

氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗生长和生理指标的影响

王丹^{1,2}, 周彦茹², 张琳靖², 王雨竹²

(1. 哈尔滨市农业科学院 哈尔滨 150000; 2. 哈尔滨师范大学 哈尔滨 150000)

摘要: 本研究利用 $25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐碱混合液模拟苏打盐碱胁迫, 探究不同浓度氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗生长及生理指标的影响。设置 5 个氯化钙浓度处理: $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A)、 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A+5)、 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A+10)、 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A+20)、 $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A+30), 并以蒸馏水处理作为无盐碱胁迫对照 (CK), 测定各处理芝麻菜幼苗的生长指标 (株高、地上部鲜质量、根长、根直径、根表面积和根系鲜质量)、叶绿素含量、根系活力、活性氧含量及抗氧化酶 (SOD、POD 和 CAT) 活性。结果表明, 盐碱胁迫会抑制芝麻菜幼苗的生长, 外源施加氯化钙能够缓解盐碱胁迫对芝麻菜幼苗的抑制作用。在 $0 \sim 20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内, 随着氯化钙浓度的升高, 其缓解效果逐渐增强; 但当氯化钙浓度为 $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 缓解效果下降。与 A 处理相比, A+20 处理芝麻菜幼苗的株高、地上部鲜质量及根系鲜质量分别显著提高了 45.46%、148.26% 和 165.49%, 总叶绿素含量和根系活力分别显著提高了 117.26% 和 467.35%, $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 含量分别显著降低了 62.95% 和 30.29%, SOD、POD 和 CAT 活性分别显著提高 74.53%、84.49% 和 98.29%。综上, 当氯化钙浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其缓解盐碱胁迫对芝麻菜幼苗抑制作用的效果最佳。

关键词: 芝麻菜; 盐碱胁迫; 氯化钙; 活性氧; 抗氧化酶; 根系活力

中图分类号: S565.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)07-222-08

Effects of calcium chloride on the growth and physiological indicators of arugula seedlings under saline-alkaline stress

Wang Dan^{1,2}, Zhou Yanru², Zhang Linjing², Wang Yuzhu²

(1. Harbin Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150000, Heilongjiang, China; 2. Harbin Normal University, Harbin 150000, Heilongjiang, China)

Abstract: To investigate the effects of different concentrations of calcium chloride on the growth and physiological indicators of arugula seedlings under saline-alkaline stress, this study used a $25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ mixed saline-alkaline solution to simulate soda saline-alkaline stress. Five calcium chloride concentration treatments were established: $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A), $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A+5), $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A+10), $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A+20), and $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (A+30). A distilled water treatment without saline-alkaline stress was set as the control group (CK). Growth indicators (shoot length, shoot fresh mass, root length, root diameter, total root surface area, and root fresh mass), chlorophyll content, root activity, reactive oxygen species levels, and antioxidant enzyme activity (SOD, POD and CAT) of the seedlings in each treatment were systematically measured. The results indicated that saline-alkaline stress inhibited the growth of arugula seedlings. Exogenous application of calcium chloride solution alleviated the inhibitory effect of saline-alkaline stress on arugula seedlings. Within the concentration range of $0 \sim 20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, as the concentration of calcium chloride increased, its alleviating effect gradually strengthened. However, the alleviating effect of calcium chloride declined when its concentration reached $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. Compared with group A, the shoot height, shoot fresh mass, and root fresh mass of arugula seedlings in treatment group A+20 increased significantly by 45.46%, 148.26%, and 165.49%, respectively; total chlorophyll content and root activity increased significantly by 117.26% and 467.35%, respectively. Furthermore, compared with the A group, the content of $\text{O}_2^{\cdot-}$ and H_2O_2 in the arugula seedlings of the A+20 group decreased significantly by 62.95% and 30.29%, respectively.

收稿日期: 2026-01-17; 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 黑龙江省博士后基金 (LBH-Z21172); 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目 (YQ2020C033)

作者简介: 王丹, 女, 讲师, 研究方向为植物遗传学与基因工程。E-mail: wangdan19881234@163.com

共同第一作者: 周彦茹, 女, 学士, 研究方向为植物遗传学与基因工程。E-mail: zhouyanru@bjfu.edu.cn

张琳靖, 女, 学士, 研究方向为植物遗传学与基因工程。E-mail: zhanglinjing430@163.com

whereas the enzymatic activity of SOD, POD, and CAT increased significantly by 74.53%, 84.49%, and 98.29%, respectively. Based on the above results, a calcium chloride solution concentration of $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ exhibited the strongest alleviating effect on the inhibitory effect of saline-alkaline stress on arugula seedlings.

Key words: Arugula; Saline-alkaline stress; Calcium chloride; Reactive oxygen species; Antioxidant enzyme; Root activity

盐碱胁迫是影响作物生长和产量的主要不利因素之一^[1]。全球气候恶化、过度使用化肥以及不合理的耕作和灌溉方式,进一步加剧了土壤盐碱化^[1-2]。2024 年联合国粮农组织发布 50 年来首份盐渍土壤全球评估关键报告,该报告显示全球盐渍土壤面积高达 13.81 亿 hm^2 , 占全球土地总面积的 10.70%。在自然环境中,盐胁迫主要由中性盐(如 NaCl 、 Na_2SO_4)引起,盐碱胁迫通常由碱性盐(如 NaHCO_3 、 Na_2CO_3)引起^[3]。与盐胁迫相比,盐碱胁迫不仅会引起渗透胁迫、氧化胁迫、离子毒性,还会导致高 pH 胁迫及碳酸氢盐/碳酸盐($\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$)胁迫^[1]。我国东北松嫩平原西部是世界三大苏打盐碱地之一,盐碱胁迫对该区域的农作物生长及农业生产构成严重威胁^[4]。探索科学有效的方法改良盐碱地,以减轻其对作物生长的不利影响,提高盐碱地作物产量,将极大地推动我国“藏粮于地”战略的实施,确保盐碱地的可持续生态利用。

钙(Ca^{2+})既是植物所需的重要营养物质,也是重要的信号分子,可以通过多种信号通路在植物应对非生物胁迫过程中发挥重要的调控功能^[5]。外源施加钙可以减轻非生物胁迫对植物的损伤,提高植物对非生物胁迫(如干旱、淹水、高温、低温、盐和盐碱胁迫等)的耐受能力^[6-13]。研究表明, $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钙溶液浸种能有效缓解盐碱胁迫对紫苏种子萌发及幼苗生长的不利影响,促进盐碱胁迫下种子萌发,显著提升幼苗胚根长、胚芽长与植株鲜质量,并可提高植株抗氧化酶活性^[14]。外源施加氯化钙可有效改善观赏植物万寿菊在盐碱胁迫下的生长状况,增强植株光合能力^[15]。由此可见,适量施加外源钙可通过增强植物体内抗氧化系统活性、降低活性氧积累,提高光合作用能力以及激活相关信号通路等途径,提高植物对盐碱胁迫的耐受能力。然而,外源钙对盐碱胁迫下蔬菜作物生长影响的研究相对较少。

芝麻菜为十字花科芝麻菜属一年生蔬菜作物,营养丰富,具有重要的食用价值和一定的药用价值,并以其独特的香味深受人们喜爱^[16]。本研究利用 $25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐碱混合液模拟苏打盐碱胁迫,选取芝麻菜作为研究对象,分别对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗施加浓度为 0、5、10、20、30 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钙

溶液,通过测定各处理组幼苗的生长指标(株高、地上部鲜质量、根长、根直径、根表面积和根系鲜质量)、叶绿素含量、根系活力、活性氧含量及抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶)活性,探究不同浓度氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗生长及生理指标的影响,为确定氯化钙缓解盐碱胁迫危害的最适浓度提供依据,从而为东北地区苏打盐碱地的芝麻菜栽培及土壤改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2024 年 9—12 月在哈尔滨师范大学遗传重点实验室植物智能光照培养室进行。供试芝麻菜品种为东北大叶,是东北地区常见的芝麻菜品种,购自金龙农业有限公司。 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 及 Na_2CO_3 均购自天津市天利化学试剂有限公司,均为分析纯;氯化钙购买于上海麦克林生化科技股份有限公司,为分析纯。

1.2 试验设计

挑选无病虫害侵染、无霉变、大小均匀、籽粒饱满的芝麻菜种子,播种于蛭石中,置于温室中培养。培养 2 周后,选择长势相同、无病虫害、生长健壮的芝麻菜进行移栽,每盆移栽 9 株芝麻菜幼苗,共 60 盆,备用。根据前期预试验(未发表), $25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐碱胁迫液(NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 摩尔比为 9:1:9:1, pH 为 9.01)会抑制芝麻菜生长但不致死,同时该盐碱胁迫液 pH 接近于东北盐碱土 pH,因此,选用 $25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐碱胁迫液模拟盐碱胁迫。

1.2.1 处理液的配制 盐碱胁迫液配制:按照 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 摩尔比为 9:1:9:1 的混合,加蒸馏水配制成浓度为 $25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐碱胁迫溶液。氯化钙溶液配制:将氯化钙粉末加蒸馏水分别配制成浓度为 5、10、20、30 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钙溶液。

1.2.2 盐碱胁迫处理 对幼苗进行盐碱胁迫及不同浓度的外源氯化钙处理。共设置 6 个处理,以蒸馏水处理作为对照(CK),其余 5 个处理在盐碱胁迫基础上分别添加不同浓度氯化钙溶液(表 1)。将移

栽获得的长势相同的 60 盆芝麻菜幼苗随机分组,每个处理 10 盆。移苗后待幼苗生长 1 周,再进行盐碱胁迫处理。首次胁迫处理时,A、A+5、A+10、A+20、A+30 处理每盆添加 50 mL 盐碱胁迫溶液,以浸湿蛭石且不外溢为宜,CK 加入等量蒸馏水。随后施加外源氯化钙,A、A+5、A+10、A+20、A+30 处理每盆分别施加 5 mL 相应浓度的氯化钙溶液。随后,每 2 d 各胁迫处理补充施加 10 mL 盐碱胁迫液以及 5 mL 相应浓度氯化钙溶液,对照施加等量蒸馏水。处理 14 d 后取样用于生长及生理生化指标的测定。

表 1 各处理盐碱胁迫液处理以及氯化钙浓度
Table 1 An overview of the experimental groups

处理 Treatment	盐碱胁迫处理 Saline-alkaline stress treatment	c(氯化钙) CaCl ₂ concentration/ (mmol·L ⁻¹)
CK	-	0
A	+	0
A+5	+	5
A+10	+	10
A+20	+	20
A+30	+	30

注: +表示进行盐碱胁迫处理; -表示未进行盐碱胁迫处理。

Note: + indicates saline-alkaline stress treatment; - indicates no saline-alkaline stress treatment.

1.3 测定方法

1.3.1 生长指标测定 处理 14 d 后,每个处理随机选取 3 株幼苗,将幼苗整株从盆中取出,用流水冲去根部蛭石,吸干表面多余水分后进行拍照并观察表型。将幼苗根系放入根系扫描仪中(Expression 12000XL, EPSON, 日本),测定各处理芝麻菜的根长、根直径和根表面积。利用刻度尺测量株高,利用电子天平测定地上部及根系鲜质量。每个处理 3 次重复。

1.3.2 叶绿素含量测定 采用 Arnon 法^[17]测定幼苗叶片(完全展开的最外侧叶片)叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量。每个处理 3 次重复。

1.3.3 根系活力、活性氧物质含量以及抗氧化酶活性的测定 采用 TTC 法^[17]测定幼苗根系活力;采用硫酸钛比色法^[18]测定幼苗叶片过氧化氢(H₂O₂)含量;采用羟胺氧化法^[19]测定幼苗叶片超氧阴离子自由基(O₂^{·-})含量。采用 NBT 还原法^[20]测定幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法^[21]测定幼苗叶片过氧化物酶(POD)活性;采用紫外吸收法^[22]测定幼苗叶片过氧化氢酶(CAT)活性。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据统计和作图;采用 SPSS 19 进行数据分析;采用 Duncan 检验进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 外源氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗生长的影响

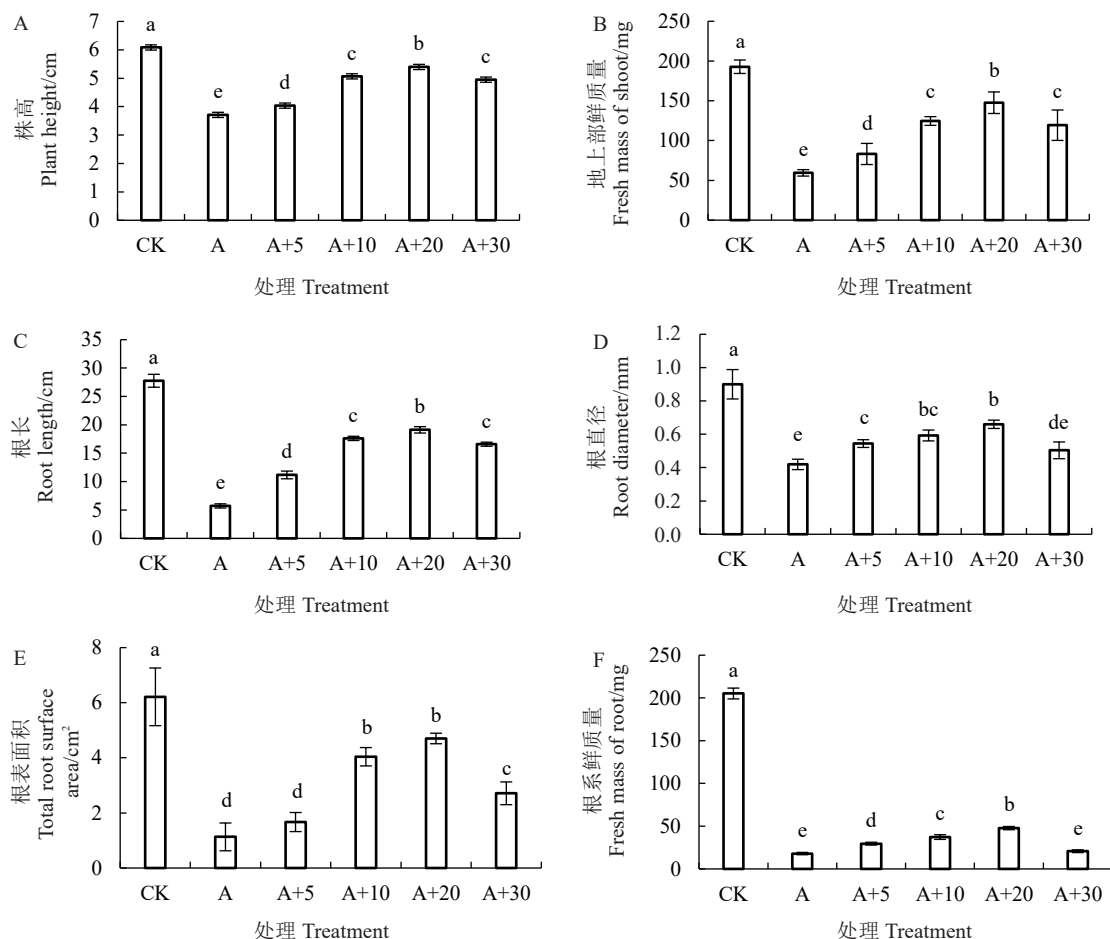
由图 1 可知,与 CK 相比,盐碱胁迫明显抑制芝麻菜幼苗生长,芝麻菜幼苗株高和根长均降低。由图 2 可知,CK 芝麻菜幼苗的株高、地上部鲜质量、根长、根直径、根表面积及根系鲜质量均最高,均显著高于其他处理,A 处理均最低,较 CK 分别降低了 39.01%、69.17%、79.40%、53.43%、81.81% 和 91.24%。盐碱胁迫显著抑制了芝麻菜幼苗地上部生长以及根系发育。

由图 1~2 可知,外源氯化钙能够缓解盐碱胁迫对芝麻菜幼苗生长的抑制作用。由图 2-A~B 可知,与 A 处理相比,A+5、A+10、A+20 和 A+30 处理芝麻菜幼苗株高分别显著增加了 8.81%、36.57%、45.46%和 33.42%,地上部鲜质量分别显著增加了 39.91%、109.64%、148.26%和 100.73%,表明在 0~20 mmol·L⁻¹ 浓度范围内,氯化钙缓解盐碱胁迫对芝麻菜幼苗地上部生长抑制的能力随氯化钙浓度升高而增强。当氯化钙浓度为 20 mmol·L⁻¹ 时,其缓解盐碱胁迫对芝麻菜地上部生长抑制的效果最强,但当氯化钙浓度升至 30 mmol·L⁻¹ 时,其缓解效果减弱。由图 2-C~F 可知,氯化钙也可减轻盐碱胁迫对芝麻菜幼苗根系生长的抑制作用,且在 0~20 mmol·L⁻¹ 的浓度范围内,缓解盐碱胁迫对根系生长抑制作用的能力亦随氯化钙浓度的升高而增强。与 A 处理相比,A+5、A+10、A+20 和 A+30 处理芝麻菜幼苗的根长、根直径、根表面积及根系鲜质量分别增加了 95.32%~234.21%、29.84%~57.42%、47.60%~316.06%和 64.56%~165.49%。其中,氯化钙浓度为 20 mmol·L⁻¹ 时,缓解盐碱胁迫对芝麻菜根长、根直径、根表面积和根系鲜质量抑制作用的效果均最强。但当氯化钙浓度升至 30 mmol·L⁻¹ 时,其缓解盐碱胁迫对芝麻菜根系生长抑制的效果减弱。综上,在 0~20 mmol·L⁻¹ 浓度范围内,随着氯化钙浓度不断增加,其缓解盐碱胁迫对芝麻菜幼苗生长抑制作用的能力增强。当氯化钙浓度达到 20 mmol·L⁻¹ 时,其缓解能力最强,而当浓度升至 30 mmol·L⁻¹ 时,其缓解效果减弱。



图1 氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of calcium chloride on the growth of arugula seedlings under saline-alkaline stress



注:不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same as below.

图2 氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗生长指标的影响

Fig. 2 Effects of calcium chloride on the growth indicators of arugula seedlings under saline-alkaline stress

2.2 外源氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗叶绿素含量和根系活力的影响

由图 3-A~C 可知,与 CK 相比,盐碱胁迫均降低了芝麻菜幼苗叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含

量。A 处理幼苗中叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均最低,分别较 CK 显著降低了 62.92%、51.05%和 59.17%。外源氯化钙能够提高盐碱胁迫下芝麻菜幼苗中叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含

量。其中,与 A 处理相比,A+5、A+10、A+20 和 A+30 幼苗的叶绿素 a 含量的增幅为 25.39%~132.39%,叶绿素 b 含量的增幅为 20.53%~92.43%,总叶绿素含量增幅为 23.55%~117.26%。与生长指标相似,在氯化钙浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其缓解盐碱胁迫对叶绿素含量抑制作用的效果均最强。

从图 3-D 可知,芝麻菜幼苗在受到盐碱胁迫

后,根系活力均显著降低,其中 A 处理最低,较 CK 显著下降了 86.79%。与 A 处理相比,A+5、A+10、A+20 和 A+30 处理芝麻菜幼苗的根系活力分别显著增高了 167.35%、295.92%、467.35%和 251.02%,说明氯化钙可减轻盐碱胁迫对芝麻菜幼苗根系活力的抑制作用。在氯化钙浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其缓解盐碱胁迫对根系活力抑制作用的效果最强,

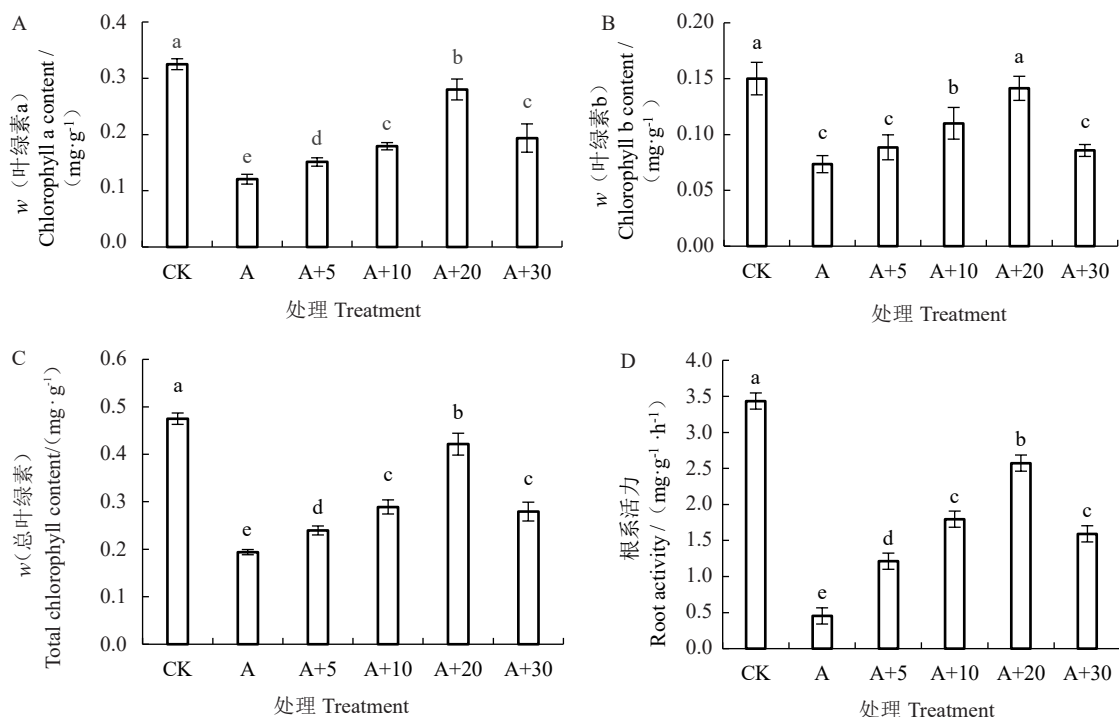


图3 氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗叶绿素含量及根系活力的影响

Fig. 3 Effects of calcium chloride on chlorophyll content and root activity in arugula seedlings under saline-alkaline stress

但当氯化钙浓度升至 $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其缓解效果减弱。

2.3 外源氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗活性氧含量以及抗氧化酶活性的影响

由图 4-A~B 可知,与 CK 相比,盐碱胁迫均会提高芝麻菜幼苗中 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 含量,其中 A 处理均最高,显著高于其他处理,较 CK 分别显著增加了 256.99%和 223.39%。与 A 处理相比,A+5、A+10、A+20 和 A+30 处理芝麻菜幼苗的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量分别显著降低了 20.18%、50.90%、62.95%和 42.77%, H_2O_2 含量分别显著降低了 10.20%、19.47%、30.29%和 17.31%。同样,氯化钙浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其缓解盐碱胁迫引起的活性氧过度积累的能力最强。但当氯化钙浓度达到 $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其缓解能力减弱。

由图 4-C~E 可知,与 CK 相比,盐碱胁迫均会提高芝麻菜幼苗中 SOD、POD 和 CAT 活性,A 处理

SOD、POD 和 CAT 活性分别显著提高 63.80%、47.24%和 39.88%。与 A 处理相比,A+5、A+10、A+20 和 A+30 处理芝麻菜幼苗的 SOD 活性分别增高了 14.29%、39.08%、74.53%和 45.28%,POD 活性分别增高了 11.23%、59.89%、84.49%和 73.26%,CAT 活性分别显著增高了 39.34%、50.05%、98.29%和 87.57%。表明氯化钙能够增强盐碱胁迫下芝麻菜幼苗的抗氧化酶活性,氯化钙浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,能够最大程度地增高盐碱胁迫下芝麻菜幼苗的 SOD、POD 和 CAT 活性,以减少活性氧的积累。

3 讨论与结论

我国东北松嫩平原西部是世界三大苏打盐碱地之一。与东北黑土区相比,该区域盐碱地的农业生产力较低,但也因此具有较大的农业增产潜力,是一类重要的农田资源储备。因此,盐碱地的改良对扩大农田面积、提升农田质量以及实现农业可持

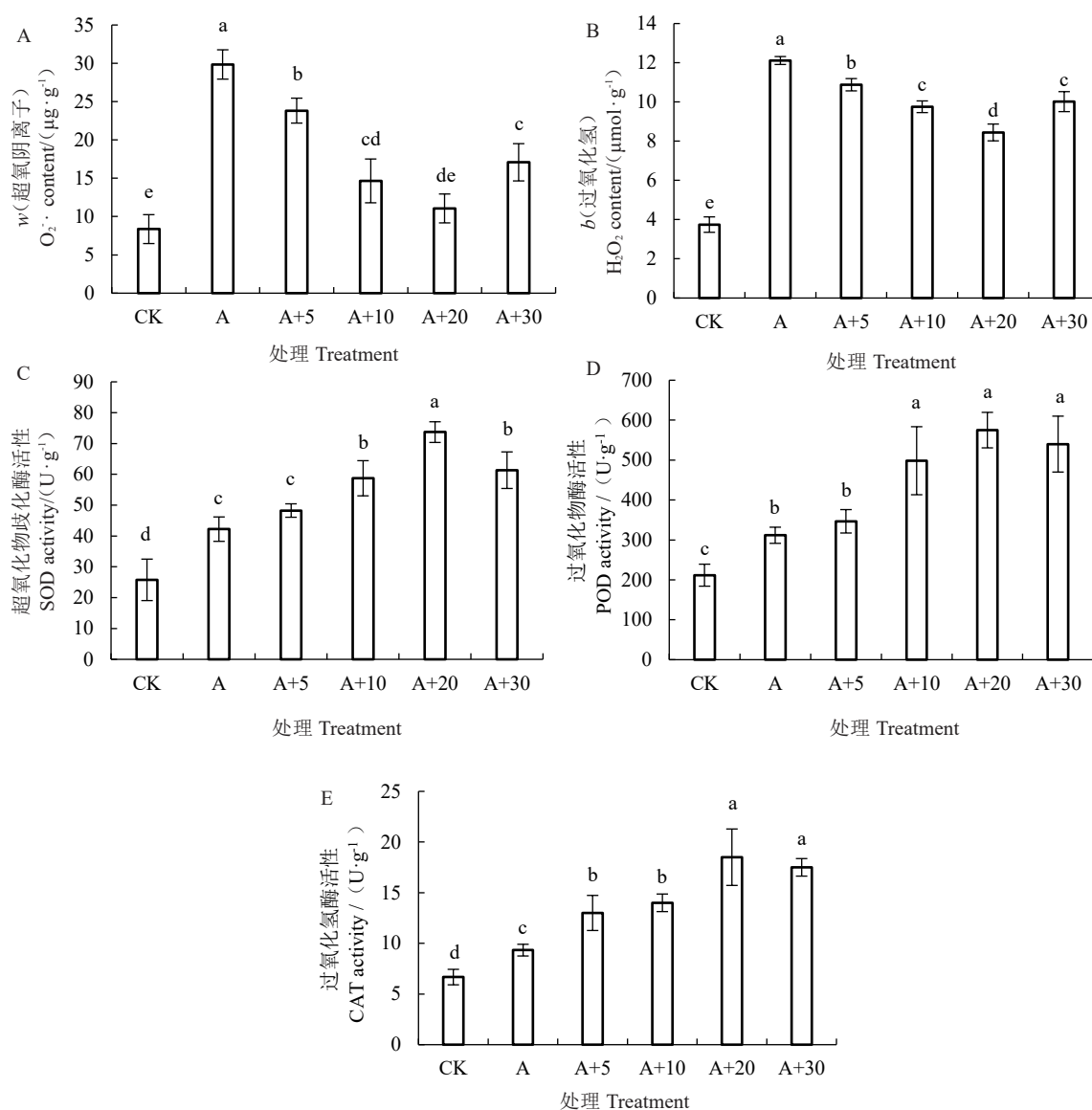


图4 氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗中活性氧物质含量及抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effects of calcium chloride on reactive oxygen species content and antioxidant enzyme activities in arugula seedlings under saline-alkaline stress

续发展具有重要的战略意义。有研究表明,外源施加钙离子能够增强植物对干旱、洪涝、高温、低温及盐碱等非生物胁迫的耐受能力^[6,13,23]。然而,目前尚不清楚氯化钙是否能够缓解盐碱胁迫对芝麻菜生长的抑制作用。本研究通过测定芝麻菜幼苗的生长指标、叶绿素含量、根系活力、活性氧含量及抗氧化酶活性,系统分析了不同浓度氯化钙对盐碱胁迫下芝麻菜幼苗生长及生理特性的影响,以探究氯化钙缓解盐碱胁迫对芝麻菜幼苗损伤的最适浓度,旨在为东北地区苏打盐碱地芝麻菜的栽培及土壤改良提供理论依据。

盐碱胁迫作为一种全球性的非生物胁迫因子,严重限制了作物的生长,导致其产量降低,甚至最

终引起作物死亡^[1]。钙离子作为植物体内的第二信使,在调节植物对非生物胁迫的响应中具有重要的作用^[5]。赵文麟等^[24]研究表明,外源施加氯化钙和硝酸钙均能在一定程度上缓解盐胁迫对黄瓜幼苗生长的抑制作用,提高其株高和根长。本研究发现,盐碱胁迫严重抑制了芝麻菜幼苗的生长,而外源施加氯化钙可有效缓解盐碱胁迫对芝麻菜幼苗生长抑制作用,促进其根系发育,提高株高及鲜质量。当氯化钙浓度达到 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其缓解盐碱胁迫对芝麻菜生长抑制作用的效果最强,其幼苗株高、地上部鲜质量及根系鲜质量较 A 处理分别显著提高了 45.46%、148.26% 和 165.49%。张胜珍等^[25]研究发现,利用不同浓度氯化钙浸种可缓解盐胁迫

对荆芥种子萌发及幼苗生长的抑制作用,荆芥幼苗的株高、根长和鲜质量均呈先增加后降低的趋势,并在氯化钙浓度为 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时缓解作用最强,与本文研究结果一致。施加适量的氯化钙,能够在一定程度上保障盐碱胁迫条件下芝麻菜体内钙信号系统的正常激活和转导,减少细胞内钾离子外流和钠离子内流,增强质膜稳定性,提高芝麻菜对盐碱胁迫的耐受能力,缓解盐碱胁迫对芝麻菜生长的抑制作用。

光合作用会影响作物生物量的形成,但易受环境胁迫的影响^[26]。研究表明,外源施加钙离子、木质素、蔗糖、水杨酸、6-苄氨基嘌呤和二氧化硅纳米颗粒等,均可有效提高植物在多种胁迫下的光合能力,进而促进其生长与发育^[27-30]。本研究表明,不同浓度的氯化钙均可提高盐碱胁迫下芝麻菜幼苗的叶绿素含量。当氯化钙浓度达到 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,总叶绿素含量较 A 处理提高了 117.26%,其缓解盐碱胁迫的效果最强。曹小强等^[31]研究表明外源氯化钙可以有效缓解碱胁迫对油菜叶绿素含量的影响,显著提高叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量;王伟宇等^[32]研究表明喷施氯化钙可有效缓解盐碱胁迫对大豆叶绿素含量的抑制作用。以上结果均与本研究一致。可能是因为外源氯化钙有助于保护盐碱胁迫下芝麻菜幼苗的叶绿体膜,有效缓解盐碱胁迫对叶绿体结构的损伤并抑制叶绿素降解,从而提高芝麻菜叶绿素含量。根系对植物吸收水分、矿物质至关重要,因此,植物根系形态和根系活力对植物生长发育具有重要影响^[33]。盐碱胁迫会严重抑制作物根系生长及根系活力,影响作物的正常发育^[34-35]。孙喜云等^[35]研究表明施加低浓度 2,4-表油菜素内酯可显著提高盐碱胁迫下菜薯根系活力,但浓度过高则会导致根系活力下降。本研究也表明,施用外源氯化钙可显著缓解盐碱胁迫对芝麻菜根系活力的抑制作用,并在 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时缓解效果最强,其根系活力较 A 处理显著提高了 467.35%;但当浓度达到 $30\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,缓解效果降低。上述研究表明,当氯化钙浓度过高时,其自身也会成为一种新的胁迫物质,可能会干扰植物体内的离子稳态,并对细胞膜结构造成破坏,进而对植物生长产生新的负面影响,具体表现为植物生长指标、叶绿素含量及根系活力下降。

研究表明盐碱胁迫会诱导活性氧积累,进而引发氧化胁迫,导致膜脂过氧化及质膜损伤^[36-37]。在本研究中,盐碱胁迫会导致芝麻菜幼苗中大量累积

$\text{O}_2\cdot$ 和 H_2O_2 , 对植株造成严重危害。为减轻氧化胁迫所带来的不利影响,植物可通过激活多种抗氧化防御机制来清除体内过量的活性氧^[38]。SOD 能够将 $\text{O}_2\cdot$ 转化为 H_2O_2 , H_2O_2 则进一步由 POD 和 CAT 转化为 H_2O , 从而实现活性氧的有效清除^[39]。研究表明,施加外源钙能够有效提高植物体内抗氧化酶的活性,减轻非生物胁迫引起的氧化损伤^[13,40-41]。外源氯化钙能够增强盐胁迫下水稻幼苗的抗氧化酶活性,减少 $\text{O}_2\cdot$ 和 H_2O_2 的生成,从而提高水稻对盐胁迫的耐受能力^[41]。外源施加 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钙能够显著提高蓖麻体内 SOD、POD 和 CAT 的活性,减少 $\text{O}_2\cdot$ 和 H_2O_2 的积累,最终提高蓖麻对盐碱胁迫的耐受性^[13]。本研究同样发现,与未施用氯化钙(A)处理相比,盐碱胁迫下施用氯化钙的芝麻菜幼苗中 SOD、POD 和 CAT 的活性均升高,降低了盐碱胁迫引起的 $\text{O}_2\cdot$ 和 H_2O_2 的过度积累,缓解了盐碱胁迫对芝麻菜幼苗造成的氧化损伤。与其他指标相似,在施加 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钙时,其缓解效果最强。

综上所述,外源施加不同浓度的氯化钙均可有效缓解盐碱胁迫对芝麻菜幼苗产生的不利影响,促进其生长、提高叶绿素含量、增强根系活力、提升抗氧化酶活性,并降低 $\text{O}_2\cdot$ 和 H_2O_2 的积累。综合各项指标,当外源施加 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钙时,对盐碱胁迫的缓解效果最佳。

参考文献

- [1] Cao Y B, Song H F, Zhang L Y. New insight into plant saline-alkali tolerance mechanisms and application to breeding[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(24): 16048.
- [2] Fang S M, Hou X, Liang X L. Response mechanisms of plants under saline-alkali stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 667458.
- [3] Guo R, Shi L X, Yan C R, et al. Ionomic and metabolic responses to neutral salt or alkaline salt stresses in maize (*Zea mays* L.) seedlings[J]. BMC Plant Biology, 2017, 17(1): 41.
- [4] Gong H Y, Li Y F, Li S J. Effects of the interaction between biochar and nutrients on soil organic carbon sequestration in soda saline-alkali grassland: A review[J]. Global Ecology and Conservation, 2021(26): e01449.
- [5] 廖婕, 任慧敏, 柳参奎, 等. 盐碱胁迫下植物生理和钙信号通路分子机制的研究进展[J]. 分子植物育种, 2021, 19(6): 2041-2047.
- [6] Feng D, Wang X J, Gao J P, et al. Exogenous calcium: Its mechanisms and research advances involved in plant stress tolerance[J]. Frontiers in Plant Science, 2023(14): 1143963.
- [7] Zhang D, Tian C Y, Mai W X. Exogenous sodium and calcium alleviate drought stress by promoting the succulence of suaeda

- salsa[J]. *Plants*, 2024, 13(5): 721.
- [8] 樊国华. 外源钙对淹水胁迫下不同抗性牡丹呼吸代谢的影响[J]. *北方园艺*, 2019(10): 80-85.
- [9] 郑栋文, 李旋, 胡欣蕊, 等. 外源 Ca^{2+} 通过提高抗氧化和渗透调节能力增强黄瓜幼苗耐热性[J]. *中国瓜菜*, 2026, 39(2): 95-100.
- [10] Wu J Y, Pan Q W, Fahim A M, et al. Effects of exogenous calcium and calcium inhibitor on physiological characteristics of winter turnip rape (*Brassica rapa*) under low temperature stress[J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 937.
- [11] 王博伟, 陈艳丽, 朱国鹏, 等. 叶面喷施氯化钙对海南高温季节水生菜生长生理的影响[J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(4): 94-98.
- [12] Abo-Shanab W A, Elshobary M E, Czubacka A, et al. Improvement of salt tolerance in *Vicia faba* (L.) seedlings: A comprehensive investigation of the effects of exogenous calcium chloride[J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1): 200.
- [13] Hao F, Cui Z G, Dong X, et al. Exogenous calcium enhances castor tolerance to saline-alkaline stress by regulating antioxidant enzyme activity and activating Ca^{2+} and ROS signaling crosstalk[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(23): 12717.
- [14] 苏文欣, 许凌欣, 姜宛彤, 等. 不同外源物质对盐碱胁迫下紫苏种子萌发、幼苗生长及生理的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(9): 2415-2422.
- [15] 王静, 蒋倩, 陶田田, 等. 外源钙对盐碱胁迫下万寿菊生长及光合特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2024, 44(9): 1345-1354.
- [16] 沈海斌, 卢盼玲, 吴珏, 等. 芝麻菜叶绿体基因组测序及系统发育关系分析[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(8): 2495-2506.
- [17] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [18] Jana S, Choudhuri M A. Glycolate metabolism of three submersed aquatic angiosperms during ageing[J]. *Aquatic Botany*, 1982(12): 345-354.
- [19] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. *植物生理学通讯*, 1990(6): 55-57.
- [20] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels[J]. *Analytical Biochemistry*, 1971, 44(1): 276-287.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Roy P R, Tahjib-Ul-Arif M, Polash M A S, et al. Physiological mechanisms of exogenous calcium on alleviating salinity-induced stress in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2019, 25(3): 611-624.
- [24] 赵文麟, 张新梅, 梁飞飞, 等. 钙离子及其抑制剂对盐胁迫下黄瓜幼苗形态建成的影响[J]. *北方园艺*, 2024(16): 1-8.
- [25] 张胜珍, 马艳芝. 氯化钙对盐胁迫下荆芥种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(7): 65-71.
- [26] Muhammad I, Shalmani A, Ali M, et al. Mechanisms regulating the dynamics of photosynthesis under abiotic stresses[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020(11): 615942.
- [27] Wang Z T, Guo J, Luo W X, et al. Salicylic acid cooperates with lignin and sucrose signals to alleviate waxy maize leaf senescence under heat stress[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2025, 48(6): 4341-4355.
- [28] Zhao X J, Lin S, Yu S, et al. Exogenous calcium enhances the physiological status and photosynthetic capacity of rose under drought stress[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2024, 10(3): 853-865.
- [29] Li Y T, Han X T, Ren H, et al. Exogenous SA or 6-BA maintains photosynthetic activity in maize leaves under high temperature stress[J]. *The Crop Journal*, 2023, 11(2): 605-617.
- [30] Chen Z D, Wang P, Zhao S M, et al. Functionalized silica nanoparticles mitigate salt stress in soybean: Comprehensive insights of physiological, metabolomic, and microbiome responses[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2025, 73(18): 10814-10825.
- [31] 曹小强, 王卫超, 阴法庭, 等. 外源钙对 NaHCO_3 胁迫下油菜幼苗叶片离子平衡及光合特性的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(5): 149-157.
- [32] 王伟宇, 冯瑞琦, 曹禹, 等. 外源氯化钙对盐碱胁迫下大豆植株生长和产量性状的影响[J]. *大豆科学*, 2025, 44(5): 55-56.
- [33] Gao M L, Liu Y, Dong Y M, et al. Effect of polyethylene particles on dibutyl phthalate toxicity in lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401(24): 123422.
- [34] 杨思震, 周璐瑶, 陈春林, 等. 外源 ALA 对盐碱胁迫下辣椒幼苗生理生化特性的影响[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(5): 51-58.
- [35] 孙喜云, 丁芳, 刘广卿, 等. 叶面喷施 2,4-表油菜素内酯对盐碱胁迫下菜薯幼苗根系生长及生理的影响[J]. *中国蔬菜*, 2025(5): 131-137.
- [36] Xu Z J, Wang J C, Zhen W T, et al. Abscisic acid alleviates harmful effect of saline-alkaline stress on tomato seedlings[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022(175): 58-67.
- [37] 朱晨晨, 史昆, 何沁坤, 等. 中苜一号紫花苜蓿幼苗对混合盐碱胁迫的响应[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(8): 1-9.
- [38] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909-930.
- [39] Hasanuzzaman M, Bhuyan M H M B, Zulfikar F, et al. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(8): 681.
- [40] Sadak M S, Hanafy R S, Elkady F M A M, et al. Exogenous calcium reinforces photosynthetic pigment content and osmolyte, enzymatic, and non-enzymatic antioxidants abundance and alleviates salt stress in bread wheat[J]. *Plants*, 2023, 12(7): 1532.
- [41] Rahman A, Nahar K, Hasanuzzaman M, et al. Calcium supplementation improves Na^+/K^+ ratio, antioxidant defense and glyoxalase systems in salt-stressed rice seedlings[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016(7): 609.