

2,4-表油菜素内酯对盐胁迫下大豆种子萌发及幼苗生理生化的影响

闫艳华 杨雅奇 杨 阳

(吕梁学院生物与食品工程系, 033000, 山西吕梁)

摘 要 研究 2,4-表油菜素内酯 (EBL) 对盐胁迫下大豆种子萌发及幼苗生理生化的影响, 采用 0、 10^{-12} 、 10^{-11} 、 10^{-10} 和 10^{-9} mol/L 5 个浓度梯度的 EBL 浸种处理 0、50、100、150 和 200 mmol/L NaCl 胁迫下的大豆种子。结果表明, 随着 NaCl 胁迫程度的不断增加, 大豆的根长、株高、发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数及含水量均呈逐渐下降的趋势, 不同浓度 EBL 浸种对大豆因盐胁迫产生的抑制作用有不同程度的缓解作用。在 100 mmol/L 的 NaCl 胁迫下, EBL 浸种的大豆幼苗体内脯氨酸含量、抗氧化酶活性、叶绿素含量、可溶性蛋白及可溶性糖含量显著上升, 丙二醛含量显著下降。 10^{-10} mol/L EBL 处理对大豆在盐胁迫下的缓解作用最明显。

关键词 大豆; 盐胁迫; 2,4-表油菜素内酯 (EBL); 生理生化; 发芽指标

土壤盐渍化是全世界范围内影响农业生产的一个重要问题, 我国是土壤盐渍化最为严重的国家之一, 据统计^[1], 盐渍化土地占总耕地面积的 6.6%, 并且有不断扩大的趋势。当土壤中的盐浓度过高时, 大量的 Na^+ 在植物细胞内积聚, 会破坏细胞钠钾平衡, 引发离子紊乱, 同时引发渗透失水, 从而造成细胞功能失调^[2-3]。因此, 土壤盐渍化会对植物的生长发育造成严重破坏, 使农业生产力遭受损失, 进而影响经济。大豆是我国重要的粮食作物, 在保障粮食安全方面发挥着极其重要的作用, 研究^[4-7]发现, 在盐胁迫处理下, 大豆种子发芽率和芽长受到抑制, 幼苗生长发育缓慢, 生物量和产量降低。

油菜素内酯 (brassinosteroids, BRs) 是一种天然植物激素, 广泛分布于植物体内, 参与多种生理过程, 2,4-表油菜素内酯 (EBL) 是一类具有高活性人工合成的 BRs 类似物, 可促进细胞的生长与分裂, 具有增强植物光合作用和抗逆生理的作用^[8]。近年来, 研究发现盐胁迫下在小麦^[9]、番茄^[10]、水稻^[11]和高粱^[12]等作物上施用 EBL 后提高了其耐盐性。Yue 等^[13]指出, 外施 EBL 可调节抗氧化功能蛋白的表达, 缓解因盐胁迫而导致的氧化损伤, 保护光合器官的功能稳定性, 提升抗氧化能力, 减轻离子毒害作用, 最终增强了刺槐的耐盐性。王晚霞等^[14]研究发现, EBL 能够改善垂丝海棠的光合能力、提高叶片抗氧化酶活性以及增强生物膜稳定性, 从而缓解盐胁迫对幼苗的危害。近年来, 关于

EBL 在大豆中的应用研究逐渐增多。Pereira 等^[15]研究表明, EBL 诱导气孔密度和指数的增加, 以及叶绿素含量和电子传输速率的提升, 显著提高了光系统 II 的效率, 改善水涝条件下气体交换; 同时 EBL 减轻了水涝对维管柱和中柱的影响, 维持根结构的完整, 表明 EBL 可以提高大豆的耐涝性。Chen 等^[16]研究了大豆中脱水诱导的 *GmMYB14* 基因在调控植物结构、高密度产量和抗旱性方面的作用, 发现 BRs 参与 *GmMYB14-OX* 植物结构的调控。但 EBL 浸种后对盐胁迫下大豆种子萌发和幼苗生理生化作用的调控机理却鲜有研究。因此, 本试验探究盐胁迫下 EBL 浸种对大豆种子萌发及幼苗生长的影响, 设置 EBL 和 NaCl 浓度双梯度试验, 筛选出能有效缓解盐害抑制作用的 EBL 浓度, 为盐渍化地区的大豆种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2024 年 3 月–2024 年 6 月在吕梁学院花木实验室 (37.58° N, 111.14° E) 进行。以大豆品种“汾豆 65” (购买于山西金三鼎农业科技有限公司) 为试验材料。EBL $\geq 99\%$ (分析纯) 购买于北京索莱宝科技有限公司。

1.2 试验设计

挑选大小一致、饱满的大豆种子, 用 0.2% NaClO 清洗消毒 10 min, 随后将种子用去离子水反复冲洗, 确保干净, 再用吸水纸吸除种子表面多余

作者简介: 闫艳华, 主要从事植物生长与发育研究, E-mail: yanhua19852008@163.com

基金项目: 吕梁市科技局社会发展领域重点项目 (2023SHFZ33)

收稿日期: 2025-06-13; 修回日期: 2025-08-20; 网络出版日期: 2025-09-30

水分。分别配制 10^{-12} (EBL1)、 10^{-11} (EBL2)、 10^{-10} (EBL3) 和 10^{-9} mol/L (EBL4) 浓度梯度的 EBL, 将种子浸入对应的溶液, 处理 24 h, 蒸馏水处理为对照 (EBL0)。浸种结束后, 挑选籽粒饱满、大小一致的种子播种于 50 穴深 9 cm 育苗盘, 以营养土和蛭石体积比为 2:1 的基质进行培养。每个处理 50 粒种子, 置于 25 °C/20 °C (昼/夜) 恒温培养箱中, 光周期为 16 h/8 h (光照/黑暗), 湿度 50%~60%。向花盆中分别加入 0、50、100、150 和 200 mmol/L 的 NaCl 溶液, 培养期间始终保持土壤湿润, 每个处理 3 个重复。CK 为蒸馏水浸种无盐处理。

1.3 测定指标与方法

参照作物种子发芽试验标准^[7]测定发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数。发芽势 (%) = (第 5 天种子发芽总数/种子总数) × 100; 发芽率 (%) = (第 8 天种子发芽总数/种子总数) × 100; 发芽指数 = $\sum G_t/D_t$ (G_t 为第 t 天的发芽数, D_t 为相应发芽的天数); 活力指数 = 发芽指数 × 幼苗鲜重。21 d 后, 将每个处理组取 7 株大豆幼苗用蒸馏水清洗并擦净, 在根茎结合部剪断分为地上部分和地下根系 2 个部分, 用量尺直接测量茎基部至最高生长点 (包括叶片) 的距离为株高, 用量尺直接测量茎基部至根尖的距离为根长。参考范翠枝等^[10]的方法计算含水量; 用乙醇提取法测定叶绿素相对含量^[18]; 参考王学奎^[19]的方法测定可溶性糖和可溶性蛋白含量; 用磺基水杨酸法测定脯氨酸 (Pro) 含量; 使用硫代巴比妥酸法测定丙二醛 (MDA) 含量; 用氮蓝四唑还原法定量检测超氧化物歧化酶 (SOD) 活性; 用紫外吸收法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性; 用愈创木酚比色法测定过氧化物酶 (POD) 活性^[19]。每个生理指标测定 3 个生物学重复, 计算平均值。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 软件对数据进行预处理并作图, 借助 SPSS 27.0 开展单因素显著性方差分析。

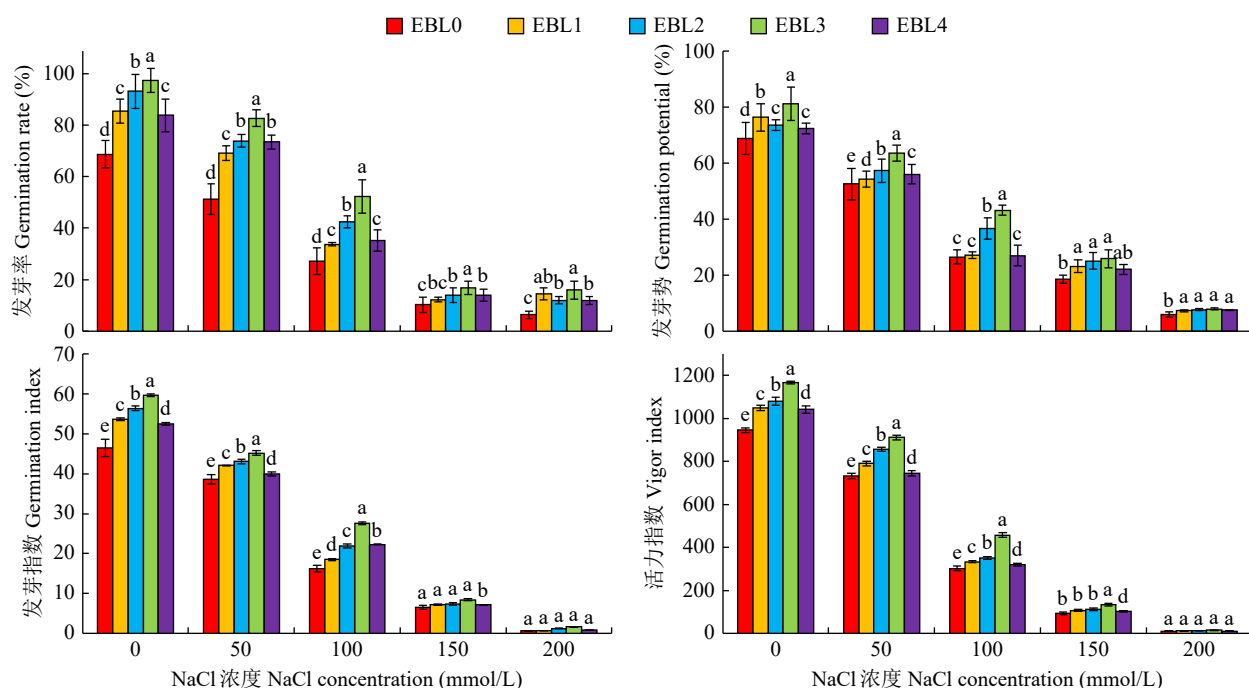
2 结果与分析

2.1 不同浓度 EBL 对盐胁迫下大豆发芽指标及生长指标的影响

2.1.1 对盐胁迫下大豆发芽指标的影响 从图 1 可知, NaCl 胁迫对大豆种子发芽均有显著影响, 随着盐胁迫浓度的提升, 大豆种子的发芽指标逐渐降低。非盐胁迫下, 大豆种子的发芽率、发芽势、发

芽指数和活力指数随 EBL 浓度升高呈现先升高后降低的趋势, EBL3 处理后发芽指标均显著高于其他处理组。50 和 100 mmol/L NaCl 处理时, 不同 EBL 处理不同程度地提高大豆种子的发芽指标, 在 EBL3 处理时达到峰值, EBL4 处理后大豆种子发芽指标均显著低于 EBL3, 50 mmol/L NaCl 处理时 EBL3 与 EBL0 处理相比, 发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别提高 61.27%、21.06%、16.78% 和 24.60%, EBL4 处理与 EBL3 处理相比发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别降低 11.15%、11.83%、11.45% 和 18.21%。150 和 200 mmol/L NaCl 处理时, 盐浓度过高抑制了大豆种子萌发指标, 随着 EBL 处理浓度升高, 大豆种子发芽指标呈现先上升后下降的趋势, 且同样在 EBL3 处理时各项指标达到峰值, 但 200 mmol/L NaCl 处理时各发芽指标在 EBL1~EBL4 处理间差异不显著, 说明随着盐胁迫程度升高, 大豆种子萌发指标受到严重抑制, EBL 处理作用不明显。由此可见, EBL 浸种处理对盐胁迫下大豆种子的萌发影响具有缓解效果, 不同浓度的 EBL 缓解程度不同, EBL3 浸种处理对缓解盐胁迫下大豆种子的发芽效果最佳。

2.1.2 对盐胁迫下大豆幼苗根长和株高的影响 从图 2 可得, 随着 NaCl 浓度的升高, 其根长和株高呈现逐渐降低趋势。非盐胁迫下, EBL3 处理的根长较 EBL0、EBL1、EBL2 和 EBL4 处理分别增加 15.43%、15.12%、10.65% 和 8.71%。EBL3 处理的株高较 EBL0、EBL1、EBL2 和 EBL4 处理分别增加 9.54%、7.98%、1.07% 和 6.68%。50 和 100 mmol/L NaCl 处理时, 与 EBL0 处理相比, 不同浓度的 EBL 浸种处理显著提升大豆幼苗根长和株高, EBL3 处理的大豆幼苗根长和株高达到峰值。100 mmol/L NaCl 处理时, EBL3 处理时根长较 EBL0、EBL1、EBL2 和 EBL4 处理分别增加 55.21%、36.94%、25.67% 和 22.36%。EBL3 处理的株高较 EBL0、EBL1、EBL2 和 EBL4 处理分别增加 44.83%、23.70%、32.07% 和 16.58%。说明 EBL 能缓解盐胁迫对大豆生长发育的抑制作用, 其中 EBL3 处理效果最佳。150 和 200 mmol/L NaCl 处理时, 大豆幼苗受到严重的 NaCl 胁迫, 植株生长极其缓慢。但与 EBL0 相比, EBL1~EBL4 处理均显著增加大豆的根长和株高, EBL3 处理株高和根长达峰值。200 mmol/L NaCl 处理时, EBL1、EBL2 和 EBL4 浸种处理对根长的影响差异不显著。



同一 NaCl 浓度处理组中的不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Different lowercase letters within the same NaCl concentration group indicate significant differences at the $P < 0.05$ level among treatments. The same below.

图 1 不同浓度 NaCl 处理下不同浓度 EBL 浸种对大豆种子发芽的影响

Fig.1 Effects of seed soaking with different concentrations of EBL on the germination of soybean seeds under different NaCl treatments

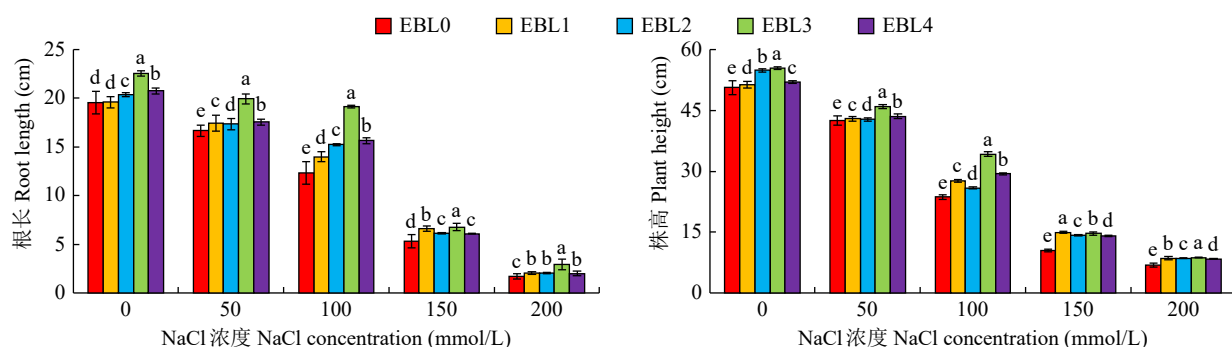


图 2 不同浓度 NaCl 处理下不同浓度 EBL 浸种对大豆幼苗根长和株高的影响

Fig.2 Effects of seed soaking with different concentrations of EBL on root length and plant height of soybean seedlings under different NaCl treatments

2.2 不同浓度 EBL 对盐胁迫下大豆幼苗含水量的影响

从图 3 可知, 大豆幼苗含水量随着 NaCl 浓度的升高呈现下降的趋势。非盐胁迫下, EBL3 浸种处理的大豆含水量比 EBL0、EBL1、EBL2 和 EBL4 处理分别提高 13.18%、6.58%、6.09%和 19.16%。50 和 100 mmol/L NaCl 处理的含水量在 EBL3 浸种处理时显著高于其他处理组。大豆含水量随着 EBL 浸种浓度的上升呈现先上升后下降的趋势。在 100 mmol/L NaCl 处理后, EBL3 处理含水量比 EBL0、EBL1、EBL2 和 EBL4 处理分别增加 36.93%、

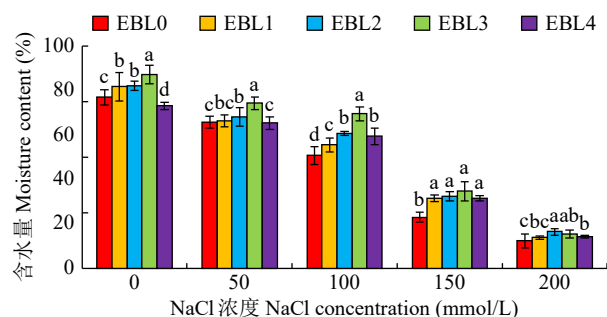


图 3 不同浓度 NaCl 处理下不同浓度 EBL 浸种对大豆幼苗含水量的影响

Fig.3 Effects of seed soaking with different concentrations of EBL on moisture content of soybean seedlings under different NaCl treatments

25.15%、14.59%和 17.03%。150 mmol/L NaCl 处理时, EBL1~EBL4 浸种较 EBL0 浸种处理显著提升幼苗含水量, 但不同浸种处理间无显著差异, 即各 EBL 处理对盐胁迫下大豆含水量的影响无明显效果。综上所述, 外源激素 EBL 可以有效缓解盐胁迫对大豆幼苗含水量的降低, 增强大豆幼苗的抗盐能力, 其中 EBL3 处理效果最佳。

2.3 不同浓度 EBL 对盐胁迫下大豆幼苗叶绿素含量的影响

由前期试验测得的大豆根长、株高、发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、含水量 7 个指标综合分析, 150 和 200 mmol/L NaCl 胁迫时, 大豆种子萌发和幼苗生长受到严重抑制, 而 100 mmol/L NaCl 胁迫虽对大豆生长有抑制, 但程度远低于前两者, 同时该浓度下激素对大豆的作用效果较为突出, 因此选用 100 mmol/L NaCl 胁迫进行后期试验。100 mmol/L NaCl 处理下, 不同浓度 EBL 浸种对大豆种子叶绿素含量的影响见图 4。100 mmol/L NaCl 处理与 CK 组相比, 大豆的叶绿素含量显著降低。与 EBL0 相比, EBL 处理后大豆中叶绿素含量有不同程度的上升, 且 EBL1~EBL4 各处理间差异显著。EBL3 处理时叶绿素含量最高, 较 EBL0、EBL1、EBL2 和 EBL4 处理分别增加 41.12%、30.17%、14.83%和 23.79%。因此, 10^{-10} mol/L EBL 缓解盐胁迫下大豆幼苗叶绿素含量降低效果最好。

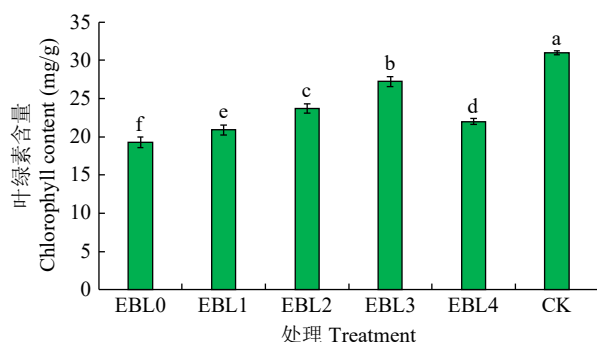


图 4 100 mmol/L NaCl 处理下不同浓度 EBL 浸种对大豆幼苗叶绿素含量的影响

Fig.4 Effects of seed soaking with different concentrations of EBL on chlorophyll content of soybean seedlings under 100 mmol/L NaCl treatment

2.4 不同浓度 EBL 对盐胁迫下大豆幼苗渗透调节物质含量的影响

2.4.1 对盐胁迫下大豆幼苗 MDA 含量的影响 由图 5 可知, 100 mmol/L NaCl 处理后, 与 CK 相比显著升高大豆幼苗的 MDA 含量。与 EBL0 处理相

比, EBL 处理后显著降低了大豆幼苗中 MDA 的含量, 且 EBL3 处理时 MDA 含量最低, 比 EBL0、EBL1、EBL2、EBL4 处理分别降低 30.41%、14.08%、5.88%、10.66%。由此可见, NaCl 胁迫会使大豆幼苗 MDA 含量升高, EBL 浸种处理后可有效降低大豆幼苗 MDA 含量, 减少膜脂过氧化, 缓解 NaCl 胁迫对大豆幼苗的伤害。

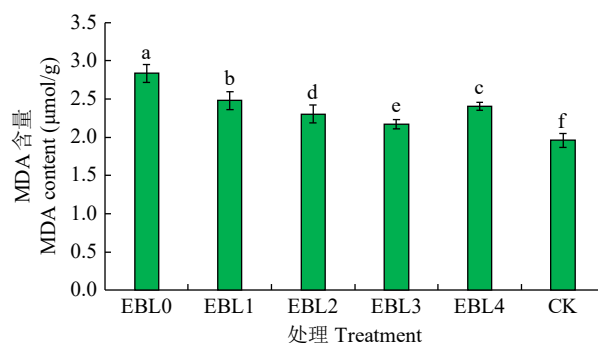


图 5 100 mmol/L NaCl 处理下不同浓度 EBL 浸种对大豆幼苗 MDA 含量的影响

Fig.5 Effects of seed soaking with different concentrations of EBL on MDA content of soybean seedlings under 100 mmol/L NaCl treatment

2.4.2 对盐胁迫下大豆幼苗 Pro 含量的影响 从图 6 可以看出, 100 mmol/L NaCl 处理与 CK 相比, 显著提升了大豆的 Pro 含量。EBL 浸种后与 EBL0 处理的大豆中 Pro 含量相比, 有不同程度的上升。在 EBL3 处理时达到峰值, 与其他处理差异显著, 较 EBL0、EBL1、EBL2、EBL4 处理分别增加 105.75%、80.23%、23.67%和 48.09%。由此可见, NaCl 胁迫和较低浓度的 EBL 浸种会使大豆幼苗的 Pro 含量增加, 提高大豆幼苗抗盐性, EBL4 浸种浓度处理时的促进效果有所回落。

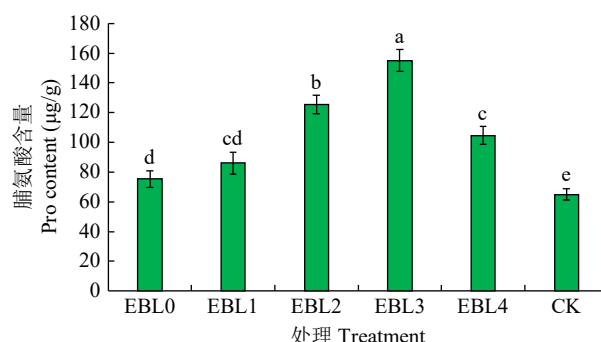


图 6 100 mmol/L NaCl 处理下不同浓度 EBL 浸种对大豆幼苗 Pro 含量的影响

Fig.6 Effects of seed soaking with different concentrations of EBL on Pro content of soybean seedlings under 100 mmol/L NaCl treatment

2.4.3 对盐胁迫下大豆幼苗可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响 由图 7 可知, 100 mmol/L NaCl 处理下 (EBL0) 与 CK 相比, 大豆的可溶性蛋白和可溶性糖含量显著降低。EBL 浸种后大豆中可溶性蛋白含量和可溶性糖含量与 EBL0 处理相比, 均有不同程度的上升, 在 EBL3 处理时达到峰值, EBL3 处理后可溶性蛋白含量显著高于其他处理, EBL3 处理后可溶性糖含量与 EBL0、EBL1、EBL4 处理有显著差异, 与 EBL2 之间无显著差异。EBL3 浸种处理可溶性糖含量比 EBL0、EBL1、EBL2、EBL4 处理分别增加 90.53%、44.22%、17.15% 和 37.12%, 可溶性蛋白含量分别增加 345.03%、220%、38.56% 和 31.76%。由此可得, NaCl 胁迫抑制大豆幼苗可溶性蛋白和可溶性糖的积累, EBL 浸种处理可缓解 NaCl 胁迫的抑制作用, 提高可溶性蛋白和可溶性糖的积累, 加强渗透压调节能力。

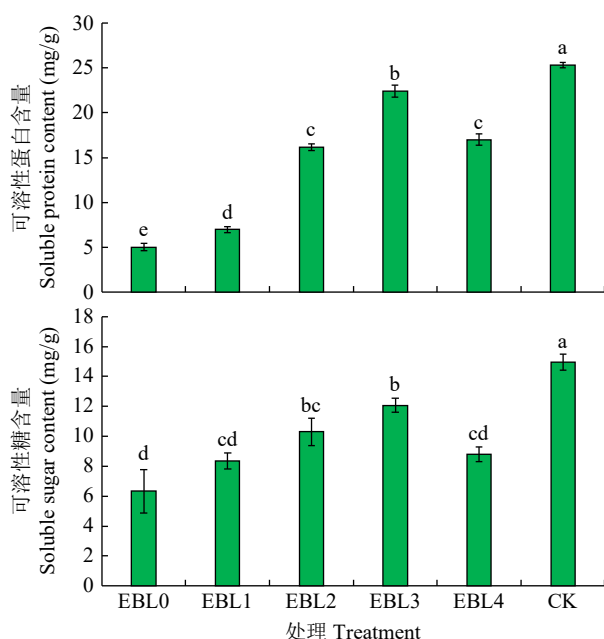


图 7 100 mmol/L NaCl 处理下不同浓度 EBL 浸种对大豆幼苗可溶性蛋白和糖含量的影响

Fig.7 Effects of seed soaking with different concentrations of EBL on soluble protein and soluble sugar contents of soybean seedlings under 100 mmol/L NaCl treatment

2.5 不同浓度 EBL 对盐胁迫下大豆幼苗抗氧化酶活性的影响

由图 8 可知, 100 mmol/L NaCl 处理显著降低大豆的 SOD、POD 和 CAT 活性。EBL 浸种后, 大豆幼苗内的 3 种酶活性均有不同程度的上升, 在 EBL3 处理时达到最高。SOD 和 POD 活性, EBL3 处理显著高于其他处理组。EBL3 处理后 CAT 活性显著高于 EBL0、EBL1 和 EBL4 处理组, 但与 EBL2

之间无显著差异。EBL3 处理后 SOD 活性比 EBL0、EBL1、EBL2、EBL4 处理分别增加 216.06%、164.02%、71.15% 和 95.93%。EBL3 处理后 POD 活性比 EBL0、EBL1、EBL2、EBL4 处理分别增加 200.61%、145.54%、20.68% 和 44.19%。EBL3 处理的 CAT 活性比 EBL0、EBL1、EBL2、EBL4 处理分别增加 97.87%、54.35%、13.76% 和 31.45%。由此可得, NaCl 胁迫降低大豆幼苗抗氧化酶活性, EBL 浸种处理后抗氧化酶活性有不同程度的增加, 其中 EBL3 处理效果最佳, 说明外源 EBL 可以有效提高 NaCl 胁迫下大豆幼苗清除活性氧的能力, 提高其抗盐性。

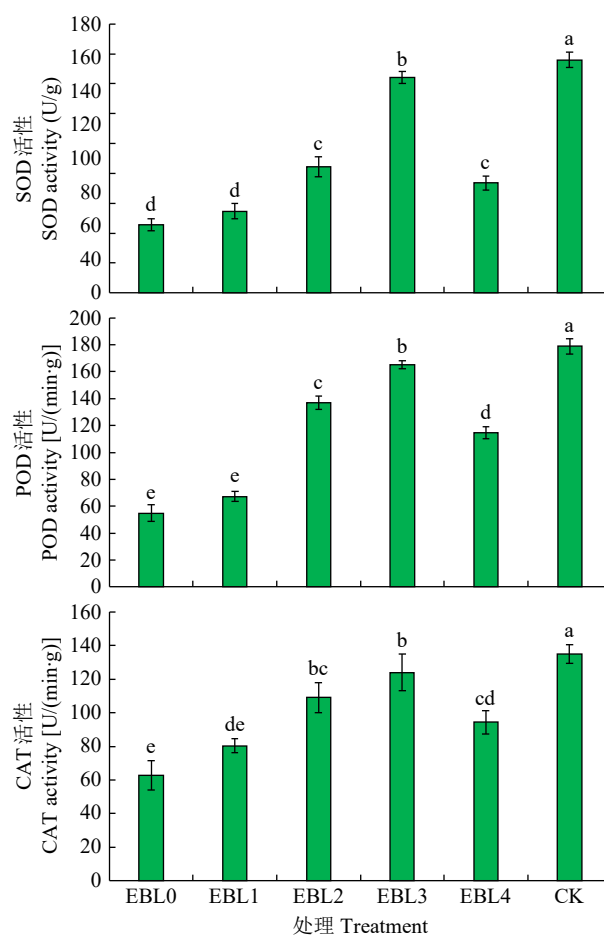


图 8 100 mmol/L NaCl 处理下不同浓度 EBL 浸种对大豆幼苗 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

Fig.8 Effects of seed soaking with different concentrations of EBL on SOD, POD and CAT activities of soybean seedlings under 100 mmol/L NaCl treatment

3 讨论

我国是土壤盐渍化最为严重的国家之一, 盐渍化程度的加剧对大豆生长发育形成了严峻挑战, 大豆的种植安全面临着巨大威胁。本研究中, 大豆的

根长、株高、发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数以及含水量随着盐浓度的增加而降低。可能由于土壤中 NaCl 浓度增加导致渗透压增加, 植物细胞形成生理性缺水, 此时土壤中有水也会造成植物吸水困难, 且盐碱土壤结块影响植物呼吸; 同时植物吸收土壤中过量的 Na^+ 和 Cl^- , 造成离子代谢混乱和离子毒害; NaCl 胁迫打破土壤正常的酸碱平衡, 植物生长发育的必需金属元素, 比如铁、镁离子形成难溶解盐, 有效游离离子减少, 造成植物缺乏营养^[20-21]。施娴等^[22]在 0、50、100、150 mmol/L NaCl 浓度下对 3 个苦荞品种幼苗生长指标评价, 结果发现不同苦荞品种干重、鲜重、株高、根长和茎粗均随着盐胁迫浓度的升高而呈下降趋势。李峰等^[23]研究不同盐胁迫对燕麦生长及生理指标的影响, 结果表明, 盐胁迫导致 2 个不同品种燕麦的出苗率、干重、鲜重和株高均降低, 且下降程度随着盐胁迫浓度增大而加剧。

长期以来科学家通过培育新品种、抗性锻炼、增加外源物质和基因工程等方法来提高植物的抗盐性^[24]。BRs 是一种甾体物质, 有 70 多种, 其中 EBL 是人工合成的、活性较强的种类之一, 被广泛用作外源激素来提高植物的抗逆性^[25]。本研究中不同 EBL 浸种后大豆发芽指标有不同程度的提升, BRs 影响植物作用机理类似于细胞分裂素作用, 通过激活细胞周期相关基因来促进细胞分裂和伸长, 从而提高植物生长量^[26], BRs 合成异常的植株个体矮小, 生物量小^[27]。叶绿素是植物进行光合作用的关键色素, 其含量的高低直接影响光合作用的效率。植物受到盐害后, 抑制叶绿素形成, 光合作用速率降低, 叶绿素含量降低^[21]。BRs 可能通过调节相关基因的表达, 增强叶绿素合成酶的活性, 促进叶绿素的合成, 盐胁迫后施用 EBL 可保护叶绿素结构, 提高光合作用酶活性, 缓解光合色素的损伤, 进而增强光合效率, 王淑娟等^[28]研究发现外源喷 0.05 mg/L 的 EBL 对盐胁迫下枸杞幼苗叶绿素 a 增加 10.68%, 叶绿素 b 增加 12.31%, 叶绿素总含量增加 6.57%, 光合参数也有不同程度的增加。

盐胁迫下, 植物细胞受到伤害产生活性氧 (ROS), 植物抗氧化酶系统清除 ROS, 当产生 ROS 超过自身清除能力, 植物受到氧化胁迫。BRs 通过激活盐应激通路减少 ROS 和 MDA 的产生, 以及增强抗氧化酶 SOD、POD 和 CAT 等活性, 缓解盐胁迫对植物的伤害。SOD 主要作用把超氧阴离子转化为 H_2O_2 , POD 和 CAT 把 H_2O_2 转化成无伤害的水和氧气, 缓解对细胞的毒害作用^[26]。侯汶君

等^[29]研究盐胁迫下喷施外源 EBL 对湖南稷子的影响, 结果发现, 150 mmol/L NaCl 胁迫下喷施 10 $\mu\text{g/L}$ 的 EBL 后超氧阴离子比不喷施下降了 38.89%, MDA 下降了 38.11%, SOD 上升了 30.46%, POD 上升了 20.49%, CAT 上升了 50.65%。本试验结果显示, 采用 10^{-10} mol/L EBL 浸种的大豆, 其 POD、CAT 和 SOD 的活性显著高于未处理组及其他浓度处理组。

BRs 还可促进渗透性物质的合成, 进而调节植物细胞渗透平衡; 可溶性糖、Pro、有机酸、可溶性蛋白是调节植物细胞渗透平衡的主要物质。研究^[25-26]发现油菜素内酯诱导脯氨酸合成酶相关基因表达上升, 降低 Pro 脱氢酶基因表达, 减少 Pro 降解, 同时激活信号通路, 增加细胞中 Na^+ 外排, 减少 K^+ 的外排, 调节细胞中 Na^+ 和 K^+ 平衡, 实现渗透调节。研究 EBL 对盐胁迫下枸杞幼苗影响^[28]发现, 150 mmol/L NaCl 胁迫下, 叶面喷洒 EBL 与喷洒蒸馏水相比, 可溶性蛋白、可溶性糖和 Pro 含量分别显著增加 57.00%, 86.54% 和 45.17%, 通过合成渗透性物质, 调节细胞内外渗透平衡, 缓解盐胁迫带来的伤害。尚秉琛等^[30]研究盐胁迫下油菜素内酯对水稻幼苗的影响时发现, 在 100 mmol/L 的 NaCl 模拟试验中, 油菜素内酯引发的水稻幼苗渗透性物质有不同程度的增加, 可溶性糖含量最高提升 37.51%, Pro 含量提升 21.40%, 其中 1.0 mg/L 的引发浓度效果最佳。

4 结论

EBL3 处理能有效缓解 NaCl 胁迫下对大豆种子萌发和幼苗的伤害, 提高种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数, 增加幼苗株高和根长, 维持幼苗的水分平衡和光合色素含量, 提高渗透调节物质含量和抗氧化酶系统能力, 降低盐胁迫对大豆细胞的伤害, 增强大豆幼苗的抗盐性。

参考文献

- [1] Li J G, Pu L J, Han M F, et al. Soil salinization research in China: advances and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(3): 943-960.
- [2] Shahid S A, Abdelfattah M A, Taha F K. Developments in soil salinity assessment and reclamation: innovative thinking and use of marginal soil and water resources in irrigated agriculture. New York, London: Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] Shrivastava P, Kumar R. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2015, 22(2): 123-131.
- [4] Phang T H, Shao G H, Lam H M. Salt tolerance in soybean. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(10): 1196-1212.

- [5] Ni X L, Wang Y A, Dai L Q, et al. The transcription factor *GmbZIP131* enhances soybean salt tolerance by regulating flavonoid biosynthesis. *Plant Physiology*, 2025, 197(3): 92.
- [6] Tong K Q, Yan L, Riaz M, et al. Mechanisms of Lanthanum-mediated mitigation of salt stress in soybean (*Glycine max* L.). *Physiologia Plantarum*, 2024, 176(4): e14452.
- [7] 刘欣玥, 郭潇阳, 王欣茹, 等. 大豆萌发期耐盐性鉴定方法建立及耐盐大豆资源筛选. *作物学报*, 2024, 50(8): 2122-2130.
- [8] 白明义, 彭金荣, 傅向东. 赤霉素和油菜素内酯信号通路双重调控助力小麦新一轮“绿色革命”. *植物学报*, 2023, 58(2): 194-198.
- [9] El-Feky S S, Abo-Hamad S A. Effect of exogenous application of brassinolide on growth and metabolic activity of wheat seedlings under normal and salt stress conditions. *Annual Research & Review in Biology*, 2014, 4(24): 3687.
- [10] 范翠枝, 吴馨怡, 关欣, 等. 油菜素内酯浸种对盐胁迫番茄种子萌发的影响及其生理机制. *生态学报*, 2021, 41(5): 1857-1867.
- [11] Wu J S, Mu D W, Feng N J, et al. Integrated analyses reveal the physiological and molecular mechanisms of brassinolide in modulating salt tolerance in rice. *Plants*, 2025, 14(10): 1555.
- [12] 郭小倩. 油菜素内酯作用于盐胁迫条件下高粱的效应及机理研究. 扬州: 扬州大学, 2024.
- [13] Yue J M, Fu Z Y, Zhang L, et al. The positive effect of different 24-epiBL pretreatments on salinity tolerance in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings. *Forests*, 2018, 23(11): 1016-1028.
- [14] 王晚霞, 高立杨, 张瑞, 等. 2,4-表油菜素内酯对盐胁迫下垂丝海棠光合及生理特性的影响. *果树学报*, 2021, 38(9): 1479-1490.
- [15] Pereira Y C, Silva F R D, Silva B R S D, et al. 24-epibrassinolide induces protection against waterlogging and alleviates impacts on the root structures, photosynthetic machinery and biomass in soybean. *Plant Signaling & Behavior*, 2020, 15(11): 1805885.
- [16] Chen L M, Yang H L, Fang Y S, et al. Overexpression of *GmMYB14* improves high-density yield and drought tolerance of soybean through regulating plant architecture mediated by the brassinosteroid pathway. *Plant Biotechnology Journal*, 2021, 19(4): 702-716.
- [17] 全国农作物种子标准化技术委员会. 农作物种子检验规程发芽试验: GB/T 3543.4-1995. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [18] 洪宇. ‘紫枝’系列玫瑰对盐碱胁迫的生理响应机制研究. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [19] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [20] Hualpa-Ramirez E, Carrasco-Lozano E C, Madrid-Espinoza J, et al. Stress salinity in plants: new strategies to cope with in the foreseeable scenario. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 208: 108507.
- [21] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59(1): 651-681.
- [22] 施娟, 李洪有, 卢丙越, 等. 3 个苦荞品种对盐胁迫的生理响应及耐受性评价. *作物杂志*, 2022(3): 149-154.
- [23] 李峰, 高宏云, 张翀, 等. 盐胁迫对燕麦生长及生理指标的影响. *作物杂志*, 2024(6): 140-146.
- [24] 王俭珍, 刘倩, 高妮妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展. *生态学报*, 2017, 37(16): 5565-5577.
- [25] Sharma J, Sharma A. Role of brassinosteroids in plants responses to salinity stress: a review. *Journal of Applied and Natural Science*, 2022, 14(2): 582-599.
- [26] 权梦萍, 徐佳慧, 尹佳茗, 等. 油菜素内酯调控植物响应非生物逆境胁迫的生理机制. *植物保护学报*, 2023, 50(1): 22-31.
- [27] Tong H N, Chu C C. Functional specificities of brassinosteroid and potential utilization for crop improvement. *Trends in Plant Science*, 2018, 23(11): 1016-1028.
- [28] 王淑娟, 李琳娜, 王晓丽, 等. 外源 24-表油菜素内酯对盐胁迫下枸杞幼苗生理特性的影响. *华北农学报*, 2025, 40(2): 98-106.
- [29] 侯汶君, 麻冬梅, 张玲, 等. 叶面喷施表油菜素内酯对湖南稷子耐盐性的调控作用. *西北植物学报*, 2024, 44(4): 517-528.
- [30] 尚秉琛, 何昊, 李丹丹, 等. 油菜素内酯引发对盐胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响. *江西农业大学学报*, 2023, 45(4): 795-805.

Effects of 2,4-Epibrassinolide on Seed Germination and Seedling Physiology and Biochemistry of Soybean under Salt Stress

Yan Yanhua, Yang Yaqi, Yang Yang

(Department of Biological and Food Engineering, Lyuliang University, Lüliang 033000, Shanxi, China)

Abstract To investigate the effects of 2,4-epibrassinolide (EBL) on seed germination and seedling physiological and biochemical characteristics of soybean under salt stress, soybean seeds that were soaked in five concentrations of EBL (0 , 10^{-12} , 10^{-11} , 10^{-10} , and 10^{-9} mol/L) were subjected to NaCl stress at 0 , 50 , 100 , 150 , and 200 mmol/L. The results showed that with the increasing severity of NaCl stress, the root length, plant height, germination rate, germination potential, germination index, vigor index, and moisture content of soybean all showed a gradual downward trend, while seed soaking with different concentrations of EBL alleviated the inhibitory effects of salt stress on soybean to varying degrees. Under 100 mmol/L NaCl stress, the proline content, antioxidant enzyme activities, chlorophyll content, soluble protein content, and soluble sugar content in EBL-soaked soybean seedlings significantly increased, whereas the malondialdehyde content significantly decreased. Seed soaking with 10^{-10} mol/L EBL treatment exhibited the most pronounced alleviating effect on soybean under salt stress.

Key words Soybean; Salt stress; 2,4-epibrassinolide (EBL); Physiology and biochemistry; Germination index