

中轻度镉污染酸性稻田土壤钝化与减量修复技术初探^①

周鑫^{1,2}, 余贤安², 张金福³, 周通^{2*}, 杨红飞^{1*}, 吴龙华²

(1 安徽师范大学生态与环境学院, 安徽芜湖 241002; 2 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135;

3 南京市高淳区耕地质量保护站, 南京 211300)

摘要: 选择南京市郊某镉污染酸性稻田土壤开展田间小区和大区示范试验, 分别研究新型土壤调理剂 ISS 的水稻降镉(Cd)效果和 水稻-伴矿景天轮作模式下土壤 Cd 减量修复效果。结果表明: 与对照比较, 1.5 ~ 4.5 t/hm² 施用量的 ISS 调理剂对水稻产量无显著性影响, 但显著降低糙米 Cd 含量 35.4% ~ 54.3%, 且降 Cd 效果随着 ISS 调理剂施用量的增加而增加; ISS 调理剂停施 1 年后, 糙米 Cd 含量仍显著降低 32.2% ~ 44.2%, 且糙米 Cd 含量与上一年度无显著性差异; 相同施用量条件下, ISS 调理剂处理的糙米 Cd 含量与生石灰处理间也无显著差异, 进一步说明 ISS 调理剂稻米降 Cd 效果的长效性与稳定性。常规水稻-伴矿景天轮作体系中, 水稻糙米 Cd 含量为 0.19 mg/kg, 低于 0.2 mg/kg 的限量标准(GB 2762—2022); 水稻和伴矿景天地上部可分别从土壤吸收 11.1 g/hm² 和 99.5 g/hm² 的 Cd, 秸秆离田的 Cd 移除量分别占耕层土壤 Cd 总量的 1.00% 和 8.96%。水稻-伴矿景天轮作是一种污染土壤 Cd 减量修复潜力较大的“边生产边修复技术”。

关键词: 镉; 水稻土; 钝化修复; 植物吸取修复; 安全利用

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Immobilization and Reduction Remediation of Moderate and Light Cadmium Polluted Acidic Paddy Soils

ZHOU Xin^{1,2}, YU Xian'an², ZHANG Jinfu³, ZHOU Tong^{2*}, YANG Hongfei^{1*}, WU Longhua²

(1 School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 Nanjing City Gaochun Arable Land Quality Protection Station, Nanjing 211300, China)

Abstract: In the moderate and light cadmium (Cd) polluted acidic paddy soils in the suburbs of Nanjing, two field experiments were conducted to study the reduction effects of soil conditioner ISS on rice Cd accumulation and the rice-*Sedum plumbizincicola* rotation on soil Cd content, respectively. Compared with the control treatment, 1.5–4.5 t/hm² of ISS applications had no significant effect on rice yield, but significantly reduced Cd concentration in brown rice by 35.4%–54.3%, and the reduction of Cd concentration in brown rice increased with the increase of ISS application rate. One year after the application of ISS was stopped, Cd concentration in brown rice was still significantly reduced by 32.2%–44.2%, and Cd concentration in brown rice was insignificantly different from that of the previous year. There was also insignificant difference in Cd concentrations in brown rice between ISS and quicklime treatments under the same application rate, which further demonstrated the long-term effect and stability of ISS conditioner on the reduction of rice Cd accumulation. In the rotation system of rice and hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*, Cd concentration in brown rice was 0.19 mg/kg which was lower than the limit standard of 0.2 mg/kg (GB 2762—2022). The total uptakes of Cd in the shoots of rice and *Sedum plumbizincicola* were 11.1 g/hm² and 99.5 g/hm², which accounted for 1.00% and 8.96% of the total Cd of soil, respectively. Thus, the rotation of rice-*Sedum plumbizincicola* is a “phytoremediation coupled with agro-production” technology with great potential for the reduction remediation of Cd polluted soil.

Key words: Cadmium; Paddy soil; Immobilization remediation; Phytoextraction; Safe utilization

①基金项目: 南京市高淳区受污染耕地安全利用项目(2021-06)资助。

* 通信作者(tzhou@issas.ac.cn; hongfeiy@ahnu.edu.cn)

作者简介: 周鑫(2000—), 男, 安徽宿松人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染治理与修复研究。E-mail: 1173273906@qq.com

随着社会经济的快速发展,我国农田土壤镉(Cd)等重金属污染问题日趋突出,不仅影响了农产品质量和生态环境安全,也制约了农业可持续发展。目前,固化/稳定化技术和植物修复技术是重金属污染农田土壤研究的重点和热点^[1-2]。石灰作为一种可提高酸性土壤 pH 并降低重金属有效性的材料,在显著降低作物重金属吸收的同时^[3],还能改善土壤质量并促进植物生长^[4]。但长期大量施用石灰会引起土壤微量元素含量下降、孔隙度降低、微生物群落减少、酶活性下降等土壤质量问题^[5]。因此,一些传统的有机无机类材料和新型改性复合材料被用来替代石灰,其在解决石灰施用引起问题的同时具有较好的重金属钝化修复效果^[6]。此外,虽然石灰等材料的即时钝化修复效果较好,但停施后会存在土壤 Cd 等重金属有效性回升的问题^[7-8]。因此,长效性和稳定性是评价钝化材料修复效果优劣的重要指标。

与降低重金属活性的钝化修复技术不同,植物吸取修复技术不仅可实现污染土壤重金属减量的目标,还可以结合当地特色农作物构建间作、套作或轮作的“边生产边修复”技术模式^[9-10]。超积累植物伴矿景天已在我国多地进行了田间小区或示范试验研究,具有较高的植物 Cd 吸取修复效率^[11-12]。而利用高生物量且 Cd 吸收能力强的水稻等作物连续种植,通过秸秆离田的输出方式也可逐步降低土壤 Cd 含量,并成为中轻度 Cd 污染土壤减量修复的新措施^[13-15]。但有研究表明,水稻秸秆移除对降低土壤 Cd 含量的效果有限^[16]。利用 Cd 超积累植物-农作物轮作则被认为是强化土壤 Cd 减量修复效率的有效途径^[17]。

基于以上,本研究选择南京市郊某中轻度 Cd 污染的酸性稻田土壤,利用田间小区试验,研究了一种新型土壤调理剂的稻米降 Cd 效果与持效性,评估了其替代生石灰的可行性,同时结合田间大区试验,探讨了水稻-伴矿景天轮作体系下污染农田安全生产与土壤 Cd 减量修复潜力,以期为中轻度 Cd 污染稻田土壤探寻出一种符合我国基本国情的“边生产边修复”技术模式。

1 材料与方法

1.1 试验田概况

试验田位于南京市郊区某地,属北亚热带南部季风气候区,年均气温和降水量分别为 17.5℃ 和 1 692 mm,以稻-麦或稻-油轮作模式为主。其中,钝化修复小区试验的土壤 pH 和全 Cd 含量分别为 5.52 和 0.74 mg/kg,植物吸取修复大区试验的土壤

pH 和全 Cd 含量则分别为 4.63 和 0.49 mg/kg,试验区土壤全 Cd 含量均超过 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[18]中 Cd 风险筛选值。

1.2 土壤钝化修复试验

土壤调理剂分别选择生石灰和一种新型材料 ISS,其中 ISS 是一种由中国科学院南京土壤研究所自主研发的调理剂产品,是一类富含铁、硒、锌等元素及腐殖酸、黏土矿物的复配调理剂。生石灰是我国受污染耕地治理修复过程中常用的一种钝化修复调理剂,可用作对照产品综合评估 ISS 调理剂的钝化修复效果。每种土壤调理剂分别设置 1.5、3.0 和 4.5 t/hm² 不同施用量梯度,同时设置不施用土壤调理剂的对照处理。试验小区面积为 20 m²(5 m×4 m),每处理 3 次重复,随机排列。

2021 年 6 月 16 日,将土壤调理剂均匀撒施于试验小区土壤表面后翻耕混匀。2021 年 6 月 24 日和 2022 年 6 月 22 日,分别开展试验小区第一季和第二季水稻秧苗的移栽工作。冬季田块闲置,不种植农作物。第二季的水稻试验小区不再施加土壤调理剂,以评估调理剂的钝化修复后效。水稻生长期间,开展除草、杀虫、灌排水等田间管理工作。供试水稻品种为“南粳 46”。

1.3 土壤镉减量修复试验

本研究选择水稻-镉超积累植物伴矿景天轮作的种植模式进行 Cd 减量修复试验,试验田面积 3 亩(1 亩=667 m²)。其中,水稻于 2021 年 6 月 10 日直播种植,伴矿景天于水稻收获后的 2021 年 11 月 3—5 日移栽。收获后的水稻秸秆和伴矿景天均从田间移除,利用水稻和伴矿景天地上部的 Cd 吸收来实现污染土壤 Cd 的减量修复。水稻的田间管理措施与当地常规方式一致,伴矿景天的种植与田间管理参考《伴矿景天的栽培和修复原理与应用》^[11]一书。

1.4 样品采集与分析测定

2021 年 10 月 20 日和 2022 年 10 月 29 日,分别开展钝化修复试验小区成熟期的水稻籽粒和 0~20 cm 土壤样品的协同采样,同时测定 2021 年度的水稻产量。每小区按照 5 点采样法,获得 1 个混合样品。2021 年 10 月 21 日开展减量修复试验区的水稻秸秆、稻谷和土壤样品协同采样工作,同时测定水稻秸秆和稻谷产量。根据该水稻品种的出糙率,可计算得到该品种的糙米产量。2022 年 5 月 14 日,开展减量修复试验区的伴矿景天和土壤(0~20 cm)样品协同采样,同时测定伴矿景天产量。试验田共设置 6 个采样点,每个

采样点分别取 1 个混合样品。

植物样品用去离子水洗净后，置于烘箱烘干。烘干后的稻谷经砗谷机脱壳成糙米。糙米、秸秆等植物样品用不锈钢粉碎机粉碎后，保存，待测。土壤样品风干过 10 目和 100 目筛后，供土壤 pH、全量 Cd 和有效态 Cd 含量测定。土壤和植物样品采用高压罐密闭消解法消解，其中土壤样品采用 5 mL HNO₃ + 5 mL HCl 的混合酸进行消解，植物样品采用 6 mL HNO₃ + 2 mL H₂O₂ 的混合酸消解^[9]。土壤有效态 Cd 采用 0.01 mol/L CaCl₂ 进行提取，土液比为 1 : 10；土壤 pH 用电位法测定，土水比为 1 : 2.5。土壤和植物消解液以及土壤提取液中 Cd 含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Optima 8000, Perkin Elmer, Waltham, MA)测定。样品分析过程中采用国家标准参比物质(土壤和植物)进行分析质量控制，试验过程所用试剂均为优级纯。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2021 进行数据处理与制图；采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析和多重比较(LSD 法)，显著性水平定为 $P<0.05$ 。若试验数据呈非正态分布，则进行对数转换后再统计分析。

2 结果与分析

2.1 钝化修复对水稻产量和糙米镉含量的影响

2021 年,不同施用量的生石灰和新型复配材料 ISS 对水稻产量无显著性影响(表 1)。2021 年和 2022 年,对照处理水稻糙米 Cd 含量分别为 0.14~0.23 mg/kg 和 0.14~0.21 mg/kg, 平均值均为 0.18 mg/kg, 最大值高于 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》标准(0.2 mg/kg)^[19]。与对照相比, 1.5、3.0 和 4.5 t/hm² 生石灰处理下水稻糙米 Cd 含量在 2021 年显著下降 44.0%、68.6% 和 72.4%, 在 2022 年显著下降 40.1%、41.9% 和 58.3%; 1.5、3.0 和 4.5 t/hm² ISS 调理剂处理下水稻糙米 Cd 含量在 2021 年显著下降 35.4%、44.6% 和 54.3%, 在 2022 年显著下降 32.2%、40.9% 和 44.2%。随着土壤调理剂施用量的增加, 糙米 Cd 含量呈持续下降趋势, 且连续两年糙米 Cd 含量均达标^[19]。虽然不同调理剂处理下糙米 Cd 含量的下降率在 2022 年较 2021 年略低, 但 2022 年和 2021 年的糙米 Cd 含量无显著性差异(除 3.0 t/hm² 生石灰处理), 说明土壤调理剂停施 1 年后仍能在 Cd 污染农田上保持较为稳定的钝化修复效果。在相同的施用量条件下, ISS 调理剂处理的糙米 Cd 含量与生石灰处理间并无显著性差异, 进一步说明 ISS 调理剂

表 1 不同调理剂施用量对水稻产量和糙米 Cd 含量的影响

Table 1 Effects of conditioner application rates on rice yield and cadmium concentration

处理	施用量 (t/hm ²)	产量 (t/hm ²)	糙米 Cd 含量 (mg/kg)	
		2021 年	2021 年	2022 年
对照	0	8.43 ± 0.65 a	0.181 ± 0.050 Aa	0.184 ± 0.029 Aa
生石灰	1.5	8.73 ± 1.49 a	0.101 ± 0.027 Ab	0.110 ± 0.031 Abc
	3.0	8.10 ± 0.83 a	0.057 ± 0.014 Bc	0.107 ± 0.022 Abc
	4.5	8.39 ± 1.52 a	0.050 ± 0.018 Ac	0.077 ± 0.037 Ac
ISS	1.5	8.54 ± 2.02 a	0.117 ± 0.012 Ab	0.125 ± 0.030 Ab
	3.0	7.77 ± 1.66 a	0.100 ± 0.012 Ab	0.109 ± 0.012 Abc
	4.5	8.17 ± 1.39 a	0.083 ± 0.015 Abc	0.103 ± 0.002 Abc

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)，同行不同大写字母表示糙米 Cd 含量在 2021 年和 2022 年间 t 检验差异显著($P<0.05$)；下同。

的稻米降 Cd 效果较为稳定。

2.2 钝化修复对土壤 pH 和有效态镉含量的影响

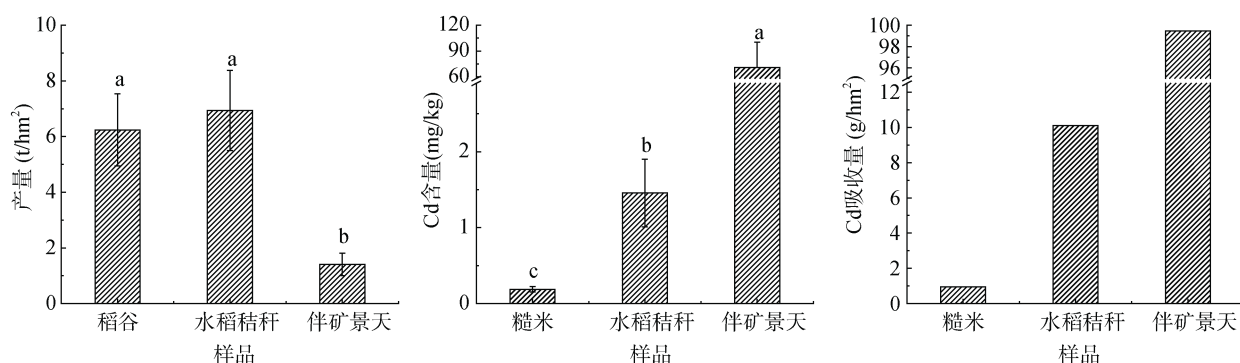
与对照处理比较, 1.5、3.0 和 4.5 t/hm² 生石灰施用显著提高了土壤 pH, 其中 2021 年显著提高了 0.83、1.05 和 1.25 个单位, 2022 年显著提高了 0.70、0.61 和 1.04 个单位(表 2)。2021 年土壤 pH 的升高显著降低了有效态 Cd 含量, 而 2022 年仅 4.5 t/hm² 生石灰处理显著降低了土壤有效态 Cd 含量。ISS 调理剂处理对土壤 pH 的影响较小, 仅 2021 年 4.5 t/hm² 的 ISS 处理土壤 pH 较对照显著提高了 0.75 个单位, 但土壤有效态 Cd 含量均较对照显著下降。2022 年, 仅 4.5 t/hm² 的 ISS 调理剂处理土壤有效态 Cd 含量显著下降。相同施用量条件下, 生石灰处理的土壤 pH 显著高于 ISS 调理剂处理的土壤 pH, 但土壤有效态 Cd 含量差异不显著。与 2021 年相比, 2022 年 1.5 t/hm² 和 3.0 t/hm² 两种调理剂处理的土壤有效态 Cd 含量均显著上升, 仅 4.5 t/hm² 处理的土壤有效态 Cd 含量无显著性差异。

2.3 水稻-伴矿景天轮作对植物生长和镉吸收的影响

如图 1 所示, 水稻-伴矿景天轮作系统中稻谷和水稻秸秆产量分别为 6.24 t/hm² 和 6.93 t/hm², 水稻干重产量显著高于伴矿景天 1.40 t/hm² 的产量。根据水稻品种“南粳 46”最低 81.5% 的糙米率^[20], 计算得到该水稻品种的糙米产量为 5.09 t/hm²。水稻糙米和秸秆 Cd 含量分别为 0.19 mg/kg 和 1.46 mg/kg, 其中糙米 Cd 含量低于 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[19]标准(0.2 mg/kg)。与水稻地上部 Cd 含量相比, 伴矿景天地上部的 Cd 积累能力更强(70.8 mg/kg)。根据产量与 Cd 含量数据, 分别

表 2 不同调理剂施用量对土壤 pH 和有效态 Cd 含量的影响
Table 2 Effects of conditioner application on soil pH and available cadmium concentration

处理	施用量 (t/hm ²)	土壤 pH		有效态 Cd 含量 (mg/kg)	
		2021 年	2022 年	2021 年	2022 年
对照	0	5.64 ± 0.17 Ac	5.55 ± 0.30 Ac	0.079 ± 0.022 Aa	0.094 ± 0.026 Aa
生石灰	1.5	6.47 ± 0.33 Ab	6.25 ± 0.33 Aab	0.018 ± 0.008 Bb	0.071 ± 0.020 Aabc
	3.0	6.69 ± 0.24 Aab	6.16 ± 0.33 Aab	0.014 ± 0.007 Bb	0.070 ± 0.005 Aabc
	4.5	6.89 ± 0.11 Aa	6.60 ± 0.14 Ba	0.014 ± 0.008 Ab	0.051 ± 0.038 Abc
ISS	1.5	5.76 ± 0.22 Ac	5.65 ± 0.26 Ac	0.030 ± 0.020 Bb	0.090 ± 0.029 Aab
	3.0	5.87 ± 0.14 Ac	5.84 ± 0.18 Abc	0.020 ± 0.012 Bb	0.082 ± 0.017 Aabc
	4.5	6.39 ± 0.20 Ab	5.93 ± 0.25 Abc	0.022 ± 0.021 Ab	0.045 ± 0.027 Ac



(图中不同小写字母表示处理间存在显著差异($P < 0.05$))

图 1 轮作系统中水稻和伴矿景天地上部生长和 Cd 吸收

Fig. 1 Uptakes of cadmium in shoots of rice and *Sedum plumbizicicola* under rotation system

计算得到水稻糙米、水稻秸秆和伴矿景天的 Cd 吸收量为 0.96、10.1 和 99.5 g/hm²。

2.4 水稻-伴矿景天轮作对土壤镉吸取修复效率的影响

修复前污染土壤全 Cd 含量为 0.49 mg/kg, 第一季水稻和第二季伴矿景天收获后, 全 Cd 含量分别降至 0.48 mg/kg 和 0.39 mg/kg(图 2A), 即水稻-伴矿景天轮作后, 土壤全 Cd 含量降低 20.0%, 其中水稻季和伴矿景天季土壤全 Cd 含量降低率分别为 3.09% 和 16.9%。根据修复前土壤全 Cd 含量和耕层土壤质量(2 250 t/hm²), 计算得到耕层土壤 Cd 的总量为 1 110 g/hm²。而轮作体系中水稻和伴矿景天地上部的 Cd 吸收量分别为 11.1 g/hm² 和 99.5 g/hm²(图 1)。通过计算植物地上部 Cd 吸收量和土壤 Cd 总量的比值, 得到轮作系统中土壤 Cd 的植物吸取修复效率为 9.96%, 其中水稻季和伴矿景天季的植物 Cd 吸取修复效率分别为 1.00% 和 8.96%(图 2B)。

3 讨论

3.1 镉污染土壤的钝化修复

石灰是一种常用于酸性 Cd 污染土壤治理修复的

重要材料, 具有成本低、操作简单、钝化修复效果好等特点而受到广泛关注^[3]。本研究中, 不同施用量的生石灰和 ISS 调理剂显著提高土壤 pH 的同时, 均显著降低土壤有效态 Cd 含量, 进而降低了糙米 Cd 含量。在湖南长沙的酸性 Cd 污染土壤上, ISS 调理剂对稻米同样具有显著的降 Cd 效果, 这与土壤 pH 升高降低 Cd 的有效性相关^[21]。此外, 在相同施用量条件下, 生石灰和 ISS 调理剂处理的糙米 Cd 含量差异并不显著, 可以推断 ISS 调理剂是一种可以高效降低污染土壤稻米 Cd 吸收的调理剂产品。进一步分析发现, 相同施用量条件下 ISS 调理剂的土壤 pH 低于生石灰处理, 但土壤有效态 Cd 含量与生石灰处理无显著差异。因此, 与石灰主要通过调节土壤 pH 降低水稻 Cd 吸收的途径不同^[22], 土壤 pH 调节并不是 ISS 调理剂抑制污染土壤上水稻 Cd 吸收的唯一途径。在江苏苏州轻度 Cd 污染的中性土壤上, 也发现 ISS 调理剂在不显著改变土壤酸碱性条件下仍可降低稻米 Cd 吸收, 这与调理剂中黏土矿物和腐殖酸的吸附络合过程进一步降低土壤 Cd 有效性的作用机制相关^[23]。除上述影响途径外, ISS 调理剂中富含的锌、硒等元素也可通过离子拮抗作用来降低水稻对 Cd 的

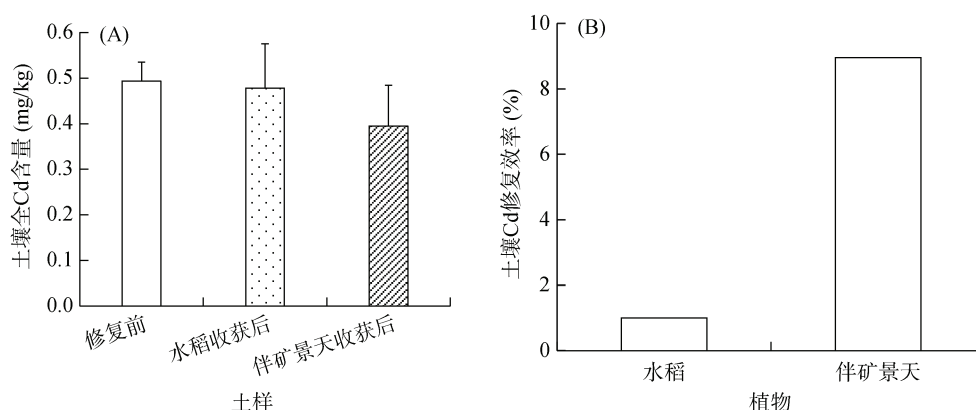


图2 轮作系统中土壤全Cd(A)以及植物吸取修复效率(B)的变化

Fig. 2 Changes in soil total cadmium concentrations(A) and cadmium phytoextraction efficiency(B) under rotation of rice and *Sedum plumbizicicola*

转运,进一步抑制水稻Cd吸收^[24-25]。已有研究表明,调理剂连续施用的污染土壤水稻降Cd效果较好,但调理剂停施后钝化修复的长效性和稳定性会下降,其中石灰的长效性下降最为显著^[8,22]。本研究中,调理剂停施1年后,不同施用量调理剂处理的糙米Cd含量连续两年间均无显著性差异,且相同施用量条件下生石灰和ISS处理间糙米Cd含量差异也不显著,可见,ISS调理剂在中轻度Cd污染的酸性土壤上停施1年后仍具有稳定的水稻降Cd效果。

3.2 镉污染土壤的减量修复

通过对文献报道的数据进行模拟计算,在土壤全Cd含量为0.5~5.0 mg/kg范围内,单季水稻秸秆和籽粒可移除的Cd占耕层土壤Cd总量的平均值仅为0.30%^[16]。本研究中,田间条件下单季水稻秸秆和籽粒可移除的Cd占土壤Cd总量的1.00%,高于上述研究的模拟结果。不同品种水稻的Cd积累能力差异是导致秸秆Cd移除量变异较大的主要原因^[26],如高积累水稻品种Lu-616的地上部Cd吸收量是常规水稻品种黄华占的5.87倍~8.98倍^[27],水稻品种深两优5814的单株Cd去除量是水旱两优898的4.5倍^[28]。在Cd污染土壤上种植高积累型水稻品种是一种减污潜力较大的技术,但其稻米的Cd积累能力也较强,难以同步实现稻米Cd含量达标生产的目标^[15,27,29]。而在本研究中,稻米Cd含量低于0.2 mg/kg的食品中污染物限量标准值(GB 2762—2022)^[19],说明秸秆离田是一种可实现该Cd污染农田土壤减污与安全生产的技术。受污染秸秆离田技术在浙江省Cd污染农田已开展试点工作,并取得了显著的土壤降Cd效果^[30]。虽然水稻秸秆离田是中轻度污染农田土壤Cd减量修复的措施之一,但若考虑大气沉降、灌溉水、肥料等土壤Cd输入量,秸秆离田技术的土壤

Cd减量修复潜力会大打折扣^[16,31-32]。因此,秸秆离田技术还需要与其他减量修复技术联合,以强化污染土壤Cd减量修复效果。

重金属超积累植物和水稻轮作是一种可以强化污染土壤植物Cd吸取修复潜力的“边生产边修复”技术模式。本研究中,超积累植物伴矿景天单季地上部Cd吸收量高达99.5 g/hm²,其Cd移除量占土壤Cd总量的8.96%,显著高于水稻季1.00%的土壤Cd吸取修复效率。与常规或高积累型作物的轮作模式相比,超积累植物与农作物轮作模式的土壤Cd减量修复潜力更高,如伴矿景天—晚稻轮作^[29]和油菜—芝麻—东南景天轮作^[33]。水稻—伴矿景天轮作1年后,土壤全量Cd从修复前的0.49 mg/kg降至0.39 mg/kg,土壤全量Cd实际降低率20.0%,显著高于9.96%的植物Cd吸取修复效率,这种差异主要与土壤采样点距离根系位置、重金属地表径流和垂直下渗的输出、重金属大气沉降的输入等变量参数有关^[12]。虽然水稻—伴矿景天轮作的土壤Cd吸取修复潜力较高,但轮作修复1年后的土壤全量Cd(0.39 mg/kg)仍高于0.3 mg/kg的农用地土壤污染风险筛选值(pH≤7.5, GB 15618—2018)^[18]。因此,常规水稻—伴矿景天轮作是一种适宜于中轻度Cd污染农田的“边生产边修复”技术模式,但要实现耕地土壤环境质量类别划分从安全利用类转变为优先保护类,仍需持续开展轮作修复。

4 结论

在安全利用类Cd污染稻田土壤上,新型复配调理剂ISS可有效降低稻米Cd吸收,是一种可替代生石灰的高效钝化修复材料;土壤调理剂ISS停施1年后,稻米Cd含量较上一年度无显著性差异,表现出长效稳定的稻米降Cd能力。田间条件下常规水稻品

种与 Cd 超积累植物伴矿景天轮作, 水稻季糙米 Cd 含量为 0.19 mg/kg, 低于 0.2 mg/kg 的食品中污染物限量标准值(GB 2762—2022); 轮作 1 年后水稻和伴矿景天地上部的 Cd 吸收量分别为 11.1 g/hm² 和 99.5 g/hm², 通过秸秆离田理论上可分别移除土壤总 Cd 的 1.00% 和 8.96%, 水稻-伴矿景天轮作是一种适宜中轻度 Cd 污染农田减量修复与安全生产的技术模式。

参考文献:

- [1] 徐建明, 何丽芝, 唐先进, 等. 中国重金属污染耕地土壤安全利用存在问题与建议[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1289–1296.
- [2] 余琼阳, 李婉怡, 张宁, 等. 农田土壤重金属污染现状与安全利用技术研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(2): 229–241.
- [3] 陈远其, 张煜, 陈国梁. 石灰对土壤重金属污染修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1419–1424.
- [4] Holland J E, Bennett A E, Newton A C, et al. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review[J]. Science of The Total Environment, 2018, 610: 316–332.
- [5] 刘鑫, 尹泽润, 盛浩, 等. 水稻土微生物群落、酶活性及理化性质对有机肥、石灰连续施用的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(1): 63–73.
- [6] Xu D M, Fu R B, Wang J X, et al. Chemical stabilization remediation for heavy metals in contaminated soils on the latest decade: Available stabilizing materials and associated evaluation methods — A critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128730.
- [7] 常春英, 曹浩轩, 陶亮, 等. 固化/稳定化修复后土壤重金属稳定性及再活化研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(4): 682–691.
- [8] 赵莎莎, 肖广全, 陈玉成, 等. 不同施用量石灰和生物炭对稻田镉污染钝化的延续效应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 334–340.
- [9] Hu P J, Zhang Y, Dong B, et al. Assessment of phytoextraction using *Sedum plumbizincicola* and rice production in Cd-polluted acid paddy soils of South China: A field study[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 286: 106651.
- [10] Zhang J W, Cao X R, Yao Z Y, et al. Phytoremediation of Cd-contaminated farmland soil via various *Sedum alfredii*-oilseed rape cropping systems: Efficiency comparison and cost-benefit analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 419: 126489.
- [11] 吴龙华, 周通, 胡鹏杰, 等. 伴矿景天的栽培和修复原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [12] Wang Y Y, Zhou T, Wang W Y, et al. Phytoextraction of highly cadmium-polluted agricultural soil by *Sedum plumbizincicola*: An eight-hectare field study[J]. Science of The Total Environment, 2023, 905: 167216.
- [13] 贾伟涛, 吕素莲, 林康祺, 等. 高生物量经济植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3): 416–425.
- [14] Takahashi R, Ito M, Kawamoto T. The road to practical application of cadmium phytoremediation using rice[J]. Plants, 2021, 10(9): 1926.
- [15] 文耀林, 丁华, 谢沙, 等. 秸秆离田对水稻 Cd 吸收累积的影响与摄入健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2024, 44(2): 413–422.
- [16] 赵方杰, 赵星宇, 陶伟敏, 等. 秸秆移除对降低土壤镉含量的效果有限[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 693–699.
- [17] 汪鹏, 赵方杰. 土壤-水稻系统中镉迁移与阻控[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(5): 990–1000.
- [18] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [19] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [20] 赵凌, 朱镇, 陈涛, 等. 水稻优良品种南梗 46 及其衍生品种特性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(3): 648–660.
- [21] 杨佳, 曹雪莹, 谭长银, 等. 钝化剂对湘中稻田土壤 Cd 有效性及水稻 Cd 积累的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2024, 47(1): 32–41.
- [22] 龙泽东, 冯秋分, 贺昊, 等. 连续三年施用改良剂对镉污染稻田的修复效果研究[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 513–520.
- [23] 邱炜, 周通, 李远, 等. 改性及复合黏土矿物调理剂对土壤镉有效性和稻米镉含量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 654–659.
- [24] 李虹呈, 王倩倩, 贾润语, 等. 外源锌对水稻各部位镉吸收与累积的拮抗效应[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4854–4863.
- [25] 郑晶, 鲍广灵, 陶荣浩, 等. 基施与叶面施硒肥对富硒镉污染农田水稻降镉增硒的效应[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 974–982.
- [26] Lin Q, Hamid Y, Yin X Y, et al. Screening of low-Cd accumulating early rice cultivars coupled with phytoremediation and agro-production: Bioavailability and bioaccessibility tests[J]. Science of The Total Environment, 2022, 844: 157143.
- [27] 沈一尘, 涂晨, 邱炜, 等. 镉污染土壤上不同水稻品种的镉积累与减污潜力[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(4): 547–555.
- [28] 吴珂萌, 严露, 柳赛花, 等. 杂交稻和常规稻对复合污染稻田土壤镉提取效果差异研究[J]. 环境科学研究, 2023, 36(3): 571–580.
- [29] 曹雪莹, 谭长银, 蔡润众, 等. 植物轮作模式对镉污染农田的修复潜力[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 765–773.
- [30] 汪洁, 朱有为, 杨肖娥, 等. 农用地土壤可持续安全利用的研究与实践——以浙江省镉污染农田为例[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1662–1674.
- [31] Yang Y H, Xiao C F, Wang F, et al. Assessment of the potential for phytoremediation of cadmium polluted soils by various crop rotation patterns based on the annual input and output fluxes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423: 127183.
- [32] Li C, Wang Z Y, Zhou H, et al. Effects of straw and roots removal on soil Cd availability and Cd accumulation in rice at different growth stages[J]. Environmental Technology & Innovation, 2024, 36: 103768.
- [33] 唐云鹏, 胡胜男, 陈镔, 等. 三季油料作物轮作模式安全利用镉污染农田及其经济效益评估[J]. 环境工程学报, 2023, 17(8): 2655–2664.