

连续三年施用改良剂对镉污染稻田的修复效果研究

龙泽东¹, 冯秋分¹, 贺 昊², 罗尊长¹, 唐海明¹, 孙 梅^{1*}, 孙 耿^{1,2*}

(1. 湖南省土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125; 2. 湖南农业大学, 湖南 长沙 410128)

摘 要:【目的】本研究目的为探讨连续三年施用石灰、生物炭和硅肥对中度镉污染稻田的修复效果。【方法】以湖南省典型双季稻区土壤—水稻系统为研究对象, 采用随机区组设计, 共设对照 (T₁)、施用石灰 (T₂)、施用生物炭 (T₃) 和施用硅肥 (T₄) 4 个处理, 分析施用不同改良剂的稻田土壤理化性质和水稻镉含量特征, 通过冗余分析与回归分析探究土壤因子对镉在土壤—水稻系统中迁移转运的影响。【结果】相较于 T₁ 处理, T₂ 处理土壤 pH 显著增加至 6.92 ± 0.05 , 土壤有效镉降低至 $0.41 \pm 0.09 \text{ mg kg}^{-1}$; T₃、T₄ 处理与 T₁ 处理相比, 土壤 pH、有效镉、活性有机质均无显著差异。T₃ 处理早稻和晚稻糙米镉含量最高, 分别为 0.54 ± 0.07 和 $0.11 \pm 0.04 \text{ mg kg}^{-1}$; T₂ 处理最低, 分别为 0.16 ± 0.00 和 $0.03 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$ 。冗余分析结果表明: 糙米中镉含量 (RiCd) 与土壤 pH 负相关, 与有效镉含量 (DPTA-Cd) 正相关。糙米中镉含量与土壤有效镉含量的关系式为: $\text{RiCd} (\text{mg kg}^{-1}) = -0.0822 + 0.297 \text{ DPTA-Cd} (\text{mg kg}^{-1})$ ($R_{\text{adj}}^2 = 0.503$, $P < 0.05$)。【结论】连续三年施用石灰对中度镉污染稻田有较好修复效果, 其主要通过提升土壤 pH, 降低土壤有效镉含量, 进而降低水稻糙米镉含量。

关 键 词: 镉; 石灰; 生物炭; 硅; 双季稻

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2024)02-0513-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022121203

龙泽东, 冯秋分, 贺 昊, 罗尊长, 唐海明, 孙 梅, 孙 耿. 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

LONG Ze-dong, FENG Qiu-Fen, HE Hao, LUO Zun-chang, TANG Hai-ming, SUN Mei, SUN Geng. Remediation of Cadmium-contaminated Rice Fields by Three Consecutive Years of Amendment Application[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2): 513 - 520

【研究意义】重金属镉 (Cd) 是造成我国农田土壤重金属污染的主要元素之一, 危害作物生长和人类健康^[1-2]。2014 年由环境保护部与国土资源部联合发表的全国土壤污染调查报告表明, 镉是我国重金属污染元素中污染超标率最高的元素, 点位超标率高达 7%^[3]。湖南省是我国的主要双季稻区, 水稻种植面积全国第一, 但耕地重金属污染严重^[4]。2013 年湖南省“镉大米”事件的曝光, 引起了全国人民对水稻镉污染问题的关注。解决湖南省双季稻区土壤—水稻系统中镉污染问题, 保证农作物安全生产, 成为当前研究热点问题。【前人研究进展】前人针对如何降低土壤—水稻系统中镉活性的问题已开展了大量研究, 其中施用土壤改良剂可有效治理稻田镉污染^[5-8]。史磊等^[5]发现施用石灰能够有效降低稻

田土壤中镉的生物有效性, 全生育期淹水结合在分蘖期施用石灰可在不减产的前提下有效降低稻米中镉含量。石灰配施海泡石、有机肥也能有效调控污染稻田土壤中的镉进入稻米, 实现水稻安全生产^[6]。王丹丹等^[7]发现, 牛粪生物炭能降低土壤酸可提取态镉含量, 降低作物镉含量, 对重金属镉污染土壤具有良好的钝化修复效果。最新的一项 Meta 分析研究表明, 生物炭的应用使土壤中镉的生物利用度降低了 50.12%, 植物中镉的浓度降低了 38.66%^[8]。彭欧等^[9]研究了改良剂及农艺措施对水稻吸收镉的影响, 发现硅肥结合水分管理处理对晚稻土壤有效态镉的降低幅度最大。但也有研究发现石灰处理后, 降镉效果不稳定, 持久性弱, 且过量施用强碱性的石灰易造成农作物死亡^[10]。徐琪^[11]发现在干湿交替

收稿日期: 2022-09-27; 修订日期: 2023-03-20

基金项目: 长沙市自然科学基金 (kq2022350) 和湖南省农业科技创新资金项目 (2022CX79, 2022CX111) 资助

作者简介: 龙泽东 (1992-), 男, 湖南怀化人, 助理研究员, 从事土壤重金属污染、土壤肥力和生态研究。E-mail: longzd313@hunaas.cn

*通讯作者: E-mail: sunmei@hunaas.cn; E-mail: sungeng@hunaas.cn

条件下,生物炭的施用会提高糙米中的镉含量,传统灌溉条件下施用生物炭则相反。【本研究切入点】稻田土壤镉污染问题严重影响水稻的产量和质量,而治理过程中存在降镉效果不佳、持久性弱等问题。石灰、生物炭、硅肥等改良剂均能不同程度地影响镉在土壤—水稻系统中的吸收转运,但现有研究多局限于盆栽试验或短期小区试验^[12],缺少连续施用的田间定位试验进行验证和评估。【拟解决的问题】本研究在前人研究的基础上,选择石灰、生物炭、硅肥作为改良剂,通过连续三年六季的田间定位试验,分析石灰、生物炭、硅肥对湖南中度镉污染稻田的修复效果,探究不同改良剂对镉在土壤—水稻系统中吸收转运特征的影响,为湖南中度镉污染稻田的安全生产提供科学数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

田间定位试验开始于 2018 年,选址在湖南省株洲市株洲县南洲镇洪桥村草塘湾组(27°31'N, 113°10'E, 海拔 50 m)。株洲市属亚热带季风性湿润气候,四季分明,雨量充沛、光热充足,风向冬季多西北风,夏季多正南风,无霜期在 286 d 以上,年平均气温 16 ℃ 至 18 ℃,适宜多种农作物生长,为湖南省有名的粮食高产区和国家重要的商品粮基地。试验稻田 0~15 cm 耕层的土壤基本理化性质如下:有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 40.4、2.48、0.54 和 15.2 g kg⁻¹,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 250、3.27 和 122 mg kg⁻¹,土壤 pH 5.40,阳离子交换量(CEC) 14.5 cmol kg⁻¹,有效镉 0.687 mg kg⁻¹,总镉 0.999 mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用稻—稻—闲种植模式,秧盘育苗。早稻品种为中嘉早 17 号,每年均在 4 月初移栽,7 月初收获,株行距为 13 cm × 20 cm,移栽前施用尿素 175.5 kg hm⁻² (80.73 kg N hm⁻²),过磷酸钙 562.5 kg hm⁻² (67.5 kg P₂O₅ hm⁻²),氯化钾 112.5 kg hm⁻² (67.5 kg K₂O hm⁻²),返青后追施尿素 117 kg hm⁻² (53.82 kg N hm⁻²),氯化钾 112.5 kg hm⁻² (67.5 kg K₂O hm⁻²)。晚稻品种为 C 两优 87,每年均在 7 月中旬移栽,10 月下旬收获,株行距为 17 cm × 20 cm,移栽前施用尿素 214.5 kg hm⁻² (98.67 kg N hm⁻²),过磷酸钙 687 kg hm⁻² (82.44 kg P₂O₅ hm⁻²),氯化钾 138 kg hm⁻² (82.8 kg K₂O hm⁻²),返青后追施尿

素 142.5 kg hm⁻² (65.55 kg N hm⁻²),氯化钾 138 kg hm⁻² (82.8 kg K₂O hm⁻²)。试验共设置对照、施用石灰、施用生物炭和施用硅肥 4 个处理,每个处理重复 3 次,共 12 个小区,每个小区面积为 33 m²,小区间用水泥田埂隔开,埂高 30 cm,各小区分别排水和灌溉。参考相关研究及生产实际^[6,8,12],不同处理每季水稻改良剂的施用量详见表 1。供试石灰为湖南株洲生产的福利牌石灰, CaO 含量 > 95%;供试生物炭原材料为稻壳,在 500~600 ℃ 下高温厌氧裂解煅烧而成, pH 约为 9;供试硅肥为湖南隆洲驰宇科技有限公司生产的硅钙肥, SiO₂ 含量 > 20%, CaO + MgO 含量 > 20%。改良剂均在基肥施用三天前人工均匀撒施在土壤表层,再通过旋耕机将其混入土壤,所有处理早、晚水稻生长过程中的日常管理,如水分管理和病虫害防治等按当地普通耕作方式进行,确保试验小区条件一致。

表 1 不同处理组每季水稻的改良剂施用量

Table 1 Application scheme of soil amendments per season under different treatments

编号 Number	处理 Treatment	施用量 Application rate
T ₁	对照	—
T ₂	石灰	1500 kg hm ⁻²
T ₃	生物炭	3000 kg hm ⁻²
T ₄	硅肥	1500 kg hm ⁻²

1.3 样品采集

2020 年在早、晚稻成熟期,采用“S”形多点取样法,采集植株样品。植株样品清洗根际土后分为根、茎叶和糙米三部分,于 105 ℃ 杀青半小时,60 ℃ 烘干,保存备用。采用“S”形多点取样法,在每季水稻收获期采集 0~15 cm 土层土壤样品。土壤样品在去除有机残体和碎石后置于阴凉处自然风干,备用。

1.4 测定和分析方法

土壤 pH 用 pH 计(ST 2100,奥豪斯仪器常州有限公司)测定,水土比为 2.5:1。阳离子交换量使用 BaCl₂-MgSO₄ 法测定^[13]。土壤全镉采用盐酸—硝酸—氢氟酸—高氯酸全消解(GB/T 17141—1997)测定。活性有机质含量采用水合热法测定^[14]。植株镉采用酸消解(GB 5009.268—2016)测定。土壤有效镉采用 DTPA 浸提(GB/T 23739—2009)测定。

采用迁移系数和富集系数分析镉在土壤—水稻系统中的迁移特征,公式如下:

$$TF_{S-Ro} = C_{Ro}/C_S \times 100\%$$

$$TF_{Ro-Le} = C_{Le}/C_{Ro} 100\%$$

$$TF_{Le-Ri} = C_{Ri}/C_{Le} 100\%$$

$$BCF = C_{Ri}/C_s 100\%$$

其中 TF_{S-Ro} 、 TF_{Ro-Le} 和 TF_{Le-Ri} 分别为镉在土壤—水稻根系, 水稻根系—茎叶, 水稻茎叶—糙米中的迁移系数, BCF 为富集系数, C_s 、 C_{Ro} 、 C_{Le} 和 C_{Ri} 分别代表土壤、水稻根、水稻茎叶和水稻糙米中的镉含量 (mg kg^{-1})。

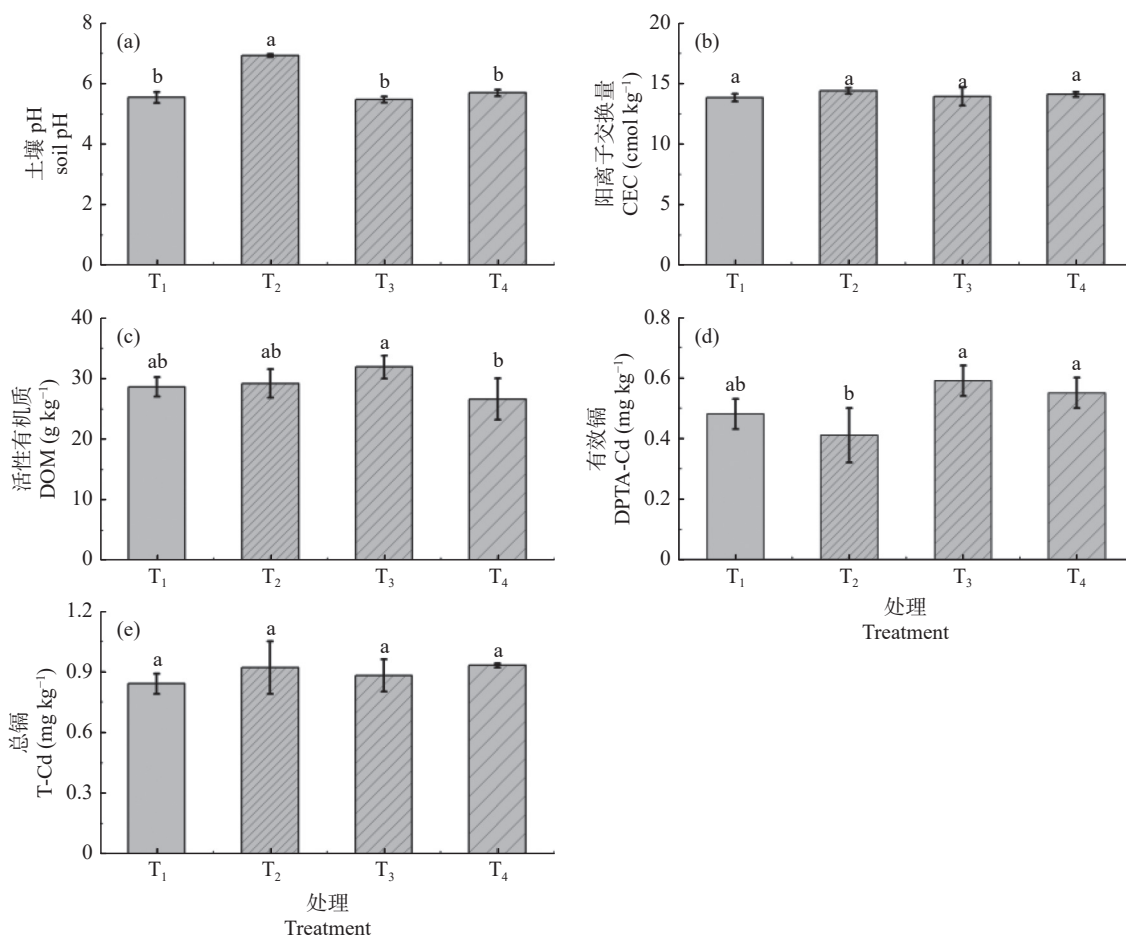
1.5 数据处理

本试验数据使用 R 软件进行数据分析, 不同处理之间的显著差异性分析通过单因素方差分析完成 (one-way ANOVA), 事后多重比较通过 Duncan 法检验, 相关性分析通过 Pearson 方法完成, 所有绘图均通过 R 软件和 Origin 2020 完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤理化性质的影响

2020 年晚稻收获后, 不同处理对稻田土壤理化性质的影响如图 1 (a, b, c, d, e) 所示。处理之间土壤 pH 存在差异, 其中 T2 处理土壤 pH 最高, 为 6.92 ± 0.05 , 显著高于其它处理, T1、T3 和 T4 处理的土壤 pH 分别为 5.54 ± 0.18 、 5.47 ± 0.10 和 5.69 ± 0.11 。T3 处理土壤活性有机质为 $31.90 \pm 1.93 \text{ g kg}^{-1}$, 显著高于 T4 ($26.63 \pm 3.42 \text{ g kg}^{-1}$, $P < 0.05$)。对于土壤有效镉, T2 处理为 $0.41 \pm 0.09 \text{ mg kg}^{-1}$, 显著低于 T3 ($0.59 \pm 0.05 \text{ mg kg}^{-1}$) 和 T4 ($0.55 \pm 0.05 \text{ mg kg}^{-1}$), 与 T1 ($0.48 \pm 0.05 \text{ mg kg}^{-1}$) 无显著差异。不同处理土壤阳离子交换量和总镉均无显著差异。



注: 不同小写字母代表不同处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。T₁, 对照; T₂, 施用石灰; T₃, 施用生物炭; T₄, 施用硅肥, 下同。

图 1 不同处理下土壤的理化性质

Fig.1 Physical and chemical properties of soils under different treatments

2.2 水稻产量、糙米镉含量和镉的迁移特征

如图 2 (a) 所示, T₁ 处理早稻和晚稻产量分别

为 $5630 \pm 156 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $6388 \pm 270 \text{ kg hm}^{-2}$ 。T₃ 处理相较于 T₁ 分别增产 9% 和 13%, 早、晚稻产量分别

为 $6162 \pm 123 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $7186 \pm 441 \text{ kg hm}^{-2}$, 而 T_2 和 T_4 处理水稻产量与 T_1 无显著差异。不同处理糙米镉含量如图 2 (b) 所示, 早稻糙米镉含量从高到低依次为: $T_3 > T_1 > T_4 > T_2$, 其中 T_3 处理早稻糙米镉含量为 $0.54 \pm 0.07 \text{ mg kg}^{-1}$ 。 T_2 处理早稻糙米镉含量为 $0.16 \pm 0.00 \text{ mg kg}^{-1}$, 低于 0.20 mg kg^{-1} 的国家食品安全标准。所有处理晚稻糙米镉含量从高到低依次为: $T_3 > T_4 > T_1 > T_2$, 其中 T_3 晚稻糙米镉含量为 $0.11 \pm 0.04 \text{ mg kg}^{-1}$, 显著高于 T_1 ($0.06 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$) 和 T_2 处理 ($0.03 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$)。

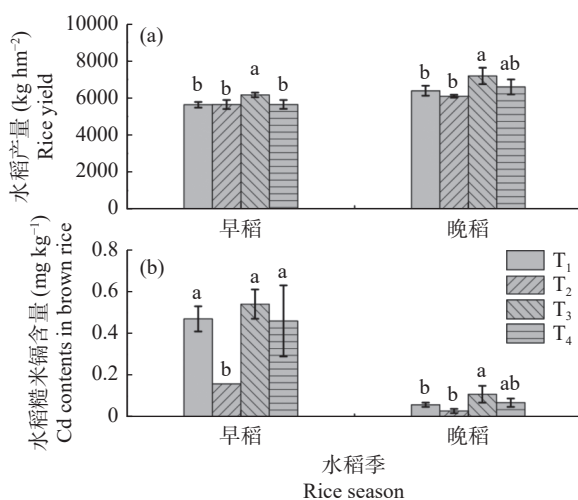


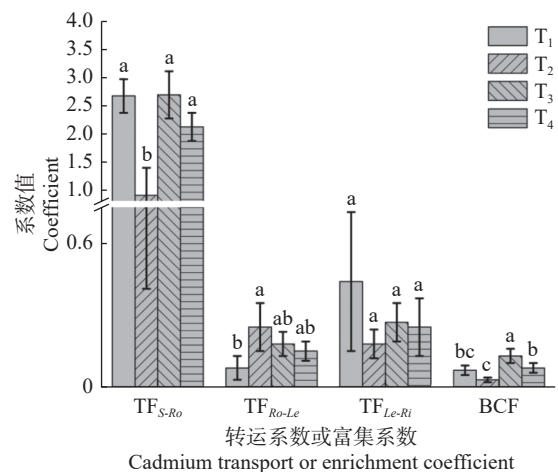
图 2 不同处理水稻产量和糙米镉含量

Fig.2 Rice yield and cadmium contents in brown rice under different treatments

镉在土壤—水稻系统中的迁移系数和富集系数如图 3 所示。 T_2 处理水稻 TF_{S-Ro} 为 0.90 ± 0.49 , 显著低于其他处理, 其中 T_1 处理为 2.67 ± 0.30 。 T_2 处理水稻 TF_{Ro-Le} (0.25 ± 0.10) 显著高于 T_1 (0.08 ± 0.05), 但与 T_3 和 T_4 无显著差异。各处理之间 TF_{Le-Ri} 均无显著差异。 BCF 方面, 各处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 按从大到小的顺序分别为 T_3 (0.13 ± 0.03) $> T_4$ (0.08 ± 0.02) $> T_1$ (0.07 ± 0.02) $> T_2$ (0.03 ± 0.01)。

2.3 水稻镉含量特征的冗余分析和回归模型

为了探究土壤因子对水稻镉的吸收转运的影响, 对水稻植株镉含量和转运特征与土壤因子进行冗余分析, 结果如图 4 所示。第一成分和第二成分分别解释了水稻植株镉含量和转运特征变异程度的 66.38% 和 11.35%。土壤有效镉 (DPTA-Cd) 与活性有机质 (DOM) 呈正相关关系, 与 pH 呈负相关关系。进一步地, 根镉含量 (RoCd)、茎叶镉含量 (LeCd)、糙米镉含量 (RiCd)、富集系数



注: TF_{S-Ro} , 镉在土壤—根系迁移转运系数; TF_{Ro-Le} , 镉在根系—茎叶转运系数; TF_{Le-Ri} , 镉在茎叶—糙米转运系数; BCF, 富集系数。

图 3 不同处理水稻镉的转运系数和富集系数

Fig.3 Transport and enrichment coefficients of cadmium in rice under different treatments

(BCF)、镉在土壤—根中的迁移系数 (TF_{S-Ro}) 与土壤 DPTA-Cd 与呈正相关关系, 而与 pH 呈负相关关系。基于冗余分析的结果, 使用逐步法剔除因子, 对 RiCd 作线性回归拟合, 使模型达到最优, 结果如图 5 所示。本研究中, RiCd 与土壤 DPTA-Cd 显著正相关, 其关系式为: $RiCd \text{ mg kg}^{-1} = -0.0822 + 0.297 \text{ DPTA-Cd mg kg}^{-1}$ ($R_{adj}^2 = 0.503, P < 0.05$)。

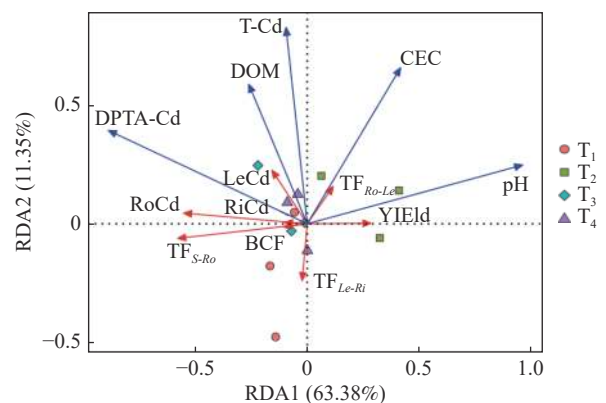


图 4 水稻镉含量和转运特征与土壤环境因子之间的冗余分析(RDA)

Fig.4 Redundancy analysis (RDA) between cadmium content and transport characteristics of rice and soil environmental factors

2.4 不同稻季间土壤 pH 和有效镉的变化

连续三年施用改良剂对土壤 pH 和有效镉的影响如图 6 所示。总体而言, 土壤 pH 和有效镉呈相反的变化趋势。 T_2 处理下, 土壤 pH 呈波动上升趋势, 2018 年早稻时期土壤 pH 为 5.10 ± 0.02 , 呈弱酸性,

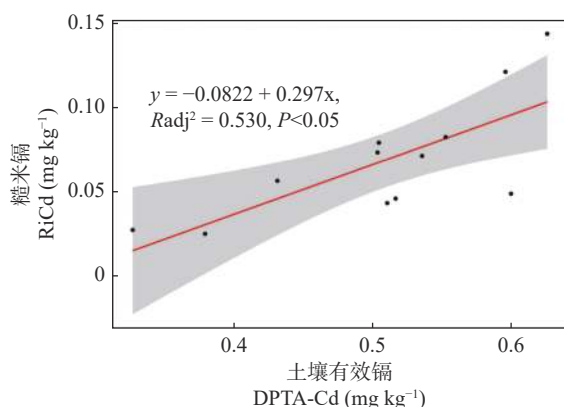


图5 糙米镉含量和土壤有效镉之间的线性拟合

Fig.5 Linear fitting between cadmium content in brown rice and available cadmium in soil

2020 年晚稻时期土壤 pH 上升到 6.92 ± 0.05 , 呈中性。其他处理土壤 pH 整体变化不大。所有处理中, 同年晚稻时期土壤 pH 略高于同年早稻时期, 次年早稻时期土壤 pH 下降。而土壤有效镉方面, 从 2018 年至 2020 年期间, 所有处理变化趋势一致, 同年晚稻时期土壤有效镉略低于同年早稻时期, 次年早稻时期土壤有效镉则升高。

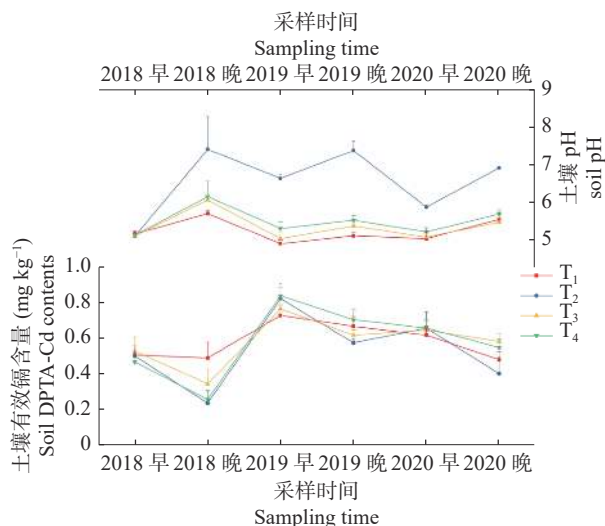


图6 2018~2020 年不同处理下土壤 pH 和有效镉的变化

Fig.6 Changes in soil pH and available cadmium under different treatments from 2018 to 2020

3 讨论

3.1 石灰、生物炭和硅肥对土壤—水稻镉吸收转运的影响

石灰是一种可调节土壤酸碱度的改良剂, 常被用于重金属污染耕地的修复治理^[12]。周亮等^[15]发现

石灰的施用能显著提高土壤 pH, 降低土壤有效镉含量。骆文轩等^[16]发现石灰可有效调控早稻季的轻度、中度、重度以及晚稻季的轻度镉污染稻田的稻米镉含量, 降至国家食品安全标准 0.20 mg kg^{-1} 以下。本研究中, 连续三年六季施用石灰显著增加土壤 pH, 降低土壤有效镉含量以及早、晚稻糙米中的镉含量, 表明在当前施用量下连续三年六季施用石灰对中度镉污染双季稻田仍具有较好的修复效应。这主要是由于较低的土壤 pH 会降低土壤表面电荷对 Cd^{2+} 的吸附, 土壤 pH 与水稻糙米镉含量通常呈显著的负相关关系^[17]。而施用石灰会增加土壤 pH, 增加土壤表面电荷对 Cd^{2+} 的吸附并降低 Cd^{2+} 的移动性, 有效镉含量降低^[16-17], 此外石灰的施用使得土壤中 Ca^{2+} 含量上升, 与 Cd^{2+} 形成竞争关系, 降低了水稻对 Cd^{2+} 的吸收利用。本研究中 T_2 石灰处理下镉富集系数和在土壤—根中的转运系数显著低于其他处理, 但在不同处理下镉在茎叶—糙米中的转运系数则无显著差异, 不同改良剂处理对水稻植株内镉的迁移转运影响不大。周亮等^[15]研究也发现, 相对于常规处理, 石灰处理能够降低、中和重度污染稻田的稻米镉富集系数。史磊等发现施用石灰后能显著降低水稻成熟期镉在水稻根部和糙米中的富集系数, 同时在全生育期淹水条件下, 也能显著降低了镉在根部到茎叶和茎叶到糙米中的转运系数^[5-6]。

生物炭作为一种富含碳的产品, 具有大比表面积、高阳离子交换量和丰富官能团的特点, 可与重金属形成表面络合物, 能通过提高土壤 pH 来降低重金属有效性, 通过阳离子吸附作用降低土壤重金属迁移率, 通常也被用于修复重金属污染土壤^[18-19]。另外生物炭的施用能够增加农作物的生物量, 从而降低植物对镉积累产生稀释效应^[20-22]。赵莎莎等^[23]研究发现生物炭能够有效降低土壤有效镉和稻米镉含量。黄雁飞等^[24]在镉污染稻田土壤中施用桑树枝秆、木薯秆和甘蔗渣生物炭, 结果表明均可有效降低水稻稻米对镉的吸收量。本研究中, 相较于常规处理, 生物炭处理增加了土壤中可溶性有机质和有效镉含量, 早、晚稻产量和糙米中镉含量均高于其他处理, 这可能是因为本研生物炭的施用量较小 (3000 kg hm^{-2}), 且施用时间相对较长 (3 年), 相关研究结果表明, 生物炭能在短时间内 (1 年) 显著增加土壤 pH 值, 从而在一年内降低重金属有效性, 但生物炭对土壤 pH 的改善是有时间限制的, 随着时间推移, 生物炭中的碱金属浸出^[25]。曹健等^[26]研究发现, 生

物炭在好氧环境下无法降低稻米中镉的积累,而持续性淹水环境下则可以。徐琪^[1]通过盆栽试验,研究了不同水分管理条件下生物炭对水稻镉积累的影响,发现传统灌溉条件下生物炭显著降低了糙米中镉含量;但在干湿交替条件下,生物炭处理反而提高了糙米和根中的镉含量。这些结果表明,生物炭修复镉污染土壤的效果与材料来源、土壤的理化性质和农艺措施等密切相关,同时生物炭制备的高温热解温度也会影响其修复效果。考虑到生物炭价格相对昂贵,在实际修复生产中还需要考虑经济成本。

硅被证明是水稻生长发育必需的元素之一,可以促进水稻对矿质元素的吸收,增加稻米产量和质量^[27-28],有效降低水稻对镉的吸收^[29-31]。戴青云等^[32]从土壤学和生物学两方面重点分析了施加硅肥对缓解镉毒害作用的可能机理,一方面硅肥会改变土壤理化性质,硅镉会发生吸附沉淀作用,降低土壤中镉的活性;另一方面硅能增强水稻抗氧化系统酶的活性和清除自由基的能力,抑制镉的吸收及其在水稻体内的运输,同时硅与镉在水稻体内具有螯合和区隔作用。Ji 等^[33]发现随着硅肥施加量的增加水稻茎秆对镉的截留更显著,抑制地上部镉向水稻籽粒的运输,降低籽粒中镉含量。王怡璇等^[34]研究发现随着硅肥施用量的增加土壤中有效镉的含量显著降低,当施硅量(Na_2SiO_3)为 800 mg kg^{-1} 时,土壤中有效态镉含量降幅达 10.57%。但本研究中硅肥处理下,土壤 pH、土壤有效镉以及水稻产量和糙米镉含量均与对照处理无显著差异,这可能是本研究硅肥用量较小(1500 kg hm^{-2}),有效成分 SiO_2 占比 20% 左右,而土壤初始 pH 为 5.4,当前剂量下的硅肥处理不能显著提高土壤 pH,不能有效降低土壤有效镉的含量从而起到修复镉污染稻田的效果。

3.2 稻季间糙米镉含量差异

不同稻季间水稻糙米镉含量及土壤的理化性质存在差异。本研究中,2020 年早稻成熟期土壤中有有效镉含量高于晚稻,相应地早稻(中嘉早 17 号)糙米镉含量显著高于同年晚稻(C 两优 87),这可能是因为品种差异以及早、晚稻生长时期的气候条件不同。湖南省属于典型的亚热带季风气候,而早、晚稻生长时期的气象条件相差较大,近 30 年晚稻季(7~10 月)的温度比早稻季(4~7 月)高 3°C ,而降雨量则少 178 mm ^[35]。韩天富等^[36]发现年均气温、年均降雨量与水田土壤 pH 均呈显著负相关关系。降雨导致土壤中的盐基离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})

随水向下移动或淋失,使土壤盐基饱和度下降,缓冲能力降低,土壤 pH 偏低^[31],而南方地区由于空气中大量 CO_2 和酸沉降等因素导致降雨呈弱酸性,进入稻田后易加速土壤 pH 降低^[37]。本研究中,株洲地区由于早稻收获时期(7 月)的气温和降水量均高于晚稻(10 月),使得早稻收获时期土壤 pH 低于同年晚稻,导致早稻季土壤有效镉高于晚稻季,进而使得早稻糙米镉含量高于同年晚稻。与本研究结果不同,韩潇潇等^[38]在湖南湘潭地区研究中发现,相同的镉污染农田晚稻(黄华占)各器官中的镉含量明显高于早稻(早 35)。罗芬等^[39]发现衡阳地区和岳阳地区水稻品种早 39 在晚稻季收获的籽粒镉含量要显著高于早稻季 118.93%~429.11%。周亮等^[15]发现湖南 43 个县区晚稻糙米镉含量极显著高于早稻(48.1%),这可能主要是水稻品种不同带来的结果差异,不同水稻品种吸收转运镉的能力不一。

4 结论

(1) 石灰处理下双季稻产量与对照组无显著差异,但土壤 pH 显著升高,有效镉含量降低,水稻镉的富集系数和在土壤到根的转运系数降低,早、晚稻糙米中镉含量下降。石灰作为一种土壤改良剂,连续施用三年六季对中度镉污染稻田修复仍有较好修复效果。

(2) 生物炭处理下,土壤活性有机质和有效镉含量增加,早、晚稻产量增产,但糙米中镉含量高于常规施肥;硅肥处理下,土壤理化性质、水稻产量和糙米中镉含量与常规施肥处理之间无显著差异。本研究设计用量下,生物炭和硅肥处理均未能对中度镉污染稻田起到较好的修复效果,在实际修复生产中,需要考虑生物炭原材料、制备工艺和硅肥施用剂量等问题。

(3) 糙米中镉含量(RiCd)与土壤有效镉含量(DPTA-Cd)的关系式为: $\text{RiCd mg kg}^{-1} = -0.0822 + 0.297 \text{ DPTA-Cd mg kg}^{-1}$ ($R_{\text{adj}}^2 = 0.503$, $P < 0.05$)。降低土壤有效镉含量,可以减少水稻对镉的吸收,从而有效降低水稻糙米镉含量。

参考文献:

- [1] Welikala D, Robinson B H, Moltchanova E, et al. Soil cadmium mobilisation by dissolved organic matter from soil amendments[J]. *Chemosphere*, 2021, 271: 129536–129545.
- [2] Yang Y, Li Y L, Wang M E, et al. Limestone dosage response of cadmium phytoavailability minimization in rice: A trade-off

- relationship between soil pH and amorphous manganese content[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123664 – 123670.
- [3] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 2014.
- [4] 黄 毅, 邓志英. 我国重金属污染区耕地轮作休耕存在的问题及对策——以湖南省为例[J]. 环境保护, 2019, 47(13): 22 – 26.
- [5] 史 磊, 郭朝晖, 梁 芳, 等. 水分管理和施用石灰对水稻镉吸收与运移的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 111 – 117.
- [6] 史 磊, 郭朝晖, 彭 驰, 等. 石灰组配土壤改良剂抑制污染农田水稻镉吸收[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 209 – 216.
- [7] 王丹丹, 林静雯, 丁海涛, 等. 牛粪生物炭对重金属镉污染土壤的钝化修复研究[J]. 环境工程, 2016, 34(12): 183 – 187.
- [8] Tian X S, Wang D Y, Chai G Q, et al. Does biochar inhibit the bioavailability and bioaccumulation of As and Cd in co-contaminated soils? A meta-analysis[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 762: 143117 – 143127.
- [9] 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.
- [10] 王 刚, 孙育强, 杜立宇, 等. 石灰与生物炭配施对不同浓度镉污染土壤修复[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 379 – 383.
- [11] 徐 琪. 水分管理下外源有机物与生物炭对水稻Cd积累的阻控研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [12] 索琳娜, 马 杰, 刘宝存, 等. 土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1141 – 1149.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 于 荣, 徐明岗, 王伯仁. 土壤活性有机质测定方法的比较[J]. 土壤肥料, 2005, (2): 49 – 52.
- [15] 周 亮, 肖 峰, 肖 欢, 等. 施用石灰降低污染稻田上双季稻镉积累的效果[J]. 中国农业科学, 2021, 54(4): 780 – 791.
- [16] 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.
- [17] Hussain B, Umer M J, Li J M, et al. Strategies for reducing cadmium accumulation in rice grains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125557 – 125576.
- [18] 吴 岩, 杜立宇, 梁成华, 等. 生物炭与沸石混施对不同污染土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 286 – 290.
- [19] 桂利权, 张永利, 王焯军. 生物炭对土壤肥力及作物产量和品质的影响研究进展[J]. 现代农业科技, 2020, (16): 136 – 141.
- [20] Chen D, Liu X, Bian R, et al. Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals – A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222: 76 – 85.
- [21] Gasco G, Alvarez M L, Paz-Ferreiro J, et al. Combining phytoextraction by *Brassica napus* and biochar amendment for the remediation of a mining soil in Riotinto (Spain)[J]. *Chemosphere*, 2019, 231: 562 – 570.
- [22] Kameyama K, Miyamoto T, Iwata Y. Comparison of plant Cd accumulation from a Cd-contaminated soil amended with biochar produced from various feedstocks[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(10): 12699 – 12706.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Yuan C P, Gao B L, Peng Y T, et al. A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: Importance of soil and biochar properties[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 756: 144058 – 144067.
- [26] 曹 健, 陈 喆, 吴 箐, 等. 基施钢渣及生物炭结合水分管理阻控水稻镉吸收研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1475 – 1483.
- [27] Ma J F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(1): 11–18.
- [28] 黄 蕊, 纪雄辉, 王 欣, 等. 土壤—水稻系统Cd-As同步钝化和吸收阻控研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 482 – 492.
- [29] 彭 华, 田发祥, 魏 维, 等. 不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1027 – 1033.
- [30] 余跑兰, 肖小军, 陈 燕, 等. 硅肥对早稻群体生产力和镉吸收的影响[J]. 中国稻米, 2015, 21(4): 135 – 137.
- [31] Zhang Y, Wang X, Ji X, et al. Effect of a novel Ca-Si composite mineral on Cd bioavailability, transport and accumulation in paddy soil-rice system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 233: 802 – 811.
- [32] 戴青云, 刘代欢, 王德新, 等. 硅对水稻生长的影响及其缓解镉毒害机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(5): 86 – 92.
- [33] Ji X, Liu S, Juan H, et al. Effect of silicon fertilizers on cadmium in rice (*Oryza sativa*) tissue at tillering stage[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(11): 1 – 9.
- [34] 王怡璇, 刘 杰, 唐云舒, 等. 硅对水稻镉转运的抑制效应研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1822 – 1827.
- [35] 罗伯良, 李易芝. 湖南双季晚稻寒露风初日的气候演变特征及其预测模型[J]. 中国农业气象, 2015, 36(3): 338 – 345.
- [36] 韩天富, 柳开楼, 黄 晶, 等. 近30年中国主要农田土壤pH时空演变及其驱动因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2137 – 2149.
- [37] 张万付. 黑土地地区土壤酸化产生机理、危害及控制措施[J]. 现代农业, 2018, (4): 43 – 44.
- [38] 韩潇潇, 任兴华, 王培培, 等. 叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1809 – 1817.
- [39] 罗 芬, 张玉盛, 周 亮, 等. 种植制度对水稻籽粒铅、镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1470 – 1478.

Remediation of Cadmium-contaminated Rice Fields by Three Consecutive Years of Amendment Application

LONG Ze-dong¹, FENG Qiu-Fen¹, HE Hao², LUO Zun-chang¹,

TANG Hai-ming¹, SUN Mei^{1*}, SUN Geng^{1,2*}

(1. Hunan Soil and Fertilizer Research Institute, Changsha 410125, China; 2. Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: [Objective] The aims were to investigate the remediation effect of lime, biochar and silicon fertilizer on moderate Cd-contaminated rice fields after three consecutive years of application. [Method] The soil and rice system of typical double-cropping rice area in Hunan Province was selected as the research object. Four treatments, control (T₁), application of lime (T₂), biochar (T₃) and silicon fertilizer (T₄), were used in conducted in a randomized group design to analyze the physicochemical properties of paddy soil and the cadmium content of rice with different amendments. The effects of soil factors on cadmium transport in soil-rice system were investigated by redundancy analysis and regression analysis. [Results] The results showed that T₂ increased soil pH to 6.92 ± 0.05 , soil available Cd decreased to $0.41 \pm 0.09 \text{ mg kg}^{-1}$ compared with T₁. There were no significant differences in soil pH, available Cd and dissolved organic matter in T₃ and T₄ treatments compared with T₁ treatments. Cd content in brown rice in T₃ treatment were the highest in the early and late season at 0.54 ± 0.07 and $0.11 \pm 0.04 \text{ mg kg}^{-1}$. The T₂ treatment had the lowest at 0.16 ± 0.00 and $0.03 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$. The redundancy analysis showed that Cd content in brown rice was negatively correlated with soil pH and positively correlated with soil available Cd (DPTA-Cd). The relationship between brown rice cadmium content (RiCd) and soil available Cd was as follows: $\text{RiCd} \text{ mg kg}^{-1} = -0.0822 + 0.297 \text{ DPTA-Cd} \text{ mg kg}^{-1}$ ($R_{\text{adj}}^2 = 0.503$, $P < 0.05$). [Conclusion] Continuous application of lime for 3-year effectively remediated paddy fields under moderately cadmium pollution due to soil pH increase and soil available cadmium reduction, could cut down the Cd content in brown rice.

Key words: Cadmium; Lime; Biochar; Silicon; Double Cropping Rice

[责任编辑: 裴久渤]