

王志科, 任盼荣, 张 魁, 等. 外源甜菜碱促进铬胁迫下豌豆幼苗生长[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(7): 1441-1446.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.07.015

外源甜菜碱促进铬胁迫下豌豆幼苗生长

王志科, 任盼荣, 张 魁, 王凤琴

(陇东学院农业与生物工程学院/甘肃省陇东生物资源保护利用与生态修复重点实验室, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 为探究外源甜菜碱对铬(Cr^{6+})胁迫的缓解效应。本研究以豌豆为试验材料, 研究甜菜碱浸种对 200 mg/L 质量浓度 Cr^{6+} 胁迫下豌豆种子萌发、幼苗生长、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性的影响。结果表明, 200 mg/L Cr^{6+} 可显著抑制豌豆种子萌发和幼苗生长 ($P < 0.05$); 与单独 Cr^{6+} 胁迫处理相比, 浓度为 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理可显著提高 Cr^{6+} 胁迫下豌豆种子发芽率和幼苗生长, 显著增加幼苗中脯氨酸含量和可溶性糖含量, 显著降低幼苗丙二醛(MDA)含量, 显著提高幼苗抗氧化酶[过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)]活性 ($P < 0.05$), 但 60 mmol/L 甜菜碱浸种处理作用不显著 ($P > 0.05$)。综上, 外源甜菜碱浸种可通过提高豌豆幼苗渗透调节物质含量、增强抗氧化酶活性、降低膜脂过氧化水平缓解铬胁迫对豌豆的毒害作用, 促进种子萌发及幼苗生长。

关键词: 甜菜碱; 豌豆; 铬胁迫; 幼苗生长; 渗透调节物质; 抗氧化酶活性

中图分类号: S643.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)07-1441-06

Promoting effect of exogenous betaine on the growth of pea seedlings under chromium stress

WANG Zhike, REN Panrong, ZHANG Kui, WANG Fengqin

(School of Agriculture and Bioengineering, Longdong University/Gansu Key Laboratory of Conservation and Utilization of Biological Resources and Ecological Restoration in Longdong, Qingyang 745000, China)

Abstract: This study aimed to explore the mitigation effect of exogenous betaine on chromium (Cr^{6+}) stress. In this study, pea was used as the test material to study the effects of seed soaking with betaine on seed germination, seedling growth, osmoregulatory substance content and antioxidant enzyme activities under 200 mg/L Cr^{6+} stress. The results showed that 200 mg/L Cr^{6+} significantly inhibited pea seed germination and seedling growth ($P < 0.05$). Compared with Cr^{6+} stress alone, seed soaking with 30 mmol/L betaine significantly increased the germination rate and seedling growth of pea under Cr^{6+} stress, significantly increased the contents of proline and soluble sugar in seedlings, significantly decreased the malondialdehyde (MDA) content, and significantly enhanced the activities of antioxidant enzymes, i.e., catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), and peroxidase (POD), in seedlings ($P < 0.05$). In contrast, the 60 mmol/L betaine treatment showed no significant effect ($P > 0.05$). In conclusion, seed soaking with exogenous betaine alleviates the toxic effects of

chromium stress on pea and promotes seed germination and seedling growth by increasing the content of osmoregulatory substances, enhancing antioxidant enzyme activities, and reducing the level of membrane lipid peroxidation in pea seedlings.

Key words: betaine; pea; chromium stress; seedling growth; osmoregulatory substances; antioxidant enzyme activity

收稿日期: 2025-08-25

基金项目: 甘肃省高校青年博士支持项目(2024QB-118); 甘肃省自然科学基金项目(21JR11RM042); 甘肃省高等学校创新基金项目(2021B-273); 陇东学院博士基金计划项目(XY-BY202007、XYBYZK15)

作者简介: 王志科(1988-), 男, 宁夏吴忠人, 博士, 副教授, 主要从事植物逆境抗性研究。(E-mail) 378487542@qq.com

甜菜碱(GB)是一种天然存在、无毒、性质稳定的季铵型生物碱^[1-3],在植物、微生物和动物体内广泛存在^[4-5]。已有研究表明,甜菜碱在植物逆境生理中扮演极其重要的角色^[6-7],它是一种关键的相容性溶质和抗氧化剂,帮助植物抵抗各种非生物胁迫^[8]。刘丽苹等^[9]研究发现,施用甜菜碱能改善盐胁迫对大麦种子萌发和幼苗生长的影响;徐婷等^[10]研究发现,适量施用甜菜碱能提高低温下玉米种子萌发和幼苗生长;侯晓敏等^[11]研究发现,干旱胁迫下外源甜菜碱可通过提升谷子的渗透调节物质含量与抗氧化能力维持细胞稳态,促进其种子萌发和幼苗生长,从而有效缓解干旱胁迫损伤;张云芳等^[12]研究发现,外源甜菜碱介导的活性氧代谢调控与膜脂过氧化抑制是减轻铝胁迫下小麦幼苗生长受阻和生理损伤的关键机制;路旭平等^[13]研究发现,适宜浓度的甜菜碱能有效缓解镉胁迫下紫花苜蓿种子萌发和幼苗根系生长。尽管外源甜菜碱对盐、低温、干旱等非生物胁迫的缓解效应已得到诸多研究证实,但其对六价铬(Cr^{6+})胁迫下豌豆幼苗生长的调控作用及相关机制,目前尚未见深入报道。

豌豆在全球范围内有广泛的市场需求,主要用于食品加工、饲料和生物燃料等领域^[14],其经济价值随着健康食品市场的扩大而提高。近年来,随着工业发展,含铬废渣和废水的排放引起土壤中铬过量积累,影响农作物生长和食品安全^[15]。据报道,当前中国已有总面积 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 耕地受到铬等重金属污染^[16]。植物吸收过多的铬,会造成植株矮小、叶片弯曲内卷,根系变褐、变短、发育不良等^[17]。已有研究表明,高浓度铬胁迫会抑制植物种子萌发和根系正常生长,还会导致植物体内糖和蛋白质等生理代谢异常,活性氧含量上升,膜脂氧化加重,从而使作物产量下降^[18]。这一问题为豌豆的规模化种植带来了严峻挑战,因此,筛选并探究可有效缓解重金属铬污染对作物损伤的外源调控物质,已成为当前农业生态领域的迫切需求。目前,关于外源甜菜碱对铬胁迫下豌豆生长的调控效应及作用机制的研究报道较为匮乏。基于此,本研究通过测定 Cr^{6+} 胁迫下外源甜菜碱对豌豆种子萌发特性及幼苗生理指标的影响,旨在明确外源甜菜碱对铬胁迫下豌豆幼苗生长的促进作用,为甜菜碱在提升植物铬胁迫抗性方面的实际应用提供理论依据与实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用豌豆种子由陇东学院农业与生物工程学院植物生理实验室提供^[19]。三氧化铬、甜菜碱等均为分析纯化学试剂,试剂盒购自北京索莱宝科技有限公司。

1.2 试验设计

1.2.1 筛选铬处理浓度 挑选籽粒饱满、种皮完整的豌豆种子,用 1%次氯酸钠消毒 10 min^[20]。用清水洗净,然后把种子放入铺有两层滤纸的培养皿中,每皿 50 粒。试验设置 1 个空白对照(CK)和 5 个不同质量浓度的 Cr^{6+} 处理,空白对照仅加入 10 mL 蒸馏水, Cr^{6+} 处理组分别加入 10 mL 质量浓度为 50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L、300 mg/L、400 mg/L 的 Cr^{6+} 溶液,每个处理重复 3 次。将所有培养皿置于恒温培养箱中,每日观察并统计发芽数。

1.2.2 外源添加甜菜碱浸种处理 根据前期试验结果,筛选出 200 mg/L Cr^{6+} 作为后续复合试验的最佳铬质量浓度。本试验所用豌豆种子参照材料与方法 1.2.1 的方法进行选种与表面消毒,随后开展浸种及萌发试验。浸种:设置 8 个处理,每个处理 3 次生物学重复,以蒸馏水浸种 12 h 作为空白对照(A);200 mg/L Cr^{6+} 溶液浸种 12 h 作为条件对照(B);甜菜碱处理浓度分别为 10 mmol/L、20 mmol/L、30 mmol/L、40 mmol/L、50 mmol/L、60 mmol/L,浸种 12 h。以上处理结束后,用蒸馏水充分漂洗种子。将经上述处理后的种子均匀置于铺有 2 层滤纸的培养皿中,每皿 50 粒,其中,空白对照加入 10 mL 蒸馏水;条件对照加 10 mL 200 mg/L Cr^{6+} 溶液,6 个甜菜碱加 Cr^{6+} 复合处理均加入 10 mL 200 mg/L Cr^{6+} 溶液,依次记为 C、D、E、F、G、H 处理。将所有培养皿置于恒温培养箱中培养,每日观察并统计种子发芽数。

1.3 指标测定与方法

1.3.1 种子萌发指标测定 发芽试验共 7 d,以胚根长达到种子长度一半作为发芽标准,参考王志科等^[20]相关公式计算种子萌发指标,第 3 d 计算种子发芽势,第 7 d 计算种子发芽率、发芽指数和活力指数。

1.3.2 幼苗生长指标测定 种子发芽试验结束后,每组随机挑选 15 株幼苗,参考王志科等^[20]的方法

测定幼苗芽长、根长、芽鲜质量和根鲜质量。

1.3.3 生理指标与抗氧化酶活性测定 可溶性糖含量、脯氨酸含量及丙二醛(MDA)含量,以及过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性的测定,均严格参照相应试剂盒的使用说明进行。

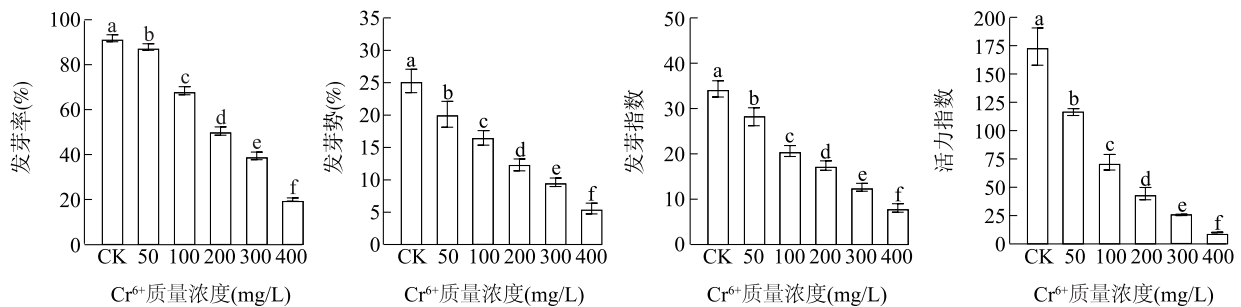
1.4 数据处理

应用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理,用 SPSS26.0 软件进行单因素方差分析,用 Duncan 氏法进行多重比较和差异显著性分析($P < 0.05$);用 GraphPad 9 软件作图^[20]。

2 结果与分析

2.1 不同浓度铬胁迫对豌豆种子萌发的影响

由图 1 可以看出,随着铬浓度的升高,豌豆种子发芽指标均显著降低($P < 0.05$)。与对照相比,铬浓度为 50 mg/L 时,豌豆种子发芽率为对照的 96%;铬浓度为 100 mg/L 时,发芽率为对照的 75%;铬浓度为 200 mg/L 时,发芽率为对照的 55%,接近半致死状态,故本研究选用 200 mg/L Cr^{6+} 作为半致死铬胁迫质量浓度,用于后续复合处理试验。



CK:空白对照,蒸馏水处理。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

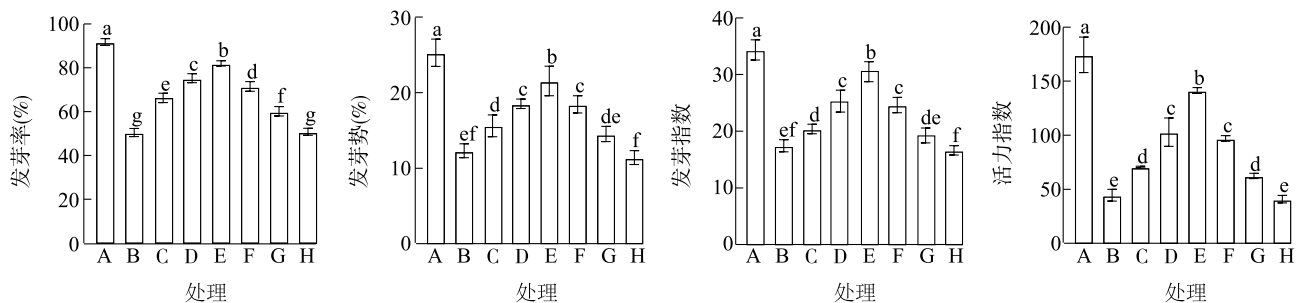
图 1 Cr^{6+} 胁迫对豌豆种子萌发的影响

Fig.1 Effects of Cr^{6+} stress on seed germination of pea

2.2 甜菜碱浸种处理对铬胁迫下豌豆种子萌发的影响

由图 2 可知,单独铬处理(B)与铬胁迫下甜菜碱浸种处理(C、D、E、F、G、H)豌豆种子发芽指标均显著低于空白对照($P < 0.05$)。与 B 处理相比,铬胁迫下 10 mmol/L、20 mmol/L、30 mmol/L、40 mmol/L

甜菜碱浸种处理的豌豆种子发芽率、发芽势、发芽指数、种子活力指数均显著提高($P < 0.05$),其中 30 mmol/L 甜菜碱处理效果最好,60 mmol/L 高浓度甜菜碱处理效果与 B 处理相比差异不显著($P > 0.05$)。表明适宜浓度外源甜菜碱浸种可有效缓解铬胁迫对豌豆种子萌发的抑制。



A:空白对照,蒸馏水处理;B:条件对照,200 mg/L Cr^{6+} 处理;C:10 mmol/L 甜菜碱浸种+200 mg/L Cr^{6+} 胁迫处理;D:20 mmol/L 甜菜碱浸种+200 mg/L Cr^{6+} 胁迫处理;E:30 mmol/L 甜菜碱浸种+200 mg/L Cr^{6+} 胁迫处理;F:40 mmol/L 甜菜碱浸种+200 mg/L Cr^{6+} 胁迫处理;G:50 mmol/L 甜菜碱浸种+200 mg/L Cr^{6+} 胁迫处理;H:60 mmol/L 甜菜碱浸种+200 mg/L Cr^{6+} 胁迫处理。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

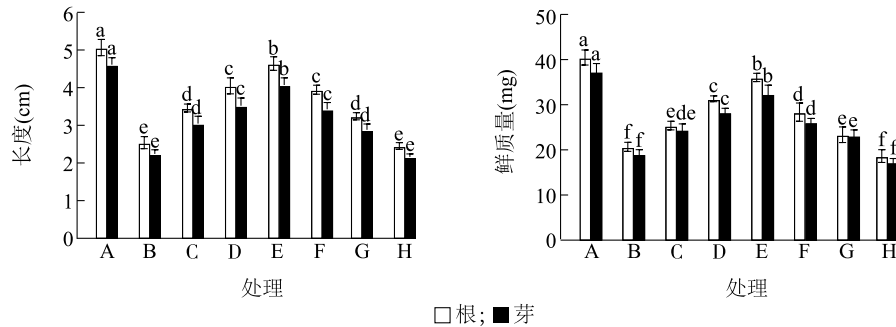
图 2 Cr^{6+} 胁迫下甜菜碱处理对豌豆种子萌发的影响

Fig.2 Effects of betaine treatment on seed germination of pea under Cr^{6+} stress

2.3 甜菜碱处理对铬胁迫下豌豆幼苗生长的影响

由图 3 可知,单独铬胁迫处理与铬胁迫下甜菜碱浸种处理豌豆幼苗的根长、芽长、根鲜质量和芽鲜质量均显著低于空白对照($P<0.05$)。与 B 处理相比,铬胁迫下 10 mmol/L、20 mmol/L、30 mmol/L、40

mmol/L、50 mmol/L 甜菜碱浸种处理均能显著提高豌豆幼苗根长、芽长、根鲜质量、芽鲜质量,其中 30 mmol/L 甜菜碱浸种加铬处理效果最好,60 mmol/L 甜菜碱浸种处理作用不显著($P>0.05$)。表明适宜浓度外源甜菜碱浸种能促进铬胁迫下豌豆幼苗的生长。



A、B、C、D、E、F、G、H 见图 2 注。同一器官图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

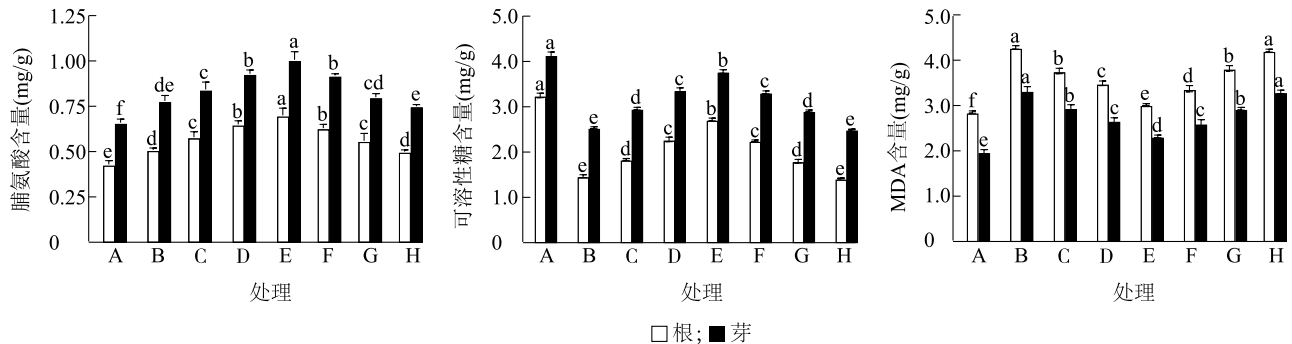
图 3 Cr^{6+} 胁迫下甜菜碱对豌豆幼苗生长的影响

Fig.3 Effects of betaine on pea seedling growth under Cr^{6+} stress

2.4 甜菜碱浸种处理对铬胁迫下豌豆幼苗渗透调节物质含量和丙二醛 (MDA) 含量的影响

由图 4 所示,与空白对照相比,单独铬胁迫处理与铬胁迫下甜菜碱浸种处理豌豆幼苗根和芽中脯氨酸含量均显著提高($P<0.05$)。与单独铬处理相比,铬胁迫

下 10 mmol/L、20 mmol/L、30 mmol/L、40 mmol/L 甜菜碱浸种处理豌豆幼苗根和芽中脯氨酸含量显著提升 ($P<0.05$),其中 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理效果最好,60 mmol/L 甜菜碱浸种处理豌豆幼苗根和芽中脯氨酸含量与单独铬胁迫处理相比差异不显著 ($P>0.05$)。



A、B、C、D、E、F、G、H 见图 2 注。同一器官图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 4 Cr^{6+} 胁迫下甜菜碱对豌豆幼苗脯氨酸、可溶性糖和丙二醛 (MDA) 含量的影响

Fig.4 Effects of betaine on the contents of proline, soluble sugar and malondialdehyde (MDA) in pea seedlings under Cr^{6+} stress

单独铬胁迫处理与铬胁迫下甜菜碱浸种处理豌豆幼苗根和芽中可溶性糖含量显著低于空白对照 ($P<0.05$)。与单独铬胁迫处理相比,铬胁迫下 10 mmol/L、20 mmol/L、30 mmol/L、40 mmol/L、50 mmol/L 甜菜碱浸种处理豌豆幼苗根和芽中可溶性糖含量显著提升 ($P<0.05$),其中 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理效果最好,60 mmol/L 甜菜碱浸种处理豌豆

幼苗可溶性糖含量与单独铬胁迫处理差异不显著 ($P>0.05$)。

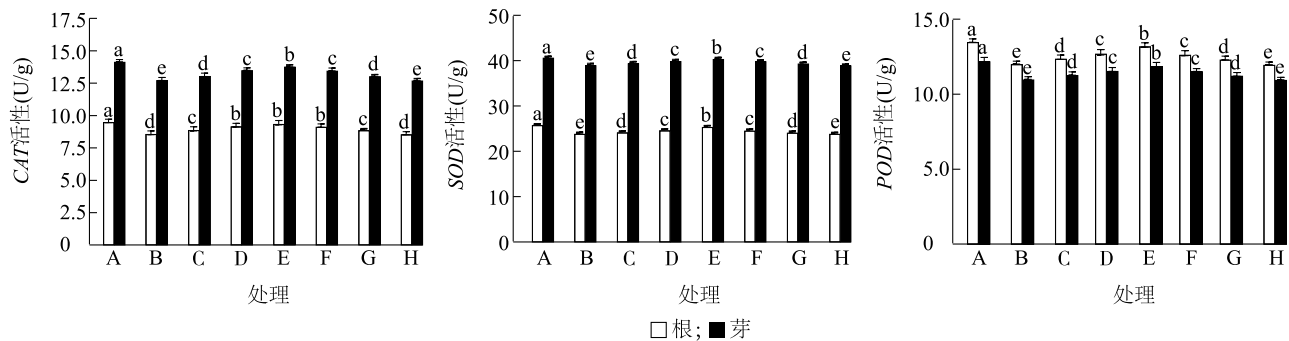
单独铬胁迫处理与铬胁迫下甜菜碱浸种处理豌豆幼苗中 MDA 含量显著高于空白对照 ($P<0.05$)。与单独铬胁迫处理相比,铬胁迫下 10 mmol/L、20 mmol/L、30 mmol/L、40 mmol/L、50 mmol/L 甜菜碱浸种处理均能显著降低幼苗根和芽中 MDA 含量,

其中 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理效果最好, 60 mmol/L 甜菜碱浸种处理豌豆幼苗 MDA 含量与单独铬胁迫处理差异不显著 ($P>0.05$)。

2.5 甜菜碱浸种处理对铬胁迫下豌豆幼苗抗氧化酶活性的影响

由图 5 可知, 与空白对照相比, 单独铬胁迫处理与铬胁迫下甜菜碱浸种处理豌豆幼苗中 CAT 活性、

SOD 活性和 POD 活性均受到显著抑制 ($P<0.05$)。与单独铬胁迫处理相比, 铬胁迫下 10 mmol/L、20 mmol/L、30 mmol/L、40 mmol/L、50 mmol/L 甜菜碱浸种处理均能显著提高豌豆幼苗抗氧化酶 (CAT、SOD 和 POD) 活性 ($P<0.05$), 其中 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理提升效果最好, 60 mmol/L 甜菜碱浸种处理提升效果不显著 ($P>0.05$)。



A、B、C、D、E、F、G、H 见图 2 注。CAT: 过氧化氢酶; SOD: 超氧化物歧化酶; POD: 过氧化物酶。同一器官图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 5 Cr^{6+} 胁迫下甜菜碱对豌豆幼苗根和芽中抗氧化酶活性的影响

Fig.5 Effects of betaine on antioxidant enzyme activities in roots and shoots of pea seedlings under Cr^{6+} stress

3 讨论

3.1 甜菜碱对铬胁迫下豌豆种子萌发和幼苗生长的影响

随着工业废水的不合理排放, 农田土壤中铬污染严重^[21]。高浓度铬污染会阻碍植物细胞分裂, 影响根对营养物质的吸收利用, 造成植物叶片发黄, 光合能力下降^[22]。已有研究结果表明, 铬胁迫处理会显著抑制小麦^[20]、百日草^[23]、紫花苜蓿^[24]、黄瓜^[25]、白三叶^[26]、娃娃菜^[27]、茼蒿^[28]种子萌发和幼苗生长。本研究发现, 200 mg/L 铬胁迫下豌豆种子萌发受到显著抑制 ($P<0.05$), 且其幼苗根长、芽长、根鲜质量、芽鲜质量均显著降低 ($P<0.05$), 推测原因在于铬胁迫会干扰豌豆种子吸水过程, 降低渗透势, 延缓吸水膨胀。经 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理后, 铬胁迫下豌豆种子的萌发和幼苗生长显著改善, 表明适宜浓度的外源甜菜碱可缓解铬胁迫对种子萌发的抑制作用, 但高浓度 (60 mmol/L) 甜菜碱作用不显著 ($P>0.05$)。

3.2 甜菜碱对铬胁迫下豌豆幼苗生理特性的影响

植物在遭受重金属铬胁迫时, 可通过启动渗透调节机制抵御逆境, 大量合成并积累脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质, 以维持细胞渗透势稳定^[29]。本研

究结果显示, 200 mg/L 铬胁迫下, 豌豆幼苗体内脯氨酸含量显著升高 ($P<0.05$), 这可能是豌豆为应对铬胁迫所启动的自我保护机制, 通过促进脯氨酸积累以增强抗逆能力。经 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理后, 铬胁迫下豌豆幼苗中脯氨酸含量进一步提升, 说明适宜浓度甜菜碱可有效强化上述抗逆保护机制。

重金属铬污染还会引发植物体内活性氧 (ROS) 过度积累, 导致细胞膜氧化损伤、细胞膜透性增加, 进而抑制植物正常生长发育^[30]; 此外, 铬胁迫还会使植物细胞中丙二醛 (MDA) 含量上升, 加剧细胞膜受损害程度, 导致植物生长畸形^[31]。本研究发现, 200 mg/L 铬胁迫可显著提高豌豆幼苗中 MDA 含量 ($P<0.05$), 铬胁迫下 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理, 可显著降低幼苗中 MDA 含量 ($P<0.05$), 表明适宜浓度甜菜碱可通过降低 MDA 含量, 来缓解铬污染对豌豆的毒害。

正常情况下, 植物细胞通过调控活性氧的生成与清除机制, 使其水平保持在一个动态平衡之中, 当受到重金属铬污染时, 会打破这种平衡^[32]。此时, 植物会启动抗氧化酶系统, 通过增强相关抗氧化酶活性以清除过量的活性氧, 从而缓解铬胁迫对植株造成的损伤^[33]。本研究发现, 200 mg/L 铬胁迫可显

著抑制豌豆幼苗中抗氧化酶 (*CAT*、*SOD*、*POD*) 活性 ($P<0.05$)。铬胁迫下 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理, 可显著提高幼苗中抗氧化酶活性 ($P<0.05$), 表明适宜浓度甜菜碱可通过提高抗氧化酶活性, 有效缓解铬胁迫对豌豆的毒害。

4 结 论

综上所述, 200 mg/L 铬胁迫可显著抑制豌豆种子的萌发和幼苗生长 ($P<0.05$), 通过适宜浓度甜菜碱溶液浸种可有效提高豌豆幼苗渗透调节物质含量和抗氧化酶活性, 降低丙二醛含量, 缓解铬胁迫对豌豆的毒害, 进而促进其种子萌发和幼苗生长。其中, 30 mmol/L 甜菜碱浸种处理效果最佳, 高浓度 (60 mmol/L) 甜菜碱作用效果不显著 ($P>0.05$)。

参考文献:

- [1] 卢俊, 金林洁, 应潇, 等. 外源甜菜碱对高温胁迫龙须菜的保护作用及其机制分析[J]. 植物生理学报, 2025, 61(7): 1007-1018.
- [2] 董向向, 缪百灵, 王燕娜, 等. 外源甜菜碱对盐胁迫下草莓生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(13): 197-203.
- [3] 胡若群, 杨卓生, 王舟帆, 等. 外源甜菜碱对 NaCl 胁迫下大红三角梅生理特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2025, 64(3): 86-91, 99.
- [4] 刘霞, 曹涛, 姚新刚, 等. 外源甜菜碱对盐胁迫杜梨种子的萌发及生理特性研究[J]. 落叶果树, 2024, 56(5): 37-40.
- [5] 龙茶. 外源甜菜碱对生姜干旱胁迫作用效果及耐旱基因挖掘[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
- [6] 刘子荣. 外源甜菜碱缓解半夏盐胁迫的生理效应[D]. 南充: 西华师范大学, 2024.
- [7] 魏晓凯, 罗小兵, 赵杰, 等. 外源甜菜碱对烤烟幼苗干旱胁迫的缓解效应[J]. 山西农业科学, 2024, 52(1): 79-85.
- [8] 杨志杰, 陈艳, 戴陶宇, 等. 外源甜菜碱对高温胁迫下生菜种子萌发的影响[J]. 种子, 2024, 43(5): 99-104.
- [9] 刘丽苹, 汪军成, 司二静, 等. 外源甜菜碱和脯氨酸对盐胁迫下大麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(6): 766-774.
- [10] 徐婷, 王俊强, 韩业辉, 等. 外源甜菜碱浸种对低温胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2023(8): 8-12.
- [11] 侯晓敏, 闫锋, 董扬, 等. 外源甜菜碱对干旱胁迫下谷子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2025(2): 228-233.
- [12] 张云芳, 程智鸿, 张心茹, 等. 外源甜菜碱对铝胁迫下小麦幼苗生长及抗氧化能力的调节效应[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(11): 1467-1473.
- [13] 路旭平, 董文科, 张然, 等. 外源甜菜碱对镉胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草原与草坪, 2019, 39(6): 1-10.
- [14] 马天天, 孟俊瑛, 陈高, 等. 100 份菜用豌豆种质资源品质鉴定与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2025, 26(4): 683-692.
- [15] 陈窃君, 黄沈婷. 化学和微生物复合还原六价铬污染土壤研究[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(增刊2): 19-25.
- [16] 吕昆, 吴治陵, 邓丽. 土壤重金属污染修复技术的演进与研究进展[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(增刊1): 52-61.
- [17] 孙游云. 铬对植物体生长生理的影响及其在植物体中的积累规律[J]. 环境污染与防治, 2001, 23(1): 45-46.
- [18] 孙淑珍, 田中伟, 郑巧梅, 等. 外源调节物质对铬 (Cr^{6+}) 胁迫下小麦种子萌发的缓解效应[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(9): 1104-1110.
- [19] 王志科, 刘灵霞. 外源水杨酸对干旱胁迫下黄精种子萌发和幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57(1): 81-86.
- [20] 王志科, 邓金霞, 唐慧玲, 等. 外源水杨酸对铬胁迫下小麦种子萌发和幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 63-68.
- [21] 刘晓莉, 杨红健, 白俊宾, 等. 利用改性生物炭修复铬污染土壤的综合实验设计[J]. 广州化工, 2025, 53(15): 183-185, 195.
- [22] 巴青松, 张兰兰, 李桂萍, 等. 根施脯氨酸对铬胁迫下小麦幼苗生长的生理影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(4): 576-582.
- [23] 朱红霞, 李赛楠, 苏文青, 等. 外源褪黑素对铬胁迫下百日草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(9): 64-69.
- [24] 刘长风, 王椰, 段士鑫, 等. 铬胁迫下紫花苜蓿种子萌发和幼苗生理响应的主成分分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(19): 176-182.
- [25] 张盼盼, 纪江涛, 武熊, 等. 不同浓度 EDTA 对铬胁迫下黄瓜种子萌发的缓解效应[J]. 榆林学院学报, 2021, 31(6): 47-52.
- [26] 王铎, 田雨龙, 张鸿建, 等. 胺鲜酯对铬胁迫下白三叶种子萌发特性的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(10): 1986-1997.
- [27] 闫志强, 陈银萍, 余沛东, 等. 外源一氧化氮对铬胁迫下娃娃菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(9): 2033-2039.
- [28] 王小平. 铬胁迫对茼蒿种子萌发及幼苗抗逆生理影响的探究[J]. 南京晓庄学院学报, 2017, 33(6): 100-103.
- [29] 王燕, 葛健文, 牟伊, 等. 铬胁迫下异甜菊醇浸种对小麦幼苗生长的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 711-718.
- [30] 钟旻依, 张新全, 杨昕颖, 等. 植物对重金属铬胁迫响应机制的研究进展[J]. 草业科学, 2019, 36(8): 1962-1975.
- [31] Zhou J M, Wang J J, Tao Y L, et al. Metabolic response of bok choy leaves under chromium pollution stress[J]. Ecotoxicology, 2021, 30(2): 231-239.
- [32] 潘法康, 张瑾, 王楚石, 等. 重金属铬胁迫对薄荷生长及生理特性的影响[J]. 安徽建筑大学学报, 2020, 28(3): 38-41.
- [33] 覃勇荣, 赵贞涛, 刘旭辉, 等. 重金属胁迫对不同种源任豆种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(12): 156-162.

(责任编辑: 黄克玲)