

硒砷交互作用对芸薹属蔬菜抗氧化系统的影响

秦玉燕¹, 陈壮美¹, 吴 凤¹, 罗义灿¹, 刘 力¹,
王运儒¹, 梁宏合¹, 黄凌娜²

(1. 广西壮族自治区亚热带作物研究所·农业农村部亚热带果品蔬菜质量安全控制重点实验室 南宁 530001; 2. 阳朔县农业技术推广中心 广西阳朔 541999)

摘要: 通过研究芸薹属蔬菜抗氧化系统对硒、砷胁迫的响应, 探讨硒砷相互作用的生理机制。采用土壤盆栽试验, 研究 100 mg·kg⁻¹ 砷、7.5 mg·kg⁻¹ 硒单独及复合处理对菜心、小白菜叶片 12 个抗氧化指标的影响, 并利用主成分分析法对不同处理的抗氧化能力进行综合评价。结果表明, 菜心的综合抗氧化能力强于小白菜。硒、砷单独处理及复合处理均对 2 种蔬菜的抗氧化防御系统造成不同程度的损伤。砷胁迫下添加硒, 菜心叶片过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性显著下降, 丙二醛(MDA)含量显著升高, 细胞膜受损程度增加; 小白菜叶片谷胱甘肽 S-转移酶(GST)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性显著升高, CAT 活性和非蛋白巯基(NPTs)含量显著下降, MDA 含量变化不显著。硒胁迫下添加砷, 菜心超氧化物歧化酶(SOD)和 POD 活性显著下降, 小白菜 CAT、GST 和 APX 活性显著提高。不同种类芸薹属蔬菜抗氧化系统在应对硒、砷复合胁迫时表现出不同响应。在菜心中, 硒、砷协同降低其综合抗氧化能力; 在小白菜中, 硒、砷在降低其综合抗氧化能力方面表现为拮抗作用。小白菜主要通过提高 GST 和 APX 活性来应对硒、砷胁迫。

关键词: 硒; 砷; 芸薹属蔬菜; 抗氧化系统; 综合评价

中图分类号: S634.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)02-143-09

Interactive effects of selenium and arsenic on the antioxidant system of *Brassica* vegetables

QIN Yuyan¹, CHEN Zhuangmei¹, WU Feng¹, LUO Yican¹, LIU Li¹, WANG Yunru¹, LIANG Honghe¹, HUANG Lingna²

(1. Guangxi Subtropical Crops Research Institute/Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruit and Vegetable, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanning 530001, Guangxi, China; 2. Yangshuo County Agricultural Technology Extension Center, Yangshuo 541999, Guangxi, China)

Abstract: This study investigated the responses of the antioxidant systems in *Brassica* vegetables to selenium (Se) and arsenic (As) stress to reveal the physiological mechanisms underlying their interaction. A soil pot experiment was conducted using choy sum and pak choi as test materials. Treatments included 100 mg·kg⁻¹ As alone, 7.5 mg·kg⁻¹ Se alone, and their combined application. Twelve antioxidant parameters in the leaves were measured, and principal component analysis was employed to comprehensively evaluate the antioxidant capacity under different treatments. The results showed that the comprehensive antioxidant capacity of choy sum was higher than that of pak choi. Both individual and combined treatments of Se and As caused varying degrees of damage to the antioxidant defense systems of both vegetables. Under As stress with Se supplementation, catalase (CAT) and peroxidase (POD) activity in choy sum leaves decreased significantly, while malondialdehyde (MDA) content increased markedly, indicating enhanced cell membrane damage. In pak choi leaves, the activity of glutathione S-transferase (GST) and ascorbate peroxidase (APX) increased significantly, whereas CAT activity and non-protein thiol (NPTs) content decreased significantly, with no significant change in MDA content. Under Se stress with added As, the activity of superoxide dismutase (SOD) and POD in choy sum decreased significantly,

收稿日期: 2025-04-27; 修回日期: 2025-07-24

基金项目: 广西青年科学基金(2018GXNSFBA281171); 广西农业和乡村振兴人才培养支持专项(GXQNTJ242129); 广西农业科学院基
本科业务专项(桂农科 2026YT013)

作者简介: 秦玉燕, 女, 高级工程师, 主要从事农产品质量安全研究工作。E-mail: 956346090@qq.com

通信作者: 黄凌娜, 女, 农艺师, 主要从事农业技术推广工作。E-mail: 425095766@qq.com

whereas CAT, GST, and APX activity in pak choi increased significantly. The antioxidant systems of the two *Brassica* vegetables exhibited different response patterns to combined Se and As stress. In choy sum, Se and As showed a synergistic patterns, jointly reducing its antioxidant capacity. In pak choi, they exhibited antagonism in reducing the overall antioxidant capacity. Additionally, pak choi primarily relied on enhancing GST and APX activities to cope with Se and As stress.

Key words: Selenium; Arsenic; *Brassica* vegetables; Antioxidant system; Comprehensive evaluation

砷(As)是一种毒性强、迁移性高的类金属元素,已被国际癌症研究机构列为第I类明确致癌物^[1]。砷可诱导植物体内活性氧(ROS)积累,扰乱氧化与抗氧化系统平衡,从而导致膜脂过氧化、酶失活等生理毒性反应,进而抑制植物正常代谢与发育^[2]。土壤砷污染对农产品安全和人类健康构成潜在威胁。硒(Se)是人和动物必需的一种微量营养元素,是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、硫氧还蛋白还原酶(TrxR)等多种抗氧化酶的活性中心,在植物体内参与调控抗氧化系统的平衡^[3]。近年来,随着富硒农业的发展,土壤中较高浓度砷、硒共存现象日趋普遍。已有研究表明,硒与砷在植物体内存在复杂的拮抗或协同作用^[4],二者不仅相互影响其吸收与富集,还可通过调控活性氧清除系统,引发抗氧化系统的变化。由于不同作物抗氧化系统应对砷、砷胁迫的响应模式存在差异,且单一指标难以全面反映植物的整体抗氧化能力。因此,研究硒、砷交互作用对不同种类芸薹属蔬菜 12 个抗氧化生理指标的影响,构建抗氧化能力综合评价模型,为揭示不同蔬菜品种在复合重金属胁迫下的抗氧化响应特征提供方法支持,同时对科学解析硒、砷相互作用的生理调控机制具有重要意义。

抗氧化系统对胁迫的响应是植物抵御逆境伤害的关键机制之一^[5]。在砷胁迫下,植物会启动抗逆机制产生保护作用。一方面通过加速生理生化活动,产生大量代谢物与重金属结合以解毒;另一方面通过激活体内抗氧化防御系统以清除过量的 ROS,因此植物对砷的耐性、抗逆性与抗氧化系统直接相关^[2]。研究表明,硒主要通过调节抗氧化系统来缓解植物的砷毒害作用。As(III)对植物的毒害作用主要是由于其与巯基基团分子的高亲和力可以形成 As(III)-S 键抑制如谷胱甘肽还原酶(GR)、GSH-Px 等的活性^[6]。在蜈蚣草中的研究发现,添加 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硒可提高植物体内硫醇和谷胱甘肽(GSH)水平,抑制脂质过氧化作用^[7]。在绿豆和水稻中的研究表明,硒可以通过增加金属硫蛋白、硫醇含量和提高谷胱甘肽-S-转移酶(GST)活性来降低砷引起的氧化损伤,提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶

(APX)、GR 等相关保护酶活性和抗坏血酸、GSH 等非酶类抗氧化物质水平^[8-9]。在砷胁迫下,硒通过增加水稻种子抗氧化物的积累来抑制氧化损伤,提高种子发芽率^[10];硒还能提高水稻幼苗 GSH-Px 和硫醇代谢相关酶的活性,显著增加根中非蛋白质巯基物质(NPTs)和植物络合素含量,显著降低超氧阴离子和细胞死亡数量^[11-12]。Singh 等^[13]研究了硒对砷处理水稻的氧化应激反应和矿物营养状况的调节作用,发现 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硒和致死剂量 $60 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ As(III)同时处理时,水稻生长状况良好,硒刺激了体内抗氧化物质的产生,降低了丙二醛(MDA)含量。

芸薹属蔬菜是一类常见的富硒植物,在富硒农产品开发中具有较大的潜力。笔者前期研究了 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 砷和 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硒交互作用对不同种类芸薹属蔬菜硒、砷积累和转运的影响,发现砷对硒积累的影响在菜心中表现为促进作用,在小白菜中表现为抑制作用,相关的作用机制可能与不同植物体内抗氧化系统响应的差异有关^[14]。目前,针对硒砷交互作用下抗氧化系统应对机制的研究尚不全面,且植物体内抗氧化相关指标繁多,不同指标变化方向不一,单一指标的变化难以准确反映抗氧化系统整体情况,迫切需要建立不同抗氧化指标的综合评价方法。笔者以菜心和小白菜两种典型的芸薹属蔬菜为试验材料,深入研究其在硒、砷胁迫下体内 12 个抗氧化相关生理指标的响应特征,利用主成分分析法(PCA)构建抗氧化能力综合评价模型,科学探讨硒、砷相互作用的生理机制。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤类型为红壤,采自广西武鸣区双桥镇柑橘地 0~20 cm 的耕层,自然风干后,去除残茬、碎砾,过 2 mm 筛。土壤基本理化性质为:pH 5.48,有机质含量(w,后同) $19.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水解性氮含量 $88.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $167 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $179 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总砷含量 $17.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总硒含量 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试砷为 $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (分析纯,美国 Sigma 公司),供试硒为 Na_2SeO_3 (分析纯,山东西亚化学工业有限公司)。盆栽作物为菜心(Choy

sum,品种为尖叶油青甜菜心,肇庆市鼎湖区超丰蔬菜种子行)、小白菜(Pak choi,品种为高禾赤叶小白菜,深圳市范记种子有限公司)。

1.2 试验设计

根据 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》的规定,当土壤中砷浓度(w ,后同)在 $40\sim 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,属于安全利用类,即轻度砷污染水平。结合前期研究结果^[14],本试验设定土壤中添加砷浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,硒浓度为 $7.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。每种蔬菜分别设置 4 个处理,对照(CK)、硒单独处理($7.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤,Se)、砷单独处理($100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤,As)以及砷硒复合处理($100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤+ $7.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤,Se+As)。每个处理设 3 个重复。

盆栽试验在温室大棚开展。试验用盆钵为方形聚乙烯盆(长 33 cm,宽 23 cm,高 15 cm),每盆装土 5 kg,称取对应量的砷酸钠、亚硒酸钠固体溶于水溶液中,用小型喷雾器全部均匀喷入土壤中,混匀。底肥 N、P、K 肥分别以尿素、磷酸二氢钾、硝酸钾形式施加,施加量分别为 $\text{N}-0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{P}-0.044\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{K}-0.25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。用称质量法控制土壤水分为田间持水量的 80%,平衡 1 个月。

1.3 样品采集

蔬菜种子用 1%(m/V)的高锰酸钾水溶液浸泡 30 min 杀菌,自来水洗净并浸泡过夜,采用穴播的方式播种,每盆播种 9 株,6 d 后间苗,14 d 后定苗至 4 株。生长期间保持土壤湿度为田间持水量的 80%左右,30 d 后采集蔬菜鲜叶,用干冰保存带回实验室, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存。

1.4 测定指标和方法

分别采用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒 BCAP-1-W、SOD-1-Y、POD-1-Y、CAT-1-Y、APX-1-W、GST-1-W、GPX-1-W、TRXR-1-W、ASA-1-W、GSH-1-W、FDSH-1-G、MDA-1-Y 测定植株叶片可溶性蛋白(SP)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性、谷胱甘肽 *S*-转移酶(GST)活性、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性、硫氧还蛋白还原酶(TrxR)活性及还原型抗坏血酸(AsA)含量、还原型谷胱甘肽(GSH)含量、非蛋白巯基(NPTs)含量和丙二醛(MDA)含量。

1.5 数据处理

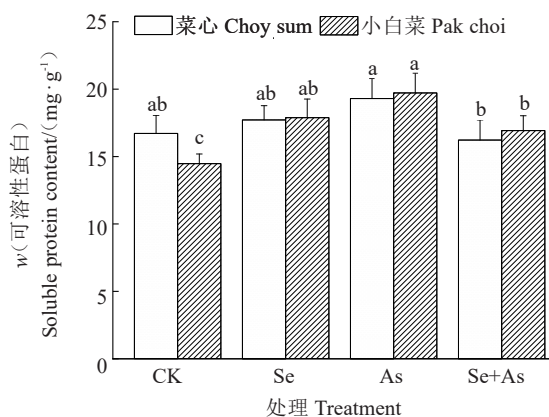
采用 SPSS 22.0 进行数据统计分析,采用 Or-

igin 2021 绘图,各处理平均值的多重比较采用 Duncan-test 法。

2 结果与分析

2.1 硒砷交互作用对可溶性蛋白含量的影响

由图 1 可知,与 CK 相比,Se、As 单独处理和 Se+As 复合处理显著提高了小白菜叶片中可溶性蛋白含量,但对菜心叶片中可溶性蛋白含量影响不显著。Se+As 复合处理菜心和小白菜叶片可溶性蛋白含量较 As 单独处理分别显著降低 16.0%、14.2%,说明 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ As 胁迫下添加 $7.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 可显著降低菜心和小白菜可溶性蛋白含量。



注:不同小写字母表示同一作物不同处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among treatments at $P<0.05$ in the same crop. The same below.

图 1 硒砷交互作用对可溶性蛋白含量的影响

Fig. 1 Interaction effects of selenium and arsenic on soluble protein content

2.2 硒砷交互作用对MDA含量的影响

由图 2 可知,菜心叶片中 MDA 含量高于小白菜。与 CK 相比,Se、As 单独处理对菜心、小白菜叶片 MDA 含量影响不显著。Se+As 复合处理菜心和小白菜叶片 MDA 含量较 CK 分别显著提高 27.9%、25.1%,且高于其他处理;说明 Se、As 协同提高了 MDA 含量。Se+As 复合处理较 As 单独处理显著提高菜心 MDA 含量,但对小白菜 MDA 含量影响不显著,说明 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ As 胁迫下添加 $7.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硒增加了菜心细胞膜受损程度。Se+As 复合处理较 Se 单独处理显著提高菜心和小白菜 MDA 含量,说明 $7.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Se 胁迫下添加 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ As 增加了菜心和小白菜细胞膜受损程度。

2.3 硒砷交互作用对抗氧化酶活性的影响

由图 3-A 可知,与 CK 相比,Se、As 单独处理和

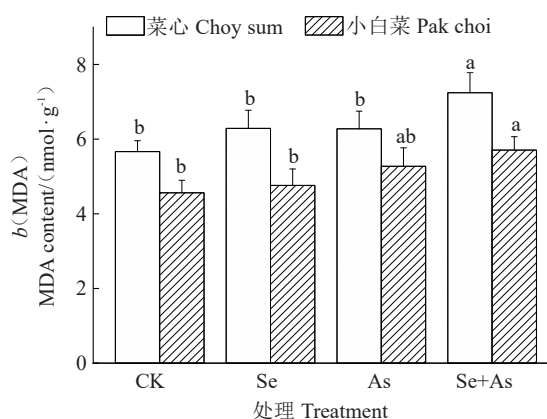


图2 硒砷交互作用对MDA含量的影响
Fig. 2 Interaction effects of selenium and arsenic on MDA content

Se+As 复合处理对2种蔬菜叶片SOD活性影响均不显著。在菜心中,Se+As复合处理较Se单独处理SOD活性显著降低20.2%,说明 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Se胁迫下添加 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ As显著降低了菜心叶片SOD活性。由图3-B可知,菜心叶片POD活性高于小白菜。与CK相比,Se、As单独处理和Se+As复合处理均显著降低2种蔬菜叶片POD活性。在菜心中,Se+As复合处理的POD活性显著低于Se、As单独处理,说明Se、As协同降低了菜心叶片POD活性。由图3-C可知,菜心叶片CAT活性高于小白菜。与CK相比,As单独处理菜心和小白菜CAT活性分别显著提高32.3%、11.9%,Se单独处理菜心和小白菜CAT活性分别显著降低28.3%、30.8%,Se+As复合处理菜心叶片CAT活性显著降低33.4%。说明 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ As处理显著提高2种蔬菜叶片CAT活性, $7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Se处理则显著降低叶片CAT活性。由图3-D可知,在菜心中,与CK相比,Se、As单独处理和Se+As复合处理对叶片GST活性影响不显著。在小白菜中,与CK相比,Se单独处理叶片GST活性显著降低23.7%,As单独处理和Se+As复合处理对叶片GST活性影响不显著;Se+As复合处理GST活性显著高于Se、As单独处理,说明Se、As协同提高了小白菜叶片GST活性。

由图3-E可知,在菜心中,与CK相比,Se、As单独处理和Se+As复合处理对叶片GSH-Px活性影响不显著。在小白菜中,与CK相比,Se单独处理叶片GSH-Px活性显著降低21.5%,As单独处理和Se+As复合处理对叶片GSH-Px活性影响不显著。由图3-F可知,菜心叶片APX活性低于小白

菜。在菜心中,与CK相比,Se、As单独处理和Se+As复合处理对叶片APX活性影响不显著。在小白菜中,Se、As单独处理叶片APX活性较CK分别显著降低32.7%、32.0%;Se+As复合处理APX活性显著高于Se、As单独处理,说明Se、As协同提高小白菜叶片APX活性。由图3-G可知,菜心叶片TrxR活性低于小白菜。与CK相比,Se、As单独处理和Se+As复合处理对菜心叶片TrxR活性影响不显著,但显著降低小白菜叶片TrxR活性。在小白菜中,Se、As单独处理和Se+As复合处理TrxR活性较CK分别显著降低23.2%、31.9%、39.5%;Se+As复合处理TrxR活性低于Se、As单独处理,说明Se、As协同降低小白菜叶片TrxR活性。

2.4 硒砷交互作用对非酶类抗氧化物质含量的影响

由图4-A可知,菜心叶片AsA含量高于小白菜。与CK相比,As单独处理菜心和小白菜叶片AsA含量分别显著降低13.3%、10.9%;Se+As复合处理菜心叶片AsA含量显著降低16.0%;说明 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ As处理显著降低菜心和小白菜叶片AsA含量。由图4-B可知,菜心叶片GSH含量低于小白菜。与CK相比,Se、As单独处理和Se+As复合处理对2种蔬菜叶片GSH含量影响均不显著。由图4-C可知,不同处理对菜心叶片中NPTs含量影响不显著。在小白菜中,Se+As复合处理NPTs含量较CK显著降低19.8%,较As单独处理显著降低17.4%;Se+As复合处理NPTs含量低于Se、As单独处理,说明Se、As协同降低了小白菜叶片NPTs含量。

2.5 抗氧化指标与砷、硒含量间的相关性分析

由表1可知,叶片As含量与SOD活性呈显著负相关,与MDA含量呈极显著正相关。叶片Se含量与POD活性呈显著负相关,与CAT活性呈极显著负相关。可溶性蛋白含量与GST、APX活性呈显著负相关,与GSH-Px活性呈极显著负相关。MDA含量与APX活性、GSH含量呈显著负相关,与TrxR活性呈极显著负相关。SOD活性与CAT活性呈显著正相关,与POD活性、AsA含量呈极显著正相关。POD活性与NPTs含量呈显著正相关,与CAT活性、AsA含量呈极显著正相关,与TrxR活性、GSH含量呈极显著负相关。CAT活性与TrxR活性呈极显著负相关。GST活性与GSH-Px、APX活性呈显著正相关。GSH-Px活性与APX活性呈极显著正相关。APX活性与GSH含量呈显著正相

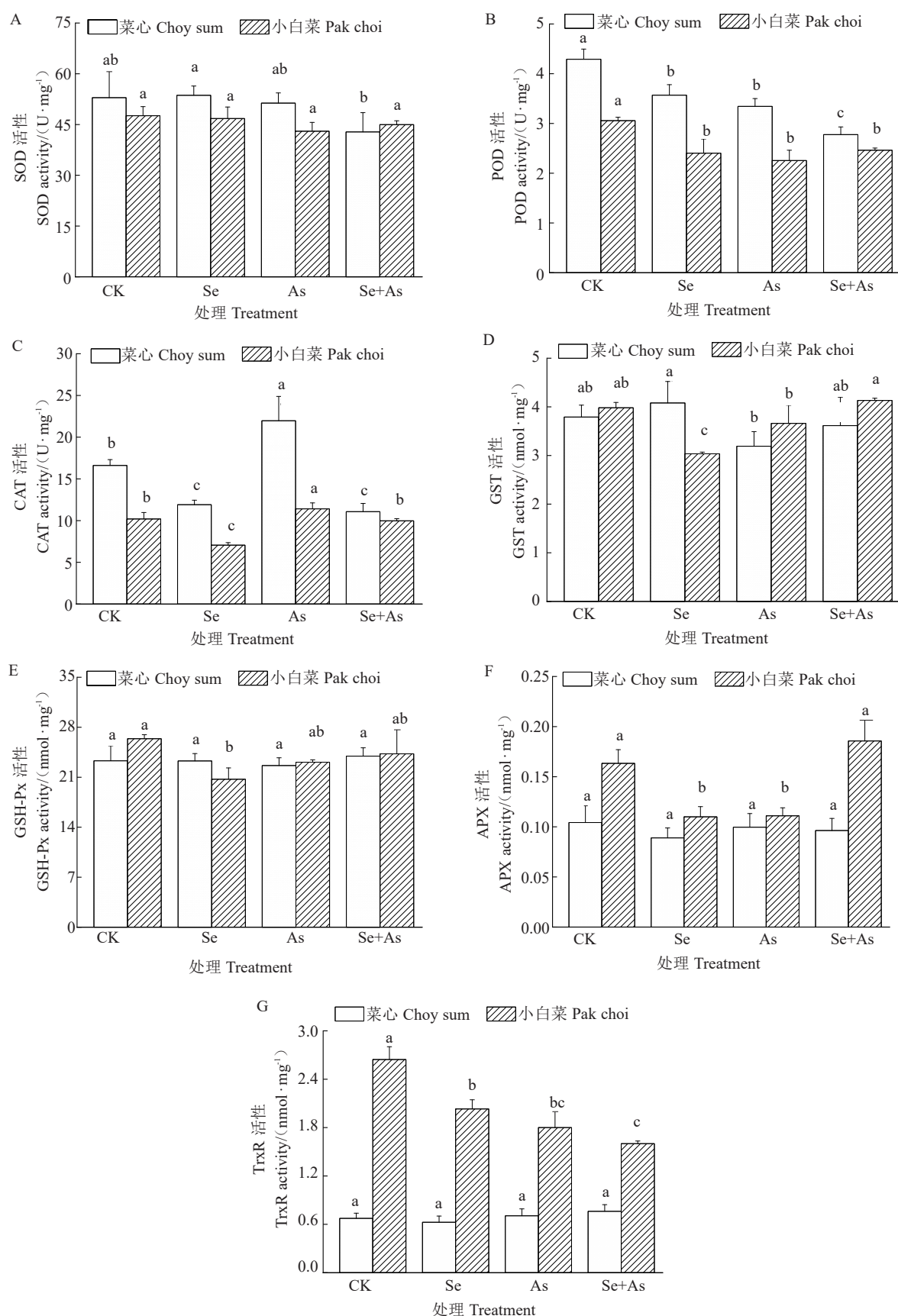


图3 硒砷交互作用对抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Interaction effects of selenium and arsenic on antioxidant enzyme activity

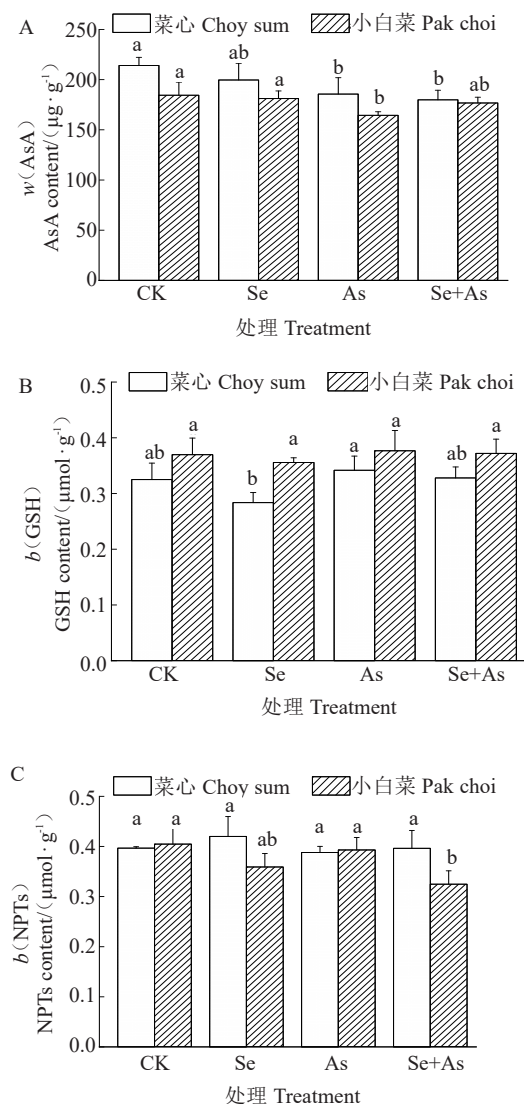


图4 硒砷交互作用对非酶类抗氧化物质含量的影响

Fig. 4 Interaction effects of selenium and arsenic on non-enzymatic antioxidants

关,与 TrxR 活性呈极显著正相关,与 NPTs 含量呈显著负相关。TrxR 活性与 GSH 含量呈极显著正相关,与 AsA 含量呈显著负相关。AsA 含量与 GSH 含量呈显著负相关。

2.6 抗氧化指标的综合评价

PCA 是一种可靠的质量评价方法,能将多个变量转化为少数的综合指标,可最大限度地保留原始高维的变量信息。对 12 个抗氧化指标进行 PCA 分析(表 2)。结果表明,PCA 分析得到的前 4 个主成分的特征值均大于 1,且累计方差贡献率达 87.303%,说明这 4 个主成分能反映 12 个指标的绝大部分信息,因此选取前 4 个主成分信息进行后续分析计算。主成分 1(PC1)的方差贡献率达到了

43.038%,特征值为 5.165,主要与 SOD 活性、POD 活性、AsA 含量等呈高度正相关,与 APX 活性、TrxR 活性、GSH 含量等呈高度负相关;这些指标在综合评价中起主要作用。主成分 2(PC2)的方差贡献率为 23.995%,特征值为 2.879,与 GST 活性、GSH-Px 活性呈高度正相关,与可溶性蛋白含量呈高度负相关。主成分 3(PC3)的方差贡献率为 11.687%,特征值为 1.402,与 MDA 含量呈高度负相关,主要反映脂质过氧化水平。主成分 4(PC4)的方差贡献率为 8.583%,特征值为 1.030,与 CAT 活性表现为较高正相关,与 NPTs 活性表现为较高负相关。

利用 PCA 分析中的 4 个主成分对不同处理的抗氧化能力进行综合评价。将表 2 中各指标的主成分载荷除以主成分相对应的特征值的平方根作为特征向量,以特征向量为权重计算各主成分得分,再以不同主成分的方差贡献率为权重建立综合评价模型: $F=0.493F_1+0.275F_2+0.134F_3+0.098F_4$ (F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 分别表示 PC1、PC2、PC3 和 PC4 得分, F 表示综合得分),获得不同处理的综合得分及排名,得分高低反映综合抗氧化能力的高低。由表 3 可知,相同处理中菜心的综合得分高于小白菜,说明菜心的综合抗氧化能力要强于小白菜,可能因其叶片 POD、CAT 活性和 ASA 含量更高。在同一种蔬菜中,CK 的综合得分最高,说明 CK 的综合抗氧化能力最强,Se、As 单独处理和 Se+As 复合处理均对蔬菜的抗氧化能力造成不同程度的损伤;Se 单独处理组的综合得分高于 As 单独处理组,说明 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ As 处理对抗氧化能力的损伤大于 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Se 处理。在菜心中,Se+As 复合处理综合得分低于 Se、As 单独处理,说明 Se 和 As 协同降低菜心的综合抗氧化能力;在小白菜中,Se+As 复合处理综合得分高于 Se、As 单独处理,说明 Se 和 As 在降低小白菜综合抗氧化能力方面表现为拮抗作用。

3 讨论与结论

植物在重金属等逆境胁迫下会导致体内 ROS 积累而引起膜脂过氧化损伤。MDA 是衡量植物体内脂质过氧化水平的重要标志物,含量越高表示植物所受损伤越严重^[15-16]。在本试验中,硒胁迫下添加砷显著提高了 2 种蔬菜叶片 MDA 含量,说明添加砷后,植物受到的胁迫增大,产生的 ROS 对植物造成了氧化损伤。相关性分析结果也表明,叶片 MDA 含量与砷含量呈极显著正相关。硒、砷复合处

表 1 各指标间的相关性分析结果
Table 1 Results of correlation analysis among various indices

指标 Index	As 含量 As content	Se 含量 Se content	SP 含量 SP content	MDA 含量 MDA content	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity	GST 活性 GST activity	GSH-Px 活性 GSH-Px activity	APX 活性 APX activity	TrxR 活性 TrxR activity	AsA 含量 AsA content	GSH 含量 GSH content	NPTs 含量 NPTs content
As 含量 As content	1.000													
Se 含量 Se content	0.263	1.000												
SP 含量 SP content	0.136	0.060	1.000											
MDA 含量 MDA content	0.695**	0.307	0.192	1.000										
SOD 活性 SOD activity	-0.410*	-0.298	-0.189	0.001	1.000									
POD 活性 POD activity	-0.300	-0.474*	-0.218	0.167	0.644**	1.000								
CAT 活性 CAT activity	0.216	-0.606**	0.221	0.322	0.434*	0.599**	1.000							
GST 活性 GST activity	-0.126	-0.139	-0.510*	0.071	0.212	0.192	-0.107	1.000						
GSH-Px 活性 GSH-Px activity	0.015	-0.323	-0.602**	-0.141	0.077	0.139	-0.025	0.505*	1.000					
APX 活性 APX activity	-0.059	-0.148	-0.492*	-0.452*	-0.136	-0.307	-0.311	0.421*	0.551**	1.000				
TrxR 活性 TrxR activity	-0.358	-0.089	-0.293	-0.786**	-0.345	-0.554**	-0.590**	0.050	0.224	0.622**	1.000			
AsA 含量 AsA content	-0.373	-0.211	-0.215	0.120	0.607**	0.766**	0.380	0.188	-0.002	-0.287	-0.465*	1.000		
GSH 含量 GSH content	0.061	-0.166	-0.047	-0.433*	-0.264	-0.561**	-0.212	-0.025	0.001	0.463*	0.622**	-0.418*	1.000	
NPTs 含量 NPTs content	-0.177	-0.248	-0.067	0.140	0.321	0.406*	0.197	0.099	0.252	-0.443*	-0.249	0.256	-0.376	1.000

注: *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$)。
Note: * means significant correlation ($P<0.05$), ** means extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 2 主成分载荷矩阵、特征值及贡献率 Table 2 Principal component loading matrix, eigenvalue, and variance contribution rate					
指标 Index	PC1	PC2	PC3	PC4	
SP 含量 SP content	0.148	-0.837	0.047	0.193	
MDA 含量 MDA content	0.553	-0.176	-0.779	0.142	
SOD 活性 SOD activity	0.789	0.234	0.480	0.117	
POD 活性 POD activity	0.852	0.410	0.253	0.125	
CAT 活性 CAT activity	0.655	-0.137	0.082	0.549	
GST 活性 GST activity	-0.029	0.802	-0.341	0.098	
GSH-Px 活性 GSH-Px activity	-0.203	0.851	-0.295	0.074	
APX 活性 APX activity	-0.724	0.520	0.062	0.425	
TrxR 活性 TrxR activity	-0.856	0.210	0.373	-0.237	
AsA 含量 AsA content	0.789	0.414	0.331	0.034	
GSH 含量 GSH content	-0.879	-0.082	0.185	0.259	
NPTs 含量 NPTs content	0.604	0.216	-0.047	-0.567	
特征值 Eigenvalue	5.165	2.879	1.402	1.030	
方差贡献率	43.038	23.995	11.687	8.583	
Variance contribution rate/%					
累计方差贡献率	43.038	67.033	78.720	87.303	
Cumulative contribution rate/%					

理下菜心 MDA 含量显著升高,而小白菜无显著变化,这种种间差异可能源于二者膜脂组成与抗氧化代偿能力的不同。

植物体内的抗氧化酶在清除过量的 ROS 中发挥重要作用。本研究结果表明,砷单独处理显著提高了 2 种蔬菜叶片 CAT 活性,与 Alam 等^[17]报道的 30 mg·kg⁻¹ 砷处理的不同基因型绿豆作物中 CAT 酶活性的变化相同。说明 100 mg·kg⁻¹ 砷处理诱导了蔬菜体内的氧化应激反应。另外,砷单独处理对 SOD 活性影响不显著,但显著降低 POD 活性,说明不同抗氧化酶对砷胁迫的敏感度有差异。陈天等^[2]认为 SOD 活性对低含量砷胁迫(150 mg·kg⁻¹)不敏感,CAT 活性对砷胁迫较敏感,与本研究结果一致。砷胁迫下添加硒,2 种蔬菜 CAT 活性显著下降,说明硒的添加可能缓解了砷引起的氧化应激反应。砷胁迫下添加硒,菜心 POD 活性显著下降,GST 和 APX 活性变化不显著;小白菜 POD 活性变

表 3 不同处理的主成分得分及综合得分

Table 3 Principal component scores and comprehensive scores for different treatments

作物 Crop	处理 Treatment	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F	排名 Rank
菜心 Choy sum	CK	2.785	1.097	1.017	0.478	1.858	1
	Se	2.899	0.706	-0.402	-0.858	1.485	2
	As	1.873	-1.676	0.364	1.289	0.638	3
	Se + As	0.386	-0.322	-2.249	-0.680	-0.266	5
小白菜 Pak choi	CK	-1.947	2.903	0.750	-0.613	-0.122	4
	Se	-1.561	-2.002	1.518	-0.896	-1.205	7
	As	-1.851	-1.548	-0.318	-0.391	-1.419	8
	Se + As	-2.584	0.842	-0.680	1.670	-0.969	6

化不显著,GST 和 APX 活性显著升高。2 种蔬菜 POD、GST 和 APX 活性对硒的响应不同可能是二者体内 MDA 含量变化差异的主要原因。小白菜体内 GST 和 APX 活性的升高可能提高了机体的抗氧化防御能力,减少了机体的氧化损伤,使得 MDA 含量变化不显著。这说明小白菜能够通过增强 GSH 依赖型代谢途径来抵御复合胁迫。

硒单独处理显著降低了 2 种蔬菜 POD 和 CAT 活性,小白菜体内 GST、GSH-Px、APX 和 TrxR 活性也显著降低,与 Liu 等^[18]报道的 2 μg·L⁻¹ 硒处理显著降低盐生植物 *Suaeda salsa* 中 CAT 和 GST 活性的结果一致。相关性分析结果也表明,叶片硒含量与 POD、CAT 活性呈显著和极显著负相关。在萝卜中的研究发现,当硒施用量超过了植物的耐受性时,会降低 APX、GR、总抗氧化能力和脱氢抗坏血酸还原酶等抗氧化活性^[19]。但在烤烟中的研究结果表明,硒的添加可显著提高叶片 SOD、POD 等酶活性^[20]。这些研究结果的差异可能与化学物质的剂量反应有关^[21]。研究认为,植物对胁迫产生响应通常表现为低含量刺激正向应答,高含量胁迫产生抑制作用。在阈值内的逆境胁迫下,植物通常会增强抗氧化酶活性以提高植物的适应力^[2]。本试验中添加的硒含量对于芸薹属蔬菜可能处于过量水平,因而硒的高剂量抑制作用表现为抗氧化物酶活性的降低。这与过量的硒竞争性取代酶活性中心的必需金属离子(如 Fe²⁺/Mn²⁺)导致酶失活有关。硒胁迫下添加砷,2 种蔬菜 SOD、POD、CAT、GST 和 APX 活性对砷的响应不同。菜心 SOD 和 POD 活性显著下降,CAT、GST 和 APX 活性变化不显著;小白菜 SOD 和 POD 活性变化不显著,CAT、GST 和 APX 活性显著升高;说明小白菜主要通过提高 CAT、GST 和 APX 活性来应对过量硒、砷产生的氧化损伤。

非酶类抗氧化物质是植物体内应对抗氧化胁

迫的另外一个重要因子。在本研究中,添加砷或硒并没有显著提高 3 种非酶类抗氧化物质含量,砷胁迫下添加硒反而显著降低了小白菜叶片 NPTs 含量,说明 7.5 mg·kg⁻¹ 硒不能有效调控非酶类抗氧化物质含量以应对砷胁迫。刘锦嫦等^[12]研究发现,5 μmol·L⁻¹ 砷处理下,添加硒抑制了水稻根部 NPTs 合成,且随着硒浓度升高,水稻根部 NPTs 含量逐渐降低,与本研究结果相似。砷单独处理显著降低 2 种蔬菜叶片 AsA 含量,与朱顺^[22]在小麦幼苗中的研究结果一致。AsA 含量的降低可能是砷抑制了 AsA 合成关键限速酶(GDP-甘露糖焦磷酸化酶)活性,造成 AsA 合成受阻。

菜心的综合抗氧化能力强于小白菜,表明菜心具有更强的本底抗氧化储备。王萍^[23]在芸薹属蔬菜中的研究结果表明,不同基因型蔬菜之间抗氧化物质含量差异很大。在本研究中,菜心叶片中较高的 POD、CAT 活性,使其能更有效地清除内源性 H₂O₂;较高的 AsA 含量也为 APX 及其他依赖 AsA 的清除途径提供了更充足的底物。在菜心中,Se 和 As 协同加剧了对抗氧化系统的抑制。这一现象可能与高剂量 Se 与 As 在活性中心或硫醇基团处的协同结合有关,双重结合破坏了更多的酶分子活性位点,导致 ROS 清除通路受损更严重。相比之下,在小白菜中,Se 和 As 在抑制抗氧化系统方面表现出拮抗效应。说明适量 Se 可能通过增强 APX 和 GST 活性,部分抵消了 As 诱导的氧化损伤。另外,Se 也可能改变 As 在细胞内的分布或形态,使其毒性降低,表现为整体抗氧化能力的相对恢复。

综上所述,7.5 mg·kg⁻¹ Se、100 mg·kg⁻¹ As 单独处理和 Se+As 复合处理均对 2 种蔬菜的抗氧化能力造成不同程度的损伤,使得大部分抗氧化酶活性降低、非酶类抗氧化物质含量减少。砷胁迫下添加硒,小白菜主要通过提高 GST 和 APX 活性以缓解砷引起的氧化损伤。硒胁迫下添加砷,小白菜主要

通过提高 CAT、GST 和 APX 活性来应对硒、砷胁迫。不同种类芸薹属蔬菜抗氧化系统应对硒、砷胁迫的响应不同。在菜心中, Se 和 As 协同降低其综合抗氧化能力; 在小白菜中, Se 和 As 在降低其综合抗氧化能力方面表现为拮抗作用。

参考文献

- [1] BUNDSCHUH J, LITTER MI, PARVEZ F, et al. One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries [J]. *Science of The Total Environment*, 2012, 429: 2-35.
- [2] 陈天, 刘云根, 王妍, 等. 外源磷对砷胁迫下挺水植物抗氧化酶系统的影响[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(5): 1040-1046.
- [3] 唐敏, 杨开宇, 张赛男, 等. 硒对核桃种仁抗氧化酶活性及果实品质的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(5): 127-134.
- [4] 秦玉燕, 王运儒, 时鹏涛, 等. 硒-砷交互作用对白菜砷和硒吸收转运的影响[J]. *环境化学*, 2021, 40(9): 2640-2648.
- [5] 阴禹舟, 王勃, 夏方山, 等. 硒引发时间对紫花苜蓿幼苗不同部位抗氧化性能的影响[J]. *畜牧与饲料科学*, 2023, 44(3): 96-102.
- [6] SHARMA V K, SOHN M. Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformation, and remediation[J]. *Environment International*, 2009, 35(4): 743-759.
- [7] SRIVASTAVA M, MA L Q, RATHINASABAPATHI B, et al. Effects of selenium on arsenic uptake in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(3): 1115-1121.
- [8] MALIK J A, GOEL S, KAUR N, et al. Selenium antagonises the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 77: 242-248.
- [9] KUMAR A, SINGH R P, SINGH P K, et al. Selenium ameliorates arsenic induced oxidative stress through modulation of antioxidant enzymes and thiols in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Ecotoxicology*, 2014, 23(7): 1153-1163.
- [10] MOULICK D, GHOSH D, SANTRA S C. Evaluation of effectiveness of seed priming with selenium in rice during germination under arsenic stress [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 109: 571-578.
- [11] PANDEY C, GUPTA M. Selenium amelioration of arsenic toxicity in rice shows genotypic variation: A transcriptomic and biochemical analysis[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 231: 168-181.
- [12] 刘锦娣, 熊双莲, 马烁, 等. 硒砷交互作用对水稻幼苗生理特性及砷硒累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(3): 423-430.
- [13] SINGH R, UPADHYAY A K, SINGH D P. Regulation of oxidative stress and mineral nutrient status by selenium in arsenic treated crop plant *Oryza sativa*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148: 105-113.
- [14] QIN Y Y, WANG Y R, SHI P T, et al. Interactive effects of selenium and arsenic on their accumulation, translocation, arsenic and selenium species, and subcellular distribution in *Brassica* vegetables[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(2): 4000-4016.
- [15] 贾莲, 张冬, 张吉斯, 等. 镉胁迫对忍冬抗氧化酶活性及内源激素含量的影响[J]. *地球与环境*, 2024, 52(1): 21-28.
- [16] 卜少腾, 李衍亮, 李玉义, 等. 不同硒累积型水稻耐高硒毒害差异特征研究[J]. *核农学报*, 2023, 37(8): 1681-1689.
- [17] ALAM M Z, MCGEE R, HOQUE M A, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi, selenium and biochar on photosynthetic pigments and antioxidant enzyme activity under arsenic stress in mung bean (*Vigna radiata*) [J]. *Frontiers in Physiology*, 2019, 10: 193.
- [18] LIU X L, LAI Y K, SUN H S, et al. The interactive effects of mercury and selenium on metabolic profiles, gene expression and antioxidant enzymes in halophyte *Suaeda salsa* [J]. *Environmental Toxicology*, 2016, 31(4): 440-451.
- [19] HU L, FAN H B, WU D S, et al. Effects of selenium on antioxidant enzyme activity and bioaccessibility of arsenic in arsenic-stressed radish[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 200: 110768.
- [20] HAN D, XIONG S L, TU S X, et al. Interactive effects of selenium and arsenic on growth, antioxidant system, arsenic and selenium species of *Nicotiana tabacum* L.[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 117: 12-19.
- [21] SAAL F S, TIMMS B G, MONTANO M M, et al. Prostate enlargement in mice due to fetal exposure to low doses of estradiol or diethylstilbestrol and opposite effects at high doses[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 94(5): 2056-2061.
- [22] 朱顺. 不同品种小麦幼苗耐砷性差异及砷胁迫下抗氧化系统的变化[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [23] 王萍. 中国主要芸薹属蔬菜抗氧化能力基因型差异和环境效应的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.