

## 施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作Cd吸收转运的影响

曹阳, 李撑娟, 王辉, 代允超, 孙本华, 张东明, 王晓晶, 吕家珑

### 引用本文:

曹阳, 李撑娟, 王辉, 代允超, 孙本华, 张东明, 王晓晶, 吕家珑. 施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作Cd吸收转运的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(2): 319-326.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0730>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 不同钝化剂及其组合对玉米(*Zea mays*)生长和吸收Pb Cd As Zn影响研究

杜彩艳, 木霖, 王红华, 严婷婷, 程在全, 曾民, 段宗颜, 雷梅, 罗红梅

*农业环境科学学报*. 2016, 35(8): 1515-1522 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0579>

#### 小麦秸秆生物质炭对旱地土壤铅镉有效性及小麦、玉米吸收的影响

左静, 陈德, 郭虎, 王静波, 隋凤凤, 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉

*农业环境科学学报*. 2017, 36(6): 1133-1140 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1655>

#### 不同来源生物质炭对水稻镉锌吸收积累的影响

申小刚, 张阿凤, 叶雪珠, 陈德, 张棋, 赵首萍, 肖文丹, 伍少福

*农业环境科学学报*. 2023, 42(1): 65-75 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0279>

#### 不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究

袁兴超, 李博, 朱仁凤, 药栋, 湛方栋, 陈建军, 祖艳群, 何永美, 李元

*农业环境科学学报*. 2019, 38(4): 807-817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0672>

#### 钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

*农业环境科学学报*. 2019, 38(3): 563-572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹阳, 李撑娟, 王辉, 等. 施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作 Cd 吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 319–326.

CAO Y, LI C J, WANG H, et al. Effects of passivating agents and foliar fertilizers on cadmium uptake and transport in wheat-maize rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(2): 319–326.



开放科学 OSID

# 施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作 Cd 吸收转运的影响

曹阳<sup>1</sup>, 李撑娟<sup>2</sup>, 王辉<sup>2</sup>, 代允超<sup>1</sup>, 孙本华<sup>1</sup>, 张东明<sup>1</sup>, 王晓晶<sup>1</sup>, 吕家珑<sup>1\*</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省咸阳市土壤肥料工作站, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:**为研究施加钝化剂、叶面肥对大田小麦-玉米轮作 Cd 吸收转运的影响, 实现安全利用类耕地农作物的安全生产, 通过大田轮作试验的方式, 选用小麦秸秆生物炭、钙镁磷肥为土壤钝化剂, 叶面硒肥为叶面阻隔剂, 在田间共设置 6 个处理: 小麦和玉米常规种植(CK)、基施生物炭(B)、基施钙镁磷肥(P)、叶面喷施硒肥(F)、叶面喷施硒肥的同时基施生物炭(BF)、叶面喷施硒肥的同时基施钙镁磷肥(PF)。小麦和玉米成熟后对其籽粒、秸秆、根系 3 部分的 Cd 含量进行检测, 并对耕地土壤的 pH 值、有效态 Cd、全量 Cd 进行测定。结果表明: 与 CK 处理相比, 小麦和玉米各处理土壤 pH 值有不同程度的升高, 其中 B 处理和 BF 处理会显著提升土壤 pH 值; 小麦和玉米各处理土壤中全量 Cd 无明显变化; P 处理和 PF 处理可显著降低土壤有效态 Cd 含量。与 CK 处理相比, 各处理农作物籽粒中 Cd 含量均有不同程度的降低, 且叶面阻隔联合土壤钝化技术(BF、PF)的效果更好。较 CK 处理, PF 处理小麦和玉米籽粒 Cd 含量下降最明显, 降幅分别为 39.91%、43.51%, BF 处理小麦和玉米籽粒 Cd 含量分别下降了 22.58%、33.53%, F、B 处理和 P 处理变化较小, 降低效果表现为 B 处理 < F 处理 < P 处理。较 CK 处理, PF 处理小麦和玉米秸秆到籽粒的 Cd 转运系数分别下降了 38.81%、38.40%, 而 B 处理小麦和玉米秸秆到籽粒的 Cd 转运系数仅分别下降了 13.37%、17.52%。研究表明, 叶面阻隔联合土壤钝化技术, 尤其是叶面喷施硒肥联合基施钙镁磷肥能更有效地降低 Cd 向小麦和玉米籽粒的吸收转运, 该技术可在中轻度 Cd 污染的小麦-玉米轮作区农田土壤上推广应用。

**关键词:** 大田; 小麦玉米轮作; 中轻度 Cd 污染; 安全利用; 吸收转运

中图分类号: X173; S512.1; S513 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)02-0319-08 doi:10.11654/jaes.2022-0730

## Effects of passivating agents and foliar fertilizers on cadmium uptake and transport in wheat-maize rotation

CAO Yang<sup>1</sup>, LI Chengjuan<sup>2</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, DAI Yunchao<sup>1</sup>, SUN Benhua<sup>1</sup>, ZHANG Dongming<sup>1</sup>, WANG Xiaojing<sup>1</sup>, LÜ Jialong<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China; 2. Soil and Fertilizer Workstation in Xianyang City, Shaanxi Province, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** Wheat straw biochar and calcium magnesium phosphate fertilizer were selected as experimental soil passivation agents through field rotation experiments. These were used to study the effect of applying passivating agents and foliar fertilizers on cadmium absorption and transport in a field wheat-maize rotation and to realize the safe production of crops and use of cultivated land. Six treatments were set

收稿日期: 2022-07-20 录用日期: 2022-11-25

作者简介: 曹阳(1997—), 男, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 从事土壤重金属污染及修复研究。E-mail: caoyang855@163.com

\*通信作者: 吕家珑 E-mail: ljlll@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007303); 陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2021-YL(XN)19); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室项目(A314021402-2021012)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China(42007303); The Project of Shaanxi Agricultural Science and Technology Innovation Drive(NYKJ-2021-YL(XN)19); The Open Fund of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau(A314021402-2021012)

in the field; conventional wheat and corn planting (CK), basal biochar application (B), basal calcium magnesium phosphate fertilizer application (P), foliar selenium fertilizer spraying (F), basal biochar application with foliar selenium fertilizer (BF), and basal calcium magnesium phosphate application with foliar selenium fertilizer (PF). The cadmium content of wheat and maize grains, straws, and roots were detected after maturity, and the pH, available Cd, and total Cd of the cultivated soil were determined. The results show that compared with the CK treatment, the soil pH values of the wheat and maize treatments increased to different degrees, among which the B and BF treatments significantly increased the soil pH; the total amount of Cd in the wheat and maize treatments did not change significantly; P and PF treatment can significantly reduce available soil Cd content. Compared with the CK treatment, the Cd content in the grains of each treatment decreased to varying degrees, and the effect of foliar barrier combined with soil passivation technology (BF, PF) was better. Compared with CK treatment, the Cd content of wheat and maize grains in PF treatment decreased the most, with a decrease rate of 39.91% and 43.51%, respectively. The Cd content of wheat and maize grains in the BF treatment decreased by 22.58% and 33.53%, respectively, and the changes in the F, B, and P treatments were not significant. The reduction effect can be expressed as  $B < F < P$ . Compared with CK treatment, the cadmium transport coefficients from wheat and corn stalks to grain in the PF treatment decreased by 38.81% and 38.40%, respectively, while the cadmium transport coefficients from wheat and maize stalks to grain in the B treatment only decreased by 13.37% and 17.52%, respectively. A foliar barrier combined with soil passivation technology, especially foliar selenium fertilizer combined with a basic application of calcium, magnesium, and phosphate fertilizer, can more effectively reduce cadmium absorption and transport to wheat and corn kernels. Furthermore, it can reduce cadmium absorption and transport to wheat and corn grains in moderate and mild cadmium pollution, meaning it can be popularized and applied to farmland soil in wheat-maize rotation areas with medium and light cadmium pollution.

**Keywords:** field; wheat and corn rotation; moderate and mild cadmium pollution; safe utilization; absorption and transportation

土壤圈是构成自然环境的五大圈之一,也是与人类关系最为密切的环境要素之一。近50年来,国家工业化、信息化、城镇化、农业现代化的同步发展,加速了各个圈层物质能量交换,使得重金属污染物通过各种途径进入环境,导致土壤环境污染问题逐渐变得严重<sup>[1]</sup>。2014年原环境保护部和原国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,耕地的点位超标率高达19.4%,其中镉(Cd)超标点位最高,达到7%。Cd是人体非必需元素,对生物的毒害性较强,农作物积累Cd后Cd会随着食物链的传递在人体中富集,从而对人类健康造成潜在性危害<sup>[2-4]</sup>。近年来,我国粮食主产区重金属污染的耕地面积呈上升趋势<sup>[5]</sup>。因此,各地方政府按照《土壤污染防治行动计划》(国发[2016]31号)要求全面进行耕地土壤环境质量类别划分,分别划分为优先保护类、安全利用类和严格管控类三类,其中安全利用类占比依然较大。为保障农产品安全生产,实现对该类型耕地的合理使用,研究探索适用于此类耕地的农田修复模式愈发重要。

施加钝化剂修复重金属污染土壤具有成本低、见效快的特点。近年来,各受污染耕地通常采取钝化修复措施来降低土壤中重金属活性,进而实现中轻度污染农田耕地“边生产边修复”的目的。选用适当的钝化剂是进行钝化处理的关键,重金属钝化剂可以与土

壤中的Cd发生络合、吸附和沉淀反应;通过氧化、还原和离子交换等化学反应<sup>[6-7]</sup>,或者通过改变土壤的酸碱度、阳离子交换量等性质,将土壤中的Cd由有效态向不可利用态转化,从而降低该金属元素在土壤中的迁移性和活性,进而减少该金属元素对生物的毒害性并降低其在农产品中的累积<sup>[8]</sup>。农田废弃物秸秆通过不同技术处理烧制而成的生物炭,具有来源广、环境友好、成本较低等特点,正在成为钝化修复的热点材料。磷酸盐类无机钝化剂(如镁磷肥)等碱性肥料,可通过提高土壤pH值,使重金属形成氢氧化物沉淀;重金属阳离子还可以直接吸附于磷矿物表面,或与磷酸盐不同晶格中的阳离子发生置换而被固定<sup>[9]</sup>。叶面阻隔技术由于具有针对性强、作用快、利用率高、用量少,且不经土壤作用可有效减少二次污染等优点,在盆栽、大田试验和实际农业生产中得到大范围应用。Khoshgoftarmanesh等<sup>[10]</sup>开展的为期两年的麦田试验表明,在所研究的大部分小麦品种中分蘖期叶面喷施硫酸锌效果最佳,该方法可提高籽粒产量并降低籽粒Cd浓度。

目前重金属污染农田安全利用的措施主要包括低吸收品种农作物种植、土壤改良剂施用、微生物调控以及农艺管理等,多种技术手段进行联合使用可实现优势互补,成为当前受污染农田安全利用的重要发展趋势。目前,少数的技术集成已取得了显著进展,

但因可重复性差、经济成本高等原因,离推广应用还有一定差距。农民作为实施主体对技术手段的接受程度也是影响安全利用推广的重要因素,他们更容易接受操作简单、接近农艺和成本较低的技术。综合考虑经济效益、生态效益和环境效益,本着减少向土壤投入外来物及投入次数的原则开展试验。目前,相关研究内容主要集中于外源添加物施用量大、试验周期短的室内盆栽机理研究,而缺少可应用于生产实际的大田修复试验。因此本研究采用大田轮作试验的方式,选用农艺修复措施、土壤钝化剂措施以及两种措施联用,进行为期一年的小麦-玉米轮作试验,农艺修复措施选用硒叶面肥作为叶面阻隔剂,土壤钝化剂选择生物炭、钙镁磷肥,研究各修复措施对小麦-玉米轮作下Cd吸收转运的影响,并探索最优修复模式,以为安全利用类耕地土壤农产品安全生产提供一定的理论指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试小麦品种为西农165,玉米品种为郑单958。叶面肥由可溶性硒盐配制而成,为农业农村部环境保护科研监测所提供,含硒量0.01%(质量分数),pH 6.1。钙镁磷肥从广东大众农业科技股份有限公司购买,CaO $\geq$ 20.0%、MgO $\geq$ 5.0%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> $\geq$ 4.0%、pH 10.15。生物炭由新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所提供,为小麦秸秆在550℃、4 h热裂而成,pH 8.76、阳离子交换量21.58 cmol $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、有机碳459.40 g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、全氮7.13 g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、全磷0.098 g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、碳氮比(C/N)64.43、可溶性有机碳1 489.95 mg $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、有效磷24.70 mg $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、速效钾34.61 mg $\cdot$ kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 研究区域

试验区位于陕西省关中平原中部的咸阳市。该区属暖温带半湿润半干旱的大陆性季风气候,雨热同季,四季分明,年平均降雨量达280 mm,年平均气温为15.6℃。试验区土壤基本理化性质:pH 8.25、土壤有效磷33.75 mg $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、土壤速效钾260.35 mg $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、土壤全磷1.45 g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、土壤阳离子交换量15.60 cmol $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、土壤碳酸钙67.525 g $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、土壤全Cd 1.83 mg $\cdot$ kg<sup>-1</sup>、土壤有效态Cd 0.42 mg $\cdot$ kg<sup>-1</sup>。

### 1.3 试验设计

试验于2020年10月—2021年6月进行,共设置6个处理(表1)。试验小区面积63.75 m<sup>2</sup>(7.5 m $\times$ 8.5 m),每个处理重复3次。分别于2020年10月和2021年6

月种植小麦与玉米,并按照农户习惯施用基肥,施肥量约为氮肥12 g $\cdot$ m<sup>-2</sup>(以N计),磷肥8 g $\cdot$ m<sup>-2</sup>(以P计),分别为尿素和磷酸二铵。按试验小区面积,取14.35 mL叶面肥兑水至4.3 L,稀释倍数为300倍,叶面肥用喷雾器均匀喷施,最终喷施浓度为1 mmol $\cdot$ L<sup>-1</sup>,在小麦分蘖期、齐穗期和灌浆期共喷施3次,在玉米灌浆至成熟期间喷施3次,选择在晴天或者多云的下午16:00左右进行喷施。两季农作物的肥料施用以及水肥管理都根据试验区的农户日常标准进行。

表1 试验处理及试验设计

Table 1 Treatments and experimental design

处理 Treatment	试验设计 Experimental design
CK	小麦和玉米常规种植
F	叶面喷施硒肥750 L $\cdot$ hm <sup>-2</sup>
BF	叶面喷施硒肥750 L $\cdot$ hm <sup>-2</sup> +基施生物炭1 800 kg $\cdot$ hm <sup>-2</sup>
B	基施生物炭1 800 kg $\cdot$ hm <sup>-2</sup>
PF	叶面喷施硒肥750 L $\cdot$ hm <sup>-2</sup> +基施钙镁磷肥600 kg $\cdot$ hm <sup>-2</sup>
P	基施钙镁磷肥600 kg $\cdot$ hm <sup>-2</sup>

### 1.4 样品的采集与处理

待小麦、玉米成熟后,采集土壤样品和小麦、玉米植株。用不锈钢土钻取4钻作为一个混合土样,每个小区共采集3个混合土样和多株小麦、玉米植株混合样。收集到的土壤样品经过自然干燥,除去碎石块、杂草、根系等侵入体,用木棍碾压后过20目和100目尼龙网筛;采集的植株样品分别用自来水、去离子水洗涤,沥干水分后105℃烘箱烘30 min杀青,然后70℃烘干至质量恒定,将小麦、玉米植株分为籽粒、根部和秸秆,各部分分别使用粉样机过100目尼龙筛保存待测。

### 1.5 样品测定

植株样品Cd含量:采用HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(5:1,V:V)消解法进行消解(GB/T 17141—1997),消解液采用ICP-MS(7800a, Agilent, 美国)进行测定。土壤pH值:水土比2.5:1,采用pH计测定<sup>[11]</sup>。土壤中全量Cd:采用HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>消解,消煮液用原子吸收火焰光度法测定<sup>[11]</sup>。土壤有效态Cd含量:采用DTPA浸提,用原子吸收火焰光度法测定上清液中Cd含量<sup>[11]</sup>。

### 1.6 数据处理和计算

试验数据采用Excel 2013进行计算,用Origin 2021制图。不同处理之间的统计分析及方差分析用SPSS 26软件计算。

转运系数(Transfer factor, TF)是植物地上部某元

素含量与植物地下部某元素含量之比,常用来评价植物将重金属从下部向上部的运输能力。

$TF_{根到秸秆}$  = 农作物秸秆中 Cd 含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) / 农作物根中 Cd 含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$TF_{秸秆到籽粒}$  = 农作物籽粒中 Cd 含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) / 农作物秸秆中 Cd 含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

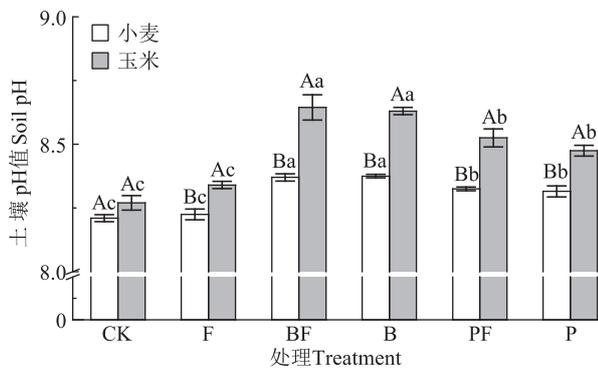
## 2 结果与分析

### 2.1 施加钝化剂及叶面肥对土壤 pH 值的影响

由图 1 可知,相同农作物不同处理间,除 F 处理以外的其他处理与 CK 处理相比 pH 值均达到显著差异水平,小麦季中 BF、B、PF、P 处理的 pH 值较 CK 处理分别上升 0.160、0.165、0.115、0.105 个单位,玉米季中 BF、B、PF、P 处理的 pH 值较 CK 处理分别上升 0.375、0.360、0.255、0.205 个单位,两季试验中 BF 与 B 处理及 PF 与 P 处理间无显著差异,其中 BF、B 处理 pH 值上升最明显,与其他各处理相比均达到显著水平。在相同处理不同农作物间,与 CK 处理相比,B 处理麦季土壤 pH 值和玉米季土壤 pH 值分别上升 0.275、0.255 个单位,P 处理麦季土壤 pH 值和玉米季土壤 pH 值分别上升 0.200、0.160 个单位。上述结果表明,施用生物炭会显著提升土壤 pH 值。

### 2.2 施加钝化剂及叶面肥对小麦和玉米种植土壤全 Cd 和有效态 Cd 含量的影响

由图 2 可知,与 CK 处理相比,小麦和玉米两季各处理土壤中全 Cd 含量无显著变化。相同农作物不同处理间,麦季中土壤有效态 Cd 除 F 处理以外其他各



不同大写字母代表相同处理不同农作物间的差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母代表相同农作物不同处理间的差异显著 ( $P < 0.05$ ),  $n=3$ 。下同 Different capital letters indicate significant differences between two crops of the same treatment at  $P < 0.05$  and different lowercase letters indicate significant differences between different treatments of the same crop at  $P < 0.05$ . Values are means ( $n=3$ ) with standard error. The same below

图 1 施加钝化剂及叶面肥对小麦和玉米季土壤 pH 值的影响  
Figure 1 Effects of passivating agents and foliar fertilizers on soil pH in wheat and corn seasons

处理与 CK 处理相比, BF、B、PF、P 处理分别下降了 3.99%、4.58%、4.81%、5.49%, 其中 B、PF、P 处理与 CK 处理相比均达到显著差异水平, BF 与 B 处理、PF 与 P 处理之间无显著差异, 降幅最大的 P 处理的有效态 Cd 共降低了  $0.025 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。玉米季中各处理土壤有效态 Cd 除 F 处理以外其他各处理与 CK 处理相比, BF、B、PF、P 处理分别下降了 3.29%、2.65%、4.45%、3.70%, 且均达到显著差异水平。CK 与 F 处理、BF 与 B 处理、PF 与 P 处理之间无显著差异, 降幅最大的 PF 处理的有效态 Cd 降低了  $0.019 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在相同处理的不同农作物间, 玉米季土壤有效态 Cd 较小麦季土壤有效态 Cd 略有下降, 均未达到显著水平。由此可知, 施用钙镁磷肥的钝化剂处理可显著降低土壤有效态 Cd 含量, 叶面肥对土壤有效态 Cd 含量无显著影响, 各处理均对土壤全 Cd 含量无显著影响, 出现这种结果的原因可能是各试验材料仅将活性 Cd 转化为稳定态 Cd, 并没有将 Cd 从土壤中去。

### 2.3 施加钝化剂及叶面肥对小麦和玉米根系、秸秆、籽粒 Cd 含量的影响

由图 3 可知, 各处理农作物各组织的 Cd 含量与 CK 处理相比发生了不同程度的变化。在麦季中, F

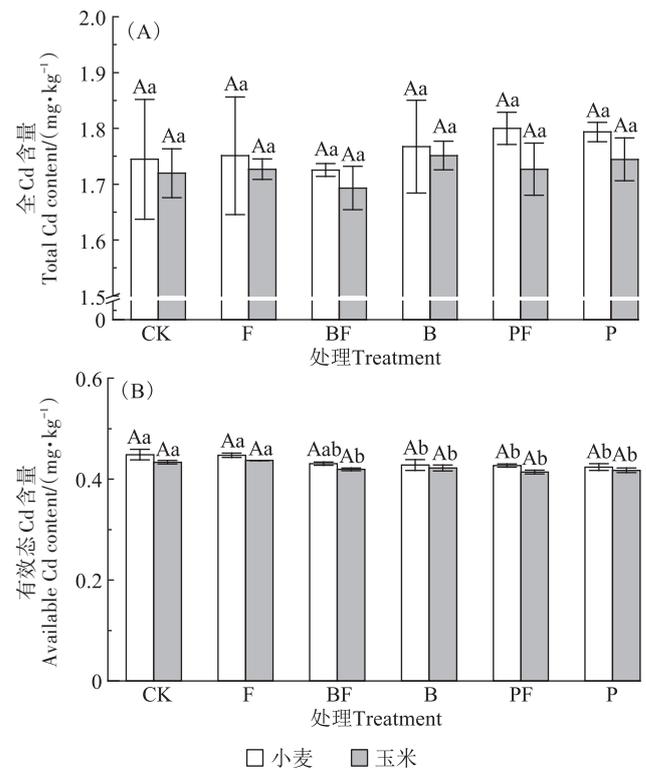


图 2 施加钝化剂及叶面肥对土壤全 Cd 和有效态 Cd 含量的影响

Figure 2 Effects of passivating agents and foliar fertilizers on soil total Cd and available Cd content

处理秸秆Cd含量较CK处理增加了8.71%;籽粒Cd含量下降了18.44%。而BF、PF处理秸秆Cd含量较CK处理分别减少了1.14%、3.05%;籽粒Cd含量分别下降了22.58%、39.91%。B、P处理秸秆Cd含量较CK处理分别减少了3.81%、9.20%;籽粒Cd含量分别下降了15.90%、26.23%。在各处理中,PF处理对籽粒的降Cd效果最佳,其小麦籽粒Cd含量降低至 $0.0126\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中规定的小麦Cd限量值( $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。另外各处理的小麦根部Cd含量都有一定程度的变化,但其差异均不显著( $P>0.05$ )。叶面阻隔技术处理和联合技术处理的秸秆Cd含量较CK处理和单施钝化剂处理稍高,说明叶面肥效果可观,可将部分Cd元素阻隔于秸秆部位。

在玉米季中,F处理秸秆Cd含量增加了6.13%;籽粒Cd含量下降了26.16%。而BF、PF处理秸秆Cd含量较CK处理分别减少了4.89%、10.51%;籽粒Cd含量分别下降了33.53%、43.51%。B、P处理秸秆Cd含量较CK处理分别减少了8.10%、14.81%;籽粒Cd含量分别下降了25.74%、36.38%。所有处理中,PF处理对籽粒的降Cd效果最佳,其玉米籽粒Cd含量降低至 $0.0022\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中规定的玉米Cd限量值( $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。另外各处理的玉米根部Cd含量都有一定程度变化,但是差异都不显著( $P>0.05$ )。结果表明,PF处理降低小麦、玉米籽粒Cd含量的效果最佳,BF处理次之。

#### 2.4 施加钝化剂及叶面肥对小麦和玉米Cd转运系数的影响

由表2和表3可知,与CK处理相比,小麦季F处理 $TF_{\text{秸秆到籽粒}}$ 下降了25.95%,B、P处理 $TF_{\text{秸秆到籽粒}}$ 下降了13.37%、18.50%,BF、PF处理 $TF_{\text{秸秆到籽粒}}$ 下降了19.95%、38.81%;玉米季F处理 $TF_{\text{秸秆到籽粒}}$ 下降了28.88%,B、P处理 $TF_{\text{秸秆到籽粒}}$ 下降了17.56%、26.15%,BF、PF处理 $TF_{\text{秸秆到籽粒}}$ 下降了32.58%、38.40%。叶面阻隔联合土壤钝化处理的 $TF_{\text{秸秆到籽粒}}$ 下降幅度远大于单独施用钝化剂处理,由于叶面肥的作用机理导致F处理秸秆富集较多的Cd,使得 $TF_{\text{秸秆到籽粒}}$ 值较高,仅次于降幅最大的叶面阻隔联合土壤钝化处理。但是,各处理的 $TF_{\text{根系到秸秆}}$ 变化大多未达到显著水平。

### 3 讨论

季书勤等<sup>[12]</sup>在对河南省主要小麦品种重金属污

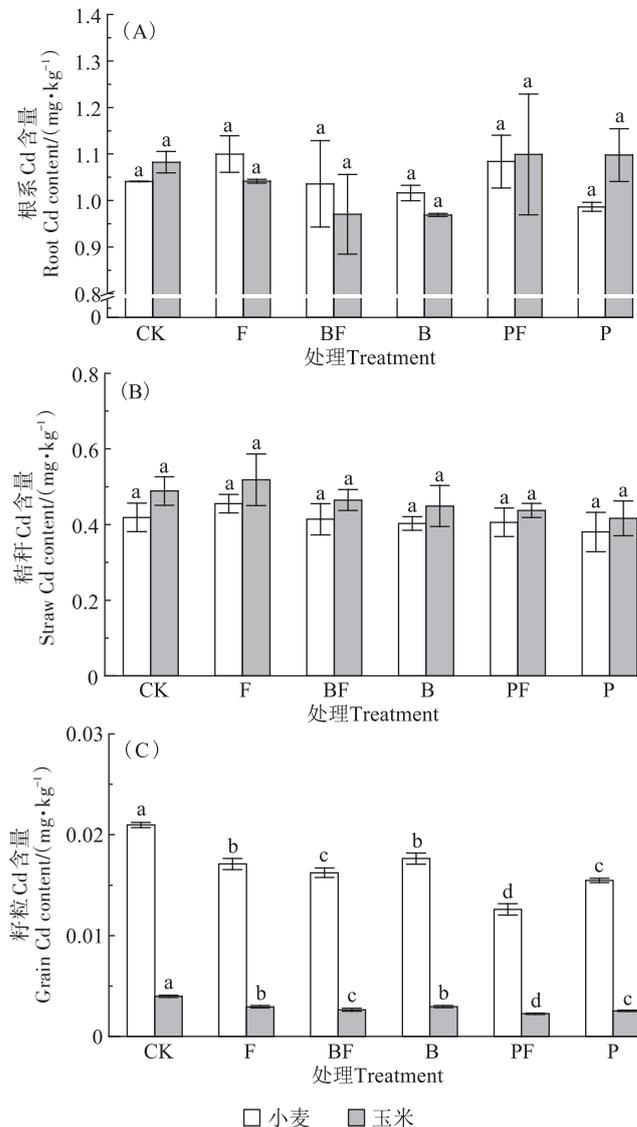


图3 施加钝化剂及叶面肥对小麦和玉米根系、秸秆和籽粒Cd含量的影响

Figure 3 Effects of passivating agents and foliar fertilizers on cadmium content in roots, straw and grain of wheat and maize

染评价的研究中表明,在Cd逆境下,小麦各部位Cd积累为根>叶>茎>籽粒>鞘>颖壳,根系Cd积累量最大,叶和茎Cd积累量次之。本试验将成熟后的小麦和玉米植株分为根系、秸秆(叶与茎混合)、籽粒3部分,小麦和玉米各部位Cd积累为根>秸秆>籽粒,与季书勤等<sup>[12]</sup>的研究结果一致。宋正国等<sup>[13]</sup>在田间条件下施用高低量钙镁磷肥和磷矿粉( $900\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、高低量赤泥(1.0%、0.5%)、高低量海泡石(0.5%、0.3%),研究其对玉米吸收Cd的影响,结果表明这些钝化材料中高量钙镁磷肥对降低玉米叶片和茎(秸秆)中Cd含量的效果最差,然而这些钝化材料中高量钙镁磷肥对降低玉米籽粒中Cd含量的效果最

表2 施加钝化剂及叶面肥对小麦 Cd 转运系数的影响

Table 2 Effects of passivating agents and foliar fertilizers on cadmium transport coefficient of wheat

项目 Item	CK	F	BF	B	PF	P
<i>TF</i> 根到秸秆	0.402±0.037a	0.415±0.037a	0.403±0.076a	0.397±0.024a	0.374±0.015a	0.386±0.057a
<i>TF</i> 秸秆到籽粒	0.050±0.005a	0.037±0.001bc	0.040±0.00c	0.043±<0.001ab	0.030±0.004c	0.040±0.006ab

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

表3 施加钝化剂及叶面肥对玉米 Cd 转运系数的影响

Table 3 Effects of passivating agents and foliar fertilizers on cadmium transport coefficient of maize

项目 Item	CK	F	BF	B	PF	P
<i>TF</i> 根到秸秆	0.452±0.044a	0.498±0.063a	0.480±0.014a	0.464±0.057a	0.402±0.065a	0.379±0.022a
<i>TF</i> 秸秆到籽粒	0.008±<0.001a	0.006±0.001bc	0.005±<0.001bc	0.006±0.001b	0.005±<0.001c	0.006±0.001bc

佳。本试验田 Cd 含量较高,在本试验材料施用量下,与 CK 处理相比,根系和秸秆 Cd 含量并未出现显著差异。再者,由于叶面肥作用机理是通过喷施将重金属元素阻隔在叶片的细胞壁或者细胞器上,抑制茎叶中的 Cd 向籽粒转移<sup>[14]</sup>,导致单施叶面肥处理秸秆 Cd 含量略高。同样秸秆中 Cd 含量也无显著差异。本试验中籽粒 Cd 含量出现显著差异,施加钝化剂和叶面肥及其联合措施下的 *TF* 秸秆到籽粒显著减小,高敏等<sup>[15]</sup>和谭骏等<sup>[16]</sup>的研究也得到类似结果,表明农作物籽粒 Cd 含量降低的主要原因是农作物地上部转运系数的减小。

钝化剂中的钙镁磷肥处理与 CK 处理相比可显著提升两季农作物土壤 pH 值,并且显著降低土壤有效态 Cd。钙镁磷肥作为碱性肥料,自身 pH 值较高,可与重金属发生沉淀反应,进而降低土壤有效态 Cd 含量<sup>[17]</sup>。各处理对土壤全 Cd 含量无显著影响,原因可能是各试验材料只将有效态 Cd 转化为稳定态 Cd,并没有将 Cd 从土壤中根除<sup>[18-19]</sup>。与 CK 处理相比,小麦、玉米秸秆 Cd 含量减少了 9.20%、14.81%;使籽粒 Cd 含量减少了 26.23%、36.38%。文炯等<sup>[20]</sup>的研究发现在长江中游地区的湖南大田水稻试验中施用 600 kg·hm<sup>-2</sup> 钙镁磷肥后,土壤有效态 Cd 和稻米中 Cd 含量降低。众多研究表明钙镁磷肥作为重金属钝化剂既可有效降低土壤中有效态 Cd 含量、植物地上部和地下部各组织 Cd 含量,又可促进农作物增产增收<sup>[16,21]</sup>。钙镁磷肥中富含钙、镁元素,其对重金属起拮抗作用,并通过在根系的竞争性吸附和共沉淀来防止植物吸收重金属<sup>[22]</sup>。

B 处理与 CK 处理相比也可显著提升两季农作物土壤 pH 值,并且显著降低土壤有效态 Cd,对土壤全 Cd 含量的影响同钙镁磷肥处理一样,均没有显著变

化,小麦秸秆生物炭具有较高的 pH 值,且秸秆生物炭表面的酚基、羧基和羟基都带负电荷<sup>[23]</sup>,可以中和部分土壤溶液中的 H<sup>+</sup>,因此生物炭施用后提高了土壤的 pH 值,促进土壤胶体表面负电性增加,进而加强对重金属阳离子的吸附固定<sup>[24]</sup>。生物炭在本试验中的用量为 1 800 kg·hm<sup>-2</sup>,是钙镁磷肥用量的 3 倍,两种材料就提高土壤 pH 值而言,生物炭效果更佳,但是在降低农作物地上部 Cd 含量效果上较钙镁磷肥效果稍差。秸秆生物炭具有较大的比表面积,较高的全碳含量、表面官能团和芳香结构,通过沉淀、吸附、离子交换等方式与重金属阳离子相结合,可以减弱重金属在土壤中的迁移和活性<sup>[24-26]</sup>。此外,生物炭孔隙结构发达、全碳含量高,有利于改善土壤基本理化性质,保持水分,同样有利于土壤中微生物的生长<sup>[27]</sup>。生物炭有着十分丰富的 Ca、Mg、Na 和 K 等矿物质元素,不但能够通过离子交换等一系列作用与溶液中的 Cd<sup>2+</sup> 结合,而且还能为作物的生长发育提供必要的矿物质营养<sup>[28]</sup>。因此,施加生物炭能够促进生物量显著提高,对富集于农作物可食部位的 Cd 产生一定的稀释效应<sup>[29]</sup>。

叶面喷施硒肥使小麦、玉米秸秆 Cd 含量增加了 8.71%、6.13%,使籽粒 Cd 含量减少了 18.44%、26.16%,主要是由于叶面肥作用机理所致<sup>[14]</sup>。刘永贤等<sup>[30]</sup>在对广西水稻田的研究表明,在水稻生长发育的孕穗期和抽穗期的前几天,各喷施一次叶面硒肥可以使农作物籽粒 Cd 含量降低 83.33%。本研究中,在小麦和玉米季喷施硒肥,同样达到了相当显著的降 Cd 效果。硒为一种微量元素,可与多种重金属产生拮抗作用,通过改变植物细胞膜对重金属离子的通透性,进而影响其在植株中的运输<sup>[31-33]</sup>,也可改善酶活性,减弱 Cd 对农作物生长的不利影响,从而降低籽粒 Cd

含量<sup>[34]</sup>。沙乐乐等<sup>[14]</sup>的研究表明在盆栽水稻试验中采用8种叶面肥,只有1种叶面肥处理的茎叶Cd含量显著下降,其他7种叶面肥处理的茎叶Cd含量与CK处理无显著差异,且部分茎叶Cd含量有所增加。于焕云等<sup>[35]</sup>在南方三地开展了为期4年的叶面阻隔技术应用效果的田间试验,结果表明,施用一定量的叶面肥后,轻度、中度、重度污染农田稻米的Cd含量降幅达39%、38%、43%。

相较于单独进行钝化剂和叶面阻隔处理,叶面阻隔联合土壤钝化技术(钙镁磷肥)处理的小麦、玉米地上部籽粒Cd含量降幅最明显,籽粒Cd含量减少了39.91%、43.51%。谭骏等<sup>[16]</sup>的研究表明叶面阻隔联合钝化技术能十分有效地降低水稻各组织的Cd含量,其中叶面喷施氨基酸螯合硒肥联合基施硅钙肥可最大程度地降低籽粒Cd含量,与CK处理相比,降幅可达88%,这与本研究结果一致,表明叶面阻隔联合土壤钝化的修复措施效果明显优于单独修复措施,但不同的叶面肥和不同的土壤钝化剂联合存在一定的交互作用,机理也更加复杂,有待今后针对小麦-玉米轮作区研究出一套经济、环保和效果更佳的联合修复措施。

#### 4 结论

(1)施加生物炭和钙镁磷肥的处理可显著提高土壤pH值,降低土壤有效态Cd含量。

(2)单独喷施叶面硒肥和土壤钝化剂均能减小陕西关中地区安全利用类耕地小麦、玉米Cd从秸秆到籽粒的转运系数,并降低籽粒Cd含量,其中钙镁磷肥钝化剂效果最佳。

(3)叶面喷施硒肥技术联合钙镁磷肥技术能最大程度地降低安全利用类耕地土壤小麦、玉米籽粒Cd含量,可尝试将该方法在中轻度Cd污染耕地安全利用中推广应用。

#### 参考文献:

[1] 赵其国. 中国土壤科学战略发展研究的新思路——土壤学战略发展研究的顶层设计与路线图[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1639-1646. ZHAO Q G. New ideas of strategic development research of Chinese soil science: Top design and roadmap of strategic development of soil science[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10): 1639-1646.

[2] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 514-519. DAI Y C, LÜ J L, CAO Y F, et al. Effects of lime and organic amendments on Cd availability in Cd contaminated soils with different proper-

ties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 514-519.

[3] 熊敏先, 吴迪, 许向宁, 等. 土壤重金属镉对高等植物的毒性效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 133-149. XIONG M X, WU D, XU X N, et al. Advances in toxic effects of soil heavy metal cadmium on higher plants[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, 16(6): 133-149.

[4] HASAN B, MURAT S, EMRE G, et al. A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop Province, Turkey[J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 125015.

[5] 肖书兴, 白福臣. 长江中下游粮食主产区农业面源污染对粮食经济的生态压力研究[J]. 生态经济, 2019, 35(7): 155-160. XIAO S X, BAI F C. Effects of agricultural non-point source pollution on ecological pressure of food economy in the main grain production area of the lower yangtze region[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(7): 155-160.

[6] 姚臻晖, 涂理达, 周慧平, 等. 稻田镉污染原位钝化修复及磷积累与迁移特征[J]. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2374-2379. YAO Z H, TU L D, ZHOU H P, et al. *In situ* immobilization remediation of cadmium-contaminated paddy soil and the characteristics of phosphorus accumulation and movement in water-soil environment[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(5): 2374-2379.

[7] 任超, 任彧仲, 李竞天, 等. 方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2133-2141. REN C, REN Y Z, LI J T, et al. Synergistic repair effect of calcite-based passivator and low-accumulation maize[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2133-2141.

[8] HAMID Y, TANG L, HUSSAIN B, et al. Adsorption of Cd and Pb in contaminated gleysol by composite treatment of sepiolite, organic manure and lime in field and batch experiments[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 196: 110539.

[9] 田林玉, 周书葵, 李智东, 等. 重金属污染土壤原位固定修复研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(4): 958-964. TIAN L Y, ZHOU S K, LI Z D, et al. Advances in research on *in situ* immobilization of heavy metals in contaminated soils[J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(4): 958-964.

[10] KHOSHGOFTARMANESH A H, SANAEIOSTOVAR A, SADRARHMI A, et al. Effect of tire rubber ash and zinc sulfate on yield and grain zinc and cadmium concentrations of different zinc-deficiency tolerance wheat cultivars under field conditions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 49(4): 42-49.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2010. BAO S D. *Agrochemical analysis of soil*[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2010.

[12] 季书勤, 郭瑞, 王汉芳, 等. 河南省主要小麦品种重金属污染评价及镉吸收规律研究[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 154-157. JI S Q, GUO R, WANG H F, et al. Estimate of pollution by heavy metals on wheat in Henan and the rule cadmium absorption in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(6): 154-157.

[13] 宋正国, 唐世荣, 丁永祯, 等. 田间条件下不同钝化材料对玉米吸收镉的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2152-2159. SONG Z G, TANG S R, DING Y Z, et al. Effects of different amendments on cadmium uptake by maize under field conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2152-2159.

[14] 沙乐乐. 水稻镉污染防控钝化剂和叶面阻控剂的研究与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. SHA L L. Control of rice cadmium contamination through heavy metal passivants and foliarfertilizers[D].

- Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2015.
- [15] 高敏, 周俊, 刘海龙, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 215-222. GAO M, ZHOU J, LIU H L, et al. Effect of silica and selenite foliar sprays on the uptake and transport of cadmium by rice under water management[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 215-222.
- [16] 谭骏, 潘丽萍, 黄雁飞, 等. 叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 981-987. TAN J, PAN L P, HUANG Y F, et al. Effects of foliar fertilizer and passivator application on cadmium accumulation and transport in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 37(6): 981-987.
- [17] 钱海燕, 王兴祥, 黄国勤, 等. 钙镁磷肥和石灰对受 Cu Zn 污染的菜园土壤的改良作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 235-239. QIAN H Y, WANG X X, HUANG G Q, et al. Melioration effect of calcium magnesium phosphate and calcareousness on vegetable garden soil polluted by Cu and Zn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 235-239.
- [18] 白珊, 倪幸, 杨璇羽, 等. 不同原材料生物炭对土壤重金属 Cd、Zn 的钝化作用[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1199-1205. BAI S, NI X, YANG Y Y, et al. Immobilization of soil cadmium and zinc by different raw material derived biochars[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(5): 1199-1205.
- [19] 吴岩, 杜立宇, 梁成华, 等. 生物炭与沸石混施对不同污染土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 286-290. WU Y, DU L Y, LIANG C H, et al. Influence of fixed addition of biochar and natural zeolite on the fraction transform of cadmium in different contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 286-290.
- [20] 文炯, 李祖胜, 许望龙, 等. 生石灰和钙镁磷肥对晚稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2496-2502. WEN J, LI Z S, XU W L, et al. Effects of quicklime and calcium magnesium phosphate application on late season rice growth and grain cadmium uptake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2496-2502.
- [21] 黄荣, 徐应明, 黄青青, 等. 施用不同磷肥对海泡石钝化修复镉污染土壤影响的研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1499-1505. HUANG R, XU Y M, HUANG Q Q, et al. Effect of different phosphate fertilizers on the immobilization remediation of cadmium contaminated soil by sepiolite[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1499-1505.
- [22] WANG G, ZHANG Q, DU W, et al. *In-situ* immobilization of cadmium-polluted upland soil: A ten-year field study[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 207: 111275.
- [23] CHINTALA R, SCHUMACHER T E, KUMAR S, et al. Molecular characterization of biochars and their influence on microbiological properties of soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 279: 244-256.
- [24] 张新帅, 张红宇, 黄凯, 等. 石灰与生物炭对矿山废水污染农田土壤的改良效应[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 481-491. ZHANG X S, ZHANG H Y, HUANG K, et al. Beneficial effects of lime and biochar application on farmland soil polluted by mine wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 481-491.
- [25] 赵超凡, 周丹丹, 孙建财, 等. 生物炭中可溶性组分对其吸附镉的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 814-823. ZHAO C F, ZHOU D D, SUN J C, et al. The effect of soluble components on the adsorption of cadmium on biochar[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(4): 814-823.
- [26] 李明, 王磊, 范婷婷, 等. 施用玉米秸秆生物炭对镉生物有效性及其胁迫下生菜生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1236-1243. LI M, WANG L, FAN T T, et al. Effects of biochar derived from corn-straw on cadmium bioavailability, and lettuce growth under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1236-1243.
- [27] YASER A A, MAMDOUH A E. Effect of biochar on yield and quality of tomato grown on a metal-contaminated soil[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 265: 109210.
- [28] WANG Y M, TANG D D, YUAN X Y, et al. Effect of amendments on soil Cd sorption and trophic transfer of Cd and mineral nutrition along the food chain[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 189: 110045.
- [29] 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 等. 钝化与叶面阻隔对不同基因型红菜苔镉累积的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3434-3440. CAO K K, LI C C, HU X Y, et al. Effects of the immobilization of cadmium in soil alone or combined with foliar application of selenium on cadmium accumulation in the plants of different genotypes of tsai-tai[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3434-3440.
- [30] 刘永贤, 潘丽萍, 黄雁飞, 等. 外源喷施硒与硅对水稻籽粒镉累积的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(7): 1588-1592. LIU Y X, PAN L P, HUANG Y F, et al. Effects of selenium or silicon foliar fertilizer on cadmium accumulation in rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(7): 1588-1592.
- [31] 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. Mechanism of Se on Cd content and sub-cell distribution in rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2): 320-326.
- [32] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 叶面喷施对水稻籽粒硒富集及分布的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 73-78. ZHOU X B, SHI W M, YANG L Z. Effect of foliar application of selenite on selenium accumulation and distribution in rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 73-78.
- [33] 柴冠群, 刘桂华, 罗沐欣键, 等. 硒肥与钝化材料组配对土壤 Cd 钝化及稻米 Cd 消减效果[J]. 中国农学通报, 2021, 37(32): 102-107. CHAI G Q, LIU G H, LUO M X J, et al. Effect of selenium and passivator application on available cadmium passivation in soil and cadmium reduction in rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(32): 102-107.
- [34] BOLAN N S, ADRISNO D C, DURAISAMY P, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. III. Effect of biosolid compost addition[J]. *Plant and Soil*, 2003, 256(1): 231-241.
- [35] 于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 等. 稻田镉砷污染阻控原理与技术应用[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1418-1426. YU H Y, CUI J H, QIAO J T, et al. Principle and technique of arsenic and cadmium pollution control in paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1418-1426.

(责任编辑:朱晓昱)