



硼对菜心镉吸收及抗氧化酶和 AsA-GSH循环关键酶活性的调控效应*

李富荣^{1,2,3}, 王琳清¹, 曹怡然¹, 吴志超^{1,2},
石含之^{1,2}, 李冬琴^{1,2}, 文典^{1,2}, 李蕾⁴, 王旭^{1,2}

- 广东省农业科学院农业质量标准与监测技术研究所, 广东 广州 510640
- 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(广州), 广东 广州 510640
- 岭南现代农业科学与技术广东省实验室河源分中心, 广东 河源 517000
- 广东农科监测科技有限公司, 广东 广州 510640

摘要: 针对华南地区旱地土壤低硼高镉和蔬菜重金属镉污染日益严重的现状, 以广东特色蔬菜菜心(*Brassica parachinensis* L)为研究对象, 通过水培实验研究了外源硼添加对菜心生长特性和镉吸收的调控效应, 并从抗氧化酶和AsA-GSH循环关键酶活性的角度探讨硼调控蔬菜镉胁迫的生理机制。研究结果显示, 在5 μmol/L的镉处理下, 20和50 μmol/L的外源硼添加显著提高菜心株高和根长达50%以上, 同时, 50 μmol/L的外源硼添加较0.25 μmol/L硼添加时的地上部和地下部生物量都明显增加114.19%和187.59%, 说明适当施加硼元素供应能有效缓解重金属镉对蔬菜的胁迫作用。另外, 10、20、50 μmol/L 3种浓度的外源硼添加都不同程度地减少了菜心地上部和地下部的镉吸收, 下降量达24.0%。从硼影响菜心的抗氧化酶活性和AsA-GSH循环关键酶活性的结果来看, 镉胁迫下添加不同浓度外源硼处理后, 不同菜心抗氧化酶和AsA-GSH循环关键酶活性变化规律存在一定差异。本文研究结论为, 适宜浓度的硼添加可有效提高镉胁迫下的菜心地上部分和地下部分的SOD、POD、CAT、APX、DHAR、GR活性, 增强菜心的抗氧化能力, 促进其AsA-GSH循环, 从而降低镉对菜心植株的胁迫作用并调控菜心对镉的吸收。这意味着有可能通过筛选适合的硼肥类别和施用量, 进一步实现控制蔬菜可食部分镉含量在安全限量范围内, 研究结论可为合理施用硼肥保障中轻度镉污染土壤上的蔬菜安全种植提供科学的参考依据。

关键词: 硼; 菜心(*Brassica parachinensis* L); 镉; 酶活性; AsA-GSH循环

中图分类号: Q89 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2024)06-0141-09

The regulatory effects of exogenous boron on the cadmium absorption and antioxidant enzyme and AsA-GSH cycle key enzyme activity in Chinese flowering cabbage

LI Furong^{1,2,3}, WANG Linqing¹, CAO Yiran¹, WU Zhichao^{1,2},
SHI Hanzhi^{1,2}, LI Dongqin^{1,2}, WEN Dian^{1,2}, LI Lei⁴, WANG Xu^{1,2}

1. Institute of Quality Standard and Monitoring Technology for Agro-Products of Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 501640, China

* 收稿日期: 2024-05-20 录用日期: 2024-05-27 网络首发日期: 2024-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(42307054); 广西自然科学基金(2022GXNSFDA080008); 广西创新驱动发展专项(桂科AA20161002-1)

作者简介: 李富荣(1984年生), 女; 研究方向: 蔬菜质量安全调控;
E-mail: lifurong@gdaas.cn

通信作者: 王旭(1982年生), 女; 研究方向: 农产品质量安全;
E-mail: wangxu@gdaas.cn

论文视频摘要见增强出版



ZR20240166



ZR20240166

2. *Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-Product (Guangzhou), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Guangzhou 510640, China*
3. *Heyuan Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Heyuan 517000, China*
4. *Guangdong Agricultural Monitoring Technology Co., Ltd., Guangzhou 510640, China*

Abstract: To solve the present situation of low boron and high cadmium in dryland soils and increasingly serious cadmium pollution in vegetables in southern China, in this study, we chose the Guangdong specialty vegetable Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L) as the research object and performed to study the regulatory effects of exogenous boron addition on its growth characteristics and cadmium absorption. The vegetable physiological mechanism of boron regulation under cadmium stress was also explored from the perspectives of antioxidant enzymes and AsA-GSH cycle key enzyme activities. The results showed that under 5 $\mu\text{mol/L}$ cadmium treatment, 20 and 50 $\mu\text{mol/L}$ exogenous boron addition significantly increased the plant height and root length of Chinese flowering cabbage by more than 50%, and the aboveground and underground biomass was increased significantly by 114.19% and 187.59% with 50 $\mu\text{mol/L}$ boron addition compared with the 0.25 $\mu\text{mol/L}$ boron. The results indicated that appropriate application of boron supply would effectively alleviate the cadmium stress on vegetable growth. Additionally, the addition of exogenous boron as 10, 20 and 50 $\mu\text{mol/L}$ could reduce cadmium absorption to 24.0% in the aboveground and underground parts of Chinese flowering cabbage. We also found that there were differences in the activity changes of antioxidant enzymes and AsA-GSH cycle key enzymes with different exogenous boron addition under cadmium stress. Overall, it can be concluded that the appropriate concentration of boron addition could effectively improve the SOD, POD, CAT, APX, DHAR and GR activities of the aboveground and underground parts of Chinese flowering cabbage under cadmium stress, to enhance its antioxidant capacity and promote its AsA-GSH cycle, thereby reducing the stress effect and cadmium absorption. Accordingly, screening suitable boron fertilizer categories and application rates would further achieve control over the cadmium contents in edible parts of vegetables within their safe limits. This conclusion would provide a scientific reference for rational application of boron fertilizer to ensure the safe planting of vegetables on farmland soil with moderate to mild cadmium pollution.

Key words: boron; Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L); cadmium; enzymatic activity; AsA-GSH cycle

农田土壤重金属污染及其带来的农产品质量安全问题是全世界广泛关注的环境问题之一(Wei et al., 2023)。镉因其在环境中移动性大、毒性持久且危害极大,被列于重金属“五毒”(镉、砷、汞、铅、铬)之首(Nordberg, 2009),且与其他元素相比,蔬菜对镉通常具有更强的吸收能力(李富荣等, 2020)。在广东省内同一区域针对多种主栽蔬菜品种及其产地土壤开展大量菜-土协同采样的重金属检测结果表明,蔬菜和土壤镉的不合格率都明显比其他4种主要重金属污染元素的超标率高得多(Sun et al., 2013; Li et al., 2021)。因此,寻找高效经济的调控措施,降低蔬菜对镉的吸收,是保障蔬菜安全种植和农业高质量发展的迫切需求(Lan et al., 2023)。

在植物体内,各种微量元素不是孤立地发挥

其重要的生物学作用,往往会受到体内其他元素的相互影响和制约,从而对其正常生理功能产生干扰(抑制、抵消或加剧)(Wu et al., 2016; Gui et al., 2022)。硼是植物生长必需的微量元素,对促进细胞壁的形成、糖类合成与运输、蛋白质合成和基因表达都起着不可替代的重要作用,能有效促进植物代谢,提高植物抗逆性,从而促进其生长发育(Kumar et al., 2022; Mal et al., 2023)。在华南地区酸性旱地土壤上,硼是两种最缺乏的微量元素之一,在农业生产中硼肥作为提高农作物产量和营养品质的有效措施被广泛使用(Uluisik et al., 2018)。近年来,通过施硼缓解植物重金属毒害引起了一些研究者的关注,主要集中在针对超富集植物、粮食和油料等作物中,硼调控植物重

金属吸收累积的施用剂量和影响效果方面有少量报道(刘登彪等, 2014; Wu et al., 2020a; 2020b; Huang et al., 2021)。但植物对重金属镉的吸收特性受调控措施和植物种类的影响存在差异(Li et al., 2021; Seo et al., 2023), 目前关于硼对蔬菜重金属镉吸收的调控效应及其生理响应机制鲜有报道。

重金属镉进入植物体后, 通常会替代许多酶的活性中心或与蛋白质中的巯基结合, 改变大分子的结构, 并使植物细胞氧自由基过量累积, 从而对植物体内酶系统产生破坏, 危害植物的生长与代谢(Aponte et al., 2020; Xue et al., 2023)。在此过程中, 植物体内过多的活性氧(ROS)积累导致氧化应激反应, 通过产生超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)等抗氧化酶限制其活性氧积累来减轻细胞损伤(Czarnockaa et al., 2018)。而AsA-GSH循环系统是植物体内清除自由基的另一重要途径, 是植物非酶抗氧化防御系统的重要组成部分, 通过AsA和GSH的氧化与再生并解毒过氧化氢来控制细胞中活性氧物质的稳态水平, 其中APX(抗坏血酸过氧化物酶)、GR(谷胱甘肽还原酶)、DHAR(脱氢抗坏血酸还原酶)是AsA-GSH循环的关键作用酶(Tang et al., 2023)。本研究针对华南地区旱地土壤低硼高镉和蔬菜镉污染日益严重的现状, 以广东特色蔬菜菜心(*Brassica parachinensis* L)为研究对象, 研究外源硼添加对蔬菜生长以及镉吸收特性的影响; 同时, 从抗氧化系统酶和AsA-GSH循环关键酶活性的角度探讨硼调控蔬菜镉胁迫的生理机制, 研究结果可为在中轻度镉污染土壤上合理利用硼肥保障蔬菜种植安全提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试蔬菜选择广东特色蔬菜——菜心为研究对象, 菜心又名菜薹, 是一、二年生十字花科芸薹属植物, 属于不结球白菜的一个变种, 是华南地区广泛种植的常见叶菜类蔬菜。

1.2 试验设计

本研究采用营养液培养方式进行。菜心种子经消毒处理后播种于育苗盘, 待幼苗长至5~6 cm时, 挑选生长一致的植株移栽至装有10 L Hoagland营养液的黑色塑料盒中, 每盒12株幼苗。预培养1周后, 开始进行不同浓度硼处理并添加重金属镉。设计4个外源硼处理浓度: 0.25、10、20、

50 $\mu\text{mol/L}$ (Wu et al., 2020b); 镉以氯化镉的形式加入, 设置0和5 $\mu\text{mol/L}$ 2个浓度(Wu et al., 2016)。每个处理设4个重复。加入的培养液均用 $w=5\%$ KOH溶液将pH值调至 $5.8(\pm 0.1)$ 。每5天更换一次培养液, 每天搅拌3次。培养3周后收获, 并开展相关指标的测定分析。其中, 一部分用于测定株高、根长、地上部和地下部生物量; 一部分用于测定蔬菜地上部和地下部镉含量; 一部分分为地上部和地下部, 经液氮冷冻后储存在 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中, 待测抗氧化酶和AsA-GSH循环关键酶活性。

1.3 分析测定方法

1.3.1 菜心镉含量测定 将用于菜心镉含量测定的植株根系浸泡在20 mmol/L EDTA-2Na溶液中15 min, 以解吸根表吸附的金属离子, 然后用去离子水洗2~3次。将每株植物分为地上部和地下部, 分别粉碎匀浆后装袋备用。分别称取植株样品2.0 g并记录精确质量, 经浓硝酸+高氯酸消解后, 利用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定其中的镉浓度(Li et al., 2021)。

1.3.2 菜心抗氧化酶活性测定 称取0.2 g冷冻样品(叶片或根部), 分3次加入5.0 mL预冷的磷酸缓冲溶液(50.0 mmol/L, pH 7.8), 冰浴上研磨匀浆, 转入离心管并在10 000 \times g离心10 min($4\text{ }^\circ\text{C}$), 所得上清液用于抗氧化酶SOD、POD和CAT活性的测定。参照苏文欣等(2022)的方法, SOD活性测定采用氯化硝基四氮唑蓝光还原法, POD活性测定采用愈创木酚法, CAT活性测定采用紫外吸收法。

1.3.3 菜心AsA-GSH循环关键酶活性测定 称取0.2 g冷冻样品(叶片或根部), 分3次加入5.0 mL预冷的磷酸缓冲溶液(含1.0 mmol/L EDTA, pH 7.4), 冰浴上研磨成匀浆, 混匀后转入离心管, 在16 000 \times g离心20 min($4\text{ }^\circ\text{C}$), 所得上清液用于AsA-GSH循环关键酶活性的测定。其中, APX活性测定采用Nakano et al.(1981)的方法, GR活性测定采用Scheible et al.(1997)的方法, DHAR活性测定采用Doulis et al.(1997)的方法。

1.4 数据处理

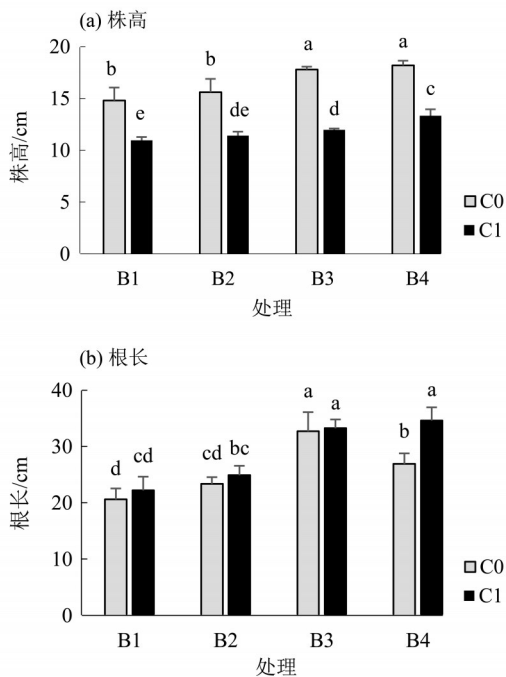
所有试验数据的统计分析和作图采用Excel 2010和SPSS 19.0软件处理。不同数据间的差异显著性采用one-way ANOVA单因素方差分析和LSD多重比较法分析, 显著性水平设为0.05。所有指标以4次重复的平均值 \pm 标准误表示。

2 结果与分析

2.1 硼对菜心生长与生物量的影响

由图 1a 可见, 在不添加和添加 $5 \mu\text{mol/L}$ 的镉处理下, 随着外源硼浓度的增加, 菜心株高均有不同程度的增加。在不添加镉处理下, B3 ($c_B=20 \mu\text{mol/L}$) 和 B4 ($c_B=50 \mu\text{mol/L}$) 处理使菜心株高显著高于 B1 ($c_B=0.25 \mu\text{mol/L}$) 和 B2 ($c_B=10 \mu\text{mol/L}$) 处理, 在 B4 处理下菜心株高达最大值, 比 B1 处理下的株高提高 22.97%; 而在 $5 \mu\text{mol/L}$ 镉处理下, B3、B4 硼添加使菜心株高比 B1 分别显著提高 9.26% 和 21.72%。对菜心根长而言, 不添加镉处理下, 随外源硼浓度增加菜心根长先升高后有所下降, 但 B4 处理下的菜心根长仍显著长于 B1 处理, B3、B4 硼处理下的根长比 B1 分别提高 58.74% 和 30.58%; 在 $5 \mu\text{mol/L}$ 镉处理下, 菜心根长随硼浓度增加而不断增加, 至 B4 处理下达最大值, 比 B1 镉处理下的株高提高 55.95% (图 1b)。

图 2 显示了 0 和 $5 \mu\text{mol/L}$ 的镉处理下, 外源硼添加对菜心不同部位生物量累积的影响。结果表明, 同一硼浓度下镉处理明显降低了蔬菜各部位的生物量累积, 但随着外源硼浓度的增加, 菜心

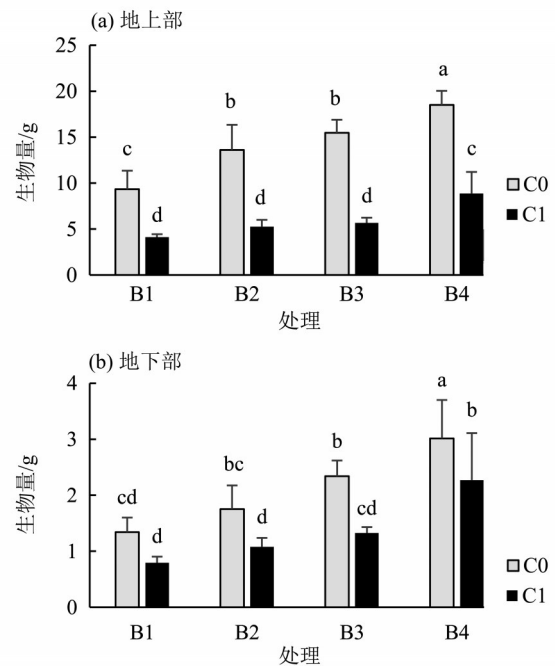


C0、C1 分别表示 0、 $5 \mu\text{mol/L}$ 镉处理; B1、B2、B3、B4 分别表示 0.25、10、20、 $50 \mu\text{mol/L}$ 的硼处理; 不同小写字母表示各处理之间差异显著性 ($P < 0.05$)。

图 1 不同硼浓度处理对镉胁迫下菜心株高和根长的影响

Fig. 1 Effects of different boron treatments on height and root length of Chinese flowering cabbage under cadmium stress

不同部位生物量均有不同程度的增加, 且均在 B4 处理下达到最大值。在不添加镉处理下, 与 B1 处理相比, B2、B3、B4 处理使菜心地上部生物量分别增加 46.07%、65.94%、98.43%; 在 $5 \mu\text{mol/L}$ 镉处理下, B2、B3 处理与 B1 处理相比增加不显著, 而 B4 处理比 B1 处理显著增加 114.19%。就地下部生物量而言, 不添加和 $5 \mu\text{mol/L}$ 的镉处理下, 均是 B4 处理与 B1 处理相比有显著增加, 增加量分别为 125.07% 和 187.59%。



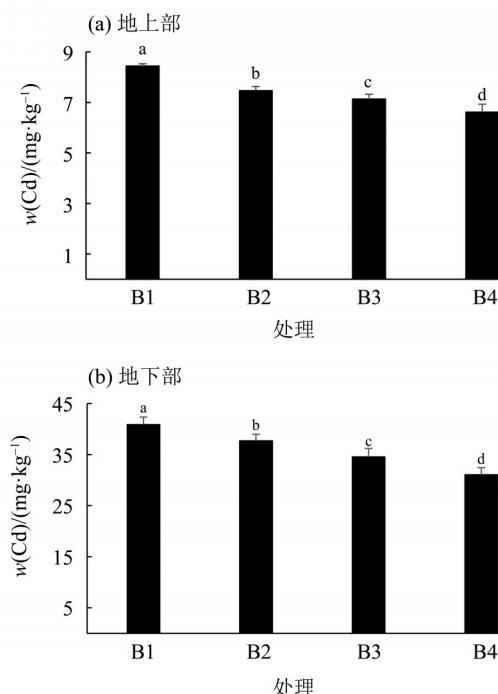
C0、C1 分别表示 0、 $5 \mu\text{mol/L}$ 镉处理; B1、B2、B3、B4 分别表示 0.25、10、20、 $50 \mu\text{mol/L}$ 硼处理; 不同小写字母表示各处理之间差异显著性 ($P < 0.05$)。

图 2 不同硼处理对镉胁迫下菜心生物量的影响

Fig. 2 Effects of different boron treatments on biomass of Chinese flowering cabbage under cadmium stress

2.2 硼对菜心不同部位镉吸收的影响

研究发现, 不添加镉的水培实验中, 不同硼添加对菜心不同部位镉吸收的影响差异不显著, 而 $5 \mu\text{mol/L}$ 镉处理的水培实验中, 外源硼添加能在一定程度上减少菜心地上部和地下部中的镉吸收 (图 3)。与 B1 处理相比, B2、B3、B4 处理使菜心不同部位的镉吸收浓度显著降低。其中, 不同量的外源硼添加使地上部的镉吸收浓度分别降低 11.50%、15.49%、21.57%, 而随着外源硼添加量的增加, 菜心地下部的镉吸收浓度分别降低 7.78%、15.45%、24.0%。



B1、B2、B3、B4 分别表示 0.25、10、20、50 μmol/L 硼处理；不同小写字母表示各处理之间差异显著性 ($P < 0.05$)。

图3 5 μmol/L 镉胁迫下不同硼处理对菜心镉吸收量的影响

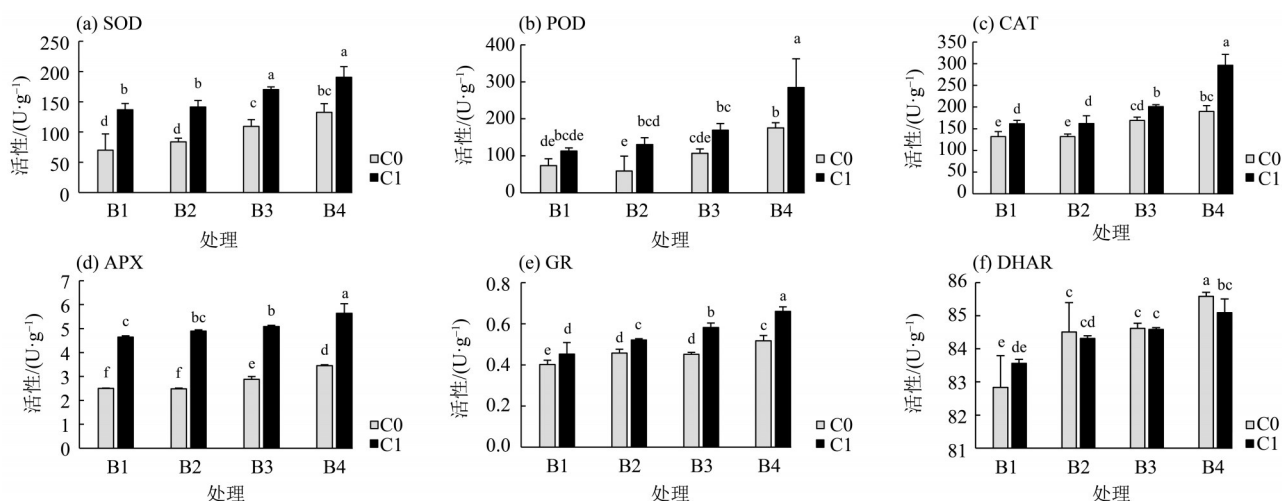
Fig. 3 Effects of different boron treatments on cadmium absorption of Chinese flowering cabbage under 5 μmol/L cadmium stress

2.3 硼对菜心相关酶活性的影响

为探索外源硼调控菜心镉吸收过程中植物的

生理响应机制, 本研究对菜心的抗氧化酶活性和 AsA-GSH 循环关键酶活性进行了测定。由图 4 可见, 在 0 和 5 μmol/L 镉胁迫下, 不同浓度外源硼添加对菜心地上部抗氧化系统中 SOD、POD、CAT 和 AsA-GSH 循环关键酶 APX、GR、DHAR 的活性产生了较明显的影响, 且随外源硼浓度的增加, 上述酶活性大多呈逐渐增加的趋势。在 0 和 5 μmol/L 镉胁迫下, 与 B1 相比, B3、B4 处理下的 SOD 活性在分别显著增加 56.20%~89.55% 和 24.18%~39.01%。POD 活性仅在 B4 处理下与 B1 有显著差异, 且 0 和 5 μmol/L 镉胁迫下增加量分别达 138.10% 和 152.40%。CAT 活性在无镉和 5 μmol/L 镉胁迫下 B3、B4 处理较 B1 分别显著增加 28.15%~44.05% 和 24.40%~83.33%。两种镉处理下, B3、B4 添加时的 APX 活性较 B1 分别显著增加 15.21%~37.93% 和 9.43%~21.27%。GR 活性随硼添加增加均与 B1 处理有显著差异, 无镉处理时分别提高了 15.09%、28.50%、45.80%, 5 μmol/L 镉胁迫下分别提高了 13.76%、12.27%、28.69%。无镉处理下, B2、B3、B4 处理的 DHAR 活性较 B1 处理分别显著增加 2.01%、2.15%、3.32%; 而 5 μmol/L 镉胁迫下, DHAR 活性在 B3、B4 处理较 B1 处理显著增加 1.22%~1.84%, B2 处理较 B1 处理也有所增加, 但差异不显著。

另外, 本项目研究了不同浓度外源硼添加对镉胁迫下菜心地下部抗氧化酶活性和 AsA-GSH 循



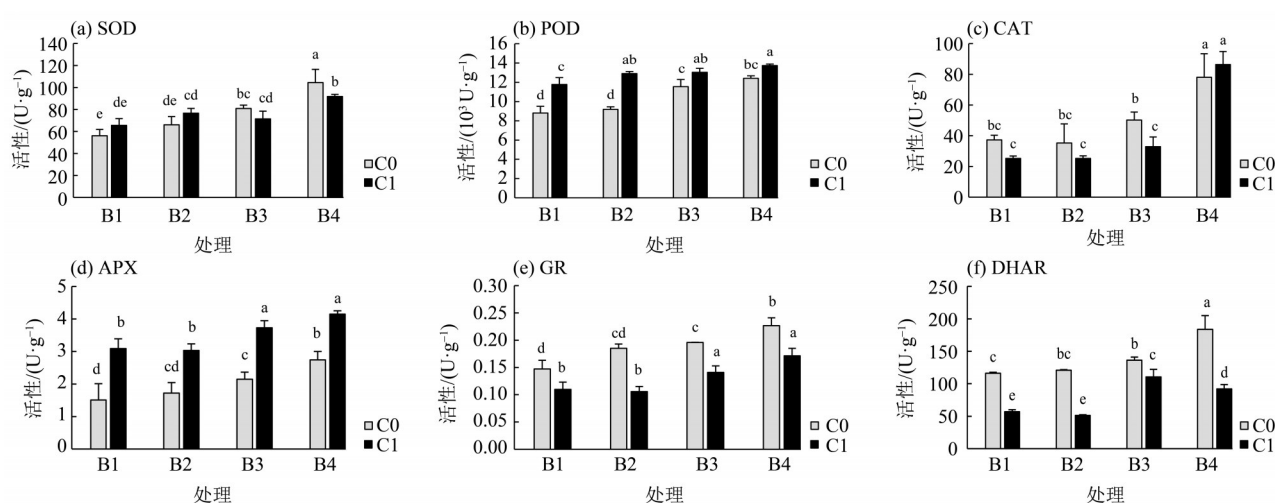
C0、C1 分别表示 0、5 μmol/L 镉处理；B1、B2、B3、B4 分别表示 0.25、10、20、50 μmol/L 硼处理；不同小写字母表示各处理之间差异显著性 ($P < 0.05$)。

图4 不同硼处理对镉胁迫下的菜心地上部抗氧化酶和AsA-GSH循环关键酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different boron treatments on activities of antioxidant enzymes and AsA-GSH cycle key enzymes in the aboveground parts of Chinese flowering cabbage under cadmium stress

环关键酶活性的影响。由图 5 可见, 与地上部的响应相似, 外源硼添加一定程度上提高了无镉添加和 5 $\mu\text{mol/L}$ 镉胁迫时的上述酶活性, 但具体影响在不同酶之间仍存在差异。就 SOD 而言, 无镉处理时, B2、B3、B4 处理与 B1 处理相比均存在显著差异, 而 5 $\mu\text{mol/L}$ 镉胁迫下, 仅 B4 处理与 B1 处理的 SOD 活性有显著差异, 增加了 40.07%。POD 活性在无镉处理时, B3、B4 处理与 B1 处理存在显著差异, 增加量为 10.69% 和 16.67%, 而 5 $\mu\text{mol/L}$ 镉胁迫下, 其他 3 个硼处理较 B1 处理均有显著增加, 分别为 4.20%、31.10% 和 40.78%。各浓度硼添加对 CAT 活性的影响差异最大, 2 种镉处理下,

B4 与 B1 的 CAT 活性差异分别达 109.69% 和 242.07%, 其他硼处理与 B1 处理的差异不显著。外源硼添加对菜心地下部的 3 种 AsA-GSH 循环关键酶活性的影响规律较为一致。2 种镉处理下, 均为 B3、B4 时的酶活性与 B1 存在显著差异。其中, 2 种镉处理下 APX 活性在 B3、B4 处理时比 B1 增加分别达 42.57%~81.97% 和 20.67%~34.30%; GR 活性在 B3、B4 处理时比 B1 增加分别达 33.13%~53.93% 和 28.53%~56.45; DHAR 活性在 B3、B4 处理时较 B1 处理时的增加量分别达 17.41%~58.23% 和 94.13%~61.52%。



C0、C1 分别表示 0、5 $\mu\text{mol/L}$ 镉处理; B1、B2、B3、B4 分别表示 0.25、10、20、50 $\mu\text{mol/L}$ 硼处理; 不同小写字母表示各处理之间差异显著性 ($P < 0.05$)。

图 5 不同硼处理对镉胁迫下的菜心地下部抗氧化酶和 AsA-GSH 循环关键酶活性的影响

Fig. 5 Effects of different boron treatments on activities of antioxidant enzymes and AsA-GSH cycle key enzymes in the underground parts of Chinese flowering cabbage under cadmium stress

3 讨论

硼作为高等植物生长发育所必需的微量营养元素, 虽然需求量小, 但对植物的养分平衡、生理代谢、细胞壁结构功能以及一些酶活性起着不可替代的作用 (Wu et al., 2017)。通过合理施用硼肥能有效促进油菜等十字花科作物的生长发育, 并提高产量和产品品质 (耿国涛等, 2023)。邵鹏等 (2010) 通过大田试验研究发现, 0.03 kg/亩 (1 亩 = 666.67 m^2) 的硼施用量能使菜心产量提高 14.27%。本研究结果显示, 外源硼添加明显促进了菜心的生长, 特别是株高和不同部位的生物量累积, 均在 50 $\mu\text{mol/L}$ 硼浓度处理下达最大值。镉是极具生物毒性的重金属元素, 且易被植物吸收累积, 导

致植物体内的生物化合物代谢与合成受阻, 从而对植物产生毒害作用, 并且通过蔬菜作物等进入食物从而威胁人类健康 (Kumar et al., 2023a)。诸多研究表明, 重金属与矿质营养元素之间复杂的相互作用关系影响着植物的生长发育, 其作用效果因蔬菜种类、元素种类及浓度的不同而有很大差异 (Kumar et al., 2023b), 筛选适合的矿质营养元素供应可以部分地或几乎全部地矫正重金属胁迫造成的毒害作用 (Meena et al., 2022)。本研究中, 在 5 $\mu\text{mol/L}$ 镉胁迫下, 外源硼的添加仍能显著提高菜心的株高、根长和生物量, 说明适当施加硼元素供应能有效缓解镉对菜心的胁迫作用。

目前, 已有大量研究表明, 矿质元素中的大量元素氮、磷、钾, 以及微量元素铁、铜、锌等

对植物镉吸收有协同或拮抗作用(Wu et al., 2018; Li et al., 2024)。近年来, 镉与硼在土壤-植物系统中的交互作用也逐渐引起了研究者的关注(刘登彪等, 2014; 肖艳辉等, 2015; Huang et al., 2021)。张敏等(2010)发现, 添加0.25 mg/kg 硼可显著提高油料作物花生产量和品质, 同时降低岩溶土盆栽试验中花生仁中镉含量。Wu et al.(2020a; 2020b)的水培实验结果发现, 50 $\mu\text{mol/L}$ 的硼添加显著降低了镉在油菜地上部分的富集。Qin et al.(2020)的研究也表明, 施加硼能有效降低镉在小麦植株中的富集, 且植物体内的硼镉浓度呈显著负相关, 硼有望用作小麦镉吸收的抑制剂。由于镉进入植物细胞后, 植物细胞会通过限制其移动性从而降低镉的毒害作用(Li et al., 2016), 其中, 液泡区室化和细胞壁固定是植物细胞贮存镉的主要方式(Gutsch et al., 2018)。而在硼对植物生理代谢影响的诸多功能中, 硼与细胞壁的合成、维持细胞膜完整性等关系密切, 硼可能以植物细胞为媒介, 通过对细胞壁和细胞膜的结构合成与稳定等过程的影响来调控蔬菜对镉的吸收(Huang et al., 2022)。本研究结果表明, 随着外源硼添加量的增加, 蔬菜地上部和地下部的镉吸收均有一定程度的减少, 其浓度下降了7.78%~24.0%。在后续的研究中, 可进一步结合盆栽试验筛选适合的硼肥类别和施加量使蔬菜可食部分中的镉含量降低到食品安全限量值以下。

植物在胁迫环境下, 体内超氧自由基和过氧化氢等活性氧物质会大量增加, 而SOD、POD、CAT作为植物抗氧化系统的重要组成部分, 可通过增加其活性缓解胁迫作用(Li et al., 2022)。其中, SOD作为植物抗氧化系统的第一道防线, 能将植物体内过量的超氧自由基通过歧化反应生成过氧化氢和氧气(Pan et al., 2020)。POD和CAT与SOD具有协同作用, 通过将其氧化产生的过氧化氢和氧自由基分解转化为水和氧气, 阻止这些活性氧在植物体内的累积, 从而减少对细胞和植物体的伤害(Shah et al., 2012)。本研究结果显示, 与不加镉相比, 5 $\mu\text{mol/L}$ 镉处理下蔬菜的3种抗氧化酶普遍更高, 说明受镉胁迫影响, 使菜心体内的酶系统受刺激而通过提高酶活性以维持蔬菜的正常生长。通过不同浓度外源硼的添加, 菜心地上部和地下部的SOD、POD、CAT活性呈增长趋势, 这与拉飞克等(2003)针对槐叶萍的研究结果一致。特别是在50 $\mu\text{mol/L}$ 硼添加下, 蔬菜地上部和地下

部的上述3种抗氧化酶活性都增加明显。尤其是就地上部而言, 由于菜心受镉胁迫后抗氧化酶活性增强, 外源硼的添加使其活性进一步增加, 提高了菜心的抗氧化能力, 来维持植株体内的活性氧平衡(Riaz et al., 2018), 从而避免氧化伤害, 增强了菜心对镉胁迫环境的抵抗能力。

另外, 在AsA-GSH循环系统的APX、DHAR与GR 3种关键酶的作用下, 可实现AsA与DHAC、GSH与GSSG互相转化的过程中将有氧的过氧化氢还原为水和氧气(Ahmad et al., 2018)。APX是以AsA为电子供体的一种过氧化物酶, 通过参与对过氧化氢的清除和AsA的生成来维持细胞内ROS的稳态, 是植物体内尤其是叶绿体中清除过氧化氢的关键酶(Gao et al., 2024); GR负责从谷胱甘肽二硫化物(GSSG)中恢复GSH, 也是AsA-GSH循环中去除过氧化氢的重要组成部分(刘梅等, 2021); DHAR将GSH-GSSG池与AsA-DHA池连接起来, 在GSH被转化为GSSG的过程中, DHAR能将DHA还原为AsA, 从而调节AsA/DHA的稳态(Deutsch, 2000)。本研究显示, 蔬菜地上部和地下部分的APX以及地上部分的GR活性在镉胁迫下较无镉处理时明显增加, 而地下部GR活性和DHAR活性在镉胁迫下较无镉处理时明显下降, 表明菜心地上部APX和GR活性对镉胁迫更为敏感。而外源硼的添加使蔬菜地上部和地下部分的3种AsA-GSH循环关键酶活性都有增加的趋势, 尤其是硼添加浓度为20和50 $\mu\text{mol/L}$ 时, 与0.25 $\mu\text{mol/L}$ 硼添加处理的酶活性均差异显著。表明硼能促进菜心在镉胁迫环境下通过调节AsA-GSH循环中的酶活性来改善AsA-GSH循环效率, 从而应对镉胁迫所造成的氧化损伤(Singh et al., 2020)。

综上所述, 镉胁迫下施用不同浓度的外源硼能有效促进蔬菜的生长和生物量, 一定程度上缓解重金属镉对蔬菜的胁迫作用的同时, 还能降低镉在蔬菜地上部和地下部的积累。而硼对植物体内的抗氧化酶和AsA-GSH循环关键酶活性的调控, 在缓解蔬菜重金属镉胁迫过程中起着关键作用。后续可结合盆栽试验筛选适合的硼肥类别和施加量来降低蔬菜可食部分镉含量到安全限量值范围内, 同时进一步加强硼调控蔬菜镉吸收的分子机制研究, 为完善植物镉吸收机理研究和在中轻度镉污染土壤上合理利用硼肥保障蔬菜种植安全提供科学依据。

参考文献:

- 耿国涛, 陆志峰, 张洋洋, 等, 2023. 硼肥用量对双低油菜籽产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 29(5): 924-934.
- 拉飞克, 施国新, 王学, 等, 2003. 硼对镉胁迫下槐叶萍生理生化特性的影响[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 26(3): 72-75.
- 李富荣, 徐爱平, 吴志超, 等, 2020. 大湾区根茎类蔬菜-农田土壤系统中 10 种重金属吸收特性及其种植安全性研究[J]. 生态环境学报, 29(6): 1251-1259.
- 刘登彪, 蒋成爱, 张嘉慧, 等, 2014. 不同硼浓度对三种超富集植物吸收硼及重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 33(6): 1106-1111.
- 刘梅, 李祖然, 张光群, 等, 2021. 野生小花南芥体内 AsA-GSH 循环对土壤 Cd、Pb 胁迫的响应[J]. 农业资源与环境学报, 38(4): 558-569.
- 邵鹏, 刘士哲, 李淑仪, 等, 2010. 硼铝镁对菜心产量及养分吸收的影响[J]. 长江蔬菜, 24: 58-62.
- 苏文欣, 许凌欣, 姜宛彤, 等, 2022. 不同外源物质对盐碱胁迫下紫苏种子萌发、幼苗生长及生理的影响[J]. 草地学报, 30(9): 2415-2422.
- 肖艳辉, 何金明, 潘春香, 等, 2015. 茴香对镉胁迫下钼硼锌协同处理的响应及精油组分的影响[J]. 生态环境学报, 24(9): 1570-1575.
- 张敏, 谢运球, 蔡五田, 等, 2010. 岩溶土壤硼镉交互作用对花生的影响[J]. 中国农学通报, 26(24): 287-294.
- AHMAD P, AHANGER M A, ALYEMENI M N, et al, 2018. Exogenous application of nitric oxide modulates osmolyte metabolism, antioxidants, enzymes of ascorbate-glutathione cycle and promotes growth under cadmium stress in tomato[J]. Protoplasma, 255(1): 79-93.
- APONTE H, MELI P, BUTLER B, et al, 2020. Meta-analysis of heavy metal effects on soil enzyme activities[J]. Sci Total Environ, 737: 139744.
- CZARNOCKA W, KARPIŃSKI S, 2018. Friend or foe? Reactive oxygen species production, scavenging and signaling in plant response to environmental stresses[J]. Free Radic Biol Med, 122: 4-20.
- DEUTSCH J C, 2000. Dehydroascorbic acid[J]. J Chromatogr A, 881(1/2): 299-307.
- DOULIS A G, DEBIAN N, KINGSTON-SMITH A H, et al, 1997. Differential localization of antioxidants in maize leaves[J]. Plant Physiol, 114(3): 1031-1037.
- GAO W, WU D, ZHANG D, et al, 2024. Comparative analysis of the effects of microplastics and nitrogen on maize and wheat: Growth, redox homeostasis, photosynthesis, and AsA-GSH cycle[J]. Sci Total Environ, 932: 172555.
- GUI J Y, RAO S, HUANG X, et al, 2022. Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review[J]. Sci Total Environ, 853: 158673.
- GUTSCH A, ZOUAGHI S, RENAUT J, et al, 2018. Changes in the proteome of *Medicago sativa* leaves in response to long-term cadmium exposure using a cell-wall targeted approach[J]. Int J Mol Sci, 19(9): 2498.
- HUANG Y Y, FEI G, YU S L, et al, 2021. Molecular and biochemical mechanisms underlying boron-induced alleviation of cadmium toxicity in rice seedlings[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 225: 112776.
- HUANG Y, HUANG B, SHEN C, et al, 2022. Boron supplying alters cadmium retention in root cell walls and glutathione content in *Capsicum annuum*[J]. J Hazard Mater, 432: 128713.
- KUMAR A, KUMARI N, SINGH A, et al, 2023a. The effect of cadmium tolerant plant growth promoting rhizobacteria on plant growth promotion and phytoremediation: A review[J]. Curr Microbiol, 80(5): 153.
- KUMAR D, MALIK S, RANI R, et al, 2023b. Behavior, risk, and bioremediation potential of heavy metals/metalloids in the soil system[J]. Rend Lincei-Sci Fis, 34: 809-831.
- KUMAR V, PANDITA S, KAUR R, et al, 2022. Biogeochemical cycling, tolerance mechanism and phytoremediation strategies of boron in plants: A critical review[J]. Chemosphere, 300: 134505.
- LAN P D T, NGUYEN H T, THI K V, et al, 2023. Insights into the remediation of cadmium-contaminated vegetable soil: Co-application of low-cost by-products and microorganism[J]. Water Air Soil Pollut, 234(5): 293.
- LI F, WANG X, WANG F, et al, 2021. A risk-based approach for the safety analysis of eight trace elements in Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) in China[J]. J Sci Food Agr, 101(13): 5583-5590.
- LI F, LIU H, ZHONG H, et al, 2024. Effects of biochar combined with nitrogen fertilizer on ryegrass remediation of cadmium-contaminated soil[J]. Int J Environ Sci Te, 21(4): 4201-4212.
- LI H, LUO N, ZHANG L J, et al, 2016. Do arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice?[J]. Sci Total Environ, 571: 1183-1190.
- LI N, LIU J, YANG L, et al, 2022. Synergistic effect of antioxidant systems enhance cadmium phytoextraction and

- translocation in *Amaranthus hypochondriacus* under rutin application[J]. S Afr J Bot, 149: 582–590.
- MAL S, SARKAR D, MANDAL B, et al, 2023. Determination of critical concentrations of boron in soils and leaves of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) using polynomial equation[J]. J Soil Sci Plant Nut, 23(3): 4055–4065.
- MEENA V, DOTANIYA M L, SAHA J K, et al, 2022. Silicon potential to mitigate plant heavy metals stress for sustainable agriculture: A review [J]. Silicon, 14 (9) : 4447–4462.
- NAKANO Y, ASADA K, 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. Plant Cell Physiol, 22(5): 867–880.
- NORDBERG G F, 2009. Historical perspectives on cadmium toxicology[J]. Toxicol Appl Pharm, 238(3): 192–200.
- PAN C, LU H, LIU J, et al, 2020. SODs involved in the hormone mediated regulation of H₂O₂ content in *Kandelia obovata* root tissues under cadmium stress [J]. Environ Pollut, 256: 113272.
- QIN S, LIU H, RENGEL Z, et al, 2020. Boron inhibits cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum*) by regulating gene expression[J]. Plant Sci, 297: 110522.
- RIAZ M, YAN L, WU X, et al, 2018. Boron reduces aluminum-induced growth inhibition, oxidative damage and alterations in the cell wall components in the roots of trifoliate orange[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 153: 107–115.
- SCHEIBLE W R, GONZALEZ-FONTES A, LAUERER M, et al, 1997. Nitrate acts as a signal to induce organic acid metabolism and repress starch metabolism in tobacco[J]. Plant Cell, 9(5): 783–798.
- SEO C, LEE J W, JEONG J W, et al, 2023. Current technologies for heavy metal removal from food and environmental resources [J]. Food Sci Biotechnol, 33 (2) : 287–295.
- SHAH K, NAHAKPAM S, 2012. Heat exposure alters the expression of SOD, POD, APX and CAT isozymes and mitigates low cadmium toxicity in seedlings of sensitive and tolerant rice cultivars [J]. Plant Physiol Bioch, 57: 106–113.
- SINGH R, PARIHAR P, PRASAD S M, 2020. Sulphur and calcium attenuate arsenic toxicity in *Brassica* by adjusting ascorbate–glutathione cycle and sulphur metabolism [J]. Plant Growth Regul, 91(2): 221–235.
- SUN F, WANG F, WANG X, et al, 2013. Soil threshold values of total and available cadmium for vegetable growing based on field data in Guangdong Province, South China[J]. J Sci Food Agr, 93(8): 1967–1973.
- TANG M, LI R, CHEN P, 2023. Exogenous glutathione can alleviate chromium toxicity in kenaf by activating antioxidant system and regulating DNA methylation[J]. Chemosphere, 337: 139305.
- ULUISIK I, KARAKAYA H C, KOC A, 2018. The importance of boron in biological systems [J]. J Trace Elem Med Bio, 45: 156–162.
- WEI R, CHEN C, KOU M, et al, 2023. Heavy metal concentrations in rice that meet safety standards can still pose a risk to human health[J]. Commun Earth Environ, 4: 84.
- WU X, RIAZ M, YAN L, et al, 2017. Boron deficiency in trifoliate orange induces changes in pectin composition and architecture of components in root cell walls [J]. Front Plant Sci, 8: 1882.
- WU X, SONG H, GUAN C, et al, 2020a. Boron alleviates cadmium toxicity in *Brassica napus* by promoting the chelation of cadmium onto the root cell wall components [J]. Sci Total Environ, 728: 138833.
- WU X, SONG H, GUAN C, et al, 2020b. Boron mitigates cadmium toxicity to rapeseed (*Brassica napus*) shoots by relieving oxidative stress and enhancing cadmium chelation onto cell walls[J]. Environ Pollut, 263: 114546.
- WU Z, WANG F, LIU S, et al, 2016. Comparative responses to silicon and selenium in relation to cadmium uptake, compartmentation in roots, and xylem transport in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress [J]. Environ Exp Bot, 13: 173–180.
- WU Z, XU S, SHI H, et al, 2018. Comparison of foliar silicon and selenium on cadmium absorption, compartmentation, translocation and the antioxidant system in Chinese flowering cabbage [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 166: 157–164.
- XUE W, ZHANG X, ZHANG C, et al, 2023. Mitigating the toxicity of reactive oxygen species induced by cadmium via restoring citrate valve and improving the stability of enzyme structure in rice[J]. Chemosphere, 327: 138511.