

SA 浸种对盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长的影响

刘亚栋, 张长峰*

(山东商业职业技术学院, 中国山东 济南 250103)

摘要: 以小麦盐敏感品种鲁麦 15 为材料, 研究了外源水杨酸(salicylic acid, SA)浸种对 100 mmol/L NaCl 胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长的影响。研究表明: 盐胁迫下, 无论经 SA 浸种还是未经 SA 浸种, 小麦幼苗的生长均受到明显抑制, 干、鲜重显著下降; 0.1 mmol/L、0.2 mmol/L 和 0.3 mmol/L SA 溶液浸种均能显著缓解 NaCl 胁迫对小麦幼苗生长的抑制, 其中以 0.2 mmol/L SA 溶液浸种预处理效果最好。实验中, 0.2 mmol/L SA 浸种可显著提高盐胁迫下小麦种子 β -淀粉酶的活性和吸胀速率。此外, 与未经 SA 浸种的盐胁迫小麦幼苗相比, 0.2 mmol/L SA 浸种的盐胁迫小麦幼苗整株的干、鲜重显著增加, 幼苗体内 Na^+ 含量降低, K^+ 含量和 K^+/Na^+ 比值显著提高; 同时, 小麦幼苗叶片中超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性升高, 而丙二醛(MDA)含量则显著降低。由此可以得出, SA 浸种能有效提高盐胁迫下小麦幼苗体内 K^+/Na^+ 比值, 提高 SOD、CAT 和 POD 的活性, 减轻膜脂过氧化程度, 以缓解盐胁迫对小麦幼苗生长的抑制作用, 从而提高耐盐性。

关键词: 小麦; 盐胁迫; 水杨酸(SA); 种子萌发; 膜脂过氧化

中图分类号: Q945.78, S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-7847(2017)03-0244-07

Effects of Seed Pre-soaking with Salicylic Acid on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat under Salt Stress

LIU Ya-dong, ZHANG Chang-feng*

(Shandong Institute of Commerce and Technology, Jinan 250103, Shandong, China)

Abstract: Seeds of *Triticum aestivum* L. (LM 15), a salt-sensitive wheat cultivar, were pre-soaked with salicylic acid (SA) to examine the effect of SA pretreatment on the germination and seedlings growth under 100 mmol/L NaCl. The results showed that, whether the seeds were pre-soaked with SA or not, the growth of wheat seedlings was significantly inhibited under salt stress and the seedling fresh weight (FW) or dry weight (DW) was dropped notably. However, 0.1 mmol/L, 0.2 mmol/L and 0.3 mmol/L SA pre-soaking significantly alleviated the growth inhibition of wheat seedlings under NaCl stress, and 0.2 mmol/L SA pre-soaking gave rise to the best alleviative effect. In the experiment, 0.2 mmol/L SA pre-soaking significantly alleviated the β -amylase activity and imbibition rate of wheat seeds under salt stress. In addition, wheat seedlings that seeds were pre-soaked with 0.2 mmol/L SA had more FW and DW, lower Na^+ concentration, higher K^+ concentration and K^+/Na^+ ratio, higher activities of SOD, CAT and POD along with lower MDA content of leaves. These results indicated that seeds pre-soaking with SA increased salt-tolerance of wheat seedlings by maintaining a higher K^+/Na^+ ratio, enhancing SOD, CAT and POD activities and reducing the degree of membrane lipid peroxidation.

Key words: wheat; salt stress; salicylic acid (SA); seed germination; membrane lipid peroxidation

(*Life Science Research*, 2017, 21(3): 244~250)

收稿日期: 2016-05-11; 修回日期: 2016-09-04

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2012CM010)

作者简介: 刘亚栋(1981-), 男, 山东济南人, 硕士, 主要从事植物生理、生化方面的研究, E-mail: liuyd6@163.com; * 通讯作者: 张长峰(1976-), 男, 土家族, 湖北宜昌人, 博士, 山东商业职业技术学院副教授, 主要从事果蔬保鲜工作的研究, E-mail: zcf202@163.com.

盐碱地在我国面积十分广泛,并且随着人口增长、化肥使用不当等不利因素的影响,土壤盐渍化日益加重,严重影响了我国农业的可持续发展。

水杨酸(salicylic acid, SA)作为一种植物内源信号物质,不仅影响着植物的离子吸收与转运、光合作用以及生长等生理生化过程,还在调节植物的抗逆性方面具有一定作用^[1,2]。刘维宝等^[3]发现外源 SA 能显著改善盐胁迫下黄瓜种子的发芽特性,促进幼苗根系的生长;周万海等^[4]认为外源 SA 处理可通过调控苜蓿幼苗体内抗氧化保护系统的活性和有机渗透调节物质的含量来缓解盐害。此外,SA 还可以有效缓解高温、低温、重金属和干旱等胁迫条件对植物的伤害作用^[5-7]。张士功等^[8]发现外源 SA 可以通过提高盐胁迫下小麦种子胚乳内 α -淀粉酶等酶的活性以及可溶性蛋白质和可溶性糖的含量来提高小麦种子的萌发,但 SA 对盐胁迫下小麦幼苗生长及其抗逆性的影响却暂未见详细报道。鲁麦 15 (*Triticum aestivum* L.) 为盐敏感品种,100 mmol/L NaCl 就能显著抑制其种子萌发^[9]。本实验以鲁麦 15 为材料,研究外源 SA 浸种对 NaCl 胁迫下小麦幼苗生长及相关生理生化特性的影响,探讨 SA 与小麦幼苗耐盐性的关系,为农业生产中利用 SA 缓解植物盐渍伤害提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

小麦盐敏感品种鲁麦 15 (*Triticum aestivum* L.) 的种子由山东省农业科学院提供。

实验所用试剂 NaCl、HgCl₂、TGA、硫代巴比妥酸等均从国药集团化学试剂有限公司购买。

1.2 实验方法

1.2.1 幼苗的培养和处理

挑选大小一致、籽粒饱满且无病虫害的小麦种子,先用 0.1% 的 HgCl₂ 消毒 10 min,再用去离子水冲洗数次,然后分别在去离子水以及浓度为 0.1 mmol/L、0.2 mmol/L 和 0.3 mmol/L SA 溶液中对小麦种子进行浸种预处理 12 h。将一部分用去离子水浸种的小麦种子培养于铺有两层滤纸、直径为 9 cm 且内有 1/5 Hoagland 营养液的培养皿中,作为对照组(Control);另一部分去离子水浸种的种子培养于铺有两层滤纸、直径为 9 cm、内有加入 100 mmol/L NaCl 的 1/5 Hoagland 营养液的培养皿中,作为 NaCl 处理组;用 0.1 mmol/L、0.2 mmol/L

和 0.3 mmol/L SA 溶液浸种的种子分别培养于铺有两层滤纸、直径为 9 cm、内有加入 100 mmol/L NaCl 的 1/5 Hoagland 营养液的培养皿中,分别作为 NaCl+0.1 SA、NaCl+0.2 SA 和 NaCl+0.3 SA 处理组。每个处理 3 个重复,每个重复 20 粒小麦种子。将培养皿放在 25 °C,光照时间为 12 h/d,光强为 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的温室内培养,7 d 后测定相关生理指标。

1.2.2 种子萌发

根据方法 1.2.1 对挑选的小麦种子进行消毒处理,然后分别在去离子水、0.2 mmol/L SA 溶液中对小麦种子进行浸种预处理 12 h。将一部分用去离子水浸种的小麦种子培养于铺有两层滤纸、直径为 9 cm 且内有 1/5 Hoagland 营养液的培养皿中,作为对照组(Control);另一部分去离子水浸种的种子培养于铺有两层滤纸、直径为 9 cm、内有加入 100 mmol/L NaCl 的 1/5 Hoagland 营养液的培养皿中,作为 NaCl 处理组;用 0.2 mmol/L SA 溶液浸种的种子培养于铺有两层滤纸、直径为 9 cm、内有加入 100 mmol/L NaCl 的 1/5 Hoagland 营养液的培养皿中,作为 NaCl+0.2 SA 处理组。每个处理 3 个重复,每个重复 20 粒小麦种子。将培养皿放在 25 °C,光照时间为 12 h/d,光强为 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的温室内培养,每天统计种子的发芽数,用于分析萌发率、发芽指数和活力指数。

萌发率=(正常发芽种子总数/供试种子总数)×100%;发芽指数 $G_i=\sum(Gt/Dt)$, G_t 为在 t 日的发芽数, D_t 为相应的发芽日数;活力指数 $V_i=S\times G_i$, S 为胚根的平均鲜重。

1.2.3 种子吸胀速率的测定

挑选大小一致、籽粒饱满且无病虫害的小麦种子,先用 0.1% 的 HgCl₂ 消毒 10 min,再用去离子水冲洗数次,然后分别在去离子水、0.2 mmol/L SA 溶液中对小麦种子进行浸种预处理 12 h,测定种子的吸胀速率。吸胀速率=[(湿重-干重)/干重]×100%。

1.2.4 种子淀粉酶活性的测定

称取 1.0 g 萌发的小麦种子放于加有 2 mL 蒸馏水和少量石英砂的研钵中,研磨成匀浆后转入离心管中(冰浴),然后用 6 mL 蒸馏水冲洗研钵并转入离心管中。将提取液在室温下放置 20 min,期间搅动数次以充分提取;随后将提取液 8 000 g、4 °C 离心 10 min,并将上清液转入 50 mL 容量瓶中。用蒸馏水定容,摇匀,得到淀粉酶原液;然后

参考王晶英等^[10]的方法,采用二硝基水杨酸法测定淀粉酶的活性。

1.2.5 Na⁺、K⁺含量的测定

取新鲜的小麦叶片和根,迅速用去离子水冲洗3次,然后用吸水纸吸干其表面水分。分别称取0.5 g新鲜叶片和根放入试管中,加入少许的去离子水,沸水浴6 h,将沸水提取液用容量瓶定容至25 mL,用火焰光度计检测Na⁺、K⁺含量。

1.2.6 干、鲜重的测定

将小麦幼苗从培养皿中取出,迅速用吸水纸吸干其表面水分,立即称其鲜重(fresh weight, FW),然后将样品置于105 °C烘箱中杀青20 min,再转至65 °C烘箱中烘干至恒重,得到干重(dry weight, DW)。

1.2.7 丙二醛(MDA)含量的测定

取0.3 g小麦叶片放于研钵中,加入少许石英砂以及1 mL 0.1% TCA研磨,再用1.5 mL 0.1% TCA分两次对研钵进行冲洗,所有溶液均倒入试管中。将2.5 mL 0.5%的硫代巴比妥酸加入试管中,混匀;再将试管置于沸水浴煮沸10 min(从试管底部出现气泡时开始计时),然后立刻放于冷水中。待冷却之后,3 000 r/min离心15 min,测量上清体积,并用紫外分光光度计检测其在532 nm、600 nm处的吸光值^[11]。计算公式如下:MDA含量(mmol/g FW)= $\Delta A \times N / (155 \times W)$ 。式中 ΔA 为 A_{600} 和 A_{532} 之差, N 为上清液的总体积, W 为植物材料的鲜重(g),155为1 mmol三甲川(反应产物)在532 nm的吸收系数。

1.2.8 抗氧化酶活性的测定

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性的测定参照冯道俊^[12]的方法。称取0.5 g小麦叶片,剪碎放入预冷的研钵中,加入适量磷酸缓冲液(pH 7.8)和少量石英砂,在冰上研磨成匀浆。然后转入离心管中,10 000 r/min离心20 min,将上清液定容至25 mL并低温保存,用于SOD和POD活性的测定。

称取0.5 g小麦叶片,剪碎放入预冷的研钵中,加入适量磷酸缓冲液(pH 7.8)和少量石英砂,在冰上研磨成匀浆,定容至25 mL,混合均匀后于5 °C冰箱中静置10 min。然后取上清转入离心管中,4 000 r/min离心15 min,将上清液低温保存,用于CAT活性的测定。

1.3 数据分析

采用SPSS 16.0软件对实验数据进行邓肯式

多重比较,数据为平均值±标准差($\bar{x} \pm s$),以 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 外源SA对盐胁迫下小麦幼苗生长的影响

从图1可以看出,100 mmol/L NaCl严重抑制了小麦幼苗的生长。进一步的统计分析显示,NaCl处理组中小麦整株的鲜重和干重均显著下降,下降率分别为75.51%和73.02%,而0.1 mmol/L、0.2 mmol/L和0.3 mmol/L SA浸种预处理则能在一定程度上显著缓解盐胁迫对小麦幼苗生长的抑制作用(图2)。NaCl+0.1 SA、NaCl+0.2 SA和NaCl+0.3 SA处理条件下的小麦整株的鲜重分别为对照组的35.13%、46.94%和42.21%,干重分别为对照组的38.21%、49.22%和42.84%,其中以0.2 mmol/L SA浸种预处理缓解盐胁迫的效果最好,故选用0.2 mmol/L SA作为后续实验的处理浓度。



图1 SA浸种对盐胁迫下小麦幼苗生长的缓解作用

Fig.1 Wheat seed pre-soaking with SA alleviates growth inhibition of wheat seedlings under salt stress

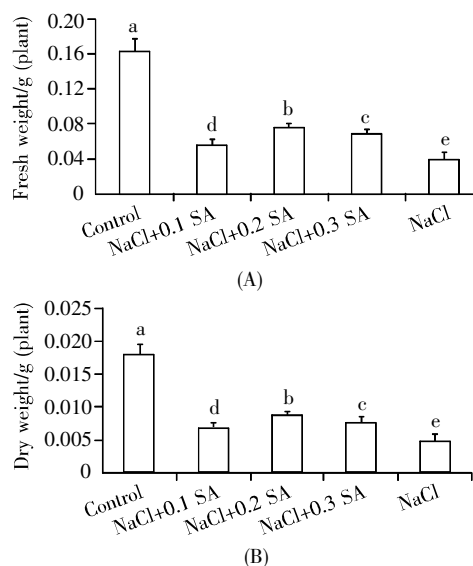


图2 SA浸种对盐胁迫下小麦幼苗鲜重(A)和干重(B)的影响

图中显示的是单株植物的鲜重和干重,数据为平均值±标准差($n=30$)。不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

Fig.2 Effects of wheat seed pre-soaking with exogenous SA on FW (A) and DW (B) under salt stress

The figure shows the fresh weight and dry weight of individual plants, values are the $\bar{x} \pm s$ ($n=30$). Different letters (a, b, c, d, e) represent significant difference at $P < 0.05$.

2.2 外源 SA 对盐胁迫下小麦种子萌发的影响

从图 3 可以看出, 100 mmol/L NaCl 使小麦种子的萌发率、发芽指数和活力指数显著下降, 而 0.2 mmol/L SA 浸种处理则能显著缓解 NaCl 对小麦种子萌发的抑制作用。与未用 SA 浸种处理的盐胁迫下的小麦种子相比, 0.2 mmol/L SA 浸种处理使盐胁迫下小麦种子的萌发率、发芽指数和活力指数分别提高了 54.87%、63.27%、52.14%。

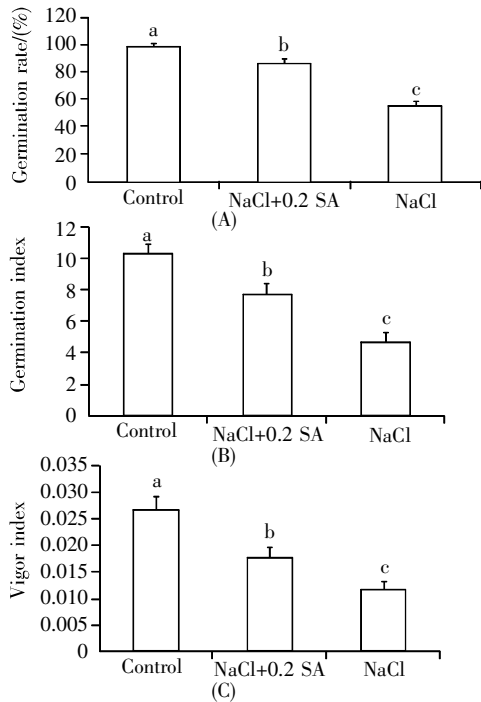


图 3 SA 浸种对盐胁迫下小麦种子萌发率(A)、发芽指数(B)和活力指数(C)的影响

图中数据为平均值±标准差($n=5$)。不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Fig.3 Effects of wheat seed pre-soaking with exogenous SA on germination rate (A), germination index (B) and vigor index (C) under salt stress

Values are the $\bar{x}\pm s$ ($n=5$). Different letters (a, b, c) represent significant difference at $P<0.05$.

2.3 外源 SA 对盐胁迫下小麦种子中淀粉酶活性的影响

从图 4 中可以看出, 100 mmol/L NaCl 显著降低了小麦种子中 α -淀粉酶和 β -淀粉酶的活性。有意思的是, 0.2 mmol/L SA 浸种对盐胁迫下小麦种子中 α -淀粉酶的活性没有明显影响(图 4A), 但显著提高了 β -淀粉酶的活性, 使 β -淀粉酶的活性提高了 19.53% (图 4B)。

2.4 外源 SA 对盐胁迫下小麦种子吸胀速率的影响

100 mmol/L NaCl 使小麦种子的吸胀速率显著下降, 而 0.2 mmol/L SA 浸种则能显著提高盐胁迫下小麦种子的吸胀速率(图 5)。与未用 SA 浸

种处理的盐胁迫小麦种子相比, 0.2 mmol/L SA 浸种处理使其吸胀速率提高了 12.86%。

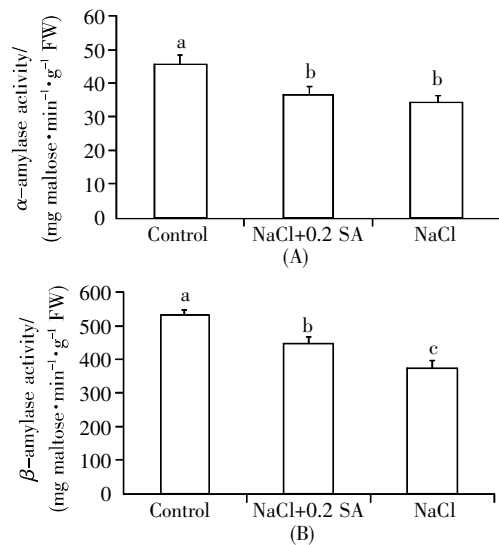


图 4 SA 浸种对盐胁迫下小麦种子中 α -淀粉酶活性(A)和 β -淀粉酶活性(B)的影响

图中数据为平均值±标准差($n=5$)。不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Fig.4 Effects of wheat seed pre-soaking with exogenous SA on α -amylase activity (A) and β -amylase activity (B) of wheat seeds under salt stress

Values are the $\bar{x}\pm s$ ($n=5$). Different letters (a, b, c) represent significant difference at $P<0.05$.

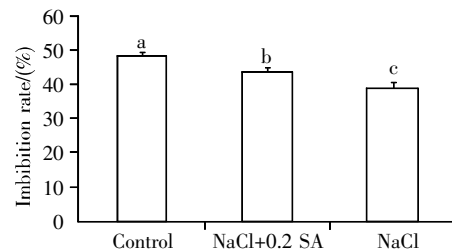


图 5 SA 浸种对盐胁迫下小麦种子吸胀速率的影响

图中数据为平均值±标准差($n=5$)。不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Fig.5 Effects of wheat seed pre-soaking with exogenous SA on imbibition rate under salt stress

Values are the $\bar{x}\pm s$ ($n=5$). Different letters (a, b, c) represent significant difference at $P<0.05$.

2.5 外源 SA 对小麦幼苗离子含量的影响

从图 6A 可以看出, 100 mmol/L NaCl 处理条件下, 小麦叶片和根中的 Na^+ 含量显著升高, 而 SA 浸种预处理能显著降低小麦叶片和根中的 Na^+ 含量。图 6B 表明 100 mmol/L NaCl 使小麦叶片和根部的 K^+ 含量显著下降; 与单独的 100 mmol/L NaCl 处理组相比, SA 浸种预处理能极显著提高叶片和根中的 K^+ 含量。因此, 盐胁迫会显著降低小麦叶片和根中的 K^+/Na^+ 比值, 而 SA 浸种预处理可以显著提高盐胁迫下小麦叶片和根中的 K^+/Na^+

比值(图 6C),从而在一定程度上缓解盐胁迫对小麦幼苗生长的抑制作用。

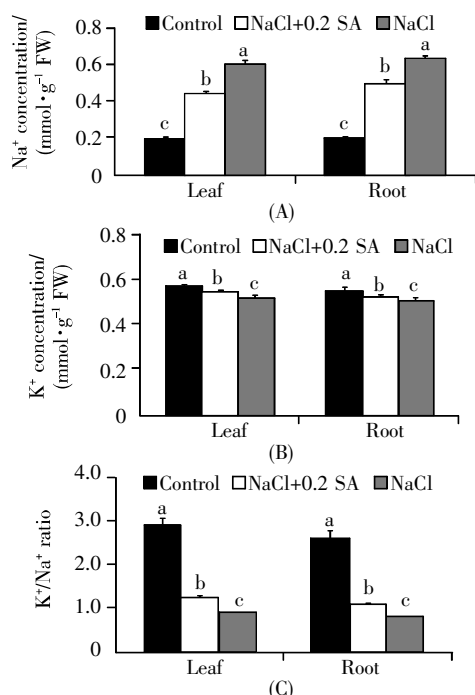


图 6 SA 浸种对盐胁迫下小麦幼苗中 Na⁺ (A)、K⁺ (B)和 K⁺/Na⁺比值(C)的影响

图中数据为平均值±标准差(n=5)。不同字母表示在 P<0.05 水平上差异显著。

Fig.6 Effects of wheat seed pre-soaking with SA on Na⁺ (A), K⁺ (B) and K⁺/Na⁺ ratio (C) under salt stress

Values are the $\bar{x}\pm s$ (n=5). Different letters (a, b, c) represent significant difference at P<0.05.

2.6 外源 SA 对小麦叶片中 MDA 含量的影响

MDA 是植物在逆境胁迫下膜脂过氧化的产物,其含量的高低可以反映在逆境条件下植物受伤害的程度^[13]。从图 7 可以看出,100 mmol/L NaCl 使小麦叶片中的 MDA 含量显著升高,而 SA 浸种预处理能显著降低盐胁迫下小麦叶片中的 MDA 含量,说明外源 SA 能显著缓解 NaCl 胁迫对小麦幼苗的伤害作用。

2.7 外源 SA 对小麦叶片中抗氧化酶活性的影响

过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)是植物体内重要的活性氧清除酶^[14],能有效清除植物体内的自由基和过氧化物。100 mmol/L NaCl 处理条件下,小麦叶片中 CAT、POD 和 SOD 活性都显著降低,而 SA 浸种预处理能显著提高盐胁迫下小麦叶片中 CAT、POD 和 SOD 的活性(图 8)。

3 讨论

盐渍环境是一种严峻的胁迫环境,对植物的

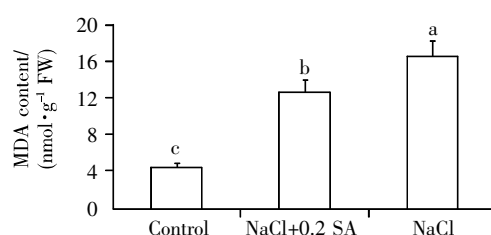


图 7 SA 浸种对盐胁迫下小麦幼苗叶片中 MDA 含量的影响

图中数据为平均值±标准差(n=5)。不同字母表示在 P<0.05 水平上差异显著。

Fig.7 Effects of wheat seed pre-soaking with SA on MDA content under salt stress

Values are the $\bar{x}\pm s$ (n=5). Different letters (a, b, c) represent significant difference at P<0.05.

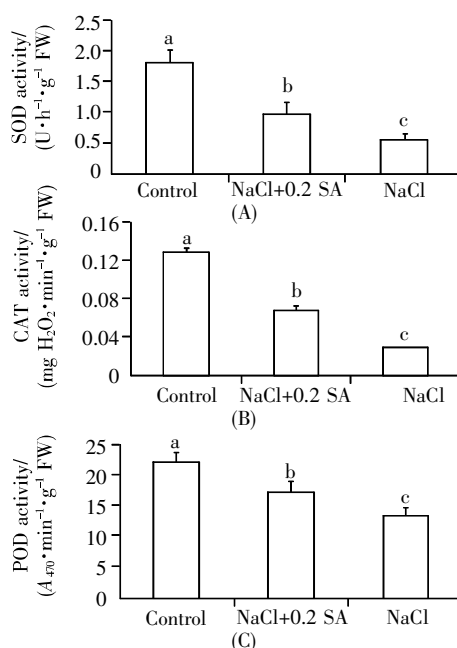


图 8 SA 浸种对盐胁迫下小麦幼苗叶片中 SOD (A)、CAT (B)和 POD (C)活性的影响

图中数据为平均值±标准差(n=5)。不同字母表示在 P<0.05 水平上差异显著。

Fig.8 Effects of wheat seed pre-soaking with SA on SOD (A), CAT (B) and POD (C) activity under salt stress

Values are the $\bar{x}\pm s$ (n=5). Different letters (a, b, c) represent significant difference at P<0.05.

生长、发育、繁殖以及分布等生理生态特征有着重要的影响^[15]。盐胁迫条件下,植物会出现光合速率下降、生长发育受到抑制等现象,严重时可能造成植物体死亡^[16]。本研究中,100 mmol/L NaCl 处理条件下,小麦幼苗生长受到明显抑制,小麦整株的鲜重和干重均显著下降,分别为对照组的 24.49%和 26.98% (图 2)。而 SA 浸种预处理则显著缓解了盐胁迫对小麦幼苗生长的抑制作用,且不同浓度(0.1 mmol/L、0.2 mmol/L 和 0.3 mmol/L)的 SA 在缓解盐胁迫下小麦幼苗生长的抑制作用方面各不相

同,其中以 0.2 mmol/L SA 浸种预处理的缓解效果最好。

对于大多数植物来说,种子阶段是植物生活周期中最能忍受不利环境因素的阶段,而幼苗期则是最为脆弱的时期^[17]。萌发率、发芽指数和活力指数是评价种子发芽常用的指标,反映了种子发芽速度、发芽整齐度和幼苗健壮的潜势^[18]。从图 3 中可以看出,与未用 SA 浸种处理的盐胁迫下的小麦种子相比,0.2 mmol/L SA 浸种处理使盐胁迫下小麦种子的萌发率、发芽指数和活力指数均大幅提高,说明 SA 浸种处理显著缓解了 NaCl 对小麦种子萌发的抑制作用。在种子萌发过程中, α -淀粉酶、 β -淀粉酶等酶类可以将淀粉降解为小分子的糖类物质,这些小分子糖类物质的可溶性大于淀粉,有助于降低细胞质的渗透势,增加细胞的渗透调节能力^[19]。张士功等^[8]发现外源 SA 可以通过提高盐胁迫下小麦种子胚乳内 α -淀粉酶等酶的活性来提高小麦种子萌发的速度、数量和质量。而我们的研究结果发现,0.2 mmol/L SA 浸种对盐胁迫下小麦种子 α -淀粉酶的活性并没有显著影响,但是显著提高了 β -淀粉酶的活性(图 4)。 α -淀粉酶是种子萌发初期最重要的酶,而 β -淀粉酶的活性在种子萌发期间会显著增强^[19],这说明 SA 对盐胁迫下盐敏感品种鲁麦 15 种子萌发的缓解作用主要是在萌发期间通过提高 β -淀粉酶的活性实现,而不是在萌发初期通过作用于 α -淀粉酶实现。充足的水分是种子萌发的三大必备条件之一,盐生环境中种子的缺水状态必然抑制其萌发^[20]。从图 5 可以看出,0.2 mmol/L SA 浸种还可以通过提高种子的吸胀速率促进盐胁迫下种子的萌发。

盐胁迫对植物造成的伤害主要包括渗透胁迫和离子毒害^[21]。 K^+ 是植物体生长的必需元素,而较高浓度的 Na^+ 对植物有毒害作用,维持细胞内较高的 K^+/Na^+ 比值对植物耐盐非常重要^[22]。本研究表明,100 mmol/L NaCl 处理条件下,小麦叶片和根中的 Na^+ 含量均显著升高, K^+ 含量及 K^+/Na^+ 比值均显著下降;NaCl+SA 处理条件下,小麦叶片和根中的 Na^+ 含量显著下降, K^+ 含量及 K^+/Na^+ 比值均显著升高(图 6),说明 SA 可以通过提高小麦幼苗体内的 K^+/Na^+ 比值来提高小麦幼苗的耐盐性,缓解盐胁迫对小麦幼苗生长的抑制作用。

正常生长条件下,植物体内的活性氧处于一种动态平衡之中,但在逆境胁迫条件下,植物体内活性氧会不断积累,导致膜脂过氧化,进而损

害膜结构及正常功能^[23,24]。本研究中,100 mmol/L NaCl 处理条件下,小麦幼苗叶片中 SOD 活性、CAT 和 POD 活性都显著降低,而 MDA 含量显著升高(图 7、8)。植物体内,活性氧的清除主要依靠非酶促抗氧化系统(Asa、GSH 等)和酶促抗氧化系统(SOD、CAT、POD 等)来完成^[25]。酶促抗氧化系统是植物体内高效而专一的活性氧清除体系^[26],SOD、CAT、POD 等相互协调,共同清除植物体内积累的活性氧,减少膜脂过氧化,保护膜结构,使其少受或免受伤害^[27]。SA 作为植物体内的一种信号分子,可以通过调节 POD、SOD 等抗氧化酶的活性缓解盐胁迫对丝瓜、苜蓿等植物的伤害^[4,28]。本实验中,100 mmol/L NaCl 处理条件下,SA 浸种能显著提高 SOD、CAT 和 POD 的活性(图 8),有效抑制体内 ROS 含量的升高,减轻膜脂过氧化,使 MDA 含量明显降低(图 7),说明 SA 可以通过提高盐胁迫下小麦质膜的稳定性来提高小麦幼苗的耐盐性。

综上所述,在盐胁迫下,小麦种子萌发和幼苗生长受到显著抑制,小麦体内 Na^+ 含量显著升高,膜脂过氧化加剧,而 SA 浸种能显著缓解盐胁迫对小麦种子萌发和幼苗的伤害,这主要是由于 SA 浸种可显著提高种子 β -淀粉酶的活性和吸胀速率,降低小麦幼苗 Na^+ 含量,增加 K^+ 含量,使 K^+/Na^+ 比值显著升高;同时,SA 浸种可促进 SOD、CAT 和 POD 等抗氧化酶活性,使膜脂过氧化程度降低,维持细胞正常的代谢活性,它们共同作用显著降低了盐胁迫对小麦幼苗生长的抑制作用。然而,SA 通过何种途径调节盐胁迫下小麦体内 Na^+ 、 K^+ 含量以及抗氧化酶活性,还有待于进一步探索。

参考文献(References):

- [1] Janda T, Szalai G, Tari L, *et al.* Hydroponic treatment with salicylic acid decreases the effects of chilling injury in maize (*Zea mays* L.) plants[J]. *Planta*, 1999, 208(2): 175-180.
- [2] Malamy J, Carr J P, Klessig D F, *et al.* Salicylic acid: a likely endogenous signal in the resistance response of tobacco to viral infection[J]. *Science*, 1990, 250(4983): 1002-1004.
- [3] 刘维宝, 陈新红, 周羽, 等. 外源水杨酸对 NaCl 胁迫下黄瓜种子萌发和幼苗根系生长的影响[J]. 中国农学通报(Liu Weibao, Chen Xin-hong, Zhou Yu, *et al.* Effect of salicylic acid on cucumber seed germination and seedling root growth under NaCl stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*), 2013, 29(34): 166-170.
- [4] 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(Zhou Wan-hai, Shi Shang-li, Kou Jiang-tao. Exogenous salicylic acid on alleviating salt stress in alfalfa seedlings[J]. *Acta Prataculturae Sinica*), 2012, 21(3): 171-176.
- [5] Larkindale J, Knight M R. Protection against heat stress-induced oxidative damage in *Arabidopsis* involves calcium, abscisic acid, ethylene, and salicylic acid[J]. *Plant Physiology*, 2002, 128(2): 682-695.

- [6] Noriega G, Caggiano E, Lecube M L, *et al.* The role of salicylic acid in the prevention of oxidative stress elicited by cadmium in soybean plants[J]. *Biometals*, 2012, 25(6): 1155–1165.
- [7] Saryhan N, Saglam A, Kadioglu A. Salicylic acid pretreatment induces drought tolerance and delays leaf rolling by inducing antioxidant systems in maize genotypes[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(1): 97–106.
- [8] 张士功, 高吉寅, 宋景芝. 水杨酸和阿斯匹林对盐胁迫下小麦种子萌发的作用[J]. *植物生理学通讯*(Zhang Shi-gong, Gao Ji-yin, Song Jing-zhi. Effect of salicylic acid and aspirin on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination under salt stress[J]. *Plant Physiology Communications*), 1999, 35(1): 29–32.
- [9] 鲍敬. 外源 H₂S 对盐胁迫下小麦生长及 Na⁺吸收和转运的效应[D]. 济南: 山东师范大学(Bao Jing. Effect of Exogenous Hydrogen Sulfide on the Growth and Uptake and Transportation of Na⁺ of Wheat Seedlings under Salt Stress[D]. Jinan: Shandong Normal University), 2012.
- [10] 王晶英, 敖红, 张杰, 等. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社(Wang Jing-ying, Ao Hong, Zhang Jie, *et al.* *Plant Physiology and Biochemistry Technology and Principle*[M]. Haerbin: Northeast Forestry University Press), 2003: 35–38.
- [11] 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 等. 水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系[J]. *植物学报*(Lin Zhi-fang, Li Shuang-shun, Lin Gui-zhu, *et al.* Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice leaves[J]. *Acta Botanica Sinica*), 1984, 26(6): 605–615.
- [12] 冯道俊. 水分胁迫下非气孔因素对玉米幼苗光合作用影响机理的研究[D]. 济南: 山东师范大学(Feng Dao-jun. The Study on Mechanism of Nonstomatal Factors in Photosynthesis of Maize Seedlings under Water Stress[D]. Jinan: Shandong Normal University), 2006.
- [13] Bharti N, Yadav D, Barnawal D, *et al.* *Exiguobacterium oxidotolerans*, a halotolerant plant growth promoting rhizobacteria, improves yield and content of secondary metabolites in *Bacopa monnieri* (L.) Pennell under primary and secondary salt stress[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013, 29(2): 379–387.
- [14] Zhang L, Pei Y, Wang H, *et al.* Hydrogen sulfide alleviates cadmium-induced cell death through restraining ROS accumulation in roots of *Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2015, 2015: 804603.
- [15] Deng Y, Yuan F, Feng Z, *et al.* Comparative study on seed germination characteristics of two species of Australia saltbush under salt stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 337–341.
- [16] Hamamoto S, Horie T, Hauser F, *et al.* HKT transporters mediate salt stress resistance in plants: from structure and function to the field[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2015, 32: 113–120.
- [17] Gutterman Y. *Seed Germination in Desert Plants*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [18] 何欢乐, 蔡润, 潘俊松, 等. 盐胁迫对黄瓜种子萌发特性的影响[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)* (He Huan-le, Cai Run, Pan Jun-song, *et al.* Effect of NaCl stress on germination characteristics of cucumber[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*), 2005, 23(2): 148–153.
- [19] 段培. NO 供体 SNP 浸种预处理对盐胁迫下小麦种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 济南: 山东师范大学(Duan Pei. Priming of Seeds with NO Donor Sodium Nitroprusside (SNP) Alleviates the Inhibition on Wheat Seed Germination and the Growth of Wheat Seedlings by Salt Stress[D]. Jinan: Shandong Normal University), 2007.
- [20] 郎志红. 盐碱胁迫对植物种子萌发和幼苗生长的影响[D]. 甘肃: 兰州交通大学(Lang Zhi-hong. Effects of Saline-alkali Stress on Seed Germination and Seedling[D]. Gansu: Lanzhou Jiaotong University), 2008.
- [21] Hasegawa P M, Bressan R A, Zhu J K, *et al.* Plant cellular and molecular responses to high salinity[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2000, 51(1): 463–499.
- [22] 赵春梅, 崔继哲, 金荣荣. 盐胁迫下植物体内保持高 K⁺/Na⁺比率的机制[J]. *东北农业大学学报*(Zhao Chun-mei, Cui Ji-zhe, Jin Rong-rong. Mechanism of maintaining high K⁺/Na⁺ ratios under salt stress in plant[J]. *Journal of Northeast Agriculture University*), 2012, 43(7): 155–160.
- [23] 陈颖, 徐彩平, 汪南阳, 等. 盐胁迫下水杨酸对南林 895 杨组育苗抗氧化系统的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)* (Chen Ying, Xu Cai-ping, Wang Nan-yang, *et al.* Effects of salicylic acid on oxidation resistance of ‘Nanlin 895’ poplar plantlets *in vitro* under salt stress[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*), 2013, 36(6): 17–22.
- [24] 孙德智, 何淑平, 彭靖, 等. 水杨酸和硝普钠对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. *西北植物学报*(Sun De-zhi, He Shu-ping, Peng Jing, *et al.* Effects of salicylic acid and sodium nitroprusside on tomato seedling growth and physiological characteristics under NaCl stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*), 2013, 33(3): 541–546.
- [25] Rai M K, Kalia R K, Singh R, *et al.* Developing stress tolerant plants through *in vitro* selection—an overview of the recent progress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 71(1): 89–98.
- [26] 王宝山. *逆境植物生物学*[M]. 北京: 高等教育出版社(Wang Bao-shan. *Plant Biology under Stress*[M]. Beijing: Higher Education Press), 2011.
- [27] Sawata H, Shim I S, Usui K, *et al.* Adaptive mechanism of *Echinochloa crus-galli* Beauv. Var. *formosensis* Ohwi under salt stress: effect of salicylic acid on salt sensitivity[J]. *Plant Science*, 2008, 174(6): 583–589.
- [28] 张爱慧, 朱士农. 外源水杨酸对盐胁迫下丝瓜幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. *江西农业学报*(Zhang Ai-hui, Zhu Shi-nong. Effects of exogenous salicylic acid on growth and antioxidant enzyme activities of loofah seedlings under salt stress[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*), 2013, 25(10): 27–29.