

SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗生长及 光合特性的影响

王立红,李星星,孙影影,阿曼古丽·买买提阿力,
拉扎提·努尔布拉提,张巨松

(新疆农业大学农学院/教育部棉花工程研究中心,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 研究水杨酸(SA)浸种对盐胁迫下棉花幼苗光合特性的影响,以 2 个对盐胁迫敏感程度不同的“中棉所 41 号(耐盐品种)”和“中棉所 49 号(中等耐盐品种)”棉花品种为试验材料,采用盆栽培养法,研究不同浓度 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗生长、光合及叶绿素荧光动力学的影响。结果显示:(1) 0.80%NaCl 致使两棉花品种的株高、叶面积、干物质积累量、叶绿素含量以及净光合速率下降,且叶片的 PSII 反应中心和受体侧受到伤害,其中中棉所 41 号的净光合速率比未用 NaCl 处理的降低 17.19%,中棉所 49 号的降低 19.46%。(2) SA 浸种处理可以减缓盐胁迫对棉花的伤害,促进植株生长,有效地调节光合结构和气孔开度,促进光合色素的积累。(3) SA 能引发棉花的自我抵御盐胁迫机制,0.80%NaCl 胁迫下,0.05 mmol·L⁻¹SA 的缓解效果优于 0.10 mmol·L⁻¹SA 处理。0.05 mmol·L⁻¹SA 浸种对棉花盐胁迫的幼苗生长有促进作用,从而抵御盐胁迫逆境的伤害。

关键词: 水杨酸(SA)浸种;NaCl 胁迫;棉花幼苗;植株生长;光合色素;叶绿素荧光动力学

中图分类号: S562; S503.4 **文献标志码:** A

Effects of soaking seeds with salicylic acid on cotton seedling growth and photosynthetic characteristics under salt stress

WANG Li-hong, LI Xing-xing, SUN Ying-ying, Amanguli·Maimaitiali,
Lazhati·Nuerbulati, ZHANG Ju-song

(College of Agronomy, Xinjiang University/Research Center of Cotton Engineering, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: To study the effect of soaking seeds with salicylic acid (SA) on cotton seedling's photosynthetic characteristics under salt stress, “Zhongmiansuo 41 (salt tolerance variety)” and “Zhongmiansuo 49 (less salt tolerance variety)” was used in the pot experiment. Cotton seedling's growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence dynamics under NaCl stress were measured. The result was as follows: (1) For 0.80% NaCl, plant height, leaf area, dry weight, chlorophyll content and net photosynthesis rate were decreased, and leaf PSII reaction center and the acceptor were injured. Compared with no NaCl, net photosynthetic rate of Zhongmiansuo 41 was decreased by 17.19% and Zhongmiansuo49 decreased by 19.46%. (2) Seed SA soaking slowed down the salty stress injury and was helpful for plant growth, photosynthesis structure and stomata opening, and could promote the photosynthesis pigment accumulation as well. (3) SA could initiate the self-resistance against salt stress of cotton seedlings and the effect of 0.05 mmol·L⁻¹ SA was better than 0.10 mmol·L⁻¹, indicating that seed soaking with 0.05 mmol·L⁻¹ SA could promote the growth and resist the damage caused by salt stress.

Keywords: soaking seeds with salicylic acid; NaCl stress; cotton seedling; plant growth; photosynthetic pigment; chlorophyll fluorescence kinetics

棉花是改良盐碱地较理想的先锋作物,但盐分严重影响棉花在萌发和苗期阶段的生长,大量研究证明,添加外源物质可以提高棉花^[1]、玉米^[2]、大豆^[3]等作物的耐盐性,例如水杨酸(SA)是一种内源

收稿日期:2016-01-24
基金项目:国家“十二五”科技支撑项目(2014BAD11B02),新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAUGRI2015019)
作者简介:王立红(1990—),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事棉花逆境生理研究。E-mail:1498877605@qq.com。
通信作者:张巨松(1963—),男,江苏江都人,教授,主要从事作物高产栽培生理生态研究。E-mail:xjndzjs@163.com。

信号物质和新型的植物调节剂,可诱导植物产生抗病、抗盐、抗热、抗寒和抗旱^[3-8]等特性。有研究表明 SA 可以调节植物叶片气孔关闭,降低叶片蒸腾速率^[9],显著提高盐胁迫下黄瓜叶片净光合速率、胞间 CO₂ 浓度和气孔导度^[10],有效维持胁迫下叶肉细胞较高的光化学效率和电子传递速率,缓解由于过剩激发能的增加而引起的光抑制,减轻光合机构受伤害的程度^[11];研究同时表明黄瓜幼苗叶片净光合速率、荧光参数和光能分配对 SA 的响应存在明显的浓度依赖性,SA 对黄瓜叶片光合的正负调节作用与浓度依存下的 PS II 活性和光能分配改变有关^[12]。有研究表明 SA 浸种能够显著提高棉花盐胁迫条件下棉花种子发芽率和发芽势等^[13],而 SA 浸种处理对盐胁迫下棉花后期幼苗的影响鲜见报道。本研究采用 0.80% NaCl 胁迫及 SA 浸种处理,采用持续胁迫方式培养材料,探讨棉花幼苗光合与荧光特性变化,研究 SA 浸种对棉花的正调节作用,以期作为盐碱地生长的棉花大田栽培技术及制种业提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015 年 3—5 月在新疆农业大学教育部棉花工程研究中心棉花生理室进行。供试棉花品种是由新疆农业科学院经济作物研究所提供的“中棉所 41 号(耐盐品种)”和“中棉所 49 号(中等耐盐品种)”,精选饱满一致的种子,用 0.1% HgCl₂ 消毒 10 min,蒸馏水冲洗 5 次,浸种试验的种子用不同浓度的 SA 溶液浸种 24 h,其它处理的种子用蒸馏水浸种 24 h。将 1:1(v/v)草炭、蛭石复合基质于 120℃ 高温灭菌 24 h,按 NaCl 盐(分析纯)与复合基质重量比设置 0、0.80% 两个处理水平,两品种的试验处理为 CK (0% NaCl + 0 mmol·L⁻¹ SA)、T1 (0.80% NaCl + 0 mmol·L⁻¹ SA)、T2 (0.80% NaCl + 0.05 mmol·L⁻¹ SA)、T3 (0.80% NaCl + 0.10 mmol·L⁻¹ SA),加蒸馏水至基质含水量约 35%,充分拌匀,装于塑料营养钵(直径 12 cm×高 11 cm),土层高约 8 cm。选择之前处理过的露白一致的种子种入营养钵,每营养钵 6 粒,用复合基质(NaCl 处理的复合基质加入 NaCl 盐)覆盖 2~3 cm,铺平压紧,营养钵口覆一层塑料膜保湿,每品种每处理各 18 个营养钵。置于光照培养室内,白天温度(28±2)℃,光强 400~600 μmol·m⁻²·s⁻¹,11 h;夜间温度(22±2)℃,光强 0 μmol·m⁻²·s⁻¹,13 h,相对湿度(RH)70%,每个处理在播种后第 7 d 将塑料膜揭去,第 10 d 剔去弱苗,每个营养钵保

证 3~4 株棉苗。

1.2 测定项目与数据处理

1.2.1 幼苗生长指标测定 第一片真叶完全展开时测定:直尺测量基质表面至植株生长点高度,即株高,20 次重复;用“长×宽”系数法测定第一片真叶面积,系数取 0.84,5 次重复;植株鲜重及干重采用称量法测定,3 次重复;

1.2.2 光合指标的测定 光合色素含量的测定采用 95% 乙醇浸泡法,测其第一片真叶,在 663 nm、645 nm 和 470 nm 波长下比色,测得叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)和类胡萝卜素含量(Car),3 次重复。按下列公式计算:

$$\text{叶绿素 a (mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{): Chla} = (12.71A_{663} - 2.59A_{645})V / (1000W)$$

$$\text{叶绿素 b (mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{): Chlb} = (22.88A_{645} - 4.67A_{663})V / (1000W)$$

$$\text{叶绿素总量 (mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{): Chla} + \text{Chlb} = (8.04A_{663} + 20.29A_{645})V / (1000W)$$

$$\text{类胡萝卜素含量 (mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{): Car} = (1000A_{470} - 3.27Ca - 104Cb) / 229$$

光合参数采用 CARIS-2 型便携式光合仪(PP Systems,英国)在第一片真叶完全展开时测定,标记植株第一片真叶,测定净光合速率(P_n)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、蒸腾速率(E)和气孔导度(G_s)指标,测定过程中光强为 400 μmol·m⁻²·s⁻¹,大气温度 25±1℃,大气 CO₂ 浓度(C_a)变化范围为 400±10 μmol·L⁻¹,气孔限制值(L_s)=1- C_i/C_a (C_a 为样品室 CO₂ 浓度),水分利用效率(WUE)= P_n/E 。每次测定采用随机选取方式,所有参数数据均为 5 次重复。

1.2.3 快速叶绿素荧光诱导动力学的测定 参考李鹏民的方法^[14],采用植物光合效率仪 Handy PEA (Hansatech,英国)与气体交换参数同步测定第一片真叶的快速叶绿素荧光诱导动力学曲线及其参数,测定之前先将叶片暗适应 30 min,每个重复 5 次,所有参数数据为 5 次重复的平均值,相关参数的推导、运算及生理意义参见李鹏民^[14-15]的方法。

1.2.4 数据处理方法 采用 Microsoft Office Excel 2010 软件处理数据和绘图,采用 DPS 6.05 软件进行数据统计分析,采用最小显著极差法(LSD)进行差异显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗生长特性的影响

2.1.1 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗株高和叶面积的影响 由表 1 可知,0.80% NaCl 胁迫致使中

棉所 41 号和中棉所 49 号的株高和叶面积显著下降,株高分别降低 39.60%和 48.19%;叶面积分别降低 25.77%和 32.86%。由此可知,0.80%的 NaCl 对棉花植株的株高影响大于叶面积,中棉所 49 号的降幅大于中棉所 41 号,这与两品种的耐盐性一致。

从浸种处理看,0.05 mmol·L⁻¹SA 效果较好,且两品种表现一致,株高分别比单盐处理提高 4.63%和 20.36%,叶面积分别提高 16.17%和 24.04%。说明适宜浓度的 SA 浸种可缓解 0.80%NaCl 对植株的伤害,有利于植株株高和叶面积的生长。

表 1 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗生长特性的影响
Table 1 Effect of SA on growth of cotton seedlings under NaCl stress

品种 Variety	处理 Treatment	株高 Plant height /cm	叶面积 Leaf area /cm ²	干物质量 Dry weight/(mg·plant ⁻¹)					根冠比 Root-shoot ratio
				根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	植株干重 Total dry weight	地上干重 Shoot dry weight	
中棉所 41 号 Zhongmian suo 41	CK	12.88±2.29a	15.83±2.74a	22.28±1.19a	64.05±3.45a	117.10±1.12a	203.43±5.76a	181.15±4.58a	0.123±0.004a
	T1	7.78±0.89b	11.75±2.32b	13.28±2.77c	39.25±5.17d	76.48±8.28c	128.99±16.21c	115.72±3.45c	0.114±0.011a
	T2	8.14±0.89b	13.65±1.71b	18.77±1.82ab	46.18±1.83b	96.85±3.94b	161.79±5.47b	143.02±5.77b	0.131±0.008a
	T3	7.91±1.17b	12.50±2.17b	16.38±1.62bc	42.32±2.19c	80.76±0.90c	139.45±1.03c	123.08±6.95c	0.133±0.013a
中棉所 49 号 Zhongmian suo 49	CK	12.70±1.64a	15.49±1.19a	19.32±0.33a	58.07±6.65a	98.72±13.77a	176.11±2.16a	156.79±7.42a	0.124±0.003a
	T1	6.58±1.19c	10.40±1.88c	11.45±0.54c	34.04±0.74c	65.75±0.39c	111.23±0.96c	99.79±1.14c	0.112±0.004ab
	T2	7.92±0.42b	12.90±2.48b	14.97±0.67b	42.21±0.45b	82.33±4.20b	139.50±3.97b	124.54±4.65b	0.120±0.011ab
	T3	7.68±0.77b	11.05±2.49bc	11.29±0.06c	39.46±0.54bc	73.23±1.01bc	123.97±1.62bc	112.68±1.56bc	0.100±0.001b

注:同一品种同一列的不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,所有数据均为平均值及其标准差。下同
Note:The different lowercase in the same column for the same variety means significant difference at 0.05 level. The data are means ± SD. The same as below.

2.1.2 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗植株干重积累及分配的影响 从表 1 可知,0.80%NaCl 胁迫(T1)对棉花干物质积累造成显著影响,中棉所 41 号的根、茎、叶分别比 CK 降低 40.39%、38.72%、34.69%,而中棉所 49 号的分别降低 40.73%、41.38%、33.40%,对于植株干重,中棉所 41 号和中棉所 49 号分别降低 36.59%和 36.84%,地上干重分别降低 36.12%和 36.35%。相比而言,NaCl 对植株根与茎的伤害大于叶,对地下部分的伤害大于地上部分。从 SA 浸种处理看,0.05 mmol·L⁻¹SA 使中棉所 41 号根、茎、叶干物质质量分别提高 41.34%、17.66%、26.63%,中棉所 49 号的分别提高30.74%、24.00%、25.22%,说明适宜浓度的 SA 对植株部位的缓解大小分别为:根>叶>茎,这可能与外施的方式有关。此外 0.05 mmol·L⁻¹SA 使中棉所 41 号和中棉所 49 号的植株干重分别提高 25.43%和 25.42%,地上干重分别提高 23.59%和 24.80%。从根冠比可以看出,0.80%NaCl 胁迫对其影响不大,SA 浸种处理对其影响也不显著,仅是中棉所 49 号的 T3 处理显著低于其它处理,这是由于中棉所 49 号根部干物质质量的减少。

2.2 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片光合参数的影响

2.2.1 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片光合色素含量的影响 叶绿素是光合作用的光能捕获物

质基础,Chla 主要存在于反应中心,Chlb 更多的存在于捕获光色素蛋白^[16],而 Car 可以猝灭三线态叶绿素和清除胁迫下的氧自由基,从而避免对 PSII 反应中心的破坏^[17]。本研究发现(表 2),0.80%NaCl 胁迫和 SA 缓解处理对植株叶片的 Chla、Chla + Chlb 造成显著性影响,而又同时对 Chlb、Car 和 Chla/Chlb 影响不大。不同的品种表现不同,中棉所 41 号的 Chla、Chla + Chlb 在盐胁迫下分别降低了 13.44%和 10.46%,中棉所 49 号分别下降了 15.16%和 16.26%。说明 0.80%NaCl 胁迫对棉花叶片 Chla 的影响大于 Chlb 的影响,而对 Car 和 Chla/Chlb 的影响较小,SA 对 NaCl 的缓解效应在 Chlb、Car 上的表现不明显,仅在 Chla 上的表现显著。

2.2.2 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片光合参数的影响 由表 3 可知,SA 对 NaCl 胁迫下棉花叶片的光合参数影响较显著,单盐处理(T1)与对照(CK)相比,Ci、Gs 和 Pn 都降低,说明 0.80%NaCl 胁迫造成的 Pn 下降的主要因素是气孔因素。对于中棉所 41 号来说,0.05 mmol·L⁻¹SA 比单盐处理的 Ci、E、Gs、Pn 提高 6.09%、14.06%、18.85%、10.42%,中棉所 49 号的提高了 23.90%、15.00%、8.15%、12.87%。这说明 Pn 的增大与 Ci 和 Gs 的升高密不可分,而单盐处理下 E 的降低可以理解为是棉花的一种保护机制。SA 可以较显著地降低 NaCl 胁迫下棉花叶片的 Ls,甚至低于对照,证明 SA 之

所以能够提高叶片 P_n , 是因为 SA 可以调节棉花叶片的气孔开度。由表 3 可以看出, WUE 与蒸腾速率 E 的变化趋势一致, 进一步证明盐胁迫下棉花的自我保护机制。

2.3 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片叶绿素荧光动力学曲线的影响

据图 1 叶绿素荧光动力学曲线可知, 不同处理的荧光诱导曲线形状发生了一定的改变, 对照和单盐处理比较, 曲线变化不明显, 仅是对照在 P 相的荧光强度明显大于单盐处理, 而浸种处理的 J 相、I 相和 P 相的荧光强度明显高于对照和单盐处理, 中棉所 41 号的处理在 J 相表现明显, 中棉所 49 号的在 I 相表现明显, 从 P 相可以明显分辨出 $0.05\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SA 浸种荧光强度值最大, 两品种表现一致。

2.4 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片叶绿素荧光动力学参数的影响

2.4.1 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 PI abs 的影响 从表 4 可以看出, 0.80% NaCl 处理促使 F_v/F_m 和 F_v/F_o 减小, 中棉

所 41 号分别减小了 1.43% 和 3.98% , 中棉所 49 号分别减小了 1.79% 和 5.12% , 而两浸种处理的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 都有所增加, 但不明显。说明 NaCl 胁迫会使棉花幼苗 PSII 反应中心光能利用效率和潜在活性降低, 而 SA 对其的改善并没有太大意义。对于 PI abs 来说, 单盐处理与对照比呈现下降趋势, $0.05\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SA 分别使中棉所 41 号与中棉所 49 号的单盐处理提高了 8.40% 和 7.35% , 说明 SA 对 NaCl 胁迫有一定的改善作用。

2.4.2 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片 PSII 受体侧的影响 从表 4 可以看出, 不同处理可使棉花幼苗的荧光参数呈现规律性变化, 单盐处理与对照比较, Ψ_0 、 Φ_{E0} 、 S_m 下降, V_j 和 V_i 上升, 表明光合机构被破坏, Ψ_o 下降, V_j 上升, 表明叶片暴露在光下 2 ms 时 Q_A^- 的最大积累量增加, 说明此时 PSII 受体侧的相对电子传递能力下降。I 相与 PQ 库的异质性有关, V_i 上升, 表明盐胁迫使得 30 ms 时 PSII 受体侧的相对电子传递能力下降, 进一步说明 0.80% NaCl 胁迫下棉花叶片的 PSII 受体侧受到伤害。

表 2 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片光合色素含量的影响

Table 2 Effect of SA on photosynthetic pigment content in cotton seedling under NaCl stress						
品种 Variety	处理 Treatment	Chla /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Chlb /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Chla + Chlb /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Car /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Chla/Chlb
中棉所 41 号 Zhongmiansuo 41	CK	$2.076 \pm 0.069\text{a}$	$0.781 \pm 0.102\text{a}$	$2.857 \pm 0.134\text{a}$	$5.871 \pm 0.283\text{a}$	$2.699 \pm 0.403\text{a}$
	T1	$1.830 \pm 0.044\text{b}$	$0.740 \pm 0.100\text{a}$	$2.570 \pm 0.094\text{b}$	$5.630 \pm 0.577\text{a}$	$2.509 \pm 0.350\text{a}$
	T2	$1.918 \pm 0.293\text{ab}$	$0.742 \pm 0.067\text{a}$	$2.660 \pm 0.230\text{ab}$	$5.714 \pm 0.423\text{a}$	$2.624 \pm 0.633\text{a}$
	T3	$1.851 \pm 0.127\text{ab}$	$0.741 \pm 0.141\text{a}$	$2.592 \pm 0.064\text{b}$	$5.672 \pm 0.238\text{a}$	$2.573 \pm 0.592\text{a}$
中棉所 49 号 Zhongmiansuo 49	CK	$1.814 \pm 0.081\text{a}$	$0.406 \pm 0.219\text{a}$	$2.220 \pm 0.282\text{a}$	$5.877 \pm 0.756\text{a}$	$5.642 \pm 3.461\text{a}$
	T1	$1.539 \pm 0.151\text{b}$	$0.321 \pm 0.040\text{a}$	$1.859 \pm 0.111\text{b}$	$5.282 \pm 0.146\text{a}$	$4.868 \pm 1.078\text{a}$
	T2	$1.714 \pm 0.124\text{ab}$	$0.345 \pm 0.042\text{a}$	$2.059 \pm 0.166\text{ab}$	$5.657 \pm 0.307\text{a}$	$4.993 \pm 0.239\text{a}$
	T3	$1.594 \pm 0.033\text{b}$	$0.336 \pm 0.022\text{a}$	$1.930 \pm 0.077\text{ab}$	$5.424 \pm 0.189\text{a}$	$4.912 \pm 0.159\text{a}$

表 3 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片光合参数的影响

Table 3 Effect of SA on photosynthetic parameters in cotton seedling under NaCl stress							
品种 Variety	处理 Treatment	G_i /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	E /($\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	G_s /($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	L_s	WUE /($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)
中棉所 41 号 Zhongmiansuo 41	CK	$277.000 \pm 12.829\text{a}$	$1.988 \pm 0.017\text{a}$	$94.750 \pm 3.242\text{a}$	$6.863 \pm 0.752\text{a}$	$0.367 \pm 0.029\text{ab}$	$3.452 \pm 0.143\text{a}$
	T1	$268.167 \pm 19.156\text{a}$	$1.600 \pm 0.110\text{b}$	$73.833 \pm 2.317\text{b}$	$5.683 \pm 0.643\text{b}$	$0.382 \pm 0.041\text{a}$	$3.698 \pm 0.139\text{a}$
	T2	$284.500 \pm 13.077\text{a}$	$1.825 \pm 0.050\text{ab}$	$87.750 \pm 7.848\text{ab}$	$6.275 \pm 1.102\text{ab}$	$0.335 \pm 0.031\text{b}$	$3.496 \pm 0.106\text{a}$
	T3	$280.600 \pm 14.328\text{a}$	$1.620 \pm 0.049\text{b}$	$75.750 \pm 3.200\text{b}$	$6.020 \pm 0.706\text{b}$	$0.346 \pm 0.033\text{ab}$	$3.511 \pm 0.127\text{a}$
中棉所 49 号 Zhongmiansuo 49	CK	$260.400 \pm 14.843\text{b}$	$1.920 \pm 0.084\text{a}$	$92.800 \pm 5.675\text{a}$	$6.820 \pm 0.719\text{a}$	$0.376 \pm 0.035\text{a}$	$3.550 \pm 0.205\text{a}$
	T1	$246.333 \pm 13.126\text{b}$	$1.600 \pm 0.058\text{a}$	$79.333 \pm 4.685\text{a}$	$5.493 \pm 1.762\text{c}$	$0.409 \pm 0.079\text{a}$	$3.867 \pm 0.120\text{a}$
	T2	$305.200 \pm 19.409\text{a}$	$1.840 \pm 0.070\text{a}$	$85.800 \pm 8.319\text{a}$	$6.200 \pm 0.416\text{ab}$	$0.263 \pm 0.050\text{b}$	$3.602 \pm 0.178\text{a}$
	T3	$297.500 \pm 13.435\text{a}$	$1.750 \pm 0.012\text{a}$	$82.500 \pm 3.536\text{a}$	$5.850 \pm 1.626\text{bc}$	$0.281 \pm 0.032\text{b}$	$3.708 \pm 0.031\text{a}$

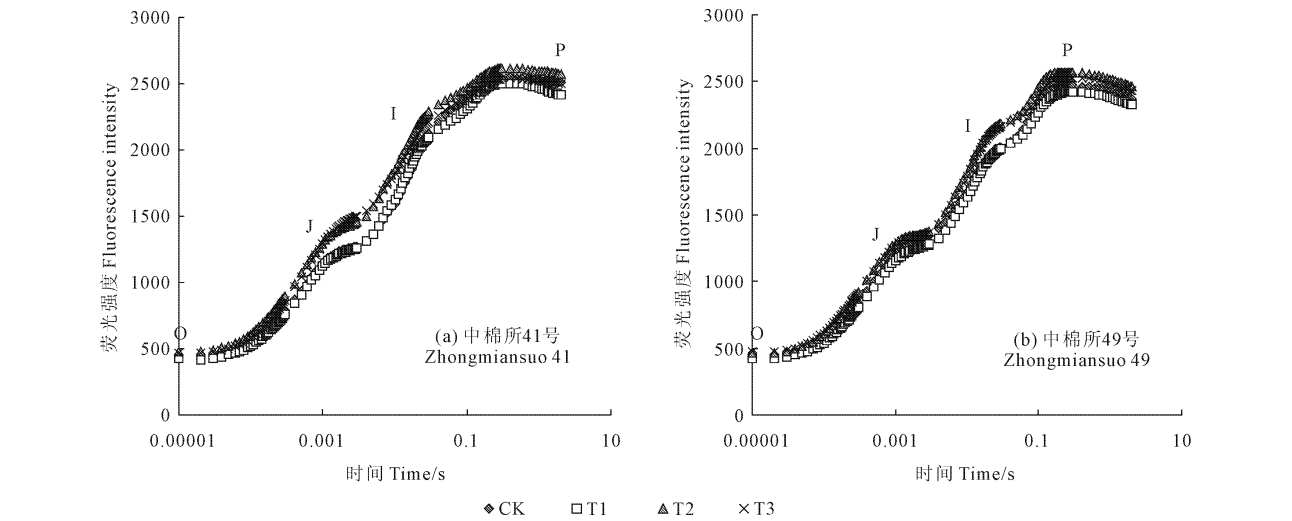


图 1 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片叶绿素荧光动力学曲线的影响

Fig.1 Effect of SA on chlorophyll fluorescence kinetics curve of cotton seedlings under NaCl stress

表 4 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effect of SA on chlorophyll fluorescence parameters in cotton seedling under NaCl stress

品种 Variety	处理 Treatment	F_v/F_m	F_v/F_o	PI abs	PSII 受体侧				
					Ψ_0	Φ_{EO}	S_m	V_j	V_i
中棉所 41 号 Zhongmiansuo 41	CK	$0.841 \pm 0.005a$	$5.201 \pm 0.182a$	$8.935 \pm 0.716a$	$0.610 \pm 0.013a$	$0.510 \pm 0.011a$	$25.598 \pm 2.399a$	$0.390 \pm 0.013b$	$0.769 \pm 0.013c$
	T1	$0.829 \pm 0.014b$	$4.994 \pm 0.094a$	$7.807 \pm 0.847b$	$0.556 \pm 0.048b$	$0.488 \pm 0.020b$	$22.781 \pm 2.321b$	$0.422 \pm 0.024a$	$0.815 \pm 0.019a$
	T2	$0.836 \pm 0.007ab$	$5.161 \pm 0.164a$	$8.463 \pm 1.211ab$	$0.564 \pm 0.022b$	$0.492 \pm 0.009b$	$23.590 \pm 1.612b$	$0.410 \pm 0.015a$	$0.785 \pm 0.034bc$
	T3	$0.834 \pm 0.014ab$	$5.052 \pm 0.479a$	$8.143 \pm 1.160ab$	$0.561 \pm 0.019b$	$0.489 \pm 0.011b$	$23.317 \pm 1.234b$	$0.413 \pm 0.012a$	$0.808 \pm 0.026ab$
中棉所 49 号 Zhongmiansuo 49	CK	$0.837 \pm 0.007a$	$5.055 \pm 0.220a$	$8.837 \pm 0.861a$	$0.584 \pm 0.037a$	$0.496 \pm 0.040a$	$22.827 \pm 1.844a$	$0.405 \pm 0.028b$	$0.771 \pm 0.010c$
	T1	$0.822 \pm 0.020b$	$4.796 \pm 0.123b$	$7.602 \pm 0.023b$	$0.541 \pm 0.007b$	$0.442 \pm 0.013b$	$18.974 \pm 0.007b$	$0.444 \pm 0.028a$	$0.835 \pm 0.001a$
	T2	$0.835 \pm 0.009ab$	$4.991 \pm 0.166ab$	$8.161 \pm 0.734ab$	$0.579 \pm 0.017ab$	$0.487 \pm 0.015a$	$19.999 \pm 0.576b$	$0.421 \pm 0.017ab$	$0.812 \pm 0.009b$
	T3	$0.830 \pm 0.011ab$	$4.905 \pm 0.180ab$	$8.023 \pm 0.364ab$	$0.570 \pm 0.010ab$	$0.477 \pm 0.010a$	$19.404 \pm 0.410b$	$0.422 \pm 0.007ab$	$0.824 \pm 0.007ab$

注： F_v/F_m :PSII 最大光化学效率； F_v/F_o :PSII 潜在活性；PI abs:光化学性能指数； Ψ_0 :捕获的激子将电子传递到电子传递链中 Q_A^- 下游的其它电子受体的概率； Φ_{EO} :用于电子传递的量子产额； S_m :标准化的互补面积； V_j :在 J 相的相对可变荧光； V_i :在 I 相的相对可变荧光。

Note: F_v/F_m : Maximum photochemistry efficiency of PSII; F_v/F_o : potential activity of PSII; PI abs: Performance index on absorption basis; Ψ_0 : probability that a trapped exciton moves an electron into the electron transport chain beyond Q_A^- ; Φ_{EO} : quantum yield for electron transport; S_m : Normalized complementary area above the OJIP transient; V_j : Relative variable fluorescence at the J- step; V_i : Relative variable fluorescence at the I- step.

2.4.3 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片 PSII 反应中心的影响 从表 5 可以看出,不同处理对棉花幼苗单位受光面积各种量子效率的影响不一致,两品种表现也有差异。 ABS/CS_0 、 DI_0/CS_0 在 0.80% NaCl 胁迫下都增大,而 TR_0/CS_0 、 ET_0/CS_0 都减小。在 SA 浸种处理下,两品种的 ABS/CS_0 分别与其单盐处理间都表现不显著,而 DI_0/CS_0 、 TR_0/CS_0 、 ET_0/CS_0 表现显著。中棉所 41 号 T2 的 DI_0/CS_0 比 T1 的减少 8.31%,而中棉所 49 号的减少 12.48%。中棉所 41 号 T2 的 TR_0/CS_0 和 ET_0/CS_0 分别比 T1 增加 6.40% 和 4.60%,而中棉所 49 号的分别增加 5.99% 和 7.34%。

3 讨 论

3.1 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗生长特性的影响 土壤中的盐分对棉花生长和发育具有双重影响,低浓度有促进作用,高浓度则有阻碍作用^[18]。本研究表明 0.80% NaCl 胁迫严重影响了棉苗的生长,SA 浸种处理可以缓解 NaCl 带来的部分伤害,0.05 mmol·L⁻¹ 和 0.10 mmol·L⁻¹ SA 浸种可提高 0.80% NaCl 胁迫下棉花的株高、叶面积和干物质积累量,并且 0.10 mmol·L⁻¹ SA 对盐害的缓解力度小于 0.05 mmol·L⁻¹,甚至在一些方面不利于盐害缓解,从中棉所 49 号的根部可以看出,0.10 mmol·L⁻¹

SA 浸种下其根干重不及单盐处理,原因可能是:(1) SA 浓度过高,而与其相应的茎和叶的干物质质量却提高,可能是因为根部是最敏感的部位,也是与盐胁迫抗衡的直接部位,高浓度 SA 对植株的伤害会反应在根部,而没有达到伤害其茎和叶的浓度;(2) SA 外施方式的影响,由于本试验选用的是 SA 浸种,对

其根系的影响较大,而随着植株的生长,植株对 SA 的接受浓度范围也逐渐增大,茎与叶并没有受到 SA 的伤害,而两品种间仅有中棉所 49 号有此种现象,也正是说明了中棉所 49 号较敏感,或者说是两品种的基因型不同导致。

表 5 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片 PSII 反应中心的影响
Table 5 Effect of SA on PSII reaction center of cotton seedlings under NaCl stress

品种 Variety	处理 Treatment	ABS/CS_0	DI_0/CS_0	TR_0/CS_0	ET_0/CS_0
中棉所 41 号 Zhongmiansuo 41	CK	403.333 ± 5.060b	64.151 ± 3.184c	365.350 ± 6.092a	215.662 ± 1.488a
	T1	424.125 ± 3.428a	76.995 ± 3.319a	333.880 ± 2.766b	189.616 ± 2.658b
	T2	410.833 ± 3.182ab	70.594 ± 5.961b	355.239 ± 4.909a	198.340 ± 5.072b
	T3	420.857 ± 3.155ab	72.972 ± 9.118ab	350.742 ± 6.333ab	191.397 ± 1.007b
中棉所 49 号 Zhongmiansuo 49	CK	418.500 ± 4.015a	66.292 ± 4.834b	347.208 ± 3.990a	207.789 ± 1.887a
	T1	432.000 ± 9.900a	78.163 ± 0.930a	324.837 ± 7.555b	183.202 ± 3.542b
	T2	423.714 ± 5.997a	68.411 ± 2.177b	344.304 ± 7.155ab	196.642 ± 8.880ab
	T3	426.800 ± 2.911a	71.464 ± 4.698b	337.136 ± 4.637ab	190.068 ± 7.640b

注: ABS/CS_0 :单位反应面积吸收的能量; DI_0/CS_0 :单位反应面积热耗散的能量; TR_0/CS_0 :单位反应面积捕获的能量; ET_0/CS_0 :单位反应面积用于电子传递的能量。
Note: ABS/CS_0 : Absorption flux per cross section (CS_0); DI_0/CS_0 : Dissipated energy flux per CS_0 ; TR_0/CS_0 : Trapped energy flux per CS_0 ; ET_0/CS_0 : Electron transport flux per CS_0 .

3.2 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗光合指标的影响

盐胁迫对植物的影响尤以光合作用最为突出。通常将影响植物光合作用的因素分为气孔因素和非气孔因素^[18],本研究在 0.80% NaCl 胁迫下,中棉所 41 号和中棉所 49 号的 P_n 下降主要原因是气孔因素,这与杨淑萍^[19]的低浓度盐胁迫研究和 Farquhar^[20]的理论一致。此外本研究还发现 SA 可以改善叶片气孔开度,调节光合作用,提高棉花对盐胁迫的抵抗能力,促进植株自身 C_i 与 G_s 的提高。张志刚^[10]研究 SA 可以降低 P_n 、 C_i 、 G_s 降幅,王晓黎^[12]研究黄瓜幼苗叶片 P_n 、荧光参数和光能分配对 SA 的响应存在明显的浓度依赖性,说明 SA 可以调节光合作用。但与任菲^[9]认为 SA 可以调节叶片气孔关闭,降低蒸腾速率不符。本研究发现 SA 可提高叶片叶绿素含量,与王玉萍等^[21]在花椰菜上的研究一致,叶绿素含量的提高可能也是 SA 对光合调节的一方面,本文以 0.05 mmol·L⁻¹效果最好。

3.3 SA 浸种对 NaCl 胁迫下棉花幼苗叶绿素荧光动力学的影响

叶绿素荧光参数与“表观性”的气体交换参数相比,更能反映光合作用的“内在性”特征^[22],同时它也是检验植物胁迫伤害程度的指标^[23]。通过对棉

花叶片叶绿素荧光动力学曲线(图 1)分析,发现动力学曲线中 K 拐点不明显,而 K 点的出现是放氧复合体(OEC)受伤害的标志^[24],从而说明 PSII 供体侧没有受到明显伤害。本研究从 PSII 受体侧与反应中心两方面的叶绿素荧光参数来探讨,发现 NaCl 处理对棉花叶片的光合结构产生了破坏作用,限制了光合色素的合成,降低了电子传递速率,这可能与 PSII 反应中心失活有关^[25],即 0.80% NaCl 胁迫对棉花叶片 PSII 受体侧和 PSII 反应中心造成伤害,而李旭新^[26]在黄连木上的研究发现盐胁迫对黄连木叶片 OEC、PSII 受体侧和 PSII 反应中心都造成了伤害,两者不一致可能是由于物种的不同或者是 NaCl 胁迫浓度的不同。就 SA 的缓解效应来看, F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 Ψ_0 、 $\Phi E0$ 、PI abs 都有不同程度的增加,且反应中心各指标也有明显改善,说明 SA 浸种对植物苗期在盐胁迫下的生长有一定缓解促进作用。

有些学者^[27]认为 SA 浸种处理仅仅只是对植株发芽阶段产生促进影响,但本研究发现 SA 浸种试验可以提高棉花第一片真叶的净光合速率,这与 Arfan^[28]发现在盐胁迫下外源 SA 预处理春小麦同样能够提高小麦的光合色素和类胡萝卜素,改善并提高小麦的光合能力类似。SA 浸种对植株子叶期生长起到了一定作用,引发了棉苗自身对盐胁迫的抵

抗能力,当然这种抵抗能力因品种和 SA 浓度而异。本研究结果表明,0.05 mmol·L⁻¹SA 浸种 24 h,对缓解 0.80%NaCl 胁迫最好。此外 SA 浸种可以促使棉苗第一片真叶 *Pn* 的提高,其原因是多方面的:(1) SA 可以有效地促进光合色素的积累,为 *Pn* 的提高打开“绿色通道”;(2) SA 可以调节叶片气孔的开放,为棉花提高自身抗盐能力奠定基础;(3) 从叶绿素荧光方面考虑,SA 可以缓解盐胁迫下叶片光合结构的破坏,促进电子能量的传递,有助于 PSII 的反应中心 *TR*₀/*CS*₀ 和 *ET*₀/*CS*₀ 的提高及 *DI*₀/*CS*₀ 的降低,促进棉花自我调节能力的产生。

参 考 文 献:

[1] 袁 超,郑宝周,朱 伟,等.水杨酸浸种对不同温度和盐浓度下棉花种子萌发的影响[J].江西农业学报,2010,22(5):28-30.

[2] 张 红.硝普钠、24-表油菜素内酯/水杨酸浸种对盐胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].核农学报,2012,26(1):164-169,181.

[3] 倪祥银,齐泽民,廖 姝,等.外源水杨酸对 NaCl 胁迫下大豆种子萌发和幼苗生长生理的影响[J].西北植物学报,2014,34(1):0106-0111.

[4] 吴晓丽,罗立津,黄丽岚,等.水杨酸和油菜素内酯对花椰菜幼苗生长及抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):168-172.

[5] 周贺芳,邹志荣,孟长军,等.外源 ALA、CaCl₂ 和水杨酸对盐胁迫下甜瓜幼苗一些生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(4):212-215.

[6] 回振龙,王 蒂,李宗国,等.外源水杨酸对连作马铃薯生长发育及抗性生理的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):1-8.

[7] 常云霞,徐克东,杨同文,等.外源水杨酸对野生龙葵幼苗干旱胁迫的缓解效应[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):43-46,64.

[8] 杨 伟,张国斌,肖雪梅,等.水杨酸对不同灌水下限青花菜根系生长、根冠比及叶片抗氧化酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):148-152.

[9] 任 菲,张荣佳,陈 强,等.ABA 和 SA 对于提高植物抗旱及抗盐性的研究进展[J].生物技术通报,2012,(3):17-21.

[10] 张志刚,尚庆茂.水杨酸、壳聚糖对盐胁迫下黄瓜叶片光合参数的调节作用[J].西北农业学报,2010,19(3):174-178.

[11] 谢寅峰,张千千,刘伟龙,等.外源水杨酸对高氯酸盐胁迫下水花生叶绿素荧光特性的影响[J].环境科学学报,2010,30(7):1457-1465.

[12] 王晓黎,郝敬虹,董春娟,等.外源水杨酸对黄瓜幼苗叶片 PS

II 活性和光能分配的影响[J].西北植物学报,2011,31(8):1644-1650.

[13] 朱 伟,李 聪,马斌强,等.水杨酸浸种对抗虫棉种子萌发的影响[J].江西农业学报,2010,22(3):34-36.

[14] 李鹏民.快速叶绿素荧光诱导动力学在植物逆境生理研究中的应用[D].泰安:山东农业大学,2007.

[15] 李鹏民,高辉远,Strasser R J.快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J].植物生理与分子生物学学报,2005,31(6):559-566.

[16] 朱新广,张其德.NaCl 对光合作用影响的研究进展[J].植物学通报,1999,16(4):332-338.

[17] Demming A B, Adams W Wiii. The role of the xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis[J]. Trends in Plant Science, 1996,1:21-26.

[18] Winter K, Schramm M J. Analysis of stomatal and nonstomatal components in the environmental control of CO₂ exchanges in leaves of *welwitschia mirabilis*[J]. Plant Physiology, 1986,82:173-178.

[19] 杨淑萍,危常州,梁永超.盐胁迫对不同基因型海岛棉光合作用及荧光特性的影响[J].中国农业科学,2010,43(8):1585-1593.

[20] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology,1982,33:317-345.

[21] 王玉萍,董 雯,张 鑫,等.水杨酸对盐胁迫下花椰菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].草业学报,2012,21(1):213-219.

[22] 李 晓,冯 伟,曾晓春.叶绿素荧光分析技术及应用进展[J].西北植物学报,2006,26(10):2186-2196.

[23] 马 清,楼洁琼,王锁民.Na⁺ 对渗透胁迫下霸王幼苗光合特性的影响[J].草业学报,2010,19(3):198-203.

[24] Jiang C D, Jiang G M, Wang X, et al. Enhanced photosystem 2 thermostability during leaf growth of elm (*Ulmuspumila*) seedlings[J]. Photosynthetica, 2006,44(3):411-418.

[25] Pandey D M, Kang K H, Yeo U D. Effects of excessive photon on the photosynthetic pigments and violaxanthin de-epoxidase activity in the xanthophyll cycle of spinach leaf[J]. Plant Science, 2005,168:161-166.

[26] 李旭新,刘炳响,郭智涛,等.NaCl 胁迫下黄连木叶片光合特性及快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的变化[J].应用生态学报,2013,24(9):2479-2484.

[27] 朱 伟,袁 超,马宗斌,等.水杨酸对盐胁迫下棉花种子萌发和幼苗生长的影响[J].江西农业大学学报,2009,21(10):17-19.

[28] Arfan M, Athar M, Ashraf M. Does exogenous application of salicylic through the rooting medium modulate growth and photosynthetic capacity in tow differently adapted spring wheat cultivars under salt stress[J]. Journal of Plant Physiology,2007,164(6):685-694.