	58.33abc
CK		15712.21a	4743.50a	1984.10a	34.76d
P 值 P value					
盐胁迫 Salt stress (S)		***	***	***	***
施氮量 N level (N)		***	***	***	**
S×N		***	***	**	ns

的氮由地下运输到地上,以保证作物生殖生长,提高了氮素利用率。S2 水平下,各器官中的氮含量分布较均匀。与 CK 相比,S2N3 处理叶和铃中氮含量分别降低了 20.80% 和 21.19%,根和茎中氮含量分别提高了 60.62% 和 40.37%,说明盐胁迫较高时,植株中根和茎需要吸收更多的氮,以保证棉花的正常营养生长。

2.4.2 氮肥利用效率 盐胁迫和施氮量及其交互作用显著影响氮肥农学利用率(NUE_a)、氮肥表观利用率(ARE_N)、氮肥生理利用率(NUE_p)和氮肥偏生产力($NPFP$) ($P<0.05$) (表 3),S2 处理的 NUE_a 、 ARE_N 和 $NPFP$ 显著低于 S1 处理($P<0.001$)。随着施氮量的增加, NUE_a 、 ARE_N 和 $NPFP$ 显著降低($P<0.001$)。S1 水平下,S1N1 处理的 $NPFP$ 与 CK 相当,与高氮(S1N4)处理相比, NUE_a 、 ARE_N 和 $NPFP$ 分别高 18.16%~116.32%、12.89%~148.39% 和 23.14%~171.50%。S2 水平下,低氮(S2N1)处理 NUE_a 、 ARE_N 和 $NPFP$ 最佳,说明氮肥的施用量远超过植株所需的氮,低施氮(100 kg·hm⁻²)棉花产量较大,同时氮肥利用效率较高。随着施氮量的增加, NUE_p 呈先增后减的趋势,S1N2 和 S2N2 处理的 NUE_p 达到最大,分别为 27.42 kg·kg⁻¹ 和 26.28 kg·kg⁻¹。

2.5 棉花产量、氮肥利用与施氮量的回归分析

以盐胁迫和施氮量为自变量,籽棉产量和氮肥偏生产力为因变量,建立二元二次回归方程(表 4),盐胁迫和施肥量对籽棉产量和氮肥偏生产力的影响均呈极显著水平($P<0.001$)。图 6A 为盐胁迫和施氮量对籽棉产量的耦合效应,为开口向下的凸曲面。盐胁迫加剧,棉花产量呈下降趋势,适量施氮可以减轻盐胁迫对作物的危害,而氮肥的过量施用反而会加剧对作物的危害,最终导致棉花产量严重下降。图 6B 为盐胁迫和施氮量对氮肥偏生产力的耦合效应,且盐胁迫和施氮量对氮肥偏生产力的影

响大体一致,呈减小的趋势。综合考虑氮素吸收利用的影响,在中盐(6.2 dS·m⁻¹)和高盐胁迫(12.3 dS·m⁻¹)土壤下,施氮量在 200 kg·hm⁻²和 100 kg·hm⁻²左右可达到最佳产量范围。

3 讨 论

3.1 加气滴灌与施氮对不同盐胁迫处理棉花生理生长的影响

对根系补氧不仅可以改善作物根区土壤微环境,促进根系生长,还可以减轻盐胁迫对植株根系造成的危害^[16-18]。本研究结果表明,使用加气滴灌可以减轻盐胁迫造成的叶片光合作用下降,S1N3 处理的 T_r 、 P_n 和 G_s 分别比 CK 高 11.88%、3.41% 和 23.76%,SPAD 值增大 3.42%~9.87%。当盐胁迫达到 12.3 dS·m⁻¹时, T_r 、 P_n 和 G_s 均下降,且各处理的光合参数和 SPAD 值均低于 CK 处理,可能由于高盐胁迫(12.3 dS·m⁻¹)严重影响棉花生长,盐胁迫抑制了加气滴灌的改善效果。植株进行光合作用依赖于众多复杂蛋白质组成的光合作用系统,氮素

表 3 施氮与盐胁迫对棉花氮肥利用效率的影响

Table 3 Effects of nitrogen application and salt stress on nitrogen use efficiency of cotton					
处理 Treatment	施氮量 N level /(kg· hm ⁻²)	NUE_a /(kg· kg ⁻¹)	ARE_N /(kg· kg ⁻¹)	NUE_p /(kg· kg ⁻¹)	$NPFP$ /(kg· kg ⁻¹)
S1	N1	8.34a	0.52a	16.08b	15.72a
	N2	8.55a	0.31b	27.42a	12.23b
	N3	4.67b	0.24c	19.83b	7.13c
	N4	3.95c	0.21c	19.00b	5.79d
S2	N1	3.67c	0.22c	16.79b	7.58c
	N2	1.60d	0.06d	26.28a	3.55e
	N3	0.87e	0.05d	19.45b	2.17ef
	N4	0.15f	0.03d	4.41c	1.12f
CK					15.81a
P 值 P value					
盐胁迫 Salt stress (S)		** *	** *	*	** *
施氮量 N level (N)		** *	** *	** *	** *
S×N		** *	**	**	**

表 4 施氮量与籽棉产量及氮肥偏生产力的回归关系

Table 4 Regression relationship between nitrogen application rate,seed cotton yield, and NPFP				
输出变量 Output variable	回归方程 Regression equation	自由度 Degrees of freedom	F 值 F value	显著性 Significance
籽棉产量 Yield	$Y_1 = -5.374N^2 - 0.014S^2 - 0.515NS + 3.144N + 12.008S + 1068.584$ ($R^2 = 0.909$)	24	58.81	$P<0.001$
氮肥偏生产力 NPFP	$Y_2 = 0.002NS - 1.663N - 0.049S + 29.248$ ($R^2 = 0.962$)	20	192.50	$P<0.001$

注: N 为氮肥施用量;S 为土壤盐胁迫水平。
Note: N is the amount of nitrogen fertilizer applied. S is the soil salt stress level.

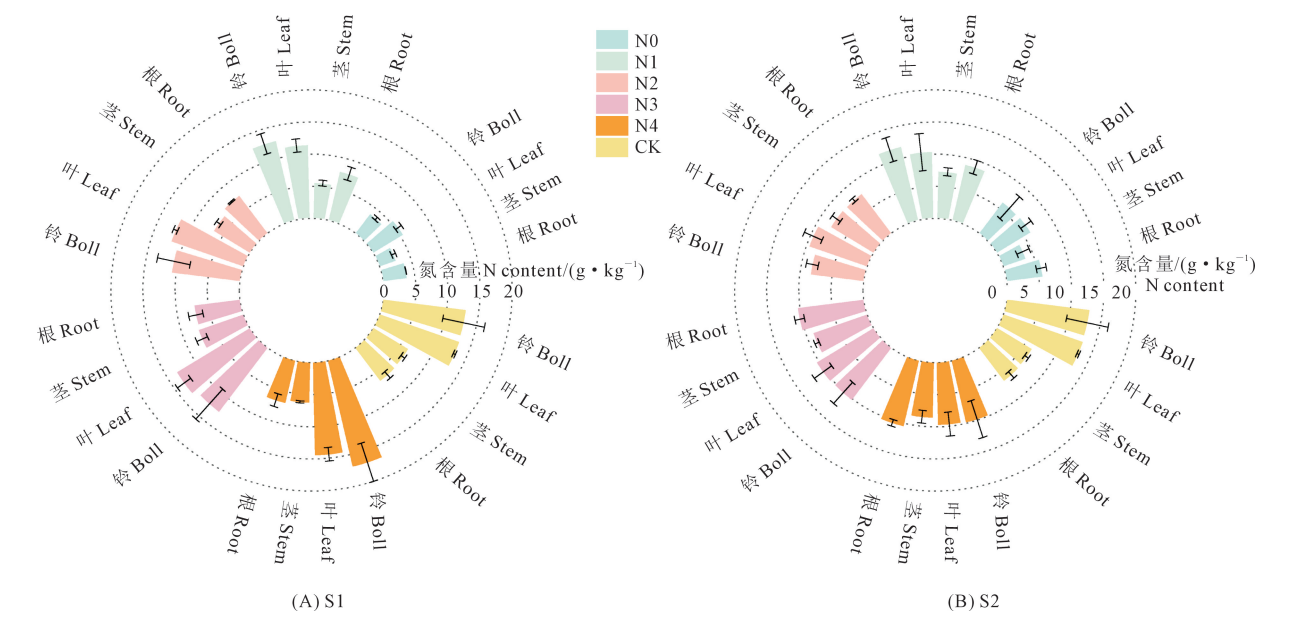


图 5 施氮与盐胁迫对棉花氮含量的影响
Fig.5 Effects of nitrogen application and salt stress on nitrogen content of cotton

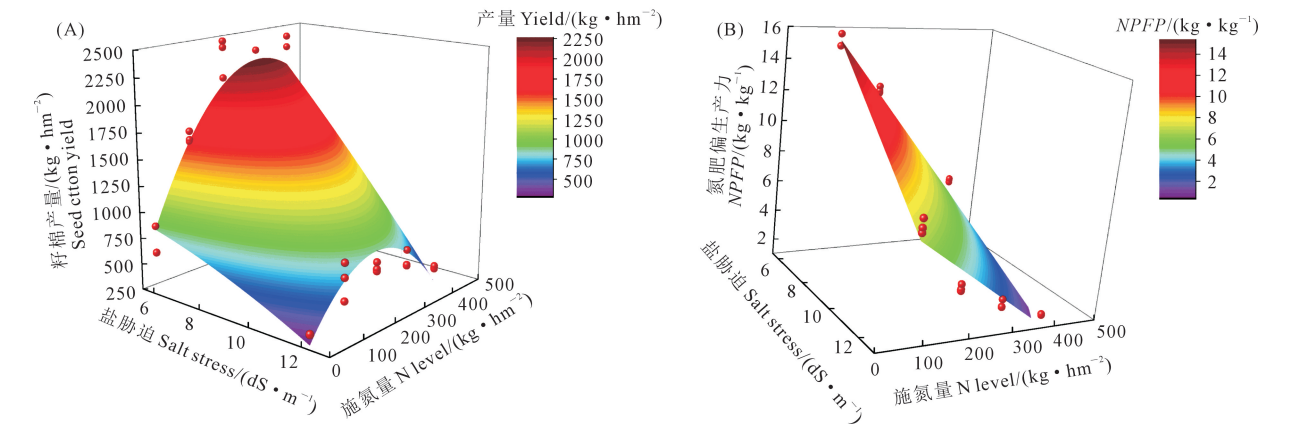


图 6 施氮量与籽棉产量及氮肥偏生产力的回归分析
Fig.6 Regression analysis between nitrogen application rate, seed cotton yield and NPFP

作为合成不同蛋白质的底物,直接影响光合作用^[19]。陈金陵等^[20]研究表明,不同盐胁迫条件下并非施氮越多对小桐子的光合能力缓解作用越好,当 NaCl 含量为 0.4% 和 0.6% 时, N2 处理 (60 g · 株⁻¹) 的日平均净光合速率比 N1 处理 (30 g · 株⁻¹) 分别显著提高了 52.23% 和 34.01%。在本研究中,适量增施氮肥有利于提高棉花光合作用, S1 水平,较 N0 处理净光合速率提高了 32.52%~53.30%。然而, S2 水平下各施氮处理净光合速率较 N0 处理显著降低,可能由于高浓度盐溶液造成渗透胁迫,细胞吸水困难,增施氮肥会进一步加剧损害作物光合生理过程。

除了叶片光合受盐胁迫的影响,叶片水分利用效率在不同盐胁迫程度下产生显著变化。马梦茹^[21]研究表明,盐胁迫下黑果枸杞植株的蒸腾量大

幅降低,植株体内水分散失减少。本研究发现,盐胁迫加剧, G_s 和 T_r 下降比 P_n 明显, S2 处理的棉花的叶片水分利用效率高于 S1 处理。与非加气处理 (CK) 相比, S1N3 处理的 WUE_i 和 WUE_{leaf} 降低, S2N3 处理的 WUE_i 和 WUE_{leaf} 分别提高了 29.53% 和 53.42%。

Gouia 等^[22]研究发现,高盐胁迫导致棉花生长缓慢甚至死亡,干物质积累减少。王振华等^[23]研究表明,加气灌溉能促进其地上部分生长,进而提升棉花产量的积累。Zhao 等^[16]通过盆栽试验研究发现,当灌溉水盐度低于 3.0 g · L⁻¹ 时,曝气处理可以缓解盐胁迫对枸杞幼苗生长的负面影响。在本研究中,盐胁迫加剧,棉花叶面积指数和植株各部分干物质质量显著降低,不同盐胁迫下,加气处理的叶面积指数和干物质质量均显著低于不加气处理,

说明加气并不能完全减轻盐胁迫对棉花生长的不利影响。我们发现施氮效果取决于盐胁迫程度, S1 水平下, 随着施氮量的增加, 叶面积指数和单株干物质呈增大趋势, 而 S2 水平下, 叶面积指数和单株干物质呈先增后减的趋势。这说明, 加气滴灌一定程度上缓解了盐胁迫, 但通过耦合最佳施氮量可以在不同盐胁迫条件下最大化改善棉花生理生长。本研究结果表明, 盐胁迫加剧, 加气滴灌下棉花生长所需最佳施氮量降低。

3.2 加气滴灌与施氮对不同盐胁迫处理棉花产量及氮肥利用效率的影响

盐胁迫对棉花生长发育产生不利影响, 最终导致产量下降。在本研究中, 盐胁迫显著影响棉花脱落率, S2 较 S1 处理脱落率提高了 9.21%~62.29%, 与 Ashraf^[24] 研究结果一致, 高盐胁迫下棉花结果枝数减少, 花铃脱落量增加。Min 等^[25] 研究结果表明, 当用微咸水 ($4.61 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 灌溉时, 随着施氮量的增加, 棉花生物量和产量呈增大趋势, 施氮 360 和 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时总生物量和籽棉产量无显著差异。而在本研究中, 在加气滴灌和施氮 ($200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 条件下, 盐胁迫为 $6.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 棉花的生物量和产量达到最大, 表明加气滴灌下减量施氮保证了干物质的积累和棉花产量。根据土壤盐分水平, 适当使用氮肥可以减轻盐分引起的生长抑制^[3, 26-27], 而过量施氮可能会进一步导致土壤盐碱化, 加剧盐分对作物的危害^[28]。NaCl 浓度较高会导致作物渗透胁迫和二次胁迫, 如营养缺乏和氧化胁迫直接或间接地限制了植株光合作用, 最终造成产量显著降低^[29-31]。在本研究中, 当盐胁迫达到 $12.3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 无论施氮量如何棉花产量间差异不显著, 说明盐分是影响棉花生长的主要因素, 施氮不能减轻生长抑制作用。Chen 等^[6] 通过盆栽棉花发现, 在中盐度土壤中, 适量施肥减轻了生长抑制, 过量施氮会加剧盐分的有害影响; 在高盐度土壤条件下, 棉花生长主要受土壤盐分的影响。本研究结果表明, 盐胁迫加剧, 棉花生长所需最佳施氮量下降。根据土壤盐胁迫程度调整氮肥用量, 中盐胁迫 ($6.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 下, 通过加气和 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量可以最大程度地减小盐胁迫带来的产量减低。而高盐胁迫 ($12.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 下, 低施氮 ($100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 可使产量最大化。

植株各器官中氮含量通常呈铃>叶>茎>根的递减趋势, 盐胁迫水平不同, 各器官中氮含量发生变化。本研究发现, 随着盐胁迫的加剧, 根和茎会吸收更多的氮素。同时, 加气滴灌下, S1N3 和 S2N3

处理的根和茎中氮含量显著增加, 较不加气 (CK) 处理分别提高了 11.27%、16.70% 和 60.62%、40.37%。这是由于棉花根区长时间受到盐胁迫, 导致其需吸收更多的氮以保证棉花正常的营养生长, 而且无论盐胁迫程度如何, 加气能进一步促进根和茎中氮的吸收利用。Shenker 等^[32] 研究表明, 施氮肥可以提高氮素的吸收量, 进而提高棉花产量。Chen 等^[6] 研究表明, 盐度水平为 $2.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, 氮肥施用量分别为 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $405 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 棉花叶中 N 吸收量差异不显著, 当盐度水平达到 $7.7 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 不同氮处理水平下植株各器官氮吸收量无显著差异, 与本研究结论不同。在本研究中, 加气滴灌条件下, 随着施氮量的增加, 植株各器官中氮累积均呈增大趋势。说明加气灌溉可以延长快速氮积累期和促进作物生殖生长, 显著增加作物氮积累^[12]。由此可以看出, 施氮可提高作物耐盐胁迫能力, 加气滴灌可进一步促进作物对氮素的吸收利用。

Jia 等^[33] 研究发现, 盐离子会使与氮素相关性的酶活性显著降低, 导致作物吸收氮素的能力下降。在本研究中, 随着盐胁迫的加剧, 棉花的氮肥利用效率显著降低, 可能由于盐胁迫显著抑制棉花生长, 适量的氮肥可以减轻对棉花的生长抑制, 氮肥的过量会加剧土壤盐渍化程度, 最终导致棉花产量和氮肥吸收利用下降。张允昔等^[34] 研究发现, 棉田氮肥农学利用率和表观利用率均随施氮量的增加而降低, 与本研究结果一致。在本研究中, 随着施氮量的增加, 氮肥农学利用率、氮肥表观利用率和氮肥偏生产力呈减小的趋势, 氮肥生理利用率呈先增后减的趋势。中盐胁迫 ($6.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 下, 施氮量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 氮肥农学利用率和生理利用率较高; 高盐胁迫 ($12.3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 下, 低施氮量 ($100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 提供最佳的氮肥农学利用率、氮肥表观利用率和氮肥偏生产力。研究结果说明, 氮肥利用效率随着施氮量的增加而减低, 尤其在高盐胁迫条件下, 氮肥的使用量远远超过植株所需的氮。

4 结 论

1) 盐胁迫显著抑制棉花生理生长。加气滴灌下, 盐胁迫为 $6.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 适量施氮可减轻盐胁迫对棉花的不利影响, 当盐胁迫达到 $12.3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, 盐分是影响棉花生长的主要因素, 施氮则不能减轻生长抑制。

2) 盐胁迫越严重, 施氮量控制要越精准。加气滴灌下, 盐胁迫分别为 $6.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $12.3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 氮施用量不宜超过 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参 考 文 献:

[1] MA YY, 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.

[2] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.

[3] TUNA A L, KAYA C, ASHRAF M, et al. The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59(2): 173-178.

[4] PESSARAKLI M, HUBER J T, TUCKER T C. Dry matter yield, nitrogen absorption, and water uptake by sweet corn under salt stress[J]. Journal of Plant Nutrition, 1989, 12(3): 279-290.

[5] HOU Z N, CHEN W P, LI X, et al. Effects of salinity and fertigation practice on cotton yield and ¹⁵N recovery[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(10): 1483-1489.

[6] CHEN W P, HOU Z N, WU L S, et al. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment[J]. Plant and soil, 2010, 326(1): 61-73.

[7] CHEN H, SHANG Z, CAI H, et al. Irrigation combined with aeration promoted soil respiration through increasing soil microbes, enzymes, and crop growth in tomato fields[J]. Catalysts, 2019, 9(11): 945.

[8] ZHU Y, CAI H J, SONG L B, et al. Aerated irrigation promotes Soil respiration and microorganism abundance around tomato rhizosphere[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(5): 1343-1355.

[9] OUYANG Z, TIAN J, YAN X, et al. Effects of different concentrations of dissolved oxygen on the growth, photosynthesis, yield and quality of greenhouse tomatoes and changes in soil microorganisms[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106579.

[10] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 223-232.

ZHU Y, CAI H J, SONG L B, et al. Effects of climatic factors and soil parameters on soil respiration under aerated irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 223-232.

[11] BHATTARAI S P, SU N H, MIDMORE D J. Oxygenation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments[J]. Advances in Agronomy, 2005, 88: 313-377.

[12] DU Y D, ZHANG Q, CUI B J, et al. Aerated irrigation improves tomato yield and nitrogen use efficiency while reducing nitrogen application rate[J]. Agricultural Water Management, 2020, 235: 106152.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 186-187.

BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 186-187.

[14] DAI YL, LIAO Z Q, LAI ZL, et al. Interactive effects of planting pattern, supplementary irrigation and planting density on grain yield, water-nitrogen use efficiency and economic benefit of winter wheat in a semi-humid but drought-prone region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 287: 108438.

[15] 韦开, 邓铭江, 王全九, 等. 膜下滴灌微咸水棉花临界氮稀释曲线模型与氮肥用量推荐[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 124-132.

WEI K, DENG M J, WANG Q J, et al. Nitrogen application rates from dilution curve model for cotton under film-mulched drip irrigation with brackish water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(7): 124-132.

[16] ZHAO H, LI L, FAN G H, et al. Effects of aerated brackish water irrigation on growth of *Lycium barbarum* seedlings[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 310: 111721.

[17] LI Y, JIA Z X, NIU W Q, et al. Effect of post-infiltration soil aeration at different growth stages on growth and fruit quality of drip-irrigated potted tomato plants (*Solanum lycopersicum*) [J]. PLoS One, 2015, 10(12): e0143322.

[18] LI Y, NIU W Q, CAO X S, et al. Effect of soil aeration on root morphology and photosynthetic characteristics of potted tomato plants (*Solanum lycopersicum*) at different NaCl salinity levels[J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1): 331.

[19] GREER D H. Photosynthetic light responses of apple (*Malus domestica*) leaves in relation to leaf temperature, CO₂ and leaf nitrogen on trees grown in orchard conditions[J]. Functional Plant Biology, 2018, 45(11): 1149-1161.

[20] 陈金陵, 杨启良, 刘小刚, 等. 盐胁迫条件下施氮对小桐子光合特性的调控效应[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(7): 631-638.

CHEN J L, YANG Q L, LIU X G, et al. Responses of nitrogen supply on photosynthesis of *Jatropha curcas* L. under salt stress[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(7): 631-638.

[21] 马梦茹. 盐胁迫对黑果枸杞光合生理特性及生长的影响[D]. 西宁: 青海大学, 2018.

MA M R. Effects of salt stress on photosynthetic physiological characteristics and growth of black fruit *Lycium barbarum* [D]. Xining: Qinghai University, 2018.

[22] GOUJA H, GHORBAL M H, TOURAINE B. Effects of NaCl on flows of N and mineral ions and on NO₃-reduction rate within whole plants of salt-sensitive bean and salt-tolerant cotton[J]. Plant Physiology, 1994, 105(4): 1409-1418.

[23] 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 Z H, HAN M Q, SONG L B, 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, 2022, 38(14): 108-116.

[24] ASHRAF M. Salt tolerance of cotton: some new advances[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2002, 21(1): 1-30.

[25] MIN W, HOU Z A, MA LJ, et al. Effects of water salinity and N application rate on water and N use efficiency of cotton under drip irrigation[J]. Journal of Arid Land, 2013, 6(4): 454-467.