

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

倪祥银¹, 齐泽民^{1,2}, 廖 姝¹, 段辉国^{1,2*}

(1 内江师范学院 生命科学学院, 四川内江 641100; 2 四川省高等学校特色农业资源研究与利用重点实验室, 四川内江 641100)

摘 要: 以大豆种子、幼苗为试验材料, 采用砂培的方法, 研究了 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源水杨酸(SA)对 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下大豆种子萌发、幼苗形态及生物量、膜脂过氧化和抗氧化酶活性的影响。结果显示: NaCl 胁迫下, 大豆种子萌发和幼苗生长受到显著抑制, 且随着胁迫时间的延长(0~3 d), 大豆幼苗相对电解质渗漏率、硫代巴比妥酸活性产物(TBARS)含量显著升高, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性均明显降低。外源 SA 促进 NaCl 胁迫下大豆种子萌发和根茎生长, 增加幼苗生物量积累, 降低幼苗叶片相对电解质渗漏率和 TBARS 含量, 增强其叶片 SOD、CAT、APX 活性。研究表明, NaCl 胁迫能显著抑制大豆种子萌发和幼苗生长, 而一定浓度的外源 SA 能有效提高 NaCl 胁迫下大豆种子活力及幼苗抗氧化酶活性, 减轻膜脂过氧化程度, 缓解 NaCl 胁迫所造成的伤害, 提高大豆幼苗抗盐胁迫的能力。

关键词: 水杨酸; NaCl 胁迫; 大豆; 萌发; 生长; 抗氧化酶

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

Effects of Exogenous Salicylic Acid on Seed Germination and Seedling Growth Physiological Characteristics of Soybean under NaCl Stress

NI Xiangyin¹, QI Zemin^{1,2}, LIAO Shu¹, DUAN Huiguo^{1,2*}

(1 College of Life Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641100, China; 2 Key Laboratory for Research and Utilization of Distinctive Agricultural Resources in the Sichuan Province, Neijiang, Sichuan 641100, China)

Abstract: The effects of $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ exogenous salicylic acid (SA) on seed germination, seedling morphology and biomass, membrane peroxidation, antioxidant enzymes in leaves of soybean (*Glycine max* L.) seedlings under $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl stress were investigated by incubating with sand culture. The results showed that seed germination and seedling growth were significantly inhibited under NaCl stress; Relative electrolyte leakage and thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) content were markedly increased; Activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) reduced constantly in leaves of soybean seedling under NaCl stress. While exogenous SA promoted seed germination and rootstock growth, increased biomass accumulation, reduced relative electrolyte leakage and TBARS content, improved activities of SOD, CAT and APX. The results suggested that NaCl stress inhibited significantly soybean seed germination and seedling growth, while certain concentration of exogenous SA could

收稿日期: 2013-09-24; 修改稿收到日期: 2013-11-29

基金项目: 四川省教育厅重点研究项目(09ZA054); 内江师范学院生物化学与分子生物学重点建设学科项目(内师院发[2012]96号)

作者简介: 倪祥银(1987—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: nixiangyin_922@163.com

* 通信作者: 段辉国, 硕士, 教授, 主要从事植物逆境生理生化与生长调节物质作用机理研究。E-mail: duanhuiguo6@163.com

enhance seed vigor and antioxidant enzymes activities, reduce the degree of membrane lipid peroxidation, alleviate damages by NaCl stress, and promote salt resistance of soybean seedlings under NaCl stress.

Key words: salicylic acid; NaCl stress; soybean; germination; growth; antioxidant enzymes

中国是世界主要盐渍化地区之一。第四次荒漠化和沙化监测结果显示,中国盐渍化土地面积达 17.30 万 km²,严重制约着农业生产发展^[1-2]。水杨酸(SA)被认为是一种内源信号因子,可诱导植物对多种生物和非生物胁迫作出响应,促使植物产生抗病过敏性反应,提高 SOD、CAT、POD 等抗氧化酶活性,降低硫代巴比妥酸水平、自由基含量和膜脂过氧化水平,改善细胞的代谢,从而调节逆境胁迫的许多生理生化过程^[3-6]。大豆 [*Glycine max* (L.) Merr.] 是中国重要的粮食作物,蕴藏着丰富的蛋白质资源,但大豆的栽种在一定程度上受到土壤盐渍化影响,深入研究外源 SA 对盐胁迫下大豆种子萌发和幼苗生长的调控效应具有重要理论和实践意义。因此,本试验在预实验筛选 100 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫条件下,对大豆种子和幼苗添加 0.2 mmol · L⁻¹ 外源 SA,考察其种子萌发、幼苗形态建成、膜脂过氧化程度和抗氧化酶活性随胁迫时间的动态变化,研究外源 SA 对 NaCl 胁迫下大豆种子萌发、幼苗生长及生理生化影响,以期为利用 SA 缓解大豆生产过程中的盐害提供一定理论依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试大豆品种为‘贡豆 12 号’,种子购自四川省自贡市农业科学研究所。实验于 2012 年 1 月至 7 月在内江师范学院生命科学院实验室进行。

1.2 胁迫处理

1.2.1 种子胁迫 共设置对照(CK,蒸馏水)、NaCl 处理(NaCl,100 mmol · L⁻¹ NaCl)和复合处理(NaCl+SA,100 mmol · L⁻¹ NaCl 配制的 0.2 mmol · L⁻¹ SA)3 组处理。挑选饱满、均匀的大豆种子,先用 1% NaClO 表面消毒 10 min,再用蒸馏水漂洗,然后随机分为 3 组,每组 50 粒,均匀置于垫有 2 层滤纸的培养皿中,分别加入上述各组处理液各 10 mL,在温度为(25±1) °C/(20±1) °C、光照时间为 14 h/d、光照度为 7 600 lx 的条件下培养,每 12 h 更换 1 次处理液。每 24 h 统计 1 次萌发种子数,并计算发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数,连续处理 120 h,第 8 天统计种子根长、茎长、侧根数、鲜质量、干质量。实验重复 3 次。

1.2.2 幼苗胁迫 共设置对照(CK,1/2 Hoagland 溶液)、NaCl 处理(NaCl,用 1/2 Hoagland 溶液配制的 100 mmol · L⁻¹ NaCl)和复合处理(NaCl+SA,用 1/2 Hoagland 溶液配制的含 100 mmol · L⁻¹ NaCl 和 0.2 mmol · L⁻¹ SA)3 组处理。按 1.2.1 方法挑选种子,用蒸馏水暗萌发 48 h。至种子出芽,随机分为 3 组,均匀植于煮沸消毒的石英砂中,施以 1/2 Hoagland 溶液,在同 1.2.1 条件下培养 72 h,每 12 h 更换 1 次培养液,直至第一片真叶充分展开,然后换为处理液进行胁迫处理,每 12 h 更换 1 次处理液。在胁迫处理的第 0、24、48、72 h 分别测定幼苗叶片相对电解质渗漏率、TBARS 含量、SOD、CAT、APX 活性。实验重复 3 次。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 种子萌发指标 种子发芽率(GR)、发芽势(GP)、发芽指数(GI)、活力指数(VI)参考宋松泉等^[7]的方法测定。其中,GR(%)=发芽种子数/总种子数×100%;GP(%)=萌发种子数/总种子数×100%(第 60 h);GI= $\sum(Gt/Dt)$;VI=FM× $\sum(Gt/Dt)$ 。其中,Gt 为 t 时间(0~5 d)的发芽种子数,Dt 为发芽天数,FM 为幼苗鲜质量。

1.3.2 幼苗形态及生物量指标 根长、茎长为胚轴基部至形态学末端的实际距离;侧根数为大于 1 mm 的侧根数目。幼苗鲜质量、干质量参考宋松泉等^[7]的方法测定。

1.3.3 幼苗生理生化指标 幼苗叶片的 SOD、CAT、APX 活性,以及相对电解质渗漏率、TBARS 含量参考宋松泉等^[7]的方法测定。

1.4 数据分析

用 Microsoft Office Excel 2003 软件整理数据,用 SPSS 20.0 对不同处理间及不同胁迫时间的数据进行 One-Way ANOVA 分析,用 OriginPro 9.0 软件绘图。差异显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 外源 SA 对 NaCl 胁迫下大豆种子萌发的影响

图 1 表明,各组处理的种子萌发率随胁迫时间延长表现出相似的先快速增加、后缓慢增加、再趋于稳定的变化趋势,但各处理组快速增加的时间段不同;在整个胁迫处理过程中,各处理组种子的发芽率

始终表现为 CK>NaCl+SA>NaCl。其中,CK 组种子于处理 24 h 时即开始萌发,于处理 48 h 时基本达到最大值,以后趋于稳定;NaCl 和 NaCl+SA 组均于处理 36 h 时开始萌发,并于处理 72 h 达到最大值,以后趋于稳定。虽然 NaCl 胁迫组种子发芽率始终低于 NaCl+SA 组,但在快速萌发阶段(或者达到各自最大发芽率之前)与对照的差异更明显,如 NaCl 胁迫组和 NaCl+SA 组在处理 48 h 时分别比 CK 显著降低 44.6%和 30.0%,且前者发芽率显著低于后者($P<0.05$);而在处理 120 h 时分别降低 10.3%和 5.2%,两者无显著性差异($P>0.05$)。以上结果说明 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫明显抑制了大豆种子的发芽率和发芽速率,外源 SA 能一定程度上减轻这种抑制作用,但其发芽率仍低于 CK。

同时,外源 SA 诱导下大豆种子萌发特征如表 1 所示。与 CK 相比,NaCl 胁迫均使种子的发芽势、发芽指数、活力指数分别显著降低 25.3%、27.3%、62.4%($P<0.05$),而 NaCl+SA 复合处理组种子

的发芽势、发芽指数、活力指数分别比 NaCl 胁迫组显著提高了 19.6%、11.8%、14.0%($P<0.05$),但仍低于或者显著低于对照水平。可见, $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 已显著抑制了大豆种子的萌发,外源 SA 能有效缓解这种抑制作用,但不能完全消除盐害。

2.2 外源 SA 对 NaCl 胁迫下大豆幼苗形态及生物量的影响

如表 2 所示,与 CK 组相比,NaCl 胁迫处理组的幼苗根长、茎长、侧根数分别显著降低 22.8%、52.4%、74.5%($P<0.05$),而 NaCl+SA 复合处理组的幼苗根长则比 NaCl 胁迫组显著提高 18.9%($P<0.05$),但仍低于 CK,茎长和侧根数分别比 NaCl 胁迫组仅提高 3.8%和 13.9%($P>0.05$),差异不显著。表明 NaCl 胁迫显著抑制大豆幼苗根、茎的生长以及侧根的形成,其中对茎长和侧根数的影响比对根长影响更大,而外源 SA 虽能在一定程度上增加根、茎长度和侧根数目,但是其缓解盐害的能力有限。

表 2 还表明,与 CK 组相比,NaCl 胁迫组大豆幼苗的鲜质量和干质量分别显著降低 66.7%和

表 1 外源 SA 对 NaCl 胁迫下大豆种子萌发特征的影响

Table 1 Effects of exogenous salicylic acid on seed germination of soybean under NaCl stress

处理 Treatment	发芽势 Germination potential	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
NaCl	62.2±2.3568 b	81.29±10.2049 c	0.1245±0.0156 c
NaCl+SA	74.4±4.7138 a	90.89±10.1706 b	0.1419±0.0159 b
CK	83.3±5.7735 a	111.78± 6.9417 a	0.3310±0.0205 a

注:数据为平均值±标准差(n=3)。同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Values are means ±SD(n=3); The different small letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

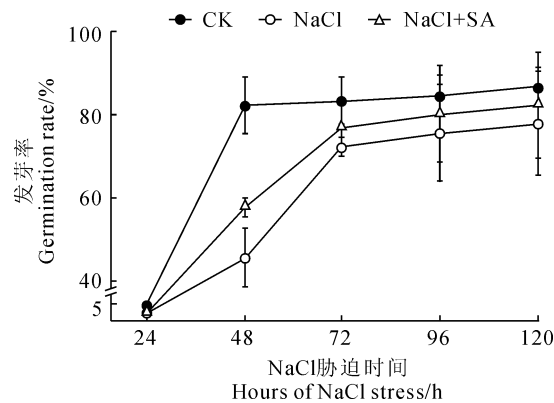


图 1 外源 SA 对 NaCl 胁迫下大豆种子萌发率的影响

Fig. 1 Effects of exogenous salicylic acid on germination rate of soybean seed under NaCl stress

表 2 外源 SA 对 NaCl 胁迫下大豆幼苗形态及生物量的影响

Table 2 Effects of exogenous salicylic acid on morphologic characters and biomass of seedlings under NaCl stress

项目 Item		处理 Treatment		
		CK	NaCl	NaCl+SA
根长	Root length/mm	39.87±0.7071 a	30.77±3.8891 b	36.60±2.4749 a
茎长	Stem length/mm	35.53±5.2003 a	16.93±1.8583 b	17.57±0.5508 b
侧根数	No. of lateral root	18.93±1.21 a	4.83±1.77 b	5.50±1.50 b
鲜质量 Fresh mass/g	地上部分 Aboveground	1.896±0.46 a	0.606±0.18 b	0.622±0.14 b
	地下部分 Underground	2.177±0.29 a	0.750±0.08 c	0.985±0.19 b
	全株 Total	4.073±0.58 a	1.356±0.12 c	1.607±0.29 b
干质量 Dry mass/g	地上部分 Aboveground	0.199±0.01 a	0.081±0.01 b	0.085±0.01 b
	地下部分 Underground	0.169±0.02 a	0.070±0.02c	0.094±0.01 b
	全株 Total	0.368±0.02 a	0.151±0.01 c	0.179±0.01 b

59.0% ($P < 0.05$),同时,地上部分和地下部分鲜质量分别显著降低 68.0%和 65.5%,而干质量分别显著降低 59.3%和 58.6% ($P < 0.05$);NaCl+SA 复合处理组的鲜质量和干质量也均比对照显著降低,但比 NaCl 胁迫组都有不同程度增加,其中的地上部分和地下部分鲜质量分别比 NaCl 胁迫组提高了 2.6%、31.3% ($P < 0.05$),干质量分别显著提高 4.9%、34.3% ($P < 0.05$)。说明,NaCl 胁迫显著抑制大豆幼苗干物质的积累,且对地上部分的伤害大于地下部分,外源 SA 能够明显降低这种抑制作用,且对地下部分盐害的缓解效应大于地上部分。

2.3 外源 SA 对 NaCl 胁迫下大豆幼苗叶片膜脂过氧化的影响

硫代巴比妥酸活性产物(TBARS)是膜脂过氧化产物,其含量高低反映了膜脂过氧化程度,相对电解质渗漏率则表明细胞膜受损伤的大小。图 2 表明,在试验时间内,CK 组幼苗叶片的 TBARS 含量和相对电解质渗漏率仅有轻微的上升;随 NaCl 胁迫时间的延长,NaCl 胁迫组幼苗的 TBARS 含量和相对电解质渗漏率均逐渐显著升高,至处理后第 72 h 时分别升高为 CK 组的 1.8 和 2.9 倍 ($P < 0.05$);外源 SA 降低了叶片相对电解质渗漏率,但对 TBARS 含量的降低效应不显著,如复合处理组第 72 h 时的相对电解质渗漏率比 NaCl 胁迫组显著降低 35.1% ($P < 0.05$),但其 TBARS 含量虽比盐胁迫组有一定程

度降低但未达到显著水平。这表明外源 SA 能有效诱导减轻 NaCl 胁迫对大豆幼苗叶片细胞膜的损坏,减少细胞内电解质外渗,并可能在胁迫后期效果更加明显。

2.4 外源 SA 对 NaCl 胁迫下大豆幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

如图 3 所示,在试验时间内,CK 组大豆幼苗叶片 SOD、CAT、APX 活性总体基本保持平衡,变化不大;随 NaCl 胁迫的进行,NaCl 胁迫组大豆幼苗叶片 SOD 和 APX 活性均显著降低,CAT 活性表现为先降低后缓慢升高的趋势,在胁迫 48 和 72 h 时,叶片 SOD、CAT、APX 活性则分别显著降低至胁迫起始值的 54.8%和 46.1%、58.5%和 72.8%、73.2%和 75.2% ($P < 0.05$),且在胁迫前期(24 h) APX 活性高于 CK 组。对于 NaCl+SA 复合处理组,SOD 活性的变化趋势与 NaCl 胁迫组基本相同,在胁迫 24、48、72 h 时分别比 NaCl 胁迫组显著提高 31.2%、51.3%、61.0% ($P < 0.05$),但仍低于同期 CK 组;CAT 活性保持基本平稳,在胁迫 48、72 h 时,其活性高于 NaCl 胁迫组但显著低于 CK;APX 活性表现为先降低后升高的趋势,在胁迫 72 h 时,其活性超过 CK 组,并显著高于 NaCl 胁迫处理组 ($P < 0.05$)。以上结果表明,大豆幼苗在 NaCl 胁迫的前期,其叶片 SOD、CAT 活性受到强烈抑制,随着胁迫的延续,其可以通过提高 CAT 活性以清除

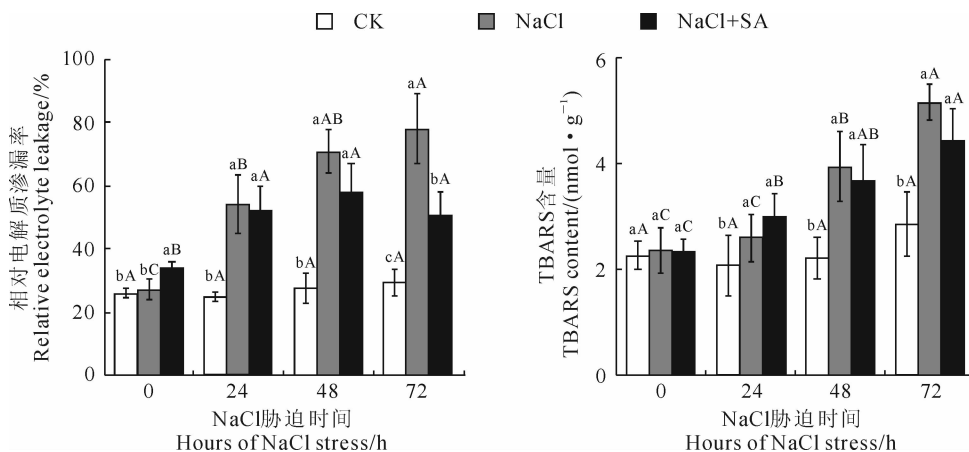


图 2 外源 SA 对 NaCl 胁迫下大豆幼苗叶片相对电解质渗漏率和硫代巴比妥酸活性产物含量的影响

数据为平均值±标准差(n=3)。不同小写字母表示同期不同处理间在 0.05 水平差异显著,

不同大写字母表示同一处理不同 NaCl 胁迫时间在 0.05 水平差异显著。下同

Fig. 2 Effects of exogenous salicylic acid on relative electrical conductivity (REC) and the content of thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) of soybean seedlings under NaCl stress

Values are means±SD(n=3). Different normal letters indicate significant difference among different treatments of the same stress time at 0.05 level, and different capital ones indicate significant difference among different stress time of the same treatment at 0.05 level. The same as below

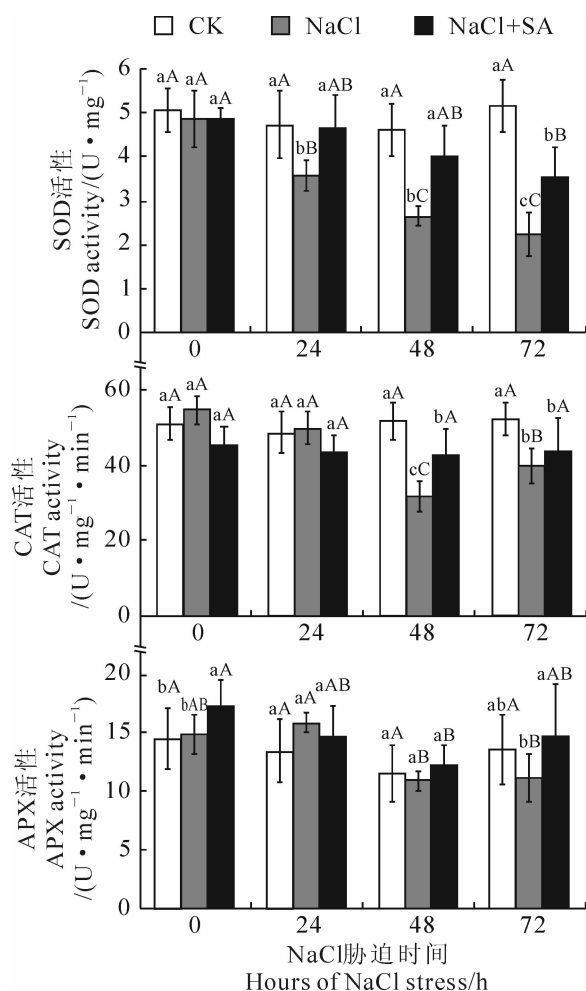


图3 外源SA对NaCl胁迫下大豆幼苗超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶活性的影响

Fig. 3 Effects of exogenous salicylic acid on activities of SOD, CAT and APX of soybean seedlings under NaCl stress

氧自由基的影响,而APX活性则在胁迫的前期迅速升高以抵御盐胁迫的影响,到后期由于自身调节有限,其活性又降低到CK组之下;外源SA显著提高NaCl胁迫下大豆幼苗SOD、CAT、APX活性,并在胁迫进行中维持CAT活性的稳定性,诱导APX活性甚至超过CK组,以消除因盐害而导致的抗氧化酶活性的破坏,增强盐胁迫下清除自由基和抗氧化的能力,帮助机体维持一定的代谢水平。

3 讨论

种子萌发和幼苗形态建成是作物生产的关键时期,也是对NaCl胁迫响应的直观表现^[8]。大量的研究表明,NaCl胁迫降低种子发芽率,抑制根茎生长和生物量积累^[9-11]。在本研究中,与NaCl胁迫组

相比,NaCl+SA复合处理组的种子萌发和根茎生长加强,生物量积累增加,其中根长和鲜质量的增长显著,而茎长和干质量增长则不显著;地下部分鲜质量增长显著,而地上部分鲜质量增长则不显著。这说明外源SA能够有效缓解NaCl胁迫对大豆幼苗生长和生物量积累的伤害,且地下部分(根)比地上部分(茎)反应更敏感;同时也说明植株在NaCl胁迫下可调整其生长和生物量分配策略来适应胁迫环境、构建植株生长。

TBARS含量和相对电解质渗漏率反映膜脂过氧化和细胞内电解质外渗水平,其大小反映了细胞膜受损伤的程度。NaCl胁迫下,抗氧化酶活性降低,体内积累过多的超氧阴离子,这些具有强氧化能力的自由基破坏细胞膜,导致膜脂过氧化。本研究结果表明,在NaCl胁迫下,大豆幼苗叶片中TBARS含量和相对电解质渗漏率均显著升高,并随胁迫时间的延长而增大,而NaCl+SA复合处理则降低了TBARS含量和相对电解质渗漏率,缓解了胁迫对细胞膜的伤害。

SOD、CAT、APX是重要的抗氧化酶,三者协同作用,共同清除氧自由基、保护膜系统完整性,是重要的抗逆指标^[12]。大量的研究表明,NaCl胁迫加剧活性氧自由基的产生,使细胞膜透性增加、抗氧化酶活性降低,造成代谢紊乱^[13-14],而SA则可诱导机体有效清除氧自由基,保护抗氧化酶活性和质膜完整性^[15-17]。本研究结果显示,与NaCl胁迫组相比,添加外源SA的复合处理组大豆幼苗叶片的SOD、CAT、APX活性均显著提高,且随着胁迫的进行CAT活性基本稳定,APX活性在后期甚至超过CK组,表明在NaCl胁迫的前期,SA诱导3种抗氧化酶协同作用清除机体过多的自由基,而在胁迫的后期更多的是稳定CAT活性和提高APX活性,增强机体清除自由基和抗氧化的能力,提升机体保持正常的代谢水平。

综上所述,外源SA可提高NaCl胁迫下大豆种子萌发和幼苗生长,增强幼苗抗氧化酶活性,减轻膜脂过氧化程度,从而增强种子活力和抗盐性。因此,外源SA可以提高大豆抗盐耐盐的能力,但是,要深入研究外源SA对盐胁迫下大豆生长的影响,还需开展苗期和结荚期农艺性状测定,进一步揭示SA对大豆后续生长的调控效应,以期更好地为农业生产服务。

参考文献:

- [1] 国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[M]. 北京:国家林业局,2011:1—3.
- [2] WANG L,ZHOU B R,WU L L,*et al.* Differentially expressed genes in *Populus simonii*×*Populus nigra* in response to NaCl stress using cDNA-AFLP[J]. *Plant Science*,2011,**180**(6):796—801.
- [3] VLOT A C,DEMPSY D A,KLESSIG D F. Salicylic acid,a multifaceted hormone to combat disease[J]. *Annual Review of Phytopathology*,2009,47:177—206.
- [4] VICENTE M R,PLASENCIA J. Salicylic acid beyond defence:Its role in plant growth and development[J]. *Journal of Experimental Botany*,2011,**62**(10):3 321—3 338.
- [5] JANDA K,HIDEG É,SZALAI G,*et al.* Salicylic acid may indirectly influence the photosynthetic electron transport[J]. *Journal of Plant Physiology*,2012,**169**(10):971—978.
- [6] FRAGNIÈRE C,SERRANO M,ABOU-MANSOUR E,*et al.* Salicylic acid and its location in response to biotic and abiotic stress[J]. *FEBS Letters*,2011,**585**(12):1 847—1 852.
- [7] 宋松泉,程红焱,龙春林,等. 种子生物学实验指导[M]. 北京:科学出版社,2005:3—4;57—58;60—62;93—97;106—107.
- [8] WANG Y P(王玉萍),DONG W(董 雯),ZHANG X(张 鑫),*et al.* Effects of salicylic acid on seed germination and physiological characters of cauliflower seedlings under salt stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*(草业学报),2012,**21**(1):213—219(in Chinese).
- [9] ZHENG CH F(郑春芳),JI D W(冀德伟),LIU W CH(刘伟成),*et al.* Eco-physiological responses of high-latitude transplanted *Aegiceras corniculatum* seedlings to NaCl stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报),2011,**22**(9):2 279—2 284(in Chinese).
- [10] ZHANG H H(张会慧),ZHANG X L(张秀丽),LI X(李 鑫),*et al.* Effects of NaCl and Na₂CO₃ stresses on the growth and photosynthesis characteristics of *Morus alba* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报),2012,**23**(3):625—631(in Chinese).
- [11] YOU J(尤 佳),WANG W R(王文瑞),LU J(卢 金),*et al.* Effects of salinity on seed germination and seedling growth in halophyte *Limonium aureum* (L.) Hill[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报),2012,**32**(12):3 825—3 833(in Chinese).
- [12] ASHRAF M,HARRIS P J C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants[J]. *Plant Science*,2004,**166**(1):3—16.
- [13] ZHU SH N(朱士农),GUO SH R(郭世荣),ZHANG A H(张爱慧),*et al.* Activities of antioxidant enzymes and photosynthetic characteristics in grafted watermelon seedlings under NaCl stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报),2008,**28**(11):2 285—2 291(in Chinese).
- [14] HU X L(胡晓立),LI Y H(李彦慧),CHEN D L(陈东亮),*et al.* Physiological responses of three colored-leaf species of *Prunus* under NaCl stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报),2010,**30**(2):370—376(in Chinese).
- [15] BORSANI O,VALPUESTA V,BOTELLA M A. Evidence for a role of salicylic acid in the oxidative damage generated by NaCl and osmotic stress in *Arabidopsis* seedlings[J]. *Plant Physiology*,2001,**126**(3):1 024—1 030.
- [16] SUN D ZH(孙德智),HE SH P(何淑平),PENG J(彭 靖),*et al.* Effects of salicylic acid and sodium nitroprusside on tomato seedling growth and physiological characteristics under NaCl stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报),2013,**33**(3):541—546(in Chinese).
- [17] YANG L(杨 岚),SHI SH(师 帅),WANG H J(王红娟),*et al.* Effects of salicylic acid on heat-resistance of *Dendrobium officinale* seedling under high temperature stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*(西北植物学报),2013,**33**(3):534—540(in Chinese).