

李杰, 杨华, 陈星旺, 等. 硒对辣椒果实中镉含量降低及硒富集效应的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(1): 152-161.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.01.016

硒对辣椒果实中镉含量降低及硒富集效应的影响

李杰, 杨华, 陈星旺, 胡艳, 蔡雄飞, 王济

(贵州师范大学地理与环境科学学院/贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了探明贵州省高镉(Cd)地质背景下施用硒(Se)对辣椒Cd积累的调控及硒富集机制,本研究通过水培试验,将辣椒幼苗暴露于含 $10\ \mu\text{mol/L}$ Cd的1/2浓度Hoagland营养液中,分别添加浓度为 $0.5\ \mu\text{mol/L}$ 、 $5.0\ \mu\text{mol/L}$ 、 $25.0\ \mu\text{mol/L}$ Se进行处理,14 d后分析辣椒幼苗根部和地上部Cd含量。再通过辣椒全生育期盆栽试验,探究 $1\ \text{mg/kg}$ Cd处理下,于辣椒开花期添加 $0.5\ \text{mg/kg}$ Se处理,成熟期分析辣椒根、茎、叶及果实中Cd和Se的含量。水培试验结果表明,与单一Cd处理相比,添加 $5.0\ \mu\text{mol/L}$ Se处理使辣椒根部和地上部生物量显著增加55.5%和95.0%,添加 $25.0\ \mu\text{mol/L}$ Se处理使辣椒根部和地上部Cd含量显著降低48.3%和45.0%,添加 $25.0\ \mu\text{mol/L}$ Se处理使辣椒根细胞液、根细胞壁、木质部汁液中Cd含量分别显著下降53.2%、55.7%和45.5%。土培试验结果表明,与单一Cd处理相比,添加 $0.5\ \text{mg/kg}$ Se处理使辣椒茎、叶、果实中Cd含量分别显著下降54.0%、49.5%、21.2%,辣椒根、茎、果实中Se含量分别显著增加85.8%、59.2%、55.0%,且辣椒果实中Ca、Fe含量显著增加96.1%和65.9%;在Cd处理下添加Se处理可降低辣椒根向茎、茎向叶、茎向果实的Cd转运系数,同时使辣椒果实中Cd对成人和儿童的致癌与非致癌风险均下降。本研究结果说明,Se有助于缓解Cd对辣椒的生理毒害作用,同时使辣椒果实中Cd含量降低,Se含量增加,有效提升了辣椒果实品质。

关键词: 辣椒; 硒; 镉; 吸收; 转运

中图分类号: S641.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2026)01-0152-10

Effects of selenium on cadmium reduction and selenium enrichment in pepper fruits

LI Jie, YANG Hua, CHEN Xingwang, HU Yan, CAI Xiongfei, WANG Ji

(School of Geography & Environmental Science, Guizhou Normal University/The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

Abstract: The study was conducted to investigate the regulatory effects of selenium (Se) application on cadmium (Cd) accumulation and selenium enrichment mechanisms in pepper fruits under high cadmium geological background of Guizhou. In a hydroponic experiment, pepper seedlings were exposed to a half-strength Hoagland nutrient solution containing $10\ \mu\text{mol/L}$ Cd, with additional Se treatments at concentrations of $0.5\ \mu\text{mol/L}$, $5.0\ \mu\text{mol/L}$, and $25.0\ \mu\text{mol/L}$. After 14 days, the Cd content in the roots and shoots of the pepper seedlings was analyzed. Subsequently, a pot experiment

spanning the entire growth period of pepper plants was conducted. Under a treatment of $1\ \text{mg/kg}$ Cd, selenium at a concentration of $0.5\ \text{mg/kg}$ was applied during the flowering stage. At maturity, the contents of Cd and Se in the roots, stems, leaves, and fruits of the pepper plants were analyzed. The hydroponic experiment results showed that, compared with the Cd-only treatment, the addition of $5.0\ \mu\text{mol/L}$ Se significantly increased the biomass of pepper

收稿日期: 2025-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42367002); 国家重点研发计划项目(2022YFD1901505); 贵州省科技支撑计划项目[黔科合支撑(2025)一般087]

作者简介: 李杰(1999-), 男, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 研究方向为土壤重金属修复。(E-mail) 232100090378@gznu.cn

通讯作者: 杨华, (E-mail) yanghua102106@126.com

roots and shoots by 55.5% and 95.0%, respectively. The application of 25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se significantly reduced the Cd content in roots and shoots by 48.3% and 45.0%, respectively. Furthermore, this treatment (25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se) also led to significant decreases in Cd content in the root cell sap, root cell wall, and xylem sap by 53.2%, 55.7%, and 45.5%, respectively. The soil pot experiment results demonstrated that, compared with the Cd-only treatment, the addition of 0.5 mg/kg Se significantly reduced Cd content in the stems, leaves, and fruits by 54.0%, 49.5%, and 21.2%, respectively, and significantly increased Se content in the roots, stems, and fruits by 85.8%, 59.2%, and 55.0%, respectively. Furthermore, this Se treatment also markedly enhanced the Ca and Fe content in the fruits by 96.1% and 65.9%, respectively. The addition of Se under Cd treatment reduced the translocation factors of Cd from roots to stems, stems to leaves, and stems to fruits in pepper plants. Furthermore, it decreased both the carcinogenic and non-carcinogenic risks associated with Cd in pepper fruits for adults and children. These findings indicate that Se application alleviates the physiological toxicity of Cd to pepper plants. Concurrently, it reduces Cd content and increases Se content in the fruits, thereby effectively enhancing fruit quality.

Key words: pepper; selenium; cadmium; uptake; transport

镉(Cd)是环境中毒性最强的重金属元素之一^[1],人体长期Cd暴露会导致呼吸功能受损、心血管紊乱、肾功能障碍、骨质疏松及癌症等疾病^[2]。受工业和农业活动影响,土壤Cd污染已成为中国重要的环境问题之一^[3]。据报道,每年进入农田的Cd约1 400 t,受Cd污染的耕地面积约有 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[4]。Cd在土壤中具有较强的迁移性,极易被作物根系吸收并转运到可食用部位^[5]。对于非吸烟群体,长期膳食摄入Cd污染的农产品是Cd暴露的首要途径^[6],且谷物和蔬菜是最主要的贡献者^[7]。

辣椒(*Capsicum annuum* L.)是茄科辣椒属植物,不仅味道鲜美,刺激食欲,帮助消化,且富含辣椒素、维生素C和蛋白质等人体必需营养元素。辣椒素是生物活性化合物,具有抗癌、抗氧化和抗炎等功效^[8]。辣椒是中国第2大蔬菜作物^[9],同时也是贵州省关键经济支柱产业。截至2023年,贵州省辣椒种植面积已达520 hm^2 ,约占全国的1/6,世界的1/10,年产量达 $7.70 \times 10^6 \text{ t}$,年产值超 3.00×10^{10} 元^[10]。然而辣椒对Cd的富集能力强于铜(Cu)、锌(Zn)、汞(Hg)等重金属^[11],比茄科作物中的番茄和茄子更容易在果实中积累Cd^[12]。在贵州等高镉(Cd)地质背景土壤中种植的辣椒,其果实镉含量常超出国家食品安全标准限值^[13],这既严重威胁人体健康,也影响辣椒品质与产业经济效益。因此,降低镉在辣椒果实中的累积,对保障公众健康、推动农业可持续发展意义重大。

硒(Se)是人类和动物体内的必需元素,它参与哺乳动物体内30多种含硒蛋白质和酶的组成,与抗癌、抗氧化和免疫功能等多种生物学功能密切相

关^[14]。对于植物,适宜浓度的Se具有促进生长、提高抗氧化能力、促进光合作用、减少活性氧(ROS)积累和脂质过氧化、延缓衰老等积极作用^[15]。大量研究表明,施用Se不仅能抑制作物对Cd的吸收,还能有效提高作物Se含量。如杨兴旺等^[16]发现叶面喷施硒肥能有效提高金黄金桃叶片发育质量、单株产量和单果重。Ding等^[17]试验发现,在含Cd营养液中加入0.8 mg/L Se可使水稻幼苗地上部Cd含量显著降低,同时使水稻幼苗中Se含量增加。Nie等^[18]通过向大蒜叶面喷施有机Se,结果发现Se对大蒜生物量有显著正影响,且大蒜各部位Se含量均有提升。尽管Se降低作物Cd累积的效应已被大量试验证实,但针对辣椒这一作物的相关研究仍鲜见报道。因此,本研究通过水培和盆栽试验,探究Se对辣椒不同组织中Cd累积及果实中Se累积的影响以及施用Se后辣椒果实中Cd对人体健康影响。以期为贵州等高Cd地质背景土壤地区辣椒的安全生产和种植富Se辣椒提供理论依据和实践新思路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试辣椒品种贵辣21种子购于贵州粒丰种业公司。所需试剂有氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{ H}_2\text{O}$)、亚硒酸钠(Na_2SeO_3)、次氯酸钠(NaClO)、高氯酸(HClO_4)、硝酸(HNO_3)、尿素 $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ 、硫酸钾(K_2SO_4)、过磷酸钙 $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$,其中 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{ H}_2\text{O}$ 、 NaClO 购自重庆川东化工(集团)有限公司, $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ 、 K_2SO_4 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

购自成都金山化学试剂有限公司, Na_2SeO_3 购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司, HClO_4 、 HNO_3 购自成都市科隆化学品有限公司。

1.2 水培试验

辣椒种子经 5% NaClO 溶液浸泡 15 min 后, 用去离子水反复冲洗干净, 均匀平铺在湿润的无菌纱布上, 连同纱布一同放入培养皿中, 在培养箱内萌发 7 d 后, 转移至装有石英砂的塑料容器, 采用 1/2 浓度 Hoagland 营养液 (pH 5.8) 继续培养 3 d。选取株高、叶片数一致的幼苗, 移栽至含完整营养液的塑料盆中预培养 3 d, 每盆定植 6 株。试验设置 5 个处理: 以不含 Cd 和 Se 的营养液培养为对照 (CK); 在含 $10 \mu\text{mol/L}$ Cd 的营养液中, 分别添加 $0 \mu\text{mol/L}$ 、 $0.5 \mu\text{mol/L}$ 、 $5.0 \mu\text{mol/L}$ 、 $25.0 \mu\text{mol/L}$ Se, 分别用 Cd、Cd+Se1、Cd+Se2、Cd+Se3 表示。各处理均设 3 次生物学重复, 每隔 3 d 更换一次营养液。处理 14 d 后, 将植株根系浸入 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 预冷的 20 mmol/L 乙二胺四乙酸二钠 (EDTA-Na_2) 溶液中浸泡 15 min, 随后用去离子水反复冲洗 5 次, 彻底去除根系表面吸附的金属离子, 然后将植株根、冠部分开收集, 先在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中杀青 15 min, 再于 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干至恒重, 检测根部干重和地上部干重。

为了检测 Cd 处理下 Se 处理不同时间辣椒幼苗各部位 Cd 含量, 本研究设置 2 个处理: 将辣椒幼苗暴露于含 $10 \mu\text{mol/L}$ Cd 的营养液中, 分别添加 $0 \mu\text{mol/L}$ Se 和 $25.0 \mu\text{mol/L}$ Se, 在处理 1 d、3 d、5 d、7 d 后, 收获辣椒根、茎、叶样品, 烘干后测定各组织 Cd 含量。

在含 $10 \mu\text{mol/L}$ Cd 的营养液中, 分别添加 $0 \mu\text{mol/L}$ 和 $25 \mu\text{mol/L}$ Se 处理, 14 d 后收获辣椒幼苗。根细胞壁镉及根细胞液镉含量的测定参照 Huang 等^[19]的方法: 取 0.2 g 鲜根, 放入离心管中液氮速冻, 然后在 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下冷冻干燥 12 h, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 离心 15 min , 所得上清液为细胞液部分, 沉淀为细胞壁部分, 沉淀部分依次用 70% 乙醇、超纯水、丙酮清洗 4 次, 随后在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干, 称量并消解, 取 $50 \mu\text{L}$ 消解液定容至 5 mL , 测定其 Cd 含量。木质部汁液镉含量的测定参照彭鸥等^[20]的方法, 用无菌刀片在茎基部上方约 4 cm 处切断茎秆, 为排除切口污染, 舍去初泌液, 将内置无菌脱脂棉的灭菌离心管倒扣并固定于切割处, 持续收集木质部汁液 12 h, 随后于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下以 $10 \text{ }000 \text{ g}$ 离心 10 min , 分离汁液,

测定其 Cd 含量。

1.3 全生育期盆栽试验

为进一步验证土培条件下 Se 对 Cd 在辣椒植株中累积的调控效应, 本研究开展全生育期盆栽试验, 供试土壤采集于贵州省贵阳市贵安新区, 在采样区域内采用五点采样法随机设置 5 个采样点, 各采集 $0\sim 20 \text{ cm}$ 表层土壤样品。将采集的土壤样品混匀后, 经自然风干、研磨处理, 过 2 mm 孔径筛, 备用。供试土壤基本理化性质测定结果如下: pH 5.56、阳离子交换量 18.6 cmol/kg 、有机质含量 22.4 g/kg 、总硒含量 1.69 mg/kg 、总钙含量 1.53 g/kg 、总镉含量 0.28 mg/kg 。试验采用聚乙烯栽培容器, 每盆装入备用土壤 4.5 kg , 外源添加 1 mg/kg Cd, 充分混匀后定量补充去离子水, 使土壤含水量维持在田间最大持水量的 60%, 进行为期 1 个月的钝化培养。钝化结束后, 每盆施入 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 K_2SO_4 作为基肥, N、P、K 含量分别为 100 mg/kg 、 80 mg/kg 、 50 mg/kg 。选取颗粒饱满、大小均匀的辣椒种子, 每盆播种 6 粒, 出苗后根据幼苗生长情况适当进行间苗, 每盆保留 3 株生长健壮、长势一致的幼苗。试验设置 2 个处理: Cd+Se 处理 (辣椒开花期外源添加 Se, 添加量 0.5 mg/kg) 和 Cd 处理 (仅添加 Cd, 不施 Se), 每个处理设置 3 次生物学重复。待辣椒果实完全成熟后, 整株采收, 将其拆解为根、茎、叶、果实 4 个组织部位。各组织样品先用自来水冲洗去除表面附着的土壤杂质, 再用去离子水二次冲洗, 最后用洁净滤纸吸干表面残留水分, 备用。

1.4 样品测定

将样品烘干研磨成粉末, 置于 25 mL 烧杯中, 按体积比 (V/V) 4 : 1 比例加入 8 mL 硝酸与 2 mL 高氯酸, 置于电热板上避光预浸 12 h 后消解, 使用 GGX-800 型原子吸收分光光度计 (北京海光仪器有限公司产品) 测定 Ca、Zn、Fe、Mg 含量。使用 NexION 2000 型电感耦合等离子体质谱仪 (珀金埃尔默股份有限公司产品) 测定 Cd、Se 含量。

1.5 转运系数和富集系数

Cd 从土壤到根部的富集用公式 (1) 计算。

$$BCF_{\text{根}} = C_{\text{根}} / C_{\text{土壤}} \quad (1)$$

其中, $BCF_{\text{根}}$ 表示 Cd 在辣椒根部的富集系数, $C_{\text{根}}$ 、 $C_{\text{土壤}}$ 分别表示根部和土壤中 Cd 的浓度。

Cd 从根到茎、茎到叶、茎到果实的转运用公式 (2) 计算。

$$TF_{i \rightarrow j} = C_j / C_i \quad (2)$$

其中, $TF_{i \rightarrow j}$ 表示 Cd 从组织 i 向组织 j 的转运系数, C 表示 Cd 在植物组织中的浓度。

1.6 健康风险评估模型

本研究采用美国环保署 (USEPA) 健康风险评估模型, 通过计算人体经口摄入重金属 Cd 的剂量来评估致癌及非致癌健康风险, 在经口暴露途径下, 成人和儿童的重金属暴露量用 ADD 表示, 计算模型见公式(3)至公式(5)^[21]:

$$ADD_i = \frac{C_i \times EF \times ED \times IR}{BW \times AT} \quad (3)$$

$$HQ_i = ADD_i / RfD_i \quad (4)$$

$$CR_i = ADD_i \times SF_i \quad (5)$$

式中 C_i 为辣椒中重金属的含量 (mg/kg), HQ 和 CR 分别表示单一重金属非致癌风险和致癌风险, 当 $HQ < 1$ 时, 表明其对人体健康风险较小或不存在明显风险, 当 $HQ > 1$ 时, 则存在非致癌风险, $HQ = 1$ 表示暴露水平恰好等于参考剂量; 当 $CR < 1 \times 10^{-6}$, 表示对人体无明显的致癌风险; 当 $1 \times 10^{-6} < CR < 1 \times 10^{-4}$, 表示可能存在致癌风险; 当 $CR \geq 1 \times 10^{-4}$, 则存在显著的致癌风险。 SF 为致癌风险斜率 [6.1 kg/(d · mg)]; RfD 为 Cd 暴露途径的参考剂量 [0.001 mg/(kg · d)], 其他参数含义、单位及参考值见表 1^[22-23]。

1.7 统计分析

试验数据采用 Excel 软件和 SPSS 26.0 软件进

行处理及统计分析, 通过 Duncan's 多重比较法在 0.05 水平对处理间差异显著性进行分析; 应用 Origin 软件绘制图表。

表 1 健康风险评估暴露参数

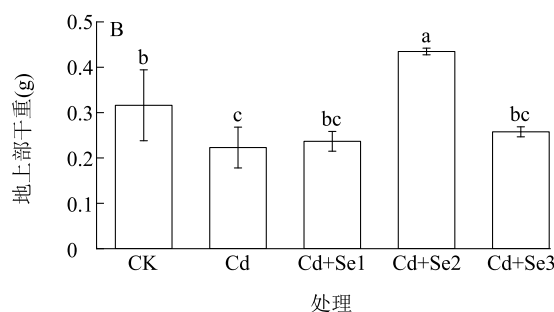
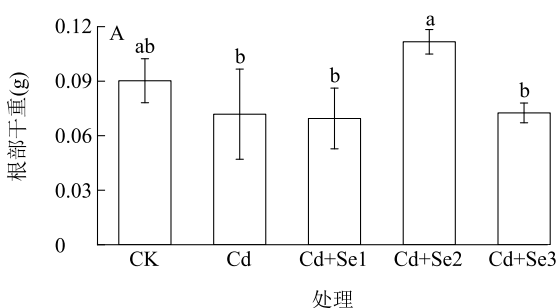
Table 1 Health risk assessment exposure parameters

参数	含义	单位	参考值	
			成人	儿童
EF	暴露频率	d/a	350	350
ED	暴露年限	a	24	6
IR	摄入量	mg/d	100	200
BW	平均体重	kg	59.0	20.5
AT	暴露时间	d	$ED \times 365$ (非致癌)	$ED \times 365$ (非致癌)
			70×365 (致癌)	70×365 (致癌)

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Se 对辣椒生物量的影响

从图 1 可见, 与对照 (CK) 相比, 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理辣椒地上部生物量显著下降, 降幅达 29.5%。与单一 Cd 处理相比, 添加 5.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理分别使辣椒根部和地上部生物量显著增加 55.5% 和 95.0%, 添加 0.5 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理和 25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理辣椒生物量无显著差异。



CK: 对照 (用 1/2 浓度 Hoagland 营养液培养); Cd 处理: 在含 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 的 1/2 浓度 Hoagland 营养液培养; Cd+Se1 处理: 在含 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 的 1/2 浓度 Hoagland 营养液中添加 0.5 $\mu\text{mol/L}$ Se 培养; Cd+Se2 处理: 在含 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 的 1/2 浓度 Hoagland 营养液中添加 5.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 培养; Cd+Se3 处理: 在含 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 的 1/2 浓度 Hoagland 营养液中添加 25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 培养。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 Cd 处理下不同浓度 Se 对辣椒生物量的影响

Fig.1 Effects of different selenium (Se) concentrations on biomass of pepper under cadmium treatment

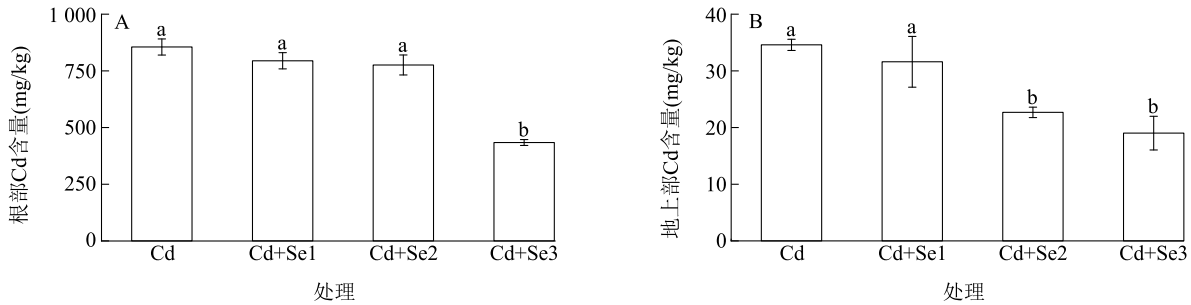
2.2 不同浓度 Se 对辣椒幼苗 Cd 累积量的影响

从图 2 可知, 与单一 Cd 处理相比, 添加 25.0

$\mu\text{mol/L}$ Se (Cd+Se3 处理) 使辣椒根部及地上部 Cd 含量分别显著降低 48.3% 和 45.0%; Cd+Se1 处理、

Cd+Se2 处理辣椒根部 Cd 含量与 Cd 处理无显著差异;Cd+Se1 处理辣椒地上部 Cd 含量与 Cd 处理无

显著差异,Cd+Se2 处理辣椒地上部 Cd 含量显著下降 34.4%。



A:不同浓度 Se 对辣椒根部 Cd 含量的影响;B:不同浓度 Se 对辣椒地上部 Cd 含量的影响。Cd、Cd+Se1、Cd+Se2、Cd+Se3 处理见图 1 注。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

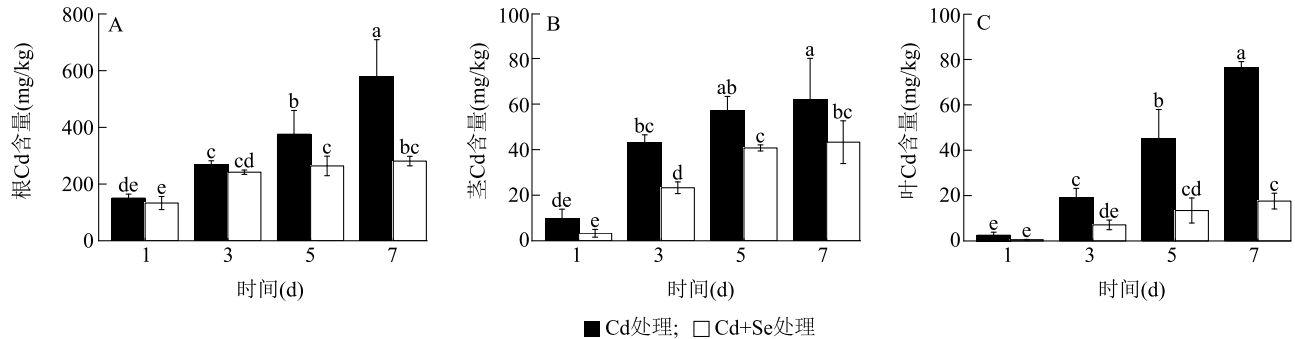
图 2 Cd 处理下不同浓度 Se 对 Cd 在辣椒中累积的影响

Fig.2 Effects of different selenium concentrations on cadmium accumulation in pepper under cadmium treatment

2.3 Se 处理时间对辣椒各部位 Cd 含量的影响

从图 3 可见,随着处理时间的延长,辣椒根、茎、叶中 Cd 含量均呈上升趋势。与单一 Cd 处理相比,添加 25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理 5 d、7 d,辣椒植株各部位

Cd 含量均下降,尤其是叶中 Cd 含量下降幅度大;添加 25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理第 3 d,辣椒茎和叶中 Cd 含量分别降低了 45.7% 和 63.2%,根中 Cd 含量无显著差异。



A:辣椒根部 Cd 含量;B:辣椒茎部 Cd 含量;C:辣椒叶片 Cd 含量。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Cd 处理:10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理;Cd+Se 处理:10 $\mu\text{mol/L}$ Cd+25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理。

图 3 Se 处理时间对辣椒各部位 Cd 含量的影响

Fig.3 Effects of selenium treatment duration on cadmium content in various parts of pepper

2.4 Se 处理对辣椒根细胞液、根细胞壁及木质部汁液中 Cd 含量的影响

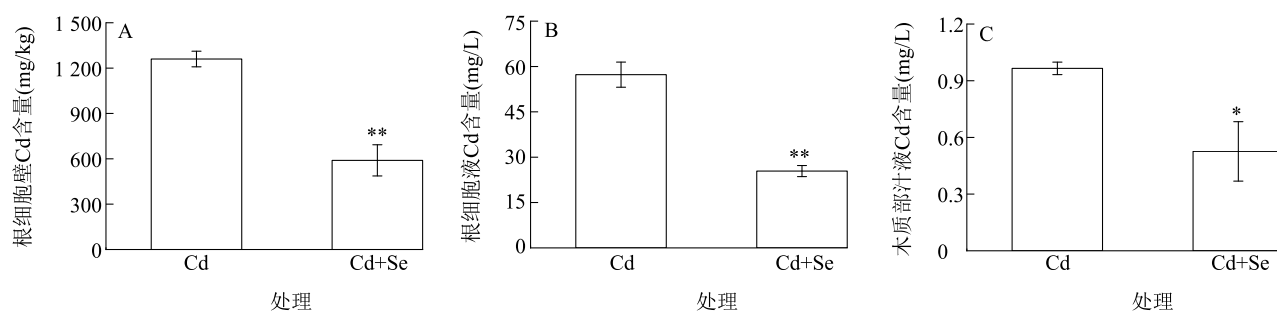
如图 4 所示,与单一 Cd 处理相比,添加 25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理使辣椒根细胞液、根细胞壁及木质部汁液中 Cd 含量分别显著下降 53.2%、55.7% 和 45.5%。

2.5 土培条件下 Se 对辣椒吸收转运 Cd、Se 的影响

2.5.1 Se 对辣椒吸收 Cd、Se 的影响 分析 Cd 处理下 Se 对辣椒中 Cd、Se 含量的影响,结果(图 5)显示,与单一 Cd 处理相比,施用 0.5 mg/kg Se 处理可显著降低辣椒茎、叶以及果实中 Cd 的含量,其降幅

分别为 54.0%、49.5%、21.2%(图 5A);施用 Se 处理可显著提高辣椒根、茎、果实中 Se 的含量,增幅分别为 85.8%、59.2%、55.0%(图 5B)。

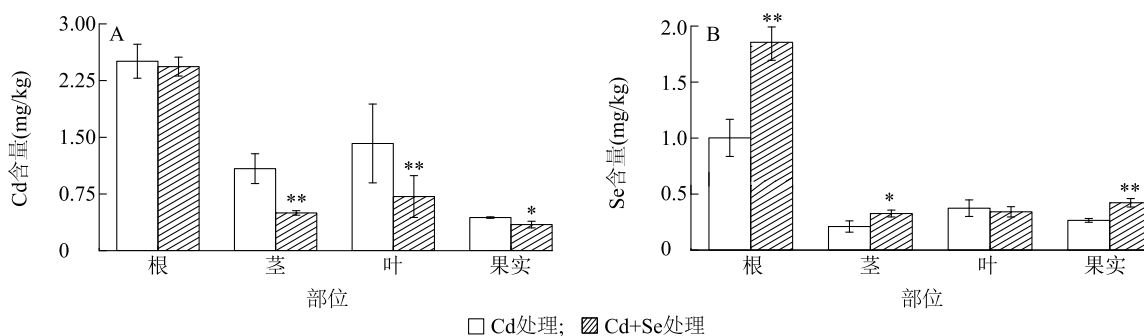
2.5.2 Se 对辣椒 Cd 和 Se 转运的影响 从表 2 可知,与单一 Cd 处理相比,添加 0.5 mg/kg Se 使辣椒根部对 Cd 的富集系数(BCF)下降 2.4%,且降低 Cd 从根到茎、茎到叶、茎到果实的转运,降幅分别为 53.5%、50.0%、22.0%。从表 3 可知,与单一 Cd 处理相比,添加 0.5 mg/kg Se 使辣椒根部对 Se 的富集系数上升 87.9%,且增加了辣椒各组织对 Se 的转运,其中根到茎、茎到果实的增幅分别为 61.1%、61.1%。



A: 辣椒根细胞壁 Cd 含量; B: 辣椒根细胞液 Cd 含量; C: 辣椒木质部汁液 Cd 含量。Cd 处理: 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd 处理; Cd+Se 处理: 10 $\mu\text{mol/L}$ Cd+25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理。图柱上 * 表示处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$); ** 表示处理间差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。

图 4 Se 对 Cd 处理下辣椒根细胞壁、根细胞液、木质部汁液中 Cd 含量的影响

Fig.4 Effects of selenium on cadmium content in the root cell wall, root cell sap, and xylem sap of pepper plants under cadmium treatment



A: Se 对辣椒各部位 Cd 累积的影响; B: Se 对辣椒各部位 Se 累积的影响。Cd 处理: 仅在土壤中外源添加 1 mg/kg Cd 处理; Cd+Se 处理: 除了在土壤中添加 Cd 处理, 辣椒开花期添加 0.5 mg/kg Se 处理。图柱上 * 表示辣椒同一部位 Cd+Se 处理与 Cd 处理相比差异达显著水平 ($P < 0.05$); ** 表示辣椒同一部位 Cd+Se 处理与 Cd 处理相比差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。

图 5 Cd 处理下 Se 处理对辣椒中 Cd、Se 含量的影响

Fig.5 Effects of selenium treatment on cadmium and selenium contents in pepper under cadmium treatment

表 2 外源 Se 对辣椒 Cd 转运系数的影响

Table 2 Effects of exogenous selenium on cadmium translocation factors in pepper

处理	$BCF_{\text{根}}$	$TF_{\text{根} \rightarrow \text{茎}}$	$TF_{\text{茎} \rightarrow \text{叶}}$	$TF_{\text{茎} \rightarrow \text{果实}}$
Cd	13.78 \pm 0.81	0.43 \pm 0.11	1.34 \pm 0.52	0.41 \pm 0.06
Cd+Se	13.45 \pm 1.51	0.20 \pm 0.15	0.67 \pm 0.27	0.32 \pm 0.07

Cd、Cd+Se 处理见图 5 注。 $BCF_{\text{根}}$: 表示 Cd 在辣椒根的富集系数; $TF_{\text{根} \rightarrow \text{茎}}$: 表示 Cd 从根向茎的转运系数; $TF_{\text{茎} \rightarrow \text{叶}}$: 表示 Cd 从茎向叶的转运系数; $TF_{\text{茎} \rightarrow \text{果实}}$: 表示 Cd 从茎向果实的转运系数。表中数据为平均值 \pm 标准差。

表 3 外源 Se 对辣椒 Se 转运系数的影响

Table 3 Effects of exogenous selenium on selenium translocation factors in pepper

处理	$BCF_{\text{根}}$	$TF_{\text{根} \rightarrow \text{茎}}$	$TF_{\text{茎} \rightarrow \text{叶}}$	$TF_{\text{茎} \rightarrow \text{果实}}$
Cd	0.58 \pm 0.08	0.18 \pm 0.04	1.71 \pm 0.49	1.31 \pm 0.32
Cd+Se	1.09 \pm 0.09	0.29 \pm 0.06	1.75 \pm 0.41	2.11 \pm 0.63

Cd、Cd+Se 处理见图 5 注。 $BCF_{\text{根}}$ 、 $TF_{\text{根} \rightarrow \text{茎}}$ 、 $TF_{\text{茎} \rightarrow \text{叶}}$ 、 $TF_{\text{茎} \rightarrow \text{果实}}$ 见表 2 注。表中数据为平均值 \pm 标准差。

2.6 Cd 处理下 Se 对辣椒植株各部位矿质元素含量的影响

从表 4 可见, 与单一 Cd 处理相比, 添加 0.5

mg/kg Se 处理使辣椒果实中 Ca、Fe 含量显著增加 96.1% 和 65.9%, 而 Mg 和 Zn 含量变化不显著; 叶片中 Mg 含量显著增加 32.8%, Fe、Zn 含量分别显

著下降 46.2% 和 49.1%; 茎中 Ca 含量显著增加 37.4%, Fe、Mg、Zn 含量的增加未达到显著水平; 根

中 Ca 的含量显著减少了 15.2%。

表 4 Cd 处理下 Se 对辣椒植株各部位钙、锌、铁、镁含量的影响

Table 4 Effects of selenium on the contents of calcium, zinc, iron and magnesium in different parts of pepper plants under cadmium treatment

组织	处理	Ca 含量 (mg/kg)	Fe 含量 (mg/kg)	Mg 含量 (mg/kg)	Zn 含量 (mg/kg)
根	Cd	5 432.68±362.45	4 471.66±399.32	365.66±31.00	65.91±3.69
	Cd+Se	4 604.53±314.96 *	4 616.06±304.64	323.97±38.86	81.66±18.36
茎	Cd	6 164.45±318.53	60.00±13.45	312.78±40.24	5.46±1.16
	Cd+Se	8 467.33±455.47 **	76.77±13.88	346.98±50.15	6.47±0.78
叶	Cd	5 073.30±264.88	186.40±33.66	232.98±27.67	27.57±4.36
	Cd+Se	6 195.02±974.73	100.37±36.30 *	309.52±9.39 *	14.03±4.83 *
果实	Cd	62.24±14.07	5.08±1.25	110.10±2.03	9.27±1.08
	Cd+Se	122.03±10.76 **	8.43±0.49 *	107.47±11.13	10.45±0.90

Cd、Cd+Se 处理见图 5 注。表中数据为平均值±标准差。* 表示同一组织 Cd+Se 处理与 Cd 处理之间差异显著 ($P<0.05$); ** 表示同一组织 Cd+Se 处理与 Cd 处理之间差异极显著 ($P<0.01$)。

2.7 Se 对辣椒果实中 Cd 健康风险评估结果的影响

添加 0.5 mg/kg Se 对辣椒果实中 Cd 摄入风险指数的影响如表 5 所示。从表 5 可知, 无论是否添加 Se 处理, 成人和儿童单一重金属 Cd 非致癌风险 (HQ) 值均小于 1, 表明本研究中经口暴露途径的 Cd 含量对人体不会造成非致癌风险, 然而单一重金属 Cd 致癌风险 (CR) 值处于 $1\times 10^{-6} \sim 1\times 10^{-4}$ 区间, 表明存在致癌风险, 且儿童受到的风险高于成人, 表明儿童比成人对 Cd 的敏感性更高。相较于单一 Cd 处理, 添加 Se 处理后分别使成人和儿童的致癌和非致癌风险降低, 表明 Se 能有效缓解 Cd 引起的健康隐患。

表 5 辣椒果实中 Cd 摄入风险

Table 5 Cadmium intake risk from pepper fruits

处理	HQ		CR	
	成人	儿童	成人	儿童
Cd	0.017 8	0.123	4.47×10^{-5}	6.44×10^{-5}
Cd+Se	0.016 8	0.097	3.52×10^{-5}	5.07×10^{-5}

Cd、Cd+Se 处理见图 5 注。HQ 表示重金属 Cd 非致癌风险; CR 表示重金属 Cd 致癌风险。

3 讨论

3.1 Se 对 Cd 处理下辣椒生长的影响

Cd 是植物生长的非必需元素, 在植物体内积累超过一定阈值时, 会导致叶片黄化、生物量降低、生长迟缓甚至死亡等危害^[24]。本研究结果显示, 与对

照 (CK) 相比, 单一 Cd 处理显著降低了辣椒地上部干重; 在 Cd 处理下添加 5.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 可有效缓解 Cd 对辣椒生长的抑制作用, 这与 Zembala 等^[25] 在小麦、Jin 等^[26] 在玉米上的研究结论一致。不过, 高浓度 Se 会抑制西葫芦幼苗生长^[27], 并降低小白菜幼苗鲜重^[28], 这体现了 Se 对植物生长的“低促高抑”剂量效应。已有研究表明, Se 可影响植物体内酶的活性及抗氧化剂的组成^[29]。因此, 本研究中在 Cd 处理下添加 Se 对辣椒生长的促进作用, 可能是通过调控植物体内酶活性和抗氧化剂组成, 增强植株的抗氧化能力, 从而缓解 Cd 对辣椒的毒性。

3.2 Se 对 Cd 处理下辣椒 Cd 含量的影响

水培试验中, 与单一 Cd 处理相比, 添加 25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 使辣椒幼苗根部 Cd 含量显著下降, 添加 5.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 和 25.0 $\mu\text{mol/L}$ Se 使辣椒幼苗地上部 Cd 含量显著下降。随着处理时间的延长, 辣椒根、茎、叶中 Cd 含量均呈上升趋势。与单一 Cd 处理相比, 添加 Se 处理后, 处理 5 d、7 d 辣椒植株各部位 Cd 含量均出现不同程度降低, 尤其是叶中 Cd 含量下降幅度较大。同时添加 Se 处理显著降低了辣椒根细胞壁、根细胞液及木质部汁液中 Cd 含量。盆栽试验结果同样表明, 添加 Se 显著降低了辣椒茎、叶、果实中 Cd 的累积, 抑制辣椒根系对 Cd 的吸收, 从而降低 Cd 向地上部转运, 因此辣椒果实中 Cd 的累积量也相应降低, 这与前人的研究结果一致, 例如, Wang 等^[30] 发现在 Cd 暴露 48 h 后, 与单一 Cd

处理相比,添加 Se 使小麦和水稻根部及地上部 Cd 含量均下降;Xu 等^[31]研究发现,在 Cd 胁迫下,外源施 Se 可显著抑制水稻幼苗对镉的吸收与转运,降低根部和地上部 Cd 含量;熊仕娟等^[32]采用盆栽试验,在土壤 Cd 污染条件下测定不同外源 Se 处理对黄瓜的影响,结果发现,叶面喷施 Se 可显著增加黄瓜生物量,促进黄瓜生长,降低 Cd 含量。本研究中添加 Se 可以减轻 Cd 在辣椒中累积,这种抑制作用可能归因于 Se 降低了辣椒根细胞壁和细胞液中 Cd 含量。相关研究结果表明,Cd 主要存在于细胞壁和细胞液中,且植物细胞壁多糖基质通过其丰富的羟基(-OH)、羧基(-COOH)等活性官能团,与 Cd²⁺形成稳定配位络合物,可显著降低 Cd 的生物有效性^[33]。此外,Se 通过激活液泡区隔化,抑制 Cd 的跨膜运输,从而降低 Cd 在植物体中的含量^[34]。Cd 从植物根部向地上部的转运主要依赖木质部运输过程^[35]。本研究发现,在 Cd 处理下添加 Se 可显著降低辣椒木质部中 Cd 的含量,说明 Se 还通过影响木质部对 Cd 的运输,从而降低辣椒地上部对 Cd 的积累。另外,添加 Se 还提高了辣椒各部位对 Ca、Mg、Fe、Zn 等营养元素的积累,而 Cd 的吸收和转运依赖于其他金属离子通道,特别是与 Cd 同价的 Ca、Mg、Fe、Zn、Cu、Mn 等金属离子转运通道,Cd 与这些营养素竞争转运蛋白或离子通道^[36],从而使辣椒组织中 Cd 含量降低。Se 还能通过调控作物 Cd 吸收和转运基因的表达水平来影响作物 Cd 的含量^[37]。如 Se 处理可下调水稻 *OsNRAMP1*^[38]、*OsLCT1*^[39]、*OsNramp5*^[40] 等转运基因的表达,还可以促进植物根系中凯氏带(CS)形成,抑制胼胝质的沉积,从而阻碍 Cd 的吸收和转运^[41]。同时,本研究中,在 Cd 处理下施用 Se 增加了辣椒果实中 Se 的含量,促进了根系对 Se 的吸收和向果实的转运。张立等^[42]的研究结果表明,亚硒酸盐处理能显著提高油菜地上部 Se 含量。Jiang 等^[43]的试验结果也证实,向黄瓜叶片喷施 Se 可显著增加黄瓜的生物量和 Se 含量。

3.3 外源添加 Se 降低辣椒果实中 Cd 暴露风险

本研究中辣椒经口暴露的 Cd 含量对成人和儿童的人体健康不会造成非致癌风险,但存在致癌风险,且儿童受到的风险高于成人,儿童致癌风险更高可能与其单位体重摄入量更大、手口活动导致的非膳食暴露更多等因素有关^[22]。在 Cd 处理下施用 0.5 mg/kg Se 减小了健康风险系数值,则可能与 Se

和 Cd 的拮抗作用导致 Cd 在辣椒组织中的含量下降有关。此外,本研究为盆栽试验,所得的结果可能受限于特定的环境条件(如盆土体积、水分调控、光照和温度等),建议后续结合田间试验,进一步评估结论的普适性和应用价值。

4 结论

水培试验结果证实,与单一 Cd 处理相比,外源添加 5.0 μmol/L Se 可显著缓解 Cd 对辣椒幼苗生长的抑制效应,使根部和地上部生物量分别显著增加 55.5% 和 95.0%,明确该浓度为缓解辣椒 Cd 毒害、促进生长的适宜 Se 浓度。25.0 μmol/L Se 处理可显著降低辣椒幼苗根部和地上部 Cd 含量,降幅分别达 48.3% 和 45.0%,且能同步降低根细胞壁、根细胞液及木质部汁液中 Cd 含量;盆栽试验进一步验证,在 Cd 处理下辣椒开花期添加 0.5 mg/kg Se,可使成熟期茎、叶、果实 Cd 含量分别显著下降 54.0%、49.5%、21.2%,同时果实 Se 含量显著提升 55.0%,且果实中 Ca、Fe 含量显著增加,实现了 Cd 含量降低与品质提升的双重效应。盆栽试验结果表明,在 Cd 处理下添加 Se 可降低辣椒根→茎、茎→叶、茎→果实的 Cd 转运系数,抑制 Cd 向地上部及果实的迁移;膳食风险评估结果显示,在 Cd 处理下添加 0.5 mg/kg Se 可使成人和儿童通过食用辣椒果实的 Cd 致癌风险和非致癌风险下降,有效降低 Cd 膳食暴露风险。

参考文献:

- [1] HU Y, NORTON G J, DUAN G, et al. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants[J]. *Plant and Soil*, 2014, 384(1/2): 131-140.
- [2] GUAN M, XIA Y, ZHANG W, et al. A review of reducing cadmium pollution in the rice-soil system in China[J]. *Foods*, 2025, 14(10): 1747.
- [3] WANG P, CHEN H, KOPITKE P M, et al. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 1038-1048.
- [4] ZOU M M, ZHOU S L, ZHOU Y J, et al. Cadmium pollution of soil-rice ecosystems in rice cultivation dominated regions in China: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280: 116965.
- [5] XUE S G, SHI L I, WU C, et al. Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human HEPG2 and keratinocyte cell-lines [J]. *Environmental Research*, 2017, 156: 23-30.

- [6] ZHAO F J, TANG Z, SONG J J, et al. Toxic metals and metalloids; uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food[J]. *Molecular Plant*, 2022, 15(1): 27-44.
- [7] SONG Y, WANG Y, MAO W, et al. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population [J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): 0177978.
- [8] ZHOU L Q, LIU W Z. Pollution of four heavy metal elements in dried chili peppers in Guizhou Province and its health risk assessment[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 17759.
- [9] 侯思皓, 巩雪峰, 许艺, 等. 辣椒炭疽病菌鉴定及炭疽菌胁迫下的生理变化[J]. *西南农业学报*, 2024, 37(10): 1-11.
- [10] LIANG C, XING D, HE J, et al. Correlation analysis of soil nutrients and quality index in pepper planting areas [J]. *Agronomy*, 2024, 14(12): 2752.
- [11] 张建, 杨瑞东, 陈蓉, 等. 贵州喀斯特地区土壤-辣椒体系重金属元素的生物迁移积累特征[J]. *食品科学*, 2017, 38(21): 175-181.
- [12] ANGELOVA V R, BABRIKOV T D, IVANOV K I. Bioaccumulation and distribution of lead, zinc, and cadmium in crops of Solanaceae family [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40(13/14): 2248-2263.
- [13] 彭秋, 李桃, 徐卫红, 等. 不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3347-3354.
- [14] HUANG B, XIN J, DAI H, et al. Effects of interaction between cadmium (Cd) and selenium (Se) on grain yield and Cd and Se accumulation in a hybrid rice (*Oryza sativa*) system [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(43): 9537-9546.
- [15] LIN L, ZHOU W, DAI H, et al. Selenium reduces Cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235/236: 343-351.
- [16] 杨兴旺, 王志强, 段晨磊, 等. 两种叶面肥对金黄色桃果实品质和挥发性风味物质影响的初探[J]. *果树学报*, 2025, 42(5): 1-14.
- [17] DING Y, FENG R, WANG R, et al. A dual effect of Se on Cd toxicity: evidence from plant growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice [J]. *Plant and Soil*, 2013, 375(1/2): 289-301.
- [18] NIE X, LUO D, MA H, et al. Different effects of Selenium speciation on selenium absorption, selenium transformation and cadmium antagonism in garlic [J]. *Food Chemistry*, 2024, 443: 138460.
- [19] HUANG X Y, DENG F L, YAMAJI N, et al. A heavy metal P-type ATPase *OshMA4* prevents Copper accumulation in rice grain [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12138.
- [20] 彭鸥, 李丹阳, 刘寿涛, 等. 镉胁迫对水稻生长发育的影响及伤流液与稻米镉含量的相关性研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(1): 76-82.
- [21] 张仁甫, 刘超琦, 张语馨, 等. 岩溶地质高背景区农田土壤重金属污染特征、风险评价与来源解析研究[J]. *环境科学学报*, 2025, 45(2): 268-280.
- [22] 祁浩, 庄坚, 庄重, 等. 不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2023, 44(6): 3600-3608.
- [23] 牛浩泽, 张超, 贺峰, 等. 陕西秦岭矿区农田土壤和作物重金属污染特征及健康风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(4): 1-23.
- [24] 潘攀, 刘贝贝, 范成五, 等. 不同品种辣椒镉积累特性与生理抗性和镉亚细胞分布关系[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(3): 623-631.
- [25] ZEMBALA M, FILEK M, WALAS S, et al. Effect of selenium on macro- and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress [J]. *Plant and Soil*, 2010, 329(1/2): 457-468.
- [26] JIN W, CHENG L, LIU C, et al. Cadmium negatively affects the growth and physiological status and the alleviation effects by exogenous selenium in silage maize (*Zea mays* L.) [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2024, 31(14): 21646-21658.
- [27] 郭锋, 吴伟锋, 冯瑜, 等. 硒镉交互作用对西葫芦幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(10): 2335-2342.
- [28] JIA K, ZHAN Z, WANG B, et al. Exogenous selenium enhances cadmium stress tolerance by improving physiological characteristics of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) Seedlings [J]. *Horticulturae*, 2023, 9(9): 1016.
- [29] W S G, ERIK R, NADEEM K, et al. Selenocysteine confers resistance to inactivation by oxidation in thioredoxin reductase: comparison of selenium and sulfur enzymes [J]. *Biochemistry*, 2013, 52(32): 5472-5481.
- [30] WANG K, LINGHU J, KONG L, et al. Comparative responses of Cadmium accumulation and subcellular distribution in wheat and rice supplied with selenite or selenate [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(33): 45075-45086.
- [31] XU H Z, YAN J P, QIN Y, et al. Effect of different forms of selenium on the physiological response and the cadmium uptake by rice under cadmium stress [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(19): 6991.
- [32] 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 286-294.
- [33] WU Z, LIU S, ZHAO J, et al. Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 133: 1-11.
- [34] LI Y, RAHMAN S U, QIU Z, et al. Toxic effects of cadmium on the physiological and biochemical attributes of plants, and phytoremediation strategies: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2023, 325: 121433.
- [35] WANYUE Z, MEIYAN G, MINGXUE C, et al. Mutation of *OsNRAMP5* reduces cadmium xylem and phloem transport in rice plants and its physiological mechanism [J]. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 2023, 341: 122928.

- [36] XIE Y, SU L, HE Z, et al. Selenium inhibits cadmium absorption and improves yield and quality of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) under cadmium stress[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(2):1-9.
- [37] CUI J, LIU T, LI Y, et al. Selenium reduces cadmium uptake into rice suspension cells by regulating the expression of lignin synthesis and cadmium-related genes[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644:602-610.
- [38] RYUICHI T, YASUHIRO I, TAKESHI S, et al. The OsNRAMP1 iron transporter is involved in Cd accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(14):4843-4850.
- [39] SHIMPEI U, TAKEHIRO K, TAKUYA S, et al. Low-affinity cation transporter (OsLCT1) regulates cadmium transport into rice grains[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 8(52):20959-20964.
- [40] AKIMASA S, NAOKI Y, KENGO Y, et al. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. The Plant Cell, 2012, 24(5):2155-2167.
- [41] WANG L Z, WU K Y, LIU Z Q, et al. Selenite reduced uptake/translocation of cadmium via regulation of assemblies and interactions of pectins, hemicelluloses, lignins, callose and Casparian strips in rice roots[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 448:130812.
- [42] 张 立,王 杰. 不同硒形态对镉胁迫下油菜镉亚细胞分布、化学形态及硒累积的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17):259-264.
- [43] JIANG P P, LIU J, CHEN M H, et al. Exogenous selenium improves the physiological resistance of cucumber to cadmium stress[J]. Toxicological and Environmental Chemistry, 2020, 102(9):455-472.

(责任编辑:黄克玲)