农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

生物炭联合亚硒酸钠对水稻生理特征及硒镉累积的影响

蒋亚, 吴道明, 周凯, 王丽, 刘桂华, 柴冠群, 范成五

引用本文:
蒋亚, 吴道明, 周凯, 等. 生物炭联合亚硒酸钠对水稻生理特征及硒镉累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3053–3060.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2025–0086

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响
王波, 张然然, 杨如意, 石晓菁, 苏楠楠, 朱濛, 昝树婷
农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2710–2718 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0437

紫云英翻压条件下生物炭基肥配施量对水稻Cd迁移累积的影响
喻成龙, 汤建, 郑琴, 倪国荣, 谢志坚, 荣勤雷, 郭乃嘉, 王惠明, 周春火
农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2554–2560 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0759

不同铁肥及其施用方法对水稻籽粒镉吸收的影响
上官宇先, 陈琨, 喻华, 秦鱼生, 曾祥忠, 周子军, 郭松, 张兰
农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1440–1449 https://doi.org/10.11654/jaes.2018–1505

关注微信公众号，获得更多资讯信息

蒋亚, 吴道明, 周凯, 等. 生物炭联合亚硒酸钠对水稻生理特征及硒镉累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3053-3060.

JIANG Y, WU D M, ZHOU K, et al. Effects of biochar and sodium selenite combination on physiological characteristics and cadmium selenide accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3053-3060.

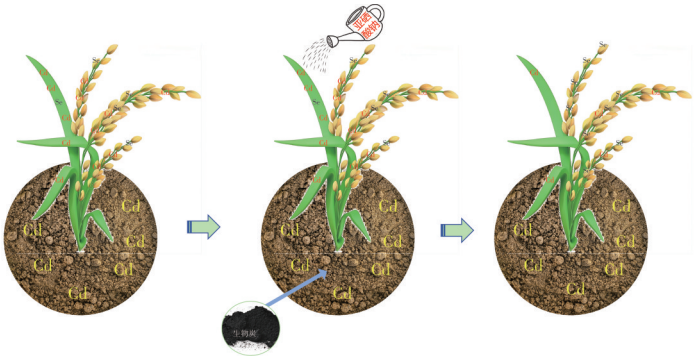
开放科学OSID

生物炭联合亚硒酸钠对水稻生理特征及硒镉累积的影响

蒋亚[1], 吴道明[2], 周凯[3], 王丽[1], 刘桂华[1], 柴冠群[1], 范成五[1*]

(1.贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006; 2.贵阳市乡村振兴服务中心, 贵阳 550081; 3.开阳县土壤肥料工作站, 贵阳 550300)

摘　要:为探究生物炭、亚硒酸钠不同施用方式对水稻籽粒降镉(Cd)增硒(Se)的效果,以荃9优801、宜香优2115和隆两优华占为研究对象,采用盆栽试验,研究了对照(CK,不施生物炭和亚硒酸钠)、单施生物炭(B,基施生物炭2 g·kg^{-1})、单施亚硒酸钠(S,叶面喷施亚硒酸钠8 mg·L^{-1})、生物炭和亚硒酸钠配施(BS,联合施用生物炭2 g·kg^{-1}和亚硒酸钠8 mg·L^{-1})对Cd胁迫下水稻产量、Se含量、Cd含量及生理特征的影响。结果表明:生物炭、亚硒酸钠不同施用方式能显著提高水稻产量并降低Cd含量。与CK相比,BS处理荃9优801、宜香优2115和隆两优华占的单株产量分别增加了74.45%、104.16%和92.41%,B处理增加了60.92%、82.69%和65.46%,S处理增加了33.43%、46.54%和35.01%;水稻籽粒Cd含量BS处理降低了58.09%、72.62%和51.56%,B处理降低了52.94%、53.57%和38.54%,S处理降低了36.76%、35.71%和23.96%。BS处理下荃9优801、宜香优2115和隆两优华占的水稻籽粒Se含量较CK分别增加了100.00%、70.77%和140.00%,B处理增加了2.27%、8.46%和12.00%,S处理增加了53.41%、26.92%和92.00%。不同施肥方式均可提高水稻叶片抗氧化酶活性,降低丙二醛含量,缓解Cd胁迫下脂膜过氧化伤害。研究表明,生物炭联合亚硒酸钠配施有利于促进水稻增产,降Cd增Se效果明显,能在一定程度上缓解Cd胁迫对水稻叶片的伤害。



关键词:生物炭;亚硒酸钠;镉;硒;水稻;抗氧化酶

中图分类号:S511;X503.231　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-2043(2025)12-3053-08　　doi:10.11654/jaes.2025-0086

Effects of biochar and sodium selenite combination on physiological characteristics and cadmium selenide accumulation in rice

JIANG Ya[1], WU Daoming[2], ZHOU Kai[3], WANG Li[1], LIU Guihua[1], CHAI Guanqun[1], FAN Chengwu[1*]

(1. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 2. Guiyang Rural Revitalization Service Centre, Guiyang 550081, China; 3. Kaiyang County Soil and Fertilizer Workstation, Guiyang 550300, China)

Abstract: This study was designed to examine the effects of different application methods of biochar and sodium selenite on reducing cadmium(Cd) and enriching selenium(Se) in rice grains, Quan 9 you 801, Yixiangyou 2115 and Longliangyouhuazhan were studied by pot

收稿日期:2025-01-24　　**录用日期:**2025-03-20

作者简介:蒋亚(1995—),女,贵州赫章县人,硕士研究生,研究方向为土壤重金属污染修复。E-mail:jy86313228@163.com

***通信作者:**范成五　E-mail:gzfcw@163.com

基金项目:贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑〔2023〕一般208,黔科合支撑〔2024〕一般106);贵州省农业科学院青年基金项目(黔农科青年基金〔2023〕31号);国家重点研发计划项目(2018YFD0800602)

Project supported: Science and Technology Support Program of Guizhou Province([2023]208,[2024]106); Foundation for Young of Guizhou Academy of Agricultural Sciences([2023]No.31); National Key Research and Development Program of China(2018YFD0800602)

experiment. It was conducted four treatments: no biochar and sodium selenite application (CK), single application of biochar (B, biochar 2 g·kg^{-1}), single application of sodium selenite (S, sodium selenite 8 mg·L^{-1}), and combined application of biochar and sodium selenite (BS, biochar 2 g·kg^{-1}+sodium selenite 8 mg·L^{-1}), to study the effects on yield, Se content, Cd content, and physiological characteristics under Cd stress. The results showed that different application methods of biochar and sodium selenite could significantly increase rice yield and reduce Cd content. Compared with CK, the yield per plant of Quan 9 you 801, Yixiangyou 2115 and Longliangyouhuazhan increased by 74.45%, 104.16%, and 92.41% respectively under BS treatment, 60.92%, 82.69%, and 65.46% under B treatment, and 33.43%, 46.54%, and 35.01% under S treatment. The Cd content in rice grains decreased by 58.09%, 72.62%, and 51.56% under BS treatment, 52.94%, 53.57%, and 38.54% under B treatment, 36.76%, 35.71%, and 23.96% under S treatment, respectively. The Se content increased by 100.00%, 70.77% and 140.00% under BS treatment, 2.27%, 8.46% and 12.00% under B treatment, 53.41%, 26.92% and 92.00% under S treatment, respectively. Different fertilization methods could increase the activity of antioxidant enzymes in rice leaves, decrease the content of malondialdehyde, and alleviate the damage of lipid membrane peroxidation under Cd stress. In conclusion, the combination of biochar and sodium selenite application is beneficial for promoting rice yield increase, reducing Cd and enriching Se, and can alleviate the damage of Cd stress on rice leaves.

Keywords: biochar; sodium selenite; cadmium; selenium; rice; antioxidant enzyme

在工业迅速发展的时代背景下，土壤重金属污染问题日益突出，有关研究表明，我国约1 000万hm^{2}的农田受到污染，333.3万hm^{2}的耕地因污染不宜耕种农作物，其中重金属是主要污染因素[1]。据2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，镉（Cd）污染点位超标率达7.0%，为首要污染物[2]，是农产品安全生产的限制因素之一。水稻是我国第一大粮食作物，较玉米、小麦、大豆、甘薯等作物更易吸收和积累Cd[3-6]，导致水稻可食部位Cd超标，危害人体健康。因此，有效的修复措施对水稻安全生产具有重要意义。

生物炭是一种具有微孔结构、孔径均匀、比表面积大的多孔隙固体材料，且有较强的吸附能力和较高的稳定性，对土壤中的Cd有较好的吸附作用[7]，能在一定程度上缓解Cd对作物生长的不利影响，有效抑制根部对土壤Cd的吸收，降低根部向地上部转运[8]。施用生物炭对Cd污染稻田生产出的稻米有明显的降Cd作用[9]。硒（Se）是人体必需的微量元素之一，缺Se会引发癌症、营养不良、克山病等健康问题。人体自身不能合成Se，富Se农产品是人体摄入Se的主要来源之一[10]。强化水稻Se营养对改善居民Se摄入水平具有重大意义。有研究发现，外源施Se是提高大米中Se含量的有效途径，且叶面施Se较土壤施Se具有操作简便、经济高效和二次污染风险低等诸多优点[11-13]。更为重要的是，Se与重金属Cd存在拮抗作用，施Se能通过竞争吸收位点形成Se-Cd复合物等机制，显著降低Cd活性，从而减少水稻对Cd的吸收与积累[14-18]。通过叶面施Se，既可提升水稻籽粒Se含量，又能降低Cd污染风险，达到“一施双效”，实现粮食安全与营养强化的协同提升。综上，施用生物炭、喷施Se肥均对稻米Cd含量有一定的降低作用，且喷施Se肥还能满足居民膳食Se营养需求，对保障粮食质量安全和推进功能农业发展具有双重价值。

目前，大量研究已经证实生物炭、Se肥单独施用对修复Cd污染土壤、降低稻米Cd含量具有积极作用，但这些研究多侧重于将改良剂、修复剂等直接施于土壤以实现控Cd降Cd的效果，而协同作用于土壤-作物系统的研究较少，且有关Se肥与生物炭耦合作用对水稻Cd累积效应的影响不甚清楚。基于此，本研究以开阳县3个主栽水稻品种为研究对象，采用盆栽试验方法，设置单施生物炭于土壤、单施Se肥于水稻叶片、两者配施协同作用于土壤-水稻等不同施用方式，探究生物炭、亚硒酸钠单独及联合处理对Cd胁迫下水稻生理特征及Se、Cd累积的影响，旨在为Cd污染稻田安全生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为荃9优801、宜香优2115和隆两优华占，均购自当地农资店；生物炭为玉米秸秆生物炭，碳含量为46.52%，购自河南达康净水材料有限公司；亚硒酸钠（Na_2SeO_3），含量≥99%，购自泰州聚丰源生物科技有限公司。

供试土壤采自贵州省贵阳市开阳县水稻土0~20 cm耕作层。土壤基本理化性质：pH 6.78，有机质22.9 g·kg^{-1}，全氮1.40 g·kg^{-1}，全磷0.77 g·kg^{-1}，全钾5.5 g·kg^{-1}，水解氮58.2 mg·kg^{-1}，有效磷1.0 mg·kg^{-1}，速效钾55.5 mg·kg^{-1}，总Cd 1.28 mg·kg^{-1}，有效Cd 0.313 mg·kg^{-1}，全硒0.63 mg·kg^{-1}。供试土壤中总Cd含量超

过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018）中Cd的筛选值（0.6 mg·kg^{-1}），为安全利用类稻田土壤。

1.2 试验设计

试验设置对照（CK，不施生物炭和亚硒酸钠）、单施生物炭（B，基施生物炭2 g·kg^{-1}）、单施亚硒酸钠（S，叶面喷施亚硒酸钠8 mg·L^{-1}）、生物炭和亚硒酸钠配施（BS，联合施用生物炭2 g·kg^{-1}和亚硒酸钠8 mg·L^{-1}）4个处理，每个处理3次重复。

试验于2023年4—9月在贵州省土壤肥料研究所大棚内进行。土壤经风干、研磨过10目筛后，充分混匀装入塑料盆（长100 cm、宽40 cm、高34 cm），每盆装土55 kg。生物炭及复合肥作基肥施用，复合肥（14-16-15）用量为14.85 g，生物炭用量为110 g，倒入土壤中充分拌匀，添加去离子水淹水老化两周，同时将长至四叶一心的水稻幼苗移栽至盆中，每盆移栽8株。拔节期每盆追施尿素2.75 g，待水稻抽穗期和灌浆期时叶面喷施亚硒酸钠各1次，以形成水滴且不落下为宜。水稻生长期间，定期定量用纯水浇灌，盆内土壤始终保持淹水状态。于水稻灌浆期喷施亚硒酸钠一周后采集叶片进行相关生理指标测定，成熟期收获水稻籽粒，测定产量后用纯水洗净，于105 ℃杀青30 min，65 ℃烘干至质量恒定，脱谷壳后（糙米）研磨过60目尼龙筛备用。

1.3 测定方法

水稻成熟期，选取6株水稻植株，自然风干后手工脱粒，清除杂质和空瘪粒，称量稻谷总质量，计算单株产量。水稻籽粒Cd、Se含量参照《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》（GB 5009.268—2016）测定。

水稻叶片超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）、谷胱甘肽过氧化物酶（GPx）活性及丙二醛（MDA）、脯氨酸（Pro）含量使用试剂盒分析，测定过程中严格按照试剂盒的说明书进行操作。

1.4 数据处理

数据均用Microsoft Excel 2016进行处理。用SPSS 26进行方差分析和相关性分析，多重比较采用Duncan法检验，采用Pearson系数分析数据间相关关系，绘图通过Origin 2024完成。

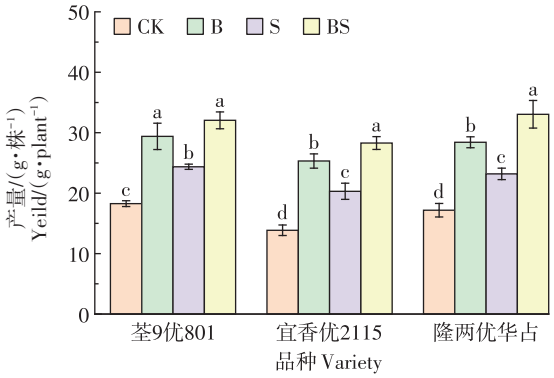
2 结果与分析

2.1 不同施肥方式对水稻产量的影响

不同施肥处理显著影响了水稻单株产量（$P<0.05$），结果见图1。不同水稻品种的产量均表现为BS>B>S>CK，且不同施肥方式间存在显著差异。荃9优801的BS、B、S处理的单株产量分别较CK增加了74.45%、60.92%、33.43%，宜香优2115增加了104.16%、82.69%、46.54%，隆两优华占增加了92.41%、65.46%、35.01%。这说明不同施肥方式均能提高水稻单株产量，其中BS产量最高，B次之。

2.2 不同施肥方式对水稻籽粒Cd含量的影响

不同施肥处理显著降低了水稻籽粒Cd含量（$P<0.05$），结果如图2所示。各品种Cd含量均表现为CK>S>B>BS，且均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》（GB 2762—2022）规定的糙米Cd含量限定值（0.2 mg·kg^{-1}）。荃9优801的BS、B、S处理的Cd含量分别较CK降低了58.09%、52.94%、36.76%，宜香优2115降低了72.62%、53.57%、35.71%，隆两优华占降低了51.56%、38.54%、23.96%。这说明B、S、BS均能



不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。
Different letters indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same below.

图1 不同处理对水稻单株产量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on the yield per plant of rice

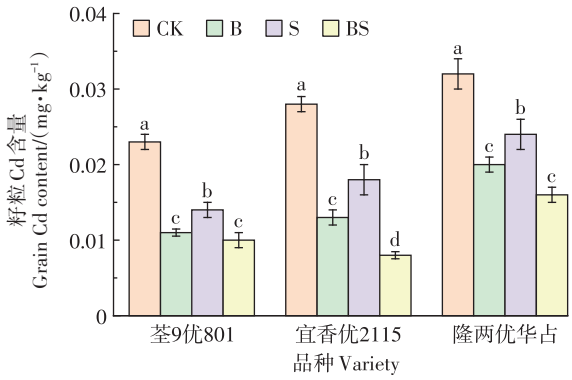


图2 不同处理对水稻籽粒Cd含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on the grain Cd content of rice

降低水稻籽粒Cd含量，其中BS降Cd效果最好。

2.3 不同施肥方式对水稻籽粒Se含量的影响

由图3可知，各品种BS、S处理水稻籽粒Se含量均显著高于B和CK处理（$P<0.05$），B和CK处理之间无显著差异（$P>0.05$）。茎9优801的BS、B、S处理的Se含量分别较CK增加了100.00%、2.27%、53.41%，宜香优2115增加了70.77%、8.46%、26.92%，隆两优华占增加了140.00%、12.00%、92.00%。结果表明，叶面喷施亚硒酸钠能促进水稻籽粒对Se的吸收，其中BS效果最为明显。

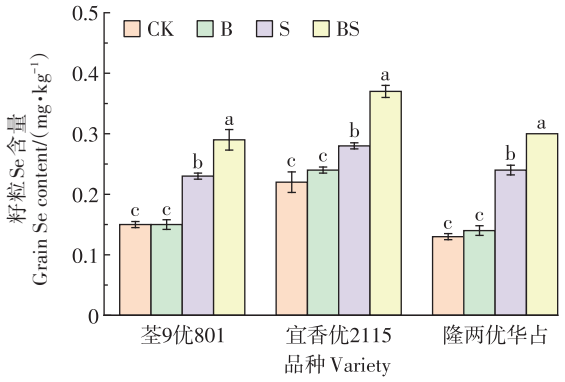


图3 不同处理对水稻籽粒Se含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on the grain Se content of rice

2.4 不同施肥方式对水稻叶片抗氧化酶活性的影响

如图4A、图4B、图4C所示，不同施肥方式对水稻叶片抗氧化酶活性有显著影响（$P<0.05$）。除BS处理的隆两优华占、宜香优2115的SOD活性，以及茎9优801、宜香优2115的POD活性与CK无显著差异外，各品种BS、B、S处理的SOD、CAT、POD活性均显著高于CK。B处理各酶活性均最高，茎9优801、宜香优2155、隆两优华占B处理的SOD活性分别较CK增加了60.05%、30.95%、53.33%，CAT活性增加了72.15%、67.43%、67.27%，POD活性增加了58.96%、69.19%、56.32%。结果表明，不同施肥方式均可提高水稻叶片的抗氧化酶活性，缓解Cd胁迫下脂膜过氧化伤害。

图4D结果表明，各品种BS、S处理的GPx活性均高于B、CK处理，B与CK处理间无显著差异。茎9优801的BS、S处理的GPx活性分别较CK显著增加了35.77%、86.42%，宜香优2155显著增加了36.43%、59.86%，隆两优华增加了45.43%、16.12%。综上可知，叶面喷施亚硒酸钠有助于水稻叶片GPx活性的提高。

2.5 不同施肥方式对水稻叶片Pro、MDA含量的影响

如图5所示，不同施肥方式显著影响了水稻叶

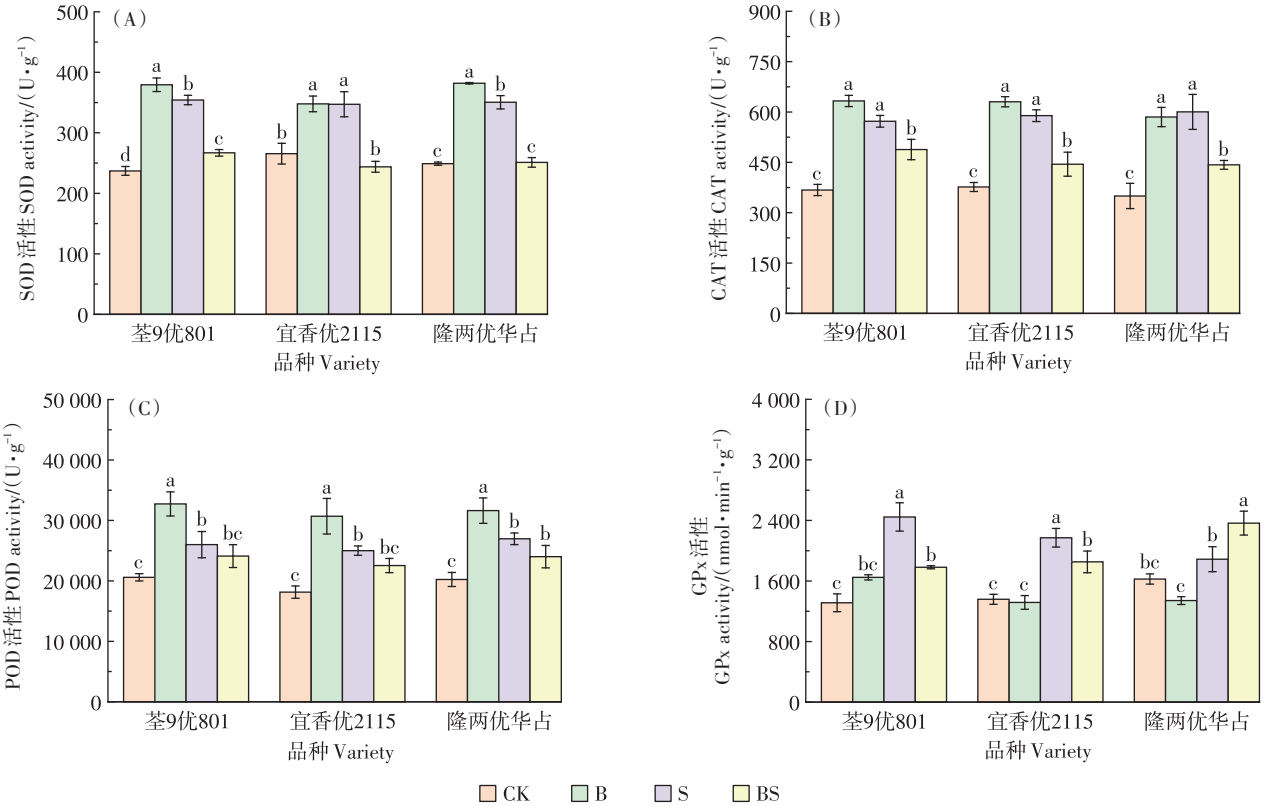


图4 不同处理对水稻叶片抗氧化酶活性的影响

Figure 4 Effects of different treatments on the activities of antioxidant enzymes in rice leaves

片Pro、MDA的含量（$P<0.05$）。BS、B、S处理水稻叶片Pro含量显著高于CK，BS与B处理间无显著差异，B处理最高，茎9优801、宜香优2155、隆两优华占分别较CK增加了47.01%、70.87%、67.74%。不同施肥方式水稻叶片MDA含量的变化趋势与Pro相反，各处理MDA含量显著低于CK，B处理最低，茎9优801、宜香优2155、隆两优华占分别较CK降低了52.46%、51.94%、58.49%。这说明BS、B、S处理能降低MDA含量，缓解Cd胁迫对水稻叶片的伤害。

2.6 相关性分析

水稻籽粒Se、Cd含量以及叶片生理特征的相关关系如图6所示。水稻籽粒Cd含量与Se含量呈显著负相关，与MDA含量呈显著正相关。水稻叶片MDA含量与SOD活性呈显著负相关，与CAT、POD活性和Pro含量呈极显著负相关。水稻叶片Pro含量与SOD、CAT、POD活性呈极显著正相关。

3 讨论

产量是反映作物生长、干物质积累等的重要指标。有研究指出，施用适量的Se可以促进植物生长，提高水稻[19]、小麦[20]等作物的产量，生物炭可以通过改善土壤通透性和提升有机质含量来增加水稻穗粒

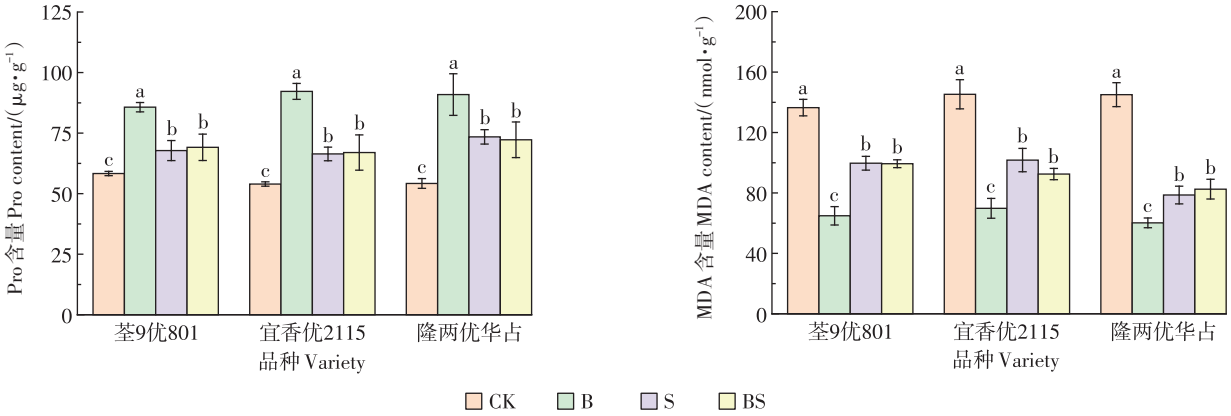
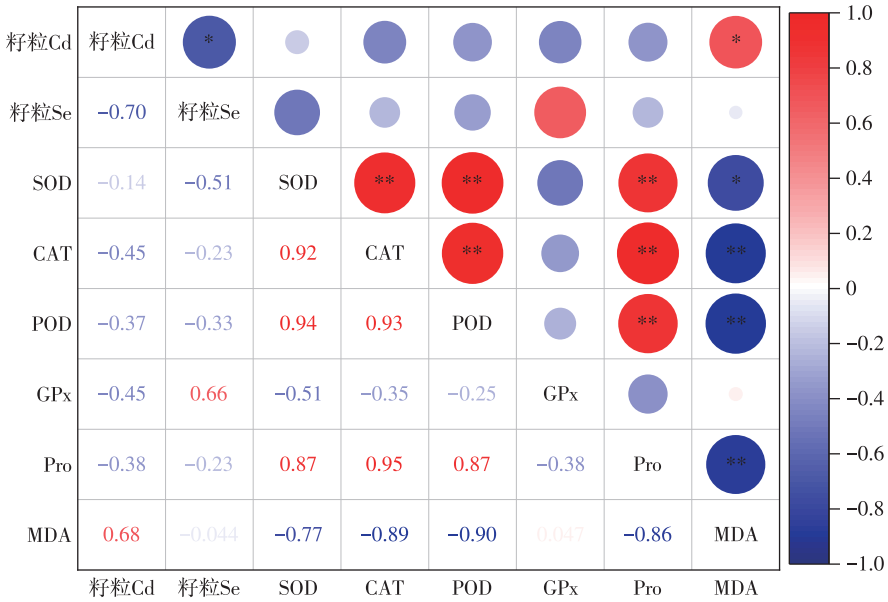


图5 不同处理对水稻叶片Pro、MDA含量的影响

Figure 5 Effects of different treatments on the Pro and MDA contents in rice leaves



“*”表示显著相关，“**”表示极显著相关。

“*” indicates significant correlation, and “**” indicates extremely significant correlation.

图6 水稻籽粒Se、Cd含量与叶片生理特征的相关性分析

Figure 6 Correlation analysis between Se and Cd contents in rice grains and physiological traits of leaves

数，进而增加产量[21]。本研究结果表明，单施生物炭、亚硒酸钠以及生物炭配施亚硒酸钠均能不同程度提高水稻单株产量，这与前人研究结果一致[22-23]。

Cd污染稻田会对水稻生长产生不利影响，稻米Cd含量与土壤Cd生物有效性及水稻对其吸收累积特性有关。本试验中，生物炭、亚硒酸钠不同施用方式均显著降低了水稻籽粒中的Cd含量，这与前人研究结果一致[24-26]。单施生物炭可降低稻米中的Cd含量是由于生物炭能吸附固定土壤溶液中部分Cd离子，降低土壤Cd有效性及其在土壤中的迁移转换，从而有效降低了水稻对土壤中Cd的吸收；叶面喷施亚硒酸钠则是由于Se、Cd存在拮抗作用，阻碍了水稻其他部位的Cd向水稻籽粒中转移，从而降低了稻米中的Cd含量。荆林晓[27]、韩熙等[28]和杨侨等[29]的研究指出，多种材料联合施用效果通常优于单一材料，这与本试验结果有所不同。本试验结果表明，除水稻品种宜香优2115外，其余两个水稻品种均表现为单施生物炭、生物炭配施亚硒酸钠两处理间稻米Cd含量无差异，这可能与水稻本身的遗传特性、生物炭吸附固定能力强等因素有关。在生物炭的作用下，荃9优801和隆两优华占积累的Cd含量已经下降到比较低的水平，此时Se的拮抗作用就不再明显；而宜香优2115在生物炭的作用下，Cd含量仍有下降空间，Se通过拮抗作用进一步降低了稻米Cd含量。这一结果也可侧面推断本试验条件下生物炭发挥了控Cd降Cd的主要作用。此外，本试验发现，所有处理水稻籽粒Cd含量均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)规定的糙米Cd含量限定值(0.2 mg·kg^{-1})，这可能是由于水稻整个生育期淹水，加上供试土壤pH值属于中性，土壤Cd有效性低，故水稻籽粒Cd含量均较低。

叶面喷施硒肥是增加水稻籽粒Se含量的有效方式[30]。本试验发现，叶面喷施亚硒酸钠、生物炭与亚硒酸钠联合施用均可显著提高水稻籽粒Se含量，这与前人研究发现叶面施硒肥提高了水稻对Se的吸收，增加了糙米中Se含量的结果一致[22,31]。《富硒稻谷》(GB/T 22499—2008)规定，富Se稻谷加工的大米Se含量应在0.04~0.30 mg·kg^{-1}，本试验所有处理水稻籽粒Se含量均明显高于其规定的最低值(0.04 mg·kg^{-1})，这可能是由于供试土壤Se含量背景值高，与贫Se土壤相比Se含量更高，水稻籽粒能吸收利用更多Se，说明在富Se地区提高稻米中Se含量是发展富Se水稻的有效措施[32]。此外，生物炭与亚硒酸钠联合施用的Se含量提升效果优于亚硒酸钠单独施用，但单独施用生物炭对水稻籽粒Se含量的影响不显著。这与前人研究得出的施加生物炭能提高土壤的pH，促进土壤Se的活化，提高Se的生物有效性[33-36]等结果不一致。这一方面可能是生物炭的吸附作用固定了部分有效Se，抵消了Se的活化作用。另一方面可能是施加生物炭能够促进水稻生长发育，增强养分吸收能力[37]，而叶面喷施亚硒酸钠能够为水稻提供充足的Se源，进而促进Se在水稻籽粒中的累积。

Cd胁迫对植物具有一定的毒害作用，对其正常生长发育产生不利影响，致使植物体内产生大量的自由基，造成过氧化损伤[38]。SOD、POD、CAT及GPx是植物体内重要的抗氧化酶，在清除自由基和过氧化物、抑制膜质过氧化等方面对植株起着重要的保护作用[39]。MDA是膜脂过氧化的最终分解产物，可反映细胞膜受伤害程度[40]。李继伟等[41]研究发现施用生物炭、硒肥可显著提高植株叶片中SOD、POD、CAT活性，降低MDA含量，本研究也得到类似结果，这说明生物炭和Se可通过调节植株叶片中抗氧化酶活性及MDA含量缓解Cd胁迫伤害，但单施生物炭、亚硒酸钠处理的抗氧化酶活性均高于生物炭联合亚硒酸钠施用的原因尚不明确，还有待进一步研究。Se是GPx的成分[39]，本研究发现，亚硒酸钠单施、生物炭联合亚硒酸钠配施均可提高GPx活性，这与前人研究结果一致[42-44]，说明Se可通过提高GPx活性，增强植株对Cd的抗性，缓解Cd对植株的毒害，从而促使植株正常生长。

4 结论

(1)生物炭、亚硒酸钠不同施用方式均能增加水稻产量，降低稻米Cd含量，同时提升Se含量，其中，以生物炭联合亚硒酸钠施用时增产、降Cd增Se效果最佳。

(2)生物炭、亚硒酸钠不同施用方式均能提高水稻叶片SOD、POD、CAT活性，降低MDA含量，缓解Cd胁迫对其产生的毒害作用。

参考文献：

[1] REN S Y, SONG C Q, YE S J, et al. The spatiotemporal variation in heavy metals in China′s farmland soil over the past 20 years: a Meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150322.

[2] WU Y F, LI X, YU L, et al. Review of soil heavy metal pollution in China: spatial distribution, primary sources, and remediation alternatives[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 181: 106261.

[3] SUI F Q, CHANG J D, TANG Z, et al. *Nramp5* expression and functionality likely explain higher cadmium uptake in rice than in wheat and maize[J]. *Plant and Soil*, 2018, 433(1):377-389.

[4] LIN Q, HAMID Y, YANG H J, et al. Cadmium mobility and health risk assessment in the soil-rice-human system using *in vitro* biaccessibility and *in vivo* bioavailability assay: two year field experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 867:161564.

[5] 李铭红, 李侠, 宋瑞生. 受污农田中农作物对重金属镉的富集特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3):675-679. LI M H, LI X, SONG R S. Cadmium accumulation in crops grown in polluted farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3):675-679.

[6] 张蕾, 吴隆坤, 李博骞, 等. 农作物镉积累的品种差异及其机理研究进展[J]. 北方园艺, 2017(2):184-190. ZHANG L, WU L K, LI B Q, et al. Research progress on difference of Cd accumulating pattern and its mechanism among crop varieties[J]. *Northern Horticulture*, 2017(2):184-190.

[7] 薛江鹏, 蔡吉祥, 李有文, 等. 生物炭及其复合材料的制备及对镉的吸附研究进展[J]. 炭素技术, 2024, 43(4):11-17. XUE J P, CAI J X, LI Y W, et al. Research progress in the preparation and cadmium adsorption performance of biochar and its composites[J]. *Carbon Techniques*, 2024, 43(4):11-17.

[8] 付彦博, 冷冰冰, 扁青永, 等. 生物炭和油菜幼苗对土壤重金属镉污染的钝化效应[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(6):183-190. FU Y B, LENG B B, BIAN Q Y, et al. Passivation effect of biochar on soil cadmium pollution and rape growth[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(6):183-190.

[9] BIAN R J, CHEN D, LIU X Y, et al. Biochar soil amendment as a solution to prevent Cd-tainted rice from China: results from a cross-site field experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58:378-383.

[10] 徐琴, 王孟, 谢义梅, 等. 施硒对水稻外观品质及籽粒硒、镉和砷含量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(5):135-140. XU Q, WANG M, XIE Y M, et al. Effect of selenium application on appearance quality, grain selenium, cadmium and arsenic content in rice[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(5):135-140.

[11] 孙星, 易琼, 唐拴虎, 等. 水稻硒营养研究进展[J]. 土壤通报, 2023, 54(1):223-231. SUN X, YI Q, TANG S H, et al. Review on selenium nutrition research in rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(1):223-231.

[12] 张城铭, 周鑫斌. 不同施硒方式对水稻硒利用效率的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(1):186-194. ZHANG C M, ZHOU X B. Effects of different selenium application methods on Se utilization efficiency of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1):186-194.

[13] 蒋雄英, 莫千持, 蒋云伟, 等. 2种施硒方式对水稻硒吸收及分布的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(1):123-128. JIANG X Y, MO Q C, JIANG Y W, et al. Effects of two selenium application methods on the absorption and distribution of selenium in rice[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(1):123-128.

[14] WAN Y N, 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, 133:127-134.

[15] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒Cd、Cu和Se的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3):112-115. LI Z W, ZHANG Y L, PAN G X, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(3):112-115.

[16] LIN L, ZHOU W H, DAI H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235:343-351.

[17] 梁程, 林匡飞, 张雯, 等. 不同浓度硫处理下硒镉交互胁迫对水稻幼苗的生理特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):857-866. LIANG C, LIN K F, ZHANG W, et al. Effects of sulfur and selenium treatment on plant growth and some physiological characteristics of rice under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):857-866.

[18] 刘春梅, 罗盛国, 刘元英. 硒对镉胁迫下寒地水稻镉含量与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1):190-199. LIU C M, LUO S G, LIU Y Y. Effects of Se on Cd content and distribution in rice plant under Cd stress in cold climate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1):190-199.

[19] ZHANG M, TANG S H, HUANG X, et al. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 107:39-45.

[20] NAWAZ F, AHMAD R, ASHRAF M Y, et al. Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 113:191-200.

[21] 王红越, 宋玉凤, 肖辉, 等. 生物炭配合深翻对稻田土壤性质及水稻产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(1):120-127. WANG H Y, SONG Y F, XIAO H, et al. Effects of rice husk biochar combined with deep tillage on properties of soil in paddy fields and yield of rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2025, 44(1):120-127.

[22] 郑晶, 鲍广灵, 陶荣浩, 等. 基施与叶面施硒肥对富硒镉污染农田水稻降镉增硒的效应[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5):974-982. ZHENG J, BAO G L, TAO R H, et al. Effects of basal and foliar selenium fertilizers in reducing cadmium and increasing selenium in selenium-enriched, cadmium-polluted rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5):974-982.

[23] 马林杰, 张诚信, 覃宝利, 等. 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(9):1623-1632. MA L J, ZHANG C X, QIN B L, et al. Effects of straw and biochar returning on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility in a rice-crayfish integrated system[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 40(9):1623-1632.

[24] 黄雁飞, 陈桂芬, 黄玉溢, 等. 田间条件下不同钝化剂对水稻镉吸收累积的影响及其时效性[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4):787-798. HUANG Y F, CHEN G F, HUANG Y Y, et al. Effects of different passivating agents on cadmium uptake and accumulation in rice and its timeliness under field conditions[J]. *Journal of Agro-*

Environment Science, 2023, 42(4):787-798.

[25] 李翔, 杨驰浩, 刘晔, 等. 钝化剂对农田土壤Cd有效性及不同水稻品种吸收Cd的研究[J]. 环境工程, 2021, 39(9):211-216. LI X, YANG C H, LIU Y, et al. Effect of passivators on Cd availability in farmland soil and Cd uptake by different rice varieties[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(9):211-216.

[26] 徐境懋, 顾明华, 韦燕燕, 等. 纳米硒和亚硒酸盐对镉污染土壤中水稻镉积累的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(10):2727-2734. XU J M, GU M H, WEI Y Y, et al. Effects of nano-selenium and sodium selenite application on cadmium accumulation in rice planting in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(10):2727-2734.

[27] 荆林晓. 重金属污染土壤的有机-无机复合体原位钝化修复技术研究[D]. 济南:山东师范大学, 2009. JING L X. Study on immobilization remediation technology for heavy metal contaminated soil by organic - inorganic complex[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2009.

[28] 韩熙, 张锡洲, 余海英. 钝化材料复配对土壤Cd生物有效性的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10):2884-2891. HAN X, ZHANG X Z, YU H Y. Effects of compounds of passivation materials on bioavailability of Cd in soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(10):2884-2891.

[29] 杨侨, 赵龙, 孙在金, 等. 复合钝化剂对污灌区镉污染农田土壤的钝化效果研究[J]. 应用化工, 2017, 46(6):1037-1041. YANG Q, ZHAO L, SUN Z J, et al. Study on passivation effects of multi-passivators on the cadimium (Cd) contaminated soils in sewage irrigation area[J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, 46(6):1037-1041.

[30] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(10):4119-4125. HU Y, HUANG Y Z, HUANG Y C, et al. Effect of selenium on the uptake and translocation of manganese, iron, phosphorus and selenium in rice(*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(10):4119-4125.

[31] 朱春弟, 朱泯亦, 沈兴连, 等. 叶面喷施富硒水溶肥对水稻产量及稻米含硒量的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(1):115-118. ZHU C D, ZHU M Y, SHEN X L, et al. Effects of spraying foliar selenium fertilizer on yield and selenium content in rice[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(1):115-118.

[32] WU Z L, BAÑUELOS G S, LIN Z Q, et al. Biofortification and phytoremediation of selenium in China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6:136.

[33] 马迅, 诸旭东, 宗良纲, 等. 不同调控措施对酸性富硒土壤硒有效性及水稻产量性状的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2):284-290. MA X, ZHU X D, ZONG L G, et al. Effects of mixed application of calcium magnesium phosphate and aminoacid foliar fertilizer on Se availability in acid Se-rich soil and on trait of rice yield[J]. *Soils*, 2018, 50(2):284-290.

[34] 周鑫斌, 于淑慧, 谢德体. pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(5):1069-1077. ZHOU X B, YU S H, XIE D T. Effects of pH and three kinds of anions on selenium absorption and desorption in purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5): 1069-1077.

[35] 严佳, 宗良纲, 杨旎, 等. 不同pH条件和P-Se交互作用对茶园土壤Se(Ⅳ)吸附行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):935-942. YAN J, ZONG L G, YANG N, et al. Effects of pH and phosphate on Se(Ⅳ) adsorption by tea garden soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):935-942.

[36] EICH-GREATOREX S, SOGN T A, ØGAARD A F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(3):221-231.

[37] KUMAR H, GANESAN S P, SANG H, et al. Exploring relations between plant photochemical quantum parameters and unsaturated soil water retention for biochars and pith amended soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 804:150251.

[38] ZHOU J, ZHANG C, DU B Y, et al. Soil and foliar applications of silicon and selenium effects on cadmium accumulation and plant growth by modulation of antioxidant system and Cd translocation: comparison of soft *vs*. durum wheat varieties[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402:123546.

[39] 刘锦嫦, 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. LIU J C, XIONG S L, MA S, et al. Interactive effects of selenite and arsenite on physiological characteristics and accumulation of arsenic and selenium in rice seedlings[J]. *Journal of Agro - Environment Science*, 2018, 37(3):423-430.

[40] 邹峁雁, 韩昊展, 谢永娟, 等. 玉米种子发芽生理和抗氧化系统对砷胁迫响应的基因型差异及其机制研究[J]. 核农学报, 2021, 35(4):969-979. ZOU M Y, HAN H Z, XIE Y J, et al. Genotypic differences of arsenic stress in germination physiology and antioxidant system of maize seeds[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(4):969-979.

[41] 李继伟, 悦飞雪, 王艳芳, 等. 施用生物炭和AM真菌对镉胁迫下玉米生长和生理生化指标的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(5):120-129. LI J W, YUE F X, WANG Y F, et al. Effects of biochar amendment and arbuscular mycorrhizal inoculation on maize growth and physiological biochemistry under cadmium stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(5):120-129.

[42] 刘俊美, 单长卷. 硒对镉胁迫下玉米幼苗生理特性的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45(3):1-5. LIU J M, SHAN C J. Effects of selenium on physiological characteristics of maize seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(3):1-5.

[43] 张庆, 魏树和, 代惠萍, 等. 硒对茶树镉毒害的缓解作用研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(1):200-204. ZHANG Q, WEI S H, DAI H P, et al. The alleviating effects of selenium on cadmium-induced toxicity in tea leaves[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44(1):200-204.

[44] KHAN M I R, NAZIR F, ASGHER M, et al. Selenium and sulfur influence ethylene formation and alleviate cadmium-induced oxidative stress by improving proline and glutathione production in wheat[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 173:9-18.

(责任编辑:潘淑君)