

闫艳华, 曾慧琳, 杨 阳. 油菜素内酯浸种对盐胁迫下曼陀罗种子萌发的影响及其生理机制[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(2): 355-361.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.02.016

# 油菜素内酯浸种对盐胁迫下曼陀罗种子萌发的影响及其生理机制

闫艳华, 曾慧琳, 杨 阳

(吕梁学院生物与食品工程系, 山西 吕梁 033000)

**摘要:** 在全世界范围内, 土壤盐渍化日渐严重, 严重威胁植物的生长。为探究油菜素内酯在曼陀罗应对盐胁迫中的作用, 本研究用油菜素内酯浸泡曼陀罗种子, 分析其对曼陀罗种子萌发、种苗生长、抗氧化酶活性的影响。研究表明, NaCl 胁迫会抑制曼陀罗种子萌发和种苗生长。1×10<sup>-9</sup> mol/L 油菜素内酯浸种处理可显著提高盐胁迫下曼陀罗种苗的根长、下胚轴长、含水率、发芽率、发芽指数、发芽势、种子活力指数, 降低曼陀罗种苗中丙二醛和脯氨酸的含量, 提升过氧化物酶(*POD*)和超氧化物歧化酶(*SOD*)的活性, 增强抗盐胁迫能力。1×10<sup>-8</sup> mol/L 油菜素内酯浸种处理会抑制曼陀罗种子的萌发及种苗生长。本研究为增强曼陀罗抗盐胁迫能力提供理论依据。

**关键字:** 油菜素内酯; 盐胁迫; 曼陀罗; 种子萌发; 抗氧化酶活性

**中图分类号:** Q946.885 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)02-0355-07

## The effect of soaking seeds with brassinolide on the germination of *Datura stramonium* L. seeds under salt stress and its physiological mechanism

YAN Yanhua, ZENG Huilin, YANG Yang

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

**Abstract:** Worldwide, soil salinization is becoming increasingly severe, posing a serious threat to plant growth. To explore the role of brassinolide in *Datura stramonium*'s response to salt stress, we soaked the seeds of *Datura stramonium* with brassinolide and analyzed its effects on seed germination, seedling growth, and antioxidant enzyme activity. The results showed that NaCl stress inhibited the germination of *Datura stramonium* seeds and the growth of seedlings. Seed soaking treatment with 1×10<sup>-9</sup> mol/L brassinolide significantly improved the root length, hypocotyl length, water content, germination rate, germination index, germination vigor, and seed vigor index of *Datura stramonium* under salt stress. It also reduced the content of malondialdehyde and proline in *Datura stramonium* seedlings, increased the activity of peroxidase (*POD*) and superoxide dismutase (*SOD*), and enhanced the resistance to salt stress. Seed soaking treatment with 1×10<sup>-8</sup> mol/L brassinolide inhibited the germination of *Datura stramonium* seeds and the growth of seedlings. This study provides a theoretical basis for enhancing the salt stress resistance of *Datura stramonium*.

**Key words:** brassinosteroids; salt stress; *Datura stramonium* L.; seed germination; antioxidant enzyme activity

收稿日期: 2024-05-29

基金项目: 吕梁市科技局社会发展领域重点项目(2023SHFZ33); 山西省高等学校教学改革创新项目(J20221138)

作者简介: 闫艳华, (1985-), 女, 山西离石人, 硕士, 副教授, 主要从事植物生长与发育研究。(E-mail) yanhua19852008@163.com

在中国, 盐渍化土地面积接近1×10<sup>9</sup> hm<sup>2</sup>, 且土壤盐渍化已成为土壤变化的趋势<sup>[1]</sup>。大面积的盐渍化土壤使植被种子萌发及其生长受到抑制, 农作物的产量和质量显著降低, 同时土壤盐渍化限制了工程设施用地的建设, 阻碍了经济发展<sup>[2-3]</sup>。曼陀罗(*Datura stramonium* L.) 为茄科曼陀罗属植物, 其

花型优美,是优良的园艺景观植物<sup>[4-5]</sup>。此外,曼陀罗含有黄酮类、醇茄内酯类、生物碱类等多种生物活性物质,在医药领域和植保领域具有较高的应用价值<sup>[6-7]</sup>。中国部分地区如西北、华北、东北和沿海等地区土壤盐渍化较为严重,盐胁迫会限制曼陀罗的大规模栽培与应用,因此研究曼陀罗对盐胁迫的响应及其调控机制显得尤为重要。

油菜素内酯(Brassinolide, BR)是一种天然植物激素,又称芸苔素内酯,广泛存在于自然界中。油菜素内酯能够显著促进植物生长发育,并缓解盐胁迫对植株造成的损伤,其作为一种新型植物生长调节剂已被广泛用于农业生产<sup>[8]</sup>。研究发现,油菜素内酯可以减缓生物胁迫和非生物胁迫对植株造成的伤害,提高植物的抗逆性<sup>[9-10]</sup>。Yue 等<sup>[11]</sup>研究结果表明,2,4-表油菜素内酯(2,4-epiBL)处理能显著减轻盐胁迫对刺槐幼苗的伤害,提升光合效率和抗氧化能力。范翠枝等<sup>[12]</sup>、王丹等<sup>[13]</sup>、王舒甜等<sup>[14]</sup>研究结果表明,施用外源油菜素内酯能提高植物产量,增强过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等保护酶的活性,增加脯氨酸和可溶性糖含量,并降低丙二醛含量。

本研究以紫花曼陀罗为研究对象,拟探究盐胁迫下油菜素内酯浸种处理对曼陀罗种子萌发和植株生长发育的影响,旨在筛选出缓解曼陀罗盐胁迫的最佳油菜素内酯浓度,为盐碱地曼陀罗的栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与药品

紫花曼陀罗种子来源于吕梁学院园林花木实验室,2,4-表油菜素内酯(分析标准品),购自北京索莱宝科技有限公司。

### 1.2 种子处理与培养

种子挑选和处理:将曼陀罗种子放于蒸馏水中,将漂浮在水面的籽粒去除。被筛选出的种子放于75%的乙醇中浸泡30~60 s,然后用无菌水洗涤种子3~5次,并使用吸水纸吸干完成消毒除菌操作。分别用浓度为 $1 \times 10^{-10}$  mol/L (EBL1)、 $1 \times 10^{-9}$  mol/L (EBL2)和 $1 \times 10^{-8}$  mol/L (EBL3)油菜素内酯和蒸馏水(CK)浸种24 h。

种子培养:将种子均匀撒在直径13 cm和高11 cm大小的花盆中,随后置于25℃恒温环境中进行培养。分别用0 mmol/L、50 mmol/L、100 mmol/L、

150 mmol/L、200 mmol/L浓度的NaCl溶液和蒸馏水浇灌种子。始终保持花盆湿润,每天同一时间记录种子的发芽情况,在第20 d测定生长生理指标。

### 1.3 测定指标与方法

种苗胚根长、下胚轴长、鲜重、含水量的测定参考范翠枝等<sup>[12]</sup>的方法;发芽率、发芽指数、种子活力指数的测定按照李志萍等<sup>[15]</sup>的方法;丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸法测定,脯氨酸(Pro)含量用磺基水杨酸法测定<sup>[16]</sup>;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据处理与统计分析

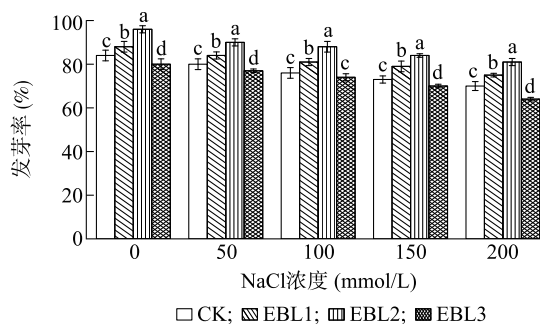
利用Microsoft Excel软件进行数据统计记录,使用SPSS 26.0软件进行数据处理、统计分析,并使用新复极差测验法进行显著性方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 油菜素内酯浸种对盐胁迫下曼陀罗种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数的影响

如图1所示,随着油菜素内酯浓度的升高,曼陀罗种子的发芽率呈现先升高后降低的趋势,EBL2处理曼陀罗种子的发芽率显著高于对照、EBL1处理和EBL3处理( $P < 0.05$ )。EBL3处理曼陀罗种子发芽率显著低于对照(NaCl浓度为100 mmol/L时除外)、EBL1处理和EBL2处理( $P < 0.05$ )。如图2所示,无盐胁迫时,EBL2处理曼陀罗种子发芽势显著高于对照、EBL1处理和EBL3处理( $P < 0.05$ ),与对照相比,EBL3处理曼陀罗种子的发芽势显著降低了37.5%( $P < 0.05$ )。综上,盐胁迫下, $1 \times 10^{-9}$  mol/L浓度的油菜素内酯浸种可显著促进种子的萌发,而 $1 \times 10^{-8}$  mol/L浓度的油菜素内酯会抑制曼陀罗种子的萌发。说明高浓度的油菜素内酯会抑制曼陀罗种子的萌发。

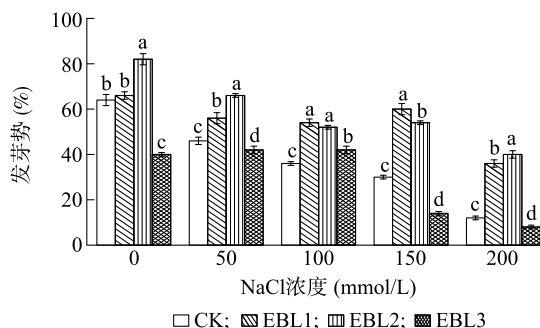
如图3所示,随着NaCl浓度的升高,对照曼陀罗种子发芽指数逐渐降低,表明盐胁迫抑制了曼陀罗种子的萌发。无盐胁迫时,EBL2处理曼陀罗种子发芽指数显著高于对照( $P < 0.05$ )。这说明在无盐胁迫时, $1 \times 10^{-9}$  mol/L油菜素内酯浸种处理可以显著促进曼陀罗种子萌发( $P < 0.05$ )。在盐胁迫下,随着油菜素内酯浓度的增加,曼陀罗种子的发芽指数呈先升高后降低的趋势。在盐胁迫下,EBL1处理和



CK:蒸馏水浸种对照;EBL1:  $1 \times 10^{-10}$  mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL2:  $1 \times 10^{-9}$  mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL3:  $1 \times 10^{-8}$  mol/L油菜素内酯浸种处理。同一浓度 NaCl 胁迫下图柱上不同小写字母表示处理间差异显著。

图1 油菜素内酯浸种对 NaCl 胁迫下曼陀罗种子发芽率的影响

Fig.1 Effects of seed soaking with brassinolide on the germination rate of *Datura stramonium* seeds under NaCl stress



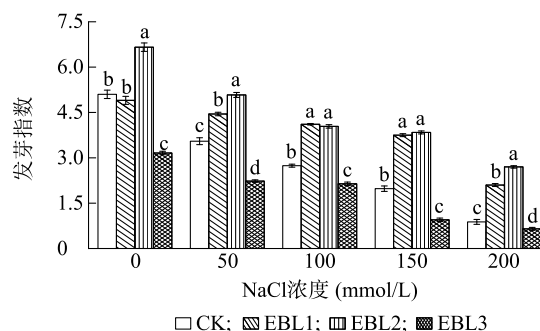
CK:蒸馏水浸种对照;EBL1:  $1 \times 10^{-10}$  mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL2:  $1 \times 10^{-9}$  mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL3:  $1 \times 10^{-8}$  mol/L油菜素内酯浸种处理。同一浓度 NaCl 胁迫下图柱上不同小写字母表示处理间差异显著。

图2 油菜素内酯浸种对 NaCl 胁迫下曼陀罗种子发芽势的影响

Fig.2 Effects of seed soaking with brassinolide on the germination potential of *Datura stramonium* seeds under NaCl stress

EBL2 处理曼陀罗种子的发芽指数显著高于对照和 EBL3 处理 ( $P < 0.05$ )。盐胁迫下,  $1 \times 10^{-9}$  mol/L 浓度的油菜素内酯促进曼陀罗种子发芽的效果最好, 而  $1 \times 10^{-8}$  mol/L 浓度的油菜素内酯会抑制曼陀罗种子的发芽。

种子活力指数是评估种子质量和发芽速率的重要指标,盐胁迫会抑制曼陀罗种子活力。如图 4 所示,随着 NaCl 浓度的升高,对照曼陀罗种子活力呈下降趋势。无盐胁迫时,EBL2 处理曼陀罗种子活力指数显著高于对照、EBL1 处理和 EBL3 处理 ( $P < 0.05$ ),EBL3 处理种子活力指数显著低于对照、

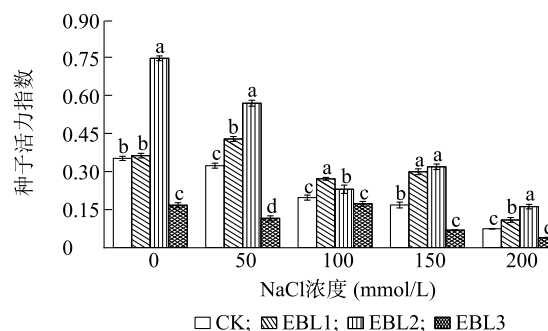


CK:蒸馏水浸种对照;EBL1:  $1 \times 10^{-10}$  mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL2:  $1 \times 10^{-9}$  mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL3:  $1 \times 10^{-8}$  mol/L油菜素内酯浸种处理。同一浓度 NaCl 胁迫下图柱上不同小写字母表示处理间差异显著。

图3 油菜素内酯浸种对 NaCl 胁迫下曼陀罗种子发芽指数的影响

Fig.3 Effects of seed soaking with brassinolide on the germination index of *Datura stramonium* seeds under NaCl stress

EBL1 处理和 EBL2 处理 ( $P < 0.05$ )。说明  $1 \times 10^{-9}$  mol/L 浓度的油菜素内酯能够显著促进曼陀罗种子的发芽。在 50 mmol/L NaCl 胁迫下,EBL2 处理曼陀罗种子活力指数显著高于对照、EBL1 处理和 EBL3 处理 ( $P < 0.05$ )。在 100~200 mmol/L NaCl 胁迫下,随着油菜素内酯浓度的增加,曼陀罗种子活力指数呈现先升高再降低的趋势,EBL1 处理、EBL2 处理曼陀罗种子活力指数显著高于对照和 EBL3 处理 ( $P < 0.05$ )。  $1 \times 10^{-8}$  mol/L 浓度的油菜素内酯会抑制曼陀罗种子的发芽。盐胁迫下,  $1 \times 10^{-9}$  mol/L 浓度的油菜素内酯促进曼陀罗种子发芽的效果最好。



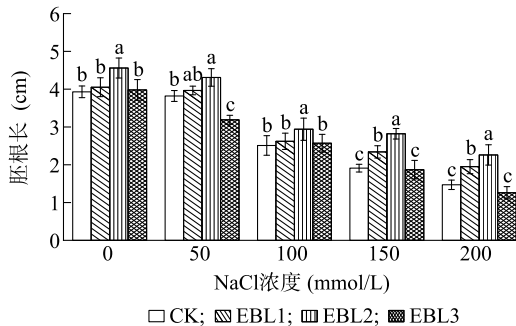
CK:蒸馏水浸种对照;EBL1:  $1 \times 10^{-10}$  mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL2:  $1 \times 10^{-9}$  mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL3:  $1 \times 10^{-8}$  mol/L油菜素内酯浸种处理。同一浓度 NaCl 胁迫下图柱上不同小写字母表示处理间差异显著。

图4 油菜素内酯浸种对 NaCl 胁迫下曼陀罗种子活力指数的影响

Fig.4 Effects of seed soaking with brassinolide on the vigour index of *Datura stramonium* seeds under NaCl stress

## 2.2 油菜素内酯对曼陀罗种苗胚根长、下胚轴长、鲜重影响

如图 5 所示,盐胁迫对曼陀罗种苗根系生长有抑制作用,随着油菜素内酯浓度的增加,曼陀罗种苗胚根长呈先增加后减少的趋势。无盐胁迫时,EBL2 处理曼陀罗种苗胚根长显著高于对照、EBL1 处理和 EBL3 处理( $P<0.05$ )。在 50 mmol/L NaCl 胁迫下,EBL2 处理曼陀罗种苗胚根长显著高于对照和 EBL3 处理( $P<0.05$ )。在 100~200 mmol/L NaCl 胁迫下,EBL2 处理曼陀罗种苗胚根长显著高于对照、EBL1 处理和 EBL3 处理( $P<0.05$ )。1×10<sup>-8</sup> mol/L 浓度的油菜素内酯会抑制曼陀罗种苗根系生长。盐胁迫下,1×10<sup>-9</sup> mol/L 浓度的油菜素内酯促进曼陀罗种子根系生长的效果最好。



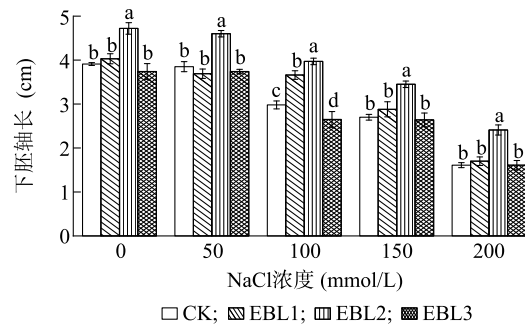
CK:蒸馏水浸种对照;EBL1:1×10<sup>-10</sup> mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL2:1×10<sup>-9</sup> mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL3:1×10<sup>-8</sup> mol/L油菜素内酯浸种处理。同一浓度 NaCl 胁迫下图柱上不同小写字母表示处理间差异显著。

图 5 油菜素内酯浸种对 NaCl 胁迫下曼陀罗种苗根长的影响

Fig.5 Effects of seed soaking with brassinolide on the root length of *Datura stramonium* seedlings under NaCl stress

如图 6 所示,随着 NaCl 浓度的增加,对照曼陀罗种苗下胚轴长度呈下降趋势。无盐胁迫时,EBL2 处理曼陀罗种苗下胚轴长显著高于对照、EBL1 处理和 EBL3 处理( $P<0.05$ )。在 100~200 mmol/L NaCl 胁迫下,EBL2 处理曼陀罗种苗下胚轴长显著高于对照、EBL1 处理和 EBL3 处理( $P<0.05$ )。在 100 mmol/L NaCl 胁迫下,EBL3 处理曼陀罗种苗下胚轴长显著低于对照、EBL1 处理和 EBL2 处理( $P<0.05$ )。综上可知,1×10<sup>-9</sup>mol/L 油菜素内酯处理对曼陀罗种苗下胚轴生长的促进作用最为显著。

如图 7 所示,无盐胁迫时,EBL2 处理曼陀罗种苗鲜重显著高于对照、EBL1 处理和 EBL3 处理( $P<$

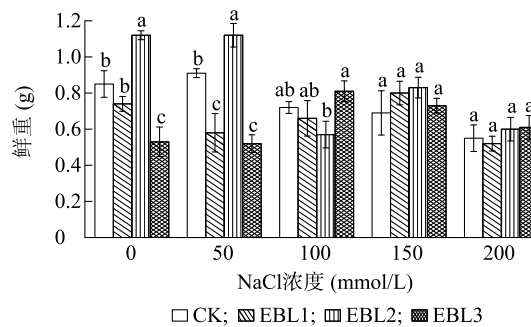


CK:蒸馏水浸种对照;EBL1:1×10<sup>-10</sup> mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL2:1×10<sup>-9</sup> mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL3:1×10<sup>-8</sup> mol/L油菜素内酯浸种处理。同一浓度 NaCl 胁迫下图柱上不同小写字母表示处理间差异显著。

图 6 油菜素内酯浸种对 NaCl 胁迫下曼陀罗下胚轴长的影响

Fig.6 Effects of seed soaking with brassinolide on the hypocotyl length of *Datura stramonium* under NaCl stress

0.05),EBL3 处理曼陀罗种苗鲜重显著低于对照、EBL1 处理和 EBL2 处理( $P<0.05$ )。在 100 mmol/L NaCl 胁迫下,EBL3 处理曼陀罗种苗鲜重显著高于 EBL2 处理( $P<0.05$ )。在 150~200 mmol/L NaCl 胁迫下,EBL1 处理、EBL2 处理、EBL3 处理和对照均无显著差异( $P>0.05$ )。在 50 mmol/L NaCl 胁迫下,EBL2 处理曼陀罗种苗鲜重显著高于对照、EBL1 处理和 EBL3 处理( $P<0.05$ )。



CK:蒸馏水浸种对照;EBL1:1×10<sup>-10</sup> mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL2:1×10<sup>-9</sup> mol/L油菜素内酯浸种处理;EBL3:1×10<sup>-8</sup> mol/L油菜素内酯浸种处理。同一浓度 NaCl 胁迫下图柱上不同小写字母表示处理间差异显著。

图 7 油菜素内酯浸种对 NaCl 胁迫下曼陀罗种苗鲜重的影响

Fig.7 Effects of seed soaking with brassinolide on the fresh weight of *Datura stramonium* seedlings under NaCl stress

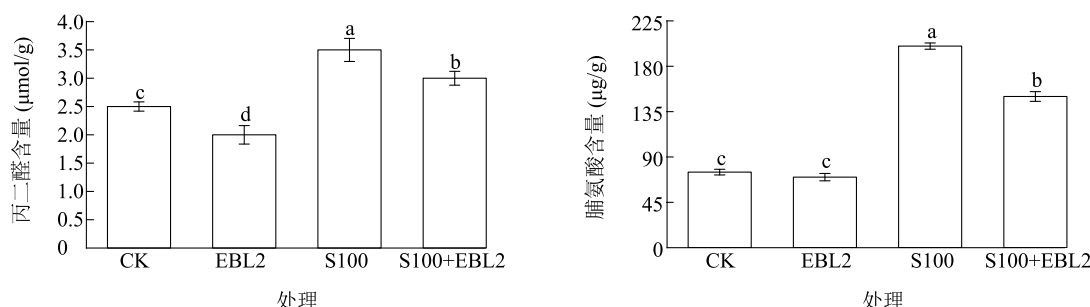
## 2.3 油菜素内酯对曼陀罗种苗丙二醛、脯氨酸含量的影响

由图 8 可知,100 mmol/L NaCl 胁迫下的曼陀罗



种苗丙二醛含量和脯氨酸含量均显著高于对照( $P < 0.05$ )。无盐胁迫时,EBL2处理曼陀罗种苗丙二醛含量显著低于对照( $P < 0.05$ ),脯氨酸含量与对照相

比无显著差异( $P > 0.05$ )。100 mmol/L NaCl胁迫下,EBL2处理曼陀罗种苗丙二醛含量和脯氨酸含量显著低于未经油菜素内酯浸种处理( $P < 0.05$ )。



CK:蒸馏水浸种对照;EBL2: $1 \times 10^{-9}$  mol/L油菜素内酯浸种处理。S100:100 mmol/L NaCl胁迫。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著。

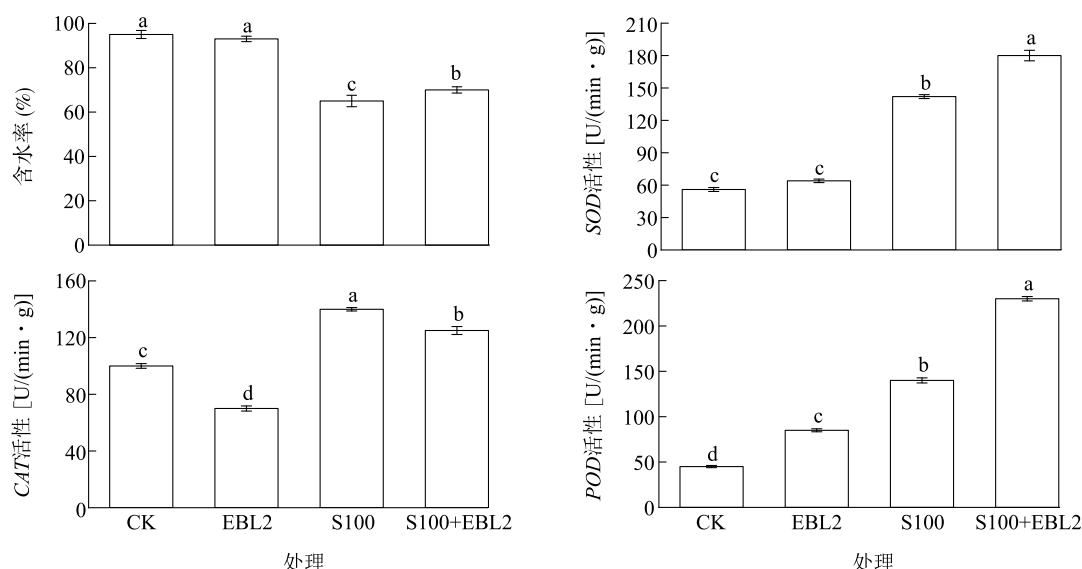
图8 油菜素内酯浸种对NaCl胁迫下曼陀罗种苗丙二醛和脯氨酸含量的影响

Fig.8 Effects of seed soaking with brassinolide on the content of malondialdehyde and proline in *Datura stramonium* seedlings under NaCl stress

## 2.4 油菜素内酯对曼陀罗种苗含水率以及SOD、CAT和POD活性的影响

不同处理对曼陀罗种苗含水率、SOD活性、CAT活性和POD活性的影响如图9所示。100 mmol/L NaCl胁迫下,EBL2处理曼陀罗种苗含水率显著高于未经油菜素内酯浸种处理( $P < 0.05$ ),表明 $1 \times 10^{-9}$  mol/L浓度油菜素内酯处理能够促进种苗对水分的

吸收。100 mmol/L NaCl胁迫下曼陀罗种苗SOD活性、CAT活性和POD活性均显著高于对照( $P < 0.05$ )。100 mmol/L NaCl胁迫下,EBL2处理曼陀罗种苗SOD活性和POD活性显著高于未经油菜素内酯浸泡处理( $P < 0.05$ ),CAT活性显著低于未经油菜素内酯浸种处理( $P < 0.05$ )。



CK:蒸馏水浸种对照;EBL2: $1 \times 10^{-9}$  mol/L油菜素内酯浸种处理。S100:100 mmol/L NaCl胁迫。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著。

图9 油菜素内酯浸种对NaCl胁迫下曼陀罗种苗含水率、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性和过氧化物酶(POD)活性的影响

Fig.9 Effects of seed soaking with brassinolide on the water content, superoxide dismutase (SOD) activity, catalase (CAT) activity, and peroxidase (POD) activity of *Datura stramonium* seedlings under NaCl stress

### 3 讨论

中国大面积土地盐渍化成为限制土壤生产力的主要因素之一。近年研究发现,施用适宜浓度的外源植物激素也可提高植物耐盐性<sup>[17-18]</sup>。油菜素内酯作为一种植物生长调节剂,在缓解植物非生物胁迫、促进植物生长及提高作物产量方面发挥出重要作用,研究发现,油菜素内酯合成异常的植株比正常植株矮小<sup>[19]</sup>。此外,油菜素内酯通过激活和调控与细胞周期相关的基因,促进细胞壁生长,其作用机理与细胞分裂素相似,但不依赖蛋白激酶<sup>[20-21]</sup>。

油菜素内酯信号代谢通路与赤霉素信号传导途径相互作用,共同调控植物的生长。生物体内油菜素内酯含量低时,油菜素内酯信号通路的转录因子 BRI1 和赤霉素信号通路的植物生长抑制因子 DELLA 结合,抑制 BZR1 活性,从而阻断 BR 信号通路,抑制植物生长。当油菜素内酯浓度升高时,油菜素内酯和转录因子 BRI1 结合,诱导植物生长抑制因子 DELLA 降解,促进赤霉素合成基因的表达,从而触发级联放大反应,引发众多下游基因表达转录,最终促进植物生长<sup>[22,8]</sup>。本研究结果表明,无盐胁迫时,适当浓度的油菜素内酯浸种处理能够提高曼陀罗种子的发芽率、发芽势和活力指数,并促进种苗胚根和下胚轴的生长。其中 $1\times 10^{-9}$  mol/L 浓度的油菜素内酯效果最佳。

适宜浓度的油菜素内酯可提升植物的抗逆性。岳健敏<sup>[23]</sup>发现,外源油菜素内酯通过调节抗氧化功能蛋白基因表达,提升刺槐和香樟的抗氧化能力,提高苗高、叶面积和相对含水量,并提高细胞膜稳定性和抗氧化酶活性。Azhar 等<sup>[24]</sup>研究结果表明,24-epiBL 可减少钾离子的损耗,从而提高大麦的抗盐性。在本研究中,100 mmol/L NaCl 胁迫下,EBL2 ( $1\times 10^{-9}$  mol/L EBL) 处理的曼陀罗种苗 MDA 含量与未经油菜素内酯浸种处理相比显著减少 ( $P<0.05$ )。

植物受到非生物胁迫后会产生大量活性氧如超氧阴离子、羟基自由基等对机体造成伤害,过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等抗氧化酶在缓解活性氧毒害方面发挥关键作用。油菜素内酯处理能够通过诱导抗氧化酶的表达,增强植物清除活性氧的能力,同时抑制活性氧产生相关基因的表达<sup>[9,21]</sup>。在本研究中, $1\times 10^{-9}$  mol/L 油菜素内酯浸种处理能够

降低曼陀罗种苗中丙二醛和脯氨酸含量,显著减轻盐胁迫对曼陀罗种苗造成的伤害。在盐胁迫下, $1\times 10^{-9}$  mol/L 油菜素内酯浸种处理 SOD 和 POD 活性显著高于未经油菜素内酯浸种处理。在非生物胁迫下施用外源油菜素内酯,海棠<sup>[25]</sup>、紫罗兰<sup>[26]</sup>、稷子<sup>[27]</sup>中抗氧化酶活性提高,与本研究结果一致。李明等<sup>[28]</sup>发现,2,4-表油菜素内酯处理可显著提高 NaHCO<sub>3</sub> 胁迫下马铃薯根系的抗氧化酶活性,并降低丙二醛和脯氨酸含量。

### 4 结论

本研究结果表明,NaCl 胁迫会抑制曼陀罗种子的萌发和种苗的生长发育,而适宜浓度的油菜素内酯浸种处理能够有效地提高 NaCl 胁迫下曼陀罗种子的发芽势、发芽率、活力指数、发芽指数以及种苗的胚根长、下胚轴长、鲜重、含水量,降低 NaCl 胁迫下曼陀罗种苗中丙二醛和脯氨酸含量,并且增强种苗中 SOD 和 POD 活性。其中, $1\times 10^{-9}$  mol/L 油菜素内酯浸种处理的效果最佳,而 $1\times 10^{-8}$  mol/L 油菜素内酯会抑制曼陀罗种子的萌发。

#### 参考文献:

- [1] LI J G, PU L J, HAN M F, et al. Soil salinization research in China: advances and prospects [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5): 943-960.
- [2] SHAHID S A, ABDELFAHATTAH 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 [M]. New York, London: Springer, 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 [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015, 22(2): 123-131.
- [4] QIU F, YAN Y J, ZENG J L, et al. Biochemical and metabolic insights into hyoscyamine dehydrogenase [J]. ACS Catalysis, 2021, 11(5): 2912-2924.
- [5] 权赫根. 曼陀罗生物学特性研究 [D]. 延吉: 延边大学, 2022.
- [6] YANG B Y, ZHOU Y Q, LIU Y, et al. Withanolides as potential immunosuppressive agents against RAW264.7 cells from the pericarps of datura metel [J]. Natural Product Communications, 2017, 12(7): 1021-1024.
- [7] DHIMAN A, LA R, BHAN M, et al. Plebeian assessment of antimicrobial and *in vitro* antioxidant zest of *Datura fastuosa* L. seeds [J]. Journal of Pharmaceutical and Scientific Innovation, 2012, 1(4): 49-53.
- [8] HAN C, WANG L Y, LYU J Y, et al. Brassinosteroid signaling

- and molecular crosstalk with nutrients in plants[J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2023, 50(8): 541-553.
- [9] PLANAS-RIVEROLA A, GUPTA A, BETEGÓN-PUTZE I, et al. Brassinosteroid signaling in plant development and adaptation to stress[J]. *Development*, 2019, 146(5): 151894.
- [10] NAWAZ F, NAEEM M, ZULFIQAR B, et al. Understanding brassinosteroid-regulated mechanisms to improve stress tolerance in plants: a critical review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(19): 15959-15975.
- [11] YUE J M, FU Z, ZHANG L, et al. The positive effect of different 24-epiBL pretreatments on salinity tolerance in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings[J]. *Forests*, 2018, 10(1): 4.
- [12] 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[J]. *生态学报*, 2021, 41(5): 1857-1867.
- [13] 王丹, 刘亚西, 周扬, 等. 油菜素内酯对盐胁迫下黑麦草种子萌发及幼苗生长的生理调控作用[J]. *草业科学*, 2021, 38(6): 1110-1118.
- [14] 王舒甜, 王金平, 张金池, 等. 油菜素内酯对盐胁迫下香樟幼苗叶片抗氧化酶活性的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 43(4): 476-482.
- [15] 李志萍, 张文辉, 崔豫川. NaCl 和  $N_2CO_3$  胁迫对栓皮栎种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 742-751.
- [16] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] 宿梅飞, 魏小红, 辛夏青, 等. 外源 cGMP 调控盐胁迫下黑麦草种子萌发机制[J]. *生态学报*, 2018, 38(17): 6171-6179.
- [18] LARRÉ C F, DE MORAES D M, LOPES N F. Qualidade fisiológica de sementes de arroz tratadas com solução salina e 24-epibrassinolideo[J]. *Revista Brasileira de Sementes*, 2011, 33(1): 86-94.
- [19] TONG H N, CHU C C. Functional specificities of brassinosteroid and potential utilization for crop improvement[J]. *Trends in Plant Sci*, 2018, 23(11): 1016-1028.
- [20] HU Y X, BAO F, LI J Y. Promotive effect of brassinosteroids on cell division involves a distinct CycD3-induction pathway in *Arabidopsis*[J]. *Plant Journal for Cell & Molecular Biology*, 2010, 24(5): 693-701.
- [21] 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[J]. *植物保护学报*, 2023, 50(1): 22-31.
- [22] 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”[J]. *植物学报*, 2023, 58(2): 194-198.
- [23] 岳健敏. 24-表油菜素内酯(24-epiBL)对刺槐、香樟幼苗耐盐性的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
- [24] AZHAR N, SU N, SHABALA L, et al. Exogenously applied 24-epibrassinolide (EBL) ameliorates detrimental effects of salinity by reducing  $K^+$  efflux via depolarization-activated  $K^+$  channels[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2017, 58(4): 802-810.
- [25] SU Q F, ZHENG X D, TIAN Y K, et al. Exogenous brassinolide alleviates salt stress in *Malus hupehensis* Rehd. by regulating the transcription of NHX-type  $Na^+(K^+)/H^+$  antiporters[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11(11): 38.
- [26] 魏茜, 何敏, 胡小京. 外源油菜素内酯对盐胁迫下紫罗兰幼苗生长及生理特性的影响[J]. *西南农业学报*, 2023, 36(6): 1165-1171.
- [27] 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[J]. *西北植物学报*, 2024, 44(4): 517-528.
- [28] 李明, 颜嘉丽, 石铭福, 等. 外源 2,4-表油菜素内酯对碱性盐胁迫下马铃薯根系生长、生理特性及土壤酶活性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(3): 394-402.

(责任编辑: 成纾寒)