

γ -氨基丁酸浸种对盐分胁迫下番茄出苗及幼苗生长的影响

闫妮^{1,2}, 冯棣¹, 杨凤娟², 张敬敏¹, 桑茂鹏³, 祝海燕¹

(1. 山东省设施园艺生物工程研究中心·潍坊科技学院 山东寿光 2627001; 2. 山东农业大学园艺科学与工程学院 山东泰安 271018; 3. 曲水县净植茂藤农业科技有限公司 西藏曲水 850600)

摘要:为探讨外源 γ -氨基丁酸(GABA)浸种对番茄耐盐性的作用,设置3个NaCl质量浓度(0.6、2.6、4.6 g·L⁻¹)进行灌水处理,研究GABA浸种对番茄出苗过程、地上部和根系生长、叶绿素含量和抗氧化酶活性的影响。结果表明,与不浸种处理相比,在较低盐分胁迫下(2.6 g·L⁻¹),GABA浸种提高了番茄出苗率,促进了植株的生长及地上部、根系干质量的累积;在较高盐分胁迫下(4.6 g·L⁻¹),GABA浸种促进了种子萌发、提高了出苗率,但增加了死苗率,且出现了番茄地上部和根系生长被抑制、叶绿素含量降低的现象。此外,与不浸种处理相比,GABA浸种处理的叶片抗氧化酶活性不同程度提高,其中在较低盐分胁迫下(2.6 g·L⁻¹),GABA浸种处理的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶活性分别提高了48.53%、44.71%和142.50%。总之,GABA浸种可在番茄幼苗处于较低盐分胁迫(≤ 2.6 g·L⁻¹)下发挥缓解盐分胁迫的作用。

关键词:番茄; γ -氨基丁酸; 盐分胁迫; 抗氧化酶活性; 叶绿素

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2022)10-058-06

GABA soaking affects tomato emergence and seedling growth under salt stress

YAN Ni^{1,2}, FENG Di¹, YANG Fengjuan², ZHANG Jingmin¹, SANG Maopeng³, ZHU Haiyan¹

(1. Shandong Facilities Horticulture Biological Engineering Research Center/Weifang University of Science and Technology, Shouguang 2627001, Shandong, China; 2. School of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; 3. Jingzhi-Maoteng Agricultural Technology, Co.Ltd. in Qushui County, Qushui 850600, Xizang, China)

Abstract: To investigate the effect of exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) on soaking tomato seeds to alleviate salt stress, three salinized irrigation water (0.6, 2.6 and 4.6 g·L⁻¹, respectively) were set to study the seed germination, seedling aboveground and root growth, chlorophyll content and antioxidant enzyme activities of tomato in response to the GABA application. Result showed that, compared with the un-soaking treatments, under a lower salinity stress (2.6 g·L⁻¹), GABA soaking increased tomato germination rate, promoted plant height and the accumulated dry matter in the aboveground and roots, but under a higher salinity stress (4.6 g·L⁻¹), GABA increased the seedling death rate, inhibited the growth of the tomato aboveground parts and roots, and reduced the chlorophyll content, while the seed germination and emergence was promoted. In addition, in comparison with the un-soaking treatments, the antioxidant enzyme activities in GABA treated tomato leaves increased at various degrees. Among those, the superoxide dismutase, peroxidase, ascorbate peroxidase activities under lower salinity stress (2.6 g·L⁻¹) surged by 48.53%, 44.71% and 142.50%, respectively. In summary, GABA seed-soaking treatment can be effective in relieving salt stress in tomato seedlings under lower salinity stress (≤ 2.6 g·L⁻¹).

Key words: Tomato; GABA; Salt stress; Antioxidant enzyme activity; Chlorophyll

现代农业的发展不仅解决了我国蔬菜供应种类少且数量不足的问题,还实现了周年均衡供应,极大地满足了人们对蔬菜的日常需求。然而,由于地下水位上升、气候干旱等自然因素及不合理的种

植方式、人为施肥量大等因素,部分地区的土壤在得不到雨水充分淋洗的情况下,致使种植多年后土壤中的盐分在表层聚集,产生严重的土壤次生盐渍化问题。盐分胁迫会使植株产生渗透胁迫和离子

收稿日期: 2022-03-22; 修回日期: 2022-06-25

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME154); 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202001ZR0067G)

作者简介: 闫妮,女,在读硕士研究生,主要从事设施蔬菜高产优质栽培研究工作。Email: 885716467@qq.com

通信作者: 冯棣,男,副教授,主要从事水土资源高效利用方面的研究工作。Email: fengdi2008sunny@163.com

胁迫,从而抑制种子吸水膨胀、出苗以及根尖的产生和幼叶生长,并加速成熟叶衰老,同时还会导致光合作用速率降低、叶绿素含量下降、活性氧(ROS)增加,进一步影响植株营养生长和生殖生长^[1-2]。番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)属于耐盐性适度敏感作物,盐分胁迫会抑制其出苗、生长,造成减产。大量研究表明,可通过外源物质(如 γ -氨基丁酸(GABA)、黄腐酸钾、水杨酸、一氧化氮等)的使用,提高作物的耐盐性^[3-9]。GABA属于非蛋白质氨基酸,与植物体内碳素和氮素两大代谢途径紧密联系,是一种对植物生长发育有重要影响的信号物质^[10]。前人研究表明,外源GABA处理通过促进内源GABA的积累、调节活性氧代谢,能显著改善小麦、玉米、甜瓜等多种作物的耐盐性^[11-13]。罗黄颖等^[6]发现,在 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl胁迫下,添加 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ GABA水培,明显提高了番茄苗叶片生长速率、抗氧化酶活性、叶绿素含量和光合速率,减少了活性氧和膜脂过氧化产物丙二醛的积累,从而改善了耐盐性。贾邱颖等^[14]发现,与未添加GABA相比,添加 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源GABA对盐分胁迫下番茄嫁接苗的地上部鲜质量、叶绿素含量、抗氧化酶活性等均有显著提高。罗黄颖等^[15]发现使用 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ GABA浸种可以更好地促进番茄种子萌发和幼苗生长进而缓解盐害。综上所述,适当施加外源GABA可有效提高作物的耐盐性,然而未见有关于GABA浸种后番茄从种子到幼苗(4叶1心)全阶段在盐分胁迫下响应的研究报道。

笔者以口感型番茄玉玲珑为供试对象,研究外源GABA浸种对盐分胁迫下番茄的出苗、幼苗的地上部和根系生长、叶片抗氧化酶活性的影响,探讨GABA浸种改善番茄耐盐性的作用特点,以期番茄育苗提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2021年4—5月在山东省潍坊市寿光市潍科种业日光温室内进行。供试番茄品种为玉玲珑,种子由潍坊科技学院潍科种业科技有限公司提供。GABA及配置营养液的其他物质均为分析纯,购自潍坊泰达化工世纪有限公司。

1.2 试验设计

设置GABA浸种和不浸种2个种子处理方式,以及无、较低和较高盐分胁迫,即0.6(当地井水)、 2.6 、 $4.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 3个盐浓度(ρ ,后同)灌水处理,不浸种

的各盐浓度处理依次标记为 S_1 、 S_2 、 S_3 ,浸种的各盐浓度处理依次标记为 GS_1 、 GS_2 、 GS_3 。 2.6 、 $4.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 咸水采用NaCl与井水定量混合而成。精选大小一致、饱满的种子,消毒、冲洗后用吸水纸吸干。参考罗黄颖等^[15]进行浸种处理,即采用 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ GABA水溶液浸种12 h。每个处理采用72穴规格的穴盘($52\text{ cm}\times 27\text{ cm}$)育苗90株,分为3个重复,每30株为1个重复。播种前使用营养土($V_{\text{草炭}}:V_{\text{蛭石}}:V_{\text{珍珠岩}}=3:1:1$)填入穴盘,在基质表面压出小穴,大致1 cm深,播种后覆一层珍珠岩,做好标记之后,放置在育苗架上。播后当即使用喷壶浇透水,并于每天9:00适量补水,待第1片真叶展开后及时追肥,营养液配制参照山崎配方^[16]。为避免咸水喷灌对番茄叶片造成伤害,每次补水后使用雾化喷头和井水快速清洗叶片。试验于播后40 d结束。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 空气温度和湿度 在温室内穴盘上方10 cm处安装温度湿度记录仪(Benetech GM1365),观测试验期间空气温度湿度。试验期间的平均、最高和最低气温均值分别为 22.8 ± 3.1 、 36.1 ± 7.5 、 $14.9\pm 2.5\text{ }^\circ\text{C}$,平均、最高和最低空气湿度均值分别为 $(59.7\pm 5.6)\%$ 、 $(81.6\pm 12.9)\%$ 和 $(32.8\pm 22.0)\%$ 。

1.3.2 生长指标 从播种5 d后开始至播后13 d每天统计出苗数,播种14~22 d每天统计死亡幼苗数,参照国家标准计算种子的出苗率、累积死亡率,统计开始出苗时间,全苗时间(停止出苗的时间),计算相对出苗率。其中相对出苗率为各处理出苗率与 S_1 处理的比值乘以100%。在番茄幼苗生长40 d时,每个处理随机选取9株,分别测定株高、茎粗,叶和茎的干、鲜质量。从每个处理已选取的9株中随机选取3株用于调查根系干物质质量和根系形态指标。测定方法:分别采用直尺和游标卡尺测定株高和茎粗,植物样鲜质量测定需要将叶片和茎分离后分别称量,其干质量测定需要将鲜样在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青30 min后与洗净待测的根系一起于 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量,使用精度为 0.0001 g 的电子天平称取。用扫描器(Epson V500,美国)将洗净待测根系扫描成彩色TIFF格式图像档,再用图像分析软件(WinRHIZO,加拿大)测定总根长、根体积、根表面积和根尖数。

1.3.3 生理指标 在进行叶绿素含量测定时参考李合生^[17]方法取生长点下第3片展开的真叶,剪碎混匀称取 0.200 g ,加入 25 mL 95%乙醇,于黑暗条件下浸提48 h,用紫外可见分光光度计(上海棱光

752S, 中国)测定 665、649 nm 和 470 nm 波长处的吸光度值, 3 次重复。取生长点下第 3 片展开的真叶进行酶活性指标的测定, 称取 0.200 g 样品洗净后置于冰浴的研钵中, 分 3 次加入 1.6 mL (0.6、0.5、0.5 mL) 50 mmol·L⁻¹ 预冷的磷酸缓冲液 (pH 7.8) 在冰浴上研磨成匀浆, 每个处理 3 个重复, 然后转入离心管中, 在 4 °C、12 000 转下离心 20 min, 上清液即为酶粗提液, 采用试剂盒 (苏州科铭生物科技有限公司, 中国) 测定超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性, 使用 Nakano 等^[18] 的方法测定抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性。

1.4 数据分析

数据处理及图表制作采用 Microsoft Office Excel 2021 软件, 差异显著性和相关性分析采用 SPSS Statistics 26 数据处理软件。

2 结果与分析

2.1 GABA 浸种对盐分胁迫下番茄出苗的影响

从图 1 可以看出, 盐分胁迫可推迟番茄出苗进程、降低出苗率、增加死苗率。除 S₃ 处理在播后 6 d 开始出苗, 在播后 12 d 完成出苗外, 其他处理均在播后 5 d 开始出苗, 分别在播后 6~10 d 完成出苗。在播后 13 d 时, 与 S₁ 处理相比, S₂ 和 S₃ 处理的出苗率分别降低了 8.74% 和 14.63%; 在相同盐分浓度下 GABA 浸种处理的出苗率分别提高 2.92%、8.97% 和 13.70%, 出苗进程加快。此外, S₁、GS₁ 处理一直没有出现死苗, S₂、GS₂ 处理的累积死苗率处于很低水平, S₃ 和 GS₃ 处理番茄出现的死苗时间要比 S₂ 和 GS₂ 处理提前 3~6 d, 且累积死苗率均升高。在播后 22 d 时, S₂、GS₂、S₃ 和 GS₃ 处理番茄的累积死苗率分别为 3.33%、2.22%、37.78% 和 60.00%。说明在较高盐分胁迫 (4.6 g·L⁻¹) 下, 使用 GABA 浸种虽然会提高出苗率, 但同时也会提升死苗率。

2.2 GABA 浸种对盐分胁迫下番茄地上部生长的影响

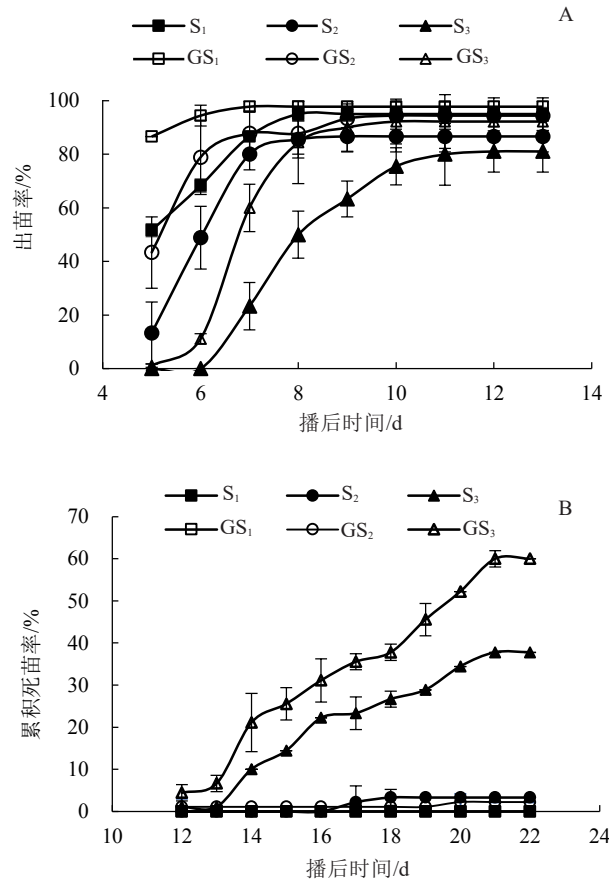


图 1 番茄 GABA 浸种在不同盐分梯度下的出苗进程及累积死苗率

不同处理番茄幼苗地上部生长情况如表 1 所示。由表 1 可知, 番茄株高、茎粗以及茎叶干、鲜质量均随着盐分胁迫程度的增加而降低。在不同盐分胁迫下, GABA 浸种对植株地上部生长的影响不一致。GS₁ 和 GS₂ 处理的株高、茎叶鲜/干质量均高于相应的 S₁ 和 S₂ 处理, 仅 GS₂ 处理叶片鲜/干质量与 S₂ 处理差异不显著, GS₁ 和 S₁ 处理、GS₂ 和 S₂ 处理其他指标差异均达到显著水平。在盐浓度 ≤ 2.6 g·L⁻¹ 时, 除茎粗及叶片鲜、干质量外, 其他指标 GABA 浸种与不浸种之间差异显著。而 GS₃ 处理的各项生长指标均小于 S₃ 处理, 二者之间除茎粗差异显著外,

表 1 不同处理番茄幼苗地上部生长调查

处理	株高/cm	茎粗/cm	单株地上部鲜质量/g		单株地上部干质量/g	
			叶片	茎	叶片	茎
S ₁	9.11±0.99 b	3.42±0.27 a	6.21±1.21 b	2.60±0.37 b	0.225±0.12 b	0.076±0.04 b
S ₂	6.39±0.55 d	3.33±0.18 ab	3.41±0.34 c	1.29±0.11 d	0.116±0.04 c	0.038±0.01 d
S ₃	3.82±0.38 e	2.80±0.18 c	1.67±0.45 d	0.65±0.13 e	-	0.019±0.01 e
GS ₁	11.39±0.60 a	3.38±0.22 a	8.60±0.92 a	3.78±0.65 a	0.293±0.07 a	0.104±0.05 a
GS ₂	7.00±0.83 c	3.14±0.28 b	4.26±0.55 c	1.87±0.23 c	0.149±0.05 c	0.061±0.03 c
GS ₃	3.39±0.86 e	2.51±0.16 d	1.15±0.09 d	0.54±0.05 e	-	0.016±0.00 e

注: 同列数字后不同小写字母代表处理间差异达到 0.05 显著水平。下同。“-”代表因样品量不足未测。

其他指标差异均不显著。在同等盐分胁迫下比较,与 S₁、S₂、S₃ 处理的株高相比,GS₁、GS₂ 处理分别提高 25.03%、9.55%,而 GS₃ 处理降低 11.26%。

2.3 GABA 浸种对盐分胁迫下番茄根系生长的影响

由表 2 可见,番茄总根长、根体积、根表面积、根尖数和根干物质质量均随着盐分胁迫程度的增加

而降低。在不同程度盐分胁迫下,GABA 浸种对植株根系生长的影响存在差异。除 GS₁ 处理的总根长显著小于 S₁ 处理外,其他各项根系指标 GS₁ 与 S₁ 处理、GS₃ 与 S₃ 处理之间无显著差异;而 GS₂ 处理的各项根系指标均大于 S₂ 处理,二者间除根干物质质量差异显著外,其他指标差异均不显著。在同等盐分胁迫下比较,与 S₁、S₂、S₃ 处理的总根长相比,GS₁、

表 2 不同处理番茄幼苗根系生长调查

处理	总根长/mm	根体积/mm ³	根表面积/cm ²	根尖数	根干物质质量/g
S ₁	412.28±48.82 a	1.14±0.13 a	384.43±10.66 a	1133.33±177.69 a	0.047±0.003 a
S ₂	243.95±13.22 c	0.65±0.04 b	243.95±13.22 bc	509.33±90.43 bc	0.028±0.004 c
S ₃	166.24±28.99 d	0.28±0.04 c	166.24±28.99 cd	443.33±132.94 bc	0.015±0.004 d
GS ₁	325.07±54.79 b	1.12±0.07 a	433.66±76.14 a	1035.33±297.74 a	0.040±0.003 ab
GS ₂	270.90±12.14 bc	0.81±0.25 ab	270.90±17.17 b	574.00±385.90 ab	0.037±0.004 b
GS ₃	128.38±9.09 d	0.25±0.03 c	128.38±9.09 d	340.33±36.12 c	0.012±0.003 d

GS₃ 处理分别降低 21.12%、22.77%,而 GS₂ 处理增加 11.05%。

2.4 GABA 浸种对盐分胁迫下番茄幼苗叶片中叶绿素含量的影响

从表 3 可以看出,番茄叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素的含量均随着盐分胁迫程度的增加呈下降趋势。在不同程度盐分胁迫下,GABA 浸种对番茄叶绿素和类胡萝卜素含量的影响存在差异。除 GS₂ 处理叶绿素 b 含量小于 S₂ 外,GS₁ 处理叶绿素 b、GS₁ 和 GS₂ 处理的叶绿素 a、总叶绿素和类胡萝卜素的含量均大于相应的 S₁ 和 S₂ 处理,但除 GS₁ 和 S₁ 总叶绿素含量差异显著外,其他对应指标差异均未达到显著水平;而 GS₃ 处理的各项指标均小于 S₃ 处理,且除叶绿素 b 含量外,其余指标差异均达到显著水平。在同等盐分胁迫下比较,与 S₁、S₂、S₃ 处理的总叶绿素含量相比,GS₁、GS₂ 处理分别提高 32.42%、7.95%,而 GS₃ 处理降低 61.47%。

表 3 不同处理番茄幼苗叶片中叶绿素及类胡萝卜素含量

处理	w(叶绿素 a)/ (mg·g ⁻¹)	w(叶绿素 b)/ (mg·g ⁻¹)	w(总叶绿素)/ (mg·g ⁻¹)	w(类胡萝卜素)/ (mg·g ⁻¹)
S ₁	1.45±0.19 ab	0.43±0.07 ab	1.88±0.26 b	0.29±0.03 a
S ₂	1.35±0.33 b	0.41±0.11 ab	1.76±0.44 b	0.29±0.07 a
S ₃	0.83±0.14 c	0.25±0.04 bc	1.09±0.18 c	0.18±0.03 b
GS ₁	1.91±0.37 a	0.59±0.13 a	2.50±0.49 a	0.39±0.08 a
GS ₂	1.58±0.16 ab	0.32±0.20 bc	1.90±0.04 b	0.35±0.05 a
GS ₃	0.31±0.07 d	0.11±0.02 c	0.42±0.09 d	0.06±0.01 c

2.5 GABA 浸种对盐分胁迫下番茄幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

由图 2 可以看出,随着盐分胁迫程度的增加,

番茄叶片内的 POD 酶活性呈现显著上升趋势,SOD 和 APX 酶活性则呈现先上升后下降的趋势。在不同程度盐分胁迫下,GABA 浸种对叶片酶活性

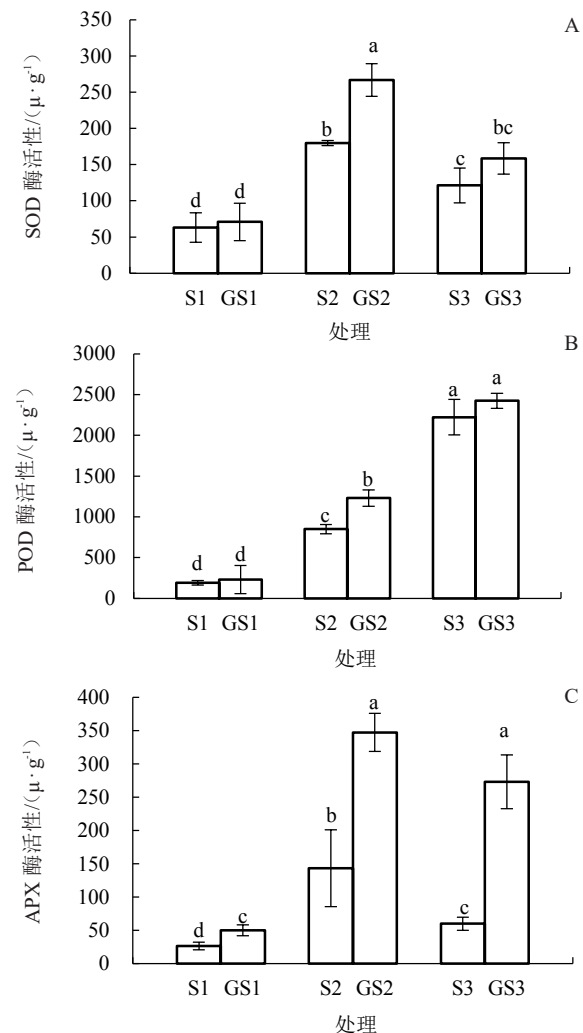


图 2 不同处理番茄叶片抗氧化酶活性

的影响存在差异。GS₁和GS₃处理的SOD、POD、APX酶活性分别较S₁和S₃处理有所升高,其中仅APX酶活性差异达到显著水平,升幅分别为87.27%和355.50%;GS₂处理的SOD、POD和APX酶活性均显著大于S₂处理,分别升高48.53%、44.71%和142.50%。

3 讨论

3.1 GABA浸种对盐分胁迫下番茄出苗及生长发育的影响

作物在出苗及幼苗阶段很容易受到盐分胁迫的抑制作用。在种子萌发阶段会影响种子吸水膨胀,造成渗透胁迫;在生长发育阶段会降低叶片叶绿素含量,抑制同化物合成与转移等,进而影响番茄地上及地下部干物质积累,且盐分胁迫程度越大,抑制越显著^[19-21]。而一些研究发现使用外源GABA可在一定程度上缓解盐分胁迫^[15,22]。笔者的研究中,当NaCl浓度达到一定范围后,会降低番茄的出苗率、推迟出苗进程和提升死苗率,而GABA浸种在较高盐分浓度胁迫(4.6 g·L⁻¹)下促进了种子萌发。罗黄颖等^[15]将番茄种子在浓度为10 mmol·L⁻¹的GABA中浸种后在培养皿中使用低浓度(25 mmol·L⁻¹)的NaCl溶液培养也得出了相同的结论。这是因为外源GABA可通过提高植物体内的抗氧化酶活性来增强幼苗耐胁迫的能力,进而利于促进种子萌发^[22-23]。同时,笔者的研究发现在较高盐分浓度胁迫(4.6 g·L⁻¹)下番茄的死苗率明显升高,GABA浸种的番茄幼苗在高盐分胁迫下死苗率并未降低反而大幅升高。可能是由于GABA作为一种氨基酸态氮肥,其作用具有一定的时效性,因此虽然促进了盐分胁迫下番茄种子萌发,但随着生育进程推进,GABA浸种处理的幼苗可能因为前期长势更好,需水量大,当GABA失去作用后,在较高盐分胁迫下所遭受的生理干旱抑制作用更加明显^[24]。

笔者的研究表明,番茄的株高、茎粗、茎叶干鲜质量均随着盐分胁迫程度的增加而降低,这与Acosta-Motos等^[2]和Chen等^[25]的研究结果一致。此外,茎叶干质量在盐分胁迫下比根的质量表现更敏感,这与Munns等^[1]的研究结果一致。而GABA浸种在较低盐分浓度胁迫(≤2.6 g·L⁻¹)下有促进番茄地上部生长的作用,但是在较高盐分浓度胁迫(4.6 g·L⁻¹)下出现一些抑制表现。这可能是因为GABA缓解盐分胁迫的作用仅在一定的盐分浓度

范围内有效,并且随着植株生长,在较低盐分胁迫下,植株可以继续保持先发优势;而在较高盐分胁迫下,植株遭受的盐害程度高且累积效应强,光合产物较少。番茄的总根长、根体积、根表面积、根尖数和根干物质质量均随着盐分胁迫程度的增加而降低。与未用GABA浸种相比,GABA浸种处理的番茄在较低盐分浓度胁迫(2.6 g·L⁻¹)下有促进番茄根系生长的趋势,这与王泳超^[26]在NaCl胁迫玉米幼苗试验中发现浓度为0.5 mmol·L⁻¹ GABA处理下能增加根系总根长、根表面积、根体积、根尖数和增加根干质量的结论相一致。但是在低盐环境(0.6 g·L⁻¹)和较高盐分浓度胁迫(4.6 g·L⁻¹)下不仅没有表现出促进作用,反而出现抑制作用。这可能是由于在低盐分环境下番茄生长没有遭受逆境,GABA浸种促进了同化物优先向地上部分分配;在较低盐分胁迫下GABA浸种通过促进根系生长吸水、吸肥,增强体内抗氧化酶活性、提高叶绿素含量和光合作用效率以促进同化物积累;在较高盐分胁迫下根系生长反应机制与地上部一致。

3.2 GABA浸种对盐分胁迫下番茄幼苗生理生化影响

盐分胁迫会影响植物的光合作用和抑制卡尔文循环酶活性,导致对盐敏感的植物叶绿素含量下降^[27]。笔者的试验发现在不同盐分梯度处理下番茄叶片的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素的含量均随着盐分胁迫程度的提高呈下降趋势,且在高盐处理(4.6 g·L⁻¹)下除叶绿素b含量外,其余指标均显著降低。而GABA浸种在较低盐分浓度胁迫(≤2.6 g·L⁻¹)下,除叶绿素b外,番茄叶片中叶绿素含量均有增加的趋势,但在较高盐分浓度胁迫(4.6 g·L⁻¹)下除叶绿素b含量外,均表现出显著的抑制现象,与幼苗地上部生长状况保持一致。在以往更高程度盐分胁迫的研究中未发现使用GABA会降低番茄叶绿素含量的现象,这可能是因为这些试验都是在短期内(3~4 d)完成,而笔者的试验是从播种到播后40 d持续使用相同浓度的盐水灌溉,因此出现了累积效应^[14-15]。在盐分胁迫下,植株体内会产生大量氧自由基,为了维持代谢平衡,预防和降低膜透性结构和功能的受损,植物会提高抗氧化酶活性^[28]。笔者的研究表明,盐分胁迫处理增强了番茄叶片中的SOD、POD和APX酶活性,而GABA浸种处理的酶活性均比未浸种处理高,说明GABA浸种在盐分胁迫下可增强抗氧化酶活性,这与前人研究结果一致^[13,29]。与较低盐分胁迫处理相

比,较高盐胁迫下 SOD、APX 酶活性呈下降趋势,可能是由于膜脂氧化损伤的加剧,降低了抗氧化酶清除活性氧的能力^[30]。

4 结 论

在供试的 3 个盐分浓度梯度下,GABA 浸种能有效促进番茄种子萌发、提高出苗率,但在较高盐分浓度胁迫($4.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)下提升了死苗率。经过连续盐分胁迫处理 40 d 后,GABA 浸种处理提高了叶片抗氧化酶 SOD、POD、APX 的活性,此外,在较低盐分胁迫($2.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)下 GABA 浸种促进了番茄株高的生长、地上部和根系干质量的累积,但是在较高盐分胁迫($4.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)下番茄长势弱于不浸种处理。综上所述,GABA 浸种可在番茄幼苗处于较低盐分胁迫($\leq 2.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)下发挥缓解盐分胁迫的作用。

参考文献

- [1] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651-681.
- [2] ACOSTA-MOTOS J R, ORTUNO M F, BEMAL-VICENTE A, et al. Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms[J]. *Agronomy*, 2017, 7: 18.
- [3] 李莉,张科,何明才,等.不同盐浓度对四个品种番茄种子萌发和幼苗芽长的影响[J].*北方园艺*, 2019(24): 1-6.
- [4] 范翠枝,吴馨怡,关欣,等.油菜素内酯浸种对盐胁迫番茄种子萌发的影响及其生理机制[J].*生态学报*, 2021, 41(5): 1857-1867.
- [5] 李丹,万书勤,康跃虎,等.滨海盐碱地微咸水滴灌水盐调控对番茄生长及质量的影响[J].*灌溉排水学报*, 2020, 39(7): 39-50.
- [6] 罗黄颖,高洪波,夏庆平,等. γ -氨基丁酸对盐胁迫下番茄活性氧代谢及叶绿素荧光参数的影响[J].*中国农业科学*, 2011, 44(4): 753-761.
- [7] 高倩,冯棣,刘杰,等.外源物缓解植物盐胁迫的作用机理及其分类[J].*植物营养与肥料学报*, 2021, 27(11): 2030-2044.
- [8] 宋士清,郭世荣,尚庆茂,等.外源 SA 对盐胁迫下黄瓜幼苗的生理效应[J].*园艺学报*, 2006, 33(1): 68-72.
- [9] 阮海华,沈文飙,叶茂炳,等.一氧化氮对盐胁迫下小麦叶片氧化损伤的保护效应[J].*科学通报*, 2001, 46(23): 1993-1997.
- [10] BOUCHE N, LACOMBE B, FROMM H. GABA signaling: a conserved and ubiquitous mechanism[J]. *Trends in Cell Biology*, 2003, 13(12): 607-610.
- [11] 杨娜,伍宏,甘立军,等.叶喷 γ -氨基丁酸对小麦产量和质量的影响[J].*中国粮油学报*, 2018, 33(3): 8-12.
- [12] WANG Y C, GU W R, MENG Y, et al. γ -aminobutyric acid imparts partial protection from salt stress injury to maize seedlings by improving photosynthesis and upregulating osmoprotectants and antioxidants[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43609.
- [13] 向丽霞,胡立盼,胡晓辉,等.外源 γ -氨基丁酸调控甜瓜叶绿体活性氧代谢应对短期盐碱胁迫[J].*应用生态学报*, 2015, 26(12): 3746-3752.
- [14] 贾邱颖,吴晓蕾,冀胜鑫,等. γ -氨基丁酸对番茄嫁接苗耐盐性的生理调控效应[J].*植物营养与肥料学报*, 2021, 27(1): 122-134.
- [15] 罗黄颖,杨丽文,高洪波,等. γ -氨基丁酸浸种对番茄种子及幼苗耐盐性调节的生理机制[J].*西北植物学报*, 2011, 31(11): 2235-2242.
- [16] 孙敏红,许益娟.不同营养液配方对番茄幼苗生长的影响[J].*广东农业科学*, 2011, 38(8): 55-57.
- [17] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社, 2000.
- [18] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.
- [19] 苏实,练薇薇,杨文杰,等.盐胁迫对番茄种子萌发和幼苗生长的效应[J].*华北农学报*, 2006, 21(5): 24-27.
- [20] 李彦,张英鹏,孙明,等.盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J].*中国农学通报*, 2008, 24(1): 258-265.
- [21] 刘琦,崔世茂,宋阳,等.NaCl 胁迫对番茄苗期根形态和光合作用的影响[J].*北方农业学报*, 2018, 46(3): 32-36.
- [22] 李敬蕊,杨丽文,王春燕,等. γ -氨基丁酸对低氧胁迫下甜瓜幼苗抗氧化酶活性及表达的影响[J].*东北农业大学学报*, 2014, 45(11): 28-36.
- [23] 高洪波,郭世荣.外源 γ -氨基丁酸对营养液低氧胁迫下网纹甜瓜幼苗抗氧化酶活性和活性氧含量的影响[J].*植物生理与分子生物学报*, 2004, 30(6): 651-659.
- [24] 张彩虹,冯棣,张敬敏,等.黄腐酸钾对盐胁迫下小白菜发芽及幼苗生长的影响[J].*中国瓜菜*, 2020, 33(12): 87-91.
- [25] CHEN Z, CUI T A, ZHOU M, et al. Compatible solute accumulation and stress-mitigating effects in barley genotypes contrasting in their salt tolerance[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(15/16): 4245-4255.
- [26] 王泳超. γ -氨基丁酸(GABA)调控盐胁迫下玉米种子萌发和幼苗生长的机制[D].哈尔滨:东北农业大学, 2016.
- [27] STEPIEN P, JOHNSON G N. Contrasting responses of photosynthesis to salt stress in the glycophyte *Arabidopsis* and the halophyte *Thellungiella*: Role of the plastid terminal oxidase as an alternative electron sink[J]. *Plant Physiology*, 2009, 149(2): 1154-1165.
- [28] 许斌,牛娜,赵文瑜,等.天然型藜麦品种抗盐碱生理特性比较研究[J].*土壤*, 2020, 52(1): 81-89.
- [29] CHENG B Z, LI Z, LIANG L L, et al. The γ -Aminobutyric Acid (GABA) alleviates salt stress damage during seeds germination of white clover associated with Na^+/K^+ transportation, dehydrins accumulation, and stress-related genes expression in white clover[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(9): 2520.
- [30] SUDHAKAR, 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(3): 613-619.