

## 不同粒径贝壳粉对水稻吸收镉与硒的影响

潘丽萍, 谭骏, 刘斌, 邢颖, 黄雁飞, 陈锦平, 刘永贤

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0244>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响

高敏, 周俊, 刘海龙, 胡远妹, 徐磊, 梁家妮, 黄贵凤, 周静

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

### 外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响

王波, 张然然, 杨如意, 石晓菁, 苏楠楠, 朱濛, 咎树婷

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2710–2718 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0437>

### 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>

### 稻田镉砷污染阻控原理与技术应用

于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 刘传平, 李芳柏

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1418–1426 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0730>

### 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响

张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 官迪, 彭华, 朱坚, 田发祥

农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1867–1872 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0432>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

# 不同粒径贝壳粉对水稻吸收镉与硒的影响

潘丽萍<sup>1,3</sup>, 谭骏<sup>2</sup>, 刘斌<sup>1,3</sup>, 邢颖<sup>1,3</sup>, 黄雁飞<sup>1,3</sup>, 陈锦平<sup>1,3</sup>, 刘永贤<sup>1,3\*</sup>

(1. 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; 2. 南宁市农业科学研究所, 南宁 530009; 3. 广西富硒农业研究中心, 南宁 530007)

**摘要:**为明确不同粒径贝壳粉对土壤镉、硒有效性及水稻吸收累积镉与硒的影响差异, 采用田间试验, 设置等量不同粒径贝壳粉施用处理, 通过测定水稻植株各部位镉和硒含量, 结合土壤 pH、土壤有效态镉和有效态硒及其价态含量, 对比分析不同粒径贝壳粉对水稻吸收累积镉和硒的影响。结果表明:施用贝壳粉可显著提高稻田土壤 pH, 降低土壤有效态镉含量, 且贝壳粉粒径越小, 效果越显著, 10、60、200 目贝壳粉处理的土壤有效态镉含量分别比对照(常规种植)降低 8.68%、10.84% 和 17.50%, 同时稻田土壤有效态硒含量得以提高, 并以交换态硒为主, 贝壳粉粒径越小, 越利于交换态硒向+6 价硒转化;施用贝壳粉可促进水稻降镉富硒, 糙米镉含量比对照降低 9.62%~49.02%, 硒含量提高 4.31~5.58 倍, 且水稻体内镉含量与硒含量呈显著的负相关性, 其中 60 目和 200 目贝壳粉处理的糙米镉含量均符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)的要求。研究表明, 在实际生产中可选用粒径 60 目以上的贝壳粉作为镉污染农田稻米降镉富硒的修复材料。

**关键词:**贝壳粉; 镉; 硒; 水稻

**中图分类号:** S511; X53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-2043(2021)10-2134-07      **doi:** 10.11654/jaes.2021-0244

## Effects of adding shell powder with different particle sizes to soil on selenium and cadmium uptake in rice

PAN Liping<sup>1,3</sup>, TAN Jun<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>1,3</sup>, XING Ying<sup>1,3</sup>, HUANG Yanfei<sup>1,3</sup>, CHEN Jinping<sup>1,3</sup>, LIU Yongxian<sup>1,3\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 2. Nanning Institute of Agricultural Sciences, Nanning 530009, China; 3. Guangxi Selenium-rich Agricultural Research Center, Nanning 530007, China)

**Abstract:** Shell is a passivating material that can be used for the remediation of heavy metals pollution. The purpose of this study is to clarify effects of different particle sizes of shell powder on the availability of cadmium and selenium in soil and on the absorption and accumulation of cadmium and selenium in rice. A plot field experiment was conducted by adding equal amounts of shell powder with different particle sizes to measure the contents of cadmium and selenium in different parts of rice plants. We further measured the soil pH, content of available cadmium, and the available selenium and valence contents. We aimed to thereby find the optimal shell particle size for rice cultivation. The results showed that the application of shell powder could significantly increase soil pH and reduce the available soil cadmium content; the particle size was inversely proportional to this effect. The available soil cadmium content after the incorporation of 10 mesh, 60 mesh, and 200 mesh shell powders decreased by 8.68%, 10.84% and 17.50% respectively, as compared to that of the control. Meanwhile, the available selenium content increased, and the exchangeable selenium was dominant. The smaller the particle size of shell

收稿日期: 2021-03-02      录用日期: 2021-06-11

作者简介: 潘丽萍(1988—), 女, 广西南宁人, 硕士, 助理研究员, 从事土壤生态与高值农业研究。E-mail: plping1013@163.com

\*通信作者: 刘永贤      E-mail: liuyx27@163.com

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17202026, 桂科 AA20108002-3); 广西科技先锋队专项(桂农科盟 202114); 广西农业科学院团队项目(桂农科 2020YT039)

**Project supported:** Science and Technology Major Project of Guangxi (Gui Ke AA17202026, Gui Ke AA20108002-3); Science and Technology Pioneer Project of Guangxi (Gui Nong Ke Meng 202114); Team Project of Guangxi Academy of Agricultural Sciences (Gui Nong Ke 2020YT039)

powder, the more conducive it was for the conversion of exchangeable selenium to +6 valence. The application of shell powder could facilitate a decrease in cadmium and an increase in selenium in rice. Compared with the control, the cadmium content in brown rice decreased by 9.62%~49.02%, while the selenium content increased by 4.31~5.58 times. The cadmium content in rice was significantly negatively correlated with the selenium content, among which the cadmium content in the brown rice treated with 60 mesh and 200 mesh shell powders met the *National Pollution Standards of Food Safety* (GB 2762—2017). Therefore, shell powders with a particle size of more than 60 mesh can be used as the remediation material to reduce the cadmium content and enrich selenium in rice contaminated by cadmium in practical production.

**Keywords:** shell powder; cadmium; selenium; rice

硒是人体必需的生命元素,开发富硒农产品是提升人体硒摄入水平的安全有效途径,而富硒土地资源是开发富硒农产品的基础。然而,近年来全国开展的多目标地球化学调查发现,受区域地质背景及其岩性建造的控制,镉、砷、汞等重金属与硒之间存在伴生现象,多数富硒区镉表现为明显富集<sup>[1-4]</sup>,致使富硒农产品开发存在一定的生态风险。在土壤镉污染防治方面已有大量的研究成果,有研究表明,基于硒与镉不同的地球化学特性,用于钝化镉的材料(如:磷灰石、石灰、生物炭等)能有效提高土壤硒的有效性<sup>[5-6]</sup>,可将其应用于硒镉共生富硒土壤资源的开发利用。贝壳是一种天然吸附材料,相对于上述钝化材料,因其低成本、易得、无二次污染的优点而被研究者关注,现阶段研究表明,施用贝壳粉可降低土壤中镉的生物有效性<sup>[7-10]</sup>,其钝化机理主要是通过提高土壤pH和物理吸附、离子交换吸附等作用降低镉的活性,且粒径越小吸附能力越强。然而贝壳粉对土壤硒的影响研究仍缺乏,尤其是在硒镉共生的田间环境下,两者之间的生物有效性以及不同贝壳粉粒径对其影响差异还有待进一步研究。另外,贝壳中含有丰富的硒等微量元素<sup>[11]</sup>,对其的挖掘利用也仍较缺乏。因此,本研究选取中轻度镉污染的镉硒伴生农田为研究对象,通过田间小区试验,对比研究施用不同粒径贝壳粉对土壤镉、硒有效性及水稻吸收累积镉与硒的影响,以期为贝壳的资源化高效利用及稻米的降镉富硒提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

小区试验位于广西桂平市某中轻度镉污染农田。

贝壳粉购买于北海市某公司,采用万能粉碎机将贝壳粉粉碎后分别过10、60、200目尼龙筛备用。供试水稻品种为百香139,由广西桂平市某育秧厂提供。供试土壤和贝壳粉基本性质见表1。

### 1.2 试验设计

前期盆栽试验发现,10目贝壳粉1%的添加量对镉的钝化效果最佳。因此本试验在前期试验的基础上设置4个处理:(1)对照组(CK),常规种植;(2)施用10目贝壳粉3 000 kg·hm<sup>-2</sup>(BK10);(3)施用60目贝壳粉3 000 kg·hm<sup>-2</sup>(BK60);(4)施用200目贝壳粉3 000 kg·hm<sup>-2</sup>(BK200)。每个处理重复3次,每个小区150 m<sup>2</sup>,设置单独的进、排水口。小区四周起垄并用聚乙烯薄膜相互间隔,以防止小区之间水、肥相互渗透。机器翻耕后,均匀撒施不同粒径贝壳粉,待贝壳粉与土壤混合一周后插秧。水稻生长过程中的水肥管理均根据当地常规标准进行。

### 1.3 样品采集与处理

水稻成熟后,每个小区随机选取6个采样点,每个点采集3株水稻及根区土壤。将植株样分成根、秸秆、稻壳、籽粒4部分,分别用去离子水冲洗后于烘箱内105℃杀青30 min,然后70℃烘至恒质量,最后粉碎过60目筛装袋备用。土壤样品于阴凉处风干后研磨过20目和100目尼龙筛备用。

### 1.4 指标测定方法

土壤pH采用电位法测定,土壤有机质含量、阳离子交换量指标测定参照《土壤农化分析》<sup>[12]</sup>。土壤全镉含量采用HNO<sub>3</sub>、HF、HClO<sub>4</sub>消解,石墨炉原子吸收分光光度法测定(GB/T 17141—1997);土壤中有效态镉用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)提取,石墨炉原子吸

表1 供试土壤和贝壳粉基本性质

Table 1 Basic properties of tested soil and oyster shell

| 供试材料 Tested material | pH    | 阳离子交换量 CEC/<br>(cmol·kg <sup>-1</sup> ) | 有机质<br>Organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全镉<br>Total Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 全硒<br>Total Se/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|----------------------|-------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 供试土壤 Soil            | 6.53  | 22.30                                   | 69.50                                       | 1.12                                  | 0.41                                  |
| 贝壳粉 Oyster shell     | 10.10 | 6.26                                    | 1.15                                        | 0.06                                  | 0.40                                  |

收分光光度法测定<sup>[13]</sup>。土壤全硒采用氢化物-原子荧光光谱法测定(NY/T 1104—2006);土壤有效硒含量的测定,用0.1 mol·L<sup>-1</sup>的磷酸二氢钾溶液浸提,HNO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(V:V=7:1)混酸进行微波消解后,用氢化物-原子荧光光谱法测定(NY/T 3420—2019);土壤硒形态及价态测定参考瞿建国等<sup>[14]</sup>的分级处理方法。

水稻植株样中镉和硒的测定:采用HNO<sub>3</sub>、HClO<sub>4</sub>消解,用石墨炉原子吸收分光光度法测定镉含量(GB/T 5009.15—2014),用氢化物-原子荧光光谱法测定硒含量(GB/T 5009.93—2017)。

### 1.5 数据统计与分析

采用Excel 2017、Origin 9.1、SPSS 17.0 软件进行数据处理、相关性分析、方差分析和图表制作。

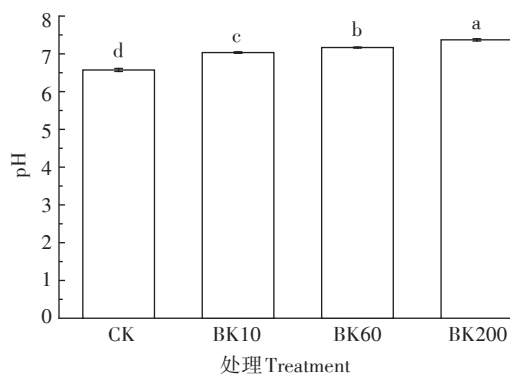
## 2 结果与分析

### 2.1 对土壤pH的影响

如图1所示,与CK相比,施用不同粒径贝壳粉均显著提高了土壤pH,且添加贝壳粉的粒径越小,效果越显著。其中粒径最大的BK10处理土壤pH上升0.4个单位,粒径最小的BK200处理土壤pH上升0.8个单位。

### 2.2 对土壤有效态镉含量和有效态硒含量的影响

由图2可知,添加不同粒径贝壳粉后,土壤中有有效态镉与有效态硒含量呈现出相反的变化趋势。BK10、BK60、BK200处理的土壤有效态镉含量均低于CK,分别比CK降低8.68%、10.84%和17.50%;而磷酸二氢钾溶液浸提的土壤有效态硒含量分别提高56.39%、70.48%和84.19%,但有效态硒含量处理间差异不显著。



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

图1 不同处理对土壤pH的影响

Figure 1 pH in soil under different treatments

土壤有效态硒一般主要包括可溶态硒和交换态硒,进一步测定分析各处理可溶态硒和交换态硒中的不同价态硒(图3)发现,可溶态硒中的+4价占比较大,而-2价与+6价占比相当。与CK相比,添加贝壳粉土壤可溶态硒中的+4价和+6价硒含量总和占比有所升高,但升高不明显。而在交换态硒中,BK60和BK200处理的+4价和+6价硒含量占比均有所升高,且+6价占比较高。可见,贝壳粉处理对土壤有效态硒的影响以交换态硒为主,并推断交换态中硒价态的变化主要是亚硒酸盐向硒酸盐转化。

### 2.3 不同粒径贝壳粉对水稻吸收累积镉和硒的影响

#### 2.3.1 水稻体内镉含量及分布

水稻对土壤中的镉有较强的富集能力,图4显示,CK处理水稻根、秸秆、稻壳和糙米中镉含量分别达到3.606、0.731、0.499、0.234 mg·kg<sup>-1</sup>。施加不同粒径贝壳粉不同程度降低了水稻对镉的吸收,各组织镉含量基本表现为根>秸秆>稻壳>糙米,各部位镉含量随贝壳粉粒径减小而降低。其中,贝壳粉粒径最小的BK200处理水稻根、秸秆、稻壳和糙米镉含量分别比CK降低39.76%、25.28%、62.80%和49.02%,并且BK60和BK200的糙米镉含量分别下降至0.16 mg·

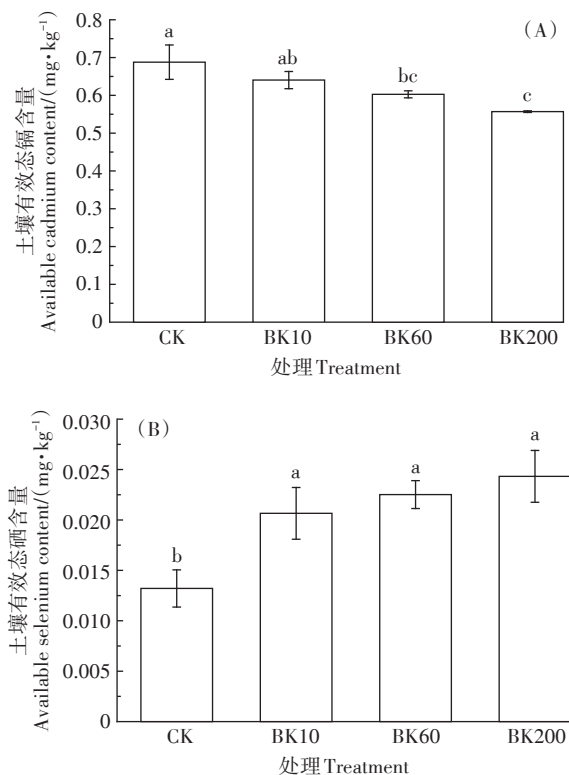


图2 不同处理对土壤有效态镉含量和有效态硒含量的影响

Figure 2 Content of available cadmium and available selenium in soil under different treatments

$\text{kg}^{-1}$ 和 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,均符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中大米镉限量值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的要求。

### 2.3.2 水稻体内硒含量及分布

与镉类似,水稻根部硒含量最高,糙米中的含量相对较少。添加贝壳粉处理对水稻吸收硒的影响与镉相反,与CK相比,施用贝壳粉显著提高了水稻各部位硒含量,且糙米、稻壳和根中硒含量随贝壳粉粒径减小而增加,BK10、BK60、BK200处理糙米硒含量分别达到 $0.086$ 、 $0.103$ 、 $0.111 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,分别是CK的 $4.31$ 、 $5.17$ 、 $5.58$ 倍。虽然水稻根和秸秆中的硒含量分别是CK的 $1.8 \sim 2.5$ 倍和 $14 \sim 16$ 倍,但除BK10与BK200根中硒含量差异显著外,其他不同粒径贝壳粉处理间差异并不显著。

### 2.4 水稻累积镉与硒的相关性

进一步分析水稻各部位镉和硒含量的相关性发现(表2),糙米中的镉含量与水稻各部位镉含量均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与硒含量呈显著负相关。其

中,糙米和稻壳中的镉与硒含量相关性较高,而秸秆中镉和硒含量的相关性相对较弱。

## 3 讨论

土壤pH是影响镉赋存形态最为关键的环境因子之一,在土壤重金属原位钝化修复过程中具有至关重要的作用<sup>[15-17]</sup>。贝壳粉主要成分为碳酸钙,且含有钾、镁等碱性化合物,是一种碱性钝化剂,具有较高的pH。本研究结果显示,添加贝壳粉显著提高了土壤pH,这与多人的研究结论一致<sup>[18-19]</sup>。贝壳粉粒径越小,土壤pH上升越明显,可能是因为粒径越小的贝壳粉比表面积越大,羟基暴露量越多<sup>[20]</sup>。

土壤有效态镉和有效态硒含量通常是反映其生物有效性的关键指标。土壤pH的升高,可增强土壤胶体和黏粒对重金属离子的吸附,黏土矿物表面及溶液中的羟基与重金属形成氢氧化物沉淀,促进镉由不稳定态向稳定态转化,进而降低土壤中镉的有效性和迁移能力<sup>[21]</sup>。本试验中,同等用量的贝壳粉处理均显

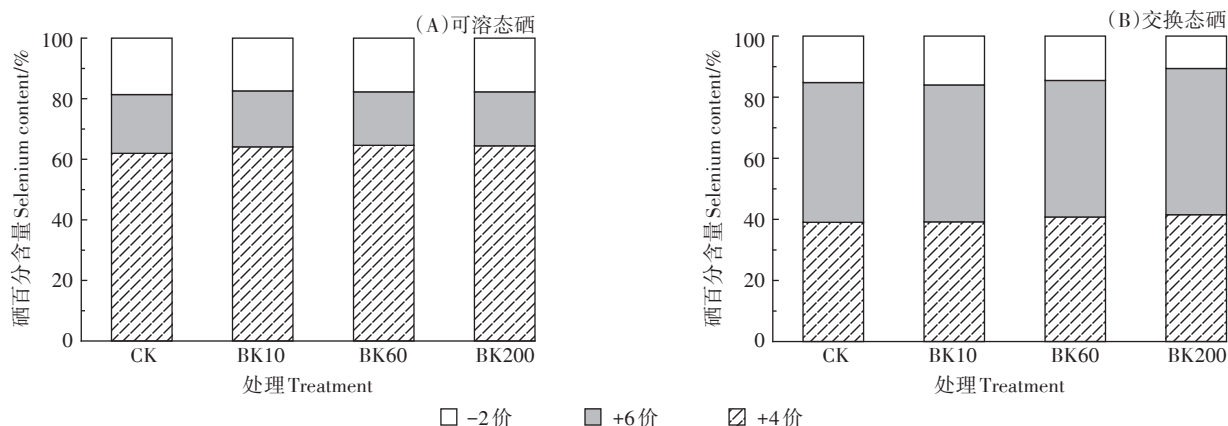


图3 不同处理对可溶态硒和交换态硒中不同价态硒的影响

Figure 3 Effects of different treatments on different species of selenium in soluble selenium and exchangeable selenium

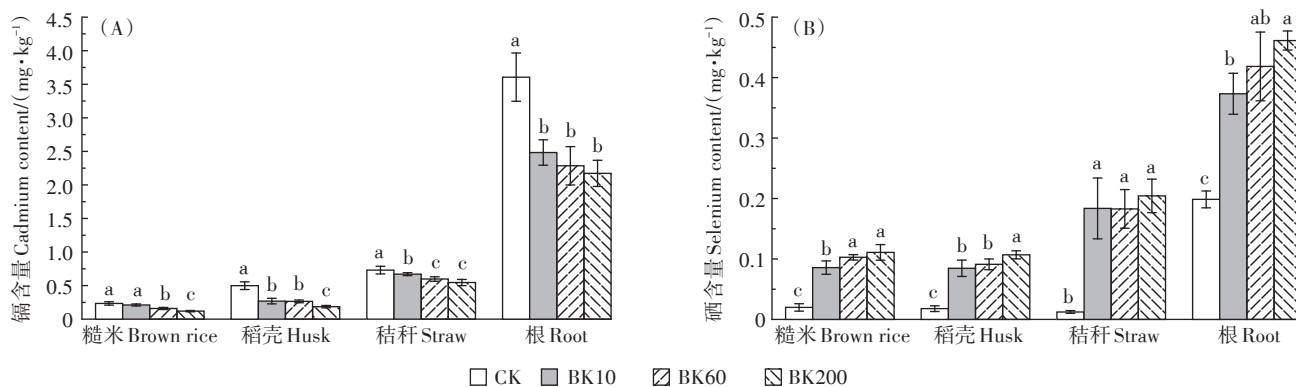


图4 不同处理下水稻糙米、稻壳、秸秆和根中的镉、硒含量

Figure 4 Content of cadmium and selenium in brown rice, husk, straw and root under different treatments

表2 不同处理下水稻糙米、稻壳、秸秆、根中镉与硒含量的相关性  
Table 2 Correlation between cadmium and selenium content in brown rice, husk, straw and root

|             | 糙米镉<br>Rice Cd | 稻壳镉<br>Husk Cd | 秸秆镉<br>Straw Cd | 根镉<br>Root Cd | 糙米硒<br>Rice Se | 稻壳硒<br>Husk Se | 秸秆硒<br>Straw Se | 根硒<br>Root Se |
|-------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|
| 糙米镉Rice Cd  | 1              | 0.728**        | 0.863**         | 0.784**       | -0.759**       | -0.782**       | -0.663*         | -0.733*       |
| 稻壳镉Husk Cd  |                | 1              | 0.811**         | 0.899**       | -0.914**       | -0.914**       | -0.861**        | -0.883**      |
| 秸秆镉Straw Cd |                |                | 1               | 0.839**       | -0.743*        | -0.744*        | -0.578*         | -0.744*       |
| 根镉Root Cd   |                |                |                 | 1             | -0.829**       | -0.909**       | -0.847**        | -0.782*       |
| 糙米硒Rice Se  |                |                |                 |               | 1              | 0.931**        | 0.857**         | 0.928**       |
| 稻壳硒Husk Se  |                |                |                 |               |                | 1              | 0.933**         | 0.877**       |
| 秸秆硒Straw Se |                |                |                 |               |                |                | 1               | 0.850**       |
| 根硒Root Se   |                |                |                 |               |                |                |                 | 1             |

注: \*和\*\*分别表示  $P<0.05$  和  $P<0.01$  显著水平。  
Note: \* and \*\* represent significant levels of  $P<0.05$  and  $P<0.01$ , respectively.

著提高了土壤pH,但只有当粒径小于60目时土壤有效态镉含量才显著低于CK,由此推断,引起有效态镉含量降低的原因除了土壤pH的升高外,主要还与贝壳粉本身的吸附特性有关。因为通过生物矿化形成的贝壳具有多孔结构,其粉碎后吸附性、分散性及化学活性等均会提升<sup>[22]</sup>,有研究发现贝壳粉粒径从60目减小到100目时,其对溶液中镉离子的吸附量可增加34%<sup>[23]</sup>,并且贝壳粉对镉的吸附不仅存在物理吸附,还存在化学吸附,且主要发生在贝壳粉表面<sup>[24]</sup>,因此当贝壳粉粒径足够小时,其比表面积大幅度提高,进而促进了贝壳粉对镉的吸附,同时有更多的钙与镉络合形成螯合物,进一步降低了土壤有效态镉含量<sup>[25]</sup>。与镉相反,碱性环境下土壤硒活性更高。土壤溶液中镉常以阳离子形式存在,具有失电子趋势,而硒主要以硒酸盐或亚硒酸盐的阴离子形式存在,有得电子趋势,两者受土壤条件的影响可在不同形态之间转化。土壤中的硒极易被铁氧化物吸附<sup>[26]</sup>,导致有效性降低。可能在土壤pH升高时,土壤溶液中的镉离子更多地被铁铝氧化物吸附,从而削弱对硒的吸附作用,使更多的硒得以释放<sup>[27]</sup>,但本试验不同粒径贝壳粉处理后,土壤pH上升显著,而土壤有效态硒含量在处理间差异并不显著,这有可能是多方面的综合影响。首先贝壳粉含有与土壤相当浓度的硒,虽然施入量相对很小,对土壤总硒影响较小,但土壤有效态硒含量占比很小,不足土壤总硒的10%,由贝壳粉引入的硒的微小变化,也可显著提高有效态硒含量,这可能是提高土壤有效态硒的原因之一。土壤环境十分复杂,土壤pH引起的硒的活化效应可能存在一定的局限性,并不是单一递进的关系,有研究发现pH对有效态硒中的水溶态硒影响较小,但对交换态硒影响显

著<sup>[28]</sup>。进一步分析可溶态和交换态硒的价态发现,添加贝壳粉后土壤中交换态硒+6价占比提高,-2价占比下降,由此推测,交换态硒是造成有效态硒差异的主要原因,贝壳粉粒径越小,越会使更多的交换态硒释放到土壤中,即更多地向植物最易吸收的硒酸盐(+6价硒)转化,同时有机硒里的硒元素(-2价)可能被离子态的镉取代进而降低镉的有效态含量<sup>[29]</sup>。另外,本试验测定的是水稻成熟期土壤有效态硒含量,水稻生长过程中经历淹水 and 非淹水过程,土壤氧化还原电位的变化对硒酸盐和亚硒酸盐以及镉的固液分配影响机制尚不明确,仍需进一步研究。

施用贝壳粉促进土壤有效态镉含量的降低和土壤有效态硒含量的升高,直接减少了水稻对镉的吸收,同时增加了水稻硒的累积。成熟期水稻各部位镉含量均显著低于CK,而硒含量显著高于CK。水稻根部镉含量在不同贝壳粉粒径之间差异不显著,可能是因为成熟期根系内的镉向上转移相对减少,且多数累积在根部造成的。而对于根系硒,尽管土壤有效态硒总量差异不显著,但根系硒的累积量却存在差异,结合水溶态硒和交换态硒的价态分析发现,交换态硒是水稻根系吸收的主要形态,且以+6价为主,这也验证了硒酸盐是植物最易吸收的形态。水稻糙米中镉累积量与秸秆、稻壳中的累积量表现出一致性,而水稻秸秆硒含量差异不显著,但在稻壳和糙米中却显现出差异性。结合镉与硒的相关性分析可知,硒的存在抑制了水稻籽粒对镉的吸收,且硒在抑制镉转移过程中也出现了自身的消耗,使稻壳和糙米中硒含量减少。因为籽粒中镉与硒的来源主要是灌浆期茎叶中储存的镉与硒向籽粒转运,仅有少部分是直接从土壤中吸收转运至籽粒,硒可促进谷胱甘肽(GSH)和植物螯合

肽(PCs)的合成,而GSH和PCs可与镉进行螯合,从而降低了镉在水稻中的移动性<sup>[30]</sup>。镉在水稻体内的转移受到抑制,进而使糙米镉含量降低,硒含量增加,这种降镉富硒效应又与贝壳粉粒径差异有一定的一致性。因此可通过粉碎的方式,在中轻度镉污染的硒镉伴生稻田中选用粒径小于60目的贝壳粉,即可使糙米镉含量符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的同时,提高糙米硒含量,增加稻米附加值。

## 4 结论

(1)施用贝壳粉可显著提高稻田土壤pH,并在降低土壤有效态镉含量的同时,提高土壤有效态硒含量。土壤有效态硒中以交换态硒为主,贝壳粉粒径越小,越利于交换态硒向+6价硒转化。

(2)施用贝壳粉可有效减少水稻各组织对镉的吸收,并促进硒的累积。贝壳粉粒径越小,其降镉富硒效应越明显。粒径在60目以上的贝壳粉处理可使糙米镉含量符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)的要求。

(3)贝壳粉作为一种降镉富硒的调理剂用于硒镉伴生稻田修复及稻米提质增效具有一定的可行性,兼顾贝壳粉碎成本及其修复效果,可选用粒径小于60目的贝壳粉。

## 参考文献:

- [1] 沈燕春. 贵池富硒区伴生重金属及其生物效应研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2011. SHEN Y C. Research of the selenium-rich area in Guichi associated with heavy metals and its biological effects[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011.
- [2] 兰敏. 富硒区重金属及硒元素地球化学特征研究[D]. 恩施:湖北民族大学, 2019. LAN M. Geochemical characteristics of heavy metals and selenium in selenium-rich areas: A case study in the Wangying Town, Lichuan City, Hubei Province, China[D]. En 'shi: Hubei Minzu University, 2019.
- [3] 杨帆, 王京彬, 王晨昇, 等. 承德市富硒土壤区镉的地球化学特征及生态风险评价[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 163–172. YANG F, WANG J B, WANG C S, et al. Geochemical characteristics and ecological risk assessment of cadmium in selenium-rich soil of Chengde City in Hebei Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 163–172.
- [4] 侯拓. 安康西部县域土壤-作物体系中硒镉影响因素及土地安全区划研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020. HOU T. Study on selenium and cadmium influencing factors and soil safety in the soil-crop system in the western county of Ankang[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [5] 张继露. 不同土壤改良剂对富硒红壤的改良效果及经济评价[D]. 南昌:江西财经大学, 2015. ZHANG J L. Different soil conditioner on selenium rich soil improvement effect and economic evaluation[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance & Economics, 2015.
- [6] 谢珊妮. 改良剂对强酸性富硒茶园土壤硒有效性调控机理与效果[D]. 南京:南京农业大学, 2017. XIE S N. Influence and mechanisms of amendments on selenium availability in highly acidic Se-rich soil of tea garden[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [7] TUDOR H E A, GRYTE C C, HARRIS C C. Seashells: Detoxifying agents for metal-contaminated waters[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 173(1): 209–242.
- [8] 张琢, 王梅, 任杰, 等. 贝壳粉对污染土壤中Pb、Zn、Cd的稳定化作用[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(1): 14–18. ZHANG Z, WANG M, REN J, et al. Stabilization of Pb, Zn, Cd in contaminated soil by shell powder[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2016, 38(1): 14–18.
- [9] 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 leaf barrier combined with soil passivation on cadmium uptake and transport in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 981–987.
- [10] 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 of cadmium contaminated farmland soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 233–240.
- [11] MA J H. New active organic substance in oyster shell capable of scavenging oxygen free radicals with high efficiency[J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2008, 24(2): 171–174.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版, 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] 盖荣银, 孙友宝, 马晓玲, 等. 二乙烯三胺五乙酸提取结合火焰原子吸收光谱法测定土壤中的有效态元素[J]. 环境化学, 2016, 35(5): 1096–1097. GAI R Y, SUN Y B, MA X L, et al. Determinate the available elements in soil extracted by DTPA solution with flame atom absorption spectrometry[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(5): 1096–1097.
- [14] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态[J]. 环境化学, 1997, 16(3): 277–283. QU J G, XU B X, GONG S C. Sequential extraction techniques for determination of selenium speciation in soils and sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 1997, 16(3): 277–283.
- [15] 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 methods for bioavailability evaluation[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2015, 13(3): 177–183.
- [16] 刘旭, 顾秋蓓, 杨琼, 等. 广西象州与横县碳酸盐岩分布区土壤中Cd形态分布特征及影响因素[J]. 现代地质, 2017, 31(2): 374–385. LIU X, GU Q B, YANG Q, et al. Distribution and influencing factors

- of cadmium geochemical fractions of soils at carbonate covering area in Hengxian and Xiangzhou of Guangxi[J]. *Geoscience*, 2017, 31(2): 374–385.
- [17] 刘瑞雪. 农田土壤典型指标对镉活性的影响效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. LIU R X. Effects of typical soil indexes on cadmium activity in farmland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [18] 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.
- [19] 赵于莹, 范稚莲, 刘永贤, 等. 不同改良剂对水稻土壤Cd污染的修复研究[J]. *农学报*, 2019, 9(2): 31–37. ZHAO Y Y, FAN Z L, LIU Y X, et al. Remediation of cadmium pollution in paddy soil with different ameliorants[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(2): 31–37.
- [20] 王亚会. 贝壳粉的改性及应用研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2016. WANG Y H. Study on modification and application of shell powder [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016.
- [21] 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.
- [22] 王亮, 张慇, 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.
- [23] 王晶. 紫贻贝粉对镉的吸附特性及其最佳吸附条件优化[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. WANG J. Adsorption characteristics of mussel for cadmium and optimization of its optimum adsorption conditions[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [24] 梁世威, 梁成华, 杜立宇, 等. 贝壳粉对重金属镉的吸附特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(4): 461. LIANG S W, LIANG C H, DU L Y, et al. Study on the adsorption characteristics of shell powder for cadmium[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2017, 39(4): 461.
- [25] PAPADOPOULOS P, ROWELL D L. The reactions of cadmium with calcium carbonate surfaces[J]. *European Journal of Soil Science*, 1988, 39(1): 23–36.
- [26] 谢邦廷, 贺灵, 江官军, 等. 中国南方典型富硒区土壤硒有效性调控与评价[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(3): 273–281. XIE B T, HE L, JIANG G J, et al. Regulation and evaluation of selenium availability in Se-rich soils in southern China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(3): 273–281.
- [27] 王松山. 土壤中硒形态和价态及生物有效性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. WANG S S. Fractionation and speciations of selenium in soil and its bioavailability[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [28] 陈继平, 任蕊, 王晖, 等. 关中壤土地区土壤pH变化对硒形态及有效性的影响[J]. *西北地质*, 2020, 53(1): 254–260. CHEN J P, REN R, WANG H, et al. Effect of Lou soil pH change on selenium forms and availability[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(1): 254–260.
- [29] 曾宇斌. 土壤添加硒对大豆拮抗重金属的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. ZENG Y B. Effect of selenium added into the soil on the antagonistic metal of soybean[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [30] 姜硕琛. 硒对镉胁迫下水稻生长及镉、硒转运与富集的影响[D]. 荆州: 长江大学, 2020. JIANG S C. Effects of selenium on growth, transport and enrichment of cadmium and selenium in rice under cadmium stress[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2020.