

外源 ABA、CaCl₂、SA 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗生长及生理的影响

刘艳菊, 徐玉芬, 于钊妍, 吴坤林, 曹秋林, 龚 涵, 贾效成*

中国热带农业科学院椰子研究所/海南省热带油料作物生物学重点实验室, 海南文昌 571339

摘 要: 探讨外源脱落酸 (ABA)、氯化钙 (CaCl₂)、水杨酸 (SA) 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗生长和生理特性的影响, 为提高油茶抗性提供理论依据。以一年生油茶幼苗为材料, NaCl 胁迫下外施不同浓度 ABA、CaCl₂、SA 处理, 研究其对油茶幼苗生长及相关生理指标的影响。结果表明: (1) 单独 NaCl 胁迫下油茶幼苗株高增长量、全株干质量、根冠比、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、质膜透性、丙二醛 (MDA) 含量、H₂O₂ 含量、SOD 和 POD 活性均显著提升; (2) NaCl 胁迫下外施不同浓度 ABA、CaCl₂、SA 处理后可增加油茶幼苗株高增长量、全株干质量, 提高幼苗可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、SOD 和 POD 活性, 降低油茶幼苗根冠比、质膜透性、MDA 含量; (3) 利用隶属法进行综合评价结果发现, 外施 40 mmol/L CaCl₂ 最能减少 NaCl 胁迫对油茶幼苗的伤害, 其次是 200 μmol/L SA、100 μmol/L SA 处理。

关键词: 油茶; NaCl 胁迫; ABA; CaCl₂; SA; 生理

中图分类号: S794.4

文献标志码: A

Growth and Physiological Effects of Exogenous ABA, CaCl₂, SA under NaCl Stress on *Camellia oleifera* Seedlings

LIU Yanju, XU Yufen, YU Zhaoyan, WU Kunlin, CAO Qiulin, GONG Han, JIA Xiaocheng*

Coconut Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Hainan Key Laboratory of Tropical Oil Crops Biology, Wenchang, Hainan 571339, China

Abstract: This study investigated the effects of exogenous abscisic acid (ABA), calcium chloride (CaCl₂), and salicylic acid (SA) on the growth and physiological characteristics of *Camellia oleifera* seedlings subjected to NaCl stress, aiming to provide theoretical basis for enhancing the resistance of tea oil plants. One-year-old *C. oleifera* seedlings were utilized, and the impact of varying concentrations of ABA, CaCl₂, and SA on growth parameters and related physiological indicators was assessed under NaCl stress. Under sole NaCl stress conditions, significant increase was observed in height growth, total dry weight, root-to-shoot ratio, soluble protein content, soluble sugar levels, membrane permeability, MDA, H₂O₂ content, as well as SOD and POD activities in *C. oleifera* seedlings. Furthermore, external application of different substances under NaCl stress enhanced height growth, total dry weight, soluble protein content, soluble sugar levels while reducing root-to-shoot ratio along with membrane permeability and MDA content in the seedlings. Comprehensive evaluation using membership function analysis indicated that treatment with 40 mmol/L CaCl₂ was most effective in mitigating NaCl-induced damage to *C. oleifera* seedlings; this was followed by treatments with 200 μmol/L SA and 100 μmol/L SA.

Keywords: *Camellia oleifera*; NaCl stress; ABA; CaCl₂; SA; physiology

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.03.017

收稿日期 2024-09-30; 接受日期 2024-10-14

基金项目 海南省重点研发计划专项 (No. ZDYF2023XDNY054); 海南省自然科学基金青年基金项目 (No. 322QN414)。

作者简介 刘艳菊 (1987—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 油茶栽培生理。*通信作者 (Corresponding author): 贾效成 (JIA Xiaocheng), E-mail: xcjia1@163.com。

油茶 (*Camellia vietnamensis*) 为山茶科山茶属 (*Camellia* L.) 常绿小乔木, 是我国南方主要的经济树种, 与椰子、油棕、油橄榄称为世界四大木本食用油料树种^[1]。具有较高的经济价值和生态效益, 是农林业产业结构调整、精准扶贫的重要经济作物之一^[2]。滨海盐碱地是我国重要的盐碱地土地类型, 主要受海水影响形成, 具有盐分高、养分低和危害大等特点。海南岛是我国第二大岛, 海岸线总长约 1800 km, 拥有丰富的滨海资源, 但也因台风等天气原因, 造成海水倒灌形成盐碱地。同时, 不合理施肥、工业污染和土壤资源过度开发等也会导致土壤盐碱化, 阻碍植物正常生长, 严重影响生态发展。研究表明, 盐胁迫下利用外源植物生长调节剂可提高抗逆性, 维持植物生长发育^[3-4]。脱落酸 (ABA) 能调节种子萌发、幼苗生长及对非生物胁迫的耐受性等生理过程^[5]。当植物叶片遭受盐胁迫时, 叶片中的 ABA 含量增加。而当植物适应了盐胁迫后, ABA 含量降低, 叶片恢复正常的代谢水平和生长状态^[6]。ABA 可关闭植物气孔, 减少蒸腾速率, 减少地上部盐离子含量, 从而增强植物适应盐胁迫的能力^[7-8]。ABA 能诱导植物选择性地吸收 Ca^{2+} , 提高植物对 Na^+ 的耐受性^[9]。

水杨酸 (salicylic acid, SA) 作为天然的信号分子, 通过提高植物叶绿素含量^[10]和抗氧化酶活性^[11-12]、降低植物蒸腾速率^[13]、增加渗透物质含量^[14]等生理变化, 进而提高植株耐盐性。外源 SA 可提高植物抗氧化酶活性 (SOD、POD、CAT 等), 降低 MDA 含量, 同时增加生物量, 进而提高抗盐能力^[15-18], 能促进小麦幼苗生长和增强根系活力^[19], 增加脯氨酸含量^[20], 增加可溶性糖含量^[21]。 Ca^{2+} 作为植物细胞内第二信使, 对低温、干旱、盐等逆境胁迫中的信号转导有着重要作用。适宜浓度的 Ca^{2+} 可通过钙调节系统来维持细胞质膜稳定性, 进而提高植物抗盐性, 浓度过高的 Ca^{2+} 则会对植物产生毒害作用^[22-23]。有研究结果表明, 外源 Ca^{2+} 能缓解盐胁迫对植物生长有较好的效果, 可能是因为太多的 Na^+ 、 Cl^- 抑制 Ca^{2+} 、 K^+ 的吸收, 致使离子缺失严重^[24]。 Ca^{2+} 能改善苜蓿幼苗离子平衡, 缓解盐胁迫造成的伤害^[25]。不同浓度 CaCl_2 可缓解盐胁迫下对小麦种子萌发的抑制, 维持小麦幼苗叶片渗透压, 增强小麦种子和幼苗的耐盐性^[26]。

目前, 针对油茶逆境生理生化的研究大多集中在低温^[27]、高温^[28]、干旱^[29-30]等方面, 开展盐

胁迫对油茶的研究较少, 仅有外源 $\text{NO}^{[31]}$ 、芸苔素内酯、水杨酸、赤霉素和褪黑素^[32]对 NaCl 胁迫下油茶幼苗生理变化的研究, 而外施不同浓度 ABA、SA 和 CaCl_2 对盐胁迫下油茶生理变化方面的研究未见报道, 因此本研究以油茶嫁接苗为研究对象, 开展 NaCl 胁迫下不同浓度 ABA、SA 和 CaCl_2 对油茶幼苗生长和生理指标的影响, 为油茶抗盐栽培提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

试验在中国热带农业科学院椰子研究所油茶种苗圃进行, 油茶品种为海南省品种审定委员会认定的热研 1 号。选取长势一致, 健康良好, 苗高 40 cm 左右的一年生油茶盆栽幼苗用于试验。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 将 200 mmol/L NaCl 溶液浸没营养杯的 1/3 处, 3 d 更换一次 NaCl 溶液以维持 NaCl 处理浓度, 同时每天上午 9:00 对油茶幼苗喷施 40 mL 不同浓度的 ABA、 CaCl_2 、SA 溶液 (表 1), 每个处理 10 盆, 3 次重复。等体积清水处理的幼苗为对照 1 (CK_1), 单独 NaCl 处理为对照 2 (CK_2)。处理 7 d 后, 取心叶外围第 4、5 片叶进行相关指标的测定。

表 1 不同处理组合梯度设置
Tab. 1 Gradient settings for different treatment combinations

处理 Treatment	处理组合 Treatment combination
CK_1	H_2O
CK_2	200 mmol/L NaCl
A_1	50 $\mu\text{mol/L}$ ABA+200 mmol/L NaCl
A_2	100 $\mu\text{mol/L}$ ABA+200 mmol/L NaCl
A_3	200 $\mu\text{mol/L}$ ABA+200 mmol/L NaCl
C_1	10 mmol/L CaCl_2 +200 mmol/L NaCl
C_2	20 mmol/L CaCl_2 +200 mmol/L NaCl
C_3	40 mmol/L CaCl_2 +200 mmol/L NaCl
S_1	50 $\mu\text{mol/L}$ SA+200 mmol/L NaCl
S_2	100 $\mu\text{mol/L}$ SA+200 mmol/L NaCl
S_3	200 $\mu\text{mol/L}$ SA+200 mmol/L NaCl

1.2.2 指标测定 (1) 生长指标的测定。油茶幼苗土面到顶端新芽芽尖的距离为株高, 喷施外源物质处理前和 NaCl 胁迫 7 d 后分别测量单株幼苗的株高, 其差值为株高增加量; 全株收获洗净, 吸干表面水分后称重以测量鲜质量, 于 110 $^{\circ}\text{C}$ 烘

箱杀青 15 min，以 80 ℃烘干至恒质量；茎叶干质量和根干质量的总和为全株干质量，根干质量与茎叶干质量的比值为根冠比。

(2) 生理指标的测定。可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 法，可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[33]，H₂O₂ 含量测定采用硫酸钛法^[34]，MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸法^[35]，脯氨酸含量测定采用磺基水杨酸法^[36]，质膜透性测定采用电导法^[37]，SOD 和 POD 活性应用南京建成试剂盒进行测定；吸光值由日本岛津 UV-2600 紫外分光光度计测定。

1.3 数据处理

试验数据用 Excel 2010 软件进行收集与整理，数据采用 SPSS 25 软件进行差异显著性分析。采用隶属函数值法对耐盐性进行综合评价，分别计算 NaCl 胁迫下外施不同物质油茶幼苗的株高、全株干质量、根冠比、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、MDA 含量、质膜透性及 SOD、POD 活性等指标变化的隶属函数值。

分析指标与耐盐性呈正相关，则计算公式为： $X=(X_{ij}-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ ；分析指标与耐盐性呈负相关，则计算公式为： $X=1-(X_{ij}-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ 。式中： X_{ij} 表示第 i 处理第 j 个指标的隶属函数值； X_{max} 和 X_{min} 分别表示测定值中的最大值和最小值。分别计算各指标隶属函数值，再计算所有指标平均值，值越大，耐盐性越强，反之越弱。

2 结果与分析

2.1 外源 ABA、CaCl₂、SA 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗生长指标的影响

由表 2 可知，单独 NaCl 胁迫下，幼苗株高增长量、全株干质量和根冠比均显著上升，与 CK₁ 相比，分别增加 66.92%、36.07%、66.67%。外源 ABA、CaCl₂、SA 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗株高增长量、全株干质量、根冠比产生不同的影响。ABA 处理下，株高增长量随 ABA 浓度增加呈下降趋势，其中 A₁ 处理的株高增长量与 CK₂ 相比差异不显著，但比 CK₁ 显著增加 80%，A₂ 处理也比 CK₁ 显著增加 38.46%，但比 CK₂ 显著减少 17.05%，A₃ 处理与 CK₁ 相比差异不显著，但比 CK₂ 显著减少 33.18%；株高增长量随 CaCl₂ 浓度增加呈上升趋势，C₁ 处理与 CK₂ 相比差异不显著，但比 CK₁ 显著增加 74.62%，C₂ 处理分别比 CK₁、CK₂ 显著

增加 106.92%、23.96%，C₃ 处理分别比 CK₁、CK₂、C₁、C₂、A₁ 显著增加 156.15%、53.46%、46.70%、23.79%、42.71%；株高增长量随 SA 浓度增加呈上升趋势，但 S₁、S₂ 均与 CK₂ 差异不显著，但均比 CK₁ 显著增加 70%、80.77%，S₃ 处理的株高增长量达到最大，分别比 CK₁、CK₂、S₂ 显著增加 170%、61.75%、49.36%，但与 C₃ 处理差异不显著。

全株干质量均随 ABA 浓度的增大呈先升高后下降趋势，A₁ 处理比 CK₂ 显著下降 11.50%，A₂、A₃ 处理与 CK₂ 差异不显著；而在 CaCl₂ 处理下，全株干质量呈先下降后上升趋势，C₁、C₂ 分别比 CK₂ 显著下降 13.65%、23.39%，而 C₃ 则比 CK₂ 显著增加 16.37%。SA 处理下，全株干质量在 S₂ 处理下较大，分别比 CK₂、S₁、S₃ 显著增加 15.59%、29.76%、11.80%。

不同浓度 ABA、CaCl₂、SA 处理的根冠比与 CK₂ 相比均显著下降，其中 C₁ 处理与 CK₂ 差异不显著，A₃、S₁ 分别比 CK₂ 减少 8.4%、9%，A₁、C₂、S₂、S₃ 下降幅度较大，与 CK₂ 相比，分别减少 29.8%、27.2%、31.2%、29.8%。

表 2 外源 ABA、CaCl₂、SA 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗生长指标的影响

Tab. 2 Effects of exogenous ABA, CaCl₂ and SA on growth indicators of *C. oleifera* seedlings under NaCl stress

处理 Treatment	株高增长量 Plant height growth rate/cm	全株干质量 Whole plant dry weight/g	根冠比 Root shoot ratio
CK ₁	1.30±0.25 ^e	3.77±0.69 ^e	0.300±0.11 ^f
CK ₂	2.17±0.54 ^c	5.13±0.46 ^{bc}	0.500±0.19 ^a
A ₁	2.34±0.29 ^c	4.54±0.50 ^d	0.351±0.09 ^e
A ₂	1.80±0.42 ^d	5.48±0.73 ^b	0.397±0.18 ^c
A ₃	1.45±0.37 ^e	5.09±0.42 ^c	0.458±0.05 ^b
C ₁	2.27±0.3 ^c	4.43±0.28 ^d	0.482±0.09 ^{ab}
C ₂	2.69±0.49 ^b	3.93±0.31 ^e	0.364±0.08 ^{de}
C ₃	3.33±0.67 ^a	5.97±0.82 ^a	0.398±0.13 ^{cd}
S ₁	2.21±0.45 ^c	4.57±0.45 ^d	0.455±0.12 ^b
S ₂	2.35±0.28 ^c	5.93±0.39 ^a	0.344±0.06 ^e
S ₃	3.51±0.34 ^a	5.23±0.40 ^{bc}	0.351±0.05 ^e

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference (P<0.05).

2.2 外源 ABA、CaCl₂、SA 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗生理指标的影响

NaCl 胁迫下外源 ABA、CaCl₂、SA 对油茶幼苗 7 个生理指标的影响如表 3 所示。单独 NaCl

胁迫下,油茶幼苗可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、质膜透性、丙二醛含量、脯氨酸含量、 H_2O_2 含量较 CK_1 均有显著提高;ABA 处理下,幼苗可溶性蛋白含量随 ABA 浓度的增加呈升高趋势, A_1 与 CK_1 差异不大, A_2 、 A_3 分别比 CK_1 显著增加 15.25%、25.42%,但比 CK_2 均显著下降; C_3 处理的可溶性蛋白含量比 CK_2 显著增加 14.81%, S_3 处理的可溶性蛋白含量比 CK_2 显著增加 24.69%,说明高浓度 SA 处理比 ABA、 CaCl_2 更能提高油茶幼苗可溶性蛋白含量;随着 ABA、 CaCl_2 、SA 处理浓度的增加,可溶性糖含量均呈逐渐下降趋势, A_1 、 C_1 处理的可溶性糖含量分别比 CK_2 增加 12.30%、8.08%,而 A_3 处理比 CK_2 显著降低 12.96%, C_3 处理与 CK_2 差异不显著,不同浓度 SA 处理比 CK_2 均显著降低,分别减少 18.24%、21.99%、28.69%。说明低浓度 ABA、 CaCl_2 可提高油茶幼苗可溶性糖含量。

不同浓度 ABA 处理的质膜透性与 CK_2 差异不显著,而 CaCl_2 处理下,与 CK_2 相比, C_1 、 C_3

处理显著减少 8.85%、18.22%。SA 处理下, S_2 、 S_3 处理的质膜透性比 CK_2 分别显著增加 10.37%、14.76%。说明高浓度 CaCl_2 处理可降低油茶幼苗质膜透性,而较高浓度 SA 处理则提高油茶幼苗质膜透性。

不同浓度 ABA、 CaCl_2 、SA 处理的幼苗 MDA 随外源物质浓度的增加均呈逐渐下降趋势, A_1 、 C_1 与 CK_2 差异不显著, A_3 、 C_3 、 S_3 分别比 CK_2 减少 24.04%、10.85%、26.65%,不同浓度 SA 处理均能显著降低 MDA 含量,减少 NaCl 对油茶幼苗的氧化伤害。

ABA、 CaCl_2 、SA 处理对 NaCl 胁迫下油茶幼苗 H_2O_2 含量产生不同的影响, A_1 、 A_2 处理的 H_2O_2 含量与 CK_2 差异不显著,但 A_3 处理显著下降 35.51%,而较低浓度 CaCl_2 处理则显著提高幼苗 H_2O_2 含量, C_1 、 C_2 分别显著增加 55.44%、38.99%, C_3 处理与 CK_2 差异不显著。 S_2 、 S_3 处理显著降低,分别比 CK_2 减少 27.81%、45.03%,而 S_1 处理与 CK_2 差异不显著。

表 3 外源 ABA、 CaCl_2 、SA 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗生理指标的影响

Tab. 3 Effects of exogenous ABA, CaCl_2 and SA on physiological indicators of *C. oleifera* seedlings under NaCl stress

处理 Treatment	可溶性蛋白含量 Soluble protein content ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	可溶性糖含量 Soluble sugar content ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	质膜透性 Membrane permeability/%	MDA 含量 MDA content ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	H_2O_2 含量 H_2O_2 content ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)
CK_1	0.59 ± 0.025^f	$25.14\pm1.29^{\text{de}}$	25.28 ± 1.01^g	6.55 ± 0.44^c	22.34 ± 2.90^g
CK_2	0.81 ± 0.021^c	$27.47\pm1.50^{\text{bc}}$	$36.93\pm2.04^{\text{cd}}$	$7.28\pm0.33^{\text{ab}}$	183.49 ± 17.51^c
A_1	0.61 ± 0.031^f	30.85 ± 1.67^a	$35.02\pm1.95^{\text{de}}$	7.99 ± 0.52^a	168.04 ± 10.70^c
A_2	0.68 ± 0.035^e	$29.01\pm0.85^{\text{ab}}$	$34.42\pm1.73^{\text{de}}$	$6.79\pm0.30^{\text{bc}}$	$162.14\pm16.00^{\text{cd}}$
A_3	$0.74\pm0.040^{\text{d}}$	$23.91\pm1.52^{\text{ef}}$	$35.82\pm1.10^{\text{de}}$	$5.53\pm0.48^{\text{de}}$	$118.34\pm17.02^{\text{ef}}$
C_1	$0.76\pm0.073^{\text{cd}}$	$29.69\pm1.35^{\text{ab}}$	33.66 ± 1.30^e	7.79 ± 0.57^a	285.22 ± 14.01^a
C_2	$0.91\pm0.045^{\text{b}}$	$28.90\pm1.63^{\text{ab}}$	$36.97\pm2.34^{\text{cd}}$	7.51 ± 0.89^a	$255.04\pm15.28^{\text{b}}$
C_3	$0.93\pm0.040^{\text{b}}$	$26.70\pm1.78^{\text{cd}}$	$30.20\pm1.55^{\text{f}}$	6.49 ± 0.25^c	169.29 ± 22.01^c
S_1	$0.73\pm0.059^{\text{d}}$	$22.46\pm2.49^{\text{fg}}$	$38.86\pm1.25^{\text{bc}}$	$6.18\pm0.29^{\text{cd}}$	164.34 ± 20.54^c
S_2	$0.93\pm0.025^{\text{b}}$	$21.43\pm3.07^{\text{gh}}$	$40.76\pm2.30^{\text{ab}}$	$5.57\pm0.27^{\text{de}}$	$132.47\pm15.89^{\text{de}}$
S_3	$1.01\pm0.030^{\text{a}}$	$19.59\pm0.59^{\text{h}}$	$42.38\pm1.65^{\text{a}}$	5.34 ± 0.67^e	100.86 ± 14.65^e

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

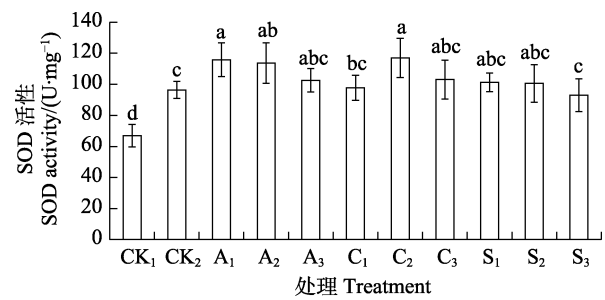
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 外源 ABA、 CaCl_2 、SA 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗 SOD、POD 活性的影响

NaCl 胁迫下外源 ABA、 CaCl_2 、SA 对油茶幼苗 SOD 活性的影响如图 1 所示。单独 NaCl 胁迫下,油茶幼苗 SOD 活性较 CK_1 有显著提高,增加 3.19 倍;较低浓度 ABA 处理下, A_1 、 A_2 的 SOD 活性显著提高,分别比 CK_2 增加 20.30%、17.92%,而 A_3 处理与 CK_2 差异不显著; C_1 、 C_3 处理与 CK_2

差异不显著, C_2 处理的 SOD 活性增幅最高,比 CK_2 增加 21.46%。不同浓度 SA 处理与 CK_2 差异均不显著, S_1 、 S_2 处理仅比 CK_2 增加 5.11%、4.37%, S_3 处理比 CK_2 减少 3.45%。说明较低浓度 ABA 和适当浓度 CaCl_2 能提高油茶幼苗 SOD 活性。

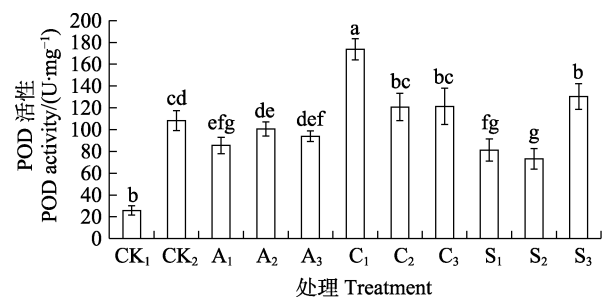
单独 NaCl 胁迫下,油茶幼苗 POD 活性较 CK_1 有显著提高,分别增加 3.19 倍;由图 2 所示,不同浓度 ABA 处理的油茶幼苗 POD 活性均较 CK_2



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

图 1 外源 ABA、CaCl₂、SA 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗 SOD 活性的影响

Fig. 1 Effects of exogenous ABA, CaCl₂ and SA on SOD activity of *C. oleifera* seedlings under NaCl stress



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

图 2 外源 ABA、CaCl₂、SA 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗 POD 活性的影响

Fig. 2 Effects of exogenous ABA, CaCl₂ and SA on POD activity of *C. oleifera* seedlings under NaCl stress

有所降低，其中 A₁ 处理比 CK₂ 显著减少 20.97%，A₂、A₃ 处理与 CK₂ 差异不显著；不同浓度 CaCl₂ 处理油茶幼苗 POD 活性较 CK₂ 呈显著提升，其中 C₁ 处理的 POD 活性增幅最高，比 CK₂ 增加 60.61%，C₂、C₃ 处理分别增加 11.51%、12.16%；S₁、S₂ 处理的 POD 活性显著下降，比 CK₂ 减少 24.93%、32.28%，而 S₃ 处理的 POD 活性则比 CK₂ 显著增加 20.45%。说明 CaCl₂ 和高浓度 SA 处理可提高油茶幼苗 POD 活性。

2.4 外源 ABA、CaCl₂、SA 对 NaCl 胁迫下各指标的相关性分析

由表 4 可知，NaCl 胁迫下油茶幼苗株高与可溶性蛋白含量、POD 活性呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），与全株干质量、质膜透性呈显著正相关（ $P<0.05$ ）；全株干质量与质膜透性、SOD 活性呈极显著正相关（ $P<0.01$ ）；根冠比与 H₂O₂ 含量、POD 活性呈极显著正相关（ $P<0.01$ ）；可溶性蛋白含量与可溶性糖含量、MDA 含量呈显著负相关（ $P<0.05$ ），与质膜透性、POD 活性呈极显著正相关（ $P<0.01$ ）；可溶性糖含量与质膜透性呈显著负相关（ $P<0.05$ ），与 MDA 含量、SOD 活性呈显著正相关（ $P<0.01$ ）；MDA 含量与 H₂O₂ 含量呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），与 SOD 活性呈显著正相关（ $P<0.05$ ）；过氧化氢含量与 SOD 活性、POD 活性呈极显著正相关（ $P<0.01$ ）；SOD 活性与 POD 活性呈显著正相关（ $P<0.05$ ）。

表 4 NaCl 胁迫下外源物质处理油茶幼苗生长和生理指标间的相关分析
Tab. 4 Correlation analysis between growth and physiological indexes of *C. oleifera* seedlings treated with exogenous substances under NaCl stress

指标 Index	株高 Plant height growth rate	全株干质量 Whole plant dry weight	根冠比 Root shoot ratio	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	可溶性糖 含量 Soluble sugar content	质膜透性 Membrane permeabil- ity	MDA 含量 MDA content	H ₂ O ₂ 含量 H ₂ O ₂ con- tent	SOD 活性 SOD ac- tivity	POD 活性 POD ac- tivity
株高	1.000	0.383*	-0.109	0.796**	-0.147	0.409*	-0.090	0.272	0.247	0.560**
全株干质量		1.000	0.088	0.269	0.009	0.545**	0.072	0.319	0.509**	0.120
根冠比			1.000	0.003	0.203	0.174	0.137	0.527**	0.129	0.498**
可溶性蛋白含量				1.000	-0.395*	0.545**	-0.399*	0.211	0.100	0.501**
可溶性糖含量					1.000	-0.371*	0.848*	0.551**	0.391*	0.282
质膜透性						1.000	-0.340	0.215	0.311	0.300
MDA 含量							1.000	0.571**	0.416*	0.243
H ₂ O ₂ 含量								1.000	0.533**	0.736**
SOD 活性									1.000	0.352*
POD 活性										1.000

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ），**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.5 外源 ABA、CaCl₂、SA 处理下油茶幼苗耐盐胁迫的综合评价

通过 NaCl 胁迫下油茶幼苗的株高、全株干质量、根冠比、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、质膜透性、MDA 含量、SOD 活性、POD 活性等 10 项抗盐相关生长和生理指标变化幅度的隶属函数值及总分排序(表 5),总分越高表示外源物质处理越能提高油茶幼苗耐盐性,不同外源物质和浓度处理的幼苗耐盐性排序为 C₃>S₃>S₂>A₂>C₂>A₁>A₃>C₁>CK₂>CK₁>S₁。说明外施 40 mmol/L CaCl₂ 最能减少 NaCl 胁迫对油茶

幼苗的伤害,其次是 200 μmol/L SA、100 μmol/L SA 处理。

3 讨论

超过一定浓度的盐胁迫会显著抑制植物生长,表现为株高减少、生物量减少、根冠比增加等^[38-39]。本研究中,单独 200 mmol/L NaCl 胁迫下油茶幼苗株高增长量、全株干质量、根冠比、可溶性蛋白、可溶性糖含量、质膜透性、MDA 含量、H₂O₂ 含量均显著升高,与作者之前研究结果相一致^[40],说明油茶幼苗具有一定的耐盐性。

表 5 NaCl 胁迫下外源物质处理油茶幼苗生长和生理指标的隶属值及排序
Tab. 5 Membership values and ranking of growth and physiological indexes of *C. oleifera* seedlings treated with exogenous substances under NaCl stress

处理 Treat- ment	隶属函数值 Membership function value										总得分 Total Points	位次 Prece- dence
	株高 Plant height	全株干 质量 Whole plant dry weight	根冠比 Root shoot ratio	可溶性蛋白 含量 Soluble protein content	可溶性糖 含量 Soluble sugar content	质膜透性 Membrane perme- ability	MDA 含量 MDA content	H ₂ O ₂ 含量 H ₂ O ₂ content	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity		
CK ₁	0.000	0.618	1.000	0.000	0.493	1.000	0.543	1.000	0.000	0.000	4.036	10
CK ₂	0.394	0.000	0.000	0.524	0.700	0.319	0.268	0.387	0.587	0.557	4.354	9
A ₁	0.471	0.350	0.745	0.048	1.000	0.430	0.000	0.446	0.978	0.403	4.871	6
A ₂	0.226	0.777	0.515	0.214	0.837	0.465	0.928	0.468	0.932	0.505	5.392	4
A ₃	0.068	0.600	0.210	0.357	0.384	0.384	0.453	0.635	0.712	0.460	4.738	7
C ₁	0.439	0.300	0.190	0.405	0.897	0.510	0.075	0.000	0.616	1.000	4.432	8
C ₂	0.629	0.073	0.680	0.762	0.827	0.316	0.181	0.115	1.000	0.641	5.224	5
C ₃	0.919	1.000	0.510	0.810	0.631	0.712	0.566	0.441	0.721	0.646	6.956	1
S ₁	0.412	0.364	0.225	0.333	0.256	0.206	0.683	0.581	0.686	0.374	3.946	11
S ₂	0.475	0.982	0.780	0.810	0.163	0.095	0.913	0.460	0.671	0.321	5.844	3
S ₃	1.000	0.664	0.745	1.000	0.000	0.000	1.000	0.701	0.521	0.706	6.337	2

可溶性蛋白和可溶性糖可作为重要的渗透调节物质,能有效地缓解盐胁迫对玉米幼苗根系和地上部生长的抑制作用^[41],本研究中,较高浓度的 CaCl₂ 和 SA 处理均显著提高幼苗可溶性蛋白含量,较低浓度的 ABA 和 CaCl₂ 处理显著提高幼苗可溶性糖含量,这与栗莉圆等^[42]对火力楠幼苗研究结果一致,可溶性糖含量的积累通过调节盐胁迫下植物细胞渗透电位及渗透保护作用,降低细胞渗透压,吸收更多的水分维持细胞膨压^[43],缓解盐害,进而维持植株正常生长。

过度积累的 Na⁺使细胞膜的选择透性丧失,质膜透性增加,电解质大量渗透^[44]。本研究发现,ABA 处理对幼苗质膜透性影响不大,较高浓度的 CaCl₂ 显著降低幼苗质膜透性,而较高浓度 SA 则

可提高幼苗质膜透性,说明外施不同物质对油茶幼苗质膜透性产生不同影响,其机制原因还有待进一步实验验证。作为植物细胞膜膜质过氧化的产物 MDA,能破坏细胞膜结构和功能^[45],其含量越高说明植物受损伤越严重^[46]。本研究发现,SA 处理和较高浓度的 ABA、CaCl₂ 处理可显著降低幼苗 MDA 含量,可能是 Ca²⁺减轻幼苗细胞膜质过氧化程度,减轻 NaCl 胁迫对油茶幼苗的氧化伤害,这与 WANG 等^[47]对黄瓜幼苗研究结果一致。H₂O₂ 含量能直接反映植物受逆境胁迫的程度^[48]。本研究发现,外施 ABA 和 SA 均显著降低油茶幼苗 H₂O₂ 含量,其中不同浓度的 SA 处理降幅更为明显,200 μmol/L SA 处理较 CK₂ 显著减少 45.03%。而较低浓度 CaCl₂ 则显著提高幼苗

H₂O₂ 含量, 仅在 40 mmol/L CaCl₂ 处理下与 CK₂ 处理的差异不显著;

SOD 和 POD 作为抗氧化酶类物质, 能降低植物体内自由基、活性氧含量, 避免膜质过氧化, 进而提高植物的抗逆能力^[49]。本研究发现, 较低浓度 ABA 和适当浓度 CaCl₂ 能提高油茶幼苗 SOD 活性, CaCl₂ 和高浓度 SA 处理可提高油茶幼苗 POD 活性。这可能是 Ca²⁺ 和钙调蛋白相结合, 进而提高抗氧化酶活性, 这与屈施旭等^[50]对火麻幼苗、PALMA 等^[51]对菜豆、周希琴等^[52]对木麻黄幼苗的研究结果一致。

综上所述, 外施适宜浓度的 ABA、CaCl₂ 和 SA 对油茶幼苗 NaCl 胁迫均有缓解作用, 经过综合评价发现外施 40 mmol/L CaCl₂ 最能减少 NaCl 胁迫对油茶幼苗的伤害, 其次是 200 μmol/L SA 和 100 μmol/L SA 处理。在海南, 靠近海边种植油茶幼苗, 可适当喷施 40 mmol/L CaCl₂, 提高幼苗耐盐性, 促进其生长。

参考文献

- [1] 庄瑞林. 中国油茶[M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2008. ZHUANG R L. Oil-tea *Camellia* of China[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [2] 贾效成, 陈良秋, 刘小玉, 刘艳菊. 海南本地油茶组培体系的建立[J]. 现代农业科技, 2018(12): 1, 5. JIA X C, CHEN L Q, LIU X Y, LIU Y J. Establishment of a tissue culture system for local *Camellia oleifera* in Hainan[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(12): 1, 5. (in Chinese)
- [3] 逮亚玲, 王灵婧, 王宁, 邵春来, 李志华. 外源水杨酸对 NaCl 胁迫下紫花苜蓿幼苗生长和生理特性的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(6): 1265-1273. LU Y L, WANG L J, WANG N, SHAO C L, LI Z H. Effects of salicylic acid on physiological characteristics and growth of alfalfa seedling under NaCl stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(6): 1265-1273. (in Chinese)
- [4] 刘广明, 李金彪, 王秀萍, 杨劲松, 陈金林, 何丽丹. 外源水杨酸对黑麦草幼苗盐胁迫的缓解效应研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 995-1002. LIU G M, LI J B, WANG X P, YANG J S, CHEN J L, HE L D. Effect of extraneous salicylic acid mitigating salt stress on ryegrass (*Lolium perenne*) seedlings[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(4): 995-1002. (in Chinese)
- [5] CUTLER S R, RODRIGUEZ P L, FINKELSTEIN R R, ABRAMS S R. Absciscic acid: emergence of a core signaling network[J]. Annual review of plant biology, 2010, 61(1): 651-679.
- [6] 沈泓, 张樱, 张轩, 姚栋萍, 贺荣华, 陈哲, 张柳, 伯斌. 盐胁迫下不同水稻品种苗期植物内源激素含量的变化特征[J]. 湖南农业科学, 2021(12): 30-35. SHEN H, ZHANG Y, ZHANG X, YAO D P, HE R H, CHEN Z, ZHANG L, BO B. Change characteristics of phytohormones contents in rice seedlings under salt stress[J]. Hunan Agriculture Sciences, 2021(12): 30-35. (in Chinese)
- [7] YU Z, DUAN X, LUO L, DAI S, DING Z, XIA G. How plant hormones mediate salt stress responses[J]. Trends in Plant Science, 2020, 25(11): 1117-1130.
- [8] KUROMORI T, SEO M, SHINOZAKI K. ABA transport and plant water stress responses[J]. Trends in Plant Science, 2018, 23(6): 513-522.
- [9] PARVEEN A, AHAMR S, KAMRAN M, MALIK Z, ALI A, RIAZ M, ABBASI G H, KHAN M, SOHAIL A B, RIZWAN M, AFZAL S, ALI S. Absciscic acid signaling reduced transpiration flow, regulated Na⁺ ion homeostasis and antioxidant enzyme activities to induce salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 24: 101808.
- [10] 张倩, 李笑佳, 张淑英. 硅对盐胁迫下棉花幼苗生长和渗透调节系统的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 110-117. ZHANG Q, LI X J, ZHANG S Y. Effects of silicon on growth and osmotic regulation of cotton seedlings under salt stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(6): 110-117. (in Chinese)
- [11] 倪祥银, 齐泽民, 廖姝, 段辉国. 外源水杨酸对 NaCl 胁迫下大豆种子萌发和幼苗生长生理的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(1): 106-111. NI X Y, QI Z M, LIAO S, DUAN H G. Effects of exogenous salicylic acid on seed germination and seedling growth physiological characteristics of soybean under NaCl stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(1): 106-111. (in Chinese)
- [12] 沙汉景, 刘化龙, 王敬国, 贾琰, 王新鹏, 邹德堂, 赵宏伟. 水杨酸调控作物耐盐性生理机制[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(3): 80-88. SHA H J, LIU H L, WANG J G, JIA Y, WANG X P, ZOU D T, ZHAO H W. Physiological mechanism of salicylic acid regulation salt tolerance of crops[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(3): 80-88. (in Chinese)
- [13] 李润枝, 靳晴, 李召虎, 王晔, 彭真, 段留生. 水杨酸提高甘草种子萌发和幼苗生长对盐胁迫耐性的效应[J]. 作物学报, 2020, 46(11): 1810-1816. LI R Z, JIN Q, LI Z H, WANG Y, PENG Z, DUAN L S. Salicylic acid improved salinity tolerance of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch during seed germination and seedling growth stages[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(11): 1810-1816.

- (in Chinese)
- [14] SHEMI R, WANG R, GHEITH E S M S, HUSSAIN H A, CHOLIDAH L, ZHANG K, ZHANG S, WANG L. Role of exogenous-applied salicylic acid, zinc and glycine betaine to improve drought-tolerance in wheat during reproductive growth stages[J]. *BMC Plant Biology*, 2021, 21(1): 1-15.
- [15] 向警, 黄倩, 鞠春燕, 黄伦霄, 赵正武. 外源褪黑素对盐胁迫下水稻种子萌发与幼苗生长的影响[J]. *植物生理学报*, 2021, 57(2): 393-401.
- XIANG J, HUANG Q, JU C Y, HUANG L X, ZHAO Z W. Effect of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth of rice under salt stress[J]. *Plant Physiology Journal*, 2021, 57(2): 393-401. (in Chinese)
- [16] 张雪蒙, 亢超, 滕元旭, 陈静怡, 崔辉梅. 外源硫化氢和水杨酸对盐胁迫下加工番茄幼苗生长与生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, 42(2): 255-262.
- ZHANG X M, KANG C, TENG Y X, CHEN J Y, CUI H M. Effects of exogenous hydrogen sulfide and salicylic acid on growth and physiological characteristics of processing tomato seedlings under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(2): 255-262. (in Chinese)
- [17] 王丹, 王璐瑶, 董家禧, 田秀平. 盐胁迫下水杨酸对苜蓿幼苗生理特性的影响[J]. *天津农学院学报*, 2022, 29(3): 19-22, 28.
- WANG D, WANG L Y, DONG J X, TIAN X P. Effects of salicylic acid on physiological characteristics of alfalfa seedlings under salt stress[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2022, 29(3): 19-22, 28. (in Chinese)
- [18] 徐雪雯, 王兴鹏, 王洪博, 李国辉, 唐茂淞, 曹振玺. 水杨酸对盐胁迫下棉苗生长及生理的调控作用[J]. *作物杂志*, 2023(3): 188-194.
- XU X W, WANG X P, WANG H B, LI G H, TANG M S, CAO Z X. Effects of salicylic acid application on the growth and physiological characteristics of cotton seedlings under salt stress[J]. *Crops*, 2023(3): 188-194. (in Chinese)
- [19] 张倩, 贺明荣, 陈为峰, 代兴龙, 王振林, 董元杰, 诸葛玉平. 外源一氧化氮与水杨酸对盐胁迫下小麦幼苗生理特性的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1254-1263.
- ZHANG Q, HE M R, CHEN W F, DAI X L, WANG Z L, DONG Y J, ZHUGE Y P. Effects of exogenous nitric oxide and salicylic acid on physiological properties of wheat seedlings under salt stress[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1254-1263. (in Chinese)
- [20] 付乃鑫, 贺明荣, 诸葛玉平, 代兴龙, 胡国庆, 董元杰. 外源 SA 对盐胁迫下冬小麦幼苗生长的缓解效应及其机理[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(3): 10-17.
- FU N X, HE M R, ZHUGE Y P, DAI X L, HU G Q, DONG Y J. Effects and mechanisms of exogenous SA alleviating the growth of winter wheat seedlings under salt stress[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(3): 10-17. (in Chinese)
- [21] 扈雪欢, 宁欢欢, 刘光照, 吴能表. 外源 SA 对盐胁迫下颠茄生理生化、氮代谢及次生代谢的影响[J]. *草业学报*, 2017, 26(11): 147-156.
- HU X H, NING H H, LIU G Z, WU N B. Effect of exogenous SA on the physiological biochemistry, nitrogen metabolism and secondary metabolism of *Atropa belladonna* under NaCl stress[J]. *Acta Agraria Sinica*, 2017, 26(11): 147-156. (in Chinese)
- [22] 周双云, 蒋晶, 高龙燕, 王令霞, 李绍鹏. 不同浓度 CaCl_2 对盐胁迫下巴西蕉幼苗生理的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(3): 449-454.
- ZHOU S Y, JIANG J, GAO L Y, WANG L X, LI S P. Effects of CaCl_2 concentration on physiology of Brazil banana seedling under NaCl stress[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(3): 449-454. (in Chinese)
- [23] 李婧男, 刘强, 李升. 生长素和氯化钙对盐胁迫下沙冬青幼苗的缓解作用[J]. *植物研究*, 2010, 30(1): 27-31.
- LI J N, LIU Q, LI S. Mitigative effect of IBA and CaCl_2 on under salt stress *Ammopiptanthus mongolicus* seedlings[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2010, 30(1): 27-31. (in Chinese)
- [24] 王茂莹, 王慧桥, 司庆臣, 张倩, 朱营营, 董元杰. 不同浓度外源一氧化氮对盐胁迫下小麦幼苗生理特性的影响[J]. *土壤通报*, 2019, 50(6): 1426-1433.
- WANG M Y, WANG H Q, SI Q C, ZHANG Q, ZHU Y Y, DONG Y J. Effects of exogenous nitric oxide at different concentrations on physiological characteristic of wheat seedlings under salt stress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6): 1426-1433. (in Chinese)
- [25] 李红, 李波, 杨墨. 盐胁迫下外源钙对苜蓿幼苗叶片离子含量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(4): 131-133.
- LI H, LI B, YANG Z. Effect of exogenous calcium on ion content in alfalfa seedling leaves under salt stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(4): 131-133. (in Chinese)
- [26] 侍瑞高, 赵慧云, 戚名扬, 党长喜, 李威, 黄慧雅, 林欢. 外源氯化胆碱和氯化钙对盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(14): 22-26.
- SHI R G, ZHAO H Y, QI M Y, DANG C X, LI W, HUANG H Y, LIN H. Effects of exogenous choline on germination and physiological characteristics of wheat under salt stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2020, 48(14): 22-26. (in Chinese)
- [27] 刘艳菊, 徐玉芬, 贾效成. 油茶低温胁迫响应机制研究进展[J]. *现代农业科技*, 2021(18): 27-29, 32.

- LIU Y J, XU Y F, JIA X C. Research progress on low temperature stress response mechanism in *Camellia oleifera*[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021(18): 27-29, 32. (in Chinese)
- [28] 傅志强, 张恒, 刘祯, 奚如春. 不同油茶品种苗对高温胁迫的生理响应及耐热性评价[J]. 林业科学研究, 2024, 37(2): 189-200.
- FU Z Q, ZHANG H, LIU Z, XI R C. Evaluation of the physiological response and heat tolerance of seedlings of different *Camellia oleifera* cultivars to high temperature stress[J]. Forest Research, 2024, 37(2): 189-200. (in Chinese)
- [29] 何小三, 周文才, 邱凤英, 龚春, 徐林初, 肖相元, 王玉娟. 不同油茶品种对干旱胁迫的响应及其抗旱性综合评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(9): 1-14.
- HE X S, ZHOU W C, QIU F Y, GONG C, XU L C, XIAO X Y, WANG Y J. Responses of different *Camellia oleifera* varieties to drought stress and the comprehensive evaluation of their drought resistance[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(9): 1-14. (in Chinese)
- [30] 董斌, 李荣喜, 洪文泓, 黄丽英, 黄永芳, 赖巧晖. 油茶干旱胁迫响应机制的研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(1): 144-149.
- DONG B, LI R X, HONG W H, HUANG L Y, HUANG Y F, LAI Q H. Research progress on drought stress response mechanism in *Camellia oleifera*[J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(1): 144-149. (in Chinese)
- [31] 刘艳菊, 徐玉芬, 于钊妍, 吴坤林, 贾效成. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下油茶幼苗生理的影响[J/OL]. 分子植物育种, (2023-08-15)[2024-09-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Ep7N7zfewyQYvp7qhYfhuaZiV0_Icy7M16ztl9-H9URWP4-9wHucubPYWtMzI4HJoTbnHoghpXg4P0jMXETOqIZ6QzwVbe2-XJOsvuKhMqll8HON6IzY3mwwjd--R5-MkZS0fYY8NFRtlQ5EkUcExlNuTc3_S00842VZLz22bafo0nst6COiellGWCKtlgWJ9i&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- LIU Y J, XU Y F, YU Z Y, WU K L, JIA X C. Effects of exogenous NO on physiology characteristics of *Camellia oleifera* seedlings under NaCl stress[J/OL]. Molecular Plant Breeding, (2023-08-15)[2024-09-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Ep7N7zfewyQYvp7qhYfhuaZiV0_Icy7M16ztl9H9URWP4-9wHucubPYWtMzI4HJoTbnHoghpXg4P0jMXETOqIZ6QzwVbe2-XJOsvuKhMqll8HON6IzY3mwwjd--R5-MkZS0fYY8NFRtlQ5EkUcExlNuTc3_S00842VZLz22bafo0nst6COiellGWCKtlgWJ9i&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [32] 彭新盛. 叶面喷施植物生长调节剂对油茶盐胁迫适应性的影响[J]. 特种经济动植物, 2023, 26(4): 43-45.
- PENG X S. The effect of foliar spraying of plant growth regulators on the adaptability of *Camellia oleifera* under salt stress[J]. Special Economic Animals and Plants, 2023, 26(4): 43-45. (in Chinese)
- [33] 王三根. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- WANG S G. Experimental course in plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2017. (in Chinese)
- [34] PATTERSON B D, MACRAE E A, FERGUSON I B. Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (IV)[J]. Analytical Biochemistry, 1984, 139(2): 487-492.
- [35] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- ZHANG Z L, QU W J. The experimental guide for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)
- [36] 白宝璋. 植物生理学测试技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- BAI B Z. Plant physiology testing technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1993. (in Chinese)
- [37] 郭海林, 刘建秀, 朱雪花, 郭爱桂. 结缕草属杂交后代抗寒性评价[J]. 草地学报, 2006, 14(1): 24-28.
- GUO H L, LIU J X, ZHU X H, GUO A G. Evaluation of cold resistance of *Zoysia* hybrids[J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, 14(1): 24-28. (in Chinese)
- [38] 张伟, 陈毓蔚, 牛亚菲, 冯悦, 侯非凡, 亢秀萍. 红花草莓‘托斯卡纳’盐胁迫下的生长发育及生理响应[J]. 北方园艺, 2023(13): 28-35.
- ZHANG W, CHEN Y W, NIU Y F, FENG Y, HOU F F, KANG X P. Growth and physiological responses of red-flowered strawberry ‘Toscana’ under salt stress[J]. Northern Horticulture, 2023(13): 28-35. (in Chinese)
- [39] 付珊, 雷婷, 金苇, 李影, 陈秀君, 陈梦丽, 陈亮. 盐胁迫对番茄幼苗生长及生理指标的影响[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版), 2023, 43(3): 9-15.
- FU S, LEI T, JIN W, LI Y, CHEN X J, CHEN M L, CHEN L. Effects of salt stress on growth and physiological indexes of tomato seedlings[J]. Journal of Hubei Normal University (Natural Science), 2023, 43(3): 9-15. (in Chinese)
- [40] 刘艳菊, 徐玉芬, 贾效成. NaCl 胁迫对油茶幼苗生理特性的影响[J]. 热带农业科学, 2021, 41(4): 11-18.
- LIU Y J, XU Y F, JIA X C. Effects of NaCl stress on physiological characteristics of *Camellia vietnamensis* seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(4): 11-18. (in Chinese)
- [41] 陈奋奇, 方鹏, 白明兴, 姬祥卓, 庄泽龙, 彭云玲. 外源脯氨酸缓解玉米幼苗盐胁迫的效应[J]. 草业科学, 2022, 39(4): 747-755.
- CHEN F Q, FANG P, BAI M X, JI X Z, ZHUANG Z L,

- PENG Y L. Mitigation of salt stress in maize seedling by exogenous proline application[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(4): 747-755. (in Chinese)
- [42] 粟莉圆, 胡颖, 梁机, 杨章旗, 陈旋, 孙明升. 几种外源物质对盐胁迫下火力楠幼苗生理特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(7): 16-21.
- SU L Y, HU Y, LIANG J, YANG Z Q, CHEN X, SUN M S. Effects of exogenous substances on physiological characteristics of *Michelia macclurei* under salt stress[J]. Journal of Northeast University, 2021, 49(7): 16-21. (in Chinese)
- [43] RAJABI D A, ZAHEBI M, LUDWICZAK A. Foliar application of salicylic acid improves salt tolerance of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench][J]. Plants, 2022, 11(3): 368.
- [44] 耿晓东, 周英, 于明华, 汪成忠, 钱剑林. NaCl 胁迫对小黄花菜生长及相关生理指标的影响[J]. 广西植物, 2021, 41(6): 930-936.
- GENG X D, ZHOU Y, YU M H, WANG C Z, QIAN J L. Effects of NaCl stress on growth and related physiological indexes in *Hemerocallis minor*[J]. Guihaia, 2021, 41(6): 930-936. (in Chinese)
- [45] GANIE S A, MOLLA K A, HENRY R J, BHAT K V, MONDAL T K. Advances in understanding salt tolerance in rice[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2019, 132(4): 851-870.
- [46] LI J T, QIU Z B, ZHANG X W, WANG L S. Exogenous hydrogen peroxide can enhance tolerance of wheat seedlings to salt stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(3): 835-842.
- [47] WANG X D, LAN Z Q, TIAN L, ZHANG X. Change of physiological properties and ion distribution by synergistic effect of Ca^{2+} and grafting under salt stress on cucumber seedlings[J]. Agronomy, 2021, 11(5): 848.
- [48] 林之林, 郝田, 于景金, 杨志民. 盐胁迫下 3 种外源物对高羊茅生理指标的影响[J]. 草业科学, 2022, 39(4): 720-730.
- LIN Z L, HAO T, YU J J, YANG Z M. Effects of three exogenous substances on the physiological indexes of tall fescue under salt stress[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(4): 720-730. (in Chinese)
- [49] MIJITI M, ZHANG Y M, ZHANG C R, WANG Y C. Physiological and molecular responses of *Betula platyphylla* Suk to salt stress[J]. Trees-Structure And Function, 2017, 31(5): 1653-1665.
- [50] 屈施旭, 孙宇, 所怡祯, 苑海鹏, 张玉红. 外源钙对盐胁迫下火麻生理特性及次生代谢产物的影响[J/OL]. 中国农业科技导报, (2024-08-09)[2024-09-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Ep7N7zfewySgoAp-MS6hStqCRNjUjeNGah37_PcE4-13wi83rGQQnPJZ6OXuw62U2GqB4e4-TIYSdZoFi2uzEdcUYPqs0afXRHvXWEmosYVELrhhlXO-hzm-fa7DzduA1VIMIPnjO8kqJ4tSQUa2ae75idxxmAaoXXY8ULtwAgeOMKOzhjQEplwKUnDwWujUXj&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- QU S X, SUN Y, SUO Y Z, YUAN H P, ZHANG Y H. Effects of exogenous calcium on physiological characteristics and secondary metabolites of *Cannabis sativa* L. under salt stress[J/OL]. Journal of agricultural science and technology, (2024-08-09)[2024-09-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Ep7N7zfewySgoAp-MS6hStqCRNjUjeNGah37_PcE4-13wi83rGQQnPJZ6OXuw62U2GqB4e4TIYSdZoFi2uzEdcUYPqs0afXRHvXWEmosYVELrhhlXO-hzm-fa7DzduA1VIMIPnjO8kqJ4tSQUa2ae75idxxmAaoXXY8ULtwAgeOMKOzhjQEplwKUnDwWujUXj&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [51] PALMA F, LLUCH C, IRIBAME C, GARCÍA-GARRIDO J M, GARCÍA N A T. Combined effect of salicylic acid and salinity on some antioxidant activities, oxidative stress and metabolite accumulation in *Phaseolous vulgaris*[J]. Plant Growth Regulation, 2009, 58(3): 307-316.
- [52] 周希琴, 吉前华. 盐胁迫下木麻黄幼苗抗氧化酶活性的变化及 Ca^{2+} 对它的调控[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(2): 184-186.
- ZHOU X Q, JI Q H. Changes in antioxidant enzyme activities in *Casuarina equisetifolia* seedlings under NaCl stress and Ca^{2+} regulation in them[J]. Plant Physiology Communications, 2004, 40(2): 184-186. (in Chinese)