施硒对不同镉污染土壤当季及后茬水稻镉吸收转运的影响

周靖恒, 张泉, 刘波, 马天池, 黄道友, 朱奇宏, 许超, 朱捍华

引用本文:
周靖恒, 张泉, 刘波, 马天池, 黄道友, 朱奇宏, 许超, 朱捍华. 施硒对不同镉污染土壤当季及后茬水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 724–732.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0790

周靖恒, 张泉, 刘波, 等. 施硒对不同镉污染土壤当季及后茬水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 724-732.
ZHOU J H, ZHANG Q, LIU B, et al. Effects of selenium fertilization on cadmium uptake and transport in rice crop in different cadmium-contaminated soils during two consecutive seasons[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4): 724-732.

施硒对不同镉污染土壤当季及后茬水稻镉吸收转运的影响

周靖恒[1,2], 张泉[1], 刘波[1], 马天池[1,2], 黄道友[1], 朱奇宏[1], 许超[1], 朱捍华[1*]

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘　要: 为探讨施硒对当季和后茬水稻镉吸收转运的影响,本研究选取基本性质相似的中、重度镉污染稻田土壤为对象,采取盆栽试验的方法,研究不同施硒量(0.5、1.0、2.0、4.0 mg·kg^{-1})对当季及后茬水稻各部位镉与硒含量的影响,并探讨其作用机理。结果表明:中度镉污染稻田土壤仅施硒2.0 mg·kg^{-1}处理使当季稻米镉含量降低28.6%(P<0.05);施硒对重度镉污染土壤当季稻米镉含量均有降低作用,其中施硒1.0 mg·kg^{-1}处理的降镉效果显著,镉含量降低36.1%(P<0.05);施硒处理使两种土壤后茬稻米镉含量显著降低30.9%~50.7%(P<0.05)。适量施硒(1.0、2.0 mg·kg^{-1})使当季水稻镉TF$_{茎/根}$降低21.5%~28.3%(P<0.05),而对后茬水稻镉转运则无显著影响。中、重度镉污染土壤施硒,可增加当季和后茬水稻植株各部位硒含量,硒含量增幅随施硒量增加而增加。稻米镉富集系数随稻米硒含量增加呈自然对数降低(P<0.05)。中度镉污染土壤施硒0.5 mg·kg^{-1}、重度镉污染土壤施硒≤1.0 mg·kg^{-1}时,当季和后茬稻米硒含量均低于1.0 mg·kg^{-1}。研究表明,施硒可通过降低水稻镉吸收而有效降低后茬稻米镉含量,但适宜的施硒量仍需田间验证确定。

关键词: 稻田土壤;镉;硒;当季水稻;后茬水稻;转运系数

中图分类号: X53;X173　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1672-2043(2023)04-0724-09　doi:10.11654/jaes.2022-0790

Effects of selenium fertilization on cadmium uptake and transport in rice crop in different cadmium-contaminated soils during two consecutive seasons

ZHOU Jingheng[1,2], ZHANG Quan[1], LIU Bo[1], MA Tianchi[1,2], HUANG Daoyou[1], ZHU Qihong[1], XU Chao[1], ZHU Hanhua[1*]

(1.Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Changsha 410125, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A pot experiment, with four rates of selenium (Se) concentration (0.5, 1.0, 2.0 mg·kg^{-1} and 4.0 mg·kg^{-1}), was conducted to investigate the effects of Se fertilization on the absorption and transport mechanisms of cadmium (Cd) in rice during two consecutive seasons under moderately and severely Cd contaminated soils. The Cd and Se contents in rice plant tissues were determined. The results showed that the Cd content of the current season rice grain decreased by 28.6% only when Se dose was 2.0 mg·kg^{-1} under moderately Cd contaminated paddy soil. However, the Cd content of rice under severely Cd polluted soil decreased by 36.1% only when the dose of Se was 1.0 mg·kg^{-1}. The Cd content of rice grains of the subsequent season significantly decreased by 30.9%-50.7% in each Se treatment. Application of 1.0 mg·kg^{-1} and 2.0 mg·kg^{-1} Se in the current season rice significantly reduced the transfer coefficient of Cd from roots to shoots by 21.5%-28.3%, with no significant effect on Cd transport in the rice crop during the subsequent season. The Se content in all parts

收稿日期: 2022-08-03　**录用日期:** 2022-11-03
作者简介: 周靖恒(1996—),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为农业土壤环境污染与修复。E-mail:zhoujingheng20@mails.ucas.ac.cn
***通信作者:** 朱捍华　E-mail:hhzhu@isa.ac.cn
基金项目: 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2020NK2001);国家麻类产业技术体系生态与土壤管理岗位项目(CARS-16-E09)
Project supported: High Technology Industry S&T Innovation Leading Project of Hunan Province (2020NK2001); The Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-16-E09)

of rice plants under moderately and severely Cd contaminated soils during the current and subsequent seasons increased with Se application rate. With the increase of Se content, the Cd enrichment coefficient of rice grain significantly decreased when the natural logarithm was used. When the Se dose was 0.5 mg·kg^{-1} in moderately Cd contaminated soil and ≤1.0 mg·kg^{-1} in severely Cd contaminated soil, the Se content in rice of the current and the subsequent seasons was less than 1.0 mg·kg^{-1}. Therefore, Se application can effectively reduce the Cd content in subsequent rice by reducing Cd uptake by the rice crop, but the appropriate Se application level still needs to be confirmed under field conditions.

Keywords: paddy soil; cadmium; selenium; current season rice; subsequent season rice; transfer coefficient

我国耕地土壤镉(Cd)污染问题较突出,已严重威胁到食品安全、粮食安全和人体健康[1]。据《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤镉点位超标率为7.0%,耕地土壤镉点位超标率位居第一,且主要分布在南方稻作区。我国稻米镉含量超过国家《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)的比例高达10%,稻米镉超标问题已引起全社会的广泛关注[2]。基于我国人多地少与粮食安全压力大的现实,镉污染稻田安全利用策略是当前的必然选择[3]。通过优化施肥等农艺措施阻控水稻对镉的吸收和积累被认为是一项较为经济有效且易推广的技术措施[4]。硒(Se)是人体必需且对水稻有益的微量元素,具有抗氧化与增强免疫力等多种功能[5]。我国超过70%的稻米硒含量低于人体的需求水平[6],低浓度硒可缓解镉胁迫,这使水稻"富硒降镉"成为可能[7-8]。因此,施硒降镉成为具有推广前景的安全利用技术。

近年来,研究者在外源施硒降低水稻镉积累方面已开展了大量工作,证实外源施硒能缓解镉对水稻植株的生物毒害,并可显著降低水稻对镉的吸收与积累[9-10]。如在全镉含量为0~8 mg·kg^{-1}的土壤上种植的水稻,其稻米镉含量随施硒量的增大而逐渐降低,最大降幅可达31.5%,稻米硒含量则逐渐增加,最大增幅达3倍[11]。硒可通过减少植物体内的自由基从而减轻镉对植物的毒害[12],施硒可改变镉在水稻根系细胞中的分配,从而降低其向地上部的转运[13]。低硒施用能降低菠菜叶中镉含量,但施硒量>2.0 mg·kg^{-1}时会使菠菜叶中镉含量上升[14]。施硒降镉效果不稳定,同时食品中硒安全范围非常窄,稻田硒施用还需要探寻适用范围,但目前的相关研究主要集中在施硒的当季效应,少有对后茬水稻种植镉积累的探讨。因此,亟待开展稻田施硒降镉的适宜浓度与水稻连作的后续效果研究,以优化完善镉污染稻田施硒降镉技术。

为此,本研究选取中、重度镉污染稻田土壤,对比分析不同浓度外源硒对当季与后茬水稻镉吸收转运以及稻米硒富集的影响,探究硒的适宜施用浓度,为镉污染稻田水稻安全生产提供科学技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验在中国科学院长沙农业环境观测研究站盆栽试验场(长沙县北山镇)开展,实施时间为2017年7月至2018年7月。该试验站位于中亚热带季风气候区,年均降雨量1 358.6 mm,年均气温17.1 ℃,最冷月(1月)平均气温5.0 ℃,最热月(7月)平均气温29.4 ℃。供试土壤采集于湖南省长沙县北山镇(28°22′~28°27′N,112°58′~113°05′E)长期耕种的稻田,该稻田的镉污染主要来自附近20世纪90年代末关停的化工厂。2种供试土壤均为发育于花岗岩风化物的麻沙泥,酸性强,土壤有机质与养分水平较高(表1),根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),2种土壤分别属于中度与重度镉污染土壤。供试水稻品种:早稻为株两优189,由湖南希望种业科技有限公司选育;

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the tested soils

土壤 Soil	pH	有机质 Organic matter/(g·kg^{-1})	全氮 Total N/(g·kg^{-1})	全磷 Total P/(g·kg^{-1})	全钾 Total K/(g·kg^{-1})	全镉 Total Cd/(mg·kg^{-1})	全硒 Total Se/(mg·kg^{-1})
中度镉污染土壤 Moderately Cd contaminated soil	4.94	60.48	2.31	0.85	36.42	1.33	0.43
重度镉污染土壤 Severely Cd contaminated soil	5.18	45.91	2.03	0.96	43.99	2.62	0.56

晚稻为H优518，由湖南农业大学和湖南省衡阳市农业科学研究所选育。试验选用的硒为亚硒酸钠，纯度为99%，生产厂家为山东西亚化学工业有限公司。

1.2 试验设计

盆栽试验设置5个处理，分别施硒0、0.5、1.0、2.0、4.0 mg·kg^{-1}（风干土基），每个处理4次重复，随机区组排列。

试验用塑料盆直径为25 cm、高为20 cm，每盆装风干土5 kg，可满足多季试验需要。供试土壤装盆前，将土壤铺于塑料布上，将不同浓度亚硒酸钠溶液均匀地喷洒在土壤中；同时按照N 150 mg·kg^{-1}、P_2O_5 100 mg·kg^{-1}、K_2O 100 mg·kg^{-1}的用量施入基肥；混合均匀后装入盆中，其后不再施用硒肥。淹水平衡3 d后，按照每盆3株移栽第一季水稻秧苗。在第二季水稻种植前，参照第一季水稻肥料用量添加氮、磷、钾肥，同样搅拌均匀、淹水平衡3 d后，移栽秧苗。两季水分管理均为淹水5 cm，待盆中表土无明水时补充水分至淹水5 cm；病虫草害防治等参照当地田间水稻管理方式。

1.3 样品采集与分析

在当季（2017年11月初）和后茬（2018年7月初）水稻成熟期，分别单独采集全部水稻植株样品（残留部分根茬），植株样品用去离子水清洗干净后分为根、茎、叶和籽粒，使用DCB（Dithionite-Citrate-Bicarbonate）提取液提取根表吸附的元素，将脱壳籽粒、根、茎、叶烘干用破碎机打成粉末后待测。同时，利用小型土钻（直径2 cm）采用梅花五点法采集0~20 cm土壤样品200 g。土壤样品充分混匀，自然风干，研磨过20目筛，用于测定土壤pH和提取态镉含量；采用棋盘多点法选取约50 g过20目筛的土壤样品，将其研磨至全部通过100目筛，用于测定土壤全镉、全硒、全氮、全磷、全钾和有机质等指标。

土壤pH值采用pH计（上海雷兹pHs-3C pH计）测定，土水比为1∶2.5。土壤氮、磷、钾与有机质等按照《土壤农化分析》[15]测定。土壤有效态镉采用0.01 mol·L^{-1} $CaCl_2$提取法测定：土液比为1∶5，溶液于25 ℃、160 r·min^{-1}下振荡2 h后经定量滤纸过滤，利用电感耦合等离子体光谱发生仪（ICP-OES 5110，美国安捷伦）测定滤液中的镉含量。

水稻植株样品各部位镉含量测定：称取0.200 0 g水稻样品于消解管中，加入硝酸-过氧化氢（8∶1）混合酸微波消解[16]，消解液移入25 mL比色管定容，定量滤纸过滤，采用电感耦合等离子体发射质谱仪（ICP-MS，Varian，美国）测定滤液中镉含量。水稻样品硒含量测定：称取0.500 0 g水稻样品于50 mL三角瓶中，加入硝酸-高氯酸（4∶1）的混合酸10 mL进行消解，消解液移入25 mL比色管定容，定量滤纸过滤，使用原子荧光光度计（AFS-830）测定滤液中硒含量。在土壤与植株样品检测分析过程中，采用空白对照、样品2次重复、标准曲线校正等进行数据质量控制。

水稻各部位间的镉转运系数（Transport coefficient，TF）是评价镉从植物地下部向地上部运输能力的指标，由水稻植株相邻部位平均镉含量（mg·kg^{-1}）的比值表征。稻米镉富集系数（Bioaccumulation factor，BCF）是评价植物对镉富集程度高低或富集能力强弱的指标，由稻米镉含量（mg·kg^{-1}）与土壤镉含量（mg·kg^{-1}）的比值表征。

1.4 数据处理

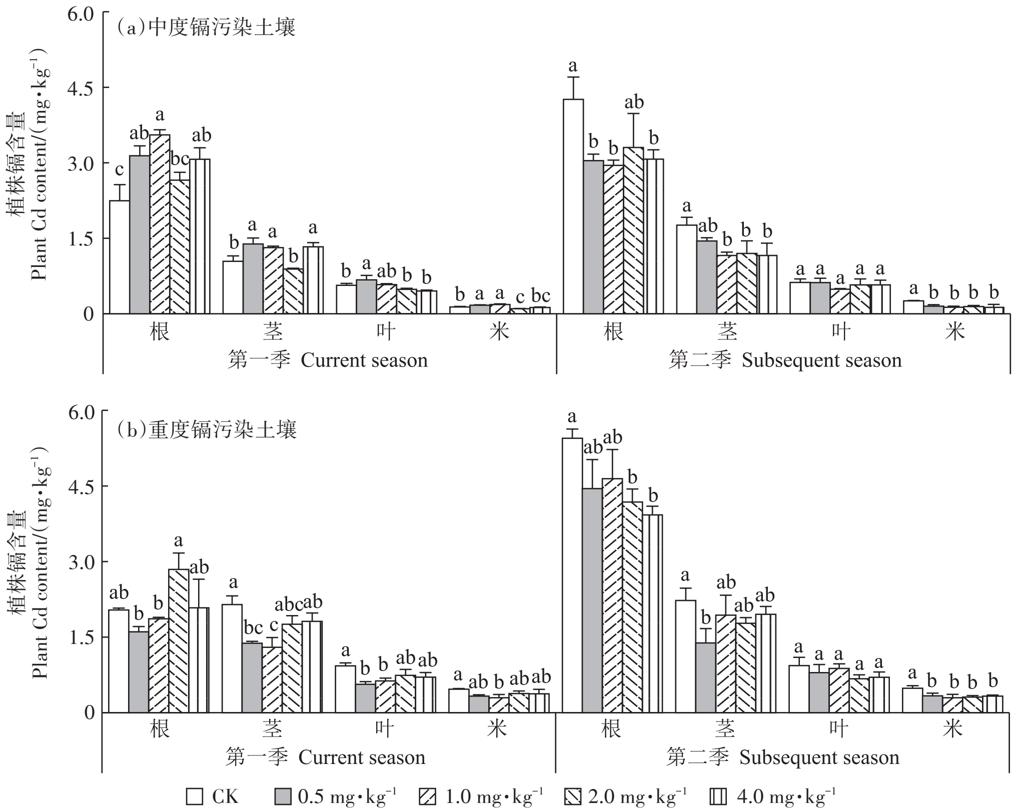
利用Excel 2010进行数据整理与制图，数据以平均值±标准误差表示。不同处理间各指标的差异分析利用SPSS 22.0软件采用多重比较和最小极差法（LSD）进行统计分析，采用Pearson相关和非线性回归等方法进行指标间的关系评价。

2 结果与分析

2.1 施硒对植株各部位镉含量的影响

中度镉污染土壤各处理水稻植株不同部位镉含量均表现为根>茎>叶>米（图1a），表明水稻主要通过根系吸收镉，并向上运输。在第一季水稻中，除2.0 mg·kg^{-1}硒处理外，其余硒处理均显著增加了根与茎中的镉含量；仅2.0 mg·kg^{-1}硒处理使米镉含量显著降低28.6%（P<0.05），尽管0.5 mg·kg^{-1}和1.0 mg·kg^{-1}硒处理使米镉含量增加了25.6%和35.2%（P<0.05），但其含量仍然低于食品安全国家标准限量值（≤0.2 mg·kg^{-1}，GB 2762—2017）。在第二季水稻中，施硒处理对水稻多部位镉含量有显著降低效果。其中，0.5、1.0、4.0 mg·kg^{-1}硒处理与对照相比使根镉含量显著降低27.9%~30.8%（P<0.05）；茎镉在≥1.0 mg·kg^{-1}硒处理下显著降低31.9%~34.3%（P<0.05）；各处理间叶镉含量无显著差异（P>0.05）；各施硒处理均显著降低了米镉含量，降幅为41.2%~50.7%（P<0.05），且米镉含量由对照组的0.26 mg·kg^{-1}均降低到食品安全国家标准限量值以下。

重度镉污染土壤上的水稻各部位镉含量同样呈现出根>茎>叶>米的规律（图1b）。在第一季水稻中，与对照相比，各施硒处理对根镉含量无显著影响；0.5



不同小写字母表示同季同土壤各处理间差异显著（P<0.05）；数据为平均值±标准误差。下同。

Different letters indicate significant differences between treatments for each rice season for the same soil（P<0.05）. Data are presented with mean±standard error（SE）. The same below.

图1　水稻各部位镉含量

Figure 1　Cd contents in different tissues of rice

mg·kg^{-1}和1.0 mg·kg^{-1}硒处理茎镉含量降低35.8%和39.5%（P<0.05），叶镉含量降低39.5%和32.2%（P<0.05）；米镉含量在各硒处理下均呈下降趋势，但仅1.0 mg·kg^{-1}硒处理米镉含量显著降低，降幅为36.1%（P<0.05）。在第二季水稻中，与对照相比，2.0 mg·kg^{-1}和4.0 mg·kg^{-1}硒处理使根镉含量降低23.2%和27.9%（P<0.05），0.5 mg·kg^{-1}硒处理使茎镉含量降低37.9%（P<0.05）；各施硒处理叶镉含量均呈降低趋势，但差异不显著；各施硒处理米镉含量均显著降低，降幅为30.9%~38.7%，其中1.0 mg·kg^{-1}硒处理降镉效果最好。

2.2　施硒对水稻镉转运系数的影响

对于中度镉污染土壤第一季水稻，≤2.0 mg·kg^{-1}各施硒处理镉$TF_{茎/根}$呈现出随硒施用量增加而降低的趋势，其中1.0 mg·kg^{-1}和2.0 mg·kg^{-1}硒处理使$TF_{茎/根}$显著降低21.5%与28.3%（P<0.05，图2a）。与对照相比，仅4.0 mg·kg^{-1}硒处理下$TF_{米/茎}$和$TF_{叶/茎}$显著降低了30.8%和40.1%（P<0.05）。对于第二季水稻，虽然各施硒处理对水稻多部位镉含量有显著降低效果，但是波动较大，致使各处理间的水稻不同部位转运系数差异不显著（图1a和图2a）。

对于重度镉污染土壤第一季水稻，施硒对$TF_{茎/根}$的影响与中度镉污染土壤相似，1.0 mg·kg^{-1}和2.0 mg·kg^{-1}硒处理$TF_{茎/根}$降低达34.0%和41.5%（P<0.05），说明适量施硒可有效降低镉从水稻根部向茎部的转运（图2b），但硒施用对$TF_{米/茎}$与$TF_{叶/茎}$没有显著影响。对于第二季水稻，施硒对水稻不同部位镉转运系数的影响与中度镉污染土壤相似，施硒处理与对照相比各部位镉转运系数均无显著差异。

2.3　施硒对植株各部位硒含量的影响

施硒1.0~4.0 mg·kg^{-1}可显著增加水稻各部位的硒含量，且硒含量随施硒量的增大而增加（图3）。对于中度镉污染土壤第一季水稻，与对照相比，0.5 mg·kg^{-1}硒处理使根硒含量增加到4倍（P<0.05，图3a），而茎、叶和米的硒含量无显著增加；1.0~4.0 mg·kg^{-1}硒处理使根、茎、叶和米的硒含量显著增加到7~26、7~29、5~28、25~93倍（P<0.05）。对于第二季水稻，各施硒处理使，根、茎、叶和米的硒含量显著增加到2~13、5~

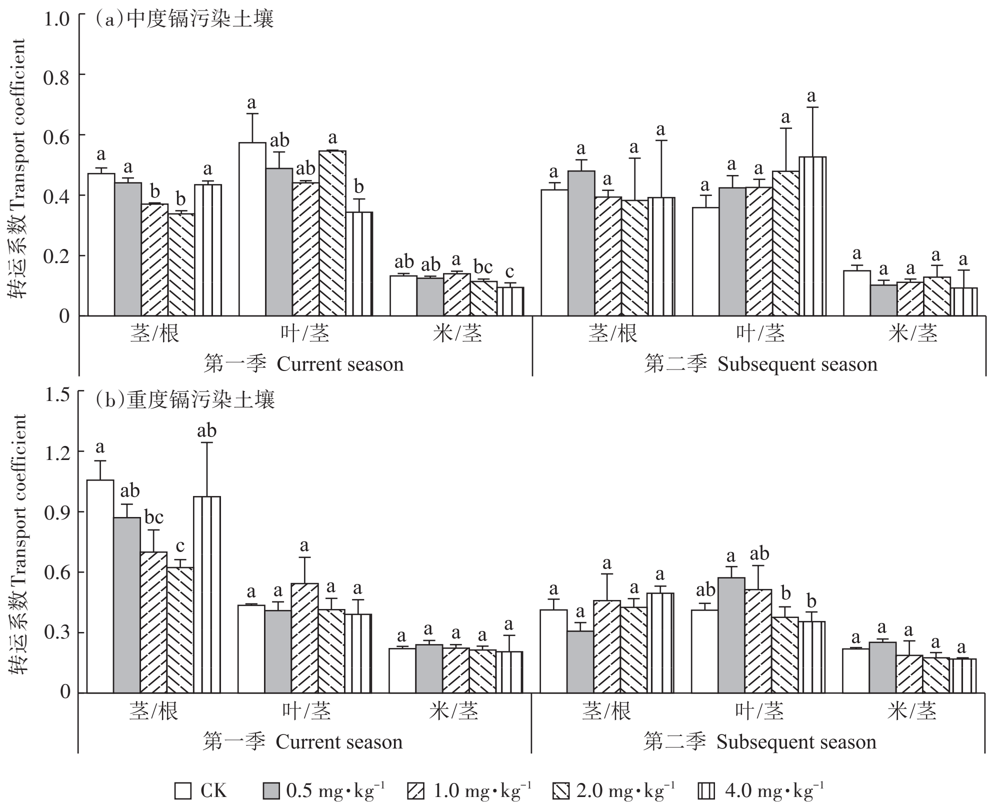


图2 施硒对水稻镉转运系数的影响

Figure 2 Effects of Se fertilization on the Cd transport coefficient of rice

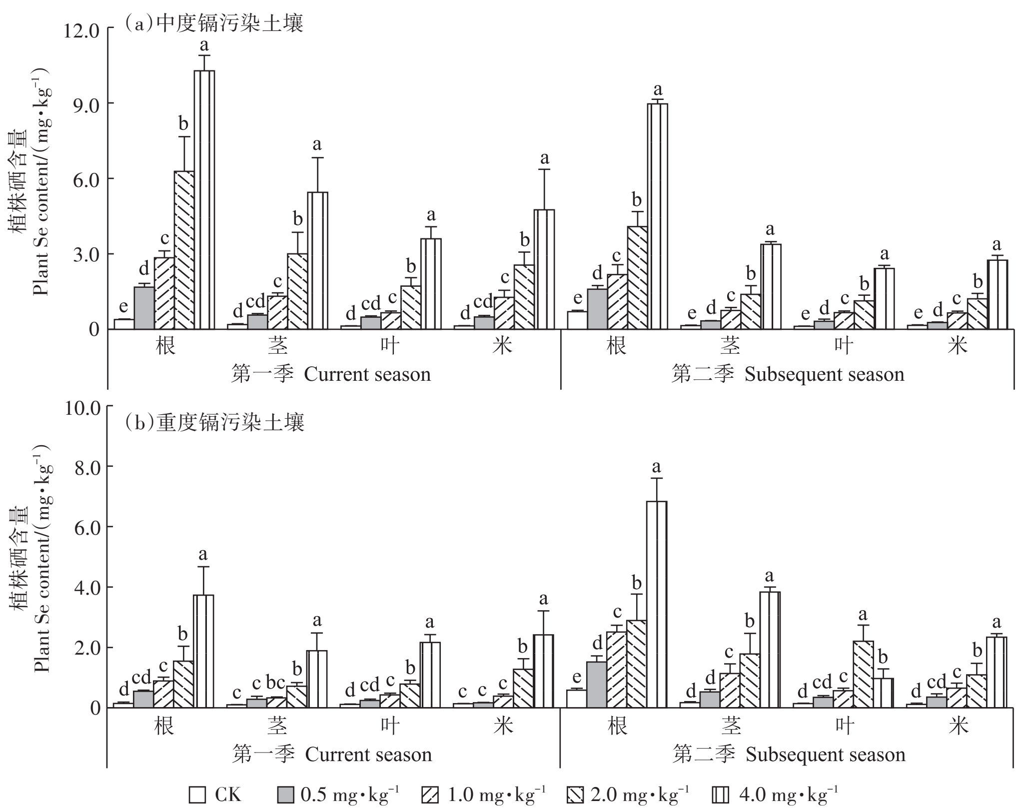


图3 施硒对植株各部位硒含量的影响

Figure 3 Effects of Se fertilization on Se content in different parts of rice

54、9~72、4~40倍（P<0.05）。

对于重度镉污染土壤第一季水稻，与对照相比，1.0~4.0 mg·kg^{-1}硒处理使根和叶的硒含量增加到6~26倍和4~19倍（P<0.05，图3b）；2.0~4.0 mg·kg^{-1}硒处理使茎和米的硒含量增加到7~19倍和20~38倍（P<0.05）。对于第二季水稻，0.5~4.0 mg·kg^{-1}硒处理使根硒含量增加到3~12倍（P<0.05）；1.0~4.0 mg·kg^{-1}硒处理使茎、叶、米的硒含量分别增加到7~23、4~7、6~21倍（P<0.05）。

鉴于硒是人体必需且对水稻有益的微量元素、我国超过70%的稻米硒含量低于人体需求水平、《食品安全国家标准 食品中污染物限量》自2013年取消对硒的强制性限量要求，本文参照我国南方最新《富硒农产品硒含量要求》[T/HNFX 001—2017（V01）]，稻米硒含量应≤1.0 mg·kg^{-1}。中度镉污染土壤施硒量为1.0 mg·kg^{-1}时，稻米硒含量为0.66~1.27 mg·kg^{-1}，部分超过限量值；施硒量>1.0 mg·kg^{-1}时稻米硒含量为1.21~4.75 mg·kg^{-1}，均超过限量值；而施硒0.5 mg·kg^{-1}时稻米硒含量为0.27~0.49 mg·kg^{-1}，均未超标，说明此类土壤施硒量不宜超过0.5 mg·kg^{-1}（图3a）。对于重度镉污染土壤，施硒量≤1.0 mg·kg^{-1}时稻米硒含量为0.17~0.65 mg·kg^{-1}，均未超标，说明此类土壤施硒量不宜超过1.0 mg·kg^{-1}（图3b）。

2.4 施硒对土壤pH和有效态镉的影响

中度镉污染土壤仅4.0 mg·kg^{-1}施硒处理的pH与对照相比在第一季显著降低0.13个单位（P<0.05），其他施硒处理土壤pH和有效态镉含量在第一季和第二季均与对照无显著差异（表2）。重度镉污染土壤仅0.5 mg·kg^{-1}与2.0 mg·kg^{-1}施硒处理与对照相比在第一季显著提高土壤pH 0.14~0.22个单位（P<0.05），0.5 mg·kg^{-1}施硒处理土壤有效态镉含量显著降低21.1%（P<0.05）；而仅2.0 mg·kg^{-1}施硒处理在第二季使土壤有效态镉含量显著提高9.7%（P<0.05）。从整体来看，施硒对土壤pH和有效态镉含量无显著影响，但土壤pH与有效态镉含量在不同季别间存在显著差异。与第一季相比，第二季中度、重度镉污染土壤pH分别降低0.16~0.43、0.44~0.59个单位，土壤有效态镉含量分别增加62.2%~76.7%、48.8%~87.5%。

表2 土壤pH与有效态镉含量

Table 2 Soil pH and available Cd content

处理Treatment			pH	有效态镉Available Cd/(mg·kg^{-1})
中度镉污染土壤 Moderately Cd contaminated soil	第一季 Current season	CK	5.03±0.01a	0.23±<0.01a
		0.5 mg·kg^{-1}	5.06±0.04a	0.23±0.02a
		1.0 mg·kg^{-1}	5.02±0.02a	0.24±0.02a
		2.0 mg·kg^{-1}	5.05±0.05a	0.24±0.01a
		4.0 mg·kg^{-1}	4.90±0.04b	0.23±0.02a
	第二季 Subsequent season	CK	4.68±0.05a	0.39±0.02a
		0.5 mg·kg^{-1}	4.69±0.07a	0.41±0.05a
		1.0 mg·kg^{-1}	4.67±<0.01a	0.41±0.01a
		2.0 mg·kg^{-1}	4.62±0.07a	0.39±<0.01a
		4.0 mg·kg^{-1}	4.74±0.05a	0.39±0.03a
重度镉污染土壤 Severely Cd contaminated soil	第一季 Current season	CK	5.21±0.03c	0.76±0.03a
		0.5 mg·kg^{-1}	5.43±0.03a	0.60±0.09b
		1.0 mg·kg^{-1}	5.30±0.03bc	0.70±0.05ab
		2.0 mg·kg^{-1}	5.35±0.03ab	0.68±0.08ab
		4.0 mg·kg^{-1}	5.23±0.01c	0.76±0.06a
	第二季 Subsequent season	CK	4.75±0.03ab	1.14±0.09bc
		0.5 mg·kg^{-1}	4.86±0.04a	1.13±0.07bc
		1.0 mg·kg^{-1}	4.86±0.05a	1.11±0.06c
		2.0 mg·kg^{-1}	4.69±0.05b	1.25±0.08a
		4.0 mg·kg^{-1}	4.64±0.06b	1.23±0.05ab

注：不同小写字母表示同季同土壤各处理间差异显著（P<0.05）；数据为平均值±标准误差。

Note: Different letters indicate significant differences between treatments for each rice season for the same soil（P<0.05）. Data are presented with mean±standard error（SE）.

2.5 稻米镉富集系数与硒含量的关系

为进一步探讨施硒对稻米积累镉的影响，分季别分析了稻米镉富集系数与其硒含量的关系（图4）。相关性分析显示，稻米镉富集系数与其硒含量呈负相关关系，第一季水稻Pearson相关系数为-0.37（$P<0.05$，$n=40$），第二季水稻相关系数为-0.54（$P<0.01$，$n=40$）。回归分析显示，稻米镉富集系数随其硒含量的增加呈自然对数降低，且第二季的降低速率明显大于第一季。这说明施硒可通过增加水稻硒吸收与稻米硒积累降低稻米镉的积累，且该作用在第二季更强。

3 讨论

本研究探讨了施用不同浓度硒对中、重度镉污染稻田土壤当季与后茬水稻镉吸收转运的影响。两季水稻各部位镉含量均呈现根>茎>叶>米的规律（图1），这与以往的研究结果一致[17]，说明本研究中水稻植株镉主要来自土壤，并从根系向上部转运。土壤施硒可影响水稻根系镉吸收和不同部位间的镉转运系数，进而影响稻米镉含量，且对当季和后茬水稻的作用程度不同（图1和图2），该作用值得深入研究探讨。

在当季水稻中，中、重度镉污染土壤施硒1.0、2.0 mg·kg^{-1}使镉$TF_{茎/根}$降低21.5%~28.3%，在施硒量增加到4.0 mg·kg^{-1}时镉$TF_{茎/根}$反弹至对照水平（图2）。这说明镉污染稻田土壤适量施硒可有效降低镉由根向茎的转运。徐境懋等[18]的研究表明，在镉污染土壤中施硒（2.5 mg·kg^{-1}）能有效抑制镉从水稻根系向地上部转运并降低籽粒镉积累，从而缓解镉毒害，这与本研究结果基本一致。硒能使根系非蛋白巯基物质（NPT）含量增加，NPT能钝化细胞镉并将其转运到液泡中储存[19-20]，使硒更多地停留在根中。此外适量施硒可抑制*OsIRT1*、*OsIRT2*、*OsLCT1*和*OsNramp5*等水稻镉转运基因的表达[21-22]，从而降低了镉向上运输，这能解释当季水稻中$TF_{茎/根}$的下降。而高硒时转运系数反弹可能是外源施硒过多，加强了植物区隔化机制，而此机制会使根系吸收的重金属多数转运到地上部分贮存，因而带动镉向地上部转运，使地上部镉含量增加[23-24]。然而，在季别和水稻品种的综合影响下，施硒对后茬水稻不同部位镉转运无显著影响。

在本研究中，中度镉污染土壤施硒2.0 mg·kg^{-1}时当季稻米镉含量显著降低28.6%，而其他施用量下稻米镉含量无显著降低，但均低于0.2 mg·kg^{-1}；重度镉污染土壤在施硒下当季稻米镉含量呈降低趋势，其中施硒1.0 mg·kg^{-1}使稻米镉含量显著降低36.1%；而中、重度镉污染土壤施硒0.5~4.0 mg·kg^{-1}均降低后茬稻米镉含量，降幅为30.9%~50.7%（图1）。通常土壤适量施硒可显著增加水稻各部位的硒含量。在本研究中，1.0~4.0 mg·kg^{-1}硒处理使根、茎、叶和米硒含量显著增加2.3~93.1倍（$P<0.05$，图3）；且稻米镉富集系数与其硒含量呈对数降低关系（图4），说明适量施硒可有效降低稻米镉累积。但本研究中度镉污染土壤当季水稻降镉效果不佳，而后茬降镉效果良好，这与前期研究并不一致[25]。这可能与不同水稻品种对硒的响应存在一定差异有关，如施硒0.4 mg·kg^{-1}时，早籼788稻米镉含量降低23.5%[26]；而施硒0.5 mg·kg^{-1}时，宜香99E-4稻米镉含量仅降低17.3%[19]。万亚男[13]的研究表明，亚硒酸盐的添加会增加水稻幼苗根系对镉的吸收能力，长时间培养下降低了根系对镉的吸收与向上转运过程。本研究中当季水稻可能在亚硒酸盐施用下根系镉吸收能力增强较多，使根系镉含量升高（图1），致使当季稻米降镉效果较差。受季节交替与前茬植株根系分泌物等的影响，后茬土壤pH比前茬明显降低、有效态镉含量明显增加（表2），施硒处理不同部位镉转运系数无显著变化（图2），但后茬水稻根系镉含量整体降低、稻米镉含量均显著降低

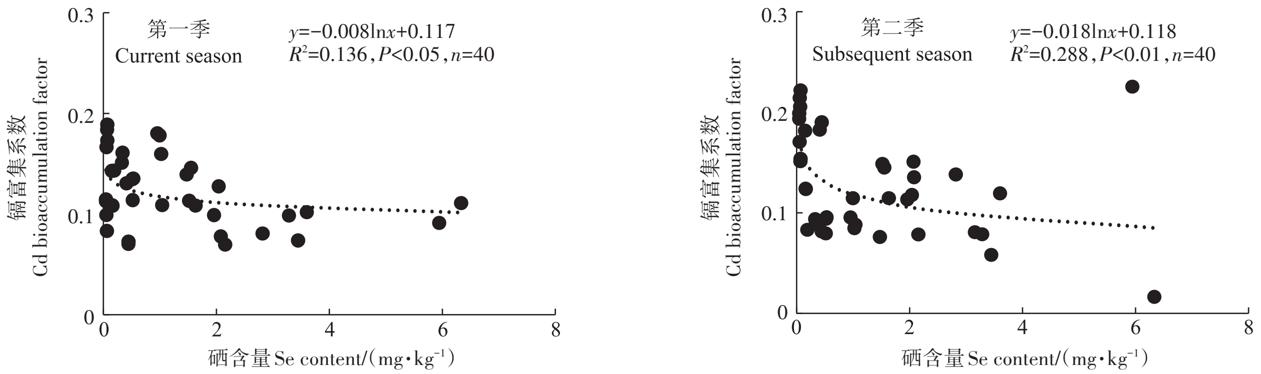


图4 稻米镉富集系数与其硒含量的关系

Figure 4 Relationship of Cd bioaccumulation factor with Se concentration in brown rice grain

(图1)，说明镉污染水稻土施硒主要是通过降低根系对镉的吸收从而显著降低后茬稻米镉累积。这主要是由于施用的亚硒酸盐可快速被土壤吸附，且在酸性(pH 4.5~5.0)条件下$HSeO_3^-$形态比例高[27]，有利于农作物吸收，进而对后茬稻米有很好的降镉效果。另外，前茬作物油菜可显著减少后茬水稻对镉、铅的吸收，进而显著降低后茬水稻秸秆与籽粒中镉、铅含量[28]，这与本研究结果一致。值得注意的是，不同施硒量下，后茬稻米镉含量无显著差异，因此可结合经济因素来降低土壤施硒量。

整体上，施硒对土壤pH和有效态镉含量无显著影响，但后茬土壤pH明显低于当季，土壤有效态镉含量则明显高于当季(表2)。一方面，作物生长期间，根系不断吸收K^+等碱基离子并向根际释放有机酸，致使土壤酸化。如程晨等[29]进行伴矿景天与水稻轮作时发现第二季土壤pH显著低于第一季，可能是因为第一季根际分泌的有机酸降低了土壤pH。另一方面，后茬水稻移栽前的氮磷钾肥施加也对土壤pH有降低效果[30]。土壤有效镉含量与土壤pH呈负相关关系[31]，后茬土壤pH明显降低，土壤酸化加重致使其镉活性增强。

目前我国70%的稻米硒含量水平低下，施硒降镉技术仍有较大推广应用空间，人体适量摄入硒能提高免疫力，但过量摄入会导致器官损伤[32]。在推行施硒降镉技术时，需考虑土壤本身硒含量及其有效性，谨防稻米硒含量超出安全阈值。本研究中，中度镉污染土壤施硒0.5 mg·kg^{-1}、重度镉污染土壤施硒≤1.0 mg·kg^{-1}时，稻米硒含量为0.17~0.65 mg·kg^{-1}，参照《富硒农产品硒含量要求》(≤1.0 mg·kg^{-1})，以上处理硒含量均未超标(图3)。因此，中度镉污染土壤施硒量不宜超过0.5 mg·kg^{-1}，而重度镉污染土壤施硒量不宜超过1.0 mg·kg^{-1}。值得注意的是，增硒降镉效果受土壤理化性状与水稻品种等因素影响[19]，且盆栽与田间条件存在一定差异，应针对不同土壤类型与水稻品种进一步开展多点、长期田间试验，验证并确定适宜且经济安全的施硒用量。

4 结论

(1)中、重度镉污染稻田土壤适量施硒，可降低当季水稻根镉向茎的转运，中度镉污染稻田土壤米镉含量虽然增加但仍低于食品安全国家标准限量值。

(2)中、重度镉污染稻田土壤适量施硒，可降低后茬水稻根和米的镉含量，使中度镉污染稻田土壤米镉含量降至食品安全国家标准限量值以下。

(3)中度镉污染土壤施硒0.5 mg·kg^{-1}、重度镉污染土壤施硒≤1.0 mg·kg^{-1}时，当季和后茬稻米硒含量均低于1.0 mg·kg^{-1}，但适宜施硒量仍需田间验证确定。

参考文献：

[1] 周莉, 郑向群, 丁永祯, 等. 农田镉砷污染防控与作物安全种植技术探讨[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4)：613-619. ZHOU L, ZHENG X Q, DING Y Z, et al. Probes of prevention and control of farmland pollution by cadmium & arsenic and crop production safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4)：613-619.

[2] 彭鸥, 铁柏清, 叶长城, 等. 稻米镉关键积累时期研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3)：272-279. PENG O, TIE B Q, YE C C, et al. The key period of cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3)：272-279.

[3] 黄道友, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6)：1030-1043. HUANG D Y, ZHU Q H, ZHU H H, et al. Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6)：1030-1043.

[4] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(5)：2469-2478. XIA W J, ZHANG L F, LIU Z B, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5)：2469-2478.

[5] 王波, 张然然, 杨如意, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12)：2710-2718. WANG B, ZHANG R R, YANG R Y, et al. Effect of exogenous selenium(Se)and Se-tolerant bacterium on the growth, physiology, and Se and cadmium(Cd)accumulation in rice(*Oryza sativa* L.) grown under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12)：2710-2718.

[6] 黄青青, 刘艺芸, 徐应明, 等. 叶面硒肥与海泡石钝化对水稻镉硒累积的影响[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(4)：116-120. HUANG Q Q, LIU Y Y, XU Y M, et al. Immobilization using foliar applications of Se and Se combined with sepiolite：effects on Cd and Se accumulation in rice[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(4)：116-120.

[7] SUN H W, HA J, LIANG S X, et al. Protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(10)：1195-1204.

[8] 刘达, 涂路遥, 赵小虎, 等. 镉污染土壤施硒对植物生长及根际镉化学行为的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3)：999-1005. LIU D, TU L Y, ZHAO X H, et al. Effect of selenium application to the cadmium-polluted rhizosphere on plant growth and chemical behavior of cadmium[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(3)：999-1005.

[9] 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.

[10] 张祎雯, 董畅茹, 刘小强, 等. 硒对水稻吸收转运镉、砷和汞影响机制的研究进展[J]. 生物学杂志, 2021, 38(5)：101-109. ZHANG Y

W, DONG C R, LIU X Q, et al. Research on effects of selenium on the uptake and transfer of Cd, As and Hg in rice[J]. *Journal of Biology*, 2021, 38(5):101-109.

[11] 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.

[12] KUMAR M, BIJO A J, BAGHEL R S, et al. Selenium and spermine alleviate cadmium induced toxicity in the red seaweed *Gracilaria dura* by regulating antioxidants and DNA methylation[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 51:129-138.

[13] 万亚男. 硒对水稻吸收、转运及累积镉的影响机制[D]. 北京:中国农业大学, 2018. WAN Y N. Effects of selenium on absorption, transport and accumulation of cadmium in rice[D]. Beijing:China Agricultural University, 2018.

[14] 郭锋, 樊文华, 冯两蕊, 等. 硒对镉胁迫下菠菜生理特性、元素含量及镉吸收转运的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2):524-531. GUO F, FAN W H, FENG L R, et al. Effects of selenium(Se) on the physiological characteristics, element contents, uptake and transportation of Cd in spinach under Cd stress[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2):524-531.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[16] ZHANG Q, CHEN H F, HUANG D Y, et al. Water managements limit heavy metal accumulation in rice: dual effects of iron-plaque formation and microbial communities[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 687:790-799.

[17] FENG X M, HAN L, CHAO D Y, et al. Ionomic and transcriptomic analysis provides new insight into the distribution and transport of cadmium and arsenic in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 331(5):246-256.

[18] 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.

[19] 庞晓辰, 王辉, 吴泽嬴, 等. 硒对水稻镉毒性的影响及其机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 42(4):2024-2030. PANG X C, WANG H, WU Z Y, et al. Alleviation by selenium of cadmium toxicity to rice and its mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 42(4):2024-2030.

[20] ANDRES S, PETER S, THOMAS T, et al. Cadmium induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in Scots pine roots[J]. *Plant Physiology*, 2001, 127(3):887-898.

[21] CUI J H, LIU T X, LI Y D, 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.

[22] 马卉, 焦小雨, 许学, 等. 水稻重金属镉代谢的生理和分子机制研究进展[J]. 作物杂志, 2020(1):1-8. MA H, JIAO X Y, XU X, et al. Advances in physiological and molecular mechanisms of cadmium metabolism in rice[J]. *Crops*, 2020(1):1-8.

[23] 李影, 王友保. 4种蕨类草本植物对Cu的吸收和耐性研究[J]. 草业学报, 2010, 19(3):191-197. LI Y, WANG Y B. Research on Cu uptake and tolerance of four pteridophyta plants[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(3):191-197.

[24] 胡斌, 王丹, 王松山, 等. 铜、硒复合污染对小白菜生长及金属吸收和转运的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9):2033-2041. HU B, WANG D, WANG S S, et al. Uptake and transport of exogenous Cu and Se in *Pak choi* and their effects on growth[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9):2033-2041.

[25] HU Y, NORTON G J, DUAN G L, 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.

[26] 李虹颖, 唐杉, 王允青, 等. 硒对水稻镉含量及其在亚细胞中的分布的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2):320-326. LI H Y, TANG S, WANG Y Q, et al. Effects of selenium on cadmium content and subcellular distribution in rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):320-326.

[27] 施卫明. 硒从土壤到植物的吸收运输途径[EB/OL].(2021-02-05)[2022-10-24]. https://baijiahao. baidu. com / s? id=1690786250475965496. SHI W M. Absorption and transport of selenium from soil to plants[EB/OL].(2021-02-05)[2022-10-24]. https://baijiahao. baidu. com/s?id=1690786250475965496.

[28] 吴飞龙, 苏德纯. 油菜连作及施用堆肥对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4):658-662. WU F L, SU D C. Phytoavailability and speciation of cd in contaminated soil after repeated croppings of oilseed rapes and amended with compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):658-662.

[29] 程晨, 高文娅, 胡鹏杰, 等. 植物吸取修复及钝化处理对后茬水稻镉吸收的影响[J]. 土壤, 2017, 49(3):476-481. CHENG C, GAO W Y, HU P J, et al. Effects of plant uptake restoration and passivation treatment on cadmium uptake in subsequent rice[J]. *Soil*, 2017, 49(3):476-481.

[30] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5):953-960. ZHAO J, FENG W Q, QIN Y S, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):953-960.

[31] YU H Y, LIU C P, ZHU J S, et al. Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: the effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 209(2):38-45.

[32] 杨贝贝. 地质高背景区硒、镉在土壤-水稻系统中的迁移及人体健康风险研究[D]. 合肥:安徽大学, 2020. YANG B B. Study on the migration of selenium and cadmium in soil-rice system and the human health risk in a high geological background area[D]. Hefei: Anhui University, 2020.

（责任编辑:李丹）