



占静,文阳平,王莹,等.牡蛎壳粉对稻田土壤酸化与镉污染的协同调控效应[J].江西农业大学学报,2023,45(4):787-794.  
ZHAN J,WEN Y P,WANG Y,et al.Synergistic regulatory effects of oyster shell powder on soil acidification and cadmium pollution  
in paddy fields[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2023,45(4):787-794.

# 牡蛎壳粉对稻田土壤酸化 与镉污染的协同调控效应

占静<sup>1</sup>,文阳平<sup>1</sup>,王莹<sup>1</sup>,朱宏艳<sup>1</sup>,李世豪<sup>1</sup>,  
陈玉婷<sup>1</sup>,陈绪龙<sup>2</sup>,王永明<sup>2</sup>,商庆银<sup>1\*</sup>

(1.江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室,江西 南昌 330045;2.福建玛塔生态科技有限公司,  
福建 漳州 363000)

**摘要:**【目的】土壤酸化与重金属污染是我国南方地区水稻生产中面临的两大障碍因素。牡蛎壳属于一种废弃的天然多孔的强碱性生物质材料,来源丰富,对其进行开发利用具有非常广阔的前景。研究旨在探究牡蛎壳粉对土壤酸化改良和重金属污染的协同修复效果。【方法】采用镉污染土壤分别添加不同剂量的热解改性牡蛎壳粉(质量比为0%、2%、4%、6%)开展水稻盆栽试验,研究牡蛎壳粉对土壤pH、土壤Cd形态分布特征以及水稻植株Cd吸收积累的影响。【结果】施加牡蛎粉后土壤pH值呈上升趋势,其中2%、4%处理移栽前提升了0.46、0.73个pH单位;分蘖期提升了0.49、0.63个pH单位。成熟期土壤pH值随牡蛎壳粉的添加而上升,上升幅度为0.48~0.56。添加牡蛎粉会降低水稻土壤中酸可提取态Cd浓度,其中2%处理显著下降82.04%。可还原Cd浓度随牡蛎壳粉的添加呈下降趋势,其中6%处理显著下降40%。与0%处理相比,2%、4%处理的可氧化态Cd浓度显著下降40%和30%,6%处理无显著变化。施加牡蛎壳粉后水稻各部位的Cd浓度呈下降趋势,其中4%处理根部Cd浓度下降47%。与不施加牡蛎壳粉相比,茎叶部Cd浓度在2%、4%、6%处理下分别下降53.73%、55.11%、41.80%;穗部Cd浓度分别下降55.38%、50.84%、39.84%。【结论】在酸性镉污染稻田土壤中施加牡蛎壳粉能够提高土壤pH值,促进土壤中的Cd由活性强的形态向稳定态转移,减少植株各部位Cd浓度。

**关键词:**水稻;酸性土壤;重金属;镉污染;形态分布;牡蛎壳粉

中图分类号:S511;S156.2 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2023)04-0787-08



## Synergistic Regulatory Effects of Oyster Shell Powder on Soil Acidification and Cadmium Pollution in Paddy Fields

ZHAN Jing<sup>1</sup>, WEN Yangping<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>, ZHU Hongyan<sup>1</sup>, LI Shihao<sup>1</sup>,  
CHEN Yuting<sup>1</sup>, CHEN Xulong<sup>2</sup>, WANG Yongming<sup>2</sup>, SHANG Qingyin<sup>1\*</sup>

(1.Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, Genetics and Breeding, Jiangxi Agricultural University, Ministry of Education, Nanchang 330045, China; 2.Fujian Mata Ecological Technology Co., Ltd., Zhangzhou, Fujian 363000, China)

收稿日期:2023-04-24 修回日期:2023-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(42167004)

Project supported by National Natural Science Foundation of China(42167004)

作者简介:占静,硕士生,orcid.org/0009-0004-5854-9212,1903288712@qq.com;\*通信作者:商庆银,副教授,博士,主要从事农田土壤改良与作物养分管理研究,orcid.org/0000-0002-7468-8704,qyshang@jxau.edu.cn.

**Abstract:** [Objective] Soil acidification and heavy metal pollution are two major obstacles faced by rice production in southern China. Oyster shell, with abundant resources, is a type of abandoned natural porous strongly alkaline biomass material, and its development and utilization have broad prospects. [Method] To investigate the synergistic effect of oyster shell powder on soil acidification improvement and heavy metal pollution remediation. Rice pot experiments were conducted by adding different doses of pyrolysis modified oyster shell powder (mass ratios of 0%, 2%, 4% and 6%) to cadmium contaminated soil. The effects of oyster shell powder on soil pH, soil Cd distribution characteristics, and Cd absorption and accumulation in rice plants were explored. [Result] After applying oyster powder, the soil pH showed an upward trend, with 2% and 4% treatments increasing by 0.46 and 0.73 units before transplantation and 0.49 and 0.63 units at tillering stage. The soil pH value of each treatment during the mature period increased with the addition of oyster shell powder, with an increase range of 0.48–0.56. Adding oyster powder could reduce the concentration of acid extractable Cd in rice soil, with a significant decrease of 82.04% under the 2% treatment. The reducible concentration showed a decreasing trend with the addition of oyster shell powder, with a decrease of 40% under the 6% treatment. Compared with the 0% treatment, the concentration of oxidizable Cd under the 2% and 4% treatments significantly decreased by 40% and 30%, while there was no significant change under the 6% treatment. The Cd concentration in various parts of rice treated with oyster shell powder showed a decreasing trend, with a decrease of 47% in the root Cd concentration under 4% treatment. Compared with no application of oyster shell powder, the Cd concentration in the stem and leaves decreased by 53.73%, 55.11% and 41.80% under 2%, 4%, and 6% treatments, respectively; The Cd concentration in the ear decreased by 55.38%, 50.84% and 39.84% respectively. [Conclusion] The addition of oyster shell powder in acidic cadmium contaminated paddy soil increased soil pH, promoted the transfer of Cd from a highly active state to a stable one, and reduced Cd concentration in various parts of the plant.

**Keywords:** rice; acid soil; heavy metals; Cd pollution; species distributions; oyster shell powder

【研究意义】水稻 (*Oryza sativa* L.) 作为世界第二大粮食作物, 也是我国最主要的粮食作物, 在粮食安全保障体系中占据重要地位<sup>[1]</sup>。近年来随着大气酸沉降不断加剧和化肥的过量施用, 农田土壤酸化问题极为严重。据调查, 20 世纪 80 年代江西省土壤平均 pH 为 5.5, 而 21 世纪初已降低至 5.1; 其中强酸性土壤 (pH < 5.5) 所占比例从 56.6% 增加至 85.7%<sup>[2]</sup>。土壤酸化可能使得土壤养分流失, 土壤板结, 导致水稻根系吸收养分困难, 影响水稻的产量与品质。另一方面对于重金属污染土壤, 土壤 pH 值下降, 还会导致土壤中重金属活性增强<sup>[3]</sup>, 迁移力提升, 增加水稻对重金属的吸收。农田酸化对土壤养分循环、土壤肥力和土壤生物的负面影响, 严重影响了食品安全的可持续发展。据国家环境保护部在 2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国农田污染土壤点位超标率为 19.4%, 其中 Cu、Cd 点位超标率分别为 2.1% 和 7.0%。江西环鄱阳湖区是我国重要的商品粮生产基地, 但该地区 Cu、Cd 的超标率更是高达 12.2% 和 12.0%, 尤其是鄱阳县、乐平市、万年县及余干县等地 Cu、Cd 复合污染极其严重<sup>[4]</sup>。倪中应等<sup>[5]</sup>研究表明, 土壤中交换态 Cd 的含量会随着土壤 pH 的下降呈现明显增加趋势。Cd 不是植物生长的必需元素, 当植物中 Cd 含量达到一定值时, 会对植物造成代谢紊乱, 叶绿素功能受阻, 光合作用下降等危害<sup>[6]</sup>。Cd 毒害使水稻叶片失绿, 植株矮小<sup>[7]</sup>, 水稻对 Cd 有一定的富集性, 随着食物链的传递对人类造成危害。因此, 如何有效抑制土壤酸化以及重金属 Cd 污染问题已成为当前我国南方地区亟须解决的重大战略需求。为了有效利用农田资源, 降低 Cd 等重金属对人类的危害, 需要采取有效的防治措施, 其中就有通过在土壤中施加化学改良剂来降低 Cd 的有效性。化学改良剂能够增加土壤有机质含量, 改变土壤 pH 值等理化性质, 通过化学吸附、沉淀等作用, 改变 Cd 在土壤中的存在形态, 从而降低其有效性和迁移性<sup>[8-9]</sup>。【前人研究进展】常用的改良剂主要包括石灰、碳酸钙、沸石、生物炭等<sup>[10]</sup>。在生产上常用石灰来提高土壤 pH 值, 这也是土壤重金属污染修复常用的方法<sup>[11]</sup>。但石灰的吸附能力较差, 长期施用容易造成土壤板

结<sup>[12]</sup>,土壤肥力下降,不利于农作物的生长。因此,需要一种低成本且环境友好型材料来代替石灰。牡蛎壳属于一种天然废弃的多孔强碱性生物质材料,具有易获取、价格低和环境友好等多种优势<sup>[13]</sup>。牡蛎壳中含有90%以上碳酸钙,可作为土壤酸化改良剂和重金属污染修复剂<sup>[14]</sup>。且经煅烧后的牡蛎壳中大量的碳酸钙转化为氧化钙,比表面积增大,碱性增强,对重金属有较强的吸附钝化效果<sup>[15]</sup>。氧化钙溶于水呈现强碱性,能够与重金属发生离子交换,络合反应和沉淀,将水中的重金属离子除去<sup>[16]</sup>,施加在土壤中能够提高土壤pH值,降低重金属活性。胡悦等<sup>[17]</sup>研究表明,在土壤中施加天然贝壳粉后,土壤pH提高,降低了土壤中重金属的有效性。

【本研究切入点】目前关于牡蛎壳粉对重金属污染修复的研究主要集中于水体污染以及蔬菜、果园等非耕地土壤的修复<sup>[18-19]</sup>,对于经煅烧后的牡蛎壳粉在酸性稻田土壤镉污染钝化方面的研究较少。【拟解决的关键问题】对此本研究选取水稻品种野香优莉丝,通过盆栽试验,分析施加牡蛎壳粉对水稻土壤pH值、不同形态Cd浓度,以及水稻成熟期地上部干物质质量、不同部位Cd浓度来研究牡蛎壳粉对水稻Cd吸收与生长的影响,为缓解酸性稻田土壤下水稻镉污染提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试水稻品种为野香优莉丝。参试土壤采集自江西农业大学科技园(28°77'N, 115°84'E)0~20 cm耕作层土壤,土壤基础肥力为全氮2.23 g/kg、有机质29.54 g/kg、速效氮97.64 mg/kg、速效磷27.62 mg/kg、速效钾102.34 mg/kg, pH值6.5。将土壤自然风干,锤碎,并过2.50 mm孔径的网筛,混合均匀待用。牡蛎壳粉购自福建玛塔生态科技有限公司,采用优质海洋牡蛎壳经保护性焙烧工艺产生,牡蛎壳粉的pH值8.74, OM含量12.8 g/kg, Cd含量0.17 mg/kg, Ca含量315.76 mg/kg。

### 1.2 试验设计和样品处理

试验在江西农业大学作物生理生态与遗传育种重点实验室进行,设牡蛎壳粉添加量为0%、2%、4%、6%,按照比例将牡蛎壳粉与6 kg土壤均匀混合转移至30 cm×20 cm×30 cm的聚乙烯材料塑料桶内。每千克土壤外源添加4 mg重金属Cd(根据农用地pH小于6.5条件下土壤镉污染风险管制值的2倍计算)。

根据当地正常栽培的施肥技术与盆栽土表面积进行换算,每桶施纯氮0.825 g,折合尿素1.795 g,按基肥、分蘖肥、穗肥5:2:3分3次施用;施钾(K<sub>2</sub>O)量为0.9 g,折合氯化钾1.5 g,按基肥、分蘖肥、穗肥7:0:3分2次施用;施磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)量为0.45 g,折合钙镁磷肥3.75 g,全部作基肥施用。

选取长势均匀一致的秧苗移栽至盆内,每盆种植2莖,每莖3株,为了保持水稻全生育期保持淹水灌溉3~5 cm水层,每天用自来水进行灌溉,病虫害管理措施按当地习惯进行。根据水稻的生长状况,采集水稻不同生育时期土壤自然风干,将水稻植株分为地上部分与地下部分,用超纯水洗净,105 °C杀青30 min,再70 °C烘干至恒重,称量后保存。

### 1.3 指标测定与方 法

土壤pH值(土水比1:5)采用酸度计(pHS-3C,上海雷磁)测定;土壤各化学形态Cd的测定采用改进的BCR连续浸提法<sup>[20]</sup>测定;水稻各部位Cd含量的测定参考GB 5009.15—2014,采用石墨炉—微波消解法,待测液Cd浓度用石墨炉进行测定。

### 1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2010进行统计处理,Origin 2020软件进行制图,SPSS Statistics 25.0软件进行差异显著性分析。

水稻中Cd的转移系数(TF)按照公式(1)进行计算:

$$TF_{ab} = C_b / C_a \quad (1)$$

式(1)中TF<sub>ab</sub>代表Cd从水稻b部位到a部位的转移系数;C<sub>a</sub>为水稻a部位Cd含量(mg/kg), C<sub>b</sub>为水稻b部位Cd含量(mg/kg)。

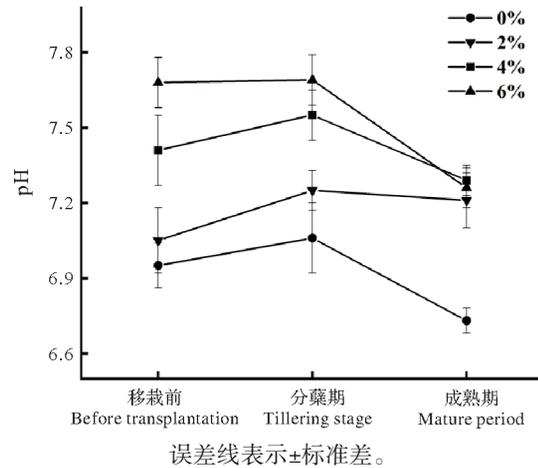
## 2 结果与分析

### 2.1 牡蛎壳粉对土壤 pH 的影响

从图 1 可知,与 CK 处理相比,施加牡蛎粉后土壤 pH 值呈上升趋势,其中 2%、4% 处理移栽前提高了 0.46, 0.73 个单位;分蘖期提高了 0.49, 0.63 个单位。成熟期各处理土壤 pH 值随着牡蛎壳粉的添加分别上升了 0.48, 0.56, 0.53 个单位。

### 2.2 牡蛎壳粉对土壤中不同形态 Cd 浓度的影响

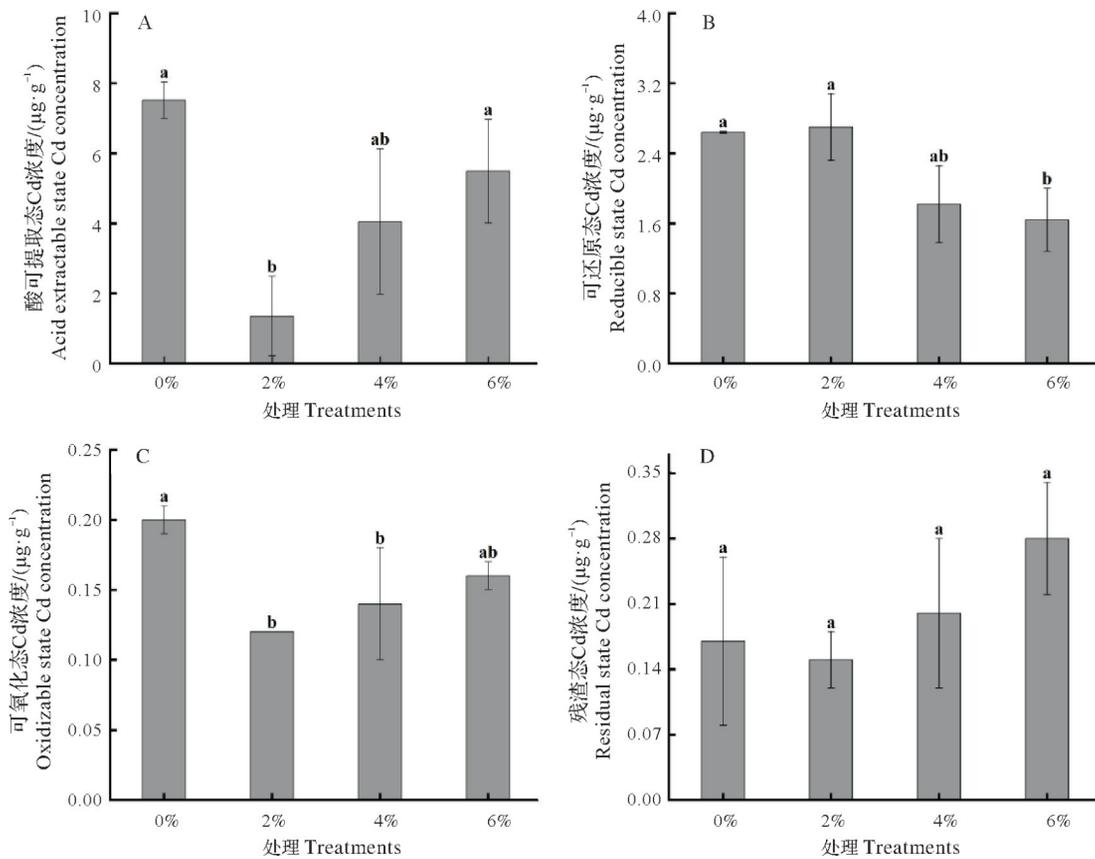
由图 2 可知,添加牡蛎粉会降低水稻土壤中酸可提取态 Cd 浓度,其中 2% 处理显著下降 82.04%。可还原 Cd 浓度随着牡蛎壳粉的添加呈下降趋势,其中 6% 处理显著下降 40%。与 0% 处理相比,2%、4% 处理的可氧化态 Cd 浓度显著下降 40% 和 30%,6% 处理无显著变化。与空白对照组相比,残渣态 Cd 浓度随牡蛎壳粉的添加呈上升趋势。



The error line represents ± standard deviation.

图 1 不同生育时期水稻土壤 pH 值

Fig.1 pH value of rice soil at different growth stages



误差线表示 ± 标准差。不同小写字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著。

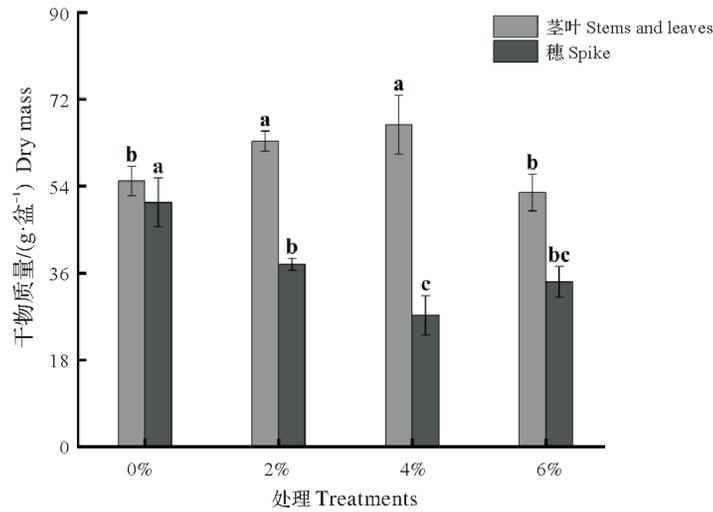
The error line represents ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the  $P < 0.05$  level.

图 2 成熟期水稻土壤中酸可提取态(A)、可还原态(B)、可氧化态(C)、残渣态(D)Cd 浓度

Fig.2 Extractable(A), reducible(B), oxidizing(C), and residual(D) Cd concentrations in mature rice soil

### 2.3 牡蛎壳粉对水稻生长的影响

如图 3 所示,牡蛎壳粉的添加对水稻生长产生显著影响。与 0% 处理相比,添加牡蛎壳粉后,水稻茎叶部干重呈上升趋势,其中 2%、4% 处理分别提高 15.0%、21.2%。施加牡蛎壳粉后,各处理成熟期穗部干重分别下降 25.31%、46.16%、32.48%。



误差线表示±标准差。不同小写字母表示处理间在  $P<0.05$  水平上差异显著。

The error line represents±standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the  $P<0.05$  level.

图 3 水稻成熟期地上部干物质量

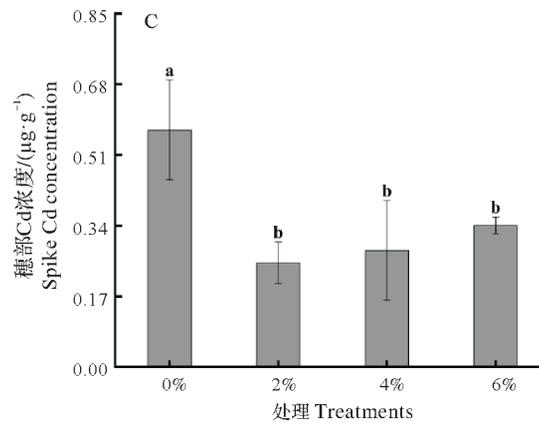
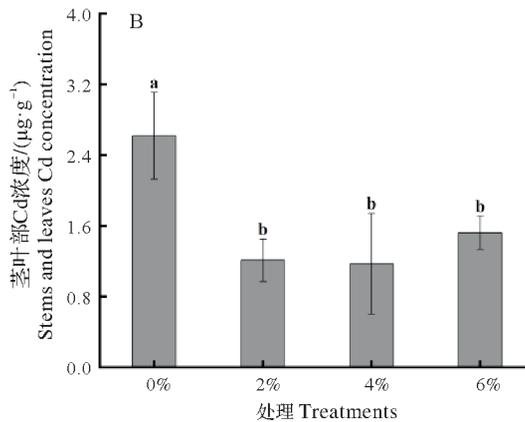
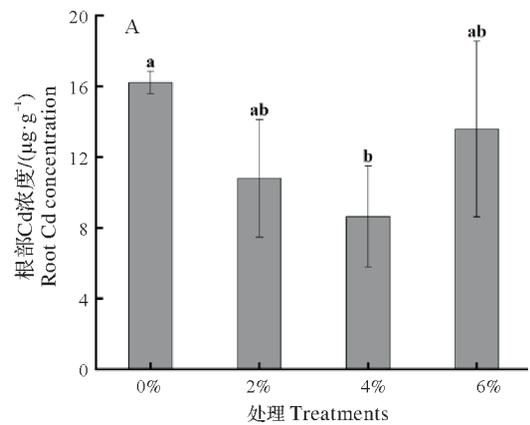
Fig.3 Quality of aboveground dry matter during rice maturity

### 2.4 牡蛎壳粉对水稻不同部位 Cd 浓度的影响

由图所示,施加牡蛎壳粉后水稻各部位的 Cd 浓度呈下降趋势,其中 4% 处理根部 Cd 浓度下降 47%。与不施加牡蛎壳粉相比,茎叶部 Cd 浓度在 2%、4%、6% 处理下分别下降 53.73%、55.11%、41.80%;穗部 Cd 浓度分别下降 55.38%、50.84%、39.84%。

### 2.5 牡蛎壳粉对 Cd 在水稻体内转移的影响

表 1 为 Cd 从水稻根部到茎叶部,根部到穗部、茎叶部到穗部的转移系数。由表可知,添加牡蛎壳粉可以抑制 Cd 从水稻根部到茎叶部和穗部的转移。添加牡蛎壳粉后  $TF_{Stem/Root}$  和  $TF_{Spike/Root}$  呈下降趋势,降幅为分别为 18.0%~30.0%、8.6%~31.4%。



误差线表示±标准差。不同小写字母表示处理间在  $P<0.05$  水平上差异显著。

The error line represents±standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the  $P<0.05$  level.

图 4 水稻植株根部(A)、茎叶部(B)、穗部(C)Cd 浓度

Fig.4 Cd Concentration in the Root(A), Stem and Leaf(B), and Panicle(C) of Rice Plants

表 1 Cd 在水稻体内的转运系数  
Tab.1 Transfer coefficient of Cd in rice

处理 Treatments	TF <sub>茎叶/根</sub> TF <sub>Stem/Root</sub>	TF <sub>穗/根</sub> TF <sub>Spike/Root</sub>	TF <sub>茎叶/穗</sub> TF <sub>Stem/Spike</sub>
0%	0.161±0.025 <sup>a</sup>	0.035±0.009 <sup>a</sup>	0.228±0.083 <sup>a</sup>
2%	0.116±0.018 <sup>a</sup>	0.024±0.003 <sup>a</sup>	0.21±0.010 <sup>a</sup>
4%	0.132±0.038 <sup>a</sup>	0.032±0.004 <sup>a</sup>	0.25±0.057 <sup>a</sup>
6%	0.121±0.037 <sup>a</sup>	0.028±0.126 <sup>a</sup>	0.228±0.037 <sup>a</sup>

表中数据均为平均值 ± 标准差 ( $n=3$ ), 同列数据后不同小写字母表示处理间在  $P<0.05$  水平上差异显著。TF<sub>Stem/Root</sub>—Cd 从根部到茎叶部的转移系数, TF<sub>Spike/Root</sub>—Cd 从根部到穗部的转移系数, TF<sub>Stem/Spike</sub>—Cd 茎叶部到穗部的转移系数。

The data in the table are mean plus or minus standard deviation ( $n=3$ ), Different Minuscule after the data in the same column indicate that there is significant difference between the treatments at the level of  $P<0.05$ . TF<sub>Stem/Root</sub>—the transfer coefficient of Cd from root to the stem, TF<sub>Spike/Root</sub>—the transfer coefficient of Cd from root to the spike, TF<sub>Stem/Spike</sub>—the transfer coefficient of Cd from spike to the stem.

### 3 讨论与结论

在江西省双季稻区,受大气酸沉降,不合理施肥和土壤母质特性的影响,稻田土壤酸化和重金属累积是影响水稻产量和品质的重要因素之一<sup>[21]</sup>。本研究表明,牡蛎壳粉的应用能够有效地提高土壤 pH 值,降低酸化稻田土壤中 Cd 的生物有效性,抑制其在水稻植株中的积累。煅烧后的牡蛎壳粉主要成分为氧化钙,且含有 K、Mg 等碱性化合物,是一种碱性钝化剂,具有较高的 pH 值,能中和土壤氢离子进而提高土壤 pH。柳开楼等<sup>[22]</sup>在旱地红壤上施用牡蛎壳粉发现,土壤 pH 提高了 0.18~0.33 个单位。本研究结果中,施加牡蛎壳粉后,土壤 pH 值呈显著上升趋势,这与曹英兰等<sup>[23]</sup>的研究结果基本一致。相较于分蘖期,成熟期水稻土壤 pH 值下降,这可能与水稻在生长发育过程中,根系不断分泌有机酸物质有关<sup>[24-25]</sup>。

土壤中的 Cd 形态与其生物有效性密切相关,酸可提取态活性最强,易于被植物吸收利用,残渣态性质稳定,生物有效性很低,不易于被植物吸收。通过 BCR 分析土壤中 Cd 的 4 种形态发现,施加牡蛎壳粉后水稻土壤酸可提取态、还原态、氧化态 Cd 浓度下降,残渣态 Cd 浓度上升,这表明施加牡蛎壳粉有利于 Cd 从活性较高的形态向活性较低的形态转化。相关研究<sup>[26]</sup>表明,在土壤中施加碱性矿物钝化剂后,促进了土壤 Cd 形态由交换态向残渣态转化,有效性大幅下降。土壤 pH 升高,土壤表面的负电荷对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附力会增加。在碱性条件下, Cd<sup>2+</sup> 还会生成 CdCO<sub>3</sub>、Cd(OH)<sub>2</sub> 等沉淀<sup>[27]</sup>,降低 Cd 的活性。此外,煅烧后的牡蛎壳表面分布大量微孔,对 Cd<sup>2+</sup> 具有一定的吸附作用<sup>[28]</sup>。因此,添加牡蛎壳粉后,由于直接或间接作用都能达到使土壤 Cd 钝化的目的,降低其迁移能力。降低水稻中重金属含量主要有两种途径,一是降低土壤中重金属的生物有效性,二是减少重金属在水稻体内的转运<sup>[29]</sup>。本研究结果发现,牡蛎壳粉的施用能够使 Cd 从水稻根部到茎叶部、根部到穗部的转运系数降低,进而降低穗部中 Cd 含量,对成熟期水稻各部位进行 Cd 浓度测定,发现与不施加牡蛎壳粉相比,各处理茎叶部与穗部 Cd 浓度呈显著下降趋势,这与陶荣浩等<sup>[30]</sup>研究结果一致。这可能是因为施加牡蛎壳粉后,改变了土壤 pH 值、Eh、养分供应等状况,进而影响 Cd 在水稻植株体内的转运,降低水稻穗部的 Cd 浓度<sup>[31]</sup>。

罗华汉等<sup>[32]</sup>研究发现,施加牡蛎壳能够提高早稻产量,且施加越多,产量越大,本研究结果发现施加牡蛎壳粉后降低了水稻穗部的干物质量。这可能与土壤 pH 值有关,测定成熟期水稻土壤发现,在施加牡蛎壳粉后土壤 pH 上升且呈微碱性。易亚科<sup>[33]</sup>研究表明当土壤 pH 值大于 7 时,无论是早稻还是晚稻的产量均显著下降。由此推测水稻穗部干物质量的下降与土壤呈微碱性有关。

在酸性镉污染稻田土壤中施加牡蛎粉后,能够有效提高土壤 pH 值,钝化土壤 Cd 活性,将 Cd 转化为更稳定的形态,从而减少水稻对 Cd 的吸收与转运,降低水稻各部位 Cd 含量。

### 参考文献 References:

[1] 虞国平. 水稻在我国粮食安全中的战略地位分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.

YU G P. Analysis of the strategic position of rice in China's food security[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sci-

- ences, 2009.
- [2] 朱安繁, 邵华, 张龙华. 江西省耕地土壤酸化现状与改良措施[J]. 江西农业学报, 2014, 26(4): 43-45.  
ZHU A F, SHAO H, ZHANG L H. Current situation and improvement measures of cultivated land soil acidification in Jiangxi Province[J]. *Acta agriculturae Jiangxi*, 2014, 26(4): 43-45.
- [3] 高译丹, 梁成华, 裴中健, 等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 258-261.  
GAO Y D, LIANG C H, PEI Z J. Effects of biochar and lime on the fraction transform of cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2014, 28(2): 258-261.
- [4] 赵杰, 罗志军, 赵越, 等. 环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2475-2485.  
ZHAO J, LUO Z J, ZHAO Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in farmland soils in Poyang Lake area[J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2018, 38(6): 2475-2485.
- [5] 倪中应, 谢国雄, 章明奎. 酸化对耕地土壤镉铅有效性及农产品中镉铅积累的影响[J]. 江西农业学报, 2017, 29(8): 52-56.  
NI Z Y, XIE G X, ZHANG M K. Effects of acidification on bioavailability of cadmium and lead in cultivated land soil and their accumulation in agricultural products[J]. *Acta agriculturae Jiangxi*, 2017, 29(8): 52-56.
- [6] SEREGIN I V, IVANOV V B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants[J]. *Russian journal of plant physiology*, 2001, 48(4): 523-544.
- [7] 戎红, 汪承润, 陶雨晴. 苯并三唑与镉对水稻幼苗生长的联合毒性效应研究[J]. 植物科学学报, 2022, 40(5): 688-694.  
RONG H, WANG C R, TAO Y Q. Study on the combined toxic effects of benzotriazole and cadmium on growth of rice seedlings[J]. *Plant science journal*, 2022, 40(5): 688-694.
- [8] 吴多基, 吴建富, 黄振侠, 等. 土壤改良剂对Cd污染石灰性稻田土壤Cd形态与水稻Cd积累的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(2): 361-372.  
WU D J, WU J F, HUANG Z X, et al. Effects of soil amendments on Cd forms and Cd accumulation of rice in Cd-contaminated calcareous paddy soils[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(2): 361-372.
- [9] 李赞, 刘迪, 范如芹, 等. 土壤改良剂的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(10): 63-69.  
LI Y, LIU DI, FAN R Q, et al. Research progress in soil amendments[J]. *Jiangsu agricultural sciences*, 2020, 48(10): 63-69.
- [10] 卢红玲, 肖光辉, 刘青山, 等. 土壤镉污染现状及其治理措施研究进展[J]. 南方农业学报, 2014, 45(11): 1986-1993.  
LU H L, XIAO G H, LIU Q S, et al. Advances in soil Cd pollution and solution measures[J]. *Journal of southern agriculture*, 2014, 45(11): 1986-1993.
- [11] ZHU H H, CHEN C, XU C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. *Environmental pollution*, 2016, 219: 99-106.
- [12] HAYNES R J, NAIDU R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review[J]. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 1998, 51(2): 123-137.
- [13] 曹敏杰, 丁希月, 许玲玲, 等. 牡蛎壳资源利用研究进展[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2021, 26(5): 390-397.  
CAO M J, DING X Y, XU L L, et al. Progress of the utilization of oyster shell resource[J]. *Journal of Jimei university (natural science edition)*, 2021, 26(5): 390-397.
- [14] 陈文韬. 牡蛎壳组成特性及其综合利用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.  
CHEN W T. Study on component properties of oyster shell and its recycling[D]. Fuzhou: Fujian A&F University, 2013.
- [15] 李雁乔. 牡蛎壳土壤改良剂对琯溪蜜柚品质影响的研究[D]. 厦门: 集美大学, 2019.  
LI Y Q. Effect of oyster shell soil conditioner on the quality of Guanxi Pomelo[D]. Xiamen: Jimei University, 2019.
- [16] 张白晔. 贝壳基材料的制备及其对水体污染物的吸附性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.  
ZHANG B Y. Preparation of shell-based materials and their adsorption performance for water pollutants[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2020.
- [17] 胡悦. 贝壳粉对镉吸附特性的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.  
HU Y. Study on adsorption properties of cadmium by different shells[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [18] 徐熙. 不同改良剂配施对土壤铅有效性及小白菜生长的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.  
XU X. Effects of combined application of different amendments on the content of available lead in the soil and the growth of Pakchoi[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.

- [19] 林荣晓, 苏永昌, 杨妙峰, 等. 牡蛎壳粉对水体中低浓度重金属离子的吸附性能研究[J]. 福建水产, 2013, 35(3): 193-202.  
LIN R X, SU Y C, LIN M F, et al. The study on adsorptive capability of oyster shell powder adsorbing low concentration of heavy metal ions in water[J]. Journal of Fujian fisheries, 2013, 35(3): 193.
- [20] RAURET G, JF LÓPEZ-SÁNCHEZ, SAHUQUILLO A, et al. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. Journal of environmental monitoring jem, 1999, 1(1): 57-61.
- [21] 余进祥, 刘娅菲, 尧娟. 江西省水稻优势产区重金属污染及累积规律[J]. 江西农业学报, 2008, 20(12): 57-60.  
YU J X, LIU Y F, YAO J. Study on heavy metal speciation and accumulation in paddy soil of Jiangxi Province[J]. Acta agriculturae Jiangxi, 2008, 20(12): 57-60.
- [22] 柳开楼, 熊华荣, 胡惠文, 等. 特贝钙土壤调理剂对红壤旱地花生产量和阻控土壤酸化的影响[J]. 广东农业科学, 2017, 44(5): 93-98.  
LIU K L, XIONG H R, HU H W, et al. Effects of soil conditioner (named by Tebeigai) on peanut yield and controlling soil acidification in red soil[J]. Guangdong agricultural sciences, 2017, 44(5): 93-98.
- [23] 曹英兰, 陈丽娜, 张金丽, 等. 牡蛎壳粉对酸性土壤的修复及其对镉的钝化作用研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 178-182.  
CAO Y L, CHEN L N, ZHANG J L, et al. Effects of oyster shell powder on the remediation and stabilization of acid Cd pollution soil[J]. Environmental science & technology, 2016, 39(1): 178-182.
- [24] 刘磊. 不同栽培措施对水稻根系和根际土壤环境的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.  
LIU K L, XIONG R H, HU H W, et al. Effects of different cultivation practisystem and rhizosphere soil environment [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [25] 周文涛. 稻田甲烷排放与水稻根系分泌物及土壤特性的关系[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.  
ZHOU W T. The Relationship between methane emission from paddy field and rice root exudates and soil properties [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.
- [26] SUN Y, SUN G, XU Y, et al. Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium-contaminated soils[J]. Journal of environmental management, 2016, 166: 204-210.
- [27] LEE M, PAIK I S, KIM I, et al. Remediation of heavy metal contaminated groundwater originated from abandoned mine using lime and calcium carbonate[J]. Journal of hazardous materials, 2007, 144(1/2): 208-214.
- [28] 孟磊. 贝壳用于土壤改良的研究进展[C]//中国环境科学学会2019年科学技术年会论文集(第三卷): 中国环境科学学会, 2019: 2875-2877.  
MENG L. Research progress in the use of shells for soil improvement [C]//Proceedings of the 2019 annual conference of science and technology of the Chinese society for environmental sciences (volume III): Chinese society for environmental sciences, 2019: 2875-2877.
- [29] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 调理剂及农艺措施对污染稻田中水稻吸收镉的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(3): 574-584.  
PENG O, LIU T L, TIEB Q, et al. Effects of conditioning agents and agronomic measures on cadmium uptake by rice in polluted rice fields[J]. Scientia agricultura Sinica, 2020, 53(3): 574-584.
- [30] 陶荣浩, 袁旭峰, 吴新德, 等. 修复肥料和紫云英对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 76-86.  
TAO R H, YUAN X F, WU X D, et al. Effects of repair fertilizer and milk vetch (*Astragalus sinicus* L) on cadmium uptake and accumulation in rice[J]. Journal of agro-environment sciences, 2023, 42(1): 76-86.
- [31] LI H, LUO N, LI Y W, et al. Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. Environmental pollution, 2017, 224(MAY): 622-630.
- [32] 罗华汉, 柳开楼, 余跑兰, 等. 牡蛎壳粉对水稻产量和土壤重金属钝化的影响[J]. 中国稻米, 2016, 22(3): 30-33.  
LUO H H, LIU K L, YU P L, et al. Effects of oyster shell powder on rice yield and heavy metal stabilization in paddy soil[J]. China rice, 2016, 22(3): 30-33.
- [33] 易亚科. 土壤pH值对低镉积累水稻品种镉吸收及生长发育的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.  
YI Y K. Effects of soil pH on cadmium uptake and growth in rice cultivars with low cadmium accumulation [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.