

# 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

# 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

黄雁飞, 陈桂芬, 黄玉溢, 熊柳梅, 刘淑仪, 钟蕙镁, 刘斌

### 引用本文:

黄雁飞,陈桂芬,黄玉溢,熊柳梅,刘淑仪,钟蕙镁,刘斌.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.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0660

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 水分管理、铁硅材料与生物炭对不同水稻品种吸收镉的影响及其机制

罗小丽, 鞠琳, 姚爱军, 刘冲, 杨燕花, 曹健, 汤叶涛, 仇荣亮 农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1506-1513 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1319

### 蚕沙与海泡石联合施用对水稻根际土壤Cd生物有效性及籽粒Cd富集的影响

刘顺翱, 胡钧铭, 吴昊, 林大松, 张俊辉, 李婷婷, 韦翔华, 蒋鑫, 刘斌 农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1686–1695 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–1403

### 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

# 坡缕石钝化与喷施叶面硅肥联合对水稻吸收累积镉效应影响研究

徐奕,李剑睿,黄青青,梁学峰,彭亮,徐应明

农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1633-1641 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0838

# 生物炭和碳酸钙粉对高、低镉积累型水稻镉积累及根际微生物群落的影响

唐仲,周明,张隽,赵方杰

农业环境科学学报. 2022, 41(10): 2102-2110 https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0263



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.

# 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

黄雁飞, 陈桂芬, 黄玉溢, 熊柳梅, 刘淑仪, 钟蕙镁, 刘斌\*

(广西壮族自治区农业科学院农业资源与环境研究所,南宁 530007)

摘 要:为明确田间条件下不同钝化材料及其复配组合处理对水稻 Cd 吸收累积的影响及其时效性差异,采用大田试验,研究了桑树枝杆生物炭、贝壳粉、膨润土、蚕沙 4 种钝化材料及其 3 个复配组合处理对土壤 pH、土壤有效态 Cd 含量和水稻植株各部位 Cd 含量的影响,并分析了不同钝化剂的作用时效性。结果表明:钝化剂处理提升了土壤 pH,其中贝壳粉(O)处理升幅最大;土壤有效态 Cd 含量显著 (P<0.05)降低,4 种材料中贝壳粉效果最好,不同钝化剂处理中桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合(MOS)处理降幅最大,3 季分别降低了 38.25%、34.24% 和 14.60%;水稻根、秸秆、谷壳、糙米中的 Cd 含量明显降低,其中,MOS处理糙米 Cd 含量显著低于其他处理,3 季分别降低了 49.04%、54.31% 和 25.22%,但仍未达到国家食品安全 Cd 含量在 0.2 mg·kg¹以下的标准要求;水稻根、秸秆、谷壳、糙米的 Cd 富集系数明显降低;Cd 由根到秸秆的转运系数(TF 版书的表)和由谷壳到糙米的转运系数(TF 版书的表)明显降低,其中 MOS处理降低效果最佳;随着钝化剂施用时间推移到第三季,糙米 Cd 含量降低幅度明显减少,其中膨润土(B)、蚕沙(S)和 MOS处理减幅相对较小;相关分析显示,糙米 Cd 含量与土壤 pH 呈极显著负相关(P<0.01),与土壤有效态 Cd 含量、TF 版书的表及水稻各部位 Cd 含量整体呈极显著正相关(P<0.01)。研究表明,MOS处理降 Cd效果及时效性整体相对较好,在生产实践中可优先推荐,但在土壤全 Cd 含量为 1.5 mg·kg¹重度污染条件下,需配合其他修复技术才能确保糙米 Cd 含量符合《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)的要求,同时在第二季后需及时补充钝化剂才能确保其钝化效果。

关键词:钝化剂;Cd;水稻;吸收累积;时效性

中图分类号:S511;X53;173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)04-0787-12 doi:10.11654/jaes.2022-0660

# Effects of different passivating agents on cadmium uptake and accumulation in rice and its timeliness under field conditions

HUANG Yanfei, CHEN Guifen, HUANG Yuyi, XIONG Liumei, LIU Shuyi, ZHONG Huimei, LIU Bin\*

(Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract:** This study was conducted to study the effects of different passivating agents and their combinations on cadmium uptake and accumulation in rice, and their time-effectiveness under field conditions. A field experiment was conducted to study the effects of mulberry stem biochar, oyster shell powder, bentonite and silkworm sand, and their combinations on soil pH, soil available cadmium content, and

收稿日期:2022-06-28 录用日期:2023-01-12

作者简介: 黄雁飞(1986—), 男, 广西宜州人, 硕士, 副研究员, 主要从事植物营养与环境生态、土壤重金属污染修复研究工作。 E-mail: 421284292@qq.com

<sup>\*</sup>通信作者:刘斌 E-mail:476985375@qq.com

基金项目:广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297041);广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA20108002-3);广西农业科学院科技发展基金项目(桂农科 2021JM54);广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2021YT042)

Project supported: The Natural Science Foundation of Guangxi, China (2020GXNSFBA297041); Project for Innovation—driven Development Special Fund of Guangxi (Gui Ke AA20108002-3); Project for Science and Technology Development Fund of Guangxi Academy of Agricultural Sciences (Gui Nong Ke 2021JM54); Project for Basic Scientific Research of Guangxi Academy of Agricultural Sciences (Gui Nong Ke 2021YT042)

cadmium contents in different parts of rice plants, as well as their time-effectiveness. The results showed that the passivating agents increased the pH value of soil, with oyster shell powder (O) increasing the pH the most. The soil available cadmium content was significantly decreased (P<0.05), with the combination of mulberry stem biochar and shell powder and silkworm sand (MOS) decreasing Cd content the most by 38.25%, 34.24%, and 14.60% in three seasons respectively. Cadmium content in the root, straw, chaff, and brown rice decreased significantly. MOS treatment decreased cadmium content in brown rice the most, which decreased by 49.04%, 54.31%, and 25.22% in three seasons respectively, but still did not meet the national standard of 0.2 mg·kg<sup>-1</sup> Cd content. The bioconcentration factor of cadmium in root, straw, chaff, and brown rice decreased significantly. The transfer factor of cadmium from the root to straw (TF<sub>straw/root</sub>) and the transfer factor of cadmium from chaff to brown rice (TF<sub>brown rice/chaff</sub>) decreased significantly; among them, MOS treatment had the best effect. As the application time reached the third season, the decrease efficiency of cadmium content in brown rice of passivating agents decreased significantly; among them, bentonite (B), silkworm (S), and MOS treatments were comparatively small. Correlation analysis showed that cadmium content in brown rice was significantly negatively correlated with soil pH (P<0.01) and significantly positively correlated (P<0.01) with soil available cadmium content, TF<sub>straw/rool</sub>, TF<sub>brown rice/chaff</sub>, and cadmium content in rice root, straw, and chaff. A comprehensive evaluation revealed that the decrease efficiency and time-effectiveness of MOS treatment were comparatively better than that of other treatments, thus making it an ideal candidate for use in production practice. However, to ensure the cadmium content in rice meet the requirements of the national food safety standard limits of contaminants in food (GB 2762-2017), other remediation measures should be applied under the condition of soil cadmium content 1.5 mg·kg<sup>-1</sup>, and passivating agents should be added at the right time to ensure its passivating effect after the second season.

Keywords: passivating agent; cadmium; rice; uptake and accumulation; time-effectiveness

2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国 土壤Cd污染点位超标率为7%,明显高于其他重金属 元素,已然成为我国土壤的首要污染物口。国务院印 发的"土十条"更是明确提出到2030年受污染耕地安 全利用率要达到95%以上的要求,其中Cd污染稻田的 稻米安全生产率就是一个重要的任务指标。广西是 有色金属之乡,部分区域稻田土壤Cd含量明显高于国 家土壤环境质量二级标准值,严重地威胁到了区域内 稻米的安全生产[2-3]。土壤原位钝化修复是当前国内 外 Cd 污染农田修复的一项重要措施, 因其具有稳定性 好、可推广性强的优点而备受青睐[4-6]。 钝化材料的选 择是决定土壤原位钝化修复技术效果的关键环节之 一,通常人们将材料的稳定性、高效性、获取的难易程 度、使用成本和可推广性作为钝化材料选择的重要依 据四。研究表明,钝化剂的钝化效果与土壤及气候条件 差异紧密相关,具有明显的区域性特点[8-9],因此,根据 区域资源特点研究获得稳定、经济、高效、易推广的Cd 污染农田钝化修复材料,对加快完成Cd污染农田安全 利用,确保区域稻米安全生产具有重要意义。

当前常用的钝化剂材料主要分为无机和有机两大类,如有机肥、生物炭、石灰、磷矿石、含硅钙类黏土矿物、金属氧化物等<sup>[7]</sup>,不同钝化材料对 Cd 的稳定化作用能力存在明显差异<sup>[10-11]</sup>。黄雁飞等<sup>[12]</sup>通过盆栽试验研究不同原料生物炭对稻米 Cd 含量的影响,结果表明施用生物炭各处理均可显著降低稻米 Cd 含量,

且不同原料生物炭的降 Cd 效果差异显著; 骆文轩 等四通过大田试验研究了有机肥与石灰对土壤有效 态 Cd 及糙米 Cd 含量的影响,结果表明有机肥和石灰 均能显著降低土壤有效态 Cd 及糙米 Cd 含量,其中有 机肥降低效果优于石灰;黎大荣等四研究发现蚕沙因 有机质含量较高也可作为钝化剂应用到重金属污染 土壤修复中;徐奕等四研究指出,膨润土可以促进土 壤中Cd从高活性形态向低活性形态转化,进而起到 钝化土壤 Cd 的作用;安艳等[16]研究发现改性后的膨 润土对 Cd 的钝化效率显著增加: 化党领等凹通过室 内培养试验发现合理地将膨润土与褐煤两种材料进 行配施更容易发挥出其对Pb、Cd复合污染土壤的修 复效果;贝壳是一种天然的可再生生物矿物材料,研 究表明在土壤中添加贝壳粉可在一定程度上抑制土 壤中重金属 Cd 的活性,进而起到钝化修复的效 果[18-20]。Cd 污染程度及施用量也是影响钝化剂对土 壤 Cd 钝化效果的重要因素[21], 王沛文等[19]通过土壤培 养试验发现文石型贝壳粉对土壤Cd赋存形态的影响 与其添加量的多少密切相关, 当添加量为5%时, 土 壤Cd生物可利用态含量占比最低;黄雁飞等[12]研究 指出,同一原料性质生物炭在不同添加量条件下对水 稻 Cd 吸收累积的影响存在明显差异;李双丽等[23]的 研究表明,等量生物质炭对不同Cd、Pb污染程度土壤 的修复效果差异明显; 巩龙达等[23]的研究表明, 在土 壤Cd平均含量为0.5 mg·kg<sup>-1</sup>条件下,以石灰、沸石、

钙镁磷肥和生物质炭组合为复合钝化剂,随其施用量 的增加水稻籽粒中Cd含量明显下降,当施用量增加 到 0.5% 时籽粒中 Cd 含量可降低 71.4%。可见,影响 钝化剂修复效果的相关因素众多,即使是同一种钝化 剂,针对不同的土壤条件和作物类型其修复效果也存 在很大的差异。

鉴于当前关于土壤钝化剂的研究报道多数还只 是侧重于单个钝化剂材料对土壤Cd生物有效性的影 响,而针对田间条件下多种钝化材料复配添加对水稻 Cd吸收累积及其作用时效性的研究还鲜有报道的问 题,本研究在前期研究工作的基础上,根据广西资源 特点以桑树枝杆生物炭、蚕沙、贝壳粉、膨润土为材 料,研究不同钝化材料及其复配组合对水稻Cd吸收 累积的影响,并进行钝化时效性分析,为广西Cd污染 区稻田土壤原位钝化修复治理提供技术参考。

# 材料与方法

## 1.1 试验材料

试验点位于广西南宁市上林县白圩镇,该区域属 于南亚热带季风型气候,年平均气温 20.9 ℃,年平均 降雨量1789.2 mm。试验区土壤类型为第四纪红土 母质发育形成的潴育性水稻土,全Cd含量1.51 mg· kg<sup>-1</sup>(参照 GB 15618—2018,属于 Cd 污染 2 类土壤), 有效 Cd 含量 0.78 mg·kg-1, 有机质含量 3.23%, 碱解氮 含量 154.0 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量 6.3 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 含量35.0 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 6.2。三季试验供试水稻品种均 为力拓2号。生物炭以桑树枝杆为原料,桑树枝杆采 集于广西南宁市邕宁区那楼镇那文村,取粉碎过的桑 树枝杆填满于大瓷坩埚中,放入控温马弗炉,在 600 ℃条件下烧制 2 h,关闭马弗炉自然冷却至室温后 取出即得到生物炭,使用前粉碎过60目筛;贝壳粉主 要为生蚝壳粉,来自于北海市伟恒生态农业有限公 司,使用前粉碎过60目筛;膨润土采集于广西崇左市 宁明县,原始膨润土块经过粉碎,填满于大瓷坩埚中, 放入控温马弗炉在700 ℃条件下煅烧3 h,自然冷却 至室温后取出,粉碎过60目筛:蚕沙来自于广西河池 宜州,蚕沙经发酵腐熟后晾干,将水分控制在10%左 右备用。4种钝化材料的pH和Cd含量见表1。

#### 1.2 试验设计

试验于2019年7月-2020年11月进行,在课题 组前期研究的基础上,试验根据广西资源特点,选择 桑树枝杆生物炭、贝壳粉、膨润土和蚕沙4种材料为 研究对象,并进行复配组合,依据前期田间试验结果,

表1 供试材料pH和Cd含量

Table 1 pH and Cd content of tested material

供试材料 Tested material	pН	全Cd含量 Total Cd content/(mg·kg <sup>-1</sup> )
桑树枝杆生物炭 Mulberry branch biochar	9.65	0.13
贝壳粉Oyster shell powder	10.21	0.08
膨润土Bentonite	8.10	0.11
蚕沙Silkworm excrement	7.32	0.09

在土壤Cd含量为1.5 mg·kg<sup>-1</sup>左右时,4种材料的添加 量在12 000 kg·hm<sup>-2</sup>时钝化效果最佳,本试验共设置 处理8个(表2),每个处理设置3次重复。于水田犁 耙前根据试验处理要求选取地力均一、形状方正的田 块一块,采用随机区组排列设计的方法,拉线划出24 个试验小区,每个小区面积  $20 \text{ m}^2 (4 \text{ m} \times 5 \text{ m})$ ,小区四 周起30 cm 高田埂,并用薄膜包裹,防止小区之间水 肥互串,每个小区均单独设置有进、排水口,方便水稻 生育期的排灌作业。第一季试验始于2019年晚稻, 于水稻移栽前10 d灌水,并采用小型拖拉机对每个试 验小区进行翻耙,犁耙平整后于水稻插秧前4d按各 试验处理要求一次性均匀撒施钝化剂材料,随后耙 匀,平衡3d后于2019年7月29日进行秧苗移栽,秧 苗统一在一块秧田中繁育,秧苗长至三叶一心时冼长 势均匀的壮苗进行移栽,每个小区秧苗移栽株数及插 秧规格保持一致,水稻生产过程中水肥及其他田间管 理均根据当地常规标准进行,2019年晚稻收割于11 月13日;第二季试验实施于2020年早稻,水稻移栽前

表2 试验处理及试验设计

Table 2 Treatments and experimental design

	Table 2 Treatments and experimental design
处理	试验设计
Treatment	Experimental design
CK	水稻常规种植
M	第一季水稻种植插秧前—次性基施桑树枝杆生物炭钝化 材料 12 000 kg·hm <sup>-2</sup>
0	第一季水稻种植插秧前一次性基施贝壳粉钝化材料 12 000 kg·hm <sup>-2</sup>
В	第一季水稻种植插秧前一次性基施膨润土钝化材料 12 000 kg·hm <sup>-2</sup>
S	第一季水稻种植插秧前一次性基施蚕沙钝化材料12000 kg·hm <sup>-2</sup>
MBS	第一季水稻种植插秧前一次性基施含有桑树枝杆生物炭、膨润土、蚕沙比例为 $1$ : $1$ : $1$ 的复配组合钝化剂 $12000\mathrm{kg}$ · $\mathrm{hm}^{-2}$
OBS	第一季水稻种植插秧前一次性基施含有贝壳粉、膨润土、 蚕沙比例为1:1:1的复配组合钝化剂12000 kg·hm <sup>-2</sup>
MOS	第一季水稻种植插秧前一次性基施含有桑树枝秆生物炭、贝壳粉、蚕沙比例为 1:1:1 的复配组合钝化剂 12 000 kg·hm $^{-2}$

7 d通过排灌沟向各试验小区内灌水,采用小型拖拉机分别对各小区进行翻耙,翻耙同时注意确保小区田埂的完好,各试验小区不再施钝化剂材料,2020年早稻秧苗移栽于2020年3月26日,每个小区秧苗移栽株数及插秧规格保持一致,水稻生产过程中水肥及其他田间管理均根据当地常规标准进行,2020年皂稻收割于7月12日;第三季试验实施于2020年晚稻,即早稻收割完成后对各试验小区进行灌水犁耙,各试验小区不再施钝化剂材料,移栽时每个小区秧苗移栽株数及插秧规格保持一致,水稻生产过程中水肥及其他田间管理均根据当地常规标准进行,2020年晚稻秧苗移栽干7月28日,收割于11月14日。

## 1.3 样品采集与处理

于水稻成熟期,采用梅花形布点法选取5个采样点,每个点采集水稻3株。先用自来水将根系土壤洗干净,再将样品带回实验室用去离子水反复清洗干净,放烘箱105℃杀青,然后将水稻植株样品分成根系、秸秆、稻谷3部分,室内阴干,稻谷采用小型砻谷机脱壳,最终共分成根系、茎叶、谷壳、糙米4个组分样品,样品放到信封中置于烘箱内60℃烘至质量恒定,随后采用小型高速粉碎机粉碎过60目筛备用。在水稻样品采集完成当日,相应地在水稻样品采集的点位处直接采集水稻根区土壤,土壤样品带回实验室自然风干后,研磨过18目和100目尼龙筛备用。3季试验样品采集时间分别为2019年11月12日、2020年7月10日、2020年11月14日。

## 1.4 指标测定方法

土壤pH参照NY/T 1121.2—2006采用电极法测定, 土水比为1:2.5;土壤全Cd含量参照GB/T 17141—1997 采用HNO3、HF、HClO3消解,AA-7000石墨炉原子吸收 分光光度计(日本岛津)测定,每个样品3个平行,同时插 入土壤Cd标样作为质控样以确保分析结果的准确性;土 壤中有效态Cd含量参照GB/T 23739—2009采用二乙烯 三胺五乙酸(DTPA)提取,AA-7000石墨炉原子吸收分 光光度计(日本岛津)测定。

水稻根系、茎叶、谷壳及糙米中Cd含量测定:参照GB/T5009.15—2014采用HNO3、HClO3消解,AA-7000石墨炉原子吸收分光光度计(日本岛津)测定,每个样品3个平行,同时插入稻米标样作为质控样以确保分析结果的准确性。

### 1.5 数据处理和计算

采用 Excel 2016进行数据整理和制图、制表,采用 SPSS 19.0进行试验数据统计分析。水稻各组织

Cd的富集系数(Bioconcentration factor, BF)、水稻各部位 Cd转运系数(Transfer factor, TF)计算公式如下[24]:

 $BF_i$ =水稻组织i中Cd含量 $(mg \cdot kg^{-1})$ /土壤中Cd含量 $(mg \cdot kg^{-1})$ 

TF<sub>精秆</sub>-水稻秸秆中Cd含量(mg·kg<sup>-1</sup>)/水稻根中Cd含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

 $TF_{\stackrel{\partial Rhff}{\partial r}}$ =水稻谷壳中Cd含量 $(mg \cdot kg^{-1})$ /水稻秸秆中Cd含量 $(mg \cdot kg^{-1})$ 

TF <sup>機米虎</sup>=水稻糙米中 Cd 含量(mg·kg<sup>-1</sup>)/水稻谷壳中 Cd 含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

# 2 结果与分析

# 2.1 钝化剂对土壤 pH、有效态 Cd 含量的影响

由表3可知,3季试验结果显示钝化剂处理土壤 pH随着施用时间的推移逐渐降低;与当季CK处理相 比较,施用钝化剂处理均提升了土壤pH,且随着时间 的推移pH升幅明显降低,4种钝化材料中贝壳粉提 升效果最佳,3季分别显著提高了1.05、0.59、0.29个 单位(P<0.05,下同),显著优于膨润土和蚕沙;3种复 配组合中桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处 理的效果最好,pH分别提升了0.75、0.37、0.22个单 位。3季试验各处理土壤有效态Cd含量随着试验时 间的推移呈先降低随后又快速升高的趋势:与当季 CK 处理相比较, 钝化剂处理土壤有效态 Cd 的含量明 显降低,其中,4种钝化剂材料中贝壳粉降低效果最 好,显著优于膨润土和蚕沙处理(第三季除外);7个 钝化剂处理中桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组 合处理土壤有效态 Cd 降幅最大,分别为 38.25%、 34.24%和14.60%,整体优于其他6个钝化剂处理。 随着时间的推移,到第三季时各钝化剂处理土壤有效 态 Cd 降幅较前两季出现了明显的减小(蚕沙处理除 外)。可见,施用钝化剂起到了提升土壤pH而降低 土壤有效态 Cd 含量的作用,4种钝化材料中贝壳粉效 果最好,7个钝化剂处理中桑树枝杆生物炭配合贝 壳粉和蚕沙组合处理土壤有效态 Cd 降低效果最佳, 各钝化剂处理随着施用时间的推移降Cd效果均明显 下滑。

## 2.2 不同钝化剂处理对水稻各部位 Cd 含量的影响

3季试验水稻各部位 Cd含量如表4和表5所示,各处理水稻各部位 Cd含量均呈现出随着试验时间的推移第二季明显降低随后到第三季又快速升高的趋势。与当季 CK 处理相比较,施用钝化剂处理均显著降低了第一季(蚕沙处理除外)和第二季水稻根部 Cd

### 表3 不同钝化剂处理对土壤pH及有效态Cd含量的影响

Table 3 pH and available Cd content in soil under different passivators treatments

		土壤 pH Soil pH		土壤有效态 Cd 含量 Soil available Cd content/(mg·kg-1)			
<u></u>	第一季 The first season	第二季 The second season	第三季 The third season	第一季 The first season	第二季 The second season	第三季 The third season	
CK	6.20±0.01d	6.21±0.06d	$6.19 \pm 0.02 d$	0.787±0.036a	0.698±0.005a	0.781±0.032a	
M	6.80±0.14abc	$6.52 \pm 0.15 be$	$6.40\pm0.04\mathrm{abc}$	$0.566 \pm 0.049 \mathrm{d}$	$0.519 \pm 0.074 \mathrm{bc}$	$0.714 \pm 0.008 \mathrm{b}$	
O	7.25±0.35a	6.80±0.14a	6.48±0.03a	$0.534 \pm 0.033 \mathrm{d}$	$0.477 \pm 0.062 c$	$0.680 \pm 0.003 \mathrm{bc}$	
В	$6.73 \pm 0.04 be$	$6.39{\pm}0.04{\rm bcd}$	$6.30 \pm 0.06 d$	$0.705 \pm 0.035 ab$	$0.592 \pm 0.091 \mathrm{ab}$	$0.684 \pm 0.018 \mathrm{bc}$	
S	$6.48{\pm}0.06\mathrm{cd}$	$6.35 \pm 0.04 \mathrm{cd}$	$6.30 \pm 0.01 d$	$0.675 \pm 0.035 \mathrm{bc}$	$0.644 \pm 0.024 \mathrm{ab}$	$0.715 \pm 0.007 \mathrm{b}$	
MBS	$6.59{\pm}0.06{\rm bcd}$	$6.39{\pm}0.05{\rm bcd}$	$6.34{\pm}0.04\mathrm{cd}$	$0.587 \pm 0.042 \mathrm{cd}$	$0.564 \pm 0.030 \mathrm{abc}$	$0.681 \pm 0.004 \mathrm{bc}$	
OBS	$6.90{\pm}0.28 \mathrm{abc}$	$6.49 \pm 0.05 be$	$6.38{\pm}0.04{\rm bcd}$	$0.488 \pm 0.041 \mathrm{d}$	$0.472 \pm 0.006 c$	$0.693 \pm 0.018 \mathrm{bc}$	
MOS	6.95±0.21ab	6.58±0.08b	6.41±0.05ab	$0.486 \pm 0.018 \mathrm{d}$	0.459±0.017c	0.667±0.016c	

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference among treatments (P<0.05). The same below.

## 表4 不同钝化剂处理对水稻根、秸秆Cd含量的影响

Table 4 Content of cadmium in rice root and straw under different passivators treatments

处理	根Cd含量	Root cadmium content/(	mg•kg <sup>-1</sup> )	秸秆Cd含量Straw cadmium content/(mg·kg <sup>-1</sup> )			
<u>欠</u> 理 Treatment	第一季 The first season The season	第二季 The second season	****		第二季 The second season	第三季 The third season	
CK	11.25±0.35a	6.60±0.42a	11.75±0.21a	4.95±0.49a	3.65±0.11a	4.83±0.21a	
M	$7.91 \pm 0.30 c$	$4.70 \pm 0.14 \mathrm{cd}$	11.20±0.42a	$2.38 \pm 0.04 c$	$1.99{\pm}0.04\mathrm{cd}$	$3.19{\pm}0.06\mathrm{cd}$	
O	$7.65 \pm 0.35 e$	$4.58 \pm 0.32 \mathrm{cd}$	10.70±0.14a	2.30±0.08c	$1.81 \pm 0.13 d$	$3.10 \pm 0.05 d$	
В	$8.30 \pm 0.14 bc$	4.90±0.28e	11.40±0.42a	$2.94 \pm 0.04 \mathrm{b}$	$2.09 \pm 0.22 c$	$3.65 \pm 0.15$ b	
S	10.50±0.71a	5.70±0.28b	11.45±0.35a	$3.10\pm0.14b$	$2.38 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$3.61 \pm 0.18 b$	
MBS	$8.40{\pm}0.28{\rm bc}$	$4.80 \pm 0.14 cd$	11.30±0.57a	2.93±0.01b	2.12±0.06c	$3.39{\pm}0.01\mathrm{bc}$	
OBS	8.85±0.07b	4.95±0.21c	10.80±0.85a	$2.89 \pm 0.04 \mathrm{b}$	2.06±<0.01cd	$3.23{\pm}0.05{\rm cd}$	
MOS	6.55±0.21d	4.20±0.28d	8.58±0.32b	$1.95 \pm 0.07 e$	$1.53 \pm 0.09 e$	2.13±0.06e	

### 表 5 不同钝化剂处理对谷壳、糙米 Cd 含量的影响

Table 5 Content of cadmium in chaff and brown rice under different passivators treatments

处理	谷壳Cd含	量 Chaff cadmium conten	t/(mg•kg <sup>-1</sup> )	糙米Cd含量Brown rice cadmium content/(mg·kg <sup>-1</sup> )			
工理 Treatment	第一季 The first season	第二季 The second season	第三季 The third season	第一季 The first season	第二季 The second season	第三季 The third season	
CK	1.19±0.10a	0.93±0.01a	1.07±0.04a	1.20±0.03a	0.94±0.03a	1.13±0.03a	
M	$0.77 \pm 0.04 c$	$0.69{\pm}0.04{\rm cd}$	$0.97 \pm 0.06 \mathrm{b}$	$0.76{\pm}0.05{\rm bcd}$	$0.62 \pm 0.01 e$	$1.01{\pm}0.01\mathrm{bc}$	
0	$0.77 \pm 0.04 c$	$0.64 {\pm} 0.02 \mathrm{d}$	$0.96 \pm 0.04 \mathrm{b}$	$0.75 \pm 0.04 \mathrm{cd}$	0.58±0.01f	$0.98\pm0.01\mathrm{c}$	
В	0.92±0.06b	$0.72 \pm 0.01 bc$	1.00±<0.01ab	$0.79 \pm 0.01 bc$	$0.68{\pm}0.02{\rm cd}$	$1.00 \pm < 0.01 bc$	
S	$0.95 \pm 0.02 \mathrm{b}$	$0.75 \pm 0.04 \mathrm{b}$	1.02±0.02ab	$0.82 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.73 \pm 0.02 \mathrm{b}$	$1.04 \pm 0.03 \mathrm{b}$	
MBS	$0.90 \pm 0.02 \mathrm{b}$	$0.70\pm0.01\mathrm{bcd}$	1.00±0.02ab	$0.75 \pm 0.01 \mathrm{cd}$	$0.69 \pm 0.01 \mathrm{bc}$	$1.01 \pm 0.05 bc$	
OBS	$0.89{\pm}0.02\mathrm{bc}$	$0.67 \pm 0.02 \mathrm{cd}$	$0.96 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.70 \pm 0.02 \mathrm{d}$	$0.64 \pm < 0.01 de$	$1.00{\pm}0.01 \mathrm{bc}$	
MOS	0.77±0.01c	$0.53 \pm 0.02 e$	$0.88 \pm 0.02 c$	$0.61 \pm 0.01 e$	$0.43 \pm < 0.01 g$	$0.85 \pm 0.01 d$	

含量,4种钝化材料中以贝壳粉效果最好,3季分别降低了32.00%、30.68%和8.94%,7个钝化剂处理中桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理降幅最大,3季分别为41.78%、36.36%和27.02%;秸秆Cd含量

均显著降低,4种钝化剂材料中贝壳粉降低效果最好且显著优于膨润土和蚕沙,7个钝化剂处理中桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理效果最佳,3季降幅分别为60.61%、58.03%和55.83%,显著优于其

他处理(第一季生物炭和贝壳粉处理除外);谷壳Cd 含量均降低,4种钝化材料中贝壳粉降低效果最好,7 个钝化剂处理中桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙 组合处理降幅最大,3季分别降低了35.29%、43.11% 和17.84%; 糙米 Cd 含量均显著降低, 4种钝化剂材料 中贝壳粉降 Cd效果最好,7个钝化剂处理中桑树枝杆 生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理糙米Cd含量显著 低于其他处理,降Cd效果最佳。与第一季相比较,随 着施用时间推移到第三季时,各钝化剂处理水稻根、 秸秆、谷壳和糙米 Cd 含量降幅明显减少,其中贝壳 粉配合膨润土和蚕沙处理糙米Cd含量降幅减少幅 度最大,为30.00%,膨润土、蚕沙及桑树枝杆生物炭 配合贝壳粉和蚕沙组合3个处理减小幅度相对较 小。可见,施用钝化剂均有效降低了水稻根、秸秆、 谷壳及糙米中Cd的含量,4种钝化材料中贝壳粉效 果最好,7个钝化剂处理中桑树枝杆生物炭配合贝 壳粉和蚕沙组合处理糙米Cd含量显著低于其他处 理,降Cd效果最佳,各钝化剂处理随着施用时间的 推移到第三季时Cd降低幅度明显减少,其中膨润 土、蚕沙及桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合 3个处理减幅相对较小。

# 2.3 不同钝化剂处理对水稻 Cd 转运系数和富集系数的影响

如表6所示,与当季CK处理相比较,钝化剂处理显著降低了水稻Cd的TF<sub>棉秆</sub>,其中,桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理TF<sub>棉秆</sub>降幅最大,3季分别降低了31.82%、34.82%和39.02%;其次,钝化剂处理降低了Cd的TF<sub>桅米冷壳</sub>,其中MOS处理降低效果最佳,3季分别降低了22.06%、19.31%和9.35%。

如表7、表8所示,3季试验水稻各部位Cd富集系 数整体上呈现出先降低后迅速升高的趋势。与当季 CK 处理相比, 钝化剂处理显著降低了第一季和第二 季水稻根部 Cd 富集系数,第三季不同处理间水稻根 部Cd 富集系数整体上差异不显著,4种钝化材料中贝 壳粉处理水稻根Cd富集系数小于桑树枝杆生物炭、 膨润土和蚕沙处理,7个钝化剂处理中桑树枝杆生物 炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理富集系数最小;水稻地 上部秸秆、谷壳、糙米的Cd富集系数显著降低(第三 季膨润土、蚕沙及桑树枝杆生物炭配合膨润土和蚕沙 组合处理谷壳 Cd 富集系数除外),其中桑树枝杆生物 炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理糙米Cd富集系数显著 小于其他7个处理;随施用时间的推移至第三季,各 钝化剂处理水稻各部位 Cd 富集系数降幅明显减小, 其中桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理降 幅减小幅度相对较小。结果表明,施用钝化剂有效 降低了水稻各组织部位 Cd 的富集系数,进而减少了 水稻根、秸秆、谷壳及糙米对Cd的富集,其中桑树枝 杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理整体降Cd效 果最佳。

# 2.4 糙米 Cd 累积的相关性分析

如表9所示,3季试验糙米中的Cd含量与土壤pH、TF<sub>令壳情秆</sub>呈极显著负相关(P<0.01),与土壤有效态Cd呈极显著正相关,与根、秸秆及谷壳Cd含量呈极显著正相关,与TF<sub>精秆保</sub>呈极显著正相关,与TF<sub>精环份壳</sub>第一季呈显著正相关(P<0.05)、第二季和第三呈极显著正相关,其中秸秆和谷壳中的Cd含量与糙米Cd含量相关系数较高,而土壤pH、土壤有效态Cd含量、TF<sub>梳米份壳</sub>与糙米Cd含量的相关系数相对较小。

#### 表 6 不同钝化剂处理对水稻 Cd 转运系数的影响

Table 6 Transfer factor of cadmium in rice under different passivators treatments

	Cd由根到秸秆转运系数			秸秆到谷壳转		Cd由谷壳到糙米转运系数			
处理	TF of Cd from root to straw(TF 精和限)			TF of Cd from straw to chaff(TF 谷売/秸秆)			TF of Cd from chaff to brown rice(TF 稿来/谷売)		
Treatment	第一季	第二季	第三季	第一季	第二季	第三季	第一季	第二季	第三季
Treatment	The first	The second	The third	The first	The second	The third	The first	The second	The third
	season	season	season	season	season	season	season	season	season
CK	$0.44 \pm 0.06 a$	$0.56 \pm 0.02 a$	0.41±0.01a	$0.24{\pm}0.04\mathrm{c}$	$0.26 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.22{\pm}0.01\mathrm{d}$	1.02±0.11a	1.01±0.01a	1.07±0.01a
M	$0.30 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.43{\pm}0.02\mathrm{bc}$	$0.29{\pm}0.02\mathrm{bc}$	$0.32 \pm 0.03 \mathrm{b}$	0.35±0.01a	$0.30{\pm}0.01\mathrm{bc}$	1.00±0.02a	$0.91{\pm}0.02\mathrm{d}$	1.05±0.06a
0	$0.30 \pm < 0.01 \mathrm{b}$	$0.40{\pm}0.01\mathrm{bc}$	$0.29 \pm < 0.01 \mathrm{bc}$	$0.33 \pm 0.03 \mathrm{b}$	$0.36 \pm 0.04 a$	$0.31 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.98{\pm}0.01\mathrm{ab}$	$0.91{\pm}0.01\mathrm{cd}$	1.03±0.02a
В	$0.35 \pm < 0.01 \mathrm{b}$	$0.43{\pm}0.02\mathrm{bc}$	$0.32 \pm 0.03 \mathrm{b}$	$0.31 \pm 0.03 \mathrm{b}$	$0.35\pm0.04a$	$0.28 \pm 0.01 c$	$0.86{\pm}0.07{\rm bc}$	$0.94{\pm}0.05{\rm bcd}$	1.01±0.01a
S	$0.30 \pm 0.04 \mathrm{b}$	$0.42{\pm}0.02\mathrm{bc}$	$0.32 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.31 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.32 \pm 0.02a$	$0.29{\pm}0.01\mathrm{bc}$	$0.87{\pm}0.02\mathrm{bc}$	$0.97{\pm}0.03\mathrm{abc}$	1.03±0.05a
MBS	$0.35 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.44 \pm 0.03 \mathrm{b}$	$0.30 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.31 \pm 0.01 \mathrm{b}$	0.33±0.01a	$0.30{\pm}0.01\mathrm{bc}$	$0.84 \pm 0.04 c$	$1.00\pm0.01\mathrm{ab}$	1.01±0.07a
OBS	$0.33 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.42{\pm}0.02\mathrm{bc}$	$0.30 \pm 0.03 \mathrm{b}$	$0.31 \pm 0.01 \mathrm{b}$	0.33±0.01a	$0.30{\pm}<0.01{\rm bc}$	0.79±<0.01c	$0.96{\pm}0.03{\rm abc}$	1.04±0.01a
MOS	$0.30 \pm < 0.01 \mathrm{b}$	$0.37 \pm 0.05 c$	$0.25 \pm 0.01 c$	$0.40 \pm 0.02 a$	0.35±0.01a	0.42±<0.01a	$0.80 \pm 0.02 c$	$0.82 \pm 0.02 \mathrm{e}$	$0.97 \pm 0.01 \mathrm{b}$

## 表7 不同钝化剂处理对水稻根、秸秆Cd富集系数的影响

Table 7 Bioconcentration factor of cadmium in root and straw under different passivators treatments

处理	水稻根部(	Cd富集系数BF of Cd in	root(BF根)	水稻秸秆C	d富集系数BF of Cd in	straw(BF <sub>秸秆</sub> )
工理 Treatment	第一季 The first season	第二季 The second season	第三季 The third season	第一季 The first season	第二季 The second season	第三季 The third season
CK	7.46±0.24a	4.37±0.28a	7.78±0.14a	3.28±0.33a	2.42±0.07a	3.20±0.13a
M	$5.24 \pm 0.20 c$	$3.12 \pm 0.09 \mathrm{cd}$	7.42±0.28a	$1.58 \pm 0.02 c$	$1.32 \pm 0.03 \mathrm{cd}$	$2.12\pm0.04$ cd
0	5.07±0.23e	$3.03 \pm 0.21 \text{cd}$	$7.09\pm0.09a$	1.52±0.06c	$1.20 \pm 0.08 d$	$2.05 \pm 0.03 d$
В	$5.50 \pm 0.09 bc$	3.25±0.19e	7.55±0.28a	$1.95 \pm 0.03$ b	$1.39 \pm 0.15 e$	$2.41 \pm 0.10 \mathrm{b}$
S	6.95±0.47a	$3.78 \pm 0.19 b$	7.59±0.23a	2.06±0.09b	$1.58 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$2.39\pm0.13b$
MBS	$5.57 \pm 0.19 bc$	$3.18\pm0.10\mathrm{cd}$	7.49±0.37a	1.94±0.01b	$1.40 \pm 0.04 c$	$2.25{\pm}0.01\mathrm{be}$
OBS	$5.86 \pm 0.04 \mathrm{b}$	$3.28 \pm 0.14 c$	7.15±0.57a	1.91±0.03b	$1.37 \pm 0.01 \mathrm{cd}$	$2.15{\pm}0.04{\rm cd}$
MOS	4.34±0.14d	2.78±0.18d	5.68±0.21b	1.29±0.04c	1.02±0.06e	1.41±0.04e

#### 表8 不同钝化剂处理对谷壳、糙米Cd富集系数的影响

Table 8 Bioconcentration factor of cadmium in chaff and brown rice under different passivators treatments

处理	谷壳Cd富	富集系数 BF of Cd in cha	ff(BF <sub>谷売</sub> )	糙米Cd富集系数BF of Cd in brown rice(BF text)			
Treatment	第一季 The first season	第二季 The second season	第三季 The third season	第一季 The first season	第二季 The second season	第三季 The third season	
CK	0.79±0.06a	0.62±0.01a	0.71±0.01a	0.80±0.02a	0.63±0.02a	0.75±0.02a	
M	$0.51 \pm 0.04 c$	$0.46 \pm 0.02 c$	$0.64 \pm 0.04 \mathrm{b}$	$0.51{\pm}0.04{\rm bcd}$	$0.41 \pm 0.01 de$	$0.67 \pm 0.06 \mathrm{b}$	
O	$0.51 \pm 0.02c$	$0.42 \pm 0.01 d$	$0.64 \pm 0.02 \mathrm{b}$	$0.49{\pm}0.03\mathrm{cd}$	$0.39 \pm 0.01 e$	$0.65 \pm 0.03 \mathrm{b}$	
В	$0.61 \pm 0.04 \mathrm{b}$	$0.48\pm0.01\mathrm{bc}$	$0.66 \pm 0.01 \mathrm{ab}$	$0.52 \pm 0.03 \mathrm{bc}$	$0.45 \pm 0.01 bc$	0.66±<0.01b	
S	$0.63 \pm 0.01$ b	$0.50 \pm 0.03 \mathrm{b}$	$0.67 \pm 0.01 \mathrm{ab}$	$0.55 \pm < 0.01 \mathrm{b}$	$0.48 \pm 0.01 \mathrm{b}$	0.69±<0.01b	
MBS	$0.59 \pm 0.01 \mathrm{bc}$	$0.46 \pm 0.00 c$	$0.66 \pm 0.01 \mathrm{ab}$	$0.50{\pm}0.01\mathrm{cd}$	$0.46 \pm 0.01 \mathrm{bc}$	$0.67 \pm 0.03 \mathrm{b}$	
OBS	$0.59 \pm 0.01 \mathrm{bc}$	$0.45 \pm 0.01 \mathrm{cd}$	$0.64 \pm 0.01 \mathrm{b}$	$0.47 \pm 0.01 d$	$0.43 \pm 0.01 \mathrm{cd}$	$0.66 \pm 0.01 \mathrm{b}$	
MOS	0.50±0.01c	$0.35 \pm 0.01 e$	0.58±0.01c	$0.41 \pm 0.01 e$	$0.29 \pm 0.01$ f	$0.56 \pm 0.02 c$	

## 表9 糙米Cd含量与土壤pH、有效态Cd、水稻不同部位Cd含量及转运系数的相关性

Table 9 Correlation of brown rice Cd content between soil pH, soil available Cd, Cd content in root, straw and chaff and TF of root, straw and chaff

项目 Item	土壤 pH Soil pH	土壤有效态 Cd 含量 Soil available Cd content/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	根 Cd 含量 Root Cd content/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	秸秆 Cd 含量 Straw Cd content/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	谷壳 Cd 含量 Chaff Cd content/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	TF 秸秆/根	TF 谷売/秸秆	TF 糙米/谷壳
第一季	-0.679**	0.829**	0.816**	0.941**	0.868**	0.799**	-0.780**	0.611*
The first season								
第二季	-0.721**	0.776**	0.892**	0.942**	0.984**	0.891**	-0.743**	0.843**
The second season								
第三季	-0.635**	0.791**	0.801**	0.918**	0.873**	0.838**	-0.925**	0.677**
The third season								

注:\*和\*\*分别表示P<0.05和P<0.01。

Note: \* and \*\* represent P<0.05 and P<0.01, respectively.

# 3 讨论

pH是影响土壤 Cd赋存形态变化的关键因子,通过提高土壤 pH减少土壤 Cd的迁移转化是钝化剂原位钝化修复过程的主要机制之一[25]。研究表明,当土壤

pH较低时,土壤Cd溶解度增加,有效态Cd含量增加, 移动性增强,当pH升高时,Cd容易结合形成Cd(OH)<sub>2</sub>, 使有效态Cd含量降低,移动性减弱<sup>[26]</sup>,原因是土壤pH 提高可促进土壤胶体对金属离子的吸附,激发土壤黏 粒表面阴离子基团与重金属离子结合形成沉淀,进而

降低了土壤中Cd的迁移转化能力[27]。而不同材料钝 化剂对土壤pH变化的影响程度也不尽相同[28]。本研 究中4种不同钝化材料及其3种复配组合均提升了土 壤pH,其中贝壳粉处理pH提升效果最佳,桑树枝杆 生物炭处理次之,其原因是贝壳粉主要成分为碳酸 钙,且含有钾、镁等碱性化合物,是一种碱性材料,具 有较高的pH[29],而不同材料复配组合中桑树枝杆生 物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理因其包含有贝壳粉 和生物炭两种pH较高的材料,因此对土壤pH也起到 了大幅提升的作用,说明钝化剂对土壤pH的影响与 材料自身的pH大小有着紧密的关系。本研究各钝化 剂处理土壤 pH 随施用时间的推移有一定程度的回 落,其原因可能与土壤本身对土壤酸碱度变化具很强 的缓冲能力有关[30],其次,还可能与当地酸性化学肥 料施用及我国南方地区酸雨沉降对土壤酸化有一定 程度的贡献有关[31]。

土壤重金属生物有效性是影响作物籽粒重金属 含量多少的重要因素[14]。研究表明,施入生物质炭可 显著降低土壤可交换态Cd、碳酸盐结合态Cd、铁锰氧 化物结合态 Cd 的含量,而残渣态 Cd 含量却明显升 高[32];施用贝壳粉钝化剂可以显著降低土壤中Cd的 有效态含量,提高Cd的残渣态含量[33-34];施用蚕沙有 机肥能有效降低土壤 Cd 的牛物有效性[35],但单独使 用时对重金属的钝化效果相对较弱[36]。本研究中施 用钝化剂处理均不同程度降低了土壤有效态Cd的含 量,其中,4种不同钝化剂材料中以贝壳粉处理降低 效果最佳,桑树枝杆生物炭处理效果次之,3种不同 复配组合中桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合 处理降低效果最佳,其原因可能是:贝壳粉和桑树枝 杆生物炭碱性较高[29,37],施入后土壤pH迅速提升,促 使 Cd2+形成磷酸盐、碳酸盐或氢氧化物沉淀[38], 与此 同时pH提高增强了土壤胶体对Cd的吸附作用,促进 了土壤溶液中游离Cd的沉淀,从而降低了土壤Cd的 有效态含量[39];其次,贝壳粉中Ca含量丰富,Ca极易 与土壤中Cd2+形成稳定的螯合物[40],生物炭则可通过 其表面的羰基、酚基和醌基等含氧官能团与Cd2+反应 形成稳定的配合物(-COOCd、-COCd、-OCd),且 该类官能团还可通过影响土壤阳离子交换量变化来 提升土壤颗粒对金属离子的静电吸附作用[41-42];贝壳 粉和生物炭成分均具有疏松多孔的特性,其巨大的比 表面积和孔径结构增强了材料对土壤溶液中重金属 离子的吸附固定[43-44],研究表明生物炭的多孔结构可 减少土壤中可溶性有机质的淋失,有力促进小分子脂 肪族物质向高芳香性大分子转化,进而提高 Cd²+稳定络合物的形成[45-46]。荆林晓[47]、陶雪等[48]研究指出,将有机钝化材料与无机材料复配使用更能激发出复合体对重金属离子的吸附、络合和沉淀能力,韩熙等[49]研究指出,将多种钝化材料联合施用,效果往往好于单一材料,同时还可减少单独施用一种材料造成的不利影响。本研究中桑树枝杆生物炭、贝壳粉、蚕沙3种材料按1:1:1复配组合施用处理显著降低了土壤有效态 Cd 的含量,且降低效果优于3种材料单独施用处理,这与前人研究结果基本一致,而3种材料组合对钝化土壤 Cd²+的最佳施用配比、施用量及三者之间的具体协作分子机制还有待深入研究。

植物体内重金属含量多少是反映钝化材料修复 效果的直接依据[50],研究表明施用生物炭、贝壳粉、蚕 沙均可不同程度地减少水稻各组织对Cd的吸 收[12,29,51]。吴迪等[52]研究指出,钝化剂可以有效降低 水稻对土壤 Cd的富集作用,同时减少水稻中 Cd由根 系向茎部的迁移。通常根系是植物吸收Cd的关键部 位,也是植物体Cd富集的主要器官[53],稻米对Cd的 吸收累积与根对 Cd 的吸收能力关系密切[54-55], 而 Cd 由谷壳到糙米转运的能力是糙米Cd富集累积的关键 过程,二者共同决定糙米的Cd含量[56-57]。本研究中, 施用钝化剂有效减少了水稻根、秸秆、谷壳及糙米中 Cd的含量,降低了Cd由根到秸秆和谷壳到糙米的转 运系数,说明钝化剂减少了水稻根系对Cd的吸收,并 抑制了Cd由根部向秸秆转运的能力,这与前人研究 结果基本一致[52]。Ca2+与Cd2+具有相似的化学性质, 含Ca钝化材料中富含的Ca2+、Mg2+等盐基离子,能与 水稻根表面的 Cd2+形成竞争吸收,进而抑制水稻对 Cd2+的吸收[58-59],本试验的钝化剂贝壳粉 Ca 含量较 高,这也可能是其影响水稻吸收累积Cd的重要因素 之一。结合相关分析结果,糙米Cd含量与根、秸秆及 谷壳Cd含量呈极显著正相关,与Cd由根到秸秆的转 运系数呈极显著正相关,与Cd由谷壳到糙米的转运 系数呈显著和极显著正相关,说明通过降低水稻根系 对Cd的吸收,减少Cd由根系向秸秆和谷壳再向糙米 中的转运系数,是钝化剂降低糙米Cd累积的原因之 一,本研究4种材料中贝壳粉糙米Cd含量降低效果 最好,而将贝壳粉与桑树枝杆生物炭和蚕沙按1:1:1 复配组合处理的糙米Cd含量显著低于其他钝化剂处 理,与van Herwijnen等[60]、杨侨等[61]和殷飞等[62]研究报 道的多种钝化材料有机复配施用效果通常优于单独 施用一种材料的结果基本一致。3种材料对水稻Cd

吸收、转运影响的具体途径及三者之间协同作用的分 子机制还有待进一步研究。

通常钝化剂只是暂时性地降低了土壤重金属的 有效态,而未能直接去除土壤中的重金属,因此钝化 剂在土壤中对重金属的钝化效果及其持久性是一个 必须考虑的问题[31]。土壤中的重金属多为过渡元素, 施用钝化剂可使土壤中的重金属可交换态、碳酸盐结 合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态发生 改变,不同钝化剂对农田土壤中重金属形态稳定性的 影响存在明显差异,目钝化剂钝化容量有限,在土壤 中可能会被污染物所饱和,并随着时间的延长,钝化 效果会逐渐不明显[63]。本研究结果显示,3季试验各 处理土壤有效态Cd含量和水稻根系、秸秆、谷壳、糙 米Cd含量均呈现出随着时间的推移先降低而后又快 速升高的趋势,原因是第二季为早稻,早稻期间广西 桂南地区雨水较为丰富,水田多处在淹水或湿润状 态,淹水造成土壤有效态Cd含量较晚稻大幅减少,Cd 的生物有效性明显降低[64]。而与当季 CK 处理相比 较,各钝化剂处理随着钝化剂施用时间的推移到第三 季时,水稻根系、秸秆、谷壳和糙米的Cd含量降低幅 度明显减小,其中水稻根部Cd含量在第三季时与CK 处理已无显著差异(桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕 沙组合处理除外)。而地上部的主要器官谷壳的Cd 含量也有部分处理与CK处理没有显著差异,水稻可 食部位糙米Cd含量明显回升,降低幅度明显减小,其 中桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理水稻 各部位Cd含量降幅整体相对较小,持久性相对较好, 说明到第三季钝化剂的钝化效果已经出现了明显降 低,原因可能与随着施用时间的延长大部分处理土壤 pH逐步回落到施用前水平, 钝化剂材料吸附力饱和, 土壤有效态 Cd 含量再度提升等因素变化有关,因此 要相应地及时补充施用才能确保其钝化效果。

## 结论

- (1)施用桑树枝杆生物炭、贝壳粉、膨润土、蚕沙 4种钝化材料均有效提升了土壤pH而降低了土壤有 效态Cd含量,其中贝壳粉材料使土壤pH提升效果最 好,桑树枝杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理土壤 有效态Cd含量最低,钝化效果最佳。
- (2)施用桑树枝杆生物炭、贝壳粉、膨润土、蚕沙 4种钝化材料有效降低了水稻根、秸秆、谷壳及糙米 Cd的含量,其中贝壳粉效果最好,不同处理中桑树枝 杆生物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理糙米Cd含量显

著低于其他7个处理,降Cd效果最佳,但糙米Cd含量 仍未达到国家食品安全标准的要求(0.2 mg·kg-1以 下),还需配合其他措施一起使用。

(3)随着施用时间的推移,第三季时钝化剂处理 糙米Cd含量的降低幅度明显减小,其中桑树枝杆生 物炭配合贝壳粉和蚕沙组合处理的减少幅度相对较 小,结合其糙米 Cd 含量降低效果最佳,认为该处理降 Cd效果及时效性整体相对较好,在生产实践中可优 先推荐,但在土壤全Cd含量为1.5 mg·kg-1的重度污 染条件下,还需配合其他修复技术,同时在第二季后 须及时补充添加钝化剂才能确保糙米Cd含量符合 《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762— 2017)的要求。

### 参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17)[2022-06-18]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/ content\_2661768.htm. Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of national soil pollution survey [EB/OL].(2014-04-17)[2022-06-18]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content 2661768.htm.
- [2] 黄玉溢, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 桂西地区稻田土壤重金属污染现状调 查及评价[J]. 南方农业学报, 2014, 45(2): 240-243. HUANG Y Y, CHEN G F, XIONG L M, et al. Survey and evaluation of heavy metal contamination of paddy soil in western Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(2):240-243.
- [3] 宋波, 王佛鹏, 周浪, 等. 广西镉地球化学异常区水稻籽粒镉含量预 测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2672-2680. SONG B, WANG F P, ZHOU L, et al. Prediction model for cadmium concentrations in rice grain under the geochemical background of a cadmium anomaly area in Guangxi[J]. Journal of Agro - Environment Science, 2019, 38(12):2672-2680.
- [4] BOLAN N, KUNHIKRISHNAN A, THANGARAJAN R, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils: To mobilize or to immobilize[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 266: 141-166.
- [5] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修 复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7):1441-1453. CAO X D, WEI X X, DAI G L, et al. Combined pollution of multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soil: A review[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5 (7): 1441-1453.
- [6] 王建乐, 谢仕斌, 涂国权, 等. 多种材料对铅镉污染农田土壤原位修 复效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 325-332. WANG J L, XIE S B, TU G Q, et al. Comparison of several amendments for in-situ remediation of lead - and cadmium - contaminated farmland soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(2):
- [7] 冯敬云, 聂新星, 刘波, 等. 镉污染农田原位钝化修复效果及其机理

NES

- 研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5):764-777. FENG J Y, NIE X X, LIU B, et al. Efficiency of *in-situ* passivation remediation in cadmium-contaminated farmland soil and its mechanism: A review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38 (5):764-777.
- [8] 解晓露, 袁毳, 朱晓龙, 等. 中碱性镉污染农田原位钝化修复材料研究进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(5):1254-1260. XIE X L, YUAN C, ZHU X L, et al. *In-situ* Passivation remediation materials in cadmium contaminated alkaline agricultural soil: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(5):1254-1260.
- [9] 徐婧婧, 赵科理, 叶正钱. 重金属污染土壤原位钝化修复材料的最新研究进展[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(7):852-855. XU J J, ZHAO K L, YE Z Q. The latest research progress of *in-situ* passivation remediation materials for heavy metal contaminated soil[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(7):852-855.
- [10] 韩雷, 陈娟, 杜平, 等. 不同钝化剂对 Cd 污染农田土壤生态安全的 影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(7):1289-1295. HAN L, CHEN J, DU P, et al. Assessing the ecological security of the cadmium contaminated farmland treated with different amendments[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(7):1289-1295.
- [11] 何赢, 杜平, 石静, 等. 土壤重金属钝化效果评估: 基于大田试验的 研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8):1734-1740. HE Y, DU P, SHI J, et al. Evaluation of the effect of heavy metal immobilization remediation field experiment study[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(8):1734-1740.
- [12] 黄雁飞, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 不同作物秸秆生物炭对水稻镉吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(10):2364-2369. HUANG Y F, CHEN G F, XIONG L M, et al. Effects of different crop straw biochars on cadmium absorption in rice[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(10):2364-2369.
- [13] 骆文轩, 宋肖琴, 陈国安, 等. 田间施用石灰和有机肥对水稻吸收 镉的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3):232-237. LUO W X, SONG X Q, CHEN G A, et al. Effects of applying lime and organic fertilizer on cadmium uptake by rice[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3):232-237.
- [14] 黎大荣, 吴丽香, 宁晓君, 等. 不同钝化剂对土壤有效态铅和镉含量的影响[J]. 环境保护科学, 2013, 39(3): 46-49. LI D R, WU L X, NING X J, et al. Effects of different passivating agents on contents of available lead and cadmium in soil[J]. Environmental Protection Science, 2013, 39(3): 46-49.
- [15] 徐奕, 赵丹, 徐应明, 等. 膨润土对轻度镉污染土壤钝化修复效应研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(1): 38-46. XU Y, ZHAO D, XU Y M, et al. Immobilization and remediation of low-level Cd contaminated soil using bentonite[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(1): 38-46.
- [16] 安艳, 朱霞萍, 孟兴锐, 等. 巯基膨润土钝化修复镉污染水稻土的 研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(4):934-939. AN Y, ZHU X P, MENG X R, et al. Passivation remediation of Cd contaminated paddy soils by mercapto bentonite[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(4):934-939.
- [17] 化党领,朱利楠,赵永芹,等.膨润土、褐煤及其混合添加对铅、镉

- 复合污染土壤重金属形态的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(1):201–206. HUA D L, ZHU L N, ZHAO Y Q, et al. Fractions of heavy metals in Cd/Pb contaminated soil amended with bentonite and lignite[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1):201–206.
- [18] 罗文文, 徐应明, 王农, 等. 贝壳粉对 Cd( II )的吸附性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11):2240-2247. LUO W W, XU Y M, WANG N, et al. Adsorption performance of cadmium onto shell powder[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(11):2240-2247.
- [19] 王沛文, 杜立宇, 吴岩, 等. 不同类型贝壳粉对土壤镉赋存形态的 影响差异[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2):331-335. WANG P W, DU L Y, WU Y, et al. Effects of different shell powder types on soil cadmium speciation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2):331-335.
- [20] 纪艺凝, 徐应明, 王农, 等. 贝壳粉对农田土壤镉污染钝化修复效应[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2):233-240. JI Y N, XU Y M, WANG N, et al. Effect of shell powder on immobilization remediation of cadmium contaminated farmland soil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(2):233-240.
- [21] 胡艳美, 王旭军, 党秀丽. 改良剂对农田土壤重金属镉修复的研究 进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6):17-23. HU Y M, WANG X J, DANG X L. Research progress on remediation of heavy metal cadmium in farmland soil with amendments[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(6):17-23.
- [22] 李双丽, 王豪吉, 王昆艳, 等. 稻壳炭对铅和镉污染的青菜种植土壤的修复效果研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2019, 39 (6):33-38. LI S L, WANG H J, WANG K Y, et al. Remediation effects of rice husk biochar on the soil polluted with Pb and Cd and planted with *Brassica chinensis* L.[J]. *Journal of Yunnan Normal University*(Natural Science), 2019, 39(6):33-38.
- [23] 巩龙达, 陈凯, 李丹, 等. 复合钝化剂施用水平对镉污染农田土壤的修复效果[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2022, 48(3): 359-368. GONG L D, CHEN K, LI D, et al. Remediation effects of mixed amendment at different application levels on cadmium contaminated farmland soil[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2022, 48(3):359-368.
- [24] 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 Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(6):981-987.
- [25] 赵云杰, 马智杰, 张晓霞, 等. 土壤-植物系统中重金属迁移性的影响因素及其生物有效性评价方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(3):177-183. ZHAO Y J, MA Z J, ZHANG X X, et al. Factors affecting heavy metal migration in plant systems and methodsfor bioavailability evaluation[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(3):177-183.
- [26] 王慧慧, 詹绍军, 任丹, 等. 钝化剂种类对镉铅污染土壤的修复效果[J]. 土壤与作物, 2022, 11(3):320-328. WANG H H, ZHAN S J, REN D, et al. Effects of different passivators on heavy metal con-

- taminated soil[J]. Soils and Crops, 2022, 11(3):320-328.
- [27] 武成辉, 李亮, 晏波, 等. 新型硅酸盐钝化剂对镉污染土壤的钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2007-2013. WU C H, LI L, YAN B, et al. Remediation effects of a new type of silicate passivator on cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2007-2013.
- [28] 董欣欣, 孙保亚, 宋雪英, 等. 不同钝化剂对潮棕壤镉污染的原位 钝化效应研究[J]. 土壤与作物, 2021, 10(4): 460-466. DONG X X, SUN B Y, SONG X Y, et al. *In-situ* remediation of cadmium polluted aquic brown soil using different amendments[J]. *Soils and Crops*, 2021, 10(4): 460-466.
- [29] 潘丽萍, 谭骏, 刘斌, 等. 不同粒径贝壳粉对水稻吸收镉与硒的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10):2134-2140. PAN L P, TAN J, LIU B, et al. Effects of adding shell powder with different particle sizes to soil on selenium and cadmium uptake in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(10):2134-2140.
- [30] 黄清扬, 徐仁扣, 俞元春. 不同产地油菜秸秆制备的生物质炭对红 壤酸度和土壤 pH 缓冲容量的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 821-827. HUANG Q Y, XU R K, YU Y C. Effects of biochars of canola straws from different soils on red soil acidity and pH buffering capacity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(4):821-827.
- [31] 姜洋, 罗远恒, 顾雪元. 农田土壤镉污染的原位钝化修复及持久性研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017, 53(2):265-274. JIANG Y, LUO Y H, GU X Y. In situ immoblization of cadmium in soil and persistence study[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2017, 53(2):265-274.
- [32] 王海波, 尚艺婕, 史静. 生物质炭对土壤镉形态转化的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(4): 22-26. WANG H B, SHANG Y J, SHI J. Influence of biochar on the transformation of soil cadmium form [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(4): 22-26.
- [33] OK Y S, OH S, AHMAD M, et al. Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils[J]. *Cross-ref*, 2010, 61(6):1301–1308.
- [34] ISLAM M N, TAKI G, NGUYEN X P, et al. Heavy metal stabilization in contaminated soil by treatment with calcined cockle shell[J]. Crossref, 2017, 24(8):7177-7183.
- [35] 黎秋君, 黎大荣, 王英辉, 等. 3 种有机物料对土壤理化性质和重金属有效态的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6):182-185. LI Q J, LI D R, WANG Y H, et al. Effects of three kinds of organic materials on physicochemical properties and available heavy metals in soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6):182-185.
- [36] 涂春艳, 蒋林伶, 张超兰, 等. 蚕沙有机肥-铁基复配材料对镉砷锌复合污染土壤的修复效应[J]. 南方农业学报, 2019, 50(11):2436-2442. TU C Y, JIANG L L, ZHANG C L, et al. Passivation effects of silkworm organic fertilizer and iron base compound material on heavy metals in contaminated soil by cadmium, arsenic and zinc[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(11):2436-2442.
- [37] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉, 铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1):251–256. GAO R L, ZHU J, TANG F, et al. Fractions transformation of Cd, Pb in contaminated soil after short-term application of rice straw

- biochar[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(1):251-256.
- [38] SUN D Z, LI F Y, JIN J W, et al. Qualitative and quantitative investigation on adsorption mechanisms of Cd ( II ) on modified biochar derived from co-pyrolysis of straw and sodium phytate[J]. Science of the Total Environment, 2022, 829:154599.
- [39] YANG X, LIU J J, MCGROUTHER K, et al. Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) and enzyme activity in soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (2):974-984.
- [40] PAPADOPOULOS P, ROWELL D L. The reactions of cadmium with calcium carbonate surfaces[J]. European Journal of Soil Science, 1988, 39(1):23-36.
- [41] 马锋锋, 赵保卫, 钟金魁, 等. 牛粪生物炭对磷的吸附特性及其影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4):1156-1163. MA F F, ZHAO B W, ZHONG J K, et al. Characteristics phosphate adsorption onto biochars derived from dairy manure and its influencing factors[J]. China Environmental Science, 2015, 35(4):1156-1163.
- [42] WANG S Y, KWAK J H, ISLAM M S, et al. Biochar surface complexation and Ni( II ), Cu( II ), and Cd( II ) adsorption in aqueous solutions depend on feedstock type[J]. Science of the Total Environment, 2020, 712;136-538.
- [43] 王亮, 张慜, 孙金才, 等. 牡蛎壳超微粉碎工艺及粉体性质[J]. 无锡轻工大学学报, 2004, 23(1):58-61. WANG L, ZHANG M, SUN J C, et al. The process of super micron-milling of oyster shells and the powder property[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2004, 23(1):58-61.
- [44] 施琪, 鲁然英, 常德政, 等. 增施生物质炭对镉污染土壤的修复效果研究[J]. 江西农业学报, 2019, 31(10):83-87. SHI Q, LU R Y, CHANG D Z, et al. Effects of increasing biochar application on remediation of Cd contaminated soil[J]. Acta Agricultural Jiangxi, 2019, 31 (10):83-87.
- [45] GUO X J, WU Y, LI N X, et al. Effects on the complexation of heavy metals onto biochar-derived WEOM extracted from low-temperature pyrolysis[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 221: 112456.
- [46] HUANG M, LI Z W, LUO N L, et al. Application potential of biochar in environment: Insight from degradation of biochar-derived DOM and complexation of DOM with heavy metals[J]. Science of the Total Environment, 2018, 646;220-228.
- [47] 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.
- [48] 陶雪, 杨琥, 季荣, 等. 固定剂及其在重金属污染土壤修复中的应用[J]. 土壤, 2016, 48(1):1-11. TAO X, YANG H, JI R, et al. Stabilizers and their applications in remediation of heavy metal-contaminated soil[J]. Soils, 2016, 48(1):1-11.
- [49] 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 bio-

- AES\_
- availability of Cd in soils[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(10):2884-2891.
- [50] 宁东峰. 土壤重金属原位钝化修复技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(23):72-80. NING D F. A review of in situ passivation repairing technology of heavy metals in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(23):72-80.
- [51] 刘顺翱, 胡钧铭, 吴昊, 等. 蚕沙与海泡石联合施用对水稻根际土壤 Cd 生物有效性及籽粒 Cd 富集的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8):1686-1695. LIU S A, HU J M, WU H, et al. Effects of the combined application of silkworm excrement and sepiolite on Cd bioavailability in rhizosphere soil and Cd accumulation in grains of rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(8):1686-1695.
- [52] 吴迪, 魏小娜, 彭湃, 等. 钝化剂对酸性高镉土壤钝化效果及水稻 镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(2):482-488. WU D, WEI X N, PENG P, et al. Effects of passivators on acid and cadmium farmland soils and cadmium absorption by rice[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(2):482-488.
- [53] NOCITO F F, LANCILLI C, DENDENA B, et al. Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation[J]. Plant Cell & Environment, 2011, 34(6):994-1008.
- [54] 李鹏, 葛滢, 吴龙华, 等. 两种籽粒镉含量不同水稻的镉吸收转运及其生理效应差异初探[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(3):291-296. LI P, GE Y, WU L H, et al. Up take and translocation of cadmium and its physiological effects in two rice cultivars differed in grain cadmium concentration[J]. Chin J Rice Sci, 2011, 25(3):291-296.
- [55] 佟倩, 张秀双, 魏晓敏, 等. 不同品种水稻对镉累积特性研究[J]. 北方水稻, 2014, 44(5):1-7. TONG Q, ZHANG X S, WEI X M, et al. Characteristics of different rice varieties on cadmium accumulation[J]. North Rice, 2014, 44(5):1-7.
- [56] 冯爱煊, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37 (6):988-1000. FENG A X, HE H Z, LI N, et al. Screening of rice varieties with low accumulation of heavy metals based on multiple target elements and their absorption and transport characteristics in rice plants[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37

- (6):988-1000.
- [57] 黄太庆, 江泽普, 黄雁飞, 等. 不同配方含硒叶面肥对水稻富硒降镉的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(7):1185-1189. HUANG T Q, JIANG Z P, HUANG Y F, et al. Effects of different foliar fertilizers containing Se on Se-enrichment and Cd-reduction in rice[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2017, 48(7):1185-1189.
- [58] LUO W, YANG S, KHAN M A, et al. Mitigation of Cd accumulation in rice with water management and calcium-magnesium phosphate fertilizer in field environment[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42(11):3877-3886.
- [59] PRASAD M. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 1995, 35(4):525-545.
- [60] VAN HERWIJNEN R, HUTCHINGS T R, ALTABBAA A, et al. Remediation of metal contaminated soil with mineral-amended composts [J]. Environmental Pollution, 2007, 150(3):347-354.
- [61] 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.
- [62] 殷飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的 修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):438-448. YIN F, WANG H J, LI Y Y, et al. Remediation of multiple heavy metal polluted soil using different immobilizing agents[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):438-448.
- [63] 王陈丝丝, 马友华, 于倩倩, 等. 钝化剂对农田土壤重金属形态与 其稳定性影响研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(1):172-177. WANG CSS, MAYH, YUQQ, et al. Effect of passivation agent on morphology and stability of heavy metals in cropland soil[J]. *Chinese* Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(1):172-177.
- [64] 葛颖, 马进川, 邹平, 等. 水分管理对镉轻度污染农田水稻镉积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 79-86. GE Y, MA J C, ZOU P, et al. Improving water management to reduce Cd accumulation in rice in lightly Cd-polluted paddy soils[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(3): 79-86.