

外源水杨酸对 NaCl 胁迫下棉花 幼苗生长生理特性的影响

王立红, 李星星, 孙影影, 阿曼古丽·买买提阿力, 张巨松*

(新疆农业大学 农学院/教育部棉花工程研究中心, 乌鲁木齐 830052)

摘要:以‘中棉所 41 号’(耐盐品种)和‘中棉所 49 号’(中等耐盐品种)为试验材料,采用水杨酸(SA)浸种+叶面喷施复合处理,通过温室盆栽试验探究了 0.60% NaCl 胁迫下外源 SA 对棉花幼苗生长、渗透调节能力和抗氧化能力的影响。结果表明:(1) NaCl 胁迫显著抑制了棉花幼苗的生长,外源 SA 处理下棉花幼苗的株高、叶面积、干物质质量、根系活力、根冠比均有升高,叶片中丙二醛(MDA)、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)和脯氨酸(Pro)含量增加,叶片和根系中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性显著提高,且棉花幼苗根系的 SOD、POD 和 CAT 活性小于叶片,SA 处理对棉花幼苗根系酶活力的提高幅度大于叶片。(2) SA 浸种+叶面喷施复合处理对 0.60% NaCl 胁迫的缓解作用优于单独 SA 浸种处理,尤以 0.05 mmol·L⁻¹ 浸种+0.2 mmol·L⁻¹ 叶面喷施处理最好。(3) 两品种比较,SA 对‘中棉所 49 号’的盐胁迫缓解作用大于‘中棉所 41 号’,且以棉花幼苗根系生长发育的表现最为显著;外源 SA 使‘中棉所 41 号’的根系活力提高 10.58%~57.56%,‘中棉所 49 号’提高 15.08%~80.48%。研究发现,外源 SA 能通过调控棉花幼苗的渗透调节和抗氧化能力来减轻细胞膜损伤,提高其耐盐性,但缓解效应在不同耐性品种和处理方式间存在明显差异。

关键词:水杨酸;棉花幼苗;盐胁迫;渗透调节物质

中图分类号:Q945.78;S311 **文献标志码:**A

Effects of Exogenous Salicylic Acid on the Physiological Characteristics and Growth of Cotton Seedlings under NaCl Stress

WANG Lihong, LI Xingxing, SUN Yingying, MAIMAITIALI Amanguli, ZHANG Jusong*

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

Abstract: In order to study the salicylic acid (SA) on the growth of cotton seedlings under salt stress and resistance physiology, We used ‘Zhongmiansuo 41’ (tolerant varieties) and ‘Zhongmiansuo 49’ (medium tolerant varieties) as material. On 0.60% NaCl stress conditions, using seed soaking and spraying application method of exogenous SA cotton, we investigated the seedling growth, osmotic adjustment matter content and antioxidant system. The results showed that: (1) NaCl stress significantly inhibited the growth of cotton seedlings, under NaCl stress with SA soaking+spraying treatment, cotton seedling height, leaf area, dry mass, root activity, root/shoot ratio were increased, and malondialdehyde (MDA), soluble sugar (SS), soluble protein (SP) and proline (Pro) contents were increased in leaves when exogenous SA had been applied, together with significant decrease in superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and

收稿日期: 2016-04-11; 修改稿收到日期: 2016-12-25

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目(2014BAD11B02)

作者简介: 王立红(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事作物逆境生理的研究。E-mail: 1498877605@qq.com

* 通信作者: 张巨松, 男, 教授, 研究生导师, 主要从事棉花高产栽培生理生态研究。E-mail: xjndzjs@163.com

catalase (CAT) activities in leaves and roots. The activities of SOD, POD and CAT in roots of cotton seedlings were smaller than those of leaves, and the SA treatment increased the enzyme activities of cotton seedling roots more than that in leaves; (2) SA soaking + spraying composite treatment on 0.60% NaCl mitigation effect is better than that of SA seed soaking treatment, while the 0.05 mmol · L⁻¹ soaking + 0.2 mmol · L⁻¹ spraying treatment is the best; (3) Comparison of two varieties, SA on the ‘Zhongmiansuo 49’ to alleviate salt stress intensity is greater than that on the ‘Zhongmiansuo 41’, especially in cotton seedling root growth is most evident, exogenous SA could made the root activity of ‘Zhongmiansuo 41’ improved 10.58%—57.56%, ‘Zhongmiansuo 49’ improved 15.08%—80.48%. The study found that exogenous SA could alleviate cell membrane damage and increase salt tolerance by regulating osmotic adjustment and antioxidant capacity of cotton seedlings, but the effect of alleviation was different between different tolerant cultivars and treatments.

Key words: salicylic acid; cotton seedling; salt stress; osmotic adjustment

盐分是影响植物生长的重要因素之一^[1],据国家林业局第四次荒漠化和沙化监测数据显示,中国盐渍化土地面积达 17.30 万 km²,严重制约着农业的发展^[2],因此提高作物耐盐能力势在必行,然而挖掘作物自身耐盐性受作物基因型的调控,具有局限性,所以近年来更多学者选择在作物上添加外源物质^[3-8]。其中,水杨酸(salicylic acid, SA)是植物体内普遍存在的一种脂溶性有机酸,可在韧皮部运输,能调节植物的许多生理过程,包括开花、产热、种子发芽、气孔开度、膜透性、离子吸收、抑制乙烯合成等^[9]。有研究表明 0.5 mmol · L⁻¹ SA 对 0.9% NaCl 胁迫下沙培棉花种子的萌发和幼苗生长缓解效果最好,能使苗高提高 3.3~3.6 倍,且单株鲜重和干重均已与清水对照达同一水平^[10]。更有研究者发现 0.9% NaCl 浓度下 SA 浸种较单盐处理种子发芽率提高 494.7%^[11]。对于棉花幼苗生长阶段,刘庆等^[12]发现于棉花第二片真叶展开后,在 100 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫下隔天向叶面喷施 0.1 mmol · L⁻¹ SA 能显著提高叶片抗氧化酶活性、可溶性蛋白(SP)含量和游离脯氨酸(Pro)含量,降低叶片的超氧阴离子产生速率、过氧化氢(H₂O₂)含量以及丙二醛(MDA)含量。棉花虽是比较耐盐的作物,但其种子萌发阶段与苗期阶段却是耐盐能力较弱的阶段,然而生产实际中盐分的胁迫是贯穿整个棉花生育期的,所以本试验立足于同时促进棉花种子萌发阶段与幼苗阶段的生长,设计了 SA 浸种与叶面喷施复合处理,从棉花幼苗的生长指标以及棉株的抗氧化能力和渗透调节能力方面着手,旨在为缓解棉花盐害提供理论和技术依据,同时为解决棉花在栽培和育种实践中遭遇的综合逆境因子伤害问题提供新思路。

1 材料和方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2014 年 8 月至 2015 年 10 月在新疆农业大学教育部棉花工程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)^[8]。依据先前所做试验结果^[6],本试验设置 6 个处理,分别为 CK(蒸馏水浸种)、N(0.60% NaCl)、T₀(0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA 浸种)、T₁(0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA 浸种 + 0.1 mmol · L⁻¹ SA 叶面喷施)、T₂(0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA 浸种 + 0.2 mmol · L⁻¹ SA 叶面喷施)和 T₃(0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA 浸种 + 0.3 mmol · L⁻¹ SA 叶面喷施)。

播种前,精选饱满一致的种子,用 0.1% HgCl₂ 消毒 10 min,蒸馏水冲洗 5 次,浸种试验用 SA 溶液浸种 24 h,对照(CK)用蒸馏水浸种 24 h;同时,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 (CK)、0.60% 两个处理水平,加蒸馏水至基质含水量约 35%,充分拌匀,装于塑料营养钵(12 cm×11 cm),土层高约 8 cm。播种时,选择之前浸种处理过的露白一致的种子种入营养钵,每营养钵 6 粒,用复合基质覆盖 2~3 cm,铺平压紧,营养钵口覆 1 层塑料膜保湿,每品种每处理 18 个营养钵。播种后,营养钵置于光照培养室内,白天温度(28±2) ℃,光强 400 μmol · m⁻² · s⁻¹,光照 11 h;夜间温度(22±2) ℃,黑暗 13 h;每个处理在播种后第 7 天将塑料膜揭去,第 10 天剔去弱苗,每个营养钵保证 4 株壮苗。叶面喷施处理于播种后的第 11 天开始,每隔 1 d 在

19:00 喷施 1 次,共喷施 6 次(即第 11、13、15、17、19、21 天),方法采用叶片正、反两面喷施,以叶片附着 1 层小液珠为准。播种后第 23 天取样进行相关指标测定。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 生长指标 播种后第 23 天,用直尺测量基
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 1 片真叶叶面积,系数取
0.78,5 次重复;用 TTC 法测定根系活力,参照袁晓
华^[13]等的方法,5 次重复;将棉株和根系冲洗干净,
并分成根、茎和叶片 3 部分,先置于 105 ℃干燥箱中
杀青 20 min,然后在 80 ℃下烘干至恒重,称其干物
质质量,即为干重,每个处理 3 次重复,每 10 株幼苗
的平均值表示 1 次重复,根据下列公式计算:

单株干重=根干重+茎干重+叶干重

地上干重=茎干重+叶干重

根冠比=根干重/地上干重

1.2.2 生理生化指标 从播种开始至棉花幼苗生
长到 23 d,将棉花幼苗剪去叶脉的第 1 片真叶和清
净擦干的棉苗根系做以下指标测定:可溶性糖(SS)
含量采用蒽酮乙酸乙酯法、可溶性蛋白(SP)含量采
用考马斯亮蓝法、游离脯氨酸(Pro)含量采用茚三
酮法测定^[14];丙二醛含量(MDA)采用硫代巴比妥
酸法^[15]测定;超氧化物歧化酶(SOD)采用 NBT 光
化还原法测定(以抑制 NBT 光化还原的 50%为一
个酶活性单位 U,表示为 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$),过氧化
物酶(POD)采用愈创木酚法测定(以每分钟 OD₄₇₀
值变化 1.0 为一个酶活力单位 U,表示为 $U \cdot g^{-1}$),
过氧化氢酶(CAT)采用愈创木酚法测定(以每分钟
OD 值减少 0.1 为一个酶活力单位 U,表示为 $U \cdot g^{-1}$)^[16]。以上指标数据均为 5 次重复。

1.3 数据处理

参照施伟^[17]等的方法进行灰色关联度分析:按
灰色系统理论要求,将 SA 处理的株高、叶面积、根
系活力、根干重、叶干重、茎干重、单株干重、根冠比、
MDA、SS、SP、Pro、SOD(根)、SOD(叶)、POD(根)、
POD(叶)、CAT(根)和 CAT(叶)视为一个灰色系
统,各性状参数看作该系统的因素。其中设 SA 叶
面喷施浓度为参考数列 X_0 ,19 个性状参数设为比
较数列 X_i ,参数 X_i 与 X_0 的关联系数和各因素的关
联度分别为:

$$\epsilon_{i(k)} = \frac{\frac{\min}{i} \frac{\min}{k} |X_{0(k)} - X_{i(k)}| + p \frac{\min}{i} \frac{\min}{k} |X_{0(k)} - X_{i(k)}|}{|X_{0(k)} - X_{i(k)}| + p \frac{\max}{i} \frac{\max}{k} |X_{0(k)} - X_{i(k)}|}$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon_{i(k)}$$

式中, $\epsilon_{i(k)}$ 为 X_i 对 X_0 在 k 点的关联系数, p 为
灰色关联的分辨系数(越小,关联系数之间差异越
大,区分关联度的能力就越强), $p=0.5; \frac{\min}{i} \frac{\min}{k}$

$|X_{0(k)} - X_{i(k)}|$ 为二级最小差的绝对值; $\frac{\max}{i} \frac{\max}{k}$

$|X_{0(k)} - X_{i(k)}|$ 为二级最大差的绝对值;根据关联度
 r 的大小确定比较数列与参数数列的关联程度,判断
比较数列对于参考数列的重要性。

数据以“平均值±标准差”表示,采用 Microsoft
Office Excel 2010 软件处理数据和绘图,采用 DPS
7.05 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 外源 SA 对 NaCl 胁迫棉花幼苗生长及干物质
积累分配的影响

2.1.1 株高、叶面积和根系活力 由表 1 可知,单
独盐胁迫处理(N)下,‘中棉所 41 号’植株的株高、
叶面积、根系活力分别比 CK 显著降低 24.60%、
25.47%、52.35%,而‘中棉所 49 号’则分别相应显
著降低 26.66%、22.03%、57.26%。两品种棉花植
株在 NaCl 胁迫和 SA 浸种及叶面喷施处理下,其株
高、叶面积与根系活力均比 N 处理不同程度增加,
且两品种表现一致,浸种及叶面喷施处理优于单独
浸种处理,都以 T_2 处理效果最好。在 T_2 处理下,
‘中棉所 41 号’的株高、叶面积与根系活力分别比 N
处理提高 8.10%、17.21%、57.56%,而‘中棉所 49
号’则分别相应提高 15.86%、26.01%、80.48%。
可见,两品种棉花植株生长在 NaCl 胁迫下均受到
显著抑制,各外源 SA 处理均能不同程度缓解盐胁
迫的伤害,但不同处理及不同品种不同部位得到的
缓解效果存在差异,即 0.05 mmol·L⁻¹ SA 浸种+
0.2 mmol·L⁻¹ SA 叶面喷施处理的诱导效果最
佳,中等耐盐品种‘中棉所 49 号’盐伤害得到的缓
解效果更优,生长指标根系活力的提高幅度最大。

2.1.2 干物质积累及分配 不同植物会通过不同
生物量分配模式来适应盐环境,SA 外施也会对植物
的生物量分配模式有影响。由表 2 可知,在单独
NaCl 胁迫下(N 处理),‘中棉所 41 号’的根、叶和茎
干重分别比 CK 显著降低 26.75%、19.94%和 32.61%,
‘中棉所 49 号’则分别显著降低 29.57%、24.35%
和 36.25%;两棉花品种植株的根、叶和茎干重在 T_0

表 1 外源 SA 对 NaCl 胁迫下棉花幼苗株高、叶面积和根系活力的影响

Table 1 Effects of exogenous SA on the height, leaf area and root activity of cotton seedling under NaCl stress				
品种 Cultivar	处理 Treatments	株高 Plant height/cm	叶面积 Leaf area/cm ²	根系活力 Root activity/(μg · g ⁻¹ · h ⁻¹)
中棉所 41 号 Zhongmiansuo 41	CK	11.95±0.38 a	16.53±3.67 a	154.55±9.06 a
	N	9.01±0.17 c	12.32±0.84 b	73.64±8.45 d
	T ₀	9.41±0.38 bc	12.74±2.08 b	81.43±10.54 cd
	T ₁	9.60±0.32 bc	14.22±3.28 ab	95.48±6.30 c
	T ₂	9.74±0.19 b	14.44±1.81 ab	116.03±22.14 b
	T ₃	9.48±0.16 bc	13.14±2.26 b	89.92±9.14 c
中棉所 49 号 Zhongmiansuo 49	CK	11.78±0.47 a	14.89±0.29 a	145.08±20.83 a
	N	8.64±0.39 c	11.61±0.33 c	62.00±7.00 d
	T ₀	9.49±0.21 bc	12.79±0.82 bc	71.35±10.17 cd
	T ₁	9.78±0.28 b	13.08±0.66 bc	78.28±9.63 c
	T ₂	10.01±0.24 b	14.63±0.59 ab	111.90±11.93 b
	T ₃	9.81±0.25 b	13.26±1.18 ab	86.19±6.14 c

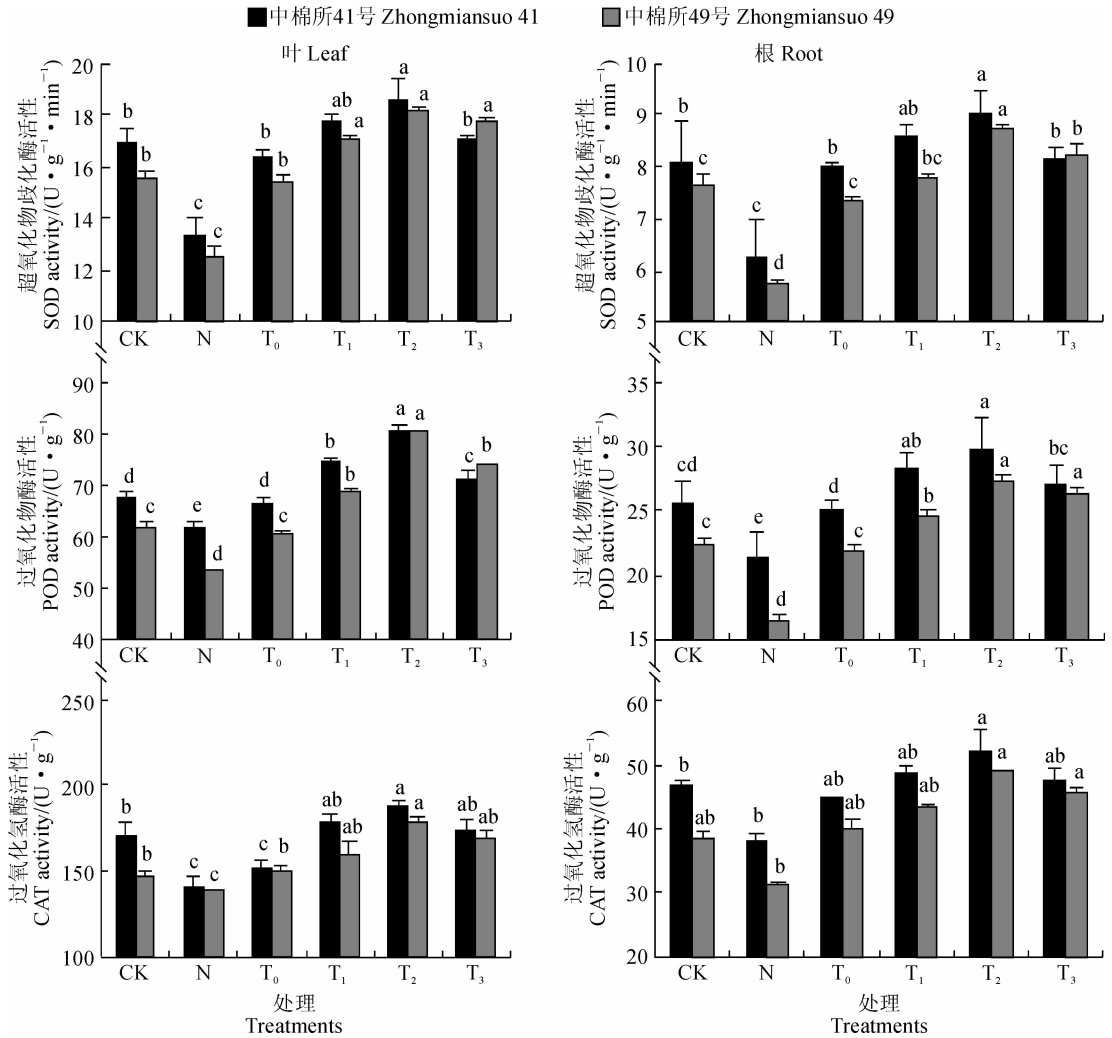
注:CK. 对照,蒸馏水浸种;N. 0.60% NaCl;T₀. 0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA 浸种;T₁. 0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA 浸种 + 0.1 mmol · L⁻¹ SA 叶面喷施;T₂. 0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA 浸种 + 0.2 mmol · L⁻¹ SA 叶面喷施;T₃. 0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA 浸种 + 0.3 mmol · L⁻¹ SA 叶面喷施;同一品种同一列的不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,所有数据均为平均值及其标准差(均值±标准差)。下同

Note:CK. Control, soaking in distilled water;N. 0.60% NaCl;T₀. 0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA seed soaking;T₁. 0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA seed soaking + 0.1 mmol · L⁻¹ SA foliar application;T₂. 0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA seed soaking + 0.2 mmol · L⁻¹ SA foliar application;T₃. 0.60% NaCl + 0.05 mmol · L⁻¹ SA seed soaking + 0.3 mmol · L⁻¹ SA foliar application;The different lowercases of the same variety in the same column means significant difference at 0.05 level. The data are the means of duplicates and their Standard deviation (Mean±SD). The same as below

表 2 外源 SA 对 NaCl 胁迫棉花幼苗干物质积累及分配的影响

Table 2 Effects of exogenous SA on the accumulation and distribution of dry matter of cotton seedlings under NaCl stress							
品种 Cultivar	处理 Treatment	根干重 Dry root weight (mg · plant ⁻¹)	叶干重 Dry leaf weight (mg · plant ⁻¹)	茎干重 Dry stem weight (mg · plant ⁻¹)	单株干重 Dry weight (mg · plant ⁻¹)	地上干重 Dry weight on the ground (mg · plant ⁻¹)	根冠比 Root shoot ratio
中棉所 41 号 Zhongmiansuo 41	CK	22.28±0.84 ab	109.60±9.21 a	64.55±0.94 a	196.43±7.43 a	174.15±8.27 a	0.129±0.011 b
	N	16.32±0.65 c	87.75±3.06 b	43.50±0.60 b	147.57±4.31 d	131.25±3.65 d	0.124±0.002 b
	T ₀	17.71±0.49 c	94.57±3.73 ab	47.18±0.45 b	159.46±4.78 cd	141.75±3.28 cd	0.125±0.001 b
	T ₁	20.80±0.16 b	100.39±2.70 ab	51.02±1.02 b	172.21±1.84 bc	151.41±1.68 bc	0.137±0.001 ab
	T ₂	24.23±0.67 a	103.90±3.40 ab	54.50±7.50 ab	182.63±3.43 ab	158.40±4.10 ab	0.153±0.008 a
	T ₃	18.00±0.62 c	96.25±4.17 ab	49.02±1.69 b	163.28±1.87 c	145.27±0.25 bcd	0.124±0.003 b
中棉所 49 号 Zhongmiansuo 49	CK	17.82±1.23 a	93.72±9.74 a	61.57±0.70 a	173.11±11.67 a	155.29±10.44 a	0.115±0.001 bc
	N	12.55±1.31 b	70.90±1.65 b	39.25±0.47 d	122.70±3.44 c	110.15±2.12 c	0.114±0.009 c
	T ₀	15.85±0.61 a	76.82±1.45 b	43.15±1.08 cd	135.82±2.76 bc	119.97±4.37 bc	0.132±0.005 abc
	T ₁	16.84±0.35 a	78.07±1.05 b	47.32±0.01 bc	142.23±6.06 b	125.39±5.05 bc	0.134±0.009 ab
	T ₂	18.06±0.56 a	82.20±3.36 ab	51.59±0.76 b	151.85±4.53 b	133.79±4.12 b	0.135±0.001 a
	T ₃	17.56±0.50 a	79.50±1.85 ab	47.99±0.09 b	145.05±2.95 b	127.49±1.94 b	0.137±0.007 a

~T₃ 处理下均比 N 处理不同程度增加,而 T₁~T₃ 处理又高于 T₀ 处理,并以 T₂ 处理各器官干重增幅最大。其中,T₂ 处理下,‘中棉所 41 号’的根、叶和茎干重分别比 N 处理增加 48.47%、18.40% 和 25.29%,‘中棉所 49 号’则分别增加 43.90%、16.78%和 31.44%。两品种各处理单株干重与地上干重的变化趋势与各器官的表现一致。另外,两品种的根冠比在单独盐处理并没有显著降低,而各



柱上不同小写字母表示同一品种不同处理间差异达 0.05 显著水平。下同

图 1 外源 SA 对 NaCl 胁迫棉花幼苗抗氧化酶活性的影响

Different letters within a cultivar represent significant difference among treatments at 0.05 level. Data are the means \pm SD of three replicates. The same as below

Fig. 1 Effect of exogenous SA on the antioxidant enzymes activities of cotton seedling under NaCl stress

外源 SA 处理却比 N 处理不同程度提高,尤其是 T₂ 处理的根冠比显著高于 N 处理和 CK。可见,盐胁迫显著抑制了两品种棉花植株及各器官干物质的累积,而对根冠比无显著影响;各 SA 浸种和叶面喷施处理均可不同程度地缓解了盐胁迫对棉株干重的抑制作用,提高了根冠比,并以 T₂ 处理缓解效果最好;各 SA 处理对根和茎的缓解作用要明显大于叶,并对根系的效果最明显。

2.2 外源 SA 对 NaCl 胁迫棉花幼苗抗氧化酶活性和叶片 MDA 含量的影响

SOD 是生物体内清除自由基的首要物质,可以催化 O₂ 单电子还原产生的第一个自由基发生歧化反应,把有害的超氧自由基转化为 H₂O₂,但活性氧 H₂O₂ 对植物仍然有伤害作用,必须由 APX、POD

和 CAT 共同协调将之清除,才可使自由基活性氧维持一个低而对细胞无害的水平。由图 1 可知,两棉花品种植株根系与叶片的 SOD、POD、CAT 的活性在各处理下均表现出相似的变化趋势。即在 0.60% NaCl 溶液胁迫(N 处理)下,各酶活性水平均比相应对照(CK)显著降低;SA 单独浸种(T₀)或者先浸种后叶面喷施处理(T₁~T₃)均使各酶活性水平比盐胁迫处理不同程度增强,且 T₁~T₃ 处理又高于或者显著高于 T₀ 处理,并均以 T₂ 处理活性最高,显著高于 N 处理和 CK。其中,在 T₀~T₃ 处理下,‘中棉所 41 号’叶的 SOD、POD、CAT 活性分别比 N 处理显著增加 22.32%~39.63%、7.92%~30.35%和 8.01%~33.83%,相应根系则分别比 N 处理显著增加 27.72%~44.71%、16.82%~

38.07%和 17.36%~36.72%;相同处理下的‘中棉所 49 号’叶片 SOD、POD、CAT 活性分别比 N 处理显著增加 22.45%~ 44.90%、14.04% ~50.57%、7.73%~27.95%,相应根系则分别比 N 处理显著增加 28.22%~ 51.92%、32.79%~ 63.88%、28.68%~56.91%。

同时,MDA 是膜脂过氧化产物,其高低可反映细胞膜的损伤程度^[18]。由图 2 可知,N 处理(0.60% NaCl)‘中棉所 41 号’与‘中棉所 49 号’的 MDA 含量分别比 CK 显著增加 67.22% 和 62.33%;两品种 MDA 含量均在 T₀ 处理下低于或者显著低于 N 处理,而在 T₁~T₃ 处理下均显著低于 N 处理,尤其在 T₂ 处理下最低,分别比 N 处理显著

降低 29.82%和 28.43%;两品种 MDA 含量对 SA 处理的响应规律几乎一致。

以上结果说明,0.60% NaCl 胁迫已经显著抑制了两个棉花品种根系和叶片的保护酶活性,使其细胞膜受到明显伤害,SA 浸种和叶面喷施有效增强了盐胁迫下棉花根系和叶片的保护酶活性,显著缓解了盐胁迫对细胞膜的伤害;这种缓解效应在品种、器官、处理存在明显差异,具体表现为中等耐盐品种‘中棉所 49’响应强于耐盐品种‘中棉所 41’,根系反应明显强于叶片,而 SA 浸种加叶面喷施处理又优于单独浸种处理,并以 T₂ 处理效果最好。

2.3 外源 SA 对 NaCl 胁迫棉花幼苗叶片脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

由表 3 可知,0.60% NaCl 胁迫下,‘中棉所 41 号’和‘中棉所 49 号’叶片的可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)与脯氨酸(Pro)含量分别比 CK 显著增加 72.57%、31.92%、34.45% 和 72.04%、37.82%、47.85%;SA 浸种和叶面喷施均能不同程度增加盐胁迫下棉花叶片 SS、SP 和 Pro 含量,并均以 T₂ 处理最高,此时‘中棉所 41 号’和‘中棉所 49 号’的 SS、SP 和 Pro 含量分别比相应 N 处理显著增加 12.71%、49.38%、6.48% 和 13.83%、28.51%、14.28%。由此说明 NaCl 胁迫能有效诱导提高棉花叶片内可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量,其中可溶性糖含量上调幅度更大;外源 SA 浸种和叶面喷施能增强这种诱导效应,使叶片内 3 种物质的含量进

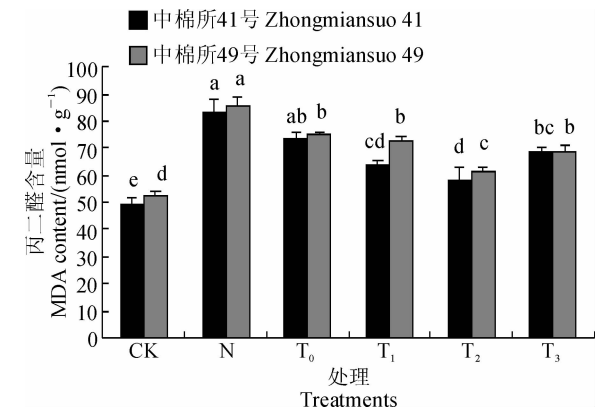


图 2 外源 SA 对 NaCl 胁迫棉花叶片 MDA 含量的影响
Fig. 2 Effects of exogenous SA on the content of MDA in leaves of cotton under NaCl stress

表 3 外源 SA 对 NaCl 胁迫棉花幼苗叶片渗透调节物质含量的影响				
Table 3 Effects of exogenous SA on the content of osmotic adjustment substance in the leaves of cotton seedling under NaCl stress				
品种 Cultivar	处理 Treatment	脯氨酸含量 Proline content (Pro) /(μg · g ⁻¹)	可溶性糖含量 Soluble sugar content (SS) /(mg · g ⁻¹)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content (SP) /(mg · g ⁻¹)
中棉所 41 号 Zhongmiansuo 41	CK	51.96±7.11 d	2.37±0.31 c	3.72±0.75 c
	N	69.86±0.95 c	4.09±0.15 b	6.40±0.87 b
	T ₀	70.86±3.40 bc	4.12±0.57 b	7.81±0.46 ab
	T ₁	73.88±1.41 ab	4.42±0.32 ab	9.01±0.32 a
	T ₂	74.39±6.10 a	4.61±0.60 a	9.56±0.28 a
	T ₃	73.47±2.03 ab	4.23±0.71 ab	8.59±0.40 ab
中棉所 49 号 Zhongmiansuo 49	CK	43.16±1.55 c	3.07±0.83 d	5.42±1.49 e
	N	63.81±1.83 b	4.05±0.36 c	7.47±0.49 d
	T ₀	66.66±2.52 ab	4.07±0.63 c	8.39±0.19 c
	T ₁	67.40±4.18 ab	4.17±0.28 bc	8.56±0.13 bc
	T ₂	72.92±4.26 a	4.61±0.61 a	9.60±0.08 a
	T ₃	69.39±3.42 ab	4.48±0.66 ab	9.05±0.24 b

表 4 SA 处理对棉花幼苗各生理指标的灰色关联度分析

Table 4 Gray correlation analysis of SA on physiological indexes of cotton seedling

指标 Index	关联度 Correlation degree	排序 Order
株高 Plant height/cm	0.184 64	16
叶面积 Leaf area/cm ²	0.187 10	15
根干重 Dry root weight/(mg·plant ⁻¹)	0.209 11	2
叶干重 Dry leaf weight/(mg·plant ⁻¹)	0.188 84	14
茎干重 Dry stem weight/(mg·plant ⁻¹)	0.197 13	9
单株干重 Dry weight/(mg·plant ⁻¹)	0.193 31	11
根冠比 Root shoot ratio	0.192 64	13
根系活力 Root activity/(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.272 30	1
可溶性糖含量 SS/(mg·g ⁻¹)	0.194 57	10
可溶性蛋白含量 SP/(mg·g ⁻¹)	0.199 26	5
脯氨酸含量 Pro/(μg·g ⁻¹)	0.160 49	18
丙二醛含量 MDA/(nmol·g ⁻¹)	0.165 66	17
根 SOD 活性 Root SOD acitivity/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	0.197 46	8
叶 SOD 活性 Leaf SOD acitivity/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	0.193 16	12
根 POD 活性 Root POD acitivity/(U·g ⁻¹)	0.198 51	7
叶 POD 活性 Leaf POD acitivity/(U·g ⁻¹)	0.207 21	3
根 CAT 活性 Root CAT acitivity/(U·g ⁻¹)	0.200 53	4
叶 CAT 活性 Leaf CAT acitivity/(U·g ⁻¹)	0.199 10	6

一步提高,其中的可溶性蛋白含量升幅更大,从而有效缓解盐胁迫伤害,各处理中又以 0.05 mmol·L⁻¹ 浸种+0.2 mmol·L⁻¹ 叶面喷施效果最显著。

2.4 SA 处理对棉花幼苗各生长生理指标的灰色关联度分析

根据灰色系统理论,关联度反映的是构成该系统的各性状组成的比较数列和参考数列间的密切程度,关联度越大,说明关系越密切^[20]。各生长生理指标灰色关联度分析(表 4)表明,SA 叶面喷施浓度与各生长生理指标之间的灰色关联度在 0.160 49~0.272 30 之间;根系活力和根干重与 SA 叶面喷施浓度间关系更为密切,说明 SA 的施用以促进根系生长为主要途径来抵御部分盐害;从植株体内代谢来看,叶部 POD 活性和根部 CAT 活性最能反映抗氧化酶系统状况,SP 最能反映细胞渗透调节能力与 SA 叶面喷施的效果。因此,SA 叶面喷施对棉花苗期影响最大的是根系,盐胁迫下根系的生长发育最能体现其耐盐能力。

3 讨 论

生物量是植物对盐胁迫反应的综合体现,本试验结果表明外源 SA 作用下,棉花幼苗的根冠比提

高,‘中棉所 41 号’仅有 T₂ 处理表现较显著,‘中棉所 49 号’的浸种+叶面喷施处理(T₁~T₃)均显著高于单独盐处理,而两品种的浸种处理(T₀)与单盐处理处于同一水平,说明 SA 可增加生物量在根系的分配,有利于根对水分和营养的获取,从而增强植株生长能力,而浸种处理效应表现不显著可能与处理方式有关。Colmer^[21]的研究发现,耐性植物通常会通过主动扩大根系分布以适应逆境条件,而敏感植物则主要采取避性机制,通过减少根的分布以最大限度降低逆境条件对植物的毒害,这也是植物根系对逆境胁迫的两种不同表现,本研究中‘中棉所 41 号’与‘中棉所 49 号’的根系活力、根干重以及根冠比指标都可证明 SA 对根系的缓解作用最显著,说明 SA 是采取调控棉花植株扩大根系分布为途径来适应盐胁迫,以此增加其耐盐性。据灰色关联度分析,根系在 SA 作用下表现显著,而根系具体在哪一方面的突出表现可提高其耐盐能力,还需进一步考察根系表面积、根系直径以及不同径级的根长等指标,这也是今后应该研究的方向。

从植物内部的代谢来看,NaCl 胁迫降低了棉花叶片和根系的抗氧化酶活性,SA 浸种处理(T₀)对棉株 SOD 和 POD 活性有显著性增加效应,而对

CAT 活性的提高仅有‘中棉所 49 号’的叶片反应显著,但都小于 CK。SA 浸种+叶面喷施复合处理进一步提高了 3 种抗氧化酶活性且都高于 CK。周万海^[3]在苜蓿上的研究发现,0.25 mmol·L⁻¹ SA 叶面喷施可使 150 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下棉花幼苗叶片与根系 SOD 活性分别提高 89.58%和 8.67%,肖强^[21]关于外源一氧化氮缓解水稻盐胁迫的研究与本研究结果相似,不同的是本研究发现棉花幼苗根系的 SOD、POD 和 CAT 活性要小于叶片,SA 处理提高棉花幼苗根系酶活力的幅度要大于叶片,由此说明 SA 在韧皮部运输的有效性,同时也能说明 SA 浸种+叶面喷施复合处理有利于根系的生长。

脯氨酸(Pro)和可溶性糖(SS)是很多植物的主要渗透调节物质,可溶性蛋白(SP)是反映植物体内代谢强度的一个重要指标^[23]。本研究发现 0.60% NaCl 胁迫可促进叶片 Pro、SS 和 SP 含量的升高,说明棉花启动了一种自我保护机制;盐胁迫下 Pro 含量的增加说明 Pro 能调控植物渗透势,降低 NaCl 对酶活性的抑制,提高植株耐盐性,这与有些研究^[23]结果一致,但也与一些结果不一致^[3],这可能与研究植物种类或 NaCl 胁迫程度有关。另外,SA 作用下棉花叶片 Pro、SS 和 SP 含量进一步提高,并以 T₂ 处理效果最为显著。据郭慧娟^[25]的研究发现

植物体可以通过增加 SP,提高渗透调节能力,增强植物对盐胁迫的适应能力;周万海^[3]的研究也发现 NaCl+SA 叶面喷施处理下,苜蓿幼苗内 SP 的积累量显著高于 NaCl 处理,这都与本研究结果一致。由此表明外源 SA 可以促进 NaCl 胁迫下棉花植株蛋白的合成,维持植株水分运输和叶片光合功能,再次证明本试验 SA 浸种+叶面喷施处理可提高细胞内渗透调节能力,有助于细胞内水势的降低,从而提高耐盐性。

综上所述,外源 SA 可以有效地促进不同盐敏感性棉花幼苗的生长发育,且 SA 浸种+叶面喷施复合处理优于 SA 浸种处理;两品种表现虽然一致,但由于两品种耐盐能力不同,SA 处理对其的缓解力度也不同,总体上 SA 对中等耐盐品种‘中棉所 49 号’的盐胁迫缓解力度大于耐盐品种‘中棉所 41 号’;灰色关联度分析表明促进棉花幼苗根系生长发育是 SA 处理最显著的表现,也是提高棉花耐盐性的最直接部位;外源 SA 浸种和叶面喷施的最佳组合浓度为 0.05 mmol·L⁻¹+0.2 mmol·L⁻¹。但是,作物耐盐性是一个极为复杂的生理过程,不同品种抗盐性不同,同一品种不同生育期抗盐性也不相同,因而对作物抗盐性的研究还需从植物生理生化及分子生物学的角度作进一步的探讨。

参考文献:

[1] SHAGUFTA S, SOBLA N, MUHAMMAD A, *et al.* Salt stress affects water relations, photosynthesis, and oxidative defense mechanisms in *Solanum melongena* L. [J]. *Journal of Plant Interactions*, 2013, **8**(1): 85-96.

[2] 国家林业局. 第四次中国荒漠化和沙化状况公报[N]. 中国绿色时报, 2011-01-05(2).
State Forestry Administration. The fourth China desertification and desertification status bulletin [N]. *China Green Times*, 2011-01-05(2)

[3] 周万海, 师尚礼, 寇江涛. 外源水杨酸对苜蓿幼苗盐胁迫的缓解效应[J]. 草业学报, 2012, **21**(3): 171-176.
ZHOU W H, SHI S L, KOU J T. Exogenous salicylic acid on alleviating salt stress in alfalfa seedlings[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, **21**(3): 171-176.

[4] 李金亭, 赵萍萍, 邱宗波, 等. 外源 H₂O₂ 对盐胁迫下小麦幼苗生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2012, **32**(9): 1 796-1 801.
LI J T, ZHAO P P, QIU Z B, *et al.* Effects of exogenous hydrogen peroxide on the physiological index of wheat seedlings under salt stress [J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2012, **32**(9): 1 796-1 801.

[5] 张永平. 氯化胆碱对盐胁迫黄瓜幼苗渗透调节物质及活性氧代谢系统的影响[J]. 西北植物学报, 2011, **31**(1): 137-143.
ZHANG Y P. Effects of choline chloride on osmotic adjustment substances and reactive oxygen species metabolism of cucumber seedlings under salt stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2011, **31**(1):137-143.

[6] 王立红, 张巨松, 李星星, 等. 外源水杨酸对盐胁迫下棉花幼苗光合作用的影响[J]. 核农学报, 2016, **30**(9): 1 864-1 871.
WANG L H, ZHANG J S, LI X X, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on the photosynthesis of cotton seedlings under salt stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, **30**(9): 1 864-1 871.

[7] 王松, 莘冰茹, 周艳, 等. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生长及光合特性的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2016, **34**(3): 1-7.
WANG S, XIN B R, ZHOU Y, *et al.* Effect of exogenous nitric oxide on growth and photosynthetic characteristics in tomato seedlings under NaCl stress[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2016, **34**(3): 1-7.

[8] 王立红, 孙影影, 李星星, 等. 水杨酸浸种对 NaCl 胁迫下棉花种子萌发和幼苗根系生长的影响[J]. 中国农业大学学报,

2016, **21**(4): 10-17.

WANG L H, SUN Y Y, LI X X, *et al.* Effects of salicylic acid soaking on seed germination and root growth of cotton under salt stress[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, **21**(4): 10-17.

[9] 赵光毅. 外源水杨酸、一氧化氮对盐胁迫下油菜叶片膜脂抗过氧化能力的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2009: 6.

[10] 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]. *江西农业学报*, 2009, **21**(10): 17-19.

ZHU W, YUAN C, MA Z B, *et al.* Effects of salicylic acid on seed germination and seedling growth of cotton under salt stress [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, **21**(10): 17-19.

[11] 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.

YUAN C, ZHENG B Z, ZHU W, *et al.* Effects of salicylic acid on cotton seed germination under different temperatures and salt concentrations [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, **22**(5): 28-30.

[12] 刘 庆, 董元杰, 刘 双, 等. 外源水杨酸(SA)对 NaCl 胁迫下棉花幼苗生理生化特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(2): 165-168+174.

LIU Q, DONG Y J, LIU S, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on the physiological biochemical characteristics of cotton seedlings under salt stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(2): 165-168+174.

[13] 袁晓华, 杨中汉. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 1983: 128-133.

[14] 邹 琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.

[15] 赵世杰, 许长城, 邹 琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. *植物生理学通讯*, 1994, **30**(3): 207-210.

ZHAO S J, XU C C, ZOU Q. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues[J]. *Plant Physiology Communications*, 1994, **30**(3): 207-210.

[16] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 吉林:吉林大学出版社, 2008.

[17] 施 伟, 昌小平, 景蕊莲. 不同水分条件下小麦生理性状与产量的灰色关联度分析[J]. *麦类作物学报*, 2012, **32**(4): 653-659.

SHI W, CHANG X P, JING R L. Gray association grade analysis of physiological traits with yield of wheat under different water regimes[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, **32**(4): 653-659.

[18] 李 明, 王根轩. 干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. *生态学报*, 2002, **22**(4): 503-507.

LI M, WANG G X. Effect of drought stress on activities of cell defense enzymes and lipid peroxidation in *Glycyrrhiza uralensis* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(4): 503-507.

[19] SUDHAKAR C, LAKSHMI A, GIRIDARAKUMAR S. Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity[J]. *Plant Science*, 2001, 161:613-619.

[20] 王士强, 胡银岗, 余奎军, 等. 小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析[J]. *中国农业科学*, 2007, **40**(11): 2 452-2 459.

WANG S Q, HU Y G, SHE K J, *et al.* Gray relational grade analysis of agronomical and physi-biochemical traits related to drought tolerance in wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40**(11): 2 452-2 459.

[21] COLMER T D. Long-distance transport of gases in plant: a perspective on internal aeration and oxygen loss from roots [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2003, **26**(1): 17-36.

[22] 肖 强, 陈 娟, 吴飞华, 等. 外源 NO 供体硝普钠(SNP)对盐胁迫下水稻幼苗中叶绿素和游离脯氨酸含量以及抗氧化酶的影响[J]. *作物学报*, 2008, **34**(10): 1 849-1 853.

XIAO Q, CHEN J, WU F H, *et al.* Effects of exogenous nitric oxide donor SNP on contents of chlorophyll and free proline, activity of antioxidative enzyme in rice seedlings under NaCl stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, **34**(10): 1 849-1 853.

[23] 王 芳, 常盼盼, 陈永平, 等. 外源 NO 对镉胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响[J]. *草业学报*, 2013, **22**(2): 178-186.

WANG F, CHANG P P, CHEN Y P, *et al.* Effect of exogenous nitric oxide on seedling growth and physiological characteristics of maize seedlings under cadmium stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, **22**(2): 178-186.

[24] WANG X, WANG H, WU F, *et al.* Effects of cinnamic acid on the physiological characteristics of cucumber seedlings under salt stress[J]. *Frontiers of Agriculture in China*, 2007, **1**(1): 58-61.

[25] 郭慧娟, 胡 涛, 傅金民. 苏打碱胁迫对多年生黑麦草的生理影响[J]. *草业学报*, 2012, **21**(1): 118-125.

GUO H J, HU T, FU J M. Effects of saline sodic stress on growth and physiological responses of *Lolium perenne* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, **21**(1): 118-125.

(编辑:裴阿卫)