

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24151

外源茉莉酸甲酯对镉胁迫下大豆种子萌发及幼苗生理的影响

崔晓霞*, 石晨乐, 刘学勤

(江苏农林职业技术学院农学院园艺学院, 江苏 句容 212400)

摘要: 以大豆 ‘Williams 82’ 为试验材料, 分析不同浓度的外源茉莉酸甲酯 (MeJA) 溶液对重金属镉胁迫下的大豆种子萌发、幼苗生长过程中生理指标的影响, 探寻缓解大豆镉胁迫的最适合 MeJA 浓度。试验采用不同浓度的外源 MeJA 溶液对重金属镉胁迫下的大豆种子和幼苗分别进行处理, 结果显示, 大豆种子的萌发及幼苗生理指标在镉离子浓度为 0.1 mmol/L 时受到了明显的抑制, 外源施加较低浓度的 MeJA 可以有效促进大豆种子的萌发, 降低大豆幼苗叶片中游离脯氨酸和丙二醛的含量, 超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶的活性则相应提高; 外源施加大于 150 $\mu\text{mol/L}$ 浓度的 MeJA 则表现出对种子萌发和活性氧代谢的抑制作用, 结果说明适宜浓度的外源 MeJA 可以有效地缓解重金属镉胁迫对大豆幼苗的伤害, 而太高浓度的 MeJA 则会对大豆幼苗的生长和代谢产生不利影响。因此, 100 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 MeJA 可最有效地促进镉胁迫下大豆种子的萌发和幼苗生长。

关键词: 大豆; 镉胁迫; 茉莉酸甲酯; 萌发; 生理特性

随着我国经济的快速发展, 重金属污染已成为土壤环境污染的一个重要问题^[1-2], 土壤重金属污染中镉为首要污染物。镉具有移动性高、毒性强和污染面积最广的特点^[3]。土壤中的镉易被植物根系所吸收, 由于其很高的移动性, 使得镉在植物体内大量积累, 一方面, 过量的镉会直接影响植物的正常生长及其生理活动, 如导致植物体内营养元素失衡, 影响植物的酶活性、呼吸作用、光合作用等^[4-7]; 另一方面, 植物中富集的镉还会通过食物链进入人体, 严重威胁人体健康^[8]。

大豆 [*Glycine max* (Linn.) Merr] 是我国重要的油料作物、粮食作物和饲料作物, 在保障粮食安全方面发挥着极其重要的作用^[9]。大豆对镉毒害是比较敏感的, 在受镉污染的土壤中生长时, 其多种农艺性状都表现出毒害症状^[10-11]。有研究表明, 镉胁迫会严重影响大豆种子的萌发, 根、茎、叶的生长, 叶绿素质量分数降低, 限制大豆叶片的光合碳同化^[12-14], 而且会影响大豆的抗氧

化酶系统^[15]。因此, 本文通过研究大豆镉胁迫下的生理机制, 以期为培育耐重金属镉的大豆品种提供理论支撑。

茉莉酸、茉莉酸甲酯 (MeJA) 及其衍生物统称为茉莉酸类化合物。MeJA 可以参与植物信号的传导, 在植物响应非生物胁迫过程中起着重要作用^[16], 如植物的抗旱^[17]、耐低温^[18]、耐高温^[19]、耐盐胁迫^[20]等。近年来, MeJA 在缓解重金属胁迫方面的应用也逐渐受到关注。外源 MeJA 可通过降低丙二醛和 H_2O_2 的含量并增加抗氧化酶的活性来缓解镉胁迫对大豆的损伤^[21]。低浓度的 MeJA 可以有效缓解镉胁迫对多年生黑麦草幼苗的伤害, 促进镉胁迫下多年生黑麦草的发芽和幼苗生长^[22]。叶面喷施 MeJA 可以降低小麦幼苗根系的镉吸收能力, 降低整株的镉积累, 促进干物质的积累^[23]。MeJA 能够有效缓解镉胁迫对马铃薯的不利影响, 增加马铃薯块茎产量, 提高马铃薯对镉胁迫的耐受性^[24]。目前有关外源 MeJA 对重金属镉胁迫下大豆幼苗生理影响方面的研究较少。本研究通过分析镉离子胁迫下不同浓度外源 MeJA 溶液对大豆种子萌发及幼苗生理的影响, 揭示外源 MeJA 增强大豆耐镉胁迫的内在生理机制, 探究如何提高大豆的耐镉胁迫能力并促进其生长, 对提高大豆产量、保障我国粮食安全具有十分重要的意义。

收稿日期: 2024-03-23; 录用日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32301776); 江苏农林职业技术学院院级科技项目 (2020kj007)。

作者简介: 崔晓霞 (1989-), 讲师, 博士研究生, 主要从事大豆遗传育种研究。E-mail: cuixiaoxia7@163.com。同时为通讯作者。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试大豆品种为‘Williams 82’，种子由江苏省农业科学院经济作物研究所提供。CdCl₂ 和 MeJA 均为分析纯，购于 Sigma 公司。

1.2 试验设计

试验设总共 7 个处理：(1) CK：种子萌发试验用蒸馏水处理；幼苗生长试验用 Hoagland 营养液灌根处理；(2) 0.1 mmol/L Cd²⁺ 溶液 +0 μmol/L MeJA；(3) 0.1 mmol/L Cd²⁺ 溶液 +10 μmol/L MeJA；(4) 0.1 mmol/L Cd²⁺ 溶液 +50 μmol/L MeJA；(5) 0.1 mmol/L Cd²⁺ 溶液 +100 μmol/L MeJA；(6) 0.1 mmol/L Cd²⁺ 溶液 +150 μmol/L MeJA；(7) 0.1 mmol/L Cd²⁺ 溶液 +200 μmol/L MeJA。

1.2.1 种子萌发试验

挑选大小一致且饱满的健康大豆种子，用 10% 次氯酸钠溶液消毒 20 min、无菌水洗净后，用灭菌蒸馏水浸泡 6 h。将 2 张滤纸平铺在 150 mm 直径的玻璃培养皿中，把先前消毒浸泡处理过的大豆种子整齐、均匀地摆放在滤纸上，每个培养皿放置大致 50 粒种子，0.1 mmol/L Cd²⁺ 胁迫下用不同浓度的 MeJA 溶液进行处理（7 个处理），每个处理设置 3 次重复。萌发试验在 25℃ 的人工气候箱中进行，定期补充等量的处理溶液，2 d 后测定大豆种子的发芽势，第 7 d 测定种子的发芽率并测量胚芽长度。

1.2.2 幼苗生长试验

大豆种子经过挑选后播种于配制好的基质中，在 25℃、16 h 光照和 8 h 黑暗光周期的植物生长箱中培养，用蒸馏水浇灌，保持水分充足，发芽后待地上部分长度大致 1 cm 的时候，将弱苗拔除，每盆留 10 株左右整齐一致的大豆幼苗，并改用 Hoagland 营养液培养至幼苗第一对真叶完全展开。之后分别用含镉离子浓度为 0.1 mmol/L 和不同浓度 MeJA 溶液的营养液进行处理（7 个处理），采用土壤浇灌的方法每天定时将 50 mL 的处理溶液均匀浇灌在基质中，灌根处理 7 d。每个处理设置 3 次重复。

1.3 测定项目和方法

胚芽长度：大豆种子萌发的第 7 d 用直尺测量。根长：0.1 mmol/L Cd²⁺ 胁迫下，不同浓度 MeJA 溶液灌根处理 7 d 后，每组处理随机抽取 20 株幼

苗用直尺测量根长。采收适量的剩余叶片，液氮速冻后保存于冰箱中，进行酶活性等相关指标的测定。

大豆幼苗用 0.1 mmol/L Cd²⁺ 和不同浓度的 MeJA 溶液进行灌根处理 7 d，取其叶片进行活性氧代谢相关酶的酶活性及游离脯氨酸和丙二醛含量的测定。超氧化物歧化酶（SOD）活性的测定采用氮蓝四唑光化还原法；过氧化物酶（POD）活性的测定采用愈创木酚法；过氧化氢酶（CAT）活性的测定采用紫外吸收法；抗坏血酸过氧化物酶（APX）活性的测定采用紫外吸收法；脯氨酸含量的测定采用茚三酮法；丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸法。以上方法均参考《植物生理学实验指导》^[25]。

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 及 SPSS 25.0 进行数据分析和差异显著性检验，并作图。

发芽势和发芽率计算公式如下：

$$\text{发芽势}(\%) = (\text{2 d 内发芽的种子数} / \text{试验种子总数}) \times 100;$$

$$\text{发芽率}(\%) = (\text{7 d 内发芽的种子数} / \text{试验种子总数}) \times 100.$$

2 结果与分析

2.1 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆种子萌发的影响

由图 1 可知，相比于 CK，0.1 mmol/L Cd²⁺ 溶液处理后大豆种子萌发受到显著的抑制作用，发芽势、发芽率和胚芽长分别降低了 16.69%、7.68% 和 64.36%。镉胁迫下，相比 MeJA 浓度 0 μmol/L，较低浓度的 MeJA 处理大豆种子后，其发芽势、发芽率和胚芽长均有提高，且随着 MeJA 处理浓度的增加呈先上升再下降的趋势，浓度 100 μmol/L 处理后增幅最大，发芽势、发芽率、胚芽长相较于不添加 MeJA 分别提高了 18.91%、9.45%、31.71%。结果表明，较低浓度的外源 MeJA 可以有效促进大豆种子的萌发，促进胚芽的生长，而浓度过高会严重抑制种子的萌发及生长。

2.2 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗根长的影响

如图 2 所示，镉胁迫对大豆幼苗根的伸长有显著的抑制作用，与 CK 相比，0.1 mmol/L Cd²⁺ 溶液处理后根长降低了 25.52%。不同浓度的 MeJA 进行灌根处理后，镉胁迫下的大豆根长随 MeJA 浓度

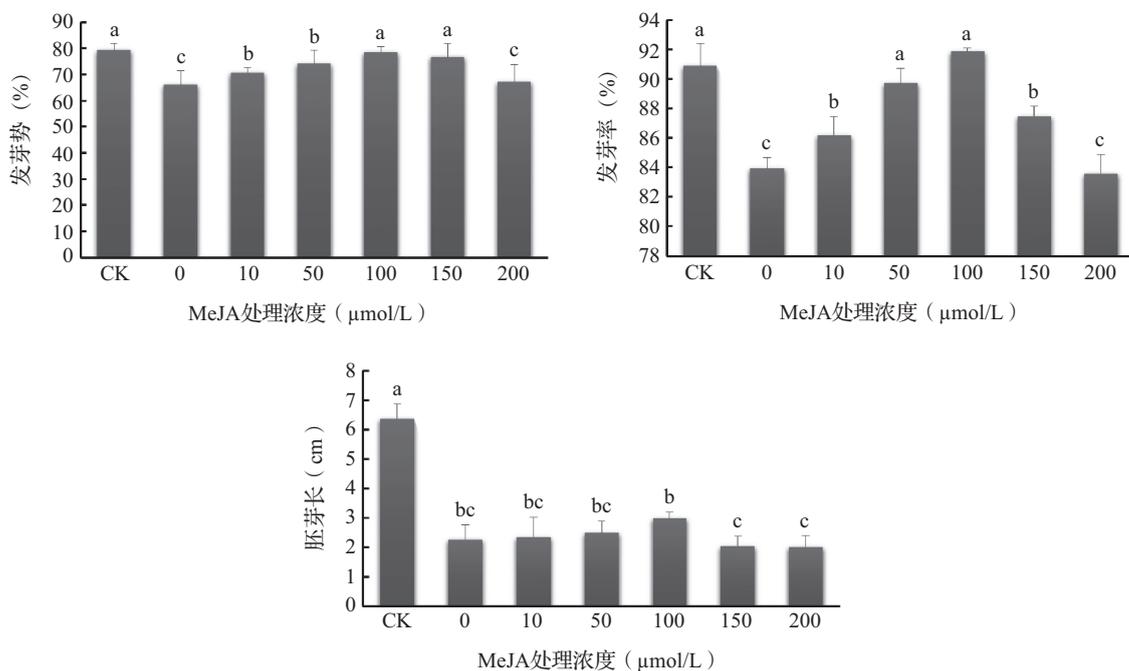


图1 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆种子萌发的影响

注：误差线上部标示的不同英文字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

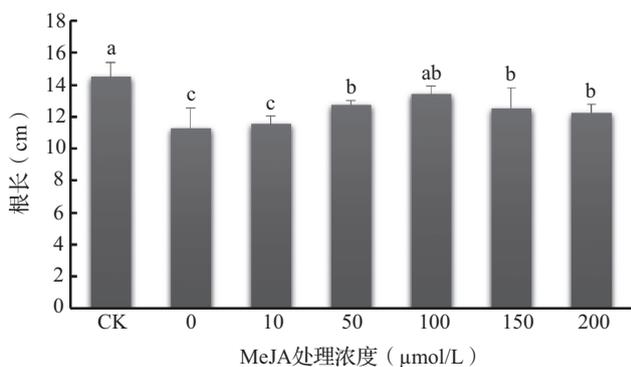


图2 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗根长的影响

的增加呈先升高再降低的趋势，且在 MeJA 浓度为 100 μmol/L 时的增幅最明显，相较于 MeJA 为 0 μmol/L 的处理升高了 31.48%，缓解镉胁迫对大豆幼苗根生长的抑制效果最明显。

2.3 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗叶片脯氨酸含量的影响

脯氨酸是一种重要的渗透调节物质，在植物的抗逆生理过程中发挥着重要的作用^[26]。图3反映了施加外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗叶片中游离脯氨酸含量的影响，发现脯氨酸的含量随着 MeJA 浓度的增加呈先减少后增加的趋势。100 μmol/L 的 MeJA 处理后大豆叶片中脯氨酸含量相对于 0 μmol/L 的处理减少了 26.80%，200 μmol/L

的 MeJA 处理使游离脯氨酸的含量显著升高。结果表明重金属镉胁迫下的大豆体内会大量累积游离脯氨酸，低浓度的外源 MeJA 处理可以降低脯氨酸的累积，浓度过高则会使得其累积量增加，这说明适宜浓度的 MeJA 缓解了重金属镉对大豆幼苗的伤害。

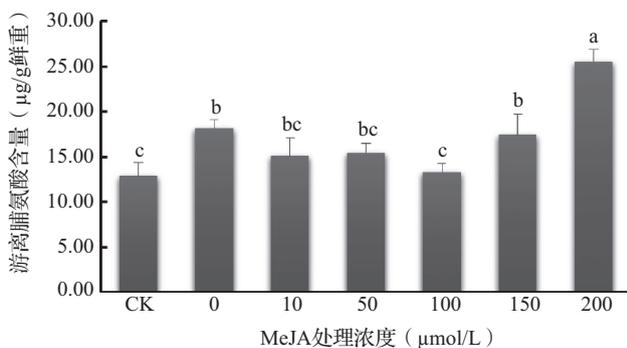


图3 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗叶片中游离脯氨酸含量的影响

2.4 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗叶片丙二醛含量的影响

丙二醛是植物在逆境环境下过氧化反应的产物，其积累量则是反映细胞膜脂过氧化作用和质膜破坏程度的重要指标^[27]。图4反映了施加外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗叶片中丙二醛含量

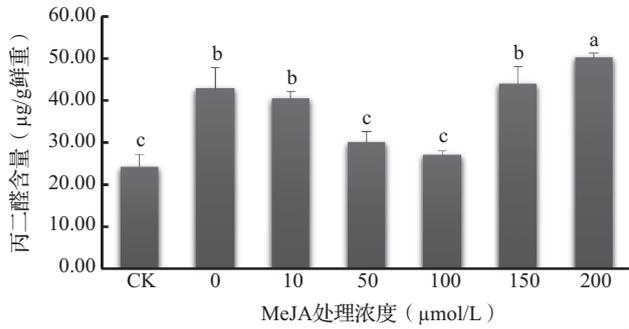


图4 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗叶片中丙二醛含量的影响

的影响, 0.1 mmol/L Cd²⁺ 胁迫下, 大豆幼苗叶片中丙二醛的含量相比于 CK 增加了 77.4%。外源 MeJA 处理后, 随着其浓度的升高, 大豆叶片中丙二醛含量呈先减少后增加的趋势。100 μmol/L 的 MeJA 处理后丙二醛含量相对于未添加 MeJA 的处理减少了 37.0%, 150、200 μmol/L 的 MeJA 处理后反而使得丙二醛的含量又升高。结果表明重金属镉胁迫下的大豆体内会大量累积丙二醛, 低浓度的外源 MeJA 可以降低丙二醛的累积, 浓度过高则会使得累积量增加, 不利于植物生长。

2.5 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗叶片抗氧化酶系统的影响

植物在逆境胁迫下, 体内会积累大量的活性氧

而发生氧化胁迫, 抗氧化酶 (SOD、POD、CAT、APX 等) 作为植物体内清除活性氧的重要酶, 参与植物的抗逆反应^[28]。由图 5 可知, 外源施加 MeJA 可有效提高镉胁迫下大豆叶片中抗氧化酶的活性。与 CK 相比, 0.1 mmol/L Cd²⁺ 溶液胁迫下大豆幼苗叶片中 SOD、POD、CAT、APX 的活性分别降低了 46.88%、43.31%、37.86%、36.99%, 这可能是因为这些酶活性中心的金属元素被镉离子取代, 使得抗氧化酶的活性受到抑制。外源施加 MeJA 后, SOD、POD、CAT、APX 的活性随着 MeJA 浓度的增加呈现先增强后减弱的趋势。100 μmol/L 的 MeJA 处理后 4 种抗氧化酶的活性增幅最显著, SOD、POD、CAT、APX 的活性相对于 MeJA 0 μmol/L 的处理分别增加了 77.62%、59.86%、64.85%、45.99%, 150、200 μmol/L 的 MeJA 处理则显著降低了各个酶的活性。结果表明, 较低浓度的外源 MeJA 处理可以极大提高抗氧化酶的活性, 从而缓解镉胁迫对大豆幼苗带来的损伤; 浓度过高时则表现出抑制酶活性的作用, 不利于植物生长。

3 讨论

重金属镉会影响植物种子的萌发、幼苗的正常生长, 对植物造成严重损伤^[13, 23]。MeJA 是一种能

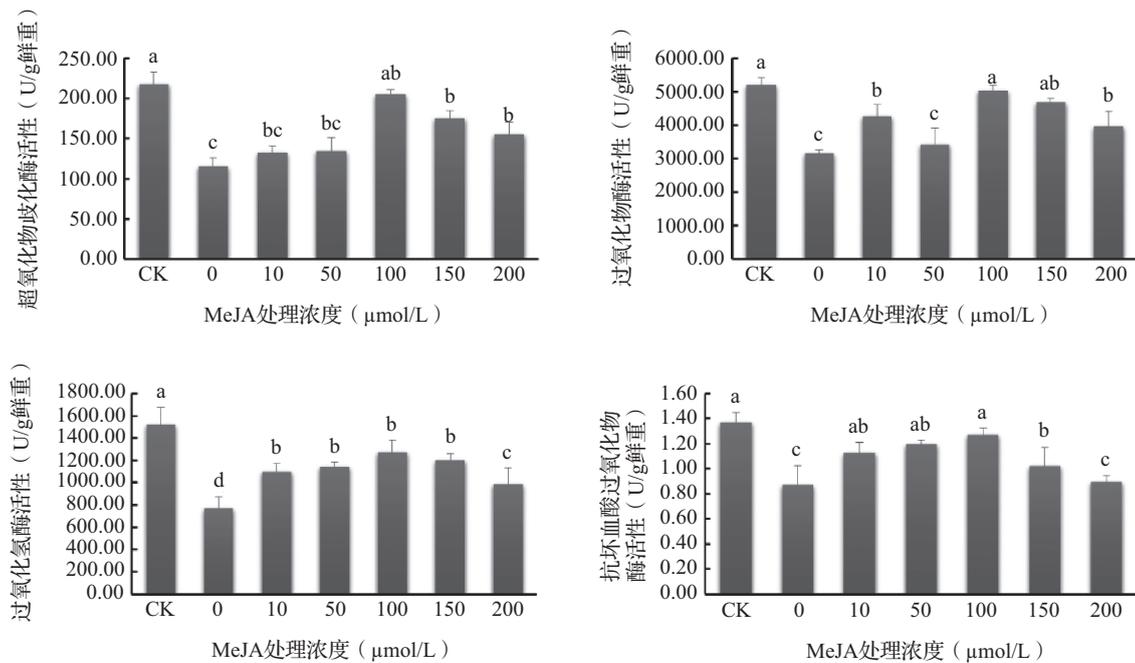


图5 外源 MeJA 对镉胁迫下大豆幼苗叶片中超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶活性的影响

够参与植物信号传导的激素,可以有效缓解镉胁迫对植物造成的伤害,促进种子萌发,促进植物根系生长发育,降低游离脯氨酸和丙二醛含量,增强抗氧化酶活性等^[23-24, 29]。

种子萌发率是衡量种子质量的重要指标之一。萌发期是植物生长发育过程中受外界环境因素影响最为敏感的其中一个时期,幼苗期对镉胁迫产生的毒害反应尤其明显^[30]。本研究发现,在镉胁迫下大豆种子的发芽势、发芽率、种子胚芽长以及幼苗根长都明显受到抑制,外源施加适宜浓度的 MeJA 溶液处理后,大豆种子的发芽势、发芽率、胚芽长和幼苗根长均明显增加,其中以 100 $\mu\text{mol/L}$ 的 MeJA 处理效果最为明显。这可能是由于 MeJA 能够提高胚根、胚芽中的抗氧化酶的活性,从而降低重金属镉对细胞膜质的损伤。

植物体内脯氨酸的积累与植物的抗逆性密切相关,脯氨酸是一种重要的有机渗透调节物质,能调节植物细胞的渗透平衡,从而保证植物各种生理生化活动的顺利进行^[31-32]。在一定的逆境条件下脯氨酸含量越高则表示受到的逆境胁迫越强。本研究发现在镉胁迫下,大豆幼苗叶片中的游离脯氨酸的含量显著增加,10、50、100、150 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 MeJA 处理可降低镉胁迫下大豆植株叶片中的脯氨酸含量,说明适宜浓度的 MeJA 缓解了重金属镉对大豆幼苗的伤害。这与在黑麦草^[22]和波斯菊^[29]上的研究结果是一致的。

在逆境胁迫下,植物体内活性氧的大量积累导致膜脂过氧化反应的加剧,从而使得过氧化产物丙二醛的含量增加,丙二醛越多则表示逆境胁迫对植物造成的氧化损伤越严重^[27, 33]。本研究中,重金属镉胁迫下大豆幼苗叶片中的丙二醛含量相比 CK 增加了 77.4%,而施加小于 100 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 MeJA 处理后,丙二醛含量有不同程度的降低,以 MeJA 浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 的效果最显著,MeJA 浓度大于 150 $\mu\text{mol/L}$ 反而使得丙二醛又大量积累。这说明低浓度的 MeJA 可有效缓解镉胁迫下大豆的膜脂过氧化反应,降低丙二醛的积累。

抗氧化酶具有维持胞内活性氧平衡、减缓膜脂过氧化的作用。在逆境胁迫下,植物体内的活性氧含量会急剧增加,植物通过提高抗氧化酶(SOD、POD、CAT、APX等)活性来清除活性氧^[28]。本研究发现,在镉胁迫下抗氧化酶的活性低于 CK,

这有可能是因为这些酶的活性中心的金属元素被镉离子取代,使得抗氧化酶的活性受到抑制^[34]。前人研究表明,MeJA 可有效提高花生^[35]在低温胁迫下、棉花^[36]在高温胁迫下、玉米^[37]和紫花苜蓿^[38]在盐胁迫下植物体内的抗氧化酶活性。本研究发现,适宜浓度的外源 MeJA 处理可极大提高镉胁迫下大豆幼苗中 SOD、POD、CAT 和 APX 4 种抗氧化酶的活性,清除过量的活性氧,从而缓解重金属镉对细胞膜系统的损伤,提高大豆植株的抗镉能力。

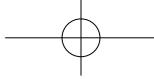
4 结论

在 0.1 mmol/L 重金属镉离子胁迫下,100 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 MeJA 可以最有效地缓解镉胁迫对大豆种子和幼苗造成的损伤,促进种子的萌发和幼苗的生长,减少丙二醛和游离脯氨酸的累积,提高抗氧化酶 SOD、POD、CAT 和 APX 的活性,从而减轻细胞膜质的损伤,促进大豆生长。本研究通过分析镉离子胁迫下不同浓度外源 MeJA 溶液对大豆种子萌发及幼苗生理的影响,初步解析大豆耐镉胁迫的生理机制,为大豆耐镉胁迫分子育种奠定基础。

参考文献:

- [1] 张亚东, 刘海学, 赵里曼. 作物镉胁迫研究进展及其在水稻中的应用展望 [J]. 种子科技, 2021, 39 (2): 30-31, 34.
- [2] 闫湘, 王旭, 李秀英, 等. 我国水溶肥料中重金属含量、来源及安全现状 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (1): 8-18.
- [3] 李婧, 周艳文, 陈森, 等. 我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述 [J]. 安徽农学通报, 2015, 21 (24): 104-107.
- [4] Zulfiqar U, Ayub A, Hussain S, et al. Cadmium toxicity in plants: recent progress on morpho-physiological effects and remediation strategies [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22 (1): 212-269.
- [5] 王金香, 张阿良, 秦敏, 等. 镉胁迫对玉米幼苗光合特性及活性氧代谢的影响 [J]. 天津农业科学, 2023, 29 (1): 1-6.
- [6] 翟夜雨, 黄五星, 袁岐山, 等. 植物镉毒害与硒对镉胁迫的缓解作用研究进展 [J]. 河南农业大学学报, 2023, 57 (3): 372-382.
- [7] 马凤仪, 赵宝平, 张茹, 等. 燕麦植株生长及叶片生理活性对土壤镉胁迫的响应 [J]. 西北植物学报, 2022, 42 (8): 1347-1354.
- [8] 熊敏先, 吴迪, 许向宁, 等. 土壤重金属镉对高等植物的毒

- 性效应研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2021, 16 (6): 133-149.
- [9] 徐雪高. 大豆进口连创新高和我国的粮食安全 [J]. 现代经济探讨, 2013 (10): 58-62.
- [10] Zhou H, Zeng M, Zhou X, et al. Assessment of heavy metal contamination and bioaccumulation in soybean plants from mining and smelting areas of southern Hunan Province, China [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2013, 32 (12): 2719-2727.
- [11] Xue Z, Gao H, Zhao S. Effects of cadmium on the photosynthetic activity in mature and young leaves of soybean plants [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2014, 21 (6): 4656-4664.
- [12] 燕辉, 王雪芹, 代智光. 镉胁迫对大豆幼苗生理特性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (6): 269-275.
- [13] 韩俊艳, 王敬言, 刘诗琦, 等. 重金属镉胁迫对大豆种子萌发与幼苗生长的影响 [J]. 沈阳大学学报 (自然科学版), 2023, 35 (2): 108-115.
- [14] 刘佳丽. 重金属镉对大豆种子萌发与幼苗生长的影响 [J]. 农业技术与装备, 2023 (12): 13-15.
- [15] 石浩东. 镉胁迫对不同进化程度大豆生长发育的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [16] Fujita M, Fujita Y, Noutoshi Y, et al. Crosstalk between abiotic and biotic stress responses: a current view from the points of convergence in the stress signaling networks [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2006, 9 (4): 436-442.
- [17] 忽雪琦, 李东阳, 严加坤, 等. 干旱胁迫下外源茉莉酸甲酯对玉米幼苗根系吸水的影响 [J]. 植物生理学报, 2018, 54 (6): 991-998.
- [18] 左彬彬, 张彦萍, 刘海河, 等. 茉莉酸甲酯对厚皮甜瓜幼苗耐冷性的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2018, 41 (5): 75-79.
- [19] 刘霞, 唐设, 窦志, 等. 茉莉酸甲酯对武运粳 24 和宁粳 3 号灌浆早期高温胁迫生理特性的影响 [J]. 中国水稻科学, 2016, 30 (3): 291-303.
- [20] Faghhi S, Ghobadi C, Zarei A. Response of strawberry plant cv. 'Camarosa' to salicylic acid and methyl jasmonate application under salt stress condition [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2017, 36: 651-659.
- [21] Keramat B, Kalantari K M, Arvin M J. Effects of methyl jasmonate in regulating cadmium induced oxidative stress in soybean plant (*Glycine max* L.) [J]. African Journal of Microbiology Research, 2009, 3 (5): 240-244.
- [22] 鲜靖苹, 王勇, 张平. 外源茉莉酸甲酯对镉胁迫下多年生黑麦草种子萌发及幼苗生理的影响 [J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 2019, 55 (6): 74-82.
- [23] 冯文静, 高巍, 孙苗苗, 等. 茉莉酸甲酯对小麦幼苗生长及镉积累的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2022, 41 (5): 933-942.
- [24] 赵雪蕊, 王勇, 孙得翔, 等. 外源茉莉酸甲酯对镉胁迫下马铃薯生长生理、产量及品质的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 1-10 [2024-12-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20231226.1519.004.html>.
- [25] 李小方, 张志良. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [26] Singh T N, Aspinall D, Palag L G. Proline accumulation and varietal adaptability to drought in barley: a potential metabolic measure of drought resistance [J]. Nature: New biology, 1972, 236 (67): 188-190.
- [27] Gomes F P, Oliva M A, Mielke M S, et al. Osmotic adjustment, proline accumulation and cell membrane stability in leaves of *Cocos nucifera* submitted to drought stress [J]. Scientia Horticulturae, 2010, 126 (3): 379-384.
- [28] 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.
- [29] 鲜靖苹. 外源 MeJA 对镉胁迫下波斯菊生长及抗氧化系统的影响 [J]. 西北植物学报, 2019, 39 (9): 1627-1635.
- [30] 杨明, 陈璐, 徐庆国, 等. 镉胁迫对不同水稻品种种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 作物研究, 2017, 31 (6): 659-663.
- [31] Kishor P B K, Sreenivasulu N. Is proline accumulation per se correlated with stress tolerance or is proline homeostasis a more critical issue? [J]. Plant, Cell & Environment, 2014, 37 (2): 300-311.
- [32] 赵燕昊, 曹跃芬, 孙威怡, 等. 小麦抗旱研究进展 [J]. 植物生理学报, 2016, 52 (12): 1795-1803.
- [33] 尚宏芹, 刘兴坦. 表油菜素内酯对汞胁迫下小麦幼苗抗氧化系统的影响 [J]. 核农学报, 2016, 30 (11): 2258-2264.
- [34] 熊愈辉, 杨肖娥. 镉对植物毒害与植物耐镉机理研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2006, 34 (13): 2969-2971.
- [35] 杨佳欣. 外源茉莉酸甲酯对花生苗期耐冷性的影响及生理调控机制 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [36] 谢贤运. 外源茉莉酸甲酯对高温胁迫下棉花产量品质及相关生理指标的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [37] 王芳, 周娟, 黄兴华, 等. 外源 MeJA 对盐胁迫下玉米幼苗生长及抗氧化酶基因表达的影响 [J]. 玉米科学, 2022, 30 (2): 75-81.
- [38] 崔凯, 吴连军, 张靖媛. 盐胁迫下茉莉酸甲酯调控紫花苜蓿幼苗生长机制研究 [J]. 现代农业科技, 2022 (12): 153-160.



Effects of exogenous methyl jasmonate on soybean seed germination and physiological characteristics under cadmium stress

CUI Xiao-xia*, SHI Chen-le, LIU Xue-qin (College of Agronomy and Horticulture, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong Jiangsu 212400)

Abstract: To investigate the effects of exogenous methyl jasmonate (MeJA) on seed germination and seedling physiological characteristics of soybean under cadmium stress, different concentrations of exogenous MeJA were used to treat the seeds and seedlings of soybean under cadmium stress. The germination and physiological index of soybean were studied. The result showed that the germination of soybean seeds and physiological indicators of seedlings were significantly inhibited at a cadmium concentration of 0.1 mmol/L. Application of lower concentrations of exogenous MeJA effectively promoted the germination of soybean seeds, reduced the content of free proline and malondialdehyde in soybean seedling leaves, and increased the activities of superoxide dismutase, peroxidase, catalase and ascorbate peroxidase. Application of exogenous MeJA at high concentrations greater than 150 $\mu\text{mol/L}$ actually exhibited inhibitory effects on seed germination and reactive oxygen species metabolism. The results indicated that appropriate concentrations of exogenous MeJA effectively alleviated the damage of heavy metal cadmium stress to soybean seedlings, while excessively high concentrations of MeJA had adverse effects on the growth and metabolism of soybean seedlings. Therefore, 100 $\mu\text{mol/L}$ of exogenous MeJA could effectively promote the germination and seedling growth of soybean seeds under cadmium stress.

Key words: soybean; cadmium stress; methyl jasmonate; germination; physiological characteristics