

外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗的缓解效应

蔡教聪¹, 杨宇^{2*}, 沈思涵¹, 贯雨晴¹, 刘锋², 郑中兵^{3**}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 湛江中粤能源有限公司, 广东湛江 524099; 3. 海南大学海洋科学与工程学院/海南大学南繁学院(三亚南繁研究院), 海南海口 570228

摘要: 为探究外源 5-ALA 对盐碱条件下甜瓜幼苗生长的缓解效果, 本研究以甜瓜品种众宝 1 号为试材, 在盆栽基质条件下, 研究 150 mmol/L 混合盐碱胁迫下根施 5 种不同质量浓度 (25、50、100、150、200 mg/L) 5-ALA 对甜瓜幼苗生长变化、光合色素、活性氧 (ROS) 积累、渗透调节及抗氧化系统的影响。结果表明: 在盐碱胁迫下, 适宜浓度 (100、150 mg/L) 的外源 5-ALA 显著提高甜瓜幼苗的株高、茎粗、叶长、叶宽及叶面积; 外源 5-ALA 提高其光合色素含量和可溶性糖含量, 脯氨酸含量有所降低但较 CK 仍上升, MDA 含量和 O_2^- 产生速率均显著下降; SOD、CAT、APX 和 GR 活性及 GSH 含量均提高, 而 POD 活性降低, 但较 CK 仍显著上升。此外, 对不同外源 5-ALA 处理所测定的指标进行 TOPSIS 综合评价分析, 结果表明排名第 1 的是 SA₁₅₀ 处理。因此, 外源 5-ALA 浓度为 150 mg/L 时对甜瓜幼苗盐碱胁迫后的缓解效果最佳, 可为抗盐碱栽培提供理论依据。

关键词: 5-ALA; 盐碱胁迫; 甜瓜; 生理调控

中图分类号: S652 文献标志码: A

Alleviating Effect of Exogenous 5-ALA on Melon Seedlings under Saline-alkali Stress

CAI Jiaocong¹, YANG Yu^{2*}, SHEN Sihan¹, GUAN Yuqing¹, LIU Feng², ZHENG Zhongbing^{3**}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Zhanjiang Zhongyue Energy Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524099, China; 3. Marine Science and Engineering College, Hainan University / School of Breeding and Multiplication (Sanya Institute of Breeding and Multiplication), Hainan University Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: The present study investigated the ameliorative effects of 5-aminolevulinic acid (5-ALA) on muskmelon seedlings subjected to saline-alkali stress. Using the melon variety Zhongbao No.1 as the test material, under pot cultivation conditions, the study investigated the effects of root application of five different concentrations (25, 50, 100, 150, and 200 mg/L) of 5-ALA on the growth changes, photosynthetic pigments, reactive oxygen species (ROS) accumulation, osmotic adjustment, and antioxidant system of melon seedlings under 150 mg/L mixed salt-alkali stress. The results showed that under saline-alkali stress, exogenous 5-ALA at appropriate concentrations (100, 150 mg/L) significantly increased plant height, stem diameter, leaf length, leaf width, and leaf area of muskmelon seedlings. It also increased the contents of photosynthetic pigments and soluble sugars, proline content was reduced but still remained higher than that of CK, and significantly reducing both MDA content and O_2^- generation rate. Furthermore, the activity of antioxidant enzymes, specifically SOD, CAT, APX, and GR, along with GSH content, exhibited elevation. Although POD activity showed a decrease, it maintained significantly higher levels compared to the control treatment (CK). In addition, TOPSIS comprehensive evaluation analysis was conducted on different exogenous 5-ALA treatments based on all the above measurement indicators, and the results showed that SA₁₅₀ treatment ranked first. Therefore, exogenous 5-ALA at

收稿日期 2025-08-07; 接受日期 2025-08-16

基金项目 国家重点研发计划专项 (No. 2024YFD2401300); 海南大学横向项目 (No. HD-KYH-2022384, No. HD-KYH-2022216-2)。

作者简介 蔡教聪 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 作物栽培; *同等贡献作者: 杨宇 (1984—), 男, 学士, 工程师, 研究方向: 新能源产业与农业融合发展。*通信作者 (Corresponding author): 郑中兵 (ZHENG Zhongbing), E-mail: 990315@hainanu.edu.cn。

a concentration of 150 mg/L exhibits the optimal effect in alleviating saline-alkali stress in muskmelon seedlings, which would provide a theoretical foundation for the cultivation of crops under saline-alkali stress conditions.

Keywords: 5-ALA; saline-alkali stress; melon; physiological regulation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.11.012

甜瓜 (*Cucumis melon* L.) 作为葫芦科一年生蔓性草本植物中的典型代表, 以其清脆爽口、甘甜多汁的独特口感及其丰富的营养成分, 深受消费者欢迎。甜瓜是一种重要的园艺作物, 在我国的设施栽培上应用十分广泛。我国设施瓜生产起步于 20 世纪 80 年代, 种植面积从 20 世纪 90 年代的几万亩, 经过 30 多年的发展, 到现在已达 600 万亩左右^[1-2]。在设施甜瓜栽培生产过程中, 因设施栽培环境相对封闭, 几乎无雨水冲淋, 温湿度高, 且复种指数较高, 土壤更容易受到化肥过度使用和灌溉不足等多种因素的不良影响, 从而导致次生盐碱化发生^[3]。与中性盐胁迫不同, 盐碱胁迫不仅会导致植物失去水分、萎蔫、营养失衡和离子中毒, 还会引发高 pH 胁迫^[4], 从而对植物造成更大的伤害, 这不仅对甜瓜产量和品质形成较大的威胁, 甚至制约设施甜瓜产业可持续发展。因此, 减轻设施甜瓜盐碱胁迫, 提高甜瓜的耐盐碱性已成为甜瓜产业亟待解决的问题。

为了缓解盐碱胁迫, 添加外源物质被认为是增强植物在盐碱条件下耐受性和提高作物产量的一种简便、高效且经济的方法^[5]。5-氨基乙酰丙酸 (5-aminolevulinic acid, 5-ALA) 是一种天然存在的非蛋白氨基酸, 广泛存在于动植物及微生物的细胞生命活动中, 同时也是合成维生素 B12、叶绿素、血红素等四吡咯类化合物的关键前体物质^[6]。已有研究表明, 5-ALA 不仅在植物的光合、呼吸和蒸腾过程中起到关键作用, 还有助于植物的生长和发展。在逆境环境中, 5-ALA 被视为一种有潜力的植物生长调节剂, 可显著增强植物对非生物胁迫 (如干旱、盐碱、极端温度等) 的抗性^[7]。卢洁春等^[8]研究表明, 在盐碱胁迫下, 外源 ALA 处理能够保持叶绿素含量的稳定; 同时促进脯氨酸含量的升高, 为维持细胞内部渗透势的平衡提供保障; 此外还能增强大豆叶片中抗氧化酶的活力, 帮助消除细胞内过量的自由基, 降低膜结构受损程度, 从而提高大豆耐盐碱性。牛钰等^[9]研究表明, ALA 可显著促进植株生长并提升生物量积累, 同时提高光合色素含量和抗氧化酶活性, 并显著减轻盐胁迫对番茄幼苗生长的抑制

效应。ZHEN 等^[10]发现外源 ALA 的施用提高了黄瓜叶片的 APX、CAT、GR 的活性, 从而缓解 NaCl 引起的氧化损伤。LIU 等^[11]研究发现外源 ALA 能有效缓解低温胁迫对番茄造成的伤害, 降低细胞膜脂质过氧化程度和增强抗氧化酶系统活力, 并对番茄的生长起到促进作用。NUNKAEW 等^[12]研究发现 ALA 通过提高总叶绿素及 CAT、APX 等抗氧化酶活性来促进盐碱稻田的生长。

外源 5-ALA 在缓解植物逆境胁迫方面有着重要的作用, 但鲜见有关外源 5-ALA 缓解盐碱胁迫下甜瓜幼苗生长效应的公开报道。因此, 本研究以甜瓜幼苗为试验材料, 通过在 150 mmol/L 盐碱胁迫 ($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4:\text{NaHCO}_3:\text{Na}_2\text{CO}_3=9:1:1:9$, pH 10.8) 下根施外源 5-ALA, 从生长变化、光合色素、活性氧 (ROS) 积累、渗透调节及抗氧化系统等方面, 探究不同外源 5-ALA 浓度对盐碱胁迫下甜瓜幼苗生长的影响, 为进一步明确 5-ALA 对盐碱化条件下甜瓜幼苗生理调控效应及抗盐碱栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究采用的甜瓜品种为众宝一号, 由新疆宝丰种业科技有限公司提供; 5-ALA 由广西南宁汉和生物科技有限公司提供; 育苗基质购自山东天醇源生物科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于 2024 年 11 月至 2025 年 3 月在三亚市崖州区海南大学三亚南繁研究院 ($18^{\circ}32'\text{N}$, $109^{\circ}16'\text{E}$) 人工气候室内进行。采用单因素随机区组方法, 5-ALA 浓度分别设定为 25、50、100、150、200 mg/L, 盐碱胁迫条件为 150 mmol/L 混合盐碱溶液 ($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4:\text{NaHCO}_3:\text{Na}_2\text{CO}_3=9:1:1:9$, pH 10.8), 该浓度通过前期预实验筛选确定。试验挑选大小均匀、颗粒饱满的甜瓜种子, 经过温汤浸种催芽处理后, 挑选发芽状态一致的种子, 播种至 72 孔塑料穴盘内, 置于适宜环境下培养, 期间给予适当水肥等管理。当甜瓜幼苗生长至 2 叶 1 心期时, 将其移

栽至装有基质的育苗盆中，先对甜瓜幼苗进行盐碱胁迫处理，为避免盐激反应，以 50 mmol/L 作为每日递增浓度，达到设定浓度后，再同步开展外源物质浇灌与盐碱胁迫处理，每隔 2 d 处理 1 次，处理 7 d 后取样进行相关指标测定，3 次重复，每处理 30 株。试验共设 7 个处理：（1）CK，浇灌纯净水；（2）S，浇灌 150 mmol/L 混合盐碱溶液；（3）SA₂₅，浇灌 150 mmol/L 混合盐碱+25 mg/L 5-ALA 溶液；（4）SA₅₀，浇灌 150 mmol/L 混合盐碱+50 mg/L 5-ALA 溶液；（5）SA₁₀₀，浇灌 150 mmol/L 混合盐碱+100 mg/L 5-ALA 溶液；（6）SA₁₅₀，浇灌 150 mmol/L 混合盐碱+150 mg/L 5-ALA 溶液；（7）SA₂₀₀，浇灌 150 mmol/L 混合盐碱+200 mg/L 5-ALA 溶液。

1.2.2 指标测定 （1）生长表型指标的测定。处理结束后，各处理随机选取 10 株甜瓜植株测定指标。株高：使用直尺进行测量植株子叶节至生长点的高度。茎粗：使用数显游标卡尺测量植物子叶节下方 1 cm 位置测量其横纵向宽度后取平均值。用直尺测量第 2 片叶的长度、宽度，叶面积采用称重法^[13]进行测定。

（2）光合色素指标含量的测定。参照李合生^[14]的方法测定叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量。

（3）活性氧（ROS）指标的测定。参照曹建康等^[15]的方法测定丙二醛（MDA）含量及超氧阴离子（O²⁻）产生速率。

（4）渗透调节系统指标的测定。参照曹建康等^[15]的方法测定可溶性糖及脯氨酸含量。

（5）抗氧化系统指标的测定。参照曹建康等^[15]的方法测定过氧化氢酶（CAT）、超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、抗坏血酸过

氧化物酶（APX）和谷胱甘肽还原酶（GR）活性以及还原型谷胱甘肽（GSH）含量。

1.2.3 甜瓜幼苗缓解效应的综合评价 参照张鹏^[16]的评价方法，对外源 5-ALA 处理的盐碱胁迫下甜瓜幼苗的生长变化、光合色素、活性氧（ROS）积累、渗透调节及抗氧化系统等全部指标进行 TOPSIS 分析。

1.3 数据处理

使用 Excel 2019 软件进行数据整理及可视化分析，使用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析和邓肯多重比较检验（ $\alpha=0.05$ ）。

2 结果与分析

2.1 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗生长表型的影响

由表 1 可知，盐碱胁迫下，随着外源 5-ALA 浓度的升高，甜瓜幼苗的株高、茎粗、叶宽、叶长及叶面积均表现出先升后降的趋势，且在 SA₁₀₀ 处理下效果最为明显。相较于 CK，S 处理下的株高、茎粗、叶长、叶宽和叶面积分别显著降低 33.7%、11.7%、15.3%、12.8%和 26.3%。各外源 5-ALA 浓度处理下的株高、茎粗、叶宽、叶长和叶面积与 S 处理的差异均达到显著水平，其中除了茎粗在 SA₁₅₀ 处理下最为明显外，株高、叶宽、叶长及叶面积均在 SA₁₀₀ 处理下最为明显，且分别比 S 处理提高 56.4%、15.2%、17.1%和 34.8%。此外，除了 SA₂₀₀ 处理下的株高与 CK 处理有显著差异外，其余各外源 5-ALA 浓度处理下的株高、茎粗、叶长、叶宽和叶面积与 CK 相比均未达到差异显著。由此说明，外源 5-ALA 对盐碱胁迫抑制甜瓜幼苗生长的作用具有显著缓解效果，且在 SA₁₀₀ 处理下效果最为显著。

表 1 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗生长表型的影响
Tab. 1 Effects of exogenous 5-ALA on growth phenotypes of melon seedlings under saline-alkali stress

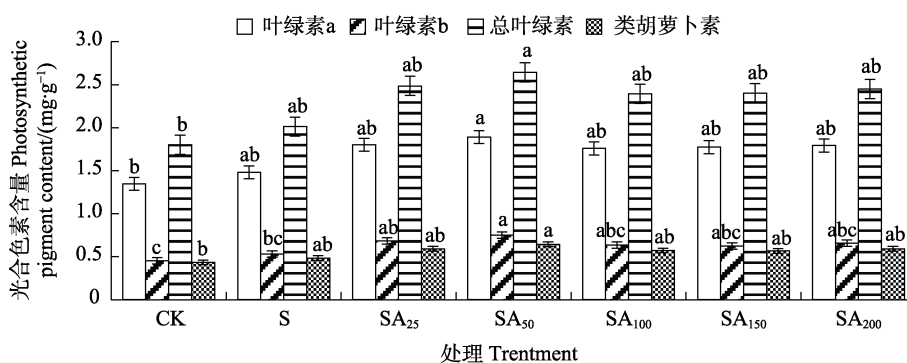
处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem size/mm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶面积 Leaf area/cm ²
CK	8.54±0.69 ^{ab}	4.09±0.18 ^a	6.28±0.58 ^a	8.31±0.77 ^a	48.78±9.22 ^a
S	5.66±0.98 ^d	3.61±0.16 ^b	5.32±0.64 ^b	7.25±0.87 ^b	35.96±7.36 ^b
SA ₂₅	8.19±1.40 ^{ab}	4.02±0.21 ^a	6.02±0.55 ^a	8.01±0.71 ^a	45.02±8.12 ^a
SA ₅₀	7.50±1.31 ^{bc}	4.01±0.21 ^a	6.07±0.54 ^a	8.12±0.74 ^a	46.04±7.96 ^a
SA ₁₀₀	8.85±0.69 ^a	4.02±0.14 ^a	6.23±0.53 ^a	8.35±0.60 ^a	48.47±7.08 ^a
SA ₁₅₀	7.98±1.71 ^{ab}	4.07±0.19 ^a	6.21±0.53 ^a	8.25±0.91 ^a	47.92±9.27 ^a
SA ₂₀₀	6.52±0.85 ^{cd}	3.90±0.24 ^a	6.04±0.44 ^a	8.00±0.77 ^a	45.11±7.54 ^a

注：不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

2.2 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗叶片光合色素含量的影响

如图 1 所示,在盐碱条件下,随着外源 5-ALA 浓度的逐步增加,叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素的含量均呈现出先升后降的动态变化趋势。而且与 CK 相比, S 处理的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量分别提高 10.0%、16.7%、11.7%和 11.5%,但均未达到显著差异。而相较于 CK 和 S, 各外源 5-ALA 浓度

处理下的 4 种色素含量均提高,且均在 SA₅₀ 处理时含量最大。此外,与 S 相比,经 SA₅₀ 处理后,叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量分别提高 27.7%、41.4%、31.3%和 33.3%,但除叶绿素 b 达到显著差异外,其余各色素均未达到显著差异。但相较于 CK, SA₅₀ 处理下的 4 种色素含量均显著提高。由此可知, 50 mg/L 的外源 5-ALA 处理下可有效提高盐碱胁迫下的色素含量,尤其对叶绿素 b 的影响更大。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 1 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量的影响
Fig.1 Effect of exogenous 5-ALA on chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoid content in melon seedlings under saline-alkali stress

2.3 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗叶片活性氧 (ROS) 积累的影响

如图 2A 所示,在盐碱胁迫下,随着外源 5-ALA 浓度的增加 MDA 含量整体呈下降的趋势,且在 SA₁₀₀ 处理下达到最低。与 CK 相比, S、SA₂₅ 和 SA₅₀ 处理下的 MDA 含量分别显著提高 20.5%、38.4%和 25.0%。与 S 相比, SA₁₀₀、SA₁₅₀ 和 SA₂₀₀ 处理下的 MDA 含量分别下降了 38.3%、20.9%和 31.7%,且均达到显著差异。另外, CK 与 SA₁₅₀、SA₂₀₀ 处理下 MDA 的含量差异不显著,而与 SA₁₀₀ 处理下的 MDA 含量差异显著。由图 2B 可知, O²-产生速率整体上随着外源 5-ALA 浓度的增加呈下降趋势,且在 SA₁₅₀ 处理下达到最低。S 处理下的 O²-产生速率相较于 CK 提高 21.9%;与 S 相比, SA₅₀、SA₁₀₀、SA₁₅₀ 和 SA₂₀₀ 处理下 O²-产生速率分别下降 13.2%、20.8%、36.0%和 18.9%,其中 SA₁₅₀ 处理达到显著差异。此外, SA₅₀、SA₁₀₀、SA₁₅₀ 和 SA₂₀₀ 处理相较于 CK 的 O²-产生速率无明显差异。可见,盐碱胁迫会加快甜瓜叶片的 MDA 含量的积累和 O²-产生速率,且在 100、150 mg/L

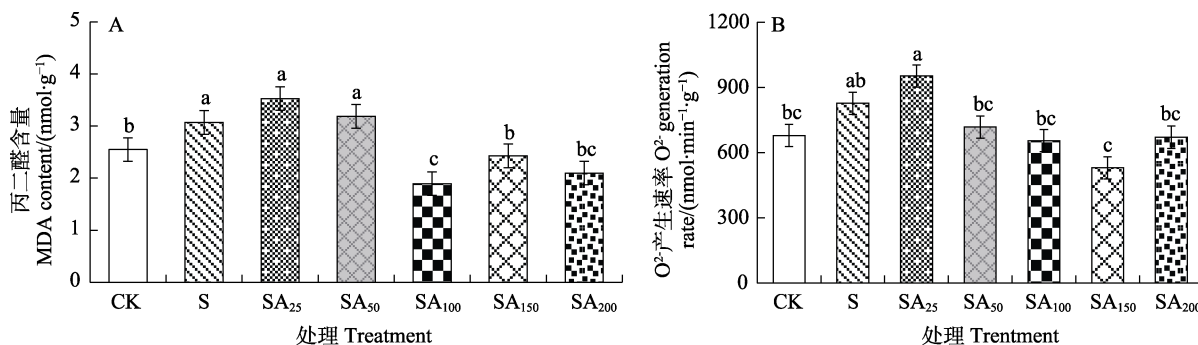
5-ALA 时对抑制 MDA 含量积累和降低 O²-产生速率的效果最佳。

2.4 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗渗透调节物质含量的影响

由图 3A 所示,随着外源 5-ALA 浓度的增加,脯氨酸含量呈现先升后降的趋势,且在 SA₁₅₀ 处理时达到最高。S 处理下的脯氨酸含量与 CK 相比上升 66.5%,但未达到显著水平。与 S 相比, SA₂₅、SA₅₀、SA₁₀₀、SA₁₅₀ 和 SA₂₀₀ 处理下的脯氨酸含量分别降低 28.4%、39.1%、25.6%、23.6%和 61.5%,其中除 SA₂₀₀ 处理达到显著水平外,其余各处理均未达到显著水平。此外, SA₂₅、SA₅₀、SA₁₀₀、SA₁₅₀ 和 SA₂₀₀ 处理下的脯氨酸含量相较于 CK 均未达到显著水平。如图 3B 所示,在盐碱胁迫下,外源 5-ALA 浓度逐渐增加的过程中,可溶性糖含量整体上呈先升后降的趋势,且在 SA₁₀₀ 处理条件下达到峰值。此外,在 S 处理条件下,可溶性糖含量较 CK 显著提升 23.6%;且相较于 S, SA₂₅、SA₅₀、SA₁₀₀、SA₁₅₀ 和 SA₂₀₀ 处理下可溶性糖含量分别显著提升 35.8%、39.1%、61.3%、46.6%

和 44.5%，其中 SA₁₀₀ 提升最为显著。由此可知，外源 5-ALA 可提高盐碱胁迫下甜瓜幼苗可溶性糖

含量，降低其脯氨酸含量，且分别在 SA₁₅₀ 和 SA₁₀₀ 处理时效果最佳。

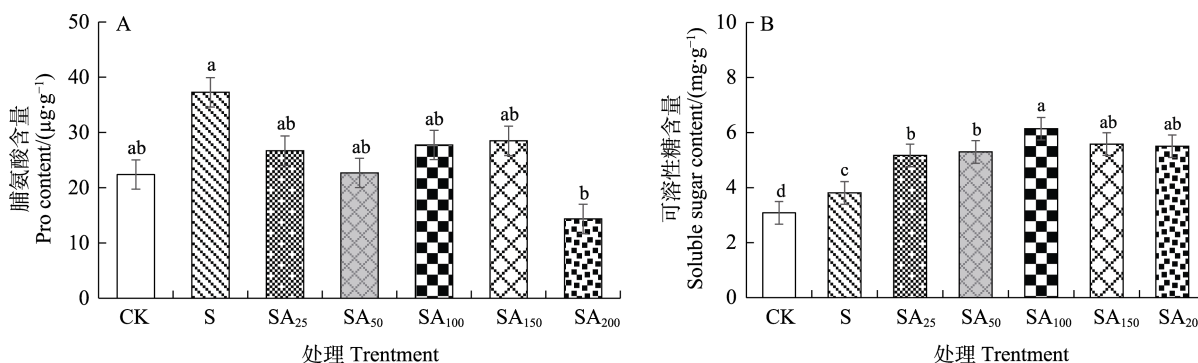


不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 2 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗叶片活性氧 (ROS) 的影响

Fig. 2 Effect of exogenous 5-ALA on reactive oxygen species (ROS) in melon seedlings under saline-alkali stress



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 3 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗渗透调节物质含量的影响

Fig. 3 Effect of exogenous 5-ALA on the content of osmotic regulatory substances in melon seedlings under saline-alkali stress

2.5 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗抗氧化系统的影响

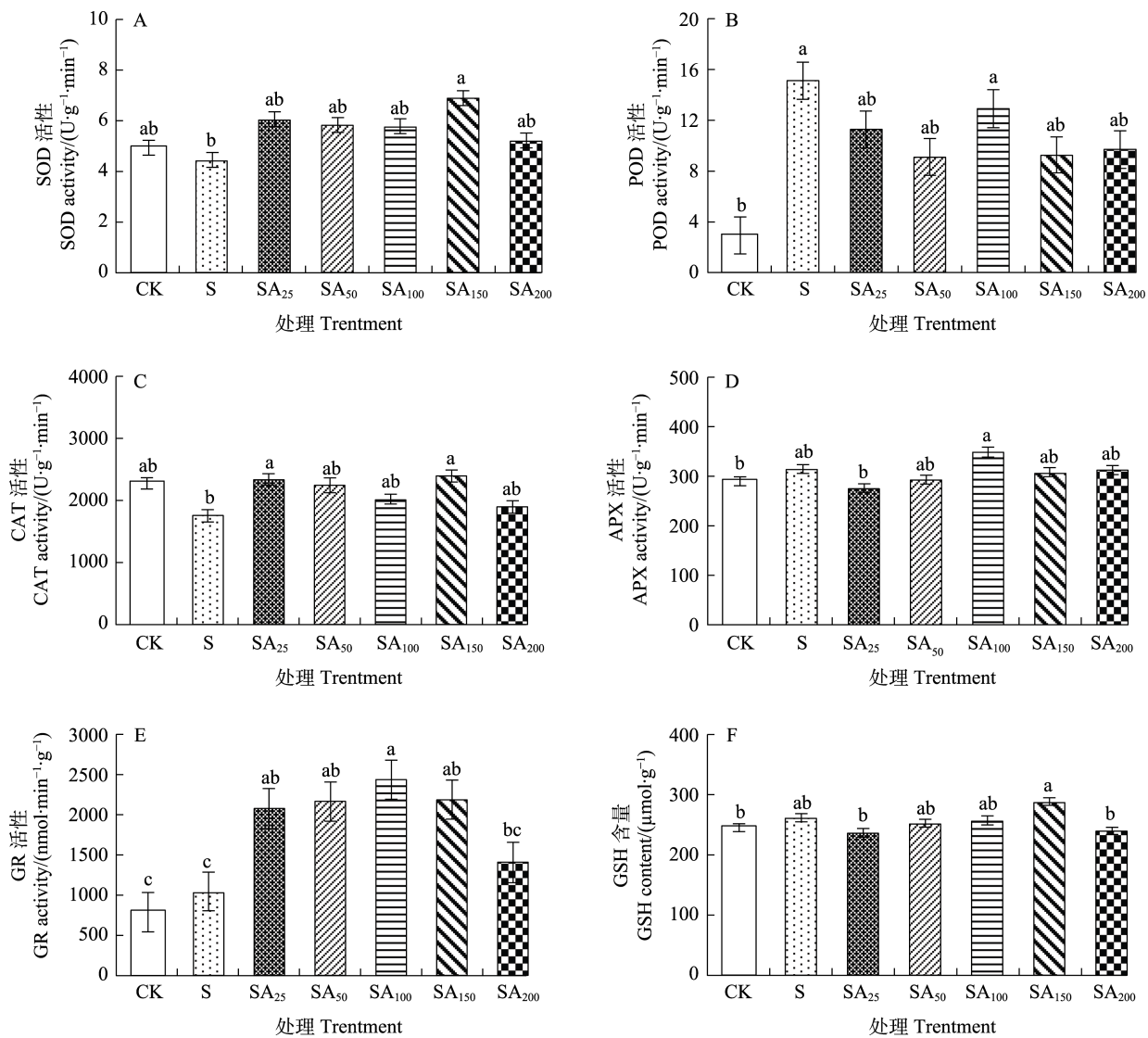
如图 4 所示，各抗氧化系统指标随着外源 5-ALA 浓度的增加均呈先升后降的趋势，且均在 SA₁₀₀ 或 SA₁₅₀ 处理下达到最高。与 CK 相比，S 处理下的 POD、APX 和 GR 活性分别提高 423.7%、8.8% 和 32.6%，其中 POD 活性达到显著差异，而 SOD 和 CAT 活性分别降低 10.0% 和 22.8%，但均未达到显著水平；此外，S 处理下的 GSH 含量较 CK 提高 6.8%，差异不显著。在各外源 5-ALA 浓度处理下，POD、APX 和 GR 活性在 SA₁₀₀ 时达到最大，且与 CK 相比分别显著提高 346.9%、20.7% 和 214.1%；而 APX 和 GR 活性较 S 处理分别提高 11.0% 和 136.8%，其中 APX 活性与 S 处理的差异达到显著水平，POD 活性较 S 处理却降低 14.6%；此外，SOD、CAT 活性以及 GSH 含量

在 SA₁₅₀ 处理下达到最大且较 CK 分别提高 40.6%、5.2% 和 17.7%，其中 GSH 含量差异显著。而与 S 处理相比，SA₁₅₀ 处理下的 SOD 和 CAT 活性分别显著提高 56.2% 和 36.2%，GSH 含量较 S 处理提高 10.1%，但未达到显著水平。由此说明，盐碱条件下 POD、APX、GR 活性和 GSH 含量会升高，但 SOD、CAT 活性会降低，而在外源 5-ALA 处理下这些抗氧化酶活性和 GSH 含量会进一步升高，尤其在 SA₁₀₀ 或 SA₁₅₀ 处理的效果更为明显；而外源 5-ALA 处理下 POD 活性则会降低，但相较于 CK 仍明显提高。

2.6 不同外源 5-ALA 处理对盐碱胁迫下甜瓜幼苗缓解效应的综合评价

根据各处理相对接近度 C_i 的排序结果可知，在盐碱胁迫下，不同外源 5-ALA 处理对甜瓜幼苗缓解效应的综合表现为：SA₁₅₀ > SA₁₀₀ > SA₅₀ >

SA₂₅>SA₂₀₀>CK>S (表 2)。由此可见,施用外源 50~150 mg/L 的 5-ALA 可有效缓解甜瓜幼苗的盐碱胁迫损伤,其中以 150 mg/L 处理组的缓解效果最佳。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 4 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗抗氧化系统指标的影响

Fig. 4 Effects of exogenous 5-ALA on antioxidant system indicators in melon seedlings under saline-alkali stress

表 2 不同外源 5-ALA 处理对盐碱胁迫下甜瓜幼苗缓解效应的综合评价

Tab. 2 Comprehensive evaluation of remission effects of different exogenous 5-ALA treatments on melon seedlings under saline-alkali stress

处理 Treatment	正理想解距离 D^+ Ideal solution distance D^+	负理想解距离 D^- Negative ideal solution distance D^-	相对接近度 C_i Relative proximity C_i	排序结果 Sorting results
CK	1.911	1.313	0.407	6
S	1.937	1.118	0.366	7
SA ₂₅	1.521	1.595	0.512	4
SA ₅₀	1.197	1.733	0.591	3
SA ₁₀₀	0.844	2.017	0.705	2
SA ₁₅₀	0.748	2.063	0.734	1
SA ₂₀₀	1.459	1.469	0.502	5

3 讨论

3.1 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗生长表型的影响

当植物面临逆境胁迫时, 幼苗生长状态会发生显著改变, 这些形态学上的变化既反映了环境胁迫的作用强度, 也为评估外源物质的缓解效应提供了直观依据。株高、茎粗、叶长、叶宽及叶面积均为可直观体现植物生长状况的重要指标。相关研究已证明, 一定浓度的盐碱胁迫会显著降低高羊茅的株高和叶宽^[17], 葡萄幼苗茎粗的相对生长量显著降低^[18], 黄瓜幼苗的叶面积减小^[19]。此外, 前人研究发现, 在盐胁迫条件下, 对玉米幼苗外施不同浓度的 5-ALA 后, 其株高和单株叶面积均随 5-ALA 浓度的增加呈先升后降的变化趋势^[20]。而本研究结果表明, 在盐碱条件下, 甜瓜幼苗的株高、茎粗、叶长、叶宽及叶面积的生长均受到明显抑制, 而外源 5-ALA 处理后能有效缓解其生长受到的阻碍, 且在 100、150 mg/L ALA 效果较为明显, 这与上述的研究结果一致。

3.2 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗叶片光合色素的影响

光合色素通过捕获光能驱动原初光反应, 其能量吸收与传递效率直接影响 PS II 反应中心的光能转化, 是评估植物光合能力及抗逆性的重要指标^[21]。而叶绿素作为绿色植物进行光合作用的主要光合色素, 其含量直接关系到光合作用的进程。在本研究中, 盐碱胁迫下, 叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素以及类胡萝卜素的含量均高于对照, 这与王素平等^[22]在盐碱胁迫黄瓜研究中的发现一致; 而施加外源 5-ALA 后, 在 SA₅₀ 处理下其 4 种光合色素含量显著提升, 这与姚侠妹等^[23]在栀子花上的研究结果基本一致。这可能是由于外源 5-ALA 对遭受盐碱胁迫的叶绿体具有保护功能, 一方面通过提高叶绿素合成相关酶的活性以促进叶绿素合成, 同时减缓叶绿素的降解速率; 另一方面, 该物质还能通过活化诱导酶的活性, 进而提升光合效率。

3.3 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗渗透调节物质的影响

作为渗透调节的关键物质, 可溶性糖和游离脯氨酸既能调控离子浓度和渗透压, 又能清除活性氧及其衍生物, 以此维持植物细胞的渗透稳态, 从而在逆境条件下对植物起保护作用^[24]。本研究

中, 甜瓜幼苗在盐碱胁迫下可溶性糖量和脯氨酸含量升高, 当用不同浓度的外源 5-ALA 处理后, 可溶性糖量含量进一步提高以保护盐碱胁迫对甜瓜幼苗造成的伤害, 而脯氨酸含量则降低并维持在正常水平。杨莎等^[25]研究表明在盐胁迫条件下, 花生叶片中会大量积累脯氨酸, 而外源施加 5-ALA 能够有效抑制这一积累过程, 并将其含量稳定在较低水平; 张嘉祥等^[26]研究表明, 盐胁迫显著诱导玉米叶片可溶性糖的积累, 且在 25 mg/L 5-ALA 处理后达到最高值的研究结果基本一致。这是由于在逆境条件下, 细胞内可溶性糖会主动积累, 通过降低渗透势促进细胞吸水; 施加适宜浓度 (100 mg/L) 的外源 5-ALA 后, 可溶性糖含量进一步增加, 细胞的吸水能力随之持续增强, 从而缓解细胞内的渗透胁迫, 同时脯氨酸积累量随之减少, 进而提升植物的耐盐碱性。

3.4 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗叶片活性氧 (ROS) 积累的影响

在逆境胁迫条件下, 植物体内会大量积累活性氧 (ROS), 引发膜脂肪酸中不饱和键的过氧化反应, 进而形成 MDA^[27]。通常情况下, MDA 的积累量可反映植物细胞的受损程度, 同时也可作为评估植物抵抗逆境能力的重要指标。张嘉祥等^[26]研究表明, 外源 ALA 有助于缓解盐胁迫对玉米幼苗细胞膜的损伤并抑制丙二醛积累; 此外, 外源 ALA 对盐胁迫下高粱植株 MDA 的积累具有明显的抑制作用^[28]。本研究中, 在盐碱胁迫下, 甜瓜幼苗叶片内会出现活性氧大量积累的现象, 即 O²⁻产生速率和 MDA 含量均显著升高, 从而加剧膜脂过氧化程度; 而适宜浓度 (100、150 mg/L) 外源 5-ALA 处理后显著降低 MDA 含量和 O²⁻产生速率, 有效缓解 ROS 引起的氧化胁迫, 从而能够保护细胞膜结构, 这与上述结果基本一致。

3.5 外源 5-ALA 对盐碱胁迫下甜瓜幼苗抗氧化物质的影响

植物在盐碱条件下, 会刺激体内活性氧自由基 (ROS) 的积累, 进而对细胞膜的组织构造和生理机能造成损害, 为缓解此类不利影响, 植物会借助酶促与非酶促防御系统来清除 ROS, 以此保护质膜免受氧化损伤, 增强其耐盐碱性^[25]。酶促系统主要包括 SOD、POD、CAT 以及 APX 和 GR 等相关酶; 非酶促系统主要包括 GSH 和 AsA 等抗氧化物质^[29]。杨莎等^[25]研究表明, 盐胁迫显

著抑制花生叶片 SOD 和 CAT 活性, 而外源 ALA 处理可明显缓解这一活性抑制现象; 聂文婧等^[30]研究表明, 黄瓜幼苗的抗氧化系统在盐碱胁迫初期被激活, 其体内的 POD、APX 和 GR 等抗氧化酶活性及 GSH 含量得到提高; 曹碧珍^[31]研究表明, 外源 ALA 处理显著提高了枇杷叶片 GSH 含量, 并激活了 GR 和 APX 的酶活性; 陈罡等^[27]研究发现, 对于 NaCl 胁迫下的西瓜幼苗, ALA 处理可显著提高其叶片中 SOD、CAT 及 POD 的活性。在本研究中, 盐碱胁迫下 SOD 和 CAT 活性降低, 而 POD、APX 和 GR 活性增强及 GSH 含量上升; 在适宜浓度 (100、150 mg/L) 外源 5-ALA 处理下, 可显著提高盐碱胁迫下甜瓜叶片中 SOD、CAT 和 GR 活性, 此外 APX 活性和 GSH 含量也有一定程度的升高, 而降低了 POD 活性但较 CK 而言仍显著增强, 这与上述研究结果基本一致。

综上所述, 在 150 mmol/L 混合盐碱胁迫下, 施加适宜浓度 (100、150 mg/L) 的外源 5-ALA 后, 甜瓜幼苗的株高、茎粗、叶长、叶宽及叶面积显著上升, 光合色素和可溶性糖含量显著升高, 脯氨酸含量降低但较 CK 仍上升, MDA 含量和 $O_2^{\cdot -}$ 产生速率显著降低, SOD、CAT、APX 和 GR 活性及 GSH 含量均增强, 而 POD 活性降低但较 CK 仍显著上升。此外, 对不同外源 5-ALA 处理所测定指标进行 TOPSIS 综合评价分析, 排序结果表明 SA₁₅₀ 处理 (150 mg/L) 是外源 5-ALA 缓解甜瓜幼苗盐碱胁迫的最优浓度。

参考文献

- [1] 孟凡欣, 石礼俊. 设施甜瓜提质增效关键技术[J]. 农业工程技术, 2024, 44(9): 80-81.
MENG F X, SHI L J. Key technologies for improving the quality and efficiency of greenhouse melons[J]. Agricultural Engineering Technology, 2024, 44(9): 80-81. (in Chinese)
- [2] 刘文革, 徐小利, 潘秀清, 张其安, 王军, 贺洪军, 孙建磊, 程志强, 张心宁, 周鹤飞. 黄河故道地区西瓜甜瓜产业分析和建议[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(8): 1-11.
LIU W G, XU X L, PAN X Q, ZHANG Q A, WANG J, HE H J, SUN J L, CHENG Z Q, ZHANG X N, ZHOU H F. Analysis and suggestions on watermelon and melon industry in the old course of the Yellow River[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2022, 35(8): 1-11. (in Chinese)
- [3] 曾成城, 秦芳, 李琴, 李方圆, 陈锦平, 苏天明, 何铁光, 苏利荣. 外源施硅和水杨酸对盐胁迫下甜瓜幼苗生理特性的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(5): 125-131.
ZENG C C, QIN F, LI Q, LI F Y, CHEN J P, SU T M, HE T G, SU L R. Effects of exogenous silicon and salicylic acid on physiological characteristics of melon seedlings under salt stress[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2025, 38(5): 125-131. (in Chinese)
- [4] YANY C W, CHONG J N, LI C Y, CHANGMIN K, SHI D C, WANG D L. Osmotic adjustment and ion balance traits of an alkali resistant halophyte *Kochia sieversiana* during adaptation to salt and alkali conditions[J]. Plant and Soil, 2007, 294(1/2): 263-276.
- [5] JIN X Q, LIU T, XU J J, GAO Z X, HU X H. Exogenous gaba enhances muskmelon tolerance to salinity-inity stress by regulating redox balance and chlorophyll biosynthesis[J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1): 48.
- [6] KANG Z, ZHANG J L, ZHOU J W, QI Q S, DU G C, CHEN J. Recent advances in microbial production of δ -aminolevulinic and vitamin B₁₂[J]. Biotechnol Advances, 2012, 30(6): 1533-1542.
- [7] 张爱慧, 冷欣兰, 袁颖辉, 任慧玲, 陈雪琼, 朱士农. 5-ALA 对 NaCl 胁迫下丝瓜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 137-141.
ZHANG A H, LENG X L, YUAN Y H, REN H L, CHEN X Q, ZHU S N. Effects of 5-ala on the growth and physiological characteristics of luffa seedlings under nacl stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(13): 137-141. (in Chinese)
- [8] 卢洁春, 牟保民, 郑殿峰, 冯乃杰, 梁晓艳, 冯胜杰, 项洪涛. 5-氨基乙酰丙酸对盐碱胁迫下大豆苗期生物量及生理特性的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(1): 84-89.
LU J C, MOU B M, ZHENG D F, FENG N J, LIANG X Y, FENG S J, XIANG H T. Effects of 5-aminoacetic acid on biomass and physiological characteristics of soybean seedlings under saline-alkali stress[J]. Soybean Science, 2020, 39(1): 84-89. (in Chinese)
- [9] 牛钰, 王俊文, 李瑞瑞, 田强, 武玥, 郁继华. 外源 ALA 对番茄幼苗盐胁迫的缓解效应[J]. 中国瓜菜, 2023, (36): 56-64.
NIU Y, WANG J W, LI R R, TIAN Q, WU Y, YU J H. Alleviating effect of exogenous ala on salt stress in tomato seedlings[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023(36): 56-64. (in Chinese)
- [10] ZHEN A, BIE L Z, HUANG Y, LIU X Z, FAN L M. Effects of 5-aminolevulinic acid on the H_2O_2 -content and xidative enzyme gene expression in nacl-treated cucumber seedlings[J]. Biologia Plantarum, 2012, (3): 566-570.
- [11] LIU T, JIAO X C, YANG S C, ZHANG Z D, YE X L, LIJ M, QI H Y, HU X H. Crosstalk between gaba and ala to im-

- prove antioxidation and cell nsion of tomato seedling under cold stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 180: 104228.
- [12] NUNKAEW T, KANTACHOTE D, KANZAKI H, NITODA T, RITCHIE R J. Effects of 5-aminolevulinic acid(ala)-containing supernatants from selected rhodospseudomonas palustris strains on rice growth under nacl,with mediating effects on chlorophyll, photosynthetic electron transport and antioxidative enzymes[J]. *Journal of Biotechnology*, 2014, 17(1): 1-8.
- [13] 李治中, 谢菲, 刘小梅, 刘云云, 邵剑文. 2 种常用叶面积测量方法准确性的比较研究[J]. *中国农学通报*, 2013(19): 193-197.
- LI Z Z, XIE F, LIU X M, LIU Y Y, SHAO J W. A comparative study on the accuracy of two commonly used leaf area measurement methods[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013(19): 193-197. (in Chinese)
- [14] 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.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [15] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Post-harvest physiological and biochemical experiment guidance of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [16] 张鹏. 滴灌水肥耦合对陕北风沙区温室油桃生长和产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- ZHANG P. Effect of drip irrigation water-fertilizer coupling on the growth and yield of greenhouse nectarine in sandy area of northern Shaanxi[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [17] 朱天奇, 鲁泽宇, 胡桑源, 李光裕, 李允月, 游翔凯, 高双红, 刘铁芄, 许岳飞. 盐胁迫对两个高羊茅品种幼苗生长及生理特性的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(8): 2082-2088.
- ZHU T Q, LU Z Y, HU S Y, LI G Y, LI Y Y, YOU X K, GAO S H, LIU T Y, XU Y F. Effects of salt stress on seedling growth and physiological characteristics of two tall fescue varieties[J]. *Journal of Grassland Science*, 2022, 30(8): 2082-2088. (in Chinese)
- [18] 赵宝龙, 刘鹏, 张祥, 孙军利. 5-氨基乙酰丙酸对盐胁迫下葡萄叶片光合特性及生长特性的影响[J]. *北方园艺*, 2016(14): 1-6.
- ZHAO B L, LIU P, ZHANG X, SUN J L. Effects of 5-aminoacetic acid on photosynthetic characteristics and growth characteristics of grape leaves under salt stress[J]. *Northern Horticulture*, 2016(14): 1-6. (in Chinese)
- [19] 武玥. 外源 5-氨基乙酰丙酸 (ALA) 缓解黄瓜幼苗盐胁迫的效果及机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- WU Y. The effect and mechanism of exogenous 5-aminoacylpropionic acid (Ala) on alleviating salt stress in cucumber seedlings[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [20] 程红玉, 王俊科, 肖占文, 肖让, 赵芸晨, 陈叶. 5-氨基乙酰丙酸(ALA)对玉米幼苗盐胁迫的缓解效应研究[J]. *农业开发与装备*, 2021(2): 149-150.
- CHENG H Y, WANG J K, XIAO Z W, XIAO R, ZHAO Y C, CHEN Y. Alleviating effect of 5-aminoacetic acid (Ala) on salt stress of maize seedlings[J]. *Agricultural Development and Equipment*, 2021(2): 149-150. (in Chinese)
- [21] FAN F H, DING L, XU L Y, DU X C. Antioxidant system and photosynthetic characteristics responses to short-term peg-induced drought stress in cucumber seedling leaves[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2017, 64(2): 162-173.
- [22] 王素平, 郭世荣, 胡晓辉, 李璟焦, 彦生. 盐胁迫对黄瓜幼苗叶片光合色素含量的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2006(1): 32-38.
- WANG S P, GUO S R, HU X H, LI J J, YAN S. Effects of salt stress on photosynthetic pigment content in cucumber seedlings[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2006(1): 32-38. (in Chinese)
- [23] 姚侠妹, 张瑞娥, 偶春, 刘晓丽, 王振, 常二梅. 外源 5—氨基乙酰丙酸对盐胁迫下柃子幼苗生理特性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(4): 37-41.
- YAO X M, ZHANG R E, OU C, LIU X L, WANG Z, CHANG E M. Effects of exogenous 5-aminoacetic acid on physiological characteristics of gardenia seedlings under salt stress[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(4): 37-41. (in Chinese)
- [24] 吴雪霞, 王勇, 姜俊, 沈海斌, 田守波, 查丁石. 外源 NO 对高温胁迫下茄子幼苗生长和抗氧化系统的影响[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(13): 4456-4465.
- WU X X, WANG Y, JIANG J, SHEN H B, TIAN S B, CHA D S. Effects of exogenous no on the growth and antioxidant system of eggplant seedlings under high temperature stress[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(13): 4456-4465. (in Chinese)
- [25] 杨莎, 赵路颖, 宋珊珊, 李新国, 万书波. 5-氨基乙酰丙酸调控花生耐盐性的生理机制研究[J]. *中国油料作物*, 2020, 42(6): 1035-1042.
- YANG S, ZHAO L Y, SONG S S, LI X G, WAN S B. Study on the physiological mechanism of 5-aminoacetic acid regulating peanut salt tolerance [J]. *Chinese Oil Crops*, 2020, 42(6): 1035-1042. (in Chinese)

- [26] 张嘉祥, 国一凡, 张梅. 外源 5-氨基乙酰丙酸对盐胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 农学学报, 2021, 11(7): 7-12.
ZHANG J X, GUO Y F, ZHANG M. Effects of exogenous 5-aminoacetic acid on seed germination and seedling growth of maize under salt stress[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 11(7): 7-12. (in Chinese)
- [27] 陈罡, 管安琴, 万云龙, 冯伟民, 樊平声, 卢昱宇. 外源 5-氨基乙酰丙酸(ALA)对盐胁迫下小型西瓜幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 252-255.
CHEN G, GUAN A Q, WAN Y L, FENG W M, FAN P S, LU Y Y. Effects of exogenous 5-aminolevulinic acid (ALA) on antioxidant enzyme activity of mini-watermelon seedlings under salt stress [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(6): 252-255. (in Chinese)
- [28] YOUSSEF M H M, RAAFAT A, ELYAAIED A A, SELIM S, AZAB E, KHOJAH E, EL N N, IBRAHIM M F M. Exogenous application of alpha-lipoic acid gates salt-induced oxidative damage in sorghum plants through regulation growth, leaf pigments, homeostasis, antioxidant enzymes, and expression of salt stress responsive genes[J]. Plants, 2021, 10(11): 2519-2519.
- [29] FERREIRA-SILVA L S, VOIGT L E, SILVA N E, MAIA M J, ARAGAO R C T, SILVEIRA G A J. Partial oxidative protection by enzymatic and enzymatic components in cashew leaves under high salinity[J]. Biologia Plantarum, 2012, 56(1): 172-176.
- [30] 聂文婧, 王硕硕, 荆鑫, 巩彪, 魏珉, 杨凤娟, 李岩, 史庆华. 外源表油菜素内酯对 NaHCO_3 胁迫下黄瓜幼苗生长及氧化还原平影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 899-908.
NIE W J, WANG S S, JING X, GONG B, WEI M, YANG F J, LI Y, SHI Q H. Effects of exogenous brassinosteroids on growth and redox level of cucumber seedlings under nahco_3 stress[J]. Application of Ecology, 2018, 29(3): 899-908. (in Chinese)
- [31] 曹碧珍. 外源 5-氨基乙酰丙酸 (ALA) 对低温胁迫下枇杷叶片 AsA-GSH 循环的影响[J]. 福建农林科技, 2021, 52(11): 7-13.
CAO B Z. Effects of exogenous 5-aminolevulinic acid (ALA) on the asa-gsh cycle in loquat leaves under low-temperature stress[J]. Fujian Agricultural and Forestry Science and Technology, 2021, 52(11): 7-13. (in Chinese)