

外源 5-氨基乙酰丙酸对盐胁迫下紫苏种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响

张春平, 何平*, 韦品祥, 杜丹丹, 喻泽莉

西南大学生命科学学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715

摘要:目的 通过对紫苏种子萌发及幼苗生理特性的研究,寻找提高紫苏种子及幼苗在盐胁迫下抗性能力的途径。方法 测定盐胁迫下紫苏种子在不同浓度的外源 5-氨基乙酰丙酸(ALA)处理后,发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数的变化,并对紫苏幼苗叶片的相对含水量、幼苗总生物量、可溶性糖量、叶片丙二醛(MDA)量以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性进行测定。结果 100 mmol/L NaCl 胁迫下的紫苏种子萌发受到显著抑制,但是经过不同质量浓度的 ALA 处理后,各项萌发指标均有所升高,其中经过 50 mg/L ALA 处理后效果最为显著,各项指标均达到最大值,发芽势为 71.3%,发芽率为 90.5%,发芽指数为 15.9,活力指数为 0.129 6。各处理均提高了幼苗总生物量和可溶性糖的量,减缓了盐胁迫下紫苏叶片相对含水量下降的趋势,降低了叶片 MDA 的量,显著地提高了 SOD、POD 和 CAT 3 种酶的活性,且经过 50 mg/L ALA 处理后 3 种酶的活性分别达到最大值(0.79、7.69、5.84 U/mg)。结论 50 mg/L ALA 能够有效地减缓盐胁迫对紫苏种子及幼苗产生的伤害,提高种子及幼苗的抗盐能力。

关键词: 紫苏; 5-氨基乙酰丙酸; 盐胁迫; 种子萌发; 抗氧化酶

中图分类号: R282.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2011)06-1194-07

Effect of exogenous 5-aminolevulinic acid on seed germination and antioxidase activities of *Perilla frutescens* seedlings under NaCl stress

ZHANG Chun-ping, HE Ping, WEI Pin-xiang, DU Dan-dan, YU Ze-li

Key Laboratory (Ministry of Education) of Eco-environments of Three Gorges Reservoir Region, Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research for Three Gorges Reservoir Region, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: **Objective** In order to get the method of improving the salt resistance of seeds and seedlings for *Perilla frutescens* under NaCl stress, seed germination and physiological characteristics of *P. frutescens* seedlings were studied. **Methods** Several physiological indexes of *P. frutescens* seeds treated by 5-aminolevulinic acid (5-ALA) were measured. And other indexes of the seedlings like relative water content (RWC), the biomass, the content of soluble sugar, and malondialdehyde (MDA), the activities of superoxide (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) were also measured. **Results** The germination indexes of *P. frutescens* seeds under NaCl stress have a obvious inhibition. But after the treatment at different concentrations of 5-ALA every germination index were all increased. And the seeds treated by 5-ALA with the concentration of 50 mg/L have the most significantly increase in every index. The germination vigor was 71.3%, the germination rate was 90.5%, the germination index and vigor index were 15.9 and 0.129 6, respectively. Every treatment of them could improve the biomass and soluble sugar of the seedlings; The RWC of *P. frutescens* leaves decreased under NaCl stress, but after treated by 5-ALA, the rate of decrease has been relieved and the content of MDA in leaves was decreased. The activities of three enzymes including SOD, POD, and CAT were all increased. And the treatment of 5-ALA with the concentration of 50 mg/L got the maximum with 0.79, 7.69, and 5.84 U/mg, respectively. **Conclusion** 5-ALA with the appropriate concentration of 50 mg/L could significantly alleviate the damages to the seeds and seedlings of *P. frutescens* under NaCl stress and promote the salt resistance of the seeds and seedlings.

Key words: *Perilla frutescens* (L.) Britt.; 5-aminolevulinic acid (5-ALA); salt stress; seed germination; antioxidase

收稿日期: 2010-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30070080)

作者简介: 张春平, 男, 山东潍坊人, 博士, 主要从事药用植物资源学及植物分子生物学等方面的研究。

Tel: 13667652727 E-mail: chunpingzhang520@163.com

*通讯作者 何平 Tel: (023)68254122 E-mail: heping196373@126.com

紫苏 *Perilla frutescens* (L.) Britt. 为唇形科紫苏属一年生草本植物, 茎、叶及种子入药, 具有散寒解表、行气和胃、宣肺化痰的功效^[1-2]。研究表明其主要含有紫苏苷、原花色素、紫苏素、木犀草素和芹黄素等多酚类化合物, 具有抗炎、镇痛和抗衰老等作用, 并且紫苏叶中含有丰富的黄酮类化合物, 具有清除和抑制自由基的作用^[3]。紫苏是我国卫生部首批颁布的“药食同源”的 60 种中药之一, 资源遍布全国 20 个省份^[4]。目前对紫苏的研究大多集中在药用成分、药理作用、种子萌发等方面^[5-9], 对紫苏种子及幼苗盐胁迫下的生理恢复方面未见报道。

土壤盐渍化是农业栽培生产中主要障碍之一, 目前我国的盐渍土地面积不断扩大, 对农业生产造成了巨大的经济损失。5-氨基乙酰丙酸 (ALA) 是所有卟啉化合物生物合成的关键前体, 作为植物叶绿素合成研究的一部分, 很早就受到重视。研究表明, 它不单是一种植物体代谢中间产物, 而且可能参与植物生长发育的调节过程。ALA 作为一种新型的植物生长调节物质, 经部分研究证实它可以提高作物的抗逆性, 提高作物产量并改善品质^[10]。Watanabe 等^[11]提出 ALA 能够促进高盐 (1.5% NaCl) 条件下棉花植株的生长, 效果明显超过以前所报道过的任何一种植物激素。Wang 等^[12]以小白菜为材料, 同样观察到外源 ALA 对盐胁迫下种子萌发的促进效应, 并且认为这种效应与 ALA 转化为卟啉化合物亚铁血红素有关。

随着中药产业化发展, 对药材的要求日益呈现科学化和合理化的趋势, 生物工程等技术引入中药材的规范化生产当中, 生物技术的应用促进了植物资源的养殖培育、繁殖、栽培, 同时也促进了大型的中药材加工基地的产生, 使得中药材生产走向集约化、规范化。本实验以紫苏种子和幼苗为材料, 研究 ALA 对 NaCl 胁迫下紫苏若干生理生化指标的影响, 探索缓解盐胁迫的调节机制, 为紫苏在栽培生产中遇到的盐胁迫问题提供理论依据, 为紫苏的大面积推广, 规范种植提供依据。

1 材料

紫苏种子由中国医学科学院药用植物研究所提供, 经西南大学生命科学学院何平教授鉴定为紫苏 *Perilla frutescens* (L.) Britt. 的干燥成熟种子。ALA 为韩国 KAIST 提供, ALA 溶液现用现配。

2 方法

2.1 种子萌发生理指标的测定

选取健壮、饱满、大小一致的紫苏种子, 用 0.1 % HgCl₂ 消毒 10 min, 蒸馏水冲洗 3~4 次, 用吸水纸吸干。胁迫所用的 NaCl 浓度为预实验得出的较为合适的浓度 (100 mmol/L), ALA 设置 4 个质量浓度梯度进行处理, 见表 1。将种子放入铺有双层滤纸的培养皿中, 在培养箱中进行 (23±2) / (15±2) °C 的变温培养, 光照时间设为 10 h, 光照强度为 2 000 lx。每个培养皿 100 粒种子, 重复 4 次, 每天定时统计萌发数, 第 5 天计算发芽势, 第 7 天计算发芽率、发芽指数和活力指数。计算公式如下: 发芽势 = (5 d 内发芽的种子数 / 供试的所有种子数); 发芽率 = (7 d 内发芽的种子 / 供试的所有种子数); 发芽指数 = $\sum(G_t/D_t)$; 活力指数 = $S \times \sum(G_t/D_t)$ 。其中 G_t 为时间 t 内发芽数, D_t 为发芽日数, S 为平均根长。

表 1 紫苏种子的不同处理组合

Table 1 Different treatments of *P. frutescens* seeds

处 理	ddH ₂ O	NaCl/(mmol·L ⁻¹)	ALA/(mg·L ⁻¹)
空白对照 CK1	+	0	0
盐对照 CK2	—	100	0
T1	—	100	10
T2	—	100	25
T3	—	100	50
T4	—	100	100

“+”代表加 ddH₂O “—”代表不加 ddH₂O

“+” means adding with ddH₂O “—” means without ddH₂O

2.2 幼苗相关生理指标的测定

从培养皿中取出 2 叶期的紫苏幼苗作为实验材料, 将根部用蒸馏水洗净, 用 1/2 Hoagland 培养液进行水培至 4 片真叶期。进行空白对照 (CK1)、NaCl 处理 (CK2) 和恢复处理 (T1~T4), 具体见表 2。每个处理 20 株幼苗, 重复 3 次。在喷施 ALA 时, 要对幼苗全株进行喷施, 叶片背面以滴水为限, 为避免光照对 ALA 的效果造成影响, 处理时间均为傍晚。处理 6 d 后测量相关指标, 包括幼苗总生物量、叶片的相对含水量、可溶性糖量、叶片丙二醛 (MDA) 量、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性。

2.2.1 幼苗总生物量的测定 测量不同处理下全株幼苗的干质量, 比较不同处理之间的差异, 每个处理 20 株幼苗, 重复 3 次。

2.2.2 叶片相对含水量 参照 He 等^[13]的方法, 先称鲜质量, 然后将叶片放入盛有蒸馏水的容器内使其充分吸收水分达饱和, 称其饱和水分质量, 105 °C

表 2 紫苏幼苗的不同处理组合

Table 2 Different treatments of *P. frutescens* seedlings

处理	1/2 Hoagland	NaCl/(mmol·L ⁻¹)	ALA/(mg·L ⁻¹)
CK1	+	0	0
CK2	—	100	0
T1	—	100	10
T2	—	100	25
T3	—	100	50
T4	—	100	100

“+”代表加 1/2 Hoagland 培养液

“+” means add 1/2 Hoagland medium

下杀青 30 min, 80 °C 下烘干至恒定质量后称量, 重复 3 次。计算相对含水量[叶片相对含水量=(鲜质量—干质量)/(水饱和鲜质量—干质量)]。

2.2.3 可溶性糖及 MDA 的测定 参照 Velikova 等^[14]的硫代巴比妥酸 (TBA) 检测法, 以 $\mu\text{mol/g}$ 表示 MDA 量, 以 mmol/g 表示可溶性糖量。

2.2.4 SOD 活性的测定 SOD 采用张以顺等^[15]的方法测量, 以抑制 NBT 光化还原 50% 所需的酶量为 1 个酶活力单位 (U), 再计算出酶活力, 以 U/g 表示。

2.2.5 POD 活性的测定 POD 采用愈创木酚法测量^[16], 以每分钟吸光度 (*A*) 的变化表示酶活力的大小, 即以每分钟 *A* 值减小 0.01 定义为 1 个酶活力单位 (U)。

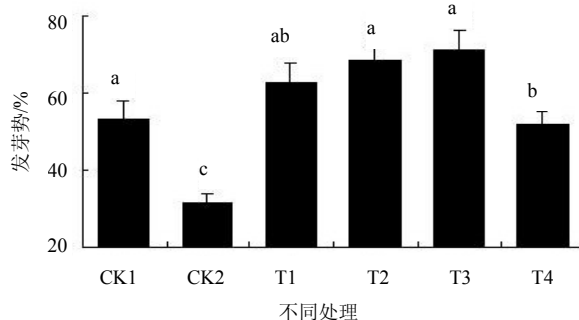
2.2.6 CAT 活性的测定 CAT 采用紫外吸收法测定^[15], 以每分钟 *A* 值减少 0.1 定义为 1 个酶活力单位 (U)。

3 结果与分析

3.1 不同质量浓度 ALA 处理下种子萌发指标的测定

由图 1 和图 2 可以看出, 紫苏种子在不同的处理下, 发芽势和发芽率都有不同程度的变化。与 CK1 的发芽势 (53.2%) 和发芽率 (75.4%) 相比可以看出, CK2 的种子发芽势 (31.3%) 和发芽率 (50.6%) 显著降低, 这表明 NaCl 处理显著抑制了紫苏种子的正常萌发。T1~T4 处理后, 紫苏种子的发芽势和发芽率与 CK2 相比均有不同程度的提高, 随着 ALA 质量浓度的增大呈上升趋势, 当 ALA 达到 50 mg/L 时, 发芽势和发芽率达到最大, 分别为 71.3% 和 90.5%, 比 CK2 分别提高了 40.0% 和 39.9%, 并且大于未经任何处理的 CK1。当质量浓度进一步增至 100 mg/L 时, 发芽势和发芽率降低至 51.6% 和 72.1%, 低于 CK1, 但仍然高于 CK2 的结果。

由图 3 和图 4 可以看出, 发芽指数和活力指数的变化趋势与发芽势和发芽率的变化趋势相似, 并且发芽指数和活力指数的变化一致。经过 NaCl 处



不同小写字母表示各处理间在 0.05 水平有显著差异, 下同
Different normal letters mean significant differences among treatments at 0.05 level, same as below

图 1 不同处理下紫苏种子的发芽势

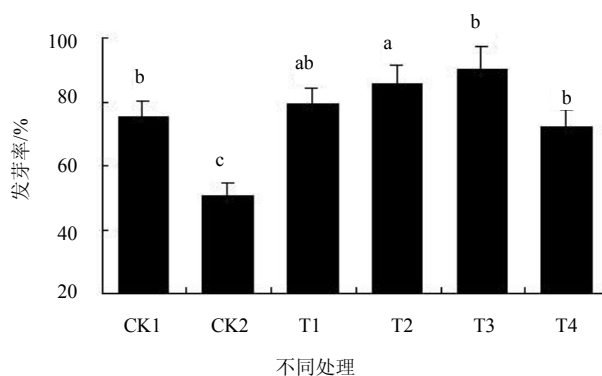
Fig. 1 Germination vigor of *P. frutescens* seeds under different treatments

图 2 不同处理下紫苏种子的发芽率

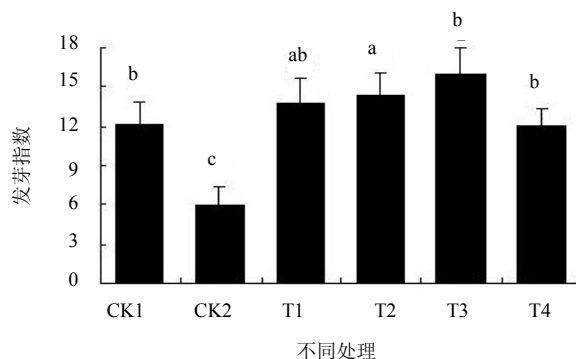
Fig. 2 Germination rate of *P. frutescens* seeds under different treatments

图 3 不同处理下紫苏种子的发芽指数

Fig. 3 Germination index of *P. frutescens* seeds under different treatments

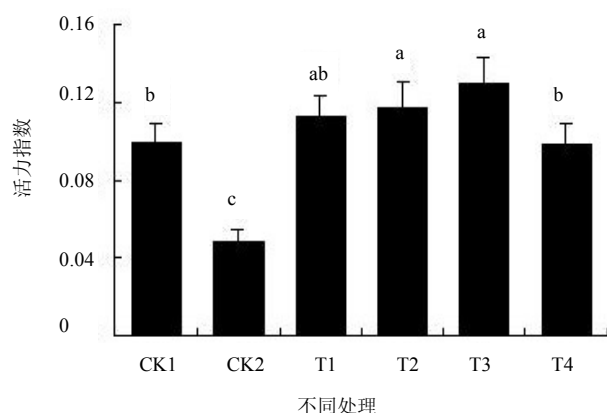


图 4 不同处理下紫苏种子的活力指数
Fig. 4 Vigor index of *P. frutescens* seeds under different treatment

理后, 发芽指数和活力指数也显著地降低, 施加 ALA 以后, 发芽指数和活力指数都逐渐升高, 当 ALA 达到 50 mg/L 时, 发芽指数和活力指数最高, 达到 15.9 和 0.129 6, 与 CK2 (5.9 和 0.048 1) 对比差异显著 ($P < 0.05$), 均为 CK2 的 2.69 倍, 且高于 CK1 (12.2 和 0.099 4)。但是当 ALA 达到 100 mg/L 时, 发芽指数和活力指数又降低至 11.9 和 0.098 6, 说明高质量浓度处理的效果不如低质量浓度处理的效果显著。

3.2 紫苏幼苗的相关生理指标

3.2.1 幼苗总生物量和叶片相对含水量的测定 由图 5 可以看出, 经过不同的处理, 紫苏幼苗的生物量发生了不同程度的变化。经过 CK2 处理后, 总生物量降到最低 (46.4 mg), 与没有经过任何处理的 CK1 的生物量 (58.9 mg) 相比差异显著 ($P < 0.05$)。经过不同质量浓度的 ALA 处理后, 幼苗总生物量与 CK2 相比, 都有不同程度的提高。且经过 50 mg/L 的 ALA 处理后, 生物量的积累 (55.4 mg) 与 CK2 相比差异显著 ($P < 0.05$), 近似达到 CK1 水平。

由图 6 可以看出, CK1 处理的叶片相对含水量为 91.2%, NaCl 处理后, 相对含水量显著地降低至 67.3%。施加外源 ALA 后, 相对含水量降低趋势有所减缓, 当 ALA 达到 50 mg/L 时, 其相对含水量为 89.5%, 显著高于 CK2 的结果。质量浓度进一步增大至 100 mg/L 时, 相对含水量又开始下降, 但仍要高于 CK2。在本实验设计的 4 个 ALA 质量浓度范围内, 均不同程度地缓解了由 NaCl 胁迫而引起的相对含水量下降的现象, 特别是当 ALA 达到 50 mg/L 时, 效果最显著。说明外源 ALA 能有效缓解幼苗在胁迫下的相对含水量降低的发生。

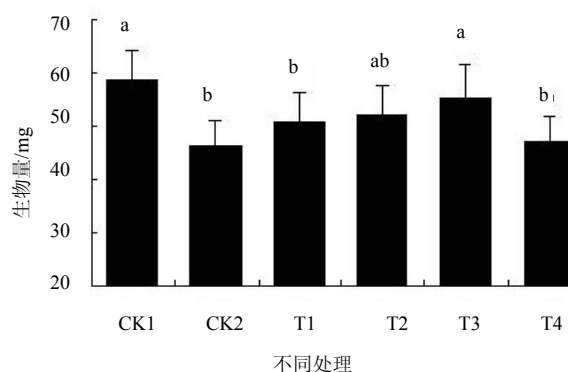


图 5 幼苗生物量测定结果

Fig. 5 Determination of biomass to *P. frutescens* seedlings

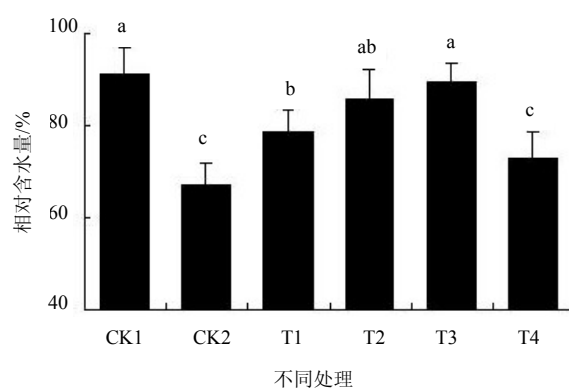


图 6 幼苗叶片相对含水量

Fig. 6 Relative water content of seedling leaves

3.2.2 MDA 及可溶性糖量的测定 由图 7 可以看出, 经过各种不同处理后紫苏幼苗叶片 MDA 量也产生了不同的变化。正常情况下 CK1 的 MDA 量最少 (0.14 $\mu\text{mol/g}$), 在经过 CK2 处理后, MDA 的量迅速升高, 与其他处理相比达到最大值 (0.38 $\mu\text{mol/g}$), 为 CK1 的 2.71 倍, 差异较为显著。通过不同质量浓度的 ALA 处理后缓解了 MDA 升高的趋势, 且处理 T3 最大程度减缓了 MDA 量的升高, 减缓的效果最显著 ($P < 0.05$), 使得叶片中 MDA 的量大幅降低至 0.18 $\mu\text{mol/g}$, 与 CK2 相比差异显著, 与 CK1 处理相比差异不显著。以上结果说明外源 ALA 处理能够有效地减缓 NaCl 胁迫下 MDA 升高的趋势, 且 ALA 为 50 mg/L 时处理效果最为显著。如图 8 所示, 盐胁迫下紫苏叶片可溶性糖量的变化, CK2 处理后, 可溶性糖的量 (0.56 mmol/g) 与 CK1 (0.22 mmol/g) 相比有显著的增加。不同质量浓度的 ALA 处理后, 可溶性糖的量逐渐增加, 并且当 ALA 为 50 mg/L 时, 达到最大值, 为 0.94 mmol/g。说明适宜质量浓度的 ALA 能够提高紫苏叶片可溶性

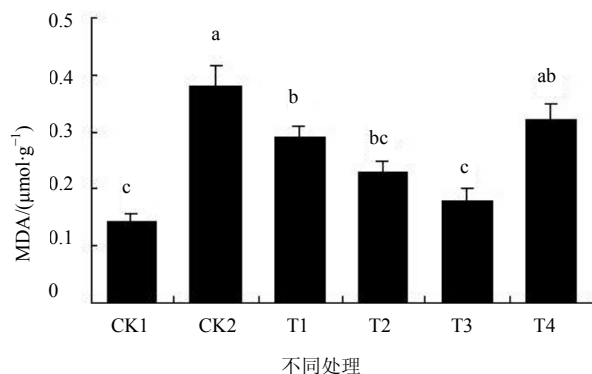


图 7 MDA 的测定

Fig. 7 Determination of MDA

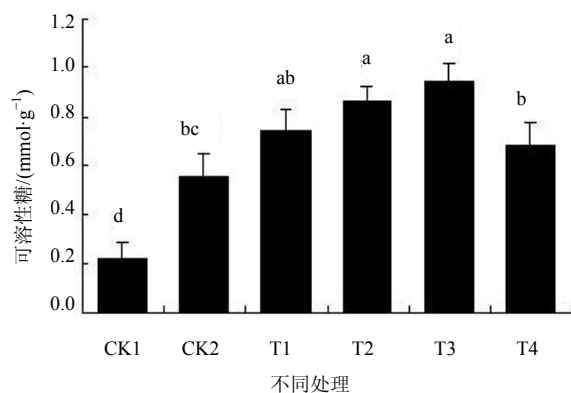


图 8 可溶性糖的测定

Fig. 8 Determination of soluble sugar

糖的量,从而提高盐胁迫下紫苏植株的抗盐性。

3.2.3 SOD、POD 和 CAT 3 种酶活性的测定 3 种抗氧化酶活性的变化趋势,如图 9~11 所示,3 种酶呈现出相似的变化趋势。经过 CK2 处理后,活性都有一定程度的升高,与 CK1 相比差异显著 ($P < 0.05$)。在经过不同浓度的 ALA 处理后,3 种酶都表现出了相似的变化趋势,即随着 ALA 质量浓度的升高,3 种酶的活性表现出逐步升高的趋势,并且都是在 50 mmol/L 时达到最大值,分别为 0.79、7.69 和 5.84 U/mg。当质量浓度继续升高至 100 mmol/L 时,酶的活性开始降低,但是仍然高于 CK2。这说明 ALA 对盐胁迫下的紫苏幼苗叶片中 3 种酶的活性,增强植株的抗盐性。

4 讨论

4.1 ALA 处理下紫苏种子的萌发生理

种子萌发是植物体生活史中比较重要的阶段,直接影响到植物体后期的生长发育和形态形成,从而间接影响到其产量,因此种子能够迅速整齐地萌发,是获得高产、稳产的基础。发芽势是用来测试

种子发芽的速度和整齐度的,其表达方式是计算种子从发芽开始到发芽高峰时段内发芽种子数占测试种子总数的百分比,其数值越大,发芽势越强,它是检测种子质量的重要指标之一。发芽率也是检测种子质量重要的指标之一,农业生产上常常依此来计算用种量。发芽指数同样可以反映种子的发芽质量,发芽指数高说明该种子发芽所用的时间短,发芽速度快。本实验中,经过 ALA 处理后的紫苏种

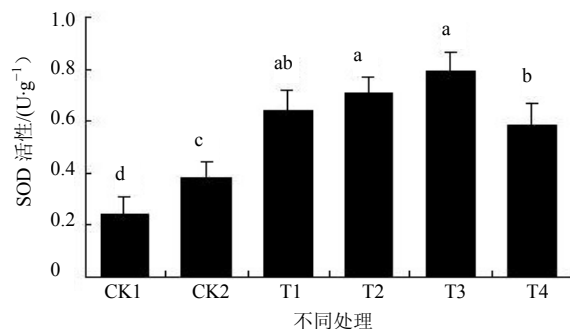


图 9 SOD 的活性

Fig. 9 SOD activity

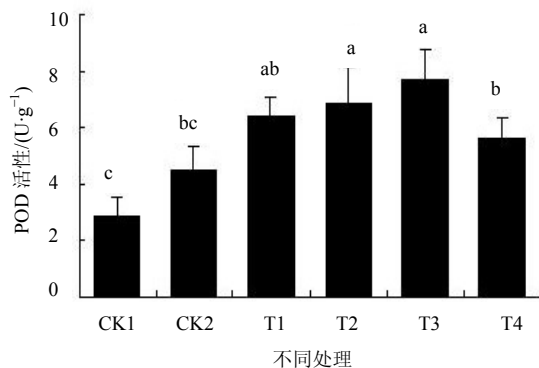


图 10 POD 的活性

Fig. 10 POD activity

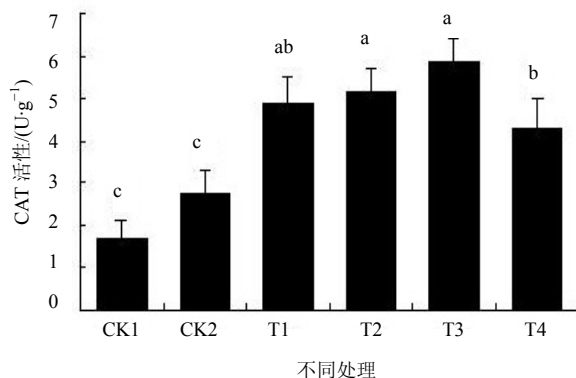


图 11 CAT 的活性

Fig. 11 CAT activity

子的发芽势、发芽率和发芽指数相对于 CK2 来说, 都有不同程度的提高, 且发芽势和发芽指数均较高, 说明 ALA 处理可以有效地提高紫苏种子在盐胁迫下的萌发能力。

4.2 叶片的相对含水量及生物量

盐胁迫对大多数植物造成的最大伤害就是植物从外界吸水困难, 由于细胞外的渗透势增大, 所以细胞不仅从外界吸水困难, 还会引起细胞失水。在本研究中, 单纯用 NaCl 处理后, 植物体的相对含水量迅速从 91.2% (CK1) 降到 67.3% (CK2), 当使用 ALA 处理后, 叶片含水量下降的速度减慢, 缓解了失水程度。因此, 通过 ALA 处理能够延缓 NaCl 胁迫下紫苏幼苗叶片水分的散失。盐胁迫可以通过干扰植物组织的正常代谢从而使植株生长缓慢或死亡, 且通常伴随着光合速率降低等生理现象的出现^[17]。经过 ALA 处理后, 植株的生物量降低的趋势减缓, 这可能 ALA 具有调节植物体叶绿素的合成有关^[18-20]。

4.3 外源 ALA 对 NaCl 处理下叶片 MDA 量、可溶性糖量和抗氧化系统的影响

有关 ALA 诱导植物抗氧化酶活性提高的原因, 目前还未有直接证据, 根据相关资料显示, 可能与其转化为亚铁血红素有关^[21]。Thomas 等^[22]观察到外源 ALA 处理促进完整黄瓜质体亚铁血红素外流并转化为血红蛋白, 有研究显示在用 ¹⁴C-ALA 处理豌豆 16 h 后 ¹⁴C 渗入到过氧化物酶和细胞色素分子的卟啉辅基中^[23]。显然, 亚铁血红素是过氧化物酶的辅基^[24], ALA 处理促进了亚铁血红素的合成, 并以辅基的形式, 导致过氧化物酶活性增加, 从而提高抗氧化胁迫能力。据此看来, ALA 促进盐胁迫下植物种子萌发至少有两方面的原因: 一是提高萌发过程中种子呼吸强度; 二是提高抗氧化酶活性。但无论是哪一方面, ALA 转化为卟啉化合物都是关键环节。刘晖等^[25]研究表明, ALA 可以促进盐胁迫下西瓜种子萌发, 明显地缓解盐胁迫对西瓜种子萌发的抑制效应, 促进幼苗生长, 这与本研究结果一致。本研究表明紫苏幼苗在受到盐害时, 体内的 MDA 量提高, 显著高于正常生长的植株, 施用 ALA 后, 降低了紫苏叶片中 MDA 量, 缓解了盐对紫苏叶片 MDA 的量影响, 这就在一定程度上减轻了膜脂的过氧化作用, 提高了膜的稳定性。并且施加中等质量浓度的 ALA 后, 3 种抗氧化酶 (SOD、POD、CAT) 的活性均达到最大值, 为清除细胞内的产生活性氧

(ROS) 提供了基础。

可溶性糖既是渗透调节剂, 也是合成其他有机溶质的碳架和能量来源, 还可在细胞内无机离子浓度高时起保护酶类的作用, 在盐逆境中其量的增加对于植物提高细胞汁液浓度、降低细胞水势、增强吸水等功能起着重要促进作用^[26]。本研究发现紫苏在盐胁迫下可溶性糖量升高, 当用不同质量浓度的 ALA 处理后, 可溶性糖量进一步升高以保护盐胁迫对紫苏幼苗造成的伤害。

由于 ALA 高质量浓度的溶液具有不稳定性, 所以采用现配现用的方式。至于 ALA 水溶液不稳定性, 有研究表明, ALA 是一种 α -酮, 在有氧和微碱性条件下, 可以自动烯醇化, 生成活性氧自由基。在碱性条件下 2 个分子 ALA 可以自动形成二氢吡嗪和 2, 5- β -羧基乙基吡嗪, 特别是在高质量浓度下更是如此^[27]。因而, 二聚缩合作用可能是 ALA 水溶液质量浓度快速降低的主要原因。从另一方面看, 正由于 ALA 在水溶液中不稳定, 所以在农业生产栽培中施用后残留时间可能会比较短, 对人体以及环境来说, 相对是比较安全的。

综上所述, 通过 ALA 处理可以显著提高 NaCl 胁迫下紫苏种子的发芽能力, 各项生理指标均有较好的体现。ALA 对幼苗的处理, 延缓了植物体叶片相对含水量的减少; 减少了 MDA 的产生量, 减缓了对细胞膜的伤害作用; 提高了紫苏幼苗叶片细胞内抗氧化酶 (SOD、POD 和 CAT) 的活性, 为清除细胞内氧自由基提供了条件。ALA 对紫苏种子及幼苗的处理缓解了 NaCl 对其的胁迫作用, 这在农业栽培生产中具有重要意义。在不同程度盐渍地的农业栽培中, 可以通过在播种前以适宜质量浓度的 ALA 进行预处理, 提高种子萌发能力, 降低盐胁迫的伤害。

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2010.
- [2] 赵中振, 肖培根. 当代药用植物典 [M]. 上海: 世界图书出版社, 2007.
- [3] 郎玉英, 张琦. 紫苏总黄酮的抗炎作用研究 [J]. 中草药, 2010, 41(5): 791-794.
- [4] 刘大川, 王静, 苏望懿, 等. 紫苏植物的开发研究 [J]. 中国油脂, 2001(5): 7-9.
- [5] 王薇, 余陈欢, 吴巧凤. 响应面分析法优化白苏中总黄酮的超声提取工艺 [J]. 中药材, 2007, 30(12): 1586-1589.
- [6] 冯蓉洁, 吕佩惠, 盛振华, 等. 紫苏提取物抗氧化活性及酚性成分的研究 [J]. 时珍国医国药, 2009, 20(5):

- 1165-1167.
- [7] 刘 蓉, 唐 方. 紫苏提取物对肢体缺血再灌注大鼠结肠环行肌条运动的影响 [J]. 中草药, 2008, 39(10): 1540-1542.
- [8] 张春平, 何 平, 何俊星, 等. 不同处理对药用紫苏种子萌发特性的影响 [J]. 中草药, 2010, 41(8): 1361-1365.
- [9] Takagi S, Nakagomi K, Sakakane Y. Anti-allergic activity of glycopeptide isolated from *Perilla frutescens* Britton [J]. *Wakan Lyakugaku Zasshi*, 2001, 18(6): 239-244.
- [10] Hotta Y, Tanaka T, Takaoka H, *et al.* Promotive effects of 5-aminolevulinic acid on the yield of several crops [J]. *Plant Growth Reg*, 1997, 22: 109-114.
- [11] Watanabe K, Tanaka T, Hotty A, *et al.* Improving salt tolerance of Cotton seedlings with 5-aminolevulinic acid [J]. *Plant Growth Regn*, 2000, 32: 99-101.
- [12] Wang L J, Jiang W B, Liu H, *et al.* Promotion of 5-aminolevulinic acid (ALA) on germination of pakchoi (*Brassica chinensis*) seeds under salt stress [J]. *Int Plant Biol*, 2005, 47(9): 1084-1091.
- [13] He J X, Wang J, Ling H G. Effects of waters stress on photochemical function and protein metabolism of photosystem II in wheat leaves [J]. *Physiol Plant*, 1995, 93(4): 771-777.
- [14] Velikova V, Yordanov I, Edreva A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain2-treated bean plants protective role of exogenous polyamines [J]. *Plant Sci*, 2000, 151(2): 59-66.
- [15] 张以顺, 黄 霞, 陈云凤. 植物生理学实验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [16] 郝再彬, 苍 晶, 徐 仲. 植物生理实验 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [17] Cristinalm M F. Ant oxidative enzymes in wheat subjected to increasing water deficit and dewatering [J]. *J Plant Physiol*, 2000, 157: 273-279.
- [18] Sasaki K, Marquez F J, Nishio N, *et al.* Promotive effects of 5-aminolevulinic acid on the growth and photosynthesis of *Spirulina platensis* [J]. *Ferm Bioeng*, 1995, 79: 453-457.
- [19] Downton W J S, Grant W J, Robinson S P. Stomatal closure fully accounts for the inhibition of photosynthesis by abscisic acid [J]. *Plant Physiol*, 1985, 77: 85-88.
- [20] Hotta Y, Tanaka T, Takaoka H, *et al.* New physiological effects of 5-aminolevulinic acid in plants: the increase of photo synthesis chlorophyll content, and plant growth [J]. *Biosci Biotech Biochem*, 1997, 61: 2025-2028.
- [21] Wang L J, Jiang W B, Liu H, *et al.* Promotion of 5-aminolevulinic acid (ALA) on germination of pakchoi (*Brassica chinensis*) seeds under salt stress [J]. *Int Plant Biol*, 2005, 47(9): 1084-1086.
- [22] Thomas J, Weinstein J D. Measurement of heme efflux and heme content in isolated developing chloroplasts [J]. *Plant Physiol*, 1990, 94: 1414-1423.
- [23] Van Huyestee R B. Porphyrin and peroxidase synthesis in cultured peanut cells [J]. *Can J Bot*, 1977, 55: 1340-1344.
- [24] Thomas L P, Kraut J. The stereochemistry of peroxidase catalysis [J]. *J Biol Chem*, 1980, 255: 8199.
- [25] 刘 晖, 康 琅, 汪良驹. ALA 对盐胁迫下西瓜种子萌发的促进效应 [J]. 果树学报, 2006, 23(6): 854-859.
- [26] 乔绍俊, 李会珍, 张志军. 盐胁迫对不同基因型紫苏种子萌发、幼苗生长和生理特征的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(4): 499-502.
- [27] Hunter A G, Rivera E, Ferreira G C. Supraphysiological concentrations of 5-aminolevulinic acid dimerize in solution to produce superoxide radical anions via a protonated dihydropyrazine intermediate [J]. *Arch Biochem Biophys*, 2005, 437: 128-137.