文章编号:1000-7601(2025)05-0079-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.08

外源 γ-氨基丁酸对盐胁迫下诸葛菜幼苗生长生理特性的影响

刘 宏

(中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

摘 要:为探究外源 γ-氨基丁酸(GABA)对地被植物诸葛菜(*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz)的盐害缓解作用,通过盆栽模拟自然生长环境,对诸葛菜幼苗施加 50 mmol·L^{-1}的 NaCl 溶液进行盐胁迫处理,并在其基础上施加不同浓度梯度(0.2、0.4、0.8、1.6 mmol·L^{-1})的 GABA 处理液,在试验 5、10 d 和 15 d 分别测定各处理组诸葛菜的形态指标(根长、株高、叶宽、茎粗)和生理指标(叶绿素含量、可溶性蛋白含量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性);同时,采用石蜡切片技术观察诸葛菜幼苗的细胞组织结构,探究外源施加 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗生长和生理的影响。结果表明:随着外源 GABA 浓度的增加,不同处理天数下,幼苗生长指标均呈先增加后降低的趋势,其中 0.4 mmol·L^{-1} GABA 处理下诸葛菜的株高、叶宽及茎粗净生长量最高,增幅分别为 73.63%、66.55%、6.83%,MDA 含量最低,为 2.66 nmol·g^{-1};0.4 mmol·L^{-1} GABA 处理下诸葛菜的可溶性蛋白含量、POD 活性、SOD 活性、叶绿素含量均为最高,分别为 17.34 mg·g^{-1}、103.03 U·g^{-1}·min^{-1}、338.75 nmol·g^{-1}、54.3(SPAD 值)。

关键词:诸葛菜;盐胁迫;外源 γ-氨基丁酸;生长生理特性;细胞组织结构

中图分类号:S143.8; Q945.3 **文献标志码**:A

Effects of exogenous γ -aminobutyric on physiological characteristics of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

LIU Hong

(*China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing* 100040, *China*)

Abstract: A pot experiment, which simulated the natural growth environment, was conducted to investigate whether exogenous γ-aminobutyric acid (GABA) could alleviate salt damage to ground cover plant *Orychophragmus violaceus*. Under the stress of 50 mmol·L^{-1} NaCl solution, different concentration gradients of γ-aminobutyric acid treatment solution (0.2, 0.4, 0.8, and 1.6 mmol·L^{-1}) were applied to the seedlings of *O. violaceus*. Morphological indexes (root length, plant height, leaf width, and stem diameter) and physiological indexes (contents of chlorophyll, soluble protein, and MDA, and activities of SOD and POD) were measured on the 5th, 10th, and 15th days of the experiment. Meanwhile, the cell structure of *O. violaceus* seedlings was observed by paraffin section technique, and the effect of exogenous application of GABA on the growth and physiology of *O. violaceus* seedlings under salt stress was investigated. The results showed that with the increase of exogenous GABA concentration, under different treatment days, the growth indictors of the seadlings showed a trend of increasing first and then decreasing. The net growth production of the plant height, leaf width, and stem diameter of *O. violaceus* were the highest under 0.4 mmol·L^{-1} GABA treatment, with an increase of 73.63%, 66.55%, and 6.83%, respectively, and the MDA content was the lowest at 2.66 nmol·g^{-1}. The 0.4 mmol·L^{-1} GABA treatment made the soluble protein content, POD activity, SOD activity, and chlorophyll content of *O. violaceus* the highest, which were 17.34 mg·g^{-1}, 103.03 U·g^{-1}·min^{-1}, 338.75 nmol·g^{-1}, and 54.3 (SPAD value), respectively.

Keywords: *O. violaceus*; salt stress; exogenous γ -aminobutyric acid; growth physiological properties; cell tissue structure

收稿日期:2024-12-09 **修回日期**:2025-02-25

基金项目:中铁建设集团-青岛农业大学校企合作项目(JC23-04b)

作者简介:刘宏(1987-),男,江苏邳州人,高级工程师,主要从事园林种植工程、园林植物生态修复研究。E-mail:799852687@qq.com

诸葛菜(*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz)为十字花科 1 年或 2 年生草本植物,耐寒耐贫瘠性较强,可以满足园林配植中林下绿地、住宅绿化等各种需求[1]。目前对诸葛菜的研究主要聚焦于栽培机制、遗传育种等层面,而其作为一种耐盐耐贫瘠的优良地被植物[2-3],在外源调控引发植物耐盐性状的研究方面鲜见报道。

GABA 是一种重要的信号分子,外源施加 GABA 可通过调节离子稳态、激活抗氧化防御系统及调控碳氮代谢等多重途径,有效缓解盐胁迫对植物造成的氧化损伤和离子毒害,从而增强植物耐盐性。本试验通过对盐胁迫下诸葛菜幼苗施加不同浓度外源 γ-氨基丁酸(GABA),系统性评估 GABA 对植物生长和生理特性的影响。基于对其生长指标和生理指标进行测定,筛选出最优缓解诸葛菜盐胁迫效应的理想 GABA 浓度,从而为盐渍化园林土壤的修复和应用提供精准指导[4-6]。同时深入探究了诸葛菜在盐胁迫下对外源激素响应的生理特性,可为提升盐渍土的生态和景观效益,以及增强耐盐植物品种培育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物材料为购自山东省潍坊市青州花卉基地的诸葛菜原变种幼苗,培养土壤为购自莱阳市仁丰花卉市场的营养土。用土培法将诸葛菜幼苗移栽于直径 12 cm、深 10 cm 的塑料育苗盆中,缓苗 7 d 后选择长势旺盛、形态均匀、无病虫害的幼苗进行试验。供试 γ-氨基丁酸购自浙江同力科技公司,试验所用仪器详见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 外源 GABA 和 NaCl 混合处理液设置 参照黄天娇[7]的研究,采用 50 mmol · L^{-1}的 NaCl 溶液来模拟盐胁迫环境。试验共设置 5 个 NaCl 和 GABA 浓度处理(CK、T1、T2、T3、T4)。其中,CK 组为仅对诸葛菜幼苗施加盐溶液的单一处理组,目的是模拟诸葛菜幼苗在无其他干预时的盐胁迫状态;T1~T4 组则为 GABA 和 NaCl 的混合处理液,外源 GABA 设置等比浓度梯度分别为 0.2、0.4、0.8、1.6 mmol · L^{-1},NaCl 处理浓度均为 50 mmol · L^{-1},以探究不同浓度 GABA 溶液对盐胁迫下诸葛菜生长状况的缓解效应。将 CK 组定义为盐害组,T1~T4 组定义为试验组,每组各设置 10 株无病虫害的诸葛菜幼苗作为处理对象。

用 5 组处理液每天对诸葛菜幼苗分别进行浇灌,并对不同组别诸葛菜幼苗贴好标签进行区分。分别在处理的 5、10、15 d 时,于每个处理组的 10 株幼苗中随机选取无病虫害的 3 株进行测定,每组每个指标各对 3 株诸葛菜幼苗进行 1 次测定,分别得到 3 个平行数据,取其平均值准确记录。

1.2.2 诸葛菜形态指标和生理指标测定 诸葛菜生长量测定:对各处理组的诸葛菜幼苗分别进行随机抽选,从土壤中小心将幼苗取出,分别用清水和蒸馏水洗去土壤和杂质,用不掉屑的吸水纸吸干水分后,使用 0~150 mm 游标卡尺测定每组的植株根长(茎部基点至主根末梢长度)、株高(茎部基点至植株最高生长点长度)、叶宽(叶片表面横向最宽处宽度)、茎粗(子叶脱落处的茎部直径)。

过氧化物酶(POD)活性测定:参考愈创木酚法[8]。超氧化物歧化酶(SOD)活性测定:使用北京

表 1 试验仪器

Table 1 Test instrument

仪器 Instrument	型号 Model	厂家 Manufacturer
分析天平 Analytical balance	CPA225D	昆山优科维特电子科技公司 Kunshan Youkeweit Electronic Technology Co., Ltd.
游标卡尺 Vernier caliper	DCB150	浙江德力西集团有限公司 Zhejiang Delixi Group Co., Ltd.
数显恒温水浴箱 Digital constant temperature water bath	HH-2	常州越新仪器制造有限公司 Changzhou Yuexin Instrument Manufacturing Co., Ltd.
可见分光光度计 Visible spectrophotometer	722N	浙江力辰仪器科技公司 Zhejiang Lichen Instrument Technology Co., Ltd.
高速离心机 High-speed centrifuge	Themo δT8	湖南迈克尔实验仪器公司 Hunan Michael Laboratory Instrument Co., Ltd.
叶绿素测定仪 Chlorophyll analyzer	TYS-A	北京时代创客有限公司 Beijing Times Chuangke Co., Ltd.
光学显微镜 Optical microscope	MSD4200	东莞市德瑞精密设备有限公司 Dongguan Derui Precision Equipment Co., Ltd.

索莱宝科技有限公司出品的 SOD 试剂盒。丙二醛(MDA)含量测定:参照张治安等[9]的硫代巴比妥酸法。可溶性蛋白含量测定:采取 Bradford protein-binding assay 法[10]。叶绿素含量测定:在各处理组诸葛菜幼苗中随机选取有代表性的植株 5 株,选取中部叶片,用 TYS-A 叶绿素测定计(表 1)测定 3 次,取其平均值。

1.2.3　*诸葛菜细胞组织石蜡切片的制作*　在相同处理天数下,观察各处理诸葛菜幼苗叶部细胞形态和结构的变化。具体操作参考杨捷频[11]的方法。

1.3　数据处理

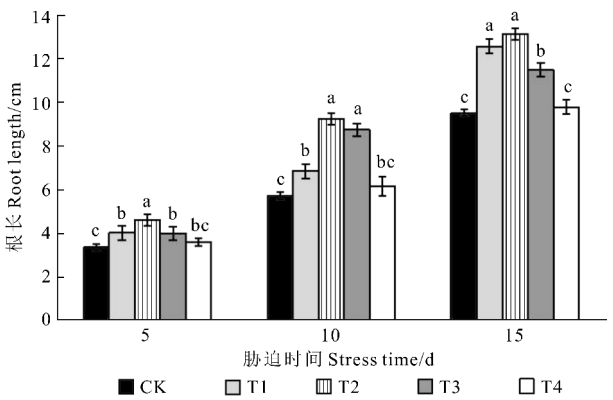
使用 Excel 2016 和 SPSS 27.0 数据处理软件对试验数据进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗形态指标的影响

如图 1(见 85 页)所示,5 组诸葛菜幼苗随着处理天数的增加均有所生长,对比同天处理的各组幼苗,CK 组生长状态最差,根系细弱,植株低矮,叶片窄小;T2 组生长状态最佳,根系健壮,植株高挺,叶片宽大。

2.1.1　*外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗根长的影响*　由图 2 可知,随着盐胁迫天数的增加,5 组诸葛菜幼苗根长净生长量整体均呈现上升趋势。CK 盐害组的根长净生长量同比涨幅最低(64.65%),T2 试验组同比涨幅最高(76.52%),T1、T3、T4 组增长率分别为 67.66%、75.00%和 70.73%;胁迫 15 d,根长平均值在 T2 组达到试验期峰值(13.1 cm)。



注:不同小写字母表示相同胁迫时间下处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments under the same stress time (P<0.05). The same below.

图 2　外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗根长的影响

Fig.2　Effects of exogenous GABA on root length of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

对比同天测定的各组间根长生长量发现,其随 GABA 浓度增加均呈现先上升后下降的趋势。与 CK 组相较,T2、T3、T4 试验组的根长均显著增加,T2 组出现增幅峰值,其中,5 ~ 10 d,T1 增幅为 70.0%,T2 增幅为 109.9%;10 ~ 15 d,T1 增幅为 83.8%,T2 增幅为 44.6%。综上可知,适宜浓度 GABA 可缓解盐对诸葛菜幼苗根长的胁迫作用,0.4 mmol · L^{-1}缓解效果最佳,当 GABA 浓度超过 0.8 mmol · L^{-1}时缓解作用下降。

2.1.2　*外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗株高的影响*　由图 3 可知,随着胁迫天数的增加,5 组诸葛菜幼苗株高净生长量整体均呈现上升趋势。CK 盐害组的株高净生长量同比涨幅最低,T2 试验组的净生长量同比涨幅最高,各处理增长率分别为:CK 组 60.35%、T1 组65.35%、T2 组 73.63%、T3 组 70.03%、T4 组65.59%;胁迫 15 d,株高平均值在 T2 组达到试验期峰值(12.3 cm)。

对比同天测定的各组间株高生长量可知,其均随 GABA 浓度增加呈现先上升后下降的趋势。与 CK 组相较,4 组试验组的株高均升高,且 5、10、15 d 均在 T2 组出现峰值,其中 5~10 d 增幅为 90.48%,10~15 d 增幅为 52.50%。T3、T4 试验组与 T2 试验组相较,株高依次降低。综上可知,适宜浓度 GABA 可缓解盐对诸葛菜幼苗株高的胁迫作用,以 0.4 mmol · L^{-1}缓解效果最佳,当 GABA 浓度超过 0.8 mmol · L^{-1}时缓解作用下降。

2.1.3　*外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶宽的影响*　由图 4 可知,随着胁迫天数的增加,5 组诸葛菜幼苗叶宽净生长量整体均呈现上升趋势。CK 盐害组的叶宽净生长量同比涨幅最低,T2 试验组的叶宽净生长量同比涨幅最高,各处理增长率分别为:CK 组35.17%、T1 组 42.13%、T2 组 66.55%、T3 组 46.75%、T4 组 41.88%;胁迫 15 d,叶宽平均值在 T2 组达到试验期峰值(3.2 cm)。

对比同天测定的各组间叶片宽度净生长量,其随 GABA 浓度的提高均呈现先升高后降低的趋势。与 CK 组相较,随着 GABA 浓度上升,4 个试验组的叶宽均增加,5 d时试验组叶宽在 T3 组达到峰值 1.7 cm,T4 组叶宽降至 1.5 cm;10 d 和 15 d 均在 T2 组达到峰值,且各试验组间叶宽差异不显著。综上可知,适宜浓度 GABA 可缓解盐对诸葛菜幼苗叶宽的胁迫作用,以 0.4 mmol · L^{-1}缓解效果最佳,当 GABA 浓度超过 0.8 mmol · L^{-1}时缓解作用下降。

2.1.4　*外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗茎粗的影响*　由图 5 可知,随着胁迫天数的增加,5 组诸葛

菜幼苗茎粗净生长量整体均呈现上升趋势。T2 试验组同比涨幅最高,各处理增长率分别为:CK 组 5.72%、T1 组6.67%、T2 组 6.83%、T3 组 6.73%、T4 组 5.72%;胁迫 15 d,茎粗平均值在 T2 组达到试验期峰值(0.21 cm)。

对比同天测定的各组间茎粗生长量,其随 GABA 浓度增加均呈现先上升后下降的趋势。与 CK 组相较,4 个试验组的茎粗均升高,各组间茎粗差异不显著,且 5、10、15 d 均在 T2 组出现增幅峰值,5~10 d 增幅为 5.56%,10~15 d 增幅为 10.5%。T3、T4 试验组与 T2 试验组相较,茎粗依次降低。综上可知,适宜浓度 GABA 可缓解盐对诸葛菜幼苗茎粗的胁迫作用,以 0.4 mmol · L^{-1} 缓解效果最佳,当 GABA 浓度超过 0.8 mmol · L^{-1}时缓解作用下降。

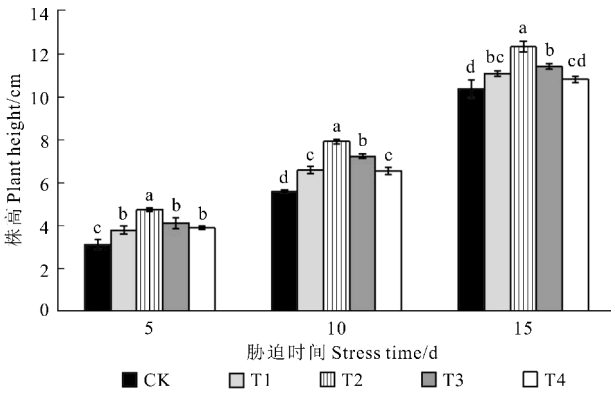


图 3 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗株高的影响

Fig.3 Effects of exogenous GABA on plant height of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

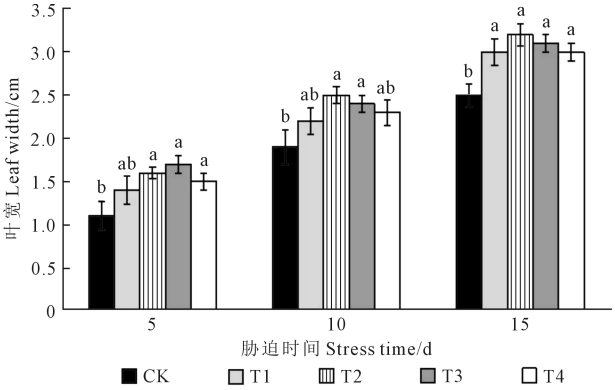


图 4 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶宽的影响

Fig.4 Effects of exogenous GABA on leaf width of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

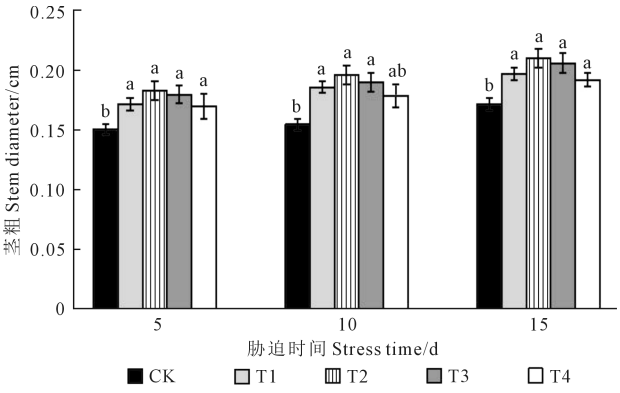


图 5 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗茎粗的影响

Fig.5 Effects of exogenous GABA on stem diameter of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

2.2 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗生理指标的影响

2.2.1 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片丙二醛(MDA)含量的影响 由图 6 可知,随着盐胁迫时间的递增,各组诸葛菜幼苗叶片的丙二醛(MDA)含量整体呈下降趋势,降低率分别为:CK 组10.02%、T1 组 14.44%、T2 组 17.23%、T3 组 12.30%、T4 组 8.88%。同天测定的各试验组 MDA 含量均随 GABA 浓度增加呈现先降低后升高的趋势;胁迫 15 d,MDA 含量在 T2 组降至试验期最低值(2.66 nmol · g^{-1})。

对比同天测定的各组间叶片 MDA 含量,随着 GABA 浓度上升,T1~T4 试验组 MDA 含量呈现先降低后升高的趋势,5、10、15 d 均在 T2 组出现转折,与其他试验组相较有显著差异,T3、T4 试验组 MDA 含量依次升高。综上可知,适宜浓度 GABA 对盐胁迫导致的诸葛菜幼苗叶片细胞膜和细胞质的损伤起到缓解作用,使丙二醛含量显著降低,以 0.4 mmol · L^{-1} 缓解效果最佳,当 GABA 浓度超过 0.8 mmol · L^{-1}时缓解作用下降。

2.2.2 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片可溶性蛋白含量的影响 由图 7 可知,随着胁迫天数的增加,CK 盐害组和 T1 试验组诸葛菜幼苗叶片的可溶性蛋白含量均呈现上升趋势,两处理试验期内增长率分别为 8.0%和 13.0%。施加 GABA 处理的 T2~T4 试验组诸葛菜幼苗的整体可溶性蛋白含量并未呈现出显著升高或降低趋势。

分别对比 5、10、15 d 测定的叶片可溶性蛋白含量在各组间的分布情况,各处理随 GABA 浓度的增加均呈现先升高后降低的状态。T1~T4 试验组较 CK 盐害组可溶性蛋白含量显著升高,且均在 T2 组达到峰值,胁迫 15 d 时 T2 组处于最大值 15.34 mg · g^{-1},其中,5~10 d,CK 组增幅为 8.11%,T1 组增幅为9.65%;10~15 d,CK 组增幅为 7.50%,T1 组增幅为 5.60%。综上,外施适宜浓度 GABA(以 0.4 mmol · L^{-1}最佳)可使诸葛菜幼苗叶片可溶性蛋白含量升高;当 GABA 浓度过高时增量下降。

2.2.3 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片过氧化物酶(POD)活性的影响 由图 8 可知,随着胁迫天数的增加,CK、T1 和 T2 组的叶片 POD 活性均呈

现整体上升趋势,3 个处理试验期内增长率分别为 6.50%、13.62%、9.05%,CK 盐害组 POD 活性同比涨幅最低;而 T3、T4 组叶片 POD 活性并未呈现出明显的整体上升或下降趋势。整体来看,叶片 POD 活性在 15 d 的 T2 组达到试验期峰值(103.03 U · g^{-1} · min^{-1})。

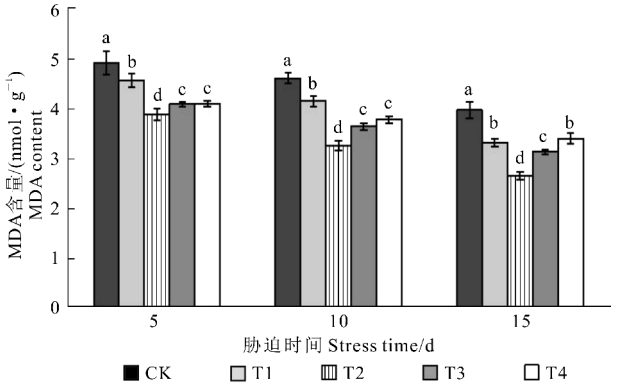


图 6　外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.6　Effects of exogenous GABA on the content of malondialdehyde (MDA) in leaves of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

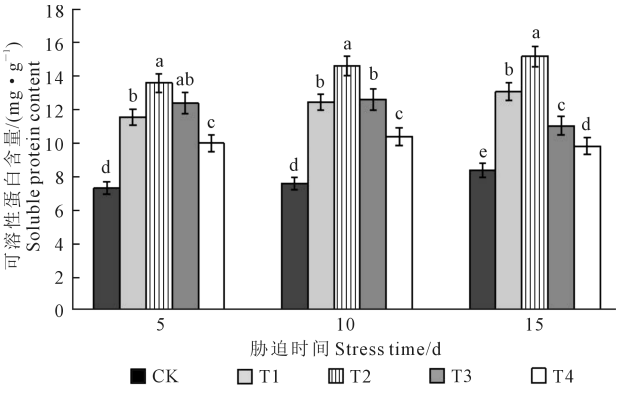


图 7　外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片可溶性蛋白含量的影响

Fig.7　Effects of exogenous GABA on soluble protein content in leaves of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

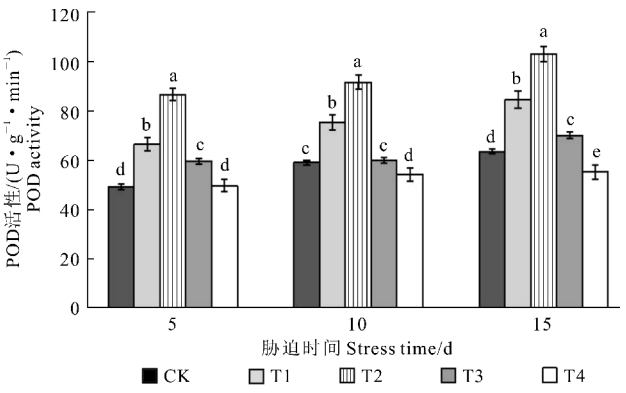


图 8　外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片 POD 活性的影响

Fig.8　Effects of exogenous GABA on POD activity in leaves of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

对比同天测定的各试验组叶片 POD 活性,其随 GABA 浓度增加均呈现先上升后下降的趋势。与 CK 组相较,T1、T2 组 POD 活性显著升高,5~10 d,T1 增幅为 15.15%,T2 增幅为 3.45%;10~15 d,T1 增幅为 13.16%,T2 增幅为 13.33%。T3、T4 组与 T2 组相较,POD 活性依次显著降低,且 5、10、15 d 均在 T2 组出现试验期峰值。综上,施加适宜浓度 GABA 可缓解盐对诸葛菜幼苗 POD 活性的胁迫作用,以 0.4 mmol · L^{-1}缓解效果最佳,浓度过高不利于 POD 活性的提高。

2.2.4　外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响　由图 9 可知,随着盐胁迫天数的增加,各试验组叶片 SOD 活性呈现整体上升趋势,CK 盐害组 SOD 活性同比涨幅最低,增长率分别为:CK 组 10.55%、T1 组 16.78%、T2 组 15.73%、T3 组 16.67%、T4 组 12.19%;胁迫 15 d,SOD 活性在 T2 组达到试验期峰值(338.75 nmol · g^{-1})。

对比同天测定的各组叶片 SOD 活性,其随 GABA 浓度上升呈现先上升后下降的趋势。与 CK 组相较,T1~T4 试验组的 SOD 活性显著升高,且 5、10、15 d 均在 T2 组出现峰值,分别较 CK 组增加 70、100、110 U · g^{-1} · min^{-1}。T3、T4 试验组与 T2 试验组相较,SOD 活性依次显著降低。综上,适宜浓度 GABA 可缓解盐对诸葛菜幼苗 SOD 活性的胁迫作用,以 0.4 mmol · L^{-1}缓解效果最佳,浓度过高时不利于 SOD 活性的提升。

2.2.5　外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片叶绿素含量的影响　由图 10 可知,随着盐胁迫天数的增加,各试验组叶片叶绿素含量呈现整体上升趋势,增长率分别为:CK 组 10.61%、T1 组 11.16%、T2 组 12.45%、T3 组 8.21%、T4 组 9.62%。整体来看,叶绿素含量在胁迫 15 d 时 T2 组达到试验期峰值(54.3),试验期谷值为胁迫 5 d 时 CK 组的 31.5 。

根据同一天测定的各组之间叶片叶绿素平均含量可知,随着 GABA 浓度升高,T1~T4 试验组的叶绿素含量表现为先升高后降低,且 5、10、15 d 均在 T2 组出现峰值,T3、T4 组与 T2 组相较,叶绿素含量依次降低,表明适宜浓度 GABA(以 0.4 mmol · L^{-1}最佳)可缓解盐对诸葛菜幼苗叶绿素含量的胁迫作用,浓度过高时不利于叶绿素含量的增加。

综上表明,盐胁迫使诸葛菜各项生长生理指标降低,施加适宜浓度 GABA(以 0.4 mmol · L^{-1}最佳)可在一定程度上缓解盐对诸葛菜幼苗的胁迫作用,当 GABA 浓度超过 0.8 mmol · L^{-1}时不利于诸葛菜

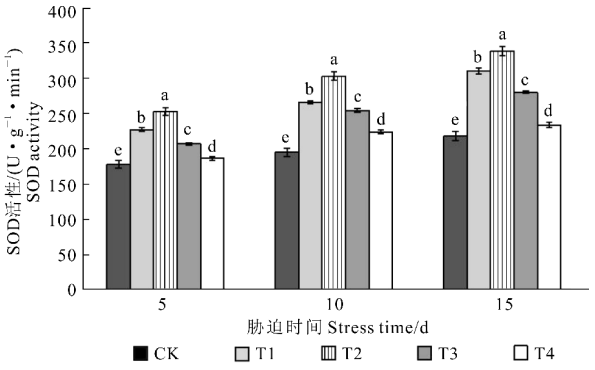


图 9 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片 SOD 活性的影响

Fig.9 Effects of exogenous GABA on SOD activity in leaves of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

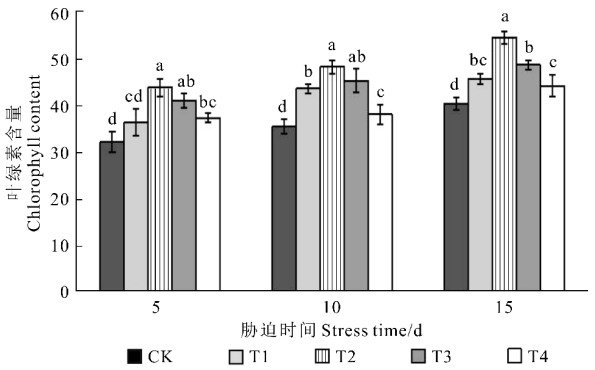


图 10 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig.10 Effects of exogenous GABA on chlorophyll content in leaves of *Orychophragmus violaceus* seedlings under salt stress

幼苗生长,1.6 mmol · L^{-1} GABA 甚至对诸葛菜幼苗的生长具有抑制作用。

2.3 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗组织结构的影响

由图 11 可知,CK 组为单一盐胁迫的诸葛菜幼苗叶片,T2 组为在盐胁迫基础上施加 0.4 mmol · L^{-1} GABA 的诸葛菜幼苗叶片。CK 组叶片的横向切片显示,海绵组织与栅栏组织之间界限模糊,未出现清晰分层,栅栏组织厚度增加,海绵组织疏松,表皮细胞形状不均匀,韧皮部细胞散乱;T2 组叶片栅栏组织与海绵组织间界限清晰,分层明显,排列整齐,气孔开放,表皮细胞形状均匀,韧皮部细胞排列紧密,说明施加 0.4 mmol · L^{-1} GABA 后诸葛菜幼苗叶片组织结构分明,形态完好,具有耐受盐胁迫条件下组织结构无序化的能力。

3 讨 论

3.1 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗生长的作用

在本试验中,盐胁迫下分别施加 0.2、0.4、0.8 mmol · L^{-1} GABA 的诸葛菜幼苗根长、株高、叶宽、茎粗等生长量平均值均高于 CK 盐害组,5、10、15 d 测定的生长量平均值均在 GABA 浓度为 0.4 mmol · L^{-1}时达到峰值且与 CK 相比具有显著差异,随着外源 GABA 浓度的升高,各组幼苗净生长量有所下降。施加 1.6 mmol · L^{-1} GABA 时,诸葛菜幼苗根长、株高、叶宽、茎粗等生长量指标与 CK 组相比均显著下降。这可能是因为适宜浓度 GABA 处理可通过调节植物叶片蒸腾、根系吸水等生理活动,增强诸葛菜幼苗对盐胁迫的抵抗力从而趋向生长势一致化,提高根系对水、肥、气、热的吸收水平,同时促进了诸葛菜幼苗地上部茎、叶的生长[12-17]。本研究发现,适宜浓度 GABA 处理(以 0.4 mmol · L^{-1}最佳)减轻了盐胁迫对诸葛菜幼苗生长的抑制,提高诸葛菜幼苗的各项生长指标,浓度过高则抑制了幼苗生长发育。

3.2 外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗抗逆生理的作用

本研究发现,随着 GABA 浓度的升高,在盐胁迫下诸葛菜幼苗叶片的丙二醛(MDA)含量呈现先降低后增加的变化趋势,且各时间段均在 T2 试验组(0.4 mmol · L^{-1})达到最低值。这表明适宜浓度的外源 GABA 可使盐胁迫对诸葛菜幼苗叶片细胞膜和细胞质的损伤作用得到缓解,导致叶片丙二醛含量下降,GABA 施加过量也可能会反向抑制诸葛菜幼苗生理代谢及生长[18-22]。GABA 引发处理显著降低了叶片丙二醛的含量,这与 NaHS 引发裸燕麦种子试验的结果表现一致[23]。

在本试验中,与 CK 组相比较,外施不同浓度的 GABA 可引发诸葛菜体内可溶性蛋白含量显著提升,增强植株对盐胁迫环境的抵抗力。GABA 浓度过高使诸葛菜受盐胁迫的损害加重,可溶性蛋白含量降低。这与尤本武等[24]在烟草上的研究结果相似。

研究表明,盐胁迫下,活性氧自由基(ROS)大量产生,增强了膜脂质过氧化过程,直接破坏细胞膜,导致大分子物质如蛋白质、核酸等出现损伤,甚至导致植物细胞衰亡[25]。本试验证明,在盐胁迫导致植物抗氧化酶系统受抑制的情况下,适宜浓度外源 GABA 增强了诸葛菜叶片抗氧化酶的活性。这表明适宜浓度外源 GABA 的施加能够有效引发植物抗氧化酶系统的活性升高,提高诸葛菜幼苗对盐胁迫的耐受性。

本研究中,与 CK 盐害组相较,外施适宜浓度的 GABA 可引发 T1 ~ T4 各试验组的叶绿素含量显著上升;外施适宜浓度 GABA(以 0.4 mmol · L^{-1}最佳)

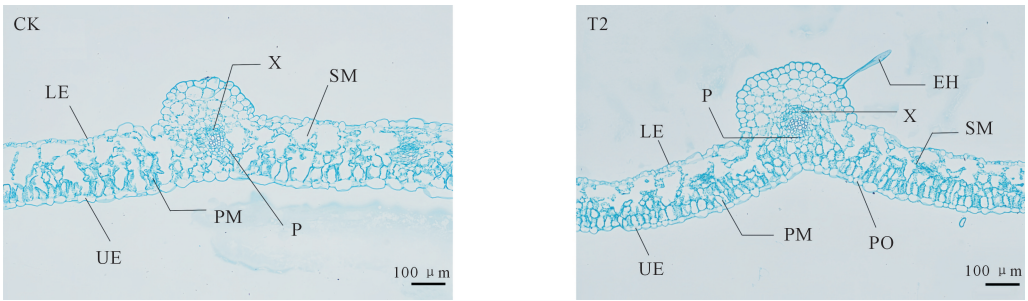
图 1　不同处理组诸葛菜生长状态

Fig.1　Growth status of *Orychophragmus violaceus* in different treatment groups

可提高盐胁迫下叶绿素的合成效率,从而促进诸葛菜幼苗的光合速率提升。施旭丽等[26]发现,GABA 可缓解重金属铬对菊花(*Chrysanthemum morifolium* (Ramat.) Tzvelev)的胁迫,从而促进叶绿素降解。本试验与其研究结果一致。

3.3　外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜组织结构的作用

郑国琦等[27]研究发现,盐生环境生长的宁夏枸杞叶片显著增厚,上、下角质层显著变薄,上表皮细胞和栅栏细胞变化不显著,但栅栏组织层显著加厚,海绵组织层变化不显著,且盐地生长的枸杞叶片叶绿体中含有较多的淀粉粒。本试验中,分别制作 CK(单一盐胁迫)和 T2(0.4 mmol · L^{-1} GABA 处理)的诸葛菜幼苗叶片石蜡切片,通过光学显微镜对两组叶片组织结构进行观察发现,CK 组表皮散乱,



注:UE:上表皮;LE:下表皮;X:木质部;P:韧皮部;SM:海绵组织;PM:栅栏组织;PO:气孔;EH:表皮毛。

Note: UE: Upper epidermis; LE: Lower epidermis; X: Xylem; P: Phloem; SM: Spongy mesophyll; PM: Palisade mesophyll; PO: Stomata; EH: Epidermal hair.

图 11　诸葛菜幼苗叶片石蜡切片(40×)

Fig.11　Paraffin sections of leaves of *Orychophragmus violaceus* seedlings

海绵组织疏松,栅栏组织分层不显著,气孔关闭;T2 组表皮排列紧密,海绵组织饱满,栅栏组织分层整齐,气孔开放。这一结果与贾琰等[17]发现的 GABA 也可作为渗透调节物质以抵御逆境胁迫的研究结果一致。

4　结　论

在盐胁迫下,施加适宜浓度的外源 γ-氨基丁酸可提高诸葛菜幼苗的根长、株高、叶宽、茎粗等形态指标,使诸葛菜幼苗的组织结构发生改变,叶绿素含量提高,同时提升了 POD、SOD 等抗氧化酶活性,缓解了盐胁迫对诸葛菜叶片组织结构的影响。

当外源 GABA 浓度为 0.4 mmol · L^{-1}时,诸葛菜幼苗的各项形态、生理指标(除 MDA 外)均达到峰值;然而,当外源 GABA 浓度提高至1.6 mmol · L^{-1}时,其对诸葛菜盐害的缓解作用显著下降。综上,0.4 mmol · L^{-1}的外源 GABA 对盐胁迫下诸葛菜幼苗形态指标和生理指标的缓解作用最佳,GABA 浓度过高则会抑制其对盐胁迫的缓解作用。

参 考 文 献:

[1] 梁琴, 莫坤, 漆燕, 等. 二月兰在四川丘陵区的利用及栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2024, (2): 222-224.
LIANG Q, MO K, QI Y, et al. Utilization and cultivation techniques of *Orychophragmus violaceus* in the hilly areas of Sichuan Province[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2024, (2): 222-224.

[2] 潘秀秀. 二月兰种子及幼苗抗旱性和耐盐碱性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
PAN X X. Research of drought stress and salinity-alkalinity stress on the seeds and seedings of *Orychophragmus violaceus*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.

[3] PARIDA A K, DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(3): 324-349.

[4] 张华永. γ-氨基丁酸(GABA)对玉米幼苗抗逆性的效应、作用机理及调控[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
ZHANG H Y. The effect function and control of γ-aminobutyric acid in

maize seedling under adversity stress[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2010.

[5] STEWARD G R. γ-Aminobutyric acid: A constituent of the potato tuber? [J]. Science, 1949, 110: 439-440.

[6] KINNERSLEY A M, J T F. Gamma aminobutyric acid (GABA) and plant responses to stress[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2000, 19(6): 479-509.

[7] 黄天娇. γ-氨基丁酸对盐胁迫下番茄种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
HUANG T J. Effects of γ-aminobutyric acid on tomato seed germination and seedling growth under salt stress [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.

[8] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 56-70.
WANG X K. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 56-70.

[9] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008: 12-36.
ZHANG Z A, CHEN Z Y. Experimental techniques of plant physiology [M]. Changchun: Jilin University Press, 2008: 12-36.

[10] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72: 248-254.

[11] 杨捷频. 常规石蜡切片方法的改良[J]. 生物学杂志, 2006, 23(1): 45-46.
YANG J P. Improvement of traditional paraffin section preparation methods[J]. Journal of biology, 2006, 23(1): 45-46.

[12] MIYASHITA Y, GOOD A G. Contribution of the GABA shunt to hypoxia-induced alanine accumulation in roots of *Arabidopsis thaliana* [J]. Plant & Cell Physiology, 2008, 49(1): 92-102.

[13] PRAVIZ M, JALIL K, REZA H. Effect of exogenous Gama-aminobutyric acid on physiological tolerance of wheat seedlings exposed to chilling stress[J]. Lranian Joural of Plant Physiology, 2012, 1(3): 611-617.

[14] 李嘉儒, 苏春杰, 胡晓辉. 外源γ-氨基丁酸对盐碱胁迫下甜瓜幼苗光合作用影响[J]. 黑龙江农业科学, 2016, (9): 66-71.
LI J R, SU C J, HU X H. Effects of exogenous γ-aminobutyric acid on muskmelon photosynthesis under salinity-alkalinity stress[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016, (9): 66-71.

[15] 高洪波, 章铁军, 吕桂云, 等. NaCl胁迫下外源γ-氨基丁酸对黄瓜幼苗生长和活性氧代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(10): 2046-2051.
GAO H B, ZHANG T J, LV G Y, et al. Effects of exogenous γ-aminobutyric acid on growth and reactive oxygen species metabolism of cucumber seedlings under NaCl stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(10): 2046-2051.

[16] 王骁. 外源GABA对盐胁迫下西伯利亚白刺种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
WANG X. Effects of exogenous GABA on the seed germination and seedling growth of nitraria sibirica pall. Under salt stress [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.

[17] 贾琰, 赵宏伟, 王敬国, 等. 逆境胁迫下作物中γ-氨基丁酸代谢及作用的研究进展[J]. 作物杂志, 2014, (5): 9-15.
JIA Y, ZHAO H W, WANG J G, et al. Research progress on γ-aminobulyric acid metabolism and function of crops under stress [J]. Crops, 2014, (5): 9-15.

[18] 张宿. γ-氨基丁酸的生理作用及应用[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(18): 1-9, 16.
ZHANG S. The physiological mechanism and application of γ-aminobutyric acid[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(18): 1-9, 16.

[19] 徐倩. 外源BABA对NaCl胁迫下二月兰种子发芽及幼苗生理特性的影响[D]. 聊城: 聊城大学, 2020.
XU Q. Effect of exogenous BABA on seed germination and seedling growth of *Orychophragmus violaceus* under NaCl stress [D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2020.

[20] 李尉霞. NaCl胁迫对大麦种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2007.
LI W X. The effects of NaCl stress on seed germination and physiological and biochcmcial traits of barley seedling[D]. Shihezi: Shihezi University, 2007.

[21] 杨纯钰. 中华红叶杨的耐镉机理研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2022.
YANG C Y. Cadmium tolerance mechanism of populus' zhonghua hongye[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2022.

[22] 周艳, 刘慧英, 王松, 等. 外源GSH对盐胁迫下番茄幼苗生长及抗逆生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(3): 515-520.
ZHOU Y, LIU H Y, WANG S, et al. Effect of exogenous GSH on tomato seedlings growth and physiological indexes of resistance stress under salt stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(3): 515-520.

[23] 刘建新, 刘瑞瑞, 贾海燕, 等. NaHS引发提高裸燕麦种子活力的生理机制[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 135-142.
LIU J X, LIU R R, JIA H Y, et al. Physiological mechanism of NaHS priming improvement of seed vigor in naked oat[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(2): 135-142.

[24] 尤本武, 董建江, 刘紫薇, 等. β-氨基丁酸诱导烟草抗碱初步研究[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(1): 86-94.
YOU B W, DONG J J, LIU Z W, et al. Preliminary study on BABA-induced resistance to alkaline stress in tobacco[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2017, 23(1): 86-94.

[25] 徐倩, 郭尚敬, 魏慧恬, 等. 外源BABA对NaCl胁迫下二月兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2020, (12): 75-81.
XU Q, GUO S J, WEI H T, et al. Effects of exogenous BABA on growth and physiological characteristics of wheat seedlings in *Orychophragmus violaceus* under NaCl stress [J]. Northern Horticulture, 2020, (12): 75-81.

[26] 施旭丽, 陈发棣, 房伟民, 等. β-氨基丁酸对Cd胁迫下菊花生理特性的影响[J]. 园艺学报, 2015, 42(12): 2429-2438.
SHI X L, CHEN F D, FANG W M, et al. Effects of β-aminobutyric acid on physiological characteristics of Chrysanthemum under Cd stress[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2015, 42(12): 2429-2438.

[27] 郑国琦, 胡正海. 宁夏枸杞的生物学和化学成分的研究进展[J]. 中草药, 2008, 39(5): 796, 附1-附4.
ZHENG G Q, HU Z H. Progress in the biological and chemical composition of barbary wolfberry in Ningxia[J]. Chinese traditional and herbal drugs, 2008, 39(5): 796,A1-A4.