

叶面喷施微生物合成纳米硒对水稻硒镉吸收的影响

何建勇, 覃惠松, 蒋代华, 黄雪娇, 李春秀, 王怡桢, 黄智刚, 朱正杰

引用本文:

何建勇, 覃惠松, 蒋代华, 黄雪娇, 李春秀, 王怡桢, 黄智刚, 朱正杰. 叶面喷施微生物合成纳米硒对水稻硒镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2398–2409.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0372>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同水分条件下水稻对硒的吸收与转运

狄雪荣, 管远清, 丁永祯, 张克强, 戴礼洪, 冯人伟, 王瑞刚, 李道贤

农业环境科学学报. 2019, 38(10): 2263–2269 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0169>

叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响

高敏, 周俊, 刘海龙, 胡远妹, 徐磊, 梁家妮, 黄贵凤, 周静

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 215–222 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1201>

不同形态硫对水稻吸收积累镉的影响

刘颖, 苏广权, 郭湘, 杨燕花, 姚爱军, 仇荣亮, 汤叶涛

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1208–1218 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1164>

亚硒酸盐对旱稻吸收、转运砷及其氧化性胁迫的影响研究

殷行行, 郑向群, 丁永祯, 冯人伟, 师荣光, 成卫民, 陈趾圳

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 817–825 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0285>

硒砷交互作用对水稻幼苗生理特性及砷硒累积的影响

刘锦嫦, 熊双莲, 马烁, 高菲, 涂书新

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 423–430 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1157>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

何建勇, 覃惠松, 蒋代华, 等. 叶面喷施微生物合成纳米硒对水稻硒镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2398–2409.

HE J Y, QIN H S, JIANG D H, et al. Effects of nano-selenium synthesized by microorganisms sprayed on leaf surfaces on cadmium selenide absorption in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(11): 2398–2409.

叶面喷施微生物合成纳米硒对水稻硒镉吸收的影响

何建勇¹, 覃惠松¹, 蒋代华^{1*}, 黄雪娇¹, 李春秀¹, 王怡桢¹, 黄智刚¹, 朱正杰²

(1. 广西大学农学院, 广西农业环境与农产品安全重点实验室, 南宁 530000; 2. 百色学院, 广西 百色 533000)

摘要:为探讨喷施微生物合成纳米Se(B)对水稻Se、Cd吸收的影响与籽粒富Se降Cd的效果,本研究通过盆栽试验,研究微生物合成SeNPs喷施5(B5)、10(B10)、20(B20) mg·L⁻¹对水稻Se、Cd吸收、转运效应,以及无机Se(S)、有机Se(M)喷施对比,比较水稻籽粒富Se降Cd效果。结果表明,与不喷Se(CK)、S、M处理相比,B5、B10、B20处理提高籽粒Se含量分别为227.52%~366.46%、3.38%~23.31%、30.54%~42.57%,降低籽粒Cd含量分别为10.14%~55.07%、4.08%~36.37%、9.03%~40.77%,籽粒富Se降Cd效果表现为B>S>M>CK,B处理中,籽粒富Se降Cd效果以喷施20 mg·L⁻¹浓度最佳,高Se与低Se水稻品种间对Se、Cd吸收差异不显著。与CK处理相比,B处理促进了水稻叶片中Cd在细胞壁、液泡组分中的积累,减少了叶绿体、线粒体组分中的积累,促进了叶片中Se在细胞壁、叶绿体组分中的积累,减少了线粒体、液泡组分中的积累。主成分分析和Pearson相关矩阵表明,水稻各部位Se与Cd含量呈负相关关系($P<0.01$)。与CK、M处理相比,B处理对水稻Se生物富集系数分别提高20.63%~264.70%、20.37%~32.86%,表现为S>B>M>CK,B5、B10、B20处理对水稻Cd富集系数分别降低9.10%~25.10%、5.70%~9.65%、10.64%~22.10%,表现为CK>M>S>B。供试水稻Se转移系数表现为根-茎<茎-籽粒<茎-叶,Cd转移系数表现为根-茎<茎-叶<茎-籽粒,与CK、S、M处理相比,B处理均促进了Se向籽粒的转移,减少了Cd向籽粒的富集。与CK、S、M处理相比,B处理均显著提高了水稻叶片SOD、CAT、POD、APX、PAL、Pro、GSH含量,降低了MDA、H₂O₂的含量,高Se水稻品种(泰丰优208)对提高水稻抗氧化酶活性与抗氧化性物质含量效果高于低Se水稻品种(桂野丰)。因此,叶面喷施微生物合成SeNPs在调控水稻Se、Cd吸收、转运与籽粒富Se降Cd方面有着更显著的优势。

关键词:微生物合成纳米硒;硒;镉;无机硒;有机硒;水稻

中图分类号:X53;S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)11-2398-12 doi:10.11654/jaes.2023-0372

Effects of nano-selenium synthesized by microorganisms sprayed on leaf surfaces on cadmium selenide absorption in rice

HE Jianyong¹, QIN Huisong¹, JIANG Daihua^{1*}, HUANG Xuejiao¹, LI Chunxiu¹, WANG Yizhen¹, HUANG Zhigang¹, ZHU Zhengjie²

(1. Guangxi Key Laboratory of Agricultural Environment and Agricultural Product Safety, School of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530000, China; 2. School of Baise, Baise 533000, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of microbial synthesis of nano-Se (B) on the absorption of cadmium selenide in rice and grain enrichment of Se on Cd reduction. The effects of microbial synthesis SeNPs sprayed with 5(B5), 10(B10), and 20(B20) mg·L⁻¹ on the absorption and transport of cadmium selenide in rice were studied through a pot experiment. Further, the effects of Se enrichment

收稿日期:2023-05-12 录用日期:2023-08-16

作者简介:何建勇(1999—),男,重庆彭水人,硕士研究生,从事土壤学研究。E-mail:2581915896@qq.com

*通信作者:蒋代华 E-mail:dhjiang2008@gxu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金地区合作与交流项目(41967006);广西自然科学基金重点项目(2018GXNSFDA281035);巴马县人才科技计划项目(20220031);广西农业环境与农产品安全重点实验室2023年度开放基金(GKLAEAPS2023-05)

Project supported: The Funds for International Cooperation of the National Natural Science Foundation of China(41967006); Key Program of the Natural Science Foundation of Guangxi, China (2018GXNSFDA281035); Bama County Talent Science and Technology Program (20220031); Key Laboratory for Agricultural Environment and Agricultural Product Safety of Guangxi, China(GKLAEAPS2023-05)

and Cd reduction on rice grains with inorganic Se (S) and organic Se (M) spray were compared. Compared with no Se (CK), S, and M treatments, B5, B10, B20 treatment increased Se content by 227.52%–366.46%, 3.38%–23.31%, and 30.54%–42.57%, and decreased Cd content by 10.14%–55.07%, 4.08%–36.37%, and 9.03%–40.77%, respectively. The effect of Se enrichment on Cd reduction was in the order B>S>M>CK. In B treatment, the best effect of Se enrichment on Cd reduction was observed with a 20 mg·L⁻¹ spray. Further, no significant difference in Se and Cd absorption between high- and low-Se rice varieties was observed. Compared with CK treatment, B treatment promoted the accumulation of Cd in cell wall and vacuole components, reduced the accumulation of chloroplast and mitochondrial components, promoted the accumulation of Se in cell wall and chloroplast components, and reduced the accumulation of mitochondria and vacuole components in rice leaves. The principal component analysis and Pearson correlation matrix showed a negative correlation between Se and Cd content in each part of rice ($P\leq 0.01$). Compared with CK, M treatments, the bio-enrichment coefficients of Se in B treatment were increased by 20.63%–264.70%, 20.37%–32.86%, respectively, in the order S>B>M>CK. CK and B5, B10, B20 treatments reduced the Cd enrichment coefficients of rice by 9.10%–25.10%, 5.70%–9.65%, and 10.64%–22.10%, respectively, in the order CK>M>S>B. The Se transfer coefficient of rice was in the order root–stem<stem–grain<stem–leaf, whereas the Cd transfer coefficient was in the order root–stem<stem–leaf<stem–grain. Compared with CK, S, and M treatments, B treatment promoted the transfer of Se and reduced the enrichment of Cd in grain. Compared with CK, S, and M treatments, B treatments significantly increased the contents of SOD, CAT, POD, APX, PAL, Pro, and GSH in rice leaves and decreased the contents of MDA and H₂O₂. The effect of high-Se rice varieties (Tai Fengyou 208) on improving the activity of antioxidant enzymes and the content of antioxidant substances in rice leaves was higher than that of low-Se rice varieties (Gui Yefeng). Therefore, SeNPs synthesized by microorganisms sprayed on the leaf surface have more significant advantages in regulating the absorption and transport of Se and Cd in rice, enriching Se, and reducing Cd in grain.

Keywords: microbial synthesis of nano-Se; selenium; cadmium; inorganic selenium; organic selenium; rice

重金属Cd广泛分布在各种环境系统中^[1],且已被国际癌症研究机构(IARC)视为一种确定的人类致癌物^[2],其在土壤中移动性强,活性高,易被植物吸收,并通过食物链进入人体^[3],严重威胁身体健康^[4–5],因此,在重金属污染农用地上生产安全可食用农产品具有重要现实意义。

近年来,水稻富Se相关产品不断发展,水稻对Se的吸收,不仅改善了水稻生长状况,同时在重金属修复方面也得到提高。利用Se调节水稻生长以及Cd含量吸收等方面已得到广泛研究^[6],Se调控水稻Cd吸收转运成为当前的一个研究热点。相关研究表明,叶面喷Se能够降低水稻对Cd的吸收和危害,Cd在植株体内会导致植株叶绿素的合成减少,膜质过氧化,促进植株产生活性氧,使植株处于氧化应激状态^[7–11],而植株对Se的吸收,可以促进叶绿素的合成、抗氧化酶系统的合成,抵抗氧化应激胁迫^[12–14]。另一方面,Se会抑制Cd在植物体内的转运,减少向植物生殖器官的移动,Se可以通过抑制*OsLCT1*、*OsNramp5*、*OsNramp1*、*OsIRT1*和*OsIRT2*的表达来阻断Cd进入细胞,激活*OsHMA3*的表达,并将Cd螯合到液泡中^[15];在Cd胁迫下,研究发现,叶面施用亚Se酸盐后油菜*IRT1*、*HMA2*、*HMA3*和*HMA4*的表达水平显著增加,同时根和茎中Cd含量增加,表明Se可以调控一些与Cd的吸

收、转运和定位相关的基因,以减轻与植物物种相关的Cd毒性^[16]。Se还可以增加抗氧化剂的水平,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽还原酶和谷胱甘肽(GSH),从而抑制Cd在植物中的转运^[17]。值得注意的是,在重金属与Se的共同作用下,植物抗氧化能力提高,并形成一些复合物,这些复合物一般溶解度较低^[18]。进而有学者发现,Se能作为重金属的解毒剂,Se、重金属和蛋白质形成了大分子可溶性蛋白复合物,从植物中排出以阻碍或降低重金属的毒性^[19]。

不同类型Se喷施对水稻Se吸收和生长有不同的反应。根据Se的组成及制备方式可将Se划分为无机Se、有机Se、纳米Se(SeNPs)三类^[20],其中,SeNPs较无机Se、有机Se有高安全、高活性、低毒性的优势,已成为广泛研究的对象,SeNPs根据制备方式可以分为物理、化学、生物合成SeNPs^[21–22],研究发现,叶面喷施有机Se(SeMet)、无机Se(Na_2SeO_3 、 Na_2SeO_4)、化学SeNPs后,化学SeNPs喷施对籽粒Se富集作用相对较弱^[23],而喷施生物合成SeNPs后,生物合成SeNPs对籽粒Se富集效果高于有机Se^[24],反映了生物合成SeNPs对作物Se富集作用更有效。但就生物合成SeNPs而言,作为外源Se使用在调控作物Cd吸收方面的研究甚少,在水稻应用方面鲜见报道。因此,本研究以前期课题

组筛选的一株耐 Se 还原菌 (*Proteus penneri* strain) 进行微生物 SeNPs 制备, 其为球形, 直径 274.9 ± 13.2 nm, 表面含有有机残基^[25], 用其作为叶面喷施调理剂, 通过水稻盆栽试验, 分析该微生物合成 SeNPs 对水稻各个部位 Se、Cd 含量的影响, 并且对水稻籽粒富 Se 降 Cd 效果与机理进行分析, 旨在为微生物合成 SeNPs 在水稻籽粒富 Se 降 Cd 应用上提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验地位于广西大学农学院温室大棚 ($22^{\circ}51'9''$ N, $108^{\circ}17'29''$ E), 试验土取自广西大学的一处水稻田表层土, 其基本理化性质如下: pH 6.88, 有机质 $24.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $3.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $156.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $27.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $102.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总 Se $0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效 Se $0.041 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总 Cd $0.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验菌株: 彭氏变形杆菌 (*Proteus penneri* strain) 由本课题组前期研究筛选获得, 其基本特性详见本课题组前期文章^[25]。

试验作物: 泰丰优 208 (高 Se 水稻品种)、桂野丰 (低 Se 水稻品种)。

1.2 微生物合成 Se 纳米颗粒 (LAB-1-SeNPs) 制备

取活化后的菌株, 置于含 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{SeO}_3$ 的 LB 液体培养基中培养 48 h 进行 Se 的还原, 然后对还原 Se 产物进行提纯分离来获得微生物合成单质 Se 纳米 Se 颗粒, 具体操作为: 把还原 Se 产物在 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min, 用 0.9% 的 NaCl 清洗 3 次, 用无菌水重悬。将液体置于超声破碎仪中 (100 W, 破碎 5 s, 间隔 5 s, 30 min) 对菌体进行破碎。破碎后的菌液使用 SDS 含量为 1% 的 Tris/HCl 缓冲液 ($1.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH=8.3) 清洗 3 次, 再次用离子水清洗 3 次重悬。按照重悬液: 正辛醇体积比 2:1 的比例加入正辛醇, 充分混匀, 于 $2\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下离心 5 min, 于 4°C 保存 24 h 沉淀纳米 Se。24 h 后, 将沉淀的 SeNPs 经过甲醇、无水乙醇、去离子水清洗, 4°C 保存。该纳米 Se 提纯物将用于后续的盆栽试验作为喷施纳米 Se 处理。

1.3 试验设计

试验设置两个水稻品种, 每个品种设计 3 种 Se 处理, 分别为微生物合成 SeNPs (LAB-1-SeNPs, B)、亚硒酸钠 (Na_2SeO_3 , S)、硒代蛋氨酸 (SeMet, M); 每个 Se 处理设置 3 种水平, 分别为 5、10、20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 以不添加任何外源 Se 作为空白对照, 每个处理重复 3 次, 总计 $(2 \times 3 \times 3 + 2) \times 3 = 60$ 盆。

每盆装 10 kg 风干过 5 mm 筛的水稻土, 后添加基肥, 尿素 $0.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 磷酸二氢钾 $0.288 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 氯化钾 $0.159 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 加水平衡一周后插秧。取长势一致的成熟幼苗 (三叶一心期) 进行移栽, 每盆种植 3 穴, 每穴 3 株。分别在分蘖盛期、灌浆期各喷施一次。

1.4 水稻叶片 MDA、 H_2O_2 含量、抗氧化物性质及抗氧化酶活性指标测定

样品取自水稻孕穗期不同处理的叶片, 用去离子水洗净, 储存在 -80°C 冰箱, 用于后续各项生理生化指标 (SOD、CAT、POD、APX、PAL、Pro、GSH、MDA、 H_2O_2) 测定。

1.5 Cd、Se 含量的测定

准确称取水稻籽粒或其他部位样品 0.25 g 置于聚四氟乙烯管中, 加 10 mL 硝酸-高氯酸混合溶液 (9+1), 加盖, 浸泡过夜。后用电热板加热, 用 140°C 的温度消煮, 待管内棕色黄烟散尽直至管内溶液变澄清, 拿下盖子赶酸, 待溶液只剩 1~2 mL 时, 取下消煮管, 稍作冷却, 冷却后把消化好的样品转入 25 mL 容量瓶, 用超纯水定容。Cd 元素采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-5000) 测定, Se 元素用原子荧光形态分析仪 (SA-20) 测定。

1.6 叶片亚细胞 Cd、Se 组分测定

将叶样品 1.00 g 研磨成具有预冷提取物的匀浆。提取物组成为: $250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 蔗糖, $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Tris-HCl 缓冲液 (pH 7.54) 和 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 二硫苏糖醇 ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2\text{S}_2$)。将匀浆以 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 得到含细胞壁的残留物 (组分 F1)。将上清液以 $3\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 得到叶绿体组分 (组分 F2)。将上清液进一步以 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min, 得到含有线粒体 (组分 F3) 的沉淀物, 细胞可溶性组分的上清液, 即液泡、核糖和核蛋白 (组分 F4)。提取组分的消解和测定的具体步骤与 Cd、Se 含量的测定步骤相同。

1.7 数据统计与分析

试验数据均以平均值 $\pm$ 标准误的方式呈现, 重复次数为 3, 数据分析采用单因素方差分析 (ANOVA) 与 Duncan 法多重比较 ($P < 0.05$); 数据制图采用 Origin-Pro 2023, Excel 与 SPSS 25 进行数据计算与显著性统计分析。

1.7.1 水稻各部位 Se、Cd 占比

水稻各部位 (根、茎、叶、籽粒) Se、Cd 含量与水稻总 Se、Cd 含量的比值。

1.7.2 水稻 Se、Cd 生物富集系数 (BAF) 与转移系数 (TF)

$$BAF = C_{\text{根}} / C_{\text{土}}$$

$$TF=C_a/C_b$$

式中:BAF为Se或Cd生物富集系数; $C_{\text{根}}$ 为水稻根系Se或Cd的含量; $C_{\pm}$ 为土壤中Se或Cd的含量;TF为Se或Cd的转移系数; C_a 、 C_b 为水稻某一部位Se或Cd含量;a为茎、叶、籽粒;b为根、茎。

2 结果与分析

2.1 LAB-1-SeNPs对水稻农艺性状的影响

LAB-1-SeNPs(B)喷施显著提高了水稻产量(表1)。B处理喷施Se含量为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,增产效果就已显著高于CK,而有机Se(M)与无机Se(S)处理在喷Se含量为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时才显著提高水稻产量,增产效果呈现B>M、S,在B20+、M20+、S20+处理时,产量分别提高了19.12%、13.22%、17.09%。B处理对水稻株高、穗长、穗数、穗粒数、千粒质量无显著影响。与CK相比,处理B在喷施含量在 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,显著提高了水稻结实率,其中B20+、B20-处理提高结实率

8.57%、9.54%,与M、S处理相比,B20处理提高结实率分别为5.60%、3.03%。

2.2 LAB-1-SeNPs对水稻Se、Cd吸收的影响

LAB-1-SeNPs(B)显著提高了水稻根、茎、叶、籽粒的Se含量(图1),各部位Se含量大小依次为叶>根>茎>籽粒,品种间籽粒Se含量无显著差异。与CK处理相比,LAB-1-SeNPs喷施提高了籽粒Se含量227.52%~366.46%,与M处理相比,籽粒Se提高30.54%~42.57%,与S处理相比,籽粒Se提高了3.38%~23.31%,在 10 、 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 喷施Se含量下,籽粒Se含量达到 $0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

叶面喷施LAB-1-SeNPs显著降低了水稻各部位的Cd含量(图2)。随着LAB-1-SeNPs喷施含量的提高,水稻籽粒Cd含量呈下降的趋势,而M与S处理呈先降低后升高的趋势(图2D),品种间差异不显著。从图2A发现,与CK处理相比,B处理降低了根系Cd含量,且随着喷施含量增加,降Cd效果与S、M处理间

表1 不同处理对水稻农艺性状的影响

Table 1 Effects of different treatments on agronomic traits of rice

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	穗长 Ear length/cm	每盆穗数 Number of ears per pot/ear	每穗粒数 Number of grains per ear/ear	结实率 Seed setting rate/%	千粒质量 1000-grain weight/g	实际产量 Actual yield/ (g·pot ⁻¹)
CK+	105.7±1.7a	20.9±0.8a	32.3±1.5a	154.4±4.0a	78.8±1.6b	20.2±1.0a	100.8±4.9def
B5+	107.3±1.3a	21.1±2.4a	35.0±2.0a	161.8±10.7a	85.6±5.1ab	21.4±1.5a	120.1±1.2a
B10+	105.9±0.5a	21.5±2.5a	35.3±2.3a	159.2±9.6a	85.4±1.1ab	21.0±1.0a	120.7±1.5a
B20+	103.9±3.2ab	22.4±0.9a	35.3±2.1a	167.0±9.2a	87.2±0.3a	21.7±0.9a	122.9±7.3a
M5+	101.3±1.0b	21.6±1.1a	34.0±4.4a	161.7±9.3a	82.0±0.8ab	20.1±1.5a	109.5±0.2bcd
M10+	103.1±0.4ab	22.7±1.2a	33.3±2.5a	162.8±12.5a	82.9±6.7ab	20.5±1.0a	109.5±9.8abc
M20+	106.5±1.7a	21.7±0.3a	33.3±1.5a	159.3±18.8a	81.6±7.0ab	20.7±1.7a	114.1±9.2bcd
S5+	104.5±2.9ab	21.9±1.0a	33.3±1.5a	160.5±8.8a	81.9±2.3ab	20.0±0.6a	107.1±3.1cde
S10+	106.2±3.3a	21.5±1.7a	34.3±3.1a	160.2±13.6a	84.9±3.3ab	20.6±2.0a	112.5±4.2abc
S20+	104.9±3.4ab	22.4±1.2a	35.3±1.5a	165.1±6.8a	84.1±4.3ab	20.2±1.0a	118.0±5.6ab
CK-	109.8±2.8a	22.5±0.4a	32.6±2.1a	133.4±5.2a	79.0±1.2b	18.6±0.7a	81.8±1.7i
B5-	108.5±5.3a	22.5±1.1a	32.0±1.0a	146.4±17.1a	83.5±5.3ab	19.3±0.4a	90.8±1.1fghi
B10-	109.9±3.7a	23.0±0.7a	32.7±2.1a	142.5±4.5a	84.4±4.9ab	19.7±0.7a	94.7±5.4fgh
B20-	109.8±3.2a	22.6±1.7a	34.7±1.5a	147.1±0.5a	86.5±1.1a	19.9±1.6a	97.9±6.51efg
M5-	107.9±4.4a	22.2±1.4a	32.7±2.1a	143.4±4.6a	82.6±3.4ab	18.9±0.7a	89.3±5.1ghi
M10-	105.4±0.8a	22.1±0.4a	32.3±0.6a	143.7±3.3a	82.4±4.5ab	19.0±0.6a	89.4±4.9ghi
M20-	108.6±4.7a	22.5±1.3a	34.3±3.1a	145.9±5.6a	84.1±5.2ab	19.23±0.5a	94.9±5.7fgh
S5-	107.1±5.5a	22.4±1.1a	32.6±0.6a	142.9±4.2a	80.9±0.4ab	18.8±0.2a	86.9±2.4hi
S10-	107.8±5.1a	22.0±1.0a	33.7±1.2a	136.9±8.2a	82.1±1.1ab	18.8±0.9a	89.5±5.4ghi
S20-	108.9±5.7a	23.0±0.6a	34.3±2.3a	138.9±10.5a	85.2±1.2ab	18.9±0.4a	89.9±0.4ghi

注:CK为空白对照,B为微生物合成纳米Se,M为有机Se,S为无机Se,其后数字表示喷施 5 、 10 、 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 含量;+:水稻泰丰优208品种,-:水稻桂野丰品种。表中数据为平均值±标准误, $n=3$,同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$,Duncan法)。下同。

Note:CK indicates control, B indicates microbial synthesis of selenium nanoparticles, M indicates organic selenium, S indicates inorganic selenium, the latter number represents spraying 5 , 10 , $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ concentration, +: rice Taifengyou 208 varieties, -: rice Guiyefeng varieties. The values in the table are mean ±standard error, $n=3$, and different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's test). The same below.

差异逐渐增大,在B5处理时,与M5、S5相差0.159、0.019 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,B20处理时,与M20、S20相差0.341、0.065 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在水稻茎和叶中(图2B、图2C),B处理降Cd效果优于S、M处理,与M20、S20处理相比,B20处理中茎Cd含量降低了45.27%、1.60%,叶Cd含量降低了68.8%、32%。对于水稻籽粒(图2D),B处理下,籽粒Cd含量与CK处理相比下降了10.14%~55.07%,与M处理相比下降了9.03%~40.77%,与S处理相比下降了4.08%~36.37%;与CK处理相比,M处理降低了籽粒Cd含量4.90%~20.81%,S处理降低了籽粒Cd含量10.14%~21.76%。在10、20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 喷施Se含量下,籽粒Cd含量低于0.20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,B20+、B20-处理籽粒Cd含量最低,分别为0.116、0.121 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 LAB-1-SeNPs调控水稻Se、Cd富集与转移

从表2可知,LAB-1-SeNPs喷施对水稻Se、Cd生物富集能力与转移能力有一定的影响。B处理显著降低了水稻Cd的生物富集系数(BAF),提高了Se的生物富集系数,与CK处理相比,B处理提高水稻Se的BAF为20.63%~264.70%,降低Cd的BAF为9.10%~25.10%;B20+处理Se的BAF与M20+、S20+

相差0.40、0.23,Cd的BAF相差0.61、0.13,与S处理相比,Se的BAF提高为-26.97%~-11.01%,Cd富集系数降低5.70%~9.65%;与M处理相比,Se的BAF提高为20.37%~32.86%,Cd富集系数降低10.64%~22.10%。B处理显著提高了Se从根向茎、茎向叶、茎向籽粒的转移系数(TF),与CK处理相比,B20+处理分别提高了231.60%、4.30%、32.56%,与S处理相比,B处理从茎向籽粒的TF提高20.04%~116.07%;B处理降低了Cd从根向茎、茎向叶、茎向籽粒的TF,从籽粒向茎,B20+、B20-处理TF降低了8.96%、25.97%。

2.4 LAB-1-SeNPs对水稻各部位、叶片亚细胞Se、Cd分布的影响

如图3所示,水稻根系Cd占比为62%~79%,叶片Cd占比为10%~18%,茎中Cd占比为4%~10%,籽粒Cd占比为7%~12%,表现为根>叶>籽粒>茎;水稻根系Se占比为19.69%~59.61%,叶片Se占比为24%~44%,茎中Se占比为8%~24%,籽粒Se占比为5%~19%,表现为叶>根>茎>籽粒。LAB-1-SeNPs提高了水稻根系中的Cd占比,降低了根系的Se占比,在水

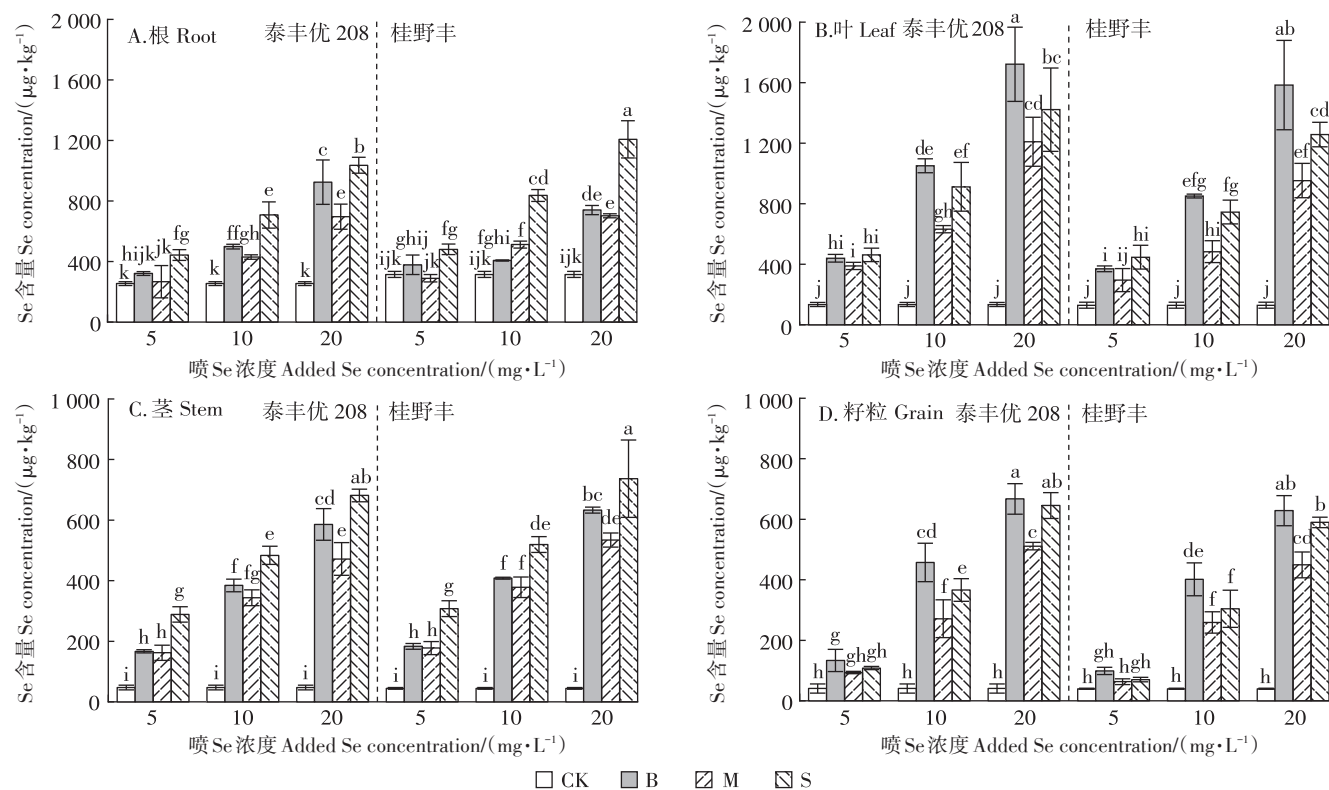


图1 不同处理对水稻各器官Se含量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on Se content in rice organs

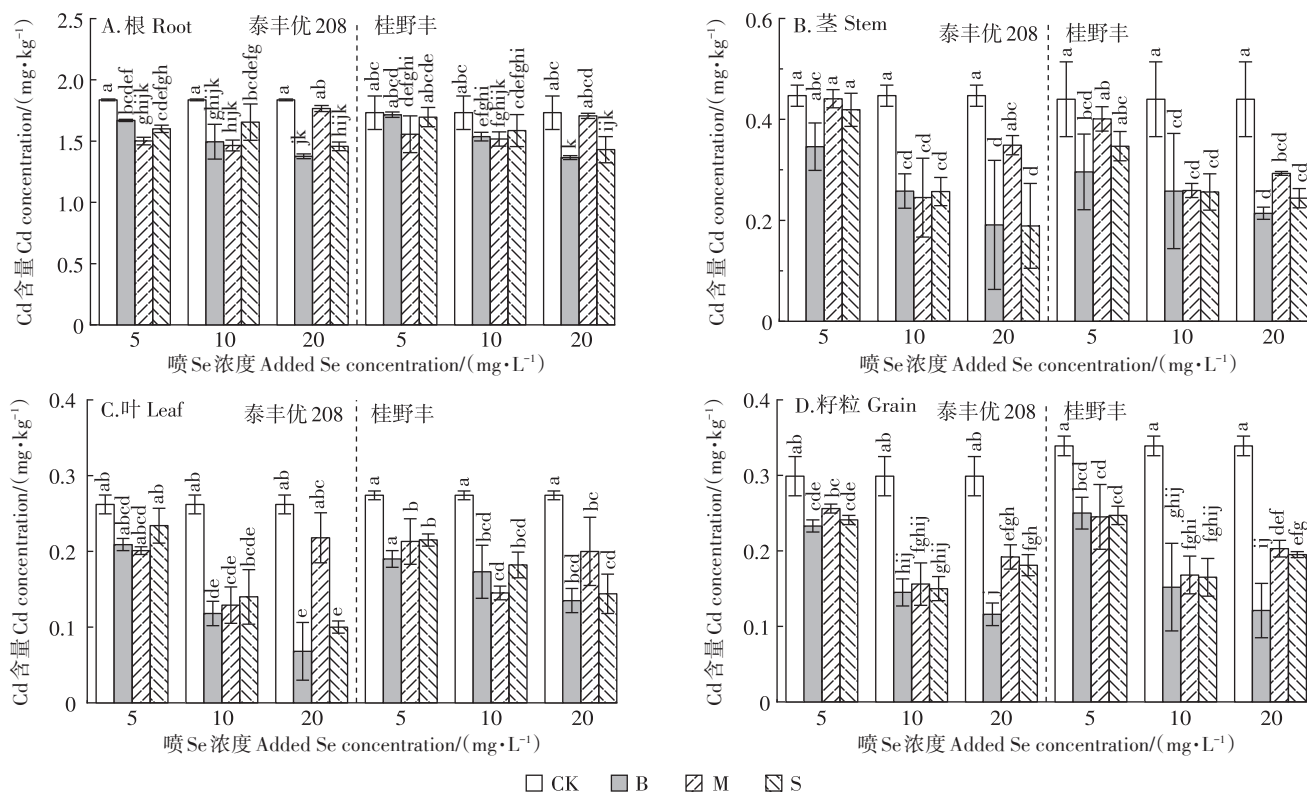


图2 不同处理对水稻各器官Cd含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on Cd content in rice organs

稻茎、叶、籽粒中,B处理提高了Se的占比,降低了Cd的占比,与M、S处理相比,B处理籽粒Cd占比降低了0.63~1.86、0.18~3.09个百分点,籽粒Se占比提高了2.30~2.95、4.26~4.29个百分点。

如图4所示,LAB-1-SeNPs喷施对水稻叶片Cd、Se亚细胞分布有一定的影响。LAB-1-SeNPs喷施后,叶片细胞壁(F1)Cd、Se组分分别占28.9%~31.6%、26.6%~43.4%,叶绿体(F2)中Cd、Se组分分别占15.5%~23.3%、26.2%~47.2%,线粒体(F3)中Cd、Se组分分别占17.8%~18.9%、2.2%~6.7%,液泡、核糖和核蛋白(F4)中Cd、Se组分分别占27.1%~35.7%、10.9%~31.5%;与CK处理相比,B处理促进了Cd在F1、F4组分中的积累,减少了F2、F3组分中的积累,促进了Se在F1、F2组分中的积累,减少了F3、F4组分中的积累。

2.5 LAB-1-SeNPs对MDA、H₂O₂含量、抗氧化物性质及抗氧化酶活性的影响

LAB-1-SeNPs提高了水稻叶片SOD、CAT、POD、APX、PAL、Pro、GSH的含量(表3),但随着喷Se含量的提高,SOD、POD、PAL、Pro的含量随之提高,而CAT、APX、GSH含量逐渐下降。与CK处理相比,B20+、B20-处理显著提高了SOD含量

329.03%、561.24%;对于POD、PAL、Pro,LAB-1-SeNPs喷施效果优于无机Se、有机Se,与M、S处理相比,B20+处理提高POD含量为18.42%、20.71%,提高PAL含量为8.05%、25.91%,提高Pro含量为24.64%、8.40%。B处理显著降低了MDA、H₂O₂的含量,且随着喷Se含量的提高,MDA、H₂O₂含量也越来越低,与CK处理相比,B20+、B20-处理MDA含量下降了75%、50.58%,H₂O₂含量下降了48.74%、47.78%,B处理降低MDA、H₂O₂含量优于M、S处理。泰丰优208和桂野丰品种间,B处理下CAT、POD、APX、PAL与MDA含量差异显著,在泰丰优208中,CAT、POD、APX、PAL含量高于桂野丰品种,MDA含量显著低于桂野丰品种。

2.6 相关性分析

水稻各部位Se、Cd含量以及水稻生理生化指标含量的相关关系如图5所示。水稻SOD、POD、PAL、Pro含量与水稻不同部位(根、茎、叶、籽粒)Cd含量呈显著负相关($P \leq 0.01$)($r = -0.47 \sim -0.74$, $r = -0.27 \sim -0.46$, $r = -0.41 \sim -0.65$, $r = -0.5 \sim -0.7$),水稻不同部位(根、茎、叶、籽粒)Cd含量与MDA、H₂O₂含量呈显著正相关($P \leq 0.01$)($r = 0.34 \sim 0.48$, $r = 0.58 \sim 0.79$);APX、MDA、H₂O₂、

表2 不同处理水稻Se、Cd生物富集系数(BAF)和转运系数(TF)的变化

Table 2 Changes of Cd bio-accumulation factors(BAF) and translocation factors(TF) in rice under different treatments

处理 Treatment	生物富集系数 BAF		转移系数TF					
	Se Cd		Se			Cd		
			茎/根 Stem/Root	叶/茎 Leaf/Stem	籽粒/茎 Grain/Stem	茎/根 Stem/Root	叶/茎 Leaf/Stem	籽粒/茎 Grain/Stem
CK+	0.51±0.01e	2.87±0.14a	0.19±0.01g	2.82±0.11f	0.86±0.10f	0.24±0.07abc	0.59±0.06ab	0.67±0.01ab
B5+	0.65±0.01de	2.61±0.02bede	0.52±0.01f	2.64±0.14e	0.80±0.11e	0.21±0.08bcd	0.60±0.05ab	0.67±0.02ab
B10+	1.00±0.02c	2.34±0.04ghi	0.77±0.01d	2.73±0.15cd	1.19±0.06b	0.17±0.11cd	0.46±0.04ab	0.56±0.06b
B20+	1.86±0.17a	2.15±0.02i	0.63±0.09b	2.94±0.09a	1.14±0.01a	0.14±0.01d	0.36±0.01b	0.61±0.04ab
M5+	0.54±0.12e	2.35±0.15ghi	0.61±0.11f	2.40±0.13e	0.58±0.04ef	0.29±0.02a	0.46±0.03ab	0.58±0.04b
M10+	0.87±0.02cd	2.29±0.06ghi	0.80±0.02d	1.84±0.12e	0.79±0.07d	0.17±0.01cd	0.53±0.01ab	0.64±0.02ab
M20+	1.40±0.10b	2.76±0.02ab	0.68±0.09c	2.56±0.37bc	1.08±0.06b	0.20±0.04bcd	0.62±0.04ab	0.55±0.01b
S5+	0.89±0.04cd	2.50±0.08cdefg	0.65±0.06e	1.60±0.01e	0.37±0.01ef	0.26±0.03ab	0.56±0.01ab	0.58±0.01b
S10+	1.42±0.10b	2.59±0.13bedef	0.68±0.02c	1.89±0.13d	0.76±0.02c	0.16±0.04d	0.54±0.02ab	0.58±0.02ab
S20+	2.09±0.06a	2.28±0.11ghi	0.66±0.01a	2.09±0.20b	0.95±0.02a	0.13±0.02d	0.53±0.03ab	0.96±0.01a
CK-	0.63±0.02cd	2.71±0.01abc	0.14±0.01g	2.90±0.36f	0.90±0.06d	0.25±0.02abc	0.62±0.12ab	0.77±0.03ab
B5-	0.76±0.07cd	2.68±0.01abc	0.48±0.06f	2.02±0.01e	0.54±0.05d	0.17±0.05cd	0.64±0.01ab	0.84±0.01ab
B10-	0.82±0.01cd	2.40±0.14efgh	1.00±0.01d	2.08±0.01cd	0.98±0.07b	0.17±0.03cd	0.67±0.04a	0.59±0.02ab
B20-	1.49±0.03b	2.13±0.02i	0.85±0.01b	2.50±0.29a	0.99±0.05a	0.16±0.13d	0.63±0.01ab	0.57±0.02b
M5-	0.58±0.03d	2.43±0.03defgh	0.61±0.01f	1.67±0.13ef	0.36±0.01d	0.26±0.02ab	0.53±0.02ab	0.61±0.01ab
M10-	1.03±0.03c	2.37±0.04fghi	0.74±0.02de	1.28±0.05e	0.69±0.09c	0.17±0.08cd	0.56±0.08ab	0.65±0.03ab
M20-	1.41±0.02b	2.67±0.02abcd	0.76±0.01c	1.78±0.17c	0.84±0.03b	0.17±0.02cd	0.68±0.02ab	0.69±0.02ab
S5-	0.97±0.04cd	2.65±0.03abcd	0.64±0.01e	1.45±0.08e	0.23±0.03d	0.20±0.03bcd	0.62±0.04ab	0.71±0.01ab
S10-	1.68±0.05b	2.48±0.15cdefg	0.62±0.03c	1.44±0.05d	0.59±0.09c	0.16±0.03d	0.71±0.01ab	0.64±0.02ab
S20-	2.43±0.14a	2.23±0.04hi	0.61±0.03a	1.71±0.11b	0.80±0.07a	0.17±0.08d	0.59±0.01ab	0.80±0.01ab

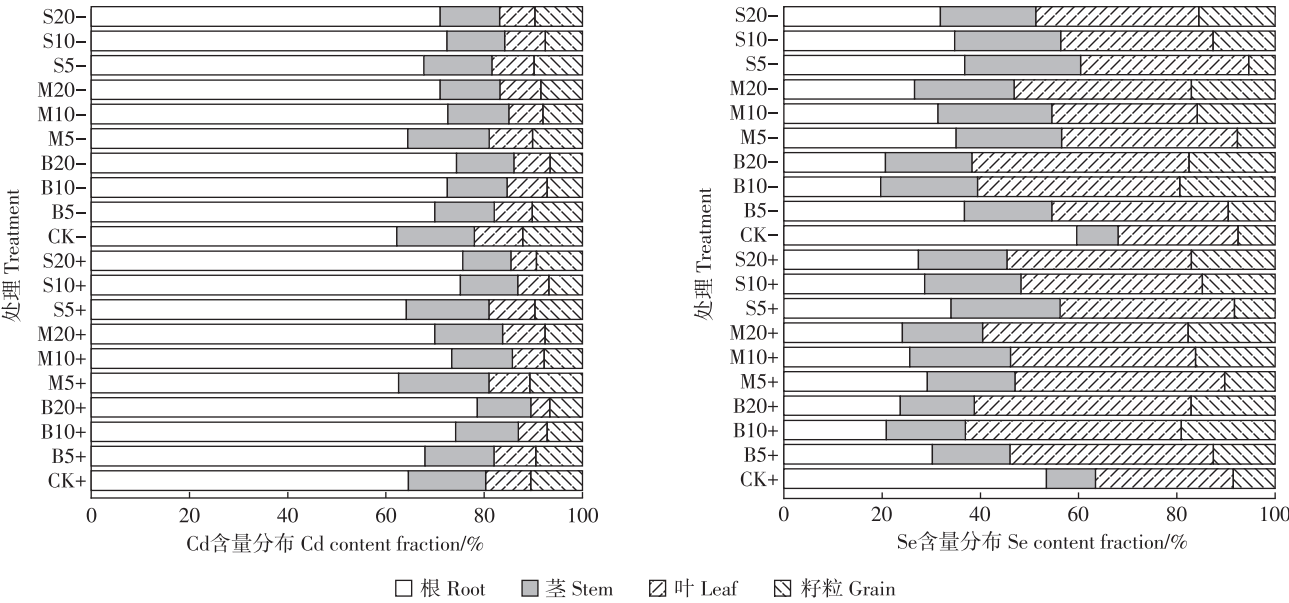


图3 水稻各部位Cd、Se含量分布

Figure 3 Cd and Se content fraction in rice tissues

GSH 含量与水稻不同部位 Se 含量呈显著负相关 ($P \leq 0.01$) ($r = -0.26 \sim -0.50, r = -0.30 \sim -0.54, r = -0.61 \sim -0.87, r = -0.39 \sim -0.69$), SOD、POD、PAL、Pro 含量与水稻不同部位 Se 含量呈显著正相关 ($P \leq 0.01$) ($r = 0.63 \sim 0.88, r =$

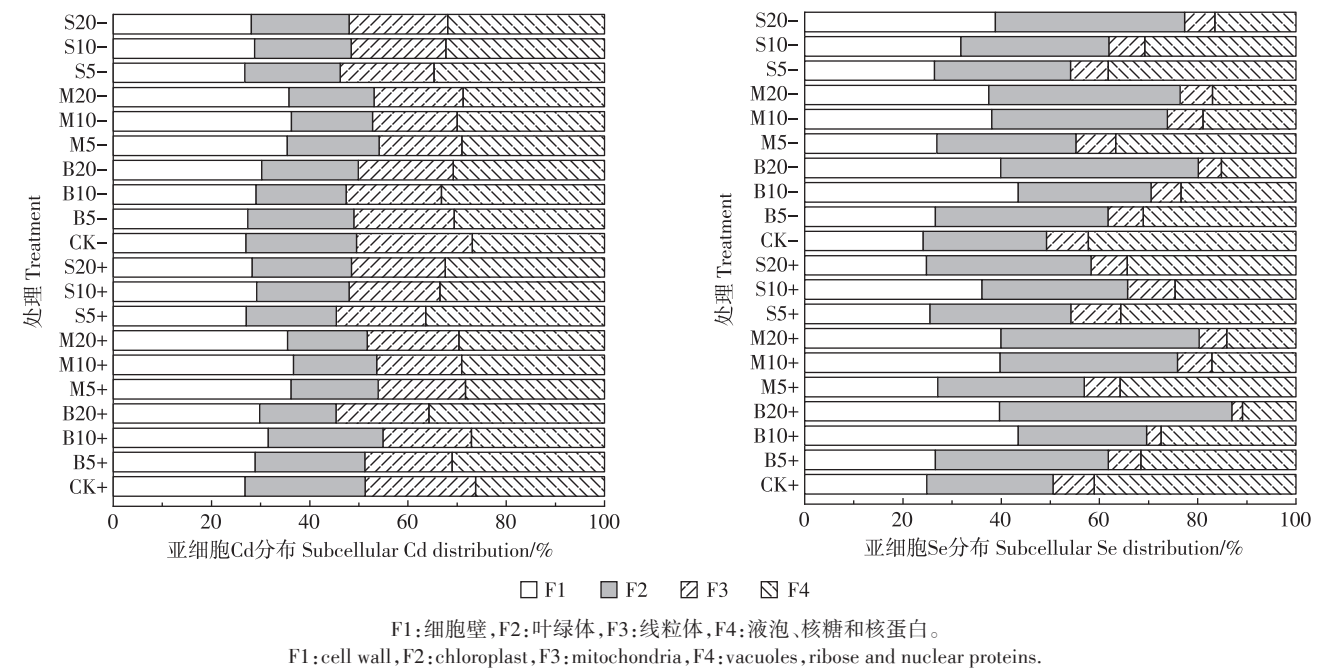


图4 水稻叶片 Cd、Se 亚细胞分布
Figure 4 Subcellular distribution of Cd and Se in rice leaves

表3 不同处理水稻生理生化指标的变化
Table 3 Changes of physiological and biochemical indexes of rice under different treatments

处理 Treatment	SOD/ (U·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	CAT/ (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	POD/ (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	APX/ (U·g ⁻¹ ·s ⁻¹)	PAL/ (U·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	MDA/ (nmol·g ⁻¹)	H ₂ O ₂ / (μmol·g ⁻¹)	Pro/ (μg·g ⁻¹)	GSH/ (μg·g ⁻¹)
CK+	82.57±18.89ijk	102.83±2.25ijk	153.99±8.60ef	20.83±3.66efg	1 524.00±14.42j	1.08±0.05ef	6.34±0.10a	113.00±3.42hi	290.79±11.61ghi
B5+	139.21±21.62ghi	149.50±9.04a	186.68±3.83d	32.26±1.32a	2 217.33±53.27cd	0.44±0.03jkl	4.99±0.10cd	144.94±4.83def	371.13±7.20abc
B10+	295.69±26.40ab	114.50±4.92fgh	261.15±5.09a	28.63±1.79b	2 381.33±72.04b	0.36±0.04kl	4.11±0.16e	158.90±3.79abcde	356.92±16.72bcd
B20+	354.25±54.74a	106.83±3.40hij	272.95±4.63a	25.18±1.70cd	2 537.33±47.72a	0.27±0.05l	3.25±0.13f	178.82±4.24s	332.20±6.51def
M5+	120.01±21.74hij	148.17±4.01ab	161.40±5.57e	28.51±1.66b	2 093.33±44.96ef	0.56±0.05ij	5.25±0.38bc	112.74±2.48hi	390.90±20.49a
M10+	230.41±50.90bcde	133.00±3.97de	203.86±9.82c	24.70±1.35cd	2 277.33±100.58bc	0.40±0.12jkl	4.91±0.36cd	133.06±5.46fgh	301.30±10.21fgh
M20+	296.65±72.93ab	115.83±7.85fg	230.49±9.10b	20.77±3.99efg	2 348.00±56.00b	0.37±0.06jkl	4.13±0.12e	143.47±12.24defg	275.35±13.94hij
S5+	88.33±32.71ijk	141.00±1.80bc	161.06±4.78e	22.44±0.74def	1 754.67±83.36h	0.84±0.10gh	5.63±0.16b	135.99±7.03fg	341.78±26.72cde
S10+	216.97±47.53cdef	134.33±4.51cd	175.56±8.17d	20.95±0.68efg	1 901.33±38.44g	0.67±0.07hi	4.78±0.38d	143.46±2.86defg	288.63±24.25ghi
S20+	276.49±26.76bc	126.33±2.47e	226.11±8.60b	16.13±1.45ij	2 014.67±38.44f	0.47±0.02jk	4.23±0.14e	164.97±1.62abcd	249.40±6.17jk
CK-	42.25±7.62k	91.67±4.73mn	104.45±7.85k	15.12±1.66j	1 357.33±23.44k	1.72±0.14a	7.89±0.18a	107.55±5.92i	311.81±11.33efg
B5-	126.73±11.99hij	117.50±2.18f	110.51±4.09jk	29.23±1.97b	2 141.33±126.01de	1.47±0.20bc	6.36±0.16cd	139.41±16.97efg	384.20±34.93ab
B10-	192.97±19.18efg	98.17±3.88klm	128.04±6.09hi	20.00±1.59fgh	2 220.00±136.00cd	1.24±0.09de	5.20±0.18e	162.74±27.55abcd	356.61±10.93bcd
B20-	279.37±46.20bc	95.33±4.37klmn	144.55±3.65fg	18.51±1.19ghi	2 494.67±28.09a	0.85±0.04gh	4.12±0.18f	177.01±18.59ab	317.67±16.99efg
M5-	90.25±27.37ijk	109.50±6.26fghi	107.14±4.41jk	26.31±1.34bc	1 798.67±85.82gh	1.35±0.27bcd	6.66±0.43bc	121.55±10.50ghi	360.62±22.21abcd
M10-	210.25±23.98def	93.17±1.89lmn	124.33±8.02hi	21.37±1.09efg	2 097.33±30.02def	1.17±0.11def	6.07±0.55cd	138.34±12.68efg	318.29±16.69efg
M20-	263.05±23.98bcd	88.33±2.08n	135.79±2.54gh	23.39±0.94cde	2 217.33±56.19cd	0.99±0.15fg	5.25±0.06e	151.41±6.77cdef	235.49±10.42kl
S5-	71.05±10.38jk	108.17±6.05ghij	103.44±4.56k	22.74±0.55def	1 508.00±65.48j	1.49±0.04b	6.91±0.30b	137.01±19.57efg	356.92±8.81bcd
S10-	161.29±8.31fgh	100.50±4.77jkl	118.94±16.12ij	17.50±1.35hij	1 610.67±56.05ij	1.29±0.06cd	6.04±0.51d	155.04±7.38bcdef	264.53±6.58ijk
S20-	240.97±35.39bcde	94.50±1.80klmn	124.33±4.04hi	15.36±1.35ij	168.67±20.53hi	0.88±0.06g	5.38±0.17e	169.18±17.28abc	213.25±25.72l

0.26~0.55、 $r=0.14\sim0.59$ 、 $r=0.68\sim0.80$)。水稻各部位 Se 含量与 Cd 含量呈显著负相关关系($P\leq0.01$)。

2.7 主成分分析(PCA)与 Pearson 相关矩阵
主成分分析和 Pearson 相关矩阵表明,不同处理

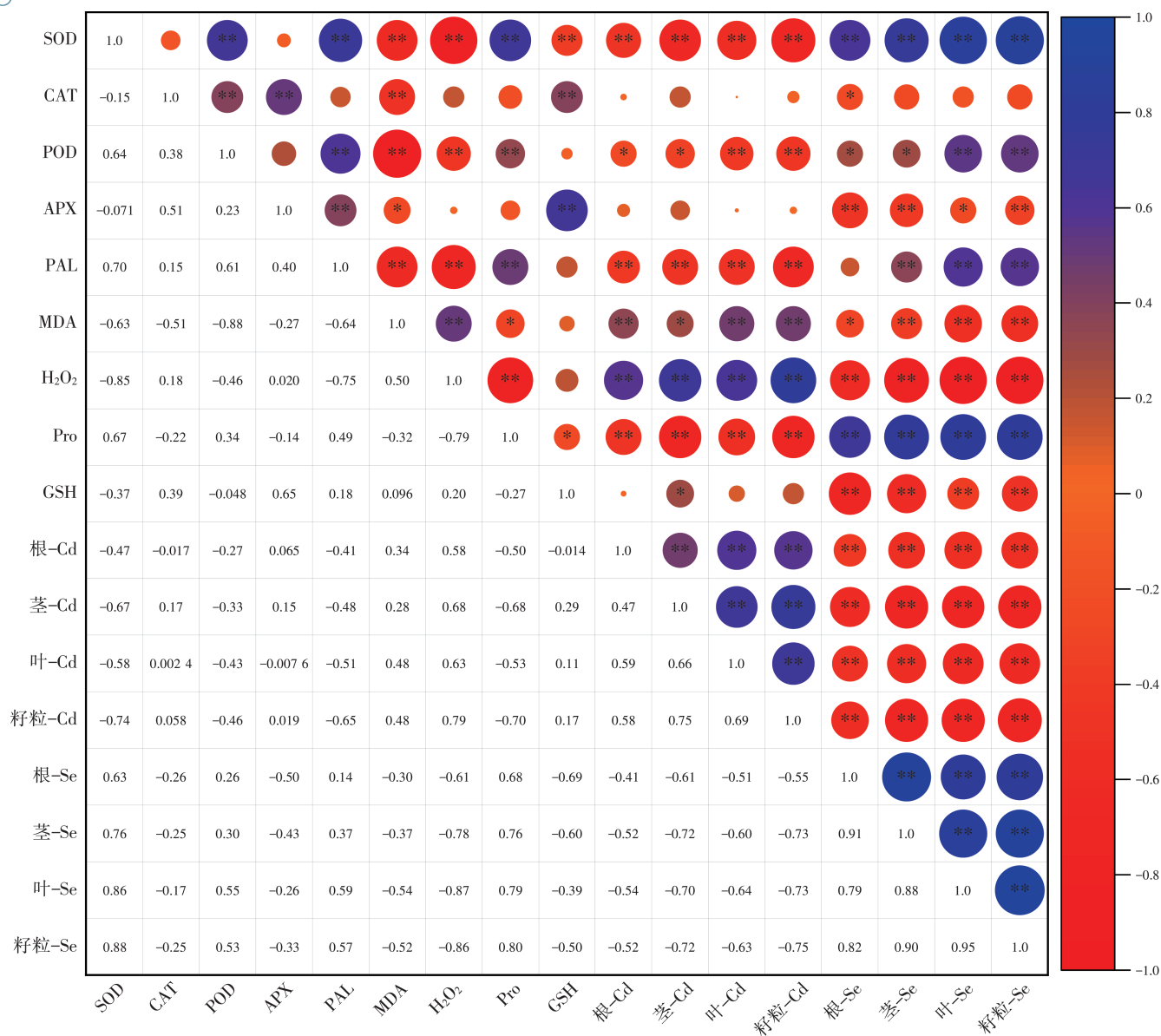


图5 水稻Se、Cd含量与生理生化指标的关系

Figure 5 Relationship between physiological indexes, Se and Cd content in rice

的各变量显著相关(图6)。PCA的两个分量占总样本方差的79.1%, PC1占59.1%, PC2占20.1%, POD、SOD、PAL、Pro与水稻各部位Se含量对PC1有正的贡献率, CAT、AOX、GSH、MDA、H₂O₂与水稻各部位Cd含量对PC1为负的贡献率(图6A)。MDA、H₂O₂与水稻各部位Cd含量呈显著正相关, SOD、Pro与水稻各部位Se含量呈显著正相关关系, Se和Cd间呈一定的负相关关系。通过Pearson相关聚类分析, 以树状图反映各变量情况, POD与PAL与水稻各部位Se有一定的相关关系, CAT、AOX、GSH与水稻Cd含量存在一定的相关性(图6B)。

3 讨论

本研究发现喷施微生物合成的纳米Se能够提高水稻籽粒Se含量, 降低籽粒Cd含量, 改善水稻生长、调节水稻Se、Cd的吸收与转移。研究结果表明, 微生物合成纳米Se的喷施提高了水稻稻米产量和结实率, 并呈现微生物合成纳米Se处理>有机Se、无机Se(表1)的规律, 这可能是Se的添加提高了花粉活力和萌发率, Barman等^[26]发现, 花粉活力、萌发率在Se的喷施后分别显著提高了40%、50%。

土壤Cd影响环境生态、作物生长以及作物吸收,

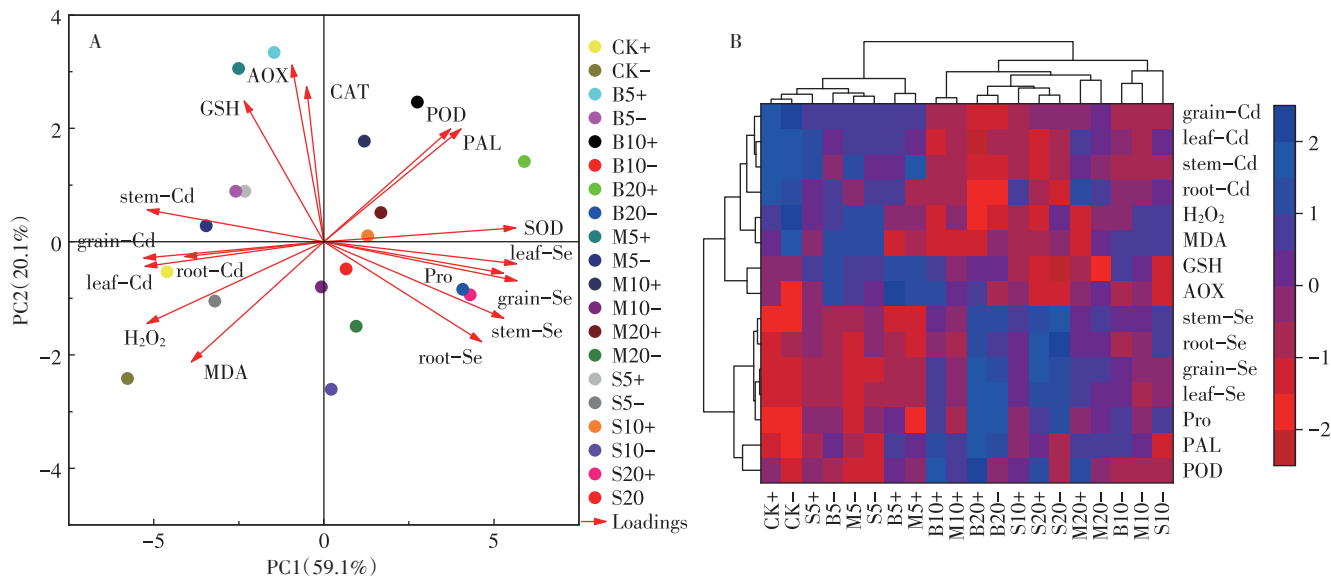


图6 主成分分析(A)与 Pearson 相关矩阵(B)分析

Figure 6 Principal component analysis(A) and Pearson correlation matrix(B) analysis

从而引起食物链Cd问题^[27-29]。研究发现Se可以调节作物Cd毒害,本研究同样证实了外源Se的添加降低了水稻各部位对Cd的累积(图2),同时也提高了水稻各部位的Se含量(图1)。据报道,叶片喷Se在小麦上显著降低了小麦籽粒的Cd含量^[30],叶面喷施Na₂SeO₃与生物有机肥提高了水稻不同部位的Se含量,降低了水稻不同部位的Cd含量^[31]。外源Se的添加提高了水稻根系Cd的百分比,这可能是Se调节Cd在植物中的运输和分布^[26],降低了根到茎的转移^[32],前人研究通过水培比较Na₂SeO₃、纳米Se、SeMet对水稻幼苗Cd吸收差异,结果显示纳米Se降低水稻幼苗Cd从根到地上部的转移系数显著高于Na₂SeO₃与SeMet处理,该差异可能是因为不同Se形式在植物体吸收和同化的差异引起的^[33],纳米Se通过物理或化学途径被植物根部吸收,而粒径小的纳米Se形式很容易穿过细胞壁屏障并被植物根部吸收^[34],这与本研究结果相一致。

重金属亚细胞分布是植株重要的重金属解毒机制之一,植物可以通过区室化缓解重金属对植物的损伤,细胞壁是重金属进入植物细胞的第一道障碍,细胞壁含有丰富的羧基及极性物质,可以与重金属结合,抑制重金属向胞内的运输。在本研究中,水稻叶片重金属Cd主要被集中在细胞壁,这与Zhang等^[35]研究结果类似,而且喷施Se后,叶片细胞壁Cd积累增加,这与Huang等^[36]实验研究结果类似,表明了Se可以促进Cd在细胞壁的积累,改变Cd在植物中的亚细

胞分布。而进入到细胞的重金属离子会被转运进液泡中,减少重金属对植物细胞器功能干扰^[35],叶片喷Se后,增加了液泡、核糖、核蛋白组分中Cd的比例,减轻了Cd对植物叶片的伤害。

植物在正常生长代谢过程中,产生的活性氧与活性氧清除保持一种动态平衡,但Cd会加剧ROS的生成,使植物处于氧化应激状态,导致氧化还原失衡和脂膜过氧化,产生过量的O₂·,植物可以通过自身的抗氧化系统进行对Cd毒害的有限的修复,包括酶抗氧化剂如SOD、POD、APX、PAL、CAT和非酶清除剂如GSH、抗坏血酸、类胡萝卜素和硫醇以及酚类化合物^[37]。Se可以直接或间接调节酶活性与蛋白质的活性,从而减轻Cd对植物的氧化损伤^[38];GSH是一种非蛋白类含硫的三肽化合物,其含有丰富的巯基,Se可以通过取代GSH上的S与Cd结合形成Cd-Se蛋白复合物沉积在细胞壁和液泡中,来减轻Cd对植物的伤害^[39],郭大维等^[40]通过研究小白菜叶面喷Se对抗氧化酶活性与GSH的影响,结果显示叶面喷Se提高了GSH含量和抗氧化酶活性,增强了小白菜的抗氧化能力,Sun等^[41]研究证实了在黄瓜幼苗中,外源Se提高了黄瓜叶APX、SOD活性以及GSH含量,Lan等^[42]研究发现外源Se喷施在水稻叶上,MDA含量降低了17.41%~38.65%,反映了叶面喷Se提高了水稻的抗氧化能力,从而减轻Cd对水稻的氧化损伤。

微生物合成纳米Se与无机Se、有机Se相比,有着高生物有效性和低毒性特点。有学者利用枯草芽孢

杆菌合成纳米Se,发现添加在罗非鱼上后显著降低了鱼体内50%~87% Cd的累积^[43],Zhu等^[44]通过喷施5、10、20 mg·L⁻¹的微生物合成纳米Se,降低了白菜23%~29%的Cd含量以及MDA的含量,并提高了白菜抗氧化防御系统,Zhou等^[45]通过喷施40 mg·L⁻¹的Na₂SeO₃,降低了水稻籽粒56%的Cd含量,本研究喷施20 mg·L⁻¹微生物合成纳米Se与Na₂SeO₃时,分别降低籽粒Cd含量为55%与21%,表明了微生物合成纳米Se有着更高的降Cd效果,Qi等^[46]比较了生物合成纳米Se和Na₂SeO₃在油菜上的降Cd效果,显示生物合成纳米Se比Na₂SeO₃更佳,这与本研究结果一致。

4 结论

(1)与不喷Se(CK)、有机Se(M)和无机Se(S)处理相比,叶面喷施微生物合成纳米Se(B)显著提高了水稻各部位Se含量,显著降低了水稻各部位Cd含量,籽粒富Se降Cd效果呈现B>M、S>CK,而且随着喷Se剂量(5、10、20 mg·L⁻¹)提高,水稻籽粒富Se降Cd效应增强。

(2)叶面喷施微生物合成纳米Se通过提高水稻Se生物富集系数、茎向籽粒的转移系数,增加Se在叶片中细胞壁、叶绿体组分中的累积,来降低水稻Cd的生物富集系数、茎向籽粒的转移系数,调节Cd在叶片中细胞壁、液泡中的累积,减轻Cd对水稻的损伤。

(3)叶面喷施微生物合成纳米Se提高了水稻抗氧化酶活性(SOD、CAT、POD、APX、PAL)与非酶抗氧化剂(Pro、GSH)含量,提高了水稻对Cd的抗氧化应激能力,喷施效果以微生物合成纳米Se效果最佳;而且高硒水稻品种(泰丰优208)提高抗氧化酶活性与非酶抗氧化剂含量效果优于低硒水稻品种(桂野丰)。

参考文献:

- [1] YI Y, ZHAO Y, ZHANG Z, et al. Recent developments in electrochemical detection of cadmium[J]. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2022, 33(1): 14–22.
- [2] TUN X Q, WEI S, WEI Y M. Progress in research on biomarkers of cadmium induced renal toxicity[J]. *Journal of Environment and Health*, 2011, 28(8): 739–742.
- [3] BERTIN G, AVERBECK D. Cadmium: cellular effects, modifications of biomolecules, modulation of DNA repair and genotoxic consequences (a review)[J]. *Biochimie*, 2006, 88(11): 1549–1559.
- [4] TARHONSKA K, LESICKA M, JANASIK B, et al. Cadmium and breast cancer: current state and research gaps in the underlying mechanisms[J]. *Toxicology Letters*, 2022, 361(1): 29–42.
- [5] YEH Y H, TSAI C C, CHEN T W, et al. Activation of multiple proteolysis systems contributes to acute cadmium cytotoxicity[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2022, 477(3): 927–937.
- [6] HUANG Q, XU Y, LIU Y, et al. Selenium application alters soil cadmium bioavailability and reduces its accumulation in rice grown in Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(31): 175–182.
- [7] WAN L, ZHANG H. Cadmium toxicity: effects on cytoskeleton, vesicular trafficking and cell wall construction[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2012, 7(3): 345–8.
- [8] WANG Y Z, WANG Q. Cadmium toxicity to plant roots[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2008, 15(4): 1–5.
- [9] GAO H, ZHANG A, ZHAO L. Effects of foliar application of zinc and selenium on the antioxidant enzyme activities and zinc and selenium contents in millet grains[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(9): 1724–1731.
- [10] LI Y, XU W, XIE W, et al. Effect of exogenous selenium on activity of glutathione peroxidase and uptake and conversion of selenium in several brassica vegetables[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2018, 20(2): 463–470.
- [11] RIOS J J, ROSALES M A, BLASCO B, et al. Biofortification of Se and induction of the antioxidant capacity in lettuce plants[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 116(3): 248–255.
- [12] ANDRESEN E, KUPPER H. Cadmium toxicity in plants[J]. *Metallions in Life Sciences*, 2013, 11(1): 395–413.
- [13] BENAVIDES M P, GALLEGO S M, TOMARO M L. Cadmium toxicity in plants[J]. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2005, 17(1): 21–34.
- [14] DAS P, SAMANTARAY S, ROUT G R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 98(1): 29–36.
- [15] 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(1): 602–610.
- [16] JIANG H, LIN W, JIAO H, et al. Uptake, transport, and metabolism of selenium and its protective effects against toxic metals in plants: a review[J]. *Metallomics*, 2021, 13(7): 40–51.
- [17] 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(1): 242–248.
- [18] QIN X, ZHAO P, LIU H, et al. Selenium inhibits cadmium uptake and accumulation in the shoots of winter wheat by altering the transformation of chemical forms of cadmium in soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(6): 8525–8537.
- [19] 郅文娟, 许永红, 冯俊贤, 等. 微量元素Se及其生物学功能[J]. 微量元素与健康研究, 2009, 26(5): 67–68. QIE W J, XU Y H, FENG J X, et al. Trace element selenium and its biological function[J]. *Trace Elements and Health Research*, 2009, 26(5): 67–68.
- [20] 李丹. 纳米Se合成菌 *Serratia marcescens* T24的分离、鉴定及其在富Se番茄栽培中的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022: 829–857. LI D. Isolation, identification and application of nano-selenium synthesizing bacterium *Serratia marcescens* T24 in cultivation of selenium-rich tomato[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,

- 2022:829–857.
- [21] 殷婷婷,李志慧,苏佳贺,等.生物法制备纳米Se的研究进展和应用前景[J].中国农学通报,2022,38(8):33–41. YIN T T, LI Z H, SU J H, et al. Research progress and application prospect of nano-selenium preparation by biological method[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(8):33–41.
- [22] 魏玮,李平,周志高,等.不同外源硒在土壤中的有效性变化及其对小麦累积的影响[J].环境科学,2023,44(2):1003–1011. WEI W, LI P, ZHOU Z G, et al. Availability changes in different exogenous selenium fertilizers in soil and their effects on selenium accumulation in wheat[J]. *Environmental Sciences*, 2023, 44(2):1003–1011.
- [23] 王琪,王雅琦,万亚男,等.不同形态叶面Se肥对水稻吸收和转运Se的影响[J].土壤,2022,54(6):1101–1107. WANG Q, WANG Y Q, WAN Y N, et al. Effects of leaf selenium fertilizer on selenium uptake and transport in rice[J]. *Soils*, 2022, 54(6):1101–1107.
- [24] 刘梦兰.两种不同Se肥对水稻籽粒Se积累及品质相关性状的影响[D].扬州:扬州大学,2021:1724–1780. LIU M L. Effects of two different selenium fertilizers on selenium accumulation and quality-related traits in rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021:1724–1780.
- [25] WANG M, JIANG D, HUANG X. Selenium nanoparticle rapidly synthesized by a novel highly selenite-tolerant strain *Proteus penneri* LAB-1[J]. *Science*, 2022, 25(9):4904–4916.
- [26] BARMAN F, R KUNDU. Foliar application of selenium affecting pollen viability, grain chalkiness, and transporter genes in cadmium accumulating rice cultivar: a pot study[J]. *Chemosphere*, 2023, 313(13):7538–7549.
- [27] BAWA U. Heavy metals concentration in food crops irrigated with pesticides and their associated human health risks in Paki, Kaduna State, Nigeria[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2023, 9(21):91889–91912.
- [28] HU Y, WANG H, JIA H, et al. Effects of Cd treatment on morphology, chlorophyll content and antioxidant enzyme activity of *Elymus nutans* Griseb., a native plant in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2023, 18(21):87561–87568.
- [29] YUE E, RONG F, LIU Z, et al. Cadmium induced a non-coding RNA microRNA535 mediates Cd accumulation in rice[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 130(1):149–162.
- [30] GU X, WEN X, YI N, et al. Effect of foliar application of silicon, selenium and zinc on heavy metal accumulation in wheat grains in field studies[J]. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 2022, 34(1):246–252.
- [31] GENG W, ZHAO Y, MAO Z, et al. The effects of combined use of black soldier fly larvae frass fertilizer with exogenous selenium on rice growth and accumulation of heavy metals[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(4):5133–5143.
- [32] WAN Y, YU Y, WANG Q, et al. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: influence of different forms of selenium[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 133(1):127–134.
- [33] XU H, YAN J, QIM 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):6991–7004.
- [34] ASLANI F, BAGHERI S, JULKAPLI N M, et al. Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview[J]. *Scientific World Journal*, 2014, 64(1):1759–1787.
- [35] ZHANG X F, HU Z H, YAN T X, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate Cd phytotoxicity by altering Cd subcellular distribution and chemical forms in *Zea mays*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171(1):352–360.
- [36] HUANG H, LI M, RIZWAN M, et al. Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401(1):393–404.
- [37] 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.
- [38] ZWOLAK I. The role of selenium in arsenic and cadmium toxicity: an updated review of scientific literature[J]. *Biological Trace Element Research*, 2020, 193(1):44–63.
- [39] YU Y, YUAN S, ZHUANG J, et al. Effect of selenium on the uptake kinetics and accumulation of and oxidative stress induced by cadmium in *Brassica chinensis*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 162(1):571–580.
- [40] 郭大维,胡艳美,蔡世鑫,等.土壤改良剂与叶面喷硒联合阻隔对小白菜吸收镉的影响[J].土壤通报,2021,52(5):1203–1209. GUO D W, HU Y M, CAI S X, et al. Effect of combination of soil conditioner and leaf spray selenium on cadmium absorption of Chinese cabbage[J]. *Soil Bulletin*, 2021, 52(5):1203–1209.
- [41] SUN H, WANG X, YANG N, et al. Effect of exogenous selenium on mineral nutrition and antioxidative capacity in cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under cadmium stress[J]. *Plant Soil and Environment*, 2022, 68(12):580–590.
- [42] LAN X, LI J, CHEN J, et al. Effects of foliar applications of brassinolide and selenium on the accumulation of arsenic and cadmium in rice grains and an assessment of their health risk[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2023, 25(2):161–171.
- [43] SAAD A M, SITOBY M Z, SULTAN M I, et al. Green nanotechnology for controlling bacterial load and heavy metal accumulation in Nile tilapia fish using biological selenium nanoparticles biosynthesized by *Bacillus subtilis* AS12[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13(10):15613–15635.
- [44] ZHU Y, DONG Y, ZHU N, et al. Foliar application of biosynthetic nano-selenium alleviates the toxicity of Cd, Pb, and Hg in *Brassica chinensis* by inhibiting heavy metal adsorption and improving antioxidant system in plant[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 240(11):3681–3690.
- [45] ZHOU J, GAO M, CUI H, et al. Influence of silicon and selenium and contribution of the node to cadmium allocation and toxicity in rice[J]. *Acta Agricultural Science & Technology*, 2021, 1(5):550–557.
- [46] QI W Y, LI Q, CHEN H, et al. Selenium nanoparticles ameliorate *Brassica napus* L. cadmium toxicity by inhibiting the respiratory burst and scavenging reactive oxygen species[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 417(12):5900–5910.

(责任编辑:叶飞)