



蒋艳, 古丽孜叶·哈力克, 秦倩, 艾力江·麦麦提. 根施甜菜碱对甜瓜幼苗在 NaCl 胁迫下的缓解效应[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(03):99-112.
JIANG Yan, GULIZIYE Halike, QIN Qian, AILIJANG Maimaiti. Alleviating effect of root application of betaine on muskmelon seedlings under NaCl stress [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(03):99-112.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.03.09

根施甜菜碱对甜瓜幼苗在 NaCl 胁迫下的缓解效应

蒋艳¹ 古丽孜叶·哈力克² 秦倩¹ 艾力江·麦麦提^{3*}

- (1. 新疆农业大学 园艺学院, 乌鲁木齐 830052;
2. 新疆维吾尔自治区葡萄瓜果研究所, 新疆 鄯善 838200;
3. 新疆农业大学 生命科学学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要 为探究根施甜菜碱与调控叶片光合、抗氧化能力和渗透调节的关联, 以及对增强甜瓜幼苗耐盐的可行性, 以‘西州密 25 号’甜瓜幼苗为试验材料, 采用水培根灌甜菜碱的方法, 将甜瓜幼苗用不同浓度甜菜碱(5、10、20 和 40 mmol/L)预处理 3 d, 再用 NaCl 胁迫(75 和 150 mmol/L)处理 7 d 后, 测定甜瓜幼苗根系活力、细胞膜相对透性、光合色素、光合生理、渗透调节物质以及抗氧化酶活性等指标。结果表明: 1) 与对照组相比, 不同浓度 NaCl 对甜瓜幼苗的各项生理指标影响差异显著($P < 0.05$)。2) 根施甜菜碱预处理对 NaCl 胁迫有一定的缓解作用, 5~10 mmol/L 的甜菜碱可不同程度地提高甜瓜幼苗叶片中光合色素含量、光合能力及抗氧化酶活性, 缓解效果最佳。3) 5~10 mmol/L 甜菜碱预处理的甜瓜幼苗根系活力、光合特征参数在 150 mmol/L NaCl 胁迫下比在 75 mmol/L 胁迫下低, 说明根施甜菜碱缓解低浓度 NaCl 胁迫的效果更优。综上, 外施甜菜碱预处理通过调节多种生理生化机制, 能有效缓解甜瓜幼苗受到的盐害, 使甜瓜幼苗能够抵御 NaCl 胁迫, 且以浓度为 5~10 mmol/L 缓解效果最佳。

关键词 甜瓜; 甜菜碱; NaCl 胁迫; 光合作用; 渗透调节; 抗氧化酶活性

中图分类号 S652.1; Q945.78

文章编号 1007-4333(2024)03-0099-14

文献标志码 A

Alleviating effect of root application of betaine on muskmelon seedlings under NaCl stress

JIANG Yan¹, GULIZIYE Halike², QIN Qian¹, AILIJANG Maimaiti^{3*}

- (1. College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. Institute of Grape and Muskmelon of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Shanshan 838200, China;
3. College of Life Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract In order to explore the relationship between betaine root application and regulating leaf photosynthesis, antioxidant capacity and osmotic regulation, and the feasibility of enhancing salt tolerance of melon seedlings, ‘Xizhoumi 25’ melon seedlings were used as study materials. Muskmelon seedlings were pretreated with betaine (5, 10, 20 and 40 mmol/L) for 3 days, and then treated with NaCl stress (75 and 150 mmol/L) for 7 days. The root activity, relative permeability of cell membrane, photosynthetic pigment, photosynthetic physiology, osmotic adjustment substance and antioxidant enzyme activity of muskmelon seedlings were determined. The results showed that: 1) Compared with the control group, different concentrations of NaCl had a significant impact on various physiological indicators of melon

收稿日期: 2023-05-10

基金项目: 新疆维吾尔自治区人力资源与社会保障厅高层次人才引进工程项目(2017-2020); 自治区自然科学基金计划——特培项目(2019D03016); 新疆维吾尔自治区“天山创新团队计划”项目(2021D14009)

第一作者: 蒋艳 (ORCID: 0009-0000-3597-2385), 硕士研究生, E-mail: 2635246798@qq.com

通讯作者: 艾力江·麦麦提 (ORCID: 0009-0001-5931-7382), 博士, 主要从事植物逆境生理生态研究, E-mail: ailijanmmt@126.com

seedlings ($P < 0.05$). 2) Root application of betaine pretreatment had a certain alleviating effect on NaCl stress. Betaine with a concentration of 5-10 mmol/L can improve the content of photosynthetic pigment, photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activity in the leaves of melon seedlings to varying degrees, with the best mitigation effect. 3) The root activity and photosynthetic characteristic parameters of melon seedlings pretreated with 5-10 mmol/L betaine were lower under 150 mmol/L NaCl stress than under 75 mmol/L NaCl stress, indicating that root application of betaine had a better effect in alleviating low concentration NaCl stress. In conclusion, exogenous root application of betaine can effectively alleviate the salt injury to muskmelon seedlings by regulating various physiological and biochemical mechanisms, enabling them to resist NaCl stress. The best mitigation effect was at the concentration of 5-10 mmol/L.

Keywords muskmelon; betaine; NaCl stress; photosynthesis; osmoregulation; antioxidant enzyme activity

自然和人为造成的土壤盐渍化已成为世界范围内日益严重的问题,盐渍化会对大多数栽培植物造成盐胁迫,危及农业生态系统,其通过改变植物的形态、生理生化和分子过程干扰作物生长和发育,直接影响食物的质量和产量^[1-3]。目前,我国土壤盐渍化和次生盐渍化现象广泛存在,特别是在一些干旱和半干旱地区,土壤盐渍化现象更为突出,已成为一个重要的生态和农业问题。土壤中高浓度的盐分会使土壤通透性变差,抑制微生物的生长^[4]。盐胁迫下土壤渗透压会升高,发生渗透胁迫,造成植物细胞生理干旱^[1],降低木质部导水有效性^[5],影响植物对水肥的吸收以及自身的光合作用,从而影响植物体内代谢物质的合成^[6];此外,盐胁迫还会使部分叶片气孔关闭^[7],减少蒸腾^[8],破坏植物叶绿体结构^[9],抑制光合磷酸化过程^[10-11]。同时,土壤盐胁迫也会通过离子毒害影响酶活性、脂质代谢以及蛋白质合成等来抑制植物生长^[12]。因此,为了提高植物对盐胁迫的抗性,需要进一步的研究以揭示植物内复杂防御系统功能的生理学机制。

甜瓜(*Cucumis melo* L.),又称为哈密瓜或香瓜,营养价值丰富,是新疆最具代表性的水果之一。新疆属于温带大陆性气候,降水少,蒸发大,空气极端干燥,昼夜温差大,有利于甜瓜营养积累^[13]。作为新疆广泛栽培的果蔬作物,甜瓜已逐渐成为继葡萄和红枣之后的又一个区域特色优势产业,在当地果农的脱贫攻坚中占有重要地位^[14]。甜瓜是对盐敏感的园艺作物,土壤盐渍化造成的盐胁迫伤害能极大地抑制甜瓜生长,造成甜瓜产量和品质的降低^[15]。

在许多已知的植物渗透保护剂中,甜菜碱(Glycine betaine, GB)是目前研究最多,也是最有效的相溶性物质之一,甜菜碱广泛存在于植物中,在

植物的抗逆性中起着至关重要的作用^[16-20]。外源施用GB能提高多种甜菜碱积累植物/非积累植物在各种胁迫条件下的生长、存活能力并增强其耐性^[21-23]。有很多研究均表明,外源施用甜菜碱对盐胁迫下大多数作物的生长和最终产量有积极效应,比如小麦^[24-25]、水稻^[26]、玉米^[27]和油菜^[28]等。相比之下,棉花的生长没有明显的改善^[29]。此外,也有报道外源施用GB对番茄生长有不利影响^[30]。Ashraf等^[21]认为施用GB的有效性取决于多种因素,包括物种类型、施用时的植物发育阶段、GB浓度和施用次数。目前,甜菜碱的研究主要集中在大田作物上^[24-29,31-32],其与园艺作物甜瓜耐盐性关系的研究报道较少^[33]。因此,本研究选用甜菜碱为外源物质,旨在评估外源施用甜菜碱是否可以通过调节光合能力和渗透调节或抗氧化能力来改善NaCl胁迫对甜瓜幼苗生长的不利影响。本研究以‘西州密25号’甜瓜幼苗为试验材料,在液培条件下,研究根施不同浓度的甜菜碱预处理对不同NaCl浓度处理下甜瓜幼苗生长、根系活力、叶片光合特性、抗氧化酶活性与其渗透调节物质代谢的影响,旨在探索甜菜碱提高甜瓜幼苗耐盐作用的机制,以期甜菜碱在甜瓜苗期抗盐害应用提供依据,同时为盐渍土壤地区甜瓜栽培提供可借鉴的苗期调控技术。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在新疆农业大学林学与园艺学院进行,供试材料为厚皮甜瓜品种‘西州密25号’,该品种植株长势健壮,综合抗性好,适合我国南北各类设施和露地栽培,为甜瓜中的精品。种子由新疆维吾尔自治区葡萄瓜果研究所提供。

供试试剂为甜菜碱(Glycine betaine, GB),购自

国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验设计

以‘西州密 25 号’甜瓜幼苗为试验材料,采用溶液培养法。在幼苗生长期,施以 1/2 Hoagland 营养液,并将其放置在光照培养架上进行培养,光周期为 16 h(光照)/8 h(黑暗)。待植株长到 5 片真叶时,先根施 1/2 Hoagland 营

养液+不同浓度的 GB 预处理 3 d,GB 浓度^[35]设为 0、5、10、20 和 40 mmol/L;之后,分别对 GB 预处理植株进行根施 1/2 Hoagland 营养液+不同浓度的 NaCl 处理 7 d,NaCl 浓度^[36-37]设为 75 和 150 mmol/L,并以 1/2 Hoagland 营养液浇灌为对照(CK)。试验设计共 11 个处理(表 1),每个处理 12 株重复,共培养 21 盆。

表 1 试验设计
Table1 Experimental design

编号 Number	处理 Processor
1	1/2 Hoagland 营养液(CK)
2	1/2 Hoagland 营养液+75 mmol/L NaCl
3	1/2 Hoagland 营养液+5 mmol/L GB+75 mmol/L NaCl
4	1/2 Hoagland 营养液+10 mmol/L GB+75 mmol/L NaCl
5	1/2 Hoagland 营养液+20 mmol/L GB+75 mmol/L NaCl
6	1/2 Hoagland 营养液+40 mmol/L GB+75 mmol/L NaCl
7	1/2 Hoagland 营养液+150 mmol/L NaCl
8	1/2 Hoagland 营养液+5 mmol/L GB+150 mmol/L NaCl
9	1/2 Hoagland 营养液+10 mmol/L GB+150 mmol/L NaCl
10	1/2 Hoagland 营养液+20 mmol/L GB+150 mmol/L NaCl
11	1/2 Hoagland 营养液+40 mmol/L GB+150 mmol/L NaCl

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系活力和叶片细胞膜相对透性的测定

根系活力(RA)的测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[38],叶片细胞膜相对透性测定采用电导法^[38]。

1.3.2 光合特征参数的测定

1) 光合色素含量的测定。称取各处理新鲜叶片 0.2 g,放入试管中,加入 95%乙醇 10 mL,提取直至全部叶片变成白色为止。把叶绿体色素提取液倒入光径 1 cm 的比色杯内,以 95%乙醇为对照,在波长 470、645 和 663 nm 下测定吸光度^[38],并计算叶绿素(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、总叶绿素(T Chl)和类胡萝卜素(Car)含量,每个处理测 5 次重复。

2) 光合参数的测定。于 10:00—12:00 进行光合参数的测定,采用 LI-6400 便携式光合仪(Li-cor 公司,美国)测定甜瓜幼苗叶片净光合速率(Pn)、气孔导度

(Gs)、蒸腾速率(Tr)和细胞间隙 CO₂浓度(Ci)等光合参数。测定时利用光合仪自配红蓝光源(LI-6400-02B)和 CO₂钢瓶,光照强度设为 800 μmol/(m²·s),CO₂的浓度为 390 μmol/(m²·s)。每个处理 5 株幼苗,选取在同一叶位的第 4~5 片叶片进行测定^[39]。

1.3.3 渗透调节物质的测定

可溶性糖(SS)含量的测定采用蒽酮比色法^[38],脯氨酸(Pro)含量的测定采用酸性茚三酮法^[38]。

1.3.4 抗氧化酶活性的测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定^[38]。

1.4 数据处理

所得试验数据均利用 Microsoft Excel 2016 进行整理,用 SPSS 23.0 软件进行方差分析和主成分分析,并使用 Duncan’s 新复极差法进行多重比较分

析。利用模糊数学隶属函数法计算不同浓度甜菜碱预处理3 d后75 mmol/L NaCl胁迫下‘西州密25号’幼苗各项指标的隶属函数值,并将指标隶属函数值求和,之后取平均值,以平均值大小进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 根施甜菜碱对 NaCl 胁迫下甜瓜幼苗表型特征的影响

与CK相比,不同浓度NaCl溶液培养下甜瓜幼苗的生长均受到明显抑制(图1)。在75 mmol/L NaCl胁迫下,甜瓜幼苗植株矮小、根系稀少,生长不

良(图1(a))。在150 mmol/L NaCl胁迫下,甜瓜幼苗受盐害症状严重,叶片出现灼伤状枯萎,幼苗基本死亡(图1(b))。根施5和10 mmol/L 甜菜碱预处理下,75 mmol/L NaCl胁迫的甜瓜幼苗叶片茂盛、根系发达、植株恢复并生长良好,150 mmol/L NaCl胁迫的甜瓜幼苗受盐害症状也有所缓解;但在根施20和40 mmol/L 甜菜碱预处理下,150 mmol/L NaCl胁迫的甜瓜幼苗生长明显不佳,基本死亡。根据甜瓜幼苗的生长状况,本试验未对150 mmol/L NaCl胁迫条件下0、20和40 mmol/L 甜菜碱预处理的甜瓜幼苗进行后续指标的测定与分析。

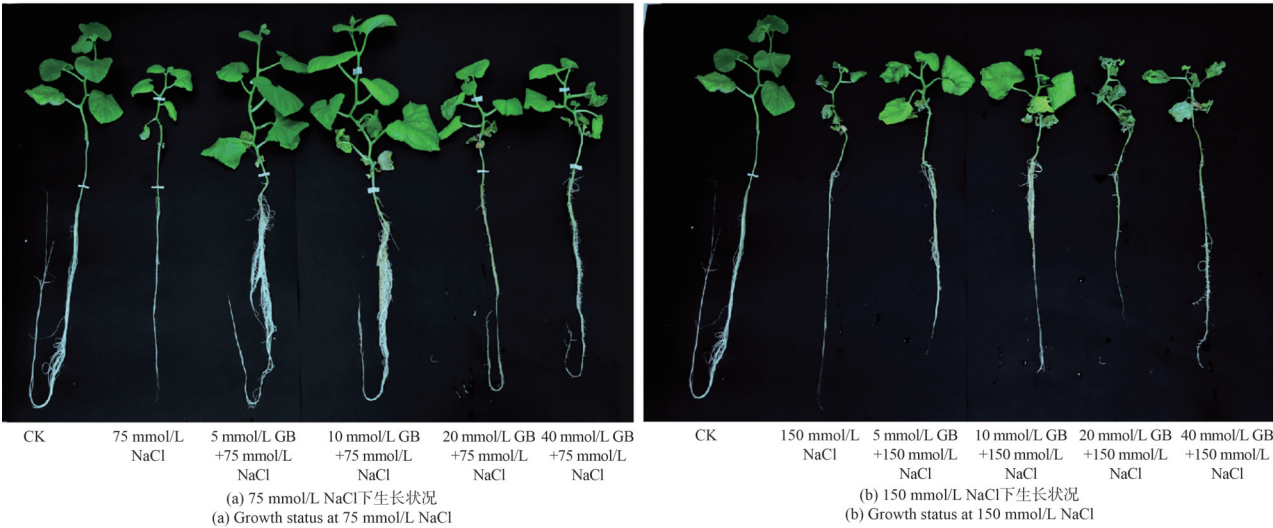
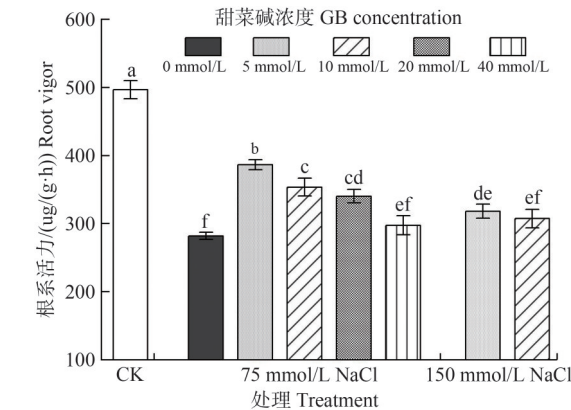


图1 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗表型的影响

Fig. 1 Effects of root application glycine betaine on the phenotypic of muskmelon seedlings under NaCl stress

2.2 根施甜菜碱对 NaCl 胁迫下甜瓜幼苗根系活力的影响

根施甜菜碱可以提高NaCl胁迫下甜瓜幼苗的根系活力(图2)。75 mmol/L NaCl胁迫下,未经过GB处理的甜瓜幼苗的根系活力与CK相比较显著降低43.20%。5、10和20 mmol/L 甜菜碱预处理均能显著提高75 mmol/L NaCl胁迫下甜瓜幼苗的根系活力,分别提高37.08%、25.40%和20.68%;其中,以5 mmol/L 甜菜碱预处理缓解效果最佳,缓解度为48.5%,但仍没有恢复到正常水平。在150 mmol/L NaCl胁迫下,5和10 mmol/L 甜菜碱预处理的甜瓜幼苗根系活力均显著低于CK,分别下降35.93%和38.12%。可见,适宜浓度的外源甜菜碱处理能有效缓解NaCl胁迫对甜瓜幼苗根系的伤害。



不同字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。
Different letters in the bar chart indicate significant differences among the treatments ($P<0.05$). The same below.

图2 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗根系活力的影响

Fig. 2 Effects of root application glycine betaine on root activity of muskmelon seedlings under NaCl stress

2.3 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片细胞膜相对透性和丙二醛(MDA)含量的影响

根施甜菜碱对甜瓜幼苗叶片在NaCl胁迫下细胞膜相对透性的影响见图3(a)。与CK相比,NaCl胁迫处理下甜瓜幼苗叶片细胞膜相对透性与MDA含量均显著增加。75 mmol/L NaCl胁迫下,甜瓜幼苗叶片细胞膜相对透性与CK相比增加249.68%;5、10和20 mmol/L的甜菜碱预处理均能降低在75 mmol/L NaCl胁迫下的甜瓜幼苗叶片细胞膜相对透性,但与0 mmol/L处理差异不显著。在150 mmol/L NaCl胁迫下进行5和10 mmol/L甜菜碱预处理的甜瓜幼苗

叶片细胞膜相对透性均高于其他处理,与CK差异显著,分别增加334.45%和355.66%。

根施甜菜碱后甜瓜幼苗叶片在NaCl胁迫下MDA含量变化如图3(b)所示。在75 mmol/L NaCl胁迫下,0 mmol/L甜菜碱预处理的甜瓜幼苗叶片MDA含量显著增加,与CK相比,增加102.21%;根施甜菜碱能有效减少MDA含量,40 mmol/L甜菜碱预处理缓解效果最佳,与0 mmol/L相比减少44.50%。在150 mmol/L NaCl胁迫下进行5和10 mmol/L甜菜碱预处理的甜瓜幼苗叶片MDA含量均显著高于CK,分别增加54.70%和53.94%。

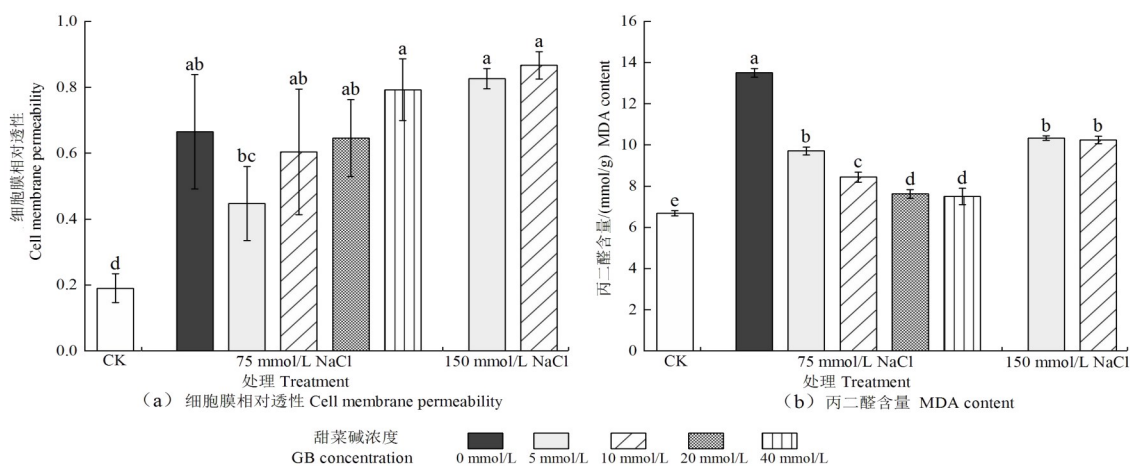


图3 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜叶片细胞膜相对透性(a)及丙二醛含量(b)的影响

Fig. 3 Effects of root application glycine betaine on membrane permeability (a) and MDA content (b) of muskmelon under NaCl stress

2.4 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片光合作用的影响

2.4.1 叶片光合色素含量的变化

根施甜菜碱后甜瓜幼苗叶片在NaCl胁迫下光合色素含量变化如图4所示。与CK相比,75 mmol/L NaCl胁迫处理下甜瓜幼苗叶片的叶绿素a、总叶绿素和类胡萝卜素含量均显著降低,分别降低52.45%、47.81%和67.17%,叶绿素b、叶绿素a/b值与CK无显著差异。5、10和20 mmol/L甜菜碱预处理均能缓解75 mmol/L NaCl胁迫对甜瓜幼苗叶片的各光合色素的影响,5 mmol/L甜菜碱预处理与CK无显著差异,10 mmol/L甜菜碱预处理下仅类胡萝卜素含量与CK有显著差异;以5 mmol/L甜菜碱预处理的缓解效果最佳,其叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量、叶绿素a/b值以及类胡萝卜素分别增加70.84%、82.41%、73.02%、72.79%

和77.4%。150 mmol/L NaCl胁迫下进行5和10 mmol/L甜菜碱预处理的甜瓜幼苗叶片的叶绿素a/b值无显著差异,其余光合色素含量均显著降低。

2.4.2 叶片光合参数的变化

根施甜菜碱对甜瓜幼苗叶片在NaCl胁迫下光合参数的影响如图5所示。与CK相比,75 mmol/L NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片的净光合速率、气孔导度、细胞间隙CO₂浓度和水分利用率均显著降低,分别下降67.71%、70.49%、26.56%和49.13%,蒸腾速率与CK无显著差异。5、10和20 mmol/L甜菜碱预处理均能缓解NaCl胁迫对甜瓜幼苗叶片的净光合速率、细胞间隙CO₂浓度、蒸腾速率及水分利用率的伤害,以5 mmol/L甜菜碱预处理效果最佳,与0 mmol/L甜菜碱预处理相比分别提高203.26%、40.81%、35.06%和109.82%。150 mmol/L NaCl胁迫下进行5和10 mmol/L甜菜碱预处理与CK相

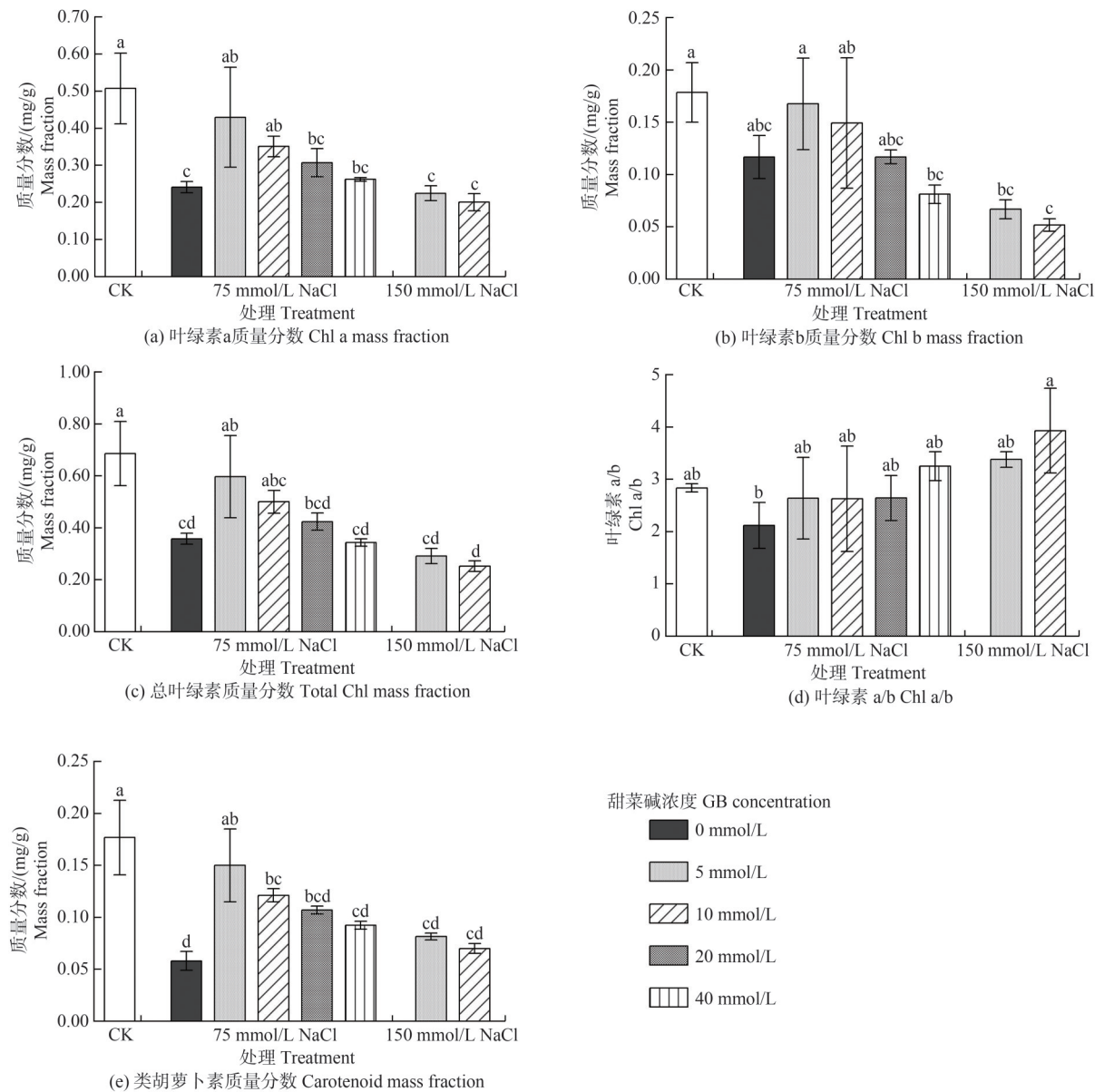


图4 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片光合色素含量的影响

Fig. 4 Effects of root application glycine betaine on photosynthetic pigments content of muskmelon seedlings under NaCl stress

比光合参数均显著降低。

2.5 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

根施甜菜碱后甜瓜幼苗叶片在NaCl胁迫下渗透调节物质含量变化见图6。与CK相比,75 mmol/L NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片可溶性糖和脯氨酸含量均显著增加,与CK相比分别增加90.00%和61.12%;与仅75mmol/L NaCl胁迫相比,各浓度甜菜碱预处理下甜瓜幼苗叶片可溶性糖含量显著增加,而脯氨酸含量在5和10 mmol/L浓度预处理下差异显著。150

mmol/L NaCl胁迫下进行5和10 mmol/L甜菜碱预处理的甜瓜幼苗叶片可溶性糖和脯氨酸含量均显著高于其他处理,以5 mmol/L甜菜碱预处理效果最佳,分别高于CK 276.18%和148.48%。

2.6 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

根施甜菜碱对甜瓜幼苗叶片在NaCl胁迫下抗氧化酶活性的影响如图7所示。与CK相比,75 mmol/L NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片中的SOD、POD和CAT酶活性均显著提高,分别提高

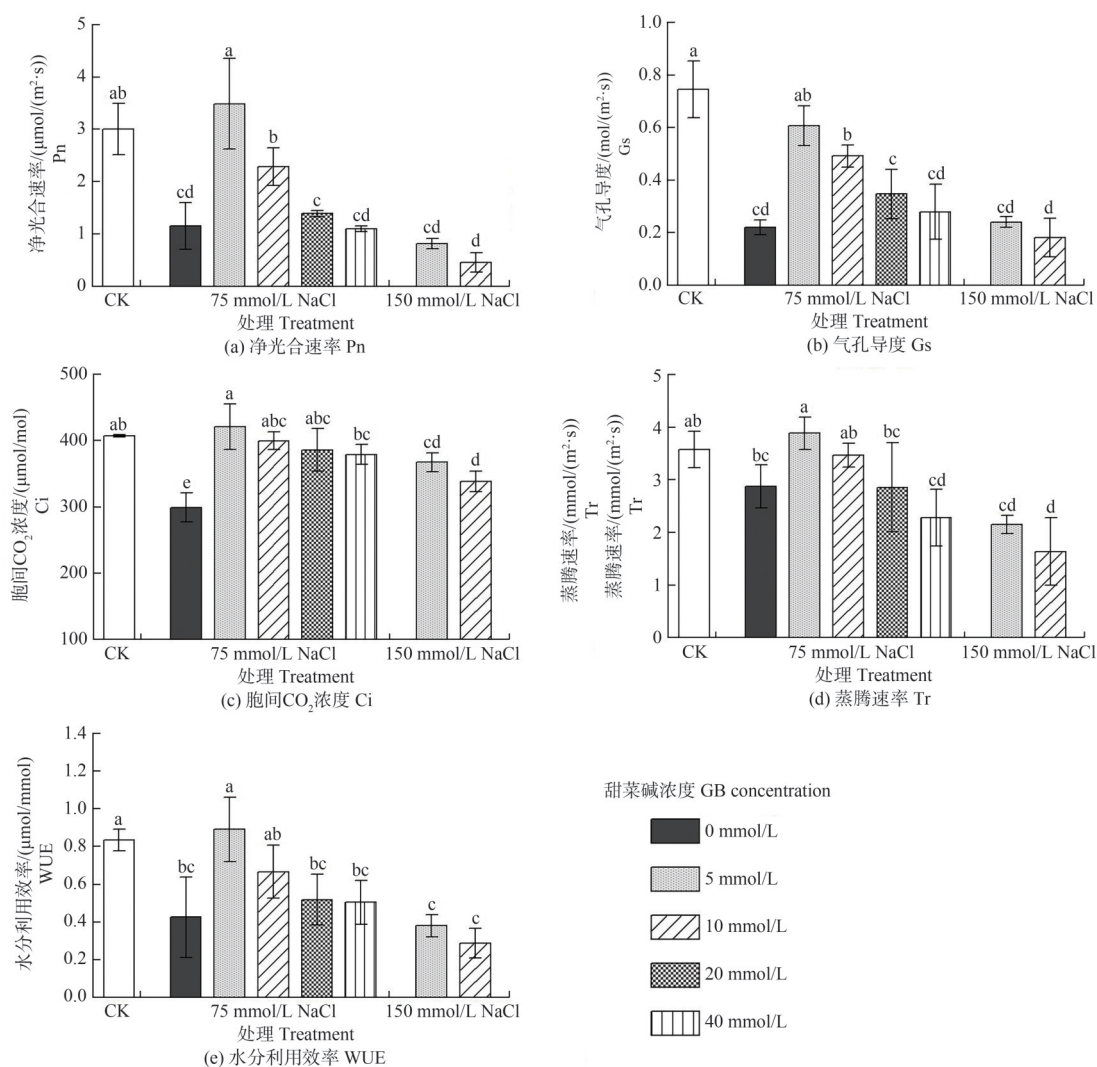


图5 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片光合参数的影响

Fig. 5 Effects of root application glycine betaine on photosynthetic parameter of muskmelon seedlings under NaCl stress

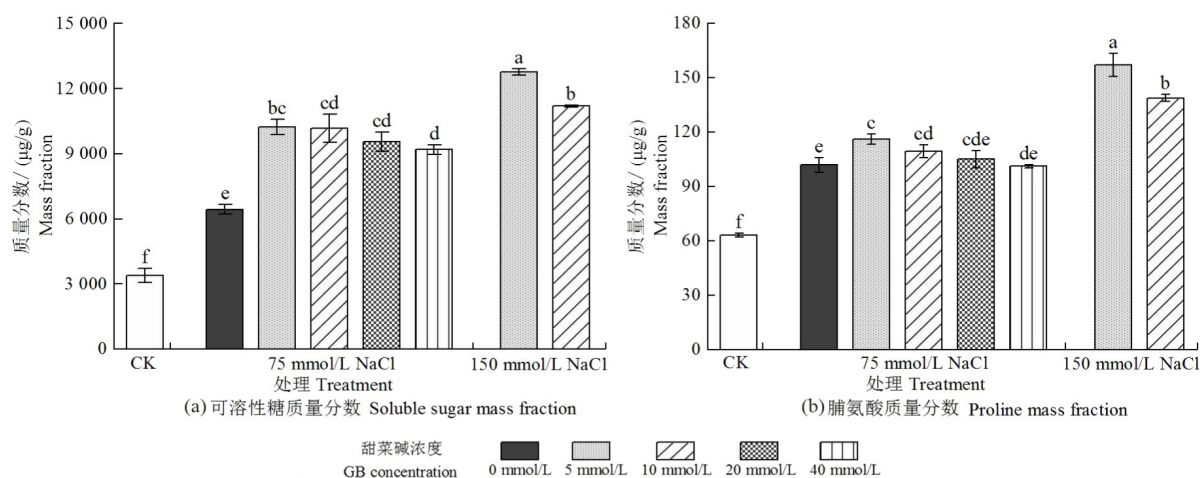


图6 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

Fig. 6 Effects of root application glycine betaine on osmotic regulation substances contents of muskmelon seedlings under NaCl stress

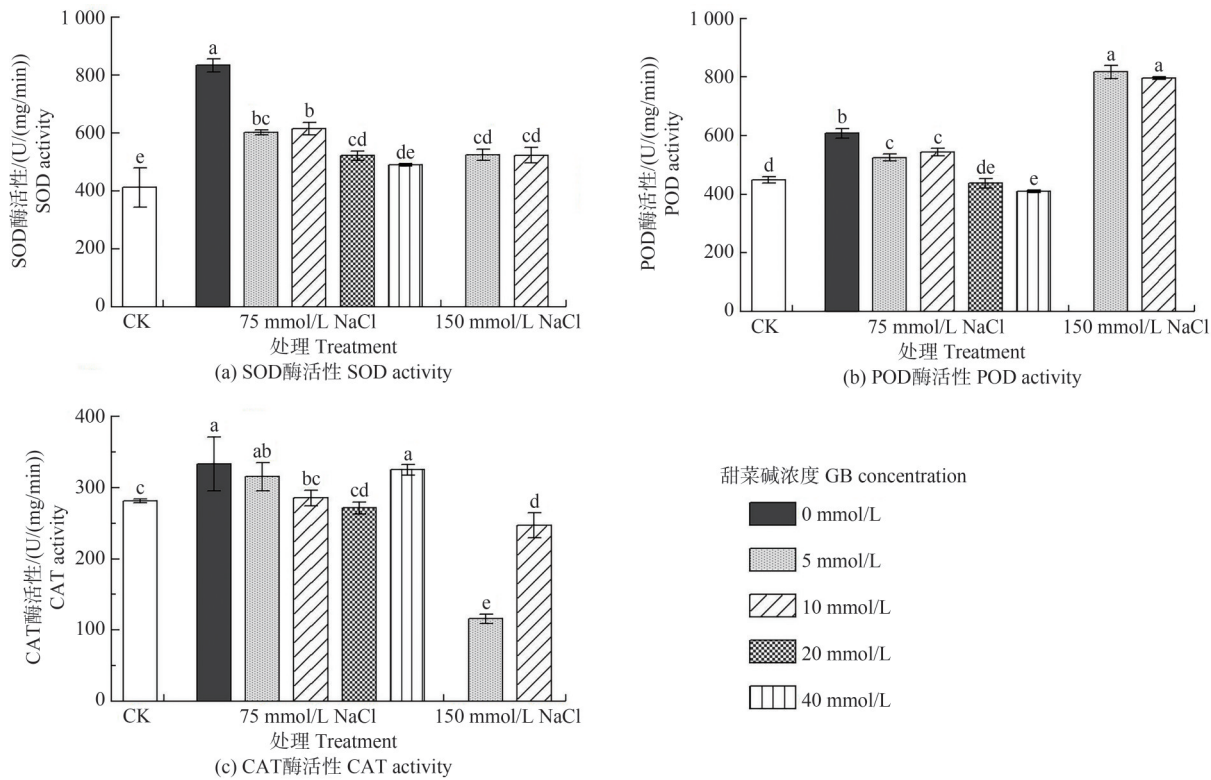


图7 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig.7 Effects of root application glycine betaine on antioxidant enzyme activities of muskmelon seedlings under NaCl stress

102.42%、35.61%和18.43%。在不同浓度的甜菜碱预处理条件下,SOD、POD和CAT酶活性与75 mmol/L NaCl胁迫下相比均有所降低,其中SOD和POD酶活性显著降低。甜瓜幼苗叶片中的SOD和POD酶活性在40 mmol/L甜菜碱预处理下达到最低,CAT酶活性在20 mmol/L甜菜碱预处理下达到最低。在150 mmol/L NaCl胁迫下进行5和10 mmol/L甜菜碱预处理的甜瓜幼苗叶片中SOD和POD酶活性显著高于CK,在此处理下POD酶活性达到所有处理中的最高值,与CK相比分别提高82.14%和77.61%;而CAT与CK相比显著降低。

2.7 甜瓜幼苗叶片光合参数及生理生化指标之间的相关性分析

通过对甜瓜幼苗根系活力、细胞膜透性、光合参数、渗透调节物质及抗氧化酶活性等指标的分析,发现某些指标间存在显著相关性(图8)。Pn、Gs、Ci、Tr和WUE之间呈显著正相关;Pn与Chl a、Chl b、Car和T Chl呈显著正相关,其中Pn与T Chl相关系数达到0.87;Chl b与Chl a/b呈显著负相关;MDA、SOD和POD呈显著正相关,其中MDA与

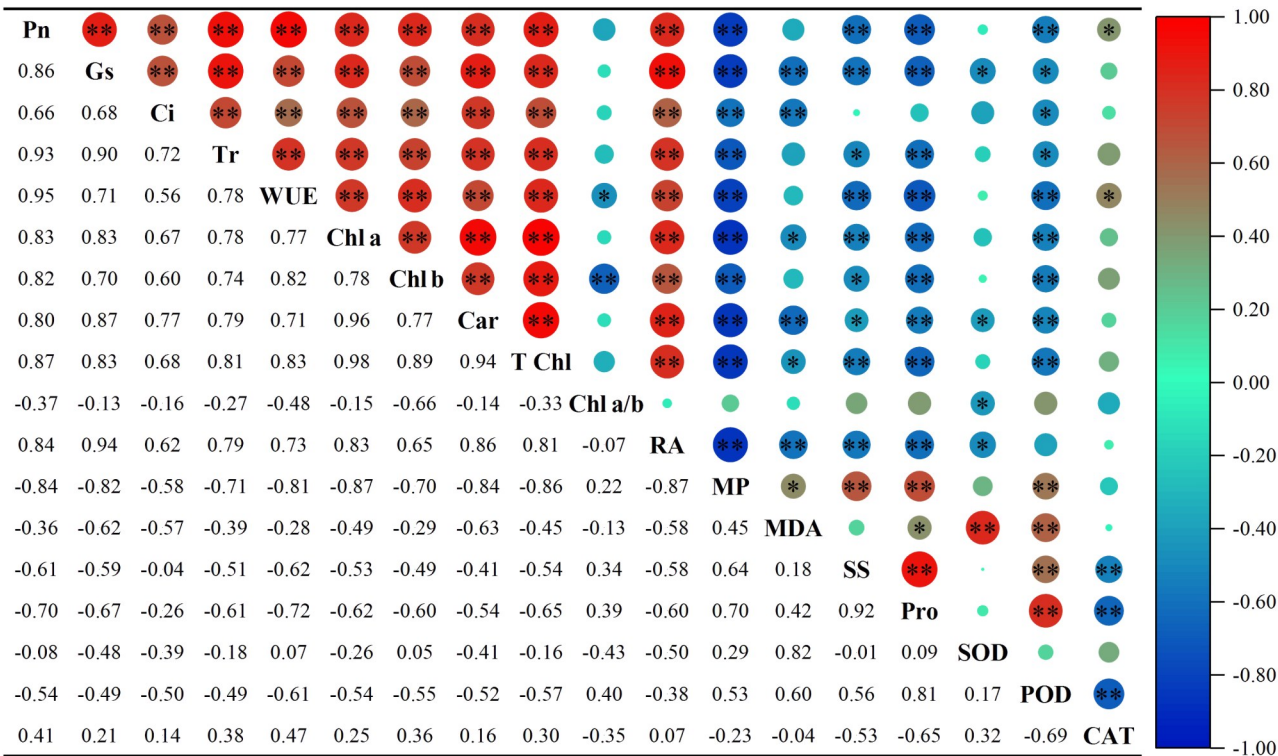
SOD相关系数达到0.82。

2.8 甜瓜幼苗叶片各指标主要成分分析

对各处理下甜瓜幼苗的各项指标进行主成分分析,并基于特征值>1的标准共提取出4个主成分(表2),各指标因子载荷系数如表3所示。其中,第1主成分的特征值为10.885,贡献率为60.471%,其对应特征向量中绝对值较大的指标为Pn、Gs、Chl a、Car和T Chl含量;第2主成分的特征值为2.773,贡献率为15.407%,其对应特征向量中绝对值较大的指标为SOD、Chl a/b和CAT含量;第3主成分的特征值为1.481,贡献率为8.226%,其对应特征向量中绝对值较大的指标为POD、Pro和MDA含量;第4主成分的特征值为1.053,贡献率为5.851%,其对应特征向量中绝对值较大的指标为Ci和SS含量。这4个主成分的累积贡献率达到89.954%,即保留了原有指标89.954%的信息。

2.9 75 mmol/L NaCl胁迫下甜瓜幼苗各处理综合评价

为更加明确不同浓度甜菜碱处理后对NaCl胁迫下甜瓜幼苗生长发育的缓解效应,对75 mmol/L



*表示相关性达显著水平($P<0.05$),**表示相关性达极显著水平($P<0.01$)。
*indicate significant correlation at the 0.05 level,** indicate significant correlation at the 0.01 level.

图 8 甜瓜幼苗叶片光合参数及生理生化指标之间的 18 个指标的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of 18 indexes between photosynthetic parameters and physiological and biochemical indexes of muskmelon seedling

表 2 主成分特征值及贡献率

Table 2 Principal component eigenvalues and contribution rates

主成分 Principal component	特征值 Eigen-value	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Accumulated contribution rate
PC1	10.885	60.471	60.471
PC2	2.773	15.407	75.878
PC3	1.481	8.226	84.103
PC4	1.053	5.851	89.954

NaCl胁迫下各个处理应用模糊数学隶属函数进行综合评价,平均隶属度可以综合反映各处理缓解效果(表4)。综合分析结果表明,在所有处理中CK的隶属函数平均值为0.62;仅75 mmol/L NaCl胁迫条件下,甜瓜幼苗的隶属函数平均值为0.32,表明NaCl胁迫会对甜瓜幼苗的生长产生抑制作用。不同浓度甜菜碱预处理下,甜瓜幼苗的隶属函数平均

值均有所升高,表明甜菜碱预处理能有效缓解NaCl胁迫对甜瓜幼苗生长带来的抑制作用。其中,5 mmol/L浓度甜菜碱预处理下,甜瓜幼苗的隶属函数平均值达到0.74,与其他处理相比最高,且高于CK;10 mmol/L甜菜碱预处理下,其隶属函数平均值最接近CK,说明用5~10 mmol/L浓度甜菜碱预处理对NaCl胁迫下甜瓜幼苗的缓解效果最佳。

表3 各指标因子载荷系数

Table 3 Load coefficients of each indicator factor

项目 Items	因子载荷系数 Factor loading coefficient			
	1	2	3	4
净光合速率 Pn	0.938	−0.117	−0.181	−0.074
气孔导度 Gs	0.919	0.250	−0.004	−0.142
胞间 CO ₂ 浓度 Ci	0.710	0.329	0.231	0.481
蒸腾速率 Tr	0.884	0.009	0.165	−0.003
水分利用率 WUE	0.884	−0.283	0.151	−0.031
叶绿素 a 含量 Chl a content	0.919	0.129	0.146	−0.078
叶绿素 b 含量 Chl b content	0.847	−0.247	0.302	0.171
类胡萝卜素含量 Car content	0.909	0.285	0.150	0.050
总叶绿素含量 T Chl content	0.942	0.008	0.207	0.000
叶绿素比值 Chl a/b	−0.345	0.670	−0.209	−0.319
膜透性 MP	−0.899	−0.077	−0.040	0.221
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	−0.271	−0.852	0.364	−0.030
过氧化物酶活性 POD activity	−0.696	0.232	0.514	−0.404
过氧化氢酶活性 CAT activity	0.412	−0.640	−0.406	0.193
丙二醛含量 MDA content	−0.565	−0.577	0.448	−0.294
根系活力 RA	0.882	0.313	0.061	−0.278
可溶性糖含量 SS content	−0.665	0.396	0.375	0.466
脯氨酸含量 Pro content	−0.790	0.341	0.464	0.155

表4 根施甜菜碱后 NaCl胁迫下甜瓜幼苗各处理的隶属函数值及综合排序

Table 4 The values of membership function and comprehensive ordering of all process of muskmelon seedlings under NaCl stress after treatment with Glycine betaine root application

指标 Index	CK	甜菜碱浓度/(mmol/L) Glycine betaine concentration				
		0	5	10	20	40
叶绿素 a 含量 Chl a content	1.00	0.00	0.71	0.41	0.25	0.08
类胡萝卜素含量 Car content	1.00	0.00	0.77	0.53	0.41	0.29
总叶绿素含量 T Chl content	1.00	0.04	0.74	0.46	0.24	0.00
叶绿素 a/b Chl a/b	0.63	0.00	0.46	0.45	0.46	1.00
净光合速率 Pn	0.80	0.02	1.00	0.50	0.12	0.00
气孔导度 Gs	1.00	0.00	0.74	0.52	0.24	0.11
胞间 CO ₂ 浓度 Ci	0.89	0.00	1.00	0.82	0.71	0.66
膜透性 MP	1.00	0.21	0.57	0.31	0.24	0.00
丙二醛含量 MDA content	1.00	0.00	0.56	0.74	0.86	0.88
可溶性糖含量 SS content	0.00	0.45	1.00	0.99	0.90	0.85
脯氨酸含量 Pro content	0.00	0.73	1.00	0.87	0.79	0.72
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	0.00	1.00	0.45	0.48	0.26	0.19
过氧化物酶活性 POD activity	0.19	1.00	0.58	0.67	0.14	0.00
过氧化氢酶活性 CAT activity	0.16	1.00	0.71	0.23	0.00	0.87
平均值 Mean value	0.62	0.32	0.74	0.57	0.40	0.40
排序 Ranking	2	6	1	3	4	4

3 讨 论

3.1 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗根系活力的影响

植物根系是活跃的吸收器官和合成器官,根的生长情况和活力水平直接影响地上部的营养状况及产量水平,根系活力就是一个表征植物根系的量。根系与土壤直接接触,最易受外界环境的影响,面对盐碱胁迫时,根系是最先感知并作出适应性调整的器官^[40-41]。本试验结果表明,NaCl胁迫处理下甜瓜幼苗根系活力显著下降,外源施加甜菜碱能明显提高其根系活力,这与杨晓云等^[42]在玉米幼苗上的研究结果一致。5和10 mmol/L甜菜碱预处理下进行150 mmol/L NaCl胁迫的甜瓜幼苗根系活力均显著低于CK以及75 mmol/L NaCl胁迫处理。75 mmol/L NaCl胁迫处理下,5 mmol/L甜菜碱预处理对甜瓜幼苗根系活力缓解效果最佳。

3.2 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片渗透调节物质的影响

盐胁迫会导致植物吸水困难,造成渗透胁迫,这时植物会大量合成脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白等渗透调节物质,以协调细胞与外界的渗透压平衡,保护细胞膜与蛋白质活性,以维持细胞的正常功能^[43]。有研究表明,NaCl胁迫下,甜菜叶片中季胺化合物、蔗糖、可溶蛋白、游离氨基酸和有机酸含量明显上升^[44];外源施加甜菜碱可以使千屈菜幼苗中的MDA含量减少,可溶性蛋白含量增加^[45],还可有效增加薄皮甜瓜幼苗中的脯氨酸含量,降低其质膜的相对透性^[35]。本试验结果表明,NaCl胁迫会使甜瓜幼苗叶片中的可溶性糖和脯氨酸含量显著增加,而不同浓度甜菜碱预处理的甜瓜幼苗叶片可溶性糖含量也显著增加,这与范春丽等^[46]在石榴种子上的研究结果一致,而脯氨酸含量在5和10 mmol/L浓度预处理下差异显著。在150 mmol/L NaCl处理下进行5和10 mmol/L甜菜碱预处理的甜瓜幼苗叶片可溶性糖和脯氨酸含量最高。说明甜瓜幼苗在NaCl胁迫下通过增加体内可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质来缓解胁迫,外源施加甜菜碱也促进这些物质积累。5 mmol/L甜菜碱预处理的甜瓜幼苗叶片细胞膜相对透性与CK无显著差异,缓解效果最佳。

3.3 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片光合作用的影响

植物叶片是主要进行光合作用的器官,而叶绿体是进行光合作用的主要场所。盐胁迫会引起叶绿体中光合色素降解,使光合作用受到一定程度的抑制^[47-48]。Chl a/b值的变化,能反映叶片光合活性的强弱^[49]。净光合速率可以反应植物在逆境条件下受到的伤害和自身的抗逆能力,在盐胁迫条件下,外源施加甜菜碱可以提升玉米幼苗的净光合速率,提高蒸腾速率,降低玉米幼苗胞间CO₂浓度^[50]。本试验结果表明,NaCl胁迫能影响甜瓜幼苗叶片光合色素的合成,并且伤害度随盐分浓度的增加而增加,而外源施加甜菜碱预处理具有有效的缓冲作用,在75 mmol/L NaCl处理下甜菜碱浓度5 mmol/L为最佳。NaCl浓度为150 mmol/L时,5和10 mmol/L甜菜碱前处理的甜瓜幼苗叶片色素低,说明NaCl浓度过高,甜菜碱前处理效果不明显或者可能有毒害作用,这需要进一步研究。同时,Chl a/Chl b值变化与光合色素含量变化趋势相反,与叶片相对透性变化趋势基本一致。甜瓜幼苗在外施甜菜碱预处理的NaCl胁迫下,光合色素含量变化趋势和各光合参数变化趋势一致。甜菜碱在NaCl胁迫下可能作为渗透物质参与渗透调节进而平衡细胞质渗透势或者促使其可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质积累,平衡植物体内水势,使膜避免膜质过氧化而对膜起到保护作用,从而提高甜瓜色素含量,促使光合作用,以缓解NaCl胁迫,这与刘丽萍等^[31]在大麦种子上的研究结果相似。在同一浓度NaCl胁迫下,5 mmol/L甜菜碱浓度对甜瓜幼苗光合作用的缓解效果最好。

3.4 根施甜菜碱对NaCl胁迫下甜瓜幼苗叶片抗氧化系统的影响

在植物的正常生理活动中,活性氧的产生和清除始终处于动态平衡,但在盐渍环境下,植物体内活性氧的积累会破坏这种平衡,最终导致植物死亡^[51]。有研究表明,盐胁迫会增加花生幼苗体内的MDA含量,使SOD、POD和CAT酶活性下降,施加NO能有效降低MDA含量,减轻膜质过氧化程度,提高抗氧化酶的活性^[52]。另有研究表明,盐胁迫下甜瓜幼苗质膜相对透性和MDA含量增加,SOD和POD酶活性提高,叶面喷施甜菜碱可有效降低质膜相对透性和MDA含量,使SOD和POD酶

活性持续提高^[35]。本试验结果表明,NaCl胁迫下甜瓜幼苗体内的MDA含量和质膜相对透性均增加,根施甜菜碱预处理能有效降低MDA含量,降低其细胞膜质过氧化程度,缓解细胞膜受到的伤害,这与前人研究^[35,52]基本一致。但甜瓜幼苗叶片中SOD、POD和CAT酶活性在NaCl胁迫下显著提高,根施不同浓度甜菜碱预处理下其SOD、CAT和POD酶活性与NaCl胁迫相比均有不同幅度的降低,这与前人研究有所差异^[52]。本试验结果说明甜瓜幼苗在受到NaCl胁迫时,可能会因自身的应激机制使抗氧化酶活性显著升高,虽然用甜菜碱进行预处理会使甜瓜幼苗的抗氧化酶活性降低,但会通过增加渗透调节物质的含量,以此达到对NaCl胁迫的缓解。

4 结 论

NaCl胁迫通过对甜瓜幼苗的根系活力、光合作用、渗透调节物质和抗氧化酶活性等多方面的影响,抑制甜瓜幼苗的正常生长发育。而一定浓度甜菜碱预处理能缓解NaCl胁迫对甜瓜幼苗根系活力的伤害,同时减少MDA含量,减轻膜质过氧化程度,增加叶片可溶性糖、脯氨酸以及光合色素含量,有效缓解NaCl胁迫带来的抑制作用。通过主成分分析及隶属函数值综合排序表明,5 mmol/L的甜菜碱预处理下的平均隶属值大于CK,10 mmol/L的甜菜碱预处理下的平均隶属函数值接近于CK,故在NaCl胁迫条件下,5~10 mmol/L的甜菜碱根施预处理缓解效果最佳。

参考文献 References

- [1] Hoque M N, Imran S, Hannan A, Paul N C, Mahamud M A, Chakroborty J, Sarker P, Irin I J, Brestic M, Rhaman M S. Organic amendments for mitigation of salinity stress in plants: A review[J]. *Life*, 2022, 12(10): 1632
- [2] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, Luo W, Xu G H, Schroeder J I. Plant salt-tolerance mechanisms[J]. *Trends in Plant Science*, 2014, 19(6): 371-379
- [3] Ruiz-Lozano J M, Porcel R, Azcón C, Aroca R. Regulation by arbuscular mycorrhizae of the integrated physiological response to salinity in plants: New challenges in physiological and molecular studies[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(11): 4033-4044
- [4] 魏征, 屠乃美, 易镇邪. 盐碱地对水稻的胁迫效应及其改良与高效利用的研究进展[J]. *湖南生态科学学报*, 2019, 6(4): 45-52
Wei Z, Tu N M, Yi Z X. Research progress on stress effect of saline-alkali soil on rice and its improvement and efficient utilization[J]. *Journal*

- of Hunan Ecological Science*, 2019, 6(4): 45-52 (in Chinese)
- [5] 周洪华, 李卫红. 胡杨木质部水分传导对盐胁迫的响应与适应[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 81-91
Zhou H H, Li W H. Responses and adaptation of xylem hydraulic conductivity to salt stress in *Populus euphratica* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(1): 81-91 (in Chinese)
- [6] 李正丽, 张丽, 文林宏, 张兆辉. 盐胁迫对两个基因型辣椒生理特性的影响[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(5): 1658-1663
Li Z L, Zhang L, Wen L H, Zhang Z H. Effects of salt stress on the physiological characteristics of two pepper genotypes [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(5): 1658-1663 (in Chinese)
- [7] Rahnama A, James R A, Poustini K, Munns R. Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil[J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(3): 255
- [8] Schachtman D P, Goodger J Q D. Chemical root to shoot signaling under drought[J]. *Trends in Plant Science*, 2008, 13(6): 281-287
- [9] 朱新广, 张其德. NaCl对光合作用影响的研究进展[J]. *植物学通报*, 1999, 34(4): 332-338
Zhu X G, Zhang Q D. Advances in the research on the effects of NaCl on photosynthesis [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 34(4): 332-338 (in Chinese)
- [10] 苏东凯, 周永斌, 唐庆华, 曹立科, 周大鹏, 张洪伟, 金福宇. 不同杨树品种光合生理生态特性的研究[J]. *西北林学院学报*, 2006, 21(2): 39-41
Su D K, Zhou Y B, Tang Q H, Cao L K, Zhou D P, Zhang H W, Jin F Y. Ecophysiological characteristics of photosynthesis in different poplar trees[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(2): 39-41 (in Chinese)
- [11] Khalid A, Athar H, Zafar Z, Akram A, Hussain K, Manzoor H, Al-Quraifi F, Ashraf M. Photosynthetic capacity of canola (*Brassica napus* L.) plants as affected by glycinebetaine under the salt stress[J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2015, 88: 78-86
- [12] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651-681
- [13] 张晓艳. 盐碱胁迫下甜瓜的生理响应及间作甜瓜生长动态研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021
Zhang X Y. Physiological response of melon and growth dynamics of intercropping melon under saline-alkali stress [D]. Ala'er: Tarim University, 2021 (in Chinese)
- [14] 张晓艳, 李燕芳, 黄鑫, 杨建, 万素梅. 盐碱胁迫对不同甜瓜品种种子萌发及植株生长发育的影响[J]. *北方园艺*, 2021(10): 47-52
Zhang X Y, Li Y F, Huang X, Yang J, Wan S M. Effects of saline-alkali stress on seed germination and plant growth of different melon varieties [J]. *Northern Horticulture*, 2021(10): 47-52 (in Chinese)
- [15] 张芙蓉. 盐渍化对甜瓜生长的影响及甜瓜耐盐相关基因 *CmRAVI* 的初步研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015
Zhang F R. Effects of salinization on the growth of melon and preliminary study on the salt tolerance related gene *CmRAVI* of melon [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015 (in Chinese)
- [16] 张天鹏, 杨兴洪. 甜菜碱提高植物抗逆性及促进生长发育研究进展[J]. *植物生理学报*, 2017, 53(11): 1955-1962
Zhang T P, Yang X H. Research on the mechanism of glycinebetaine regulating plants stress resistance and development [J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(11): 1955-1962 (in Chinese)
- [17] Chen T H H, Murata N. Glycinebetaine protects plants against abiotic stress: Mechanisms and biotechnological applications [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2011, 34(1): 1-20

- [18] Mansour M M F, Ali E F. Glycinebetaine in saline conditions: An assessment of the current state of knowledge [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2017, 39(2): 56
- [19] Xu Z J, Sun M L, Jiang X F, Sun H P, Dang X M, Cong H Q, Qiao F. Glycinebetaine biosynthesis in response to osmotic stress depends on jasmonate signaling in watermelon suspension cells[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1469
- [20] Giri J. Glycinebetaine and abiotic stress tolerance in plants [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2011, 6(11): 1746-1751
- [21] Ashraf M, Foolad M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2): 206-216
- [22] Shehzadi A, Akram N A, Ali A, Ashraf M. Exogenously applied glycinebetaine induced alteration in some key physio-biochemical attributes and plant anatomical features in water stressed oat (*Avena sativa* L.) plants[J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(2): 292-305
- [23] Annunziata M G, Ciarmiello L F, Woodrow P, Dell'Aversana E, Carillo P. Spatial and temporal profile of *Glycine* betaine accumulation in plants under abiotic stresses[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 230
- [24] Raza S H, Athar H R, Ashraf M, Hameed A. Glycinebetaine-induced modulation of antioxidant enzymes activities and ion accumulation in two wheat cultivars differing in salt tolerance [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60(3): 368-376
- [25] Salama K H A, Mansour M M F, Al-Malawi H A. Glycinebetaine priming improves salt tolerance of wheat[J]. *Biologia*, 2015, 70(10): 1334-1339
- [26] Shahbaz M, Zia B. Does exogenous application of glycinebetaine through rooting medium alter rice (*Oryza sativa* L.) mineral nutrient status under saline conditions [J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2012, 84(1): 54-60
- [27] Elhakem A. Mitigation of the salinity influences on maize (*Zea mays* L.) productivity by exogenous applications of *Glycine* betaine[J]. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 2019, 15(3): 21-28
- [28] Khalid A, Athar H, Zafar Z, Akram A, Hussain K, Manzoor H, Al-Qurainy F, Ashraf M. Photosynthetic capacity of canola (*Brassica napus* L.) plants as affected by glycinebetaine under the salt stress[J]. *Journal of Applied Botany & Food Quality*, 2015, 88(1): 78-86
- [29] Meek C, Oosterhuis D, Gorham J. Does foliar-applied *Glycine* betaine affect endogenous betaine levels and yield in cotton? [J]. *Crop Management*, 2003, 2(1): 1-10
- [30] Heuer B. Influence of exogenous application of proline and glycinebetaine on growth of salt-stressed tomato plants [J]. *Plant Science*, 2003, 165(4): 693-699
- [31] 刘丽苹, 汪军成, 司二静, 姚立蓉, 鲁宗辉, 祁天涛, 马小乐, 王化俊, 李葆春, 赵池铭, 尚勋武, 孟亚雄. 外源甜菜碱和脯氨酸对盐胁迫下大麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(6): 766-774
- Liu L P, Wang J C, Si E J, Yao L R, Lu Z H, Qi T T, Ma X L, Wang H J, Li B C, Zhao C M, Shang X W, Meng Y X. Effect of exogenous betaine and proline on seed germination and seedling growth of barley under salt stress[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(6): 766-774 (in Chinese)
- [32] 刘文露, 钱婧雅, 徐志明, 潘素君, 王悦. 温度和甜菜碱对水稻种子萌发的影响[J/OL]. 分子植物育种, 2023: 1-8
- Liu W L, Qian J Y, Xu Z M, Pan S J, Wang Y. Effects of temperature and betaine on rice seed germination[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2023: 1-8 (in Chinese)
- [33] 徐婷, 樊景胜, 赵佰仁, 连永利, 曲忠诚, 李青超. 外源甜菜碱对盐胁迫下薄皮甜瓜生长及产量和品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2016(2): 84-86
- Xu T, Fan J S, Zhao B R, Lian Y L, Qu Z C, Li Q C. Effect of *Glycine* betaine on growth, yield and quality of melon under salt stress [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016(2): 84-86 (in Chinese)
- [34] 陈静, 任佰朝, 赵斌, 刘鹏, 张吉旺. 叶面喷施甜菜碱对不同播期夏玉米产量形成及抗氧化能力的调控[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1502-1515
- Chen J, Ren B Z, Zhao B, Liu P, Zhang J W. Regulation of leaf-spraying glycine betaine on yield formation and antioxidation of summer maize sowed in different dates [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(6): 1502-1515 (in Chinese)
- [35] 徐婷. 不同浓度甜菜碱对盐胁迫下薄皮甜瓜幼苗抗氧化系统的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(14): 48-49, 53
- Xu T. Effect of different concentrations of betaine on antioxidant system of melon seedlings under salt stress [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(14): 48-49, 53 (in Chinese)
- [36] 孙晓华, 王晓博, 杜宪, 宋阳, 李晓静. 盐敏感甜瓜幼苗生长及生理特性对盐胁迫的响应[J]. 北方园艺, 2019(24): 43-50
- Sun X H, Wang X B, Du X, Song Y, Li X J. Response on growth, photosynthetic performance in salt-sensitive melon seedling under salinity stress[J]. *Northern Horticulture*, 2019(24): 43-50 (in Chinese)
- [37] 张子健, 刘美岑, 张东, 白立华, 齐月, 刘艳. 盐胁迫对甜瓜幼苗根系生长及膜脂过氧化的影响[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2022, 43(2): 11-16, 101
- Zhang Z J, Liu M C, Zhang D, Bai L H, Qi Y, Liu Y. Effects of salt stress on root growth and membrane lipid peroxidation of muskmelon seedlings [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2022, 43(2): 11-16, 101 (in Chinese)
- [38] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2009
- Zhang Z L, Qu W J, Li X F. *Experimental Instruction of Plant Physiology* [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009 (in Chinese)
- [39] 孙旭生, 林琪, 赵长星, 翟延举, 吴钢, Cheruth Abdul Jaleel. 施氮量对超高产冬小麦灌浆期旗叶光响应曲线的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1428-1437
- Sun X S, Lin Q, Zhao C X, Zhai Y J, Wu G, Jaleel C. Effects of nitrogen application rate on light-response curves of flag leaves in super-high yielding winter wheat at grain filling stage [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1428-1437 (in Chinese)
- [40] 刘莉. 盐胁迫下植物激素对水稻种子萌发及幼苗根系生长的调控机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018
- Liu L. Study on the regulation mechanism of plant hormones on rice seed germination and seedling root growth under salt stress [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [41] 毛爽, 周万里, 杨帆, 狄小琳, 蔺吉祥, 杨青杰. 植物根系应答盐碱胁迫机理研究进展[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(10): 1991-2000
- Mao S, Zhou W L, Yang F, Di X L, Lin J X, Yang Q J. Research progress on mechanism of plant roots response to salt-alkali stress [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(10): 1991-2000 (in Chinese)
- [42] 杨晓云, 宋涛, 刘辉, 王红. 外源甜菜碱对NaCl胁迫下玉米幼苗生长和叶绿素含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(5): 830-833, 875
- Yang X Y, Song T, Liu H, Wang H. Effects of exogenous *Glycine* betaine on the growth and chlorophyll content of maize seedlings under NaCl stress[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(5): 830-833, 875 (in Chinese)

- [43] 王玮, 吴传万, 王欣, 赵建锋, 汪国莲, 孙玉东. 外源脯氨酸对盐胁迫下萝卜幼苗生长、抗氧化酶活性及渗透调节物质积累的影响[J]. 江西农业学报, 2019, 31(3): 51-56
Wang W, Wu C W, Wang X, Zhao J F, Wang G L, Sun Y D. Effects of exogenous proline on growth, antioxidant enzyme activity and osmotic adjustment substance accumulation in radish seedlings under salt stress [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2019, 31(3): 51-56 (in Chinese)
- [44] 於丽华. NaCl胁迫下甜菜的生理响应及其耐盐机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015
Yu L H. Physiological response and salt tolerance mechanism of sugarbeet under NaCl stress [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [45] 华智锐. 外源甜菜碱对盐胁迫下千屈菜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2022, 50(9): 119-126
Hua Z R. Effects of exogenous glycine betaine on *Lythrum salicaria* seed germination and seedling growth under salt stress [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2022, 50(9): 119-126 (in Chinese)
- [46] 范春丽, 曲金柱. 甜菜碱浸种对盐胁迫下石榴种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 中国果树, 2015(6): 51-54
Fan C L, Qu J Z. Effects of seed soaking with betaine on seed germination and physiological characteristics of pomegranate seedlings under salt stress [J]. *China Fruits*, 2015(6): 51-54 (in Chinese)
- [47] 黄永健, 蔡冠龙, 潘东阳, 黄真池. 盐胁迫对桉树4个叶绿体基因表达的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(10): 12-15
Huang Y J, Cai G L, Pan D Y, Huang Z C. Effects of salt stress on expression of four chloroplast genes in eucalyptus [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(10): 12-15 (in Chinese)
- [48] 刘玉丰, 闫征南, 万泽, 姜童, 杨延杰. 盐碱胁迫下黄腐酸对甜瓜幼苗生长抑制的缓解效应[J]. 北方园艺, 2021(24): 45-50
Liu Y F, Yan Z N, Wan Z, Jiang T, Yang Y J. Alleviation effects of muskmelon seedling by fulvic acid under saline alkali stress [J]. *Northern Horticulture*, 2021(24): 45-50 (in Chinese)
- [49] 甘丽萍, 叶云霄, 向丽霞, 曾晓琳, 陈敏. 光照强度对花叶冷水花色素含量和过氧化氢酶活性的影响[J]. 南方农业学报, 2012, 43(11): 1655-1659
Gan L P, Ye Y X, Xiang L X, Zeng X L, Chen M. Effects of different light intensity on pigments and catalase (CAT) of *Pilea cadieri* Gagnep [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(11): 1655-1659 (in Chinese)
- [50] 李帆, 莫朝牧, 李晓衡, 田秀平. 甜菜碱对盐胁迫下糯玉米幼苗光合特性的影响[J]. 天津农林科技, 2021(6): 9-11
Li F, Mo Z M, Li X H, Tian X P. Effects of betaine on photosynthetic characteristics of waxy corn seedlings under salt stress [J]. *Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry*, 2021(6): 9-11 (in Chinese)
- [51] 段文静, 孟妍君, 江丹, 刘连涛, 张科, 张永江, 孙红春, 白志英, 李存东. 外源褪黑素对盐胁迫下棉花幼苗形态及抗氧化系统的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(1): 92-104
Duan W J, Meng Y J, Jiang D, Liu L T, Zhang K, Zhang Y J, Sun H C, Bai Z Y, Li C D. Effects of exogenous melatonin on the morphology and antioxidant enzyme activities of cotton seedlings under salt stress [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(1): 92-104 (in Chinese)
- [52] 朱营营, 张倩, 董元杰. 外源NO缓解花生盐胁迫的效果及机理[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(12): 30-39
Zhu Y Y, Zhang Q, Dong Y J. Effects of exogenous nitric oxide on the physiological characteristics of peanut seedlings under salt stress [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(12): 30-39 (in Chinese)

责任编辑:董金波



第一作者简介: 蒋艳, 硕士研究生, 四川眉山人。本科毕业于西南林业大学, 现就读于新疆农业大学园艺学院农艺与种业专业。就读期间荣获新疆农业大学2021—2022学年学校奖学金。在校期间在完成自身课程之外也参加学院及学校组织的各类学术讲座, 扩充自己的知识面, 曾参与黑果腺肋花楸抗旱性以及不同品种梨的抗寒性等相关生理指标的测定试验, 较为熟悉各生理指标的测定方法。平时喜欢阅读各类文章, 以期提升自己阅读速度及快速提炼重点的能力。



通讯作者简介: 艾力江·麦麦提, 博士, 新疆农业大学生命科学学院, 研究生导师。博士毕业于日本鸟取大学, 2015年参加工作, 2016年被入选“自治区高层次人才引进工程”和“百名青年博士引进计划”。主要研究领域是干旱区荒漠植物逆境生理生态。研究方向是根据新疆的实际情况把荒漠化及盐渍化防治作为研究目标, 进行植物与逆境环境相互关系, 通过研究植物水分生理、光合生理、营养生理和逆境生理等, 揭示植物响应逆境的生理生态和分子机制、盐碱地和荒漠化土地的生物改良和治理、提高植物抗逆性等研究工作。先后主持和参加各级项目8项; 发表学术论文28篇, 其中SCI收录4篇; 拥有软件著作权3个。