

农业现代化研究

NONGYE XIANDAIHUA YANJIU

(双月刊)

第 42 卷第 2 期 (总第 243 期)

2021 年 03 月

目次

污染防控 功在当代 利在千秋——“农村污染综合防控与修复”专刊编者语·····	(I)
农业面源污染专栏 (栏目主编:李裕元)	
我国农村水体面源污染问题解析与综合防控技术及实施路径·····	李裕元,李希,孟岑,吴金水(185)
国家尺度种植业面源污染负荷估算方法研究·····	邱捷,余冬立,夏永秋(198)
不同固体碳源释碳特征及其对反硝化脱氮效果研究 ·····	朱辉翔,张树楠,彭英湘,肖金,刘锋,肖润林,戴桂金,朱小娇(206)
猪场废水施用对设施白菜地土壤氮盈余的影响·····	付莉,王贵云,杜连柱,杨柳,张克强,杜会英(215)
季节性干湿气候对茶园坡面土壤硝态氮淋失的影响·····	柳菲,赖晓明,朱青,廖凯华(223)
农村污水处理与环境质量专栏 (栏目主编:刘锋)	
畜禽粪污治理政策演化研究·····	赵玥,李翠霞(232)
农村生活污水分散式处理现状与问题探讨·····	彭彬,胡思源,王铸,徐国良,莫凌梓,李玉坤,利曼琳,李杏子(242)
生猪废水处理和磷回收工艺中抗生素和耐药细菌的削减特征·····	王蕾,黄栩(254)
基于秸秆材料的生物基质系统对养殖废水污染物去除效果研究 ·····	蒋磊,郭宁宁,刘铭羽,彭健,李希,张满意,李裕元,吴金水(263)
典型饮用水水源地周边土壤环境质量及其潜在生态风险评价 ·····	陈向,彭英湘,龙睿,邢宏霖,刘锋,刘新亮,谢华,王毅,郭朝晖(275)
土壤重金属污染及治理专栏 (栏目主编:朱奇宏)	
植物根系限制重(类)金属吸收/转运的因素及其机制·····	刘梓清,杨继刚,吴子涵,李增飞,宋变兰,冯人伟(284)
铁氧化物-硅酸盐复合物的形成、性质及其对砷的固定 ·····	杨忠兰,曾希柏,孙本华,苏世鸣,王亚男,张楠,张洋,吴翠霞(294)
长期施肥对稻田土壤镉锌铜积累及其有效性的影响 ·····	杨敏,何璐璐,饶中秀,黄道友,田应兵,朱捍华,许超,张泉(302)
铁改性木本泥炭对镉砷复合污染稻田的修复效果研究·····	杜衍红,王向琴,刘传平,易从圣,彭笑笑,李芳柏(311)
猪场沼液对不同 pH 土壤中重金属有效性的影响·····	韩金,范弟武,郭伊辉,申建华,韩建刚(321)
铅及铅镉复合暴露对赤子爱胜蚓急性毒性效应及其掘穴行为响应 ·····	刘嫦娥,肖艳兰,谭佳欣,潘瑛,段昌群,孟祥怀,王朋,袁鑫奇(330)
博落回对铅的耐性、富集及生理响应研究·····	蔡斌,陈永华,杜露,何浪君(339)
湿地生态与污染修复 (栏目主编:李峰)	
人工湿地砷污染去除研究进展·····	杨刚,马云龙,白银萍,周磊,刘坤(349)
虾塘养殖对红树林沉积物和间隙水理化性质的影响·····	覃盈盈,罗万次,梁铭忠,魏明月,高长颖,郑海雷(357)
典型湿地植物在盐碱胁迫下的催芽方法研究·····	孙慧,程锐,程宪伟,阎百兴,祝惠(367)

引用格式:

杜衍红, 王向琴, 刘传平, 易从圣, 彭笑笑, 李芳柏. 铁改性木本泥炭对镉砷复合污染稻田的修复效果研究 [J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2): 311-320.

Du Y H, Wang X Q, Liu C P, Yi C S, Peng X X, Li F B. Study on the simultaneous remediation of Cd and As contamination in the paddy soil by applying iron modified woody peat[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(2): 311-320.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2021.0043



铁改性木本泥炭对镉砷复合污染稻田的修复效果研究

杜衍红¹, 王向琴¹, 刘传平^{1*}, 易从圣², 彭笑笑¹, 李芳柏¹

(1. 广东省科学院生态环境与土壤研究所 / 华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心 / 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东 广州 510650; 2. 中科检测技术服务(广州)股份有限公司, 广东 广州 510640)

摘要: 铁改性木本泥炭是一种新型环保有机类土壤调理剂, 在稻田镉砷复合污染治理方面具有很大的应用潜力。为研究铁改性木本泥炭对稻田镉砷同步钝化效果的稳定性, 在珠三角地区开展了三年的田间定位试验。结果表明: 施加铁改性木本泥炭可显著降低稻米镉砷含量, 下降率分别达到了 41.3%~57.6% 和 40.1%~55.8%; 可显著促进水稻增产, 水稻单季撒施 2 250 kg/hm² 铁改性木本泥炭, 水稻增产 810~1 125 kg/hm², 增产率为 14.3%~18.4%; 土壤的有效态镉和有效态砷含量同步降低, 下降率分别为 25.8%~46.4% 和 42.6%~56.1%。而单施木本泥炭仅对稻米镉的吸收积累表现出较好的抑制作用, 单施铁粉仅抑制了稻米砷的积累。此外, 施加铁改性木本泥炭后, 土壤 pH 提高了 0.33~0.44 个单位, 有机质增加了 2.1~3.3 g/kg, 阳离子交换能力(CEC)提高了 1.0~2.6 cmol/kg。这表明铁改性木本泥炭可以有效改善土壤的理化性质。对比 2016—2018 三年(六季)铁改性木本泥炭修复稻田镉砷复合污染效果发现, 3 年间早稻米镉砷含量下降率、产量增幅的年际差异均较小, 晚稻亦然, 表明铁改性木本泥炭可以稳定地抑制稻米镉砷积累、提高稻米产量。

关键词: 铁改性木本泥炭; 稻田; 重金属; 有效态镉砷; 有机质; 阳离子交换量

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275(2021)02-0311-10

Study on the simultaneous remediation of Cd and As contamination in the paddy soil by applying iron modified woody peat

DU Yan-hong¹, WANG Xiang-qin¹, LIU Chuan-ping¹, YI Cong-sheng², PENG Xiao-xiao¹, LI Fang-bai¹

(1. Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences/National local joint Engineering Research Center for soil pollution control and remediation in South China/Guangdong Key Laboratory of Agro-Environment Integrated Control, Guangzhou, Guangdong 510650, China; 2. CAS Testing Technical Services (Guangzhou) Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510650, China)

Abstract: As a new type of environmentally and friendly organic soil conditioner, iron-modified woody peat (IMP) has good application potential in the restoration of cadmium-arsenic compound contaminated farmland. In this study, the efficiency and long-term application stability of IMP were investigated in field trails with early and late season rice in the Pearl River Delta region from 2016 to 2018. The results showed that IMP can make the rice yield increase and the Cd and As concentrations of grain decrease significantly by application 2 250 kg/hm². Compared with the control group, the yield of rice increased by 810~1 125 kg/hm², and the average annual rate of growth arranged from 14.3% to 18.4%. Moreover, after the application of IMP, the contents of Cd and As in grain were significantly reduced by 41.3%~57.6% and 40.1%~55.8% respectively. The analysis of soil available Cd and As contents showed that IMP can simultaneously reduce the content of available Cd and As in the paddy soil by 25.8%~46.4% and 42.6%~56.1%, respectively. Additionally, the soil pH increased by 0.33~0.44, organic matter by 2.1~3.3 g/kg, and the cations exchange capacity (CEC) by 1.0~2.6 cmol/kg, which indicating that iron-modified woody peat can also effectively improve the

基金项目: 国家自然科学基金(41907139); 广东省科技计划项目(2019B110210003); 国家重点研发计划项目(2017YFD0801002); 广东省自然科学基金(2018A030313745)。

作者简介: 杜衍红(1984—), 女, 山东泰安人, 博士, 助理研究员, 主要从事重金属污染农田治理研究, E-mail: yhdu@soil.gd.cn; 通信作者: 刘传平(1977—), 安徽马鞍山人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事土壤污染修复研究, E-mail: cpliu@soil.gd.cn。

收稿日期: 2020-11-12, **接受日期:** 2021-03-22

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41907139); Science and Technology Program of Guangdong Province (2019B110210003); National Key Research and Development Program of China (2017YFD0801002); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2018A030313745).

Corresponding author: LIU Chuan-ping, E-mail: cpliu@soil.gd.cn.

Received 12 November, 2020; **Accepted** 22 March, 2021

physical and chemical properties of the soil. Compared with the control group, the application of iron powder or woody peat separately had limited effect on the immobilization of Cd and As (<for the early and late rice, respectively), while the IMP showed synergetic effect on the immobilization of Cd and As. Besides, there were no significant differences of the rice yields, the Cd and As concentrations within three early season rice, and it was similar to the late rice, which indicated that: IMP had the stable effect on the increasing of the rice yield and controlling the mobility and bio-availability of the Cd and As in the paddy soil.

Key words : Fe-modified woody-peat; paddy soil; heavy metal; available Cd and As; organic matter; CEC

我国稻田面积大, 水稻干湿交替的特殊生长环境, 导致稻田重金属活性较高, 严重增加了水稻的重金属超标风险。近年来, 由于我国工农业的快速发展, 农田重金属污染问题加剧。据 2014 年国家环境保护部与国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国耕地土壤重金属等污染物点位超标率达 19.4%, Cd 污染物点位超标率为 7.0%, As 污染物点位超标率为 2.7%^[1], 镉超标问题不容忽视。稻田重金属污染尤其镉砷复合污染形势严峻, 稻田重金属污染不仅造成水稻生长受阻导致减产, 还可通过土壤-稻米进入食物链, 对人类的生命健康构成直接威胁^[2]。因此, 治理稻田土壤重金属污染, 保障稻米食用安全, 对于我国生态环境安全与食品安全有着不可忽视的作用。

稻田镉、砷从土壤颗粒表面迁移至水稻根表面的过程, 是决定其有效性的关键。而这一过程主要与其形态、价态有关, 一般由土壤的酸碱性质、氧化还原状态决定^[3-4]。研究发现稻田系统镉砷的形态转化受土壤 pH-Eh 影响表现出完全相反的规律^[5]。重金属镉的移动性随着土壤 pH 值的升高逐步降低, 而类金属砷的移动性逐步升高; 随着土壤 Eh 值的升高, 重金属镉的移动性逐步升高, 而类金属砷的移动性逐步降低^[6]。而目前镉污染稻田治理通常采用原位钝化技术^[7-8], 以提高土壤 pH 为切入点, 向污染农田施加无机钝化剂或者有机吸附材料, 通过提高土壤 pH 值或利用钝化材料的吸附固定作用, 与 Cd 产生沉淀、吸附、络合反应而实现 Cd 的钝化, 降低其生物有效性^[9-12], 而这些修复材料很大程度上都会造成砷的活化。

另外有机钝化剂材料比如腐殖质、木本泥炭、生物炭等天然有机质在镉污染稻田修复方面应用较多^[13-14], 研究发现这些有机材料在吸附固定镉的同时, 还可以作为微生物的电子供体促进铁氧化物的还原溶解而释放砷^[15-17]。因此, 研发镉砷同步钝化的材料与技术仍是目前农田重金属污染治理领域的重大需求。

稻田土壤铁循环是连接碳氮养分循环与镉/砷行为的枢纽。利用以铁为中心的循环耦合过程, 可高效定向同步调控镉/砷活性, 抑制稻米镉/砷的

积累^[18-19]。已有研究发现, 镉砷复合污染水稻土中施加硝酸铁和木本泥炭可有效降低孔隙水镉砷的浓度以及土壤镉砷的移动性^[20]; 在利用生物炭作为有机钝化材料修复镉砷复合污染稻田时, 配合添加一定量的纳米零价铁可抑制稻米砷的积累^[21]。因此, 将零价铁负载到木本泥炭材料中获得铁改性木本泥炭用于稻田重金属污染修复, 将是镉、砷复合污染稻田修复的重要突破口。

目前, 有关稻田镉砷同步钝化的相关研究大部分都是短期试验, 缺乏钝化效果稳定性机制研究。因此, 本文采用铁改性木本泥炭开展镉砷复合污染稻田的长期修复试验, 研究铁改性木本泥炭对土壤镉砷同步钝化效果及其稳定性, 探究其对水稻镉砷积累的影响机制, 为稻田镉砷原位钝化修复提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试铁改性木本泥炭土壤调理剂由中向旭曜科技有限公司提供, 其有机物总量 $\geq 35\%$, 铁含量为 2.0%, pH 6.0~8.0。木本泥炭原料, 原产地为印度尼西亚, 含胡敏酸 105.9 mg/kg, 胡敏素 69.5 mg/kg 和富里酸 12.4 mg/kg。纳米零价铁粉购买自日本同和控股(集团)有限公司, 型号 E-200, 总铁含量为 93.04%, 硫为 0.01%, 碳为 2.43%, 不溶成分为 2.15%。

铁改性木本泥炭复合材料制备以木本泥炭中的腐殖质为材料基质, 将零价铁负载于腐殖质结构中, 铁通过 Fe-O 和 Fe-O-C 等化学键与腐殖质中的羧基、醇羟基和酚羟基等功能基团连接, 形成稳定的铁基负载腐殖质材料。

1.2 供试土壤和水稻

田间试验点位于广东省惠州市博罗县公庄镇大沥村水稻主产区轻度 Cd 和 As 复合污染稻田。土壤的基本理化性质见表 1。早稻和晚稻水稻品种分别为天优 998、天优 652 和黄华占。该试验点属于轻度 Cd 和 As 复合污染稻田土壤, 土壤母质为花岗岩, 土层深厚, 质地较粘重, 属于华南区典型红壤。采集 0~20 cm 耕作层土样, 土壤理化特性分析结果见表 1。土壤粘粒含量 367.1 g/kg, 沙粒含量 102.7 g/kg,

表1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Physico-chemical properties of the tested soil

pH	有机质 (g/kg)	总氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	有效钾 (mg/kg)	CEC (cmol/kg)	总 Cd (mg/kg)	总 As (mg/kg)	有效态 Cd (mg/kg)	有效态 As (mg/kg)
5.2	20.2	1.33	77.4	59.8	9.89	0.35	49.3	0.15	8.05

有机质 (OM) 20.2 g/kg, 总氮 1.33 g/kg, 有效磷 77.4 mg/kg, 有效钾 59.8 mg/kg, 土壤阳离子交换量为 9.89 cmol/kg, 土壤 pH 为 5.2, 呈酸性。Cd、As 平均含量分别为 0.35 mg/kg 和 49.3 mg/kg, 相应的有效态 Cd、As 含量分别为 0.15 mg/kg 和 8.05 mg/kg。根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》GB15618-2018 和《全国土壤污染状况评价技术规定》, 该地块 Cd、As 含量分别是土壤污染风险筛选值 (Cd 0.3 mg/kg、As 30 mg/kg、pH ≤ 5.5) 的 1.16 倍和 1.64 倍, 属于轻度 (1~2 倍之间) Cd 和 As 复合污染土壤, 对作物生长具有一定危害。

1.3 试验设计

试验周期为 3 a, 自 2016 年 4 月开始至 2018 年 11 月结束, 一年种两季水稻, 共计 6 季。每年早晚稻基本种植情况见表 2。2016—2018 年供试水

稻品种分别为天优 998、天优 652 和黄华占。

每季水稻均设置 4 个试验处理, 3 次重复, 各小区随机排列, 每个小区面积为 30 m²。

处理 1: 常规施肥 (对照组);

处理 2: 常规施肥 + 供试木本泥炭 (无铁);

处理 3: 常规施肥 + 还原铁粉;

处理 4: 常规施肥 + 供试铁改性木本泥炭。

各处理均进行常规施肥, 氮、磷和钾的施肥配方为 N 240 kg/hm², P₂O₅ 42 kg/hm² 和 K₂O 90 kg/hm²。在常规施肥的基础上, 插秧前一次性施用木本泥炭、还原铁粉 (纳米零价铁) 和铁改性木本泥炭。早稻、晚稻还原铁粉施加量均为 45.0 kg/hm², 木本泥炭、铁改性木本泥炭施加量均为 2 250 kg/hm²。各材料施用前稻田要犁耙均匀, 且淹水 3~5 cm; 施用 7 d 后插秧。除草和灌溉等田间管理与农民日常管理一致。

表2 供试作物基本情况
Table 2 The seasonal rice plant information

种植	品种	密度 (万苗/hm ²)	播种期	收获期
2016- 早稻	天优 998	68.7	2016 年 4 月 25 日	2016 年 7 月 30 日
2016- 晚稻	天优 998	69.3	2016 年 8 月 10 日	2016 年 11 月 4 日
2017- 早稻	天优 652	77.0	2017 年 3 月 25 日	2017 年 7 月 15 日
2017- 晚稻	天优 652	77.4	2017 年 7 月 24 日	2017 年 10 月 29 日
2018- 早稻	黄华占	71.6	2018 年 3 月 23 日	2018 年 7 月 16 日
2018- 晚稻	黄华占	70.2	2018 年 7 月 29 日	2018 年 11 月 11 日

1.4 样品采集与分析

测产: 水稻成熟期各小区单打单收, 进行实际产量的测定, 最后换算成每公顷的产量。

样品采集与分析: 采用“S”形取样法采集试验区内水稻植株样品及根际土样品。稻米晒干后脱壳, 粉碎后保存备用。

收获时采集水稻根际土壤, 土壤样品在室温下自然风干, 剔除杂物后碾碎混匀, 过 100 目筛后保存至封口塑料袋中备用。

土壤 pH 值参考农业标准 (NY/T 1377-2007), 采用 1:2.5 土水比进行浸提, 然后采用 pH 计 (HACH, pHCI01) 测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法 - 外加热法测定^[22]; CEC 采用乙酸钠 - 火焰光度法进行测定。

土壤有效态镉采用二乙三胺五乙酸 (DTPA) 进行提取, 主要参考 (GB/T 23739-2009) 进行测定; 有效态砷采用磷酸盐溶液提取^[23]; 土壤样品用 HF-

HNO₃-HClO₄ 进行消解, 稻米样品采用 HNO₃-HClO₄ 法消解以测定镉 / 砷总量。提取液和消解液中的 Cd 采用石墨炉 - 原子吸收分光光度计 (PinAAcle900Z, USA) 进行测定、As 采用原子荧光光度计 (AFS-933, 北京吉天) 进行测定。

1.5 数据处理与分析

所有试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行分析处理; 采用 SPSS19.0 统计软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 比较各个处理间的差异性, 显著性水平为 $P < 0.05$, 极显著水平为 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 铁改性木本泥炭对水稻产量的影响

2016 年至 2018 年连续 3 a 施加铁改性木本泥炭后早晚稻的产量如图 1 所示。结果表明: 与对照相比, 施加铁改性木本泥炭处理 2016—2018 年水稻产量分别为 810~945 kg/hm²、885~1 005 kg/hm² 和 960~

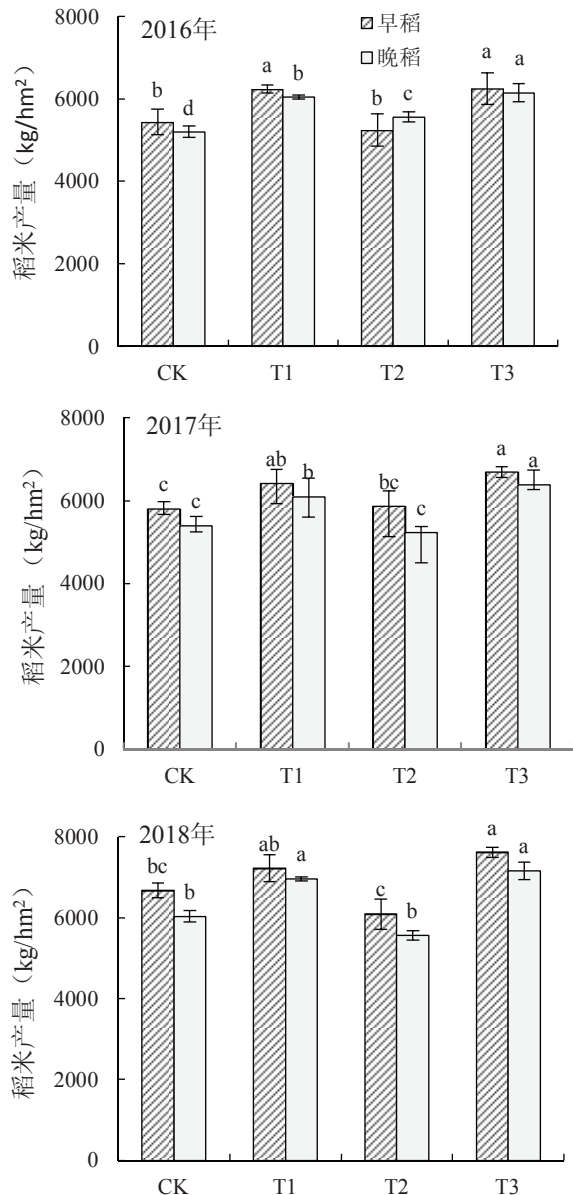


图 1 2016—2018 年早、晚稻稻米产量

Fig. 1 The yields of early and late rice amended with different soil amendments (2016—2018)

1 125 kg/hm², 增产率为 14.7%~18.1%、15.3%~17.8% 和 14.3~18.4%。表明施加铁改性木本泥炭调理剂可以逐年稳定提高水稻产量。此外, 单独施加木本泥炭也可显著增加稻米产量, 但是增产程度低于铁改性木本泥炭。而施加还原铁粉对稻米产量没有显著提高 ($P > 0.05$)。

由表 3 可知, 施加铁改性木本泥炭后年内早稻和晚稻产量增幅差异较大, 2016、2017 和 2018 年晚稻产量增幅均高于早稻, 且差异均达到极显著性水平 ($P < 0.01$), 这可能是由光照、气候或水稻品种特性等原因造成的。另外, 施加木本泥炭后稻米产量年际差异较小, 连续三季早晚稻产量增幅稳定, 说明铁改性木本泥炭可促进水稻稳定增产。

表 3 稻米产量增幅的年内和年际差异

项目	处理	产量增幅 (%)	LSD _{0.05}	LSD _{0.01}	
年内差异	2016 年	早稻	14.7±1.54	b	B
		晚稻	18.1±0.94	a	A
	2017 年	早稻	15.3±1.29	b	B
		晚稻	18.4±0.60	a	A
	2018 年	早稻	14.3±1.64	b	B
		晚稻	18.3±1.71	a	A
年际差异	早稻	2016 年	14.7±1.54	a	A
		2017 年	15.3±1.29	a	A
		2018 年	14.3±1.64	a	A
	晚稻	2016 年	18.1±0.94	a	A
		2017 年	18.4±0.60	a	A
		2018 年	18.3±1.71	a	A

注: 小写字母 a 和 b 表明在 LSD_{0.05} 水平上具有显著差异, 大写字母 A 和 B 表明在 LSD_{0.01} 水平上具有极显著差异, 下同。

2.2 铁改性木本泥炭对稻米 Cd 和 As 积累的影响

2.2.1 早晚稻稻米 Cd 和 As 含量

不同处理稻米 Cd、As 含量如图 2 所示。与对照相比, 施用铁改性木本泥炭处理后稻米 Cd 含量连续三年下降。2016 年早晚稻稻米 Cd 含量分别为 0.198±0.021 mg/kg 和 0.265±0.043 mg/kg, 下降率达到了 54.1% 和 42.0%; 2017 年早晚稻稻米 Cd 含量分别为 0.216±0.023 mg/kg 和 0.291±0.013 mg/kg, 下降率分别达到了 53.1% 和 42.0%; 2018 年早晚稻稻米 Cd 含量分别为 0.183±0.012 mg/kg 和 0.283±0.023 mg/kg, 下降率分别达到了 57.6% 和 41.3%。3 年 6 季早稻稻米 Cd 含量基本达到 GB 2762-2012 食品安全国家标准 (0.20 mg/kg)。此外, 单独施加木本泥炭或还原铁粉也可降低稻米对 Cd 的吸收, 这是因为木本泥炭可络合土壤有效态 Cd, 而还原铁粉可与土壤中 H⁺ 结合, 提高土壤的 pH, 形成的 Fe²⁺ 再次氧化从而固定 Cd。

与对照相比, 施用铁改性木本泥炭后, 每年每季稻米 As 含量显著下降。2016 年早稻稻米 As 含量由 0.327±0.024 mg/kg 降至 0.186±0.019 mg/kg, 晚稻稻米 As 含量由 0.301±0.018 mg/kg 下降至 0.146±0.014 mg/kg, 下降幅度分别达 43.1% 和 51.5%; 2017 年早稻 As 含量由 0.372±0.023 mg/kg 降至 0.223±0.013 mg/kg, 晚稻稻米 As 含量由 0.332±0.013 mg/kg 下降至 0.149±0.011 mg/kg, 下降幅度分别达 40.1% 和 55.1%; 2018 年早稻稻米 As 含量由 0.418±0.013 mg/kg 降至 0.236±0.016 mg/kg, 晚稻稻米 As 含量由 0.391±0.016 mg/kg 下降至 0.173±0.018 mg/kg, 下降幅度分别达 43.5% 和 55.8%。此外, 施加还原铁粉也有效降低了稻米 As 含量; 而施加木本泥炭稻米 As 含量增加, 这与木本泥炭主要成分—腐殖质增强

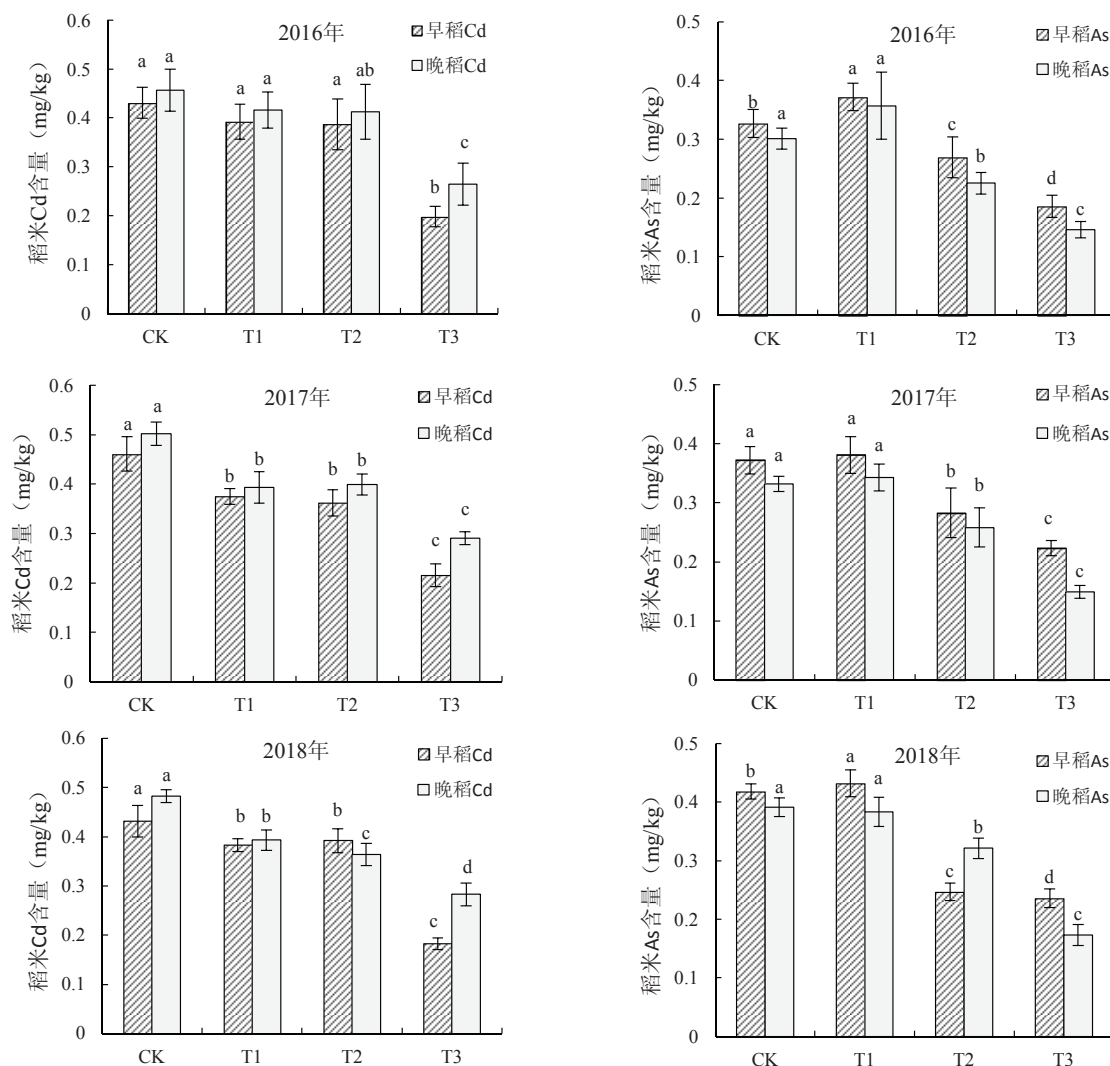


图2 早晚稻糙米 Cd 和 As 含量
Fig. 2 Cd and As concentrations of early and later rice

土壤 As 活性有关。施加铁改性木本泥炭对稻米 As 的降低率远高于单独施加还原铁粉和木本泥炭的降低率的总和 (图 2), 因此, 铁改性木本泥炭调理剂具有还原铁粉和木本泥炭二者的协同作用。

2.2.2 稻米镉砷年内和年际差异分析 由表 4 可知, 每季水稻施加铁改性木本泥炭后, 稻米 Cd 含量降幅年内差异较大, 2016、2017 和 2018 年早稻和晚稻差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 铁改性木本泥炭的施加有利于降低早稻稻米中的 Cd。稻米 Cd 含量降幅年际差异小, 三季早稻 Cd 降幅、晚稻 Cd 降幅差异均较小, 连续三季早晚稻稻米 Cd 含量降幅稳定, 表明铁改性木本泥炭钝化 Cd 的效果较为稳定。

另外, 施加铁改性木本泥炭后, 稻米 As 浓度降幅年内差异大, 2016、2017 和 2018 年早稻和晚稻差异均达极显著水平 ($P < 0.01$), 铁改性木本泥炭的施加更有利于降低晚稻稻米 As 含量。稻米 As 浓

度降幅年际差异小, 三季早稻、晚稻稻米 As 降幅稳定, 表明铁改性木本泥炭是一种稳定的降低稻米 As 积累的调理剂。

2.3 铁改性木本泥炭对土壤有效态 Cd 和 As 含量影响

三年间各处理土壤有效态 Cd 含量如图 3 所示。与对照相比, 施用铁改性木本泥炭后, 每年每季土壤有效态 Cd 均显著降低。2016 年早稻土壤有效态 Cd 由 0.153 ± 0.011 mg/kg 降至 0.080 ± 0.019 mg/kg、晚稻土壤有效态 Cd 由 0.165 ± 0.013 mg/kg 降至 0.112 ± 0.007 mg/kg, 下降幅度分别达 46.4% 和 32.1%; 2017 年早稻土壤有效态 Cd 由 0.163 ± 0.013 mg/kg 降至 0.092 ± 0.012 mg/kg, 晚稻土壤有效态 Cd 由 0.170 ± 0.015 mg/kg 降至 0.126 ± 0.008 mg/kg, 下降幅度分别达 43.6% 和 25.9%; 2018 年早稻土壤有效态 Cd 由 0.173 ± 0.012 mg/kg 降至 0.103 ± 0.010 mg/kg, 晚稻土壤有效态 Cd 由 0.182 ± 0.012 mg/kg 降至 0.135 ± 0.008 mg/kg, 下降幅度分别达 40.5% 和 25.8%。以上结

表 4 稻米 Cd、As 含量的年内和年际差异

Table 4 The annual and interannual differences of Cd and As concentrations in brown rice

项目	处理	Cd 降幅 (%)	As 降幅 (%)
年内差异	2016 早稻	54.1b±4.10	43.1b±1.72
	2016 晚稻	42.0a±4.36	51.5a±1.31
	2017 早稻	53.1b±3.29	40.1±0.99
	2017 晚稻	42.0a±1.46	55.1a±1.63
	2018 早稻	57.6b±1.02	43.5b±1.16
	2018 晚稻	41.3a±0.68	55.8a±2.56
年际差异	2016 早稻	54.1a±4.10	43.1a±1.72
	2017 早稻	53.1a±3.29	40.1a±0.99
	2018 早稻	57.6a±1.02	43.5a±1.16
	2016 晚稻	42.0a±4.36	51.5a±1.31
	2017 晚稻	40.0a±1.46	55.1a±1.63
	2018 晚稻	41.3a±0.68	55.8a±2.56

果表明, 铁改性木本泥炭显著降低了稻田土壤中有有效态 Cd 的含量。此外, 与对照相比, 单独施加还原铁粉和木本泥炭也可有效降低有效态 Cd 含量, 但效果均无铁改性木本泥炭显著。

与对照相比, 施加铁改性木本泥炭后稻田土壤有效态 As 的含量显著降低。2016 年早稻土壤有效态 As 由 8.33 ± 0.62 mg/kg 降至 4.78 ± 0.29 mg/kg, 晚稻土壤有效态 As 由 7.58 ± 0.41 mg/kg 降至 3.32 ± 0.32 mg/kg, 下降幅度分别为 42.6% 和 56.1%; 2017 年早稻土壤有效态 As 由 7.31 ± 0.36 mg/kg 降至 4.02 ± 0.12 mg/kg, 晚稻土壤有效态 As 由 6.39 ± 0.15 mg/kg 降至 2.87 ± 0.12 mg/kg, 下降幅度分别为 45.0% 和 55.1%; 2018 年早稻土壤有效态 As 由 8.76 ± 0.62 mg/kg 降至 4.87 ± 0.32 mg/kg, 晚稻土壤有效态 As 由 8.12 ± 0.27

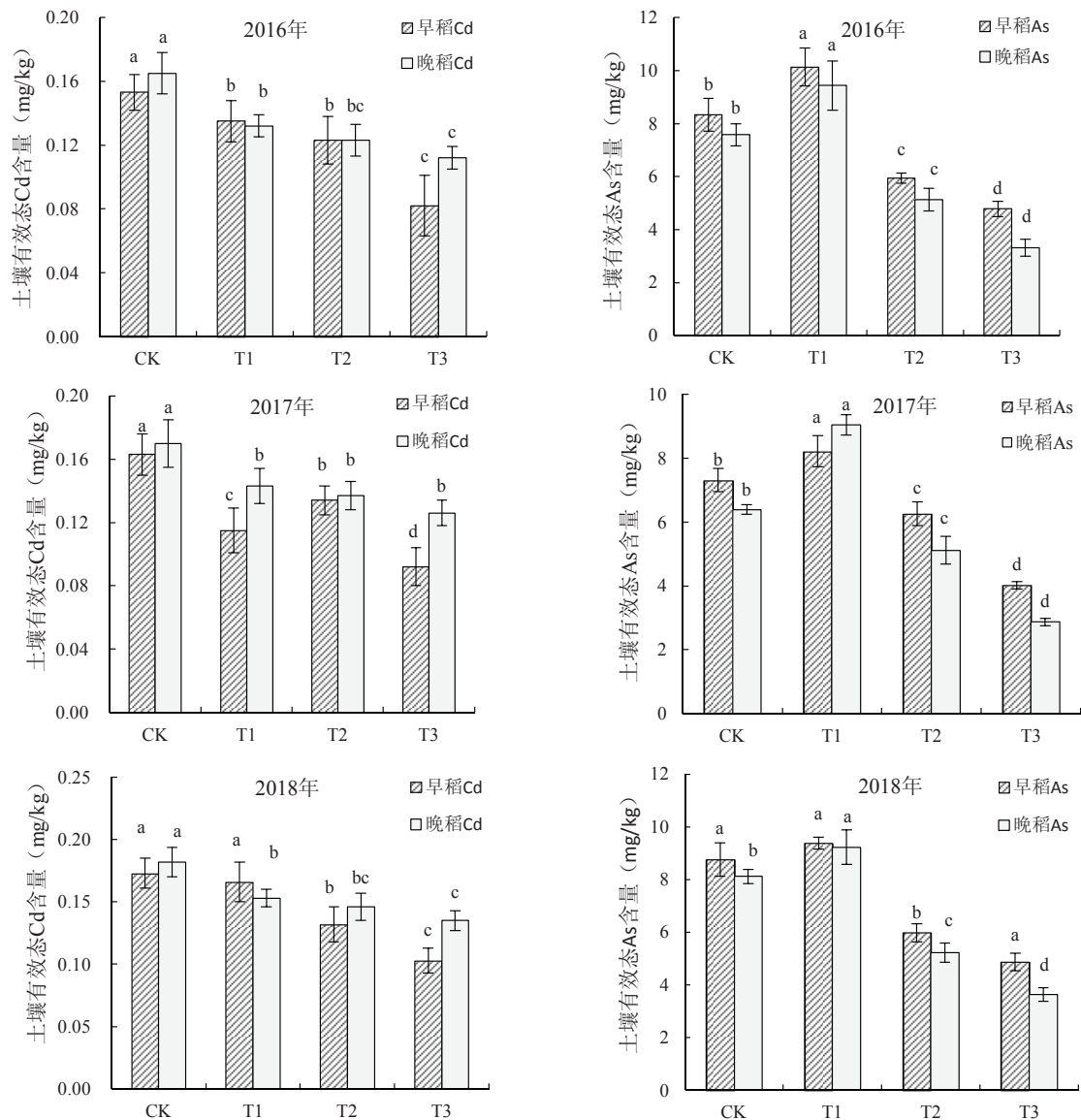


图 3 早晚稻土壤有效态 Cd 和 As 含量

Fig. 3 The available Cd and As concentrations of early and later rice

mg/kg 降至 3.64 ± 0.26 mg/kg, 下降幅度分别为 44.4% 和 55.1%。此外, 单独施加还原铁粉也显著地降低了有效态 As 的含量。相反地, 单独施加木本泥炭则增加了土壤有效态 As 的含量。这是因为砷在稻田土壤中主要以阴离子形式存在, 木本泥炭中主要成分腐殖质可以作为电子穿梭体促进含砷铁矿物的还原溶解^[24], 也可以还原五价砷为三价砷, 从而提高其移动性^[25]。

由表 5 可知, 每年每季施加铁改性木本泥炭后, 土壤有效态 Cd 含量降幅年内差异大, 2016、2017 和 2018 年早稻和晚稻差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 有效态 Cd 含量降幅年际差异小, 三年早稻、晚稻有效态 Cd 降幅保持稳定; 另外, 连续 6 季施加铁改性木本泥炭后, 土壤有效态 As 含量降幅年内差异大, 2016、2017 和 2018 年早稻和晚稻差异均达到了极显著水平 ($P < 0.01$), 而有效态 As 含量降幅年际差异小, 表明铁改性木本泥炭对土壤 Cd、As 具有非常稳定的钝化效果。

表 5 土壤有效态 Cd、As 降幅的年内和年际差异
Table 5 The annual and interannual differences of available Cd and As concentrations reduction of soil

项目	处理	有效态 Cd 降幅 (%)	有效态 As 降幅 (%)
年内差异	2016	早稻 $46.4A \pm 2.67$	早稻 $42.6B \pm 3.11$
		晚稻 $32.1B \pm 1.99$	晚稻 $56.1A \pm 2.91$
	2017	早稻 $43.6A \pm 1.72$	早稻 $45.0B \pm 0.93$
		晚稻 $25.9B \pm 0.65$	晚稻 $55.1A \pm 0.39$
	2018	早稻 $40.5A \pm 1.34$	早稻 $44.4B \pm 5.34$
		晚稻 $25.8B \pm 1.21$	晚稻 $55.1A \pm 2.23$
年际差异	早稻	2016 $46.4a \pm 2.67$	2016 $42.6a \pm 3.11$
		2017 $43.6a \pm 1.72$	2017 $45.0a \pm 0.93$
		2018 $40.5a \pm 1.34$	2018 $44.4a \pm 5.34$
	晚稻	2016 $32.1a \pm 1.99$	2016 $56.1a \pm 2.91$
		2017 $25.9a \pm 0.65$	2017 $55.1a \pm 0.39$
		2018 $25.8a \pm 1.21$	2018 $55.1a \pm 2.23$

2.4 铁改性木本泥炭对土壤理化性质的影响

与对照相比, 施用铁改性木本泥炭后, 各年各季根际土壤 pH 增加极显著 ($P < 0.01$)。2016 年早稻、晚稻土壤 pH 分别由 5.28 ± 0.05 升至 5.72 ± 0.05 、由 5.26 ± 0.03 升至 5.61 ± 0.07 , 分别上升 0.44 和 0.35 个单位; 2017 年早稻、晚稻土壤 pH 分别由 5.27 ± 0.05 升至 5.60 ± 0.06 、由 5.29 ± 0.03 升至 5.65 ± 0.02 , 分别上升 0.33 和 0.36 个单位; 2018 年早稻、晚稻土壤 pH 分别由 5.32 ± 0.04 升至 5.66 ± 0.06 、由 5.29 ± 0.05 升至 5.73 ± 0.05 , 分别上升 0.34 和 0.44 个单位; 此外, 与对照相比, 施加还原铁粉也极显著地提升了土壤 pH 值, 而单独施加木本泥炭对 pH 提升具有负面效应。本试验施加还原铁粉和铁改性木本泥炭均显著

地提升了土壤 pH, 有利于 Cd 的固定, 可能是还原铁粉在铁氧化过程中消耗土壤中的 H^+ 所致, 这将导致土壤矿物表面所带负电荷增加, 利于吸附固定以阳离子形式存在的 Cd。

供试铁改性木本泥炭可提升稻田土壤有机质含量 (表 6)。与对照相比, 2016、2017 和 2018 年早稻和晚稻土壤有机质显著增多 ($P < 0.05$)。施用铁改性木本泥炭后, 2016 年早稻、晚稻土壤有机质分别由 19.6 ± 0.67 g/kg 升至 21.9 ± 0.50 g/kg、由 20.3 ± 0.92 g/kg 升至 22.4 ± 1.15 g/kg, 有机质分别增加了 2.3 和 2.1 g/kg; 2017 年早稻、晚稻土壤有机质分别由 20.3 ± 2.50 g/kg 升至 22.9 ± 1.04 g/kg、由 21.2 ± 1.17 g/kg 升至 23.7 ± 3.08 g/kg, 有机质分别增加了 2.6 和 2.5 g/kg; 2018 年早稻、晚稻土壤有机质分别由 19.9 ± 1.36 g/kg 升至 22.5 ± 1.15 g/kg、由 19.5 ± 0.72 g/kg 升至 22.8 ± 1.75 g/kg, 有机质分别增加了 2.6 和 3.3 g/kg。此外, 与对照相比, 单独施加木本泥炭也有利于土壤有机质的提升, 这有利于促进水稻的生长, 是水稻增产的主要原因。

供试铁改性木本泥炭可提升稻田土壤 CEC 值 (表 6)。随着改良年限延长, CEC 增加显著。与对照相比, 施用铁改性木本泥炭后, 2016 年早稻、晚稻土壤 CEC 分别由 9.97 ± 0.69 cmol/kg 升至 11.8 ± 0.81 cmol/kg、由 10.6 ± 1.00 cmol/kg 升至 11.7 ± 0.85 cmol/kg, 土壤 CEC 分别提高 1.83 cmol/kg 和 1.1 cmol/kg; 2017 年早稻、晚稻土壤 CEC 分别由 10.3 ± 1.36 cmol/kg 升至 12.2 ± 1.34 cmol/kg、由 10.6 ± 0.68 cmol/kg 升至 11.6 ± 1.13 cmol/kg, 土壤 CEC 分别提高 1.9 cmol/kg 和 1.0 cmol/kg; 2018 年早稻、晚稻土壤 CEC 分别由 9.83 ± 0.67 cmol/kg 升至 12.4 ± 3.01 cmol/kg、由 9.81 ± 0.53 cmol/kg 升至 12.3 ± 1.74 cmol/kg, 土壤 CEC 分别提高 2.57 cmol/kg 和 2.49 cmol/kg。此外, 与对照相比, 单独施加木本泥炭也促进了土壤 CEC 的显著增加。当土壤的 CEC 升高, 阳离子交换能力提高, 可吸附更多的重金属离子从而促进土壤 Cd 的固定^[26]。

3 讨论

通过三年的大田试验, 验证了铁改性木本泥炭对镉砷复合污染稻田修复效果, 铁改性木本泥炭可有效钝化稻田 Cd、As, 降低稻米 Cd、As 含量, 并且镉砷钝化效果稳定; 另外, 铁改性木本泥炭可显著改善土壤肥力, 提高土壤有机质含量和阳离子交换量 (CEC), 进而促进了水稻产量的增加。

3.1 铁改性木本泥炭镉砷同步钝化的稳定性机制分析

稻田铁循环是连接碳氮养分循环与 Cd、As 行

表 6 不同处理土壤 pH、OM 和 CEC 分析
Table 6 The analysis about pH, OM and CEC of different soils

处理	早稻			晚稻		
	pH	OM(g/kg)	CEC(cmol/kg)	pH	OM(g/kg)	CEC(cmol/kg)
2016 年	对照	5.28±0.05c	19.6±0.67b	9.97±0.69b	5.26±0.03c	20.3±0.92b
	泥炭	4.95±0.01d	21.3±0.97a	11.4±1.09a	4.94±0.02d	22.2±0.64a
	还原铁粉	5.51±0.07b	19.7±1.28b	9.78±0.90b	5.48±0.02b	20.6±2.42b
	铁改性木本泥炭	5.72±0.05a	21.9±0.50a	11.8±0.81a	5.61±0.07a	22.4±1.15a
2017 年	对照	5.27±0.05c	20.3±2.50b	10.3±1.36b	5.29±0.03a	21.2±1.17b
	泥炭	4.93±0.04d	21.2±1.30a	11.1±1.36ab	4.82±0.06d	22.7±1.09a
	还原铁粉	5.44±0.06b	20.3±1.10b	10.4±0.56b	5.55±0.04b	20.7±0.87b
	铁改性木本泥炭	5.60±0.06a	22.9±1.04a	12.2±1.34a	5.65±0.02a	23.7±3.08a
2018 年	对照	5.32±0.04c	19.9±1.36b	9.83±0.67b	5.29±0.05c	19.5±0.72b
	泥炭	4.76±0.10d	22.4±1.58ab	11.7±1.51a	4.58±0.08d	22.9±2.68ab
	还原铁粉	5.49±0.08b	20.5±1.84ab	9.98±0.65b	5.60±0.07b	19.7±0.37b
	铁改性木本泥炭	5.66±0.06a	22.5±1.15a	12.4±3.01a	5.73±0.05a	22.8±1.75a

为的枢纽,可高效定向调控 Cd、As 活性,抑制稻米 Cd、As 积累^[27]。有机质是微生物与铁矿物相互作用过程的重要参与者,在浸水稻田土壤等厌氧环境中,通过相互电子传递不仅促进了体系铁循环过程,而且显著影响 Cd、As 的迁移转化过程^[28]。铁改性木本泥炭钝化材料具有更丰富的官能团和更强的表面活性,实现镉钝化的同时,能提高砷氧化基因的表达,促进砷的氧化固定,从而实现镉砷的同步调控。铁改性木本泥炭施入稻田后,负载的零价铁成为稻田最活跃的氧化还原活性元素,在稻田生境中迅速氧化并消耗 H⁺,提高土壤 pH,从而实现镉的钝化,自身形成铁氧化物,生成的铁氧化物将砷固定在晶格内,从而降低砷的移动性^[29]。另外,水稻根际径向分泌的氧气可与 Fe(II) 发生类 Fenton 反应,促进根表铁膜的形成,铁膜对 Cd 和 As 具有强烈的固定能力,从而抑制水稻根部对镉砷的吸收^[30]。

铁改性木本泥炭的主要成分为腐殖质和零价铁,其中腐殖质具有大量的活性官能团,如羧基、醇羟基和酚羟基等,因而具有很高的反应活性进而影响污染物的迁移转化过程。本试验中单施木本泥炭后土壤砷的活性增加,这是因为木本泥炭中的腐殖质成分可以作为电子穿梭体促进铁氧化物结合态砷的还原溶解,从而控制微生物介导的 As、Cd 的释放^[31],提高砷的移动性;单施零价铁处理稻米 Cd 含量有一定程度的降低,但效果远低于铁改性木本泥炭,这可能是由零价铁侵蚀过程易于在其表面形成铁氧化物将其进行包裹,反应活性相应降低所致。

基于以上原理,采用多层复合的方法将包裹着

氢离子消耗剂的木本泥炭与零价铁复合,形成一种具有特殊结构和功能的铁改性木本泥炭复合材料,用于同步钝化稻田镉砷。经过三年的修复试验,6 季水稻糙米 Cd、As 均显著下降,土壤有效态 Cd、有效态 As 含量均显著下降。试验表明,铁改性木本泥炭具有零价铁和木本泥炭二者的协同作用效果,因此可稳定高效地实现稻田镉砷同步钝化。

3.2 铁改性木本泥炭对土壤理化性质的影响

铁改性木本泥炭属于有机质类复合土壤调理剂,其中腐殖质的含量和赋存形态对土壤结构的形成和稳定性有重要影响,腐殖质在土壤中可呈游离的酸和盐类状态存在,但大部分呈凝胶状与土壤矿质粘粒紧密结合,形成土壤微团聚体^[32],因此可增加土壤团粒持水性。土壤有机质含量是土壤的肥力指标,腐殖质可通过增加植物根部细胞膜的渗透性、激活土壤呼吸以及促进植物光合作用促进作物的生长。另外,木本泥炭作为一种重要的腐殖酸资源,施入土壤后可快速构建土壤的养分层,提高土壤 DOC 和 EOC 含量,并能有效刺激微生物生长,提高了土壤微生物多样性,进而可促进作物生长所需的养分循环转化,促进作物的生长^[33-34]。本试验中,三年施用铁改性木本泥炭及木本泥炭处理每季稻米产量均显著高于对照处理,6 季水稻均有明显地增产趋势,土壤的阳离子交换量、有机质含量均稳定地增加,土壤质量得到持续性改善。因此,铁改性木本泥炭在土壤改良方面也具有较好的应用前景。

4 结论

三年的田间定位试验验证了铁改性木本泥炭在镉砷复合污染稻田上的修复效果及其稳定性。通过

连续监测每年每季水稻产量、稻米中镉砷含量、土壤有效态镉砷含量以及土壤理化性质的变化,发现施用铁改性木本泥炭对轻度镉砷复合污染稻田修复效果显著。具体结论如下:

1) 铁改性木本泥炭可显著促进水稻增产,并可显著降低稻米 Cd 和 As 含量。连续施用 3 a 的铁改性木本泥炭,水稻增产达到了 810~1 125 kg/hm²,而稻米镉、砷含量分别降低了 41.3%~57.6% 和 40.1%~55.8%。

2) 铁改性木本泥炭可有效降低土壤有效态镉砷含量。土壤有效态 Cd 含量降幅分别在 25.8%~46.4% 之间;土壤有效态 As 含量降幅在 42.6%~56.1% 之间,土壤 Cd、As 得到有效的固定。

3) 铁改性木本泥炭可有效改善土壤理化性能。2016—2018 年三年内每季水稻施加 2 250 kg/hm² 的铁改性木本泥炭后,土壤 pH 值提升 0.33~0.44 个单位,土壤 OM 值提升 2.1~3.3 g/kg,土壤 CEC 值增加了 1.0~2.6 cmol/kg,土壤理化性能得到有效改善。

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).
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National Soil Pollution Investigation Bulletin[EB/OL]. (2014-04-17).
- [2] 张良运. 稻田土壤重金属污染和稻米 Cd 安全分析及控制技术探讨 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
Zhang L Y. Analysis of heavy metal pollution in paddy soils, cadmium health risk of rice and experiment of alleviation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [3] Kumarathilaka P, Seneweera S, Meharg A, et al. Arsenic speciation dynamics in paddy rice soil-water environment: Sources, physico-chemical, and biological factors - A review[J]. Water Research, 2018, 140: 403-414.
- [4] Li H, Luo N, Li Y W, et al. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. Environmental Pollution, 2017, 224: 622-630.
- [5] 王向琴, 刘传平, 杜衍红, 等. 零价铁与腐殖质复合调理剂对稻田镉砷污染钝化的效果研究 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2329-2336.
Wang X Q, Liu C P, Du Y H, et al. Effects of stabilizing remediation of Cd and As in paddy rice by applying combined zero-valent iron and humus[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(12): 2329-2336.
- [6] 于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 等. 稻田镉砷污染阻控原理与技术应用 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1418-1426.
Yu H Y, Cui J H, Qiao J T, et al. Principle and technique of arsenic and cadmium pollution control in paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(7): 1418-1426.
- [7] 胡鹏杰, 李柱, 吴龙华. 我国农田土壤重金属污染修复技术、问题及对策议 [J]. 农业现代化研究, 2018, 39(4): 535-542.
- [8] Hu P J, Li Z, Wu L H. Current remediation technologies of heavy metal polluted farmland soil in China: Progress, challenge and countermeasure[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(4): 535-542.
- [9] 黄道友, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望 [J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1030-1043.
Huang D Y, Zhu Q H, Zhu H H, et al. Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(6): 1030-1043.
- [10] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(1): 84-91.
- [11] 刘小诗. 砷超标农田钝化剂的筛选及调控效应研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
Liu X S. Research on selection of amendments and the immobilization effects of arsenic and cadmium contaminated farmlands[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [12] 丁琼. 土壤性质及钝化剂对镉在土壤—植物系统转移的影响 [D]. 北京: 首都师范大学, 2012.
Ding Q. The effects of soil properties and soil amendments on the transfer of cadmium in soil-plant system[D]. Beijing: Capital Normal University, 2012.
- [13] 辜娇峰. 组配改良剂对稻田镉砷复合污染的调控效果及机制研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
Gu J F. Mechanisms and effects of combined amendment regulating paddy soil complexly contaminated with cadmium and arsenic[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017.
- [14] 李鸿博, 钟怡, 张昊楠, 等. 生物炭修复重金属污染农田土壤的机制及应用研究进展 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 173-185.
Li H B, Zhong Y, Zhang H N, et al. Mechanism for the application of biochar in remediation of heavy metal contaminated farmland and its research advances[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(13): 173-185.
- [15] Yuan C L, Qiao J T, Li F B, et al. Community dynamics of As(V)-reducing and As(III)-oxidizing genes during a wet-dry cycle in paddy soil amended with organic matter, gypsum, or iron oxide[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 393: 122485.
- [16] Wang N, Xue X M, Juhasz A L, et al. Biochar increases arsenic release from an anaerobic paddy soil due to enhanced microbial reduction of iron and arsenic[J]. Environmental Pollution, 2017, 220: 514-522.
- [17] Li G, Khan S, Ibrahim M, et al. Biochars induced modification of dissolved organic matter (DOM) in soil and its impact on mobility and bioaccumulation of arsenic and cadmium[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 348: 100-108.
- [18] Qiao J T, Li X M, Li F B, et al. Humic substances facilitate arsenic reduction and release in flooded paddy soil[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(9): 5034-5042.
- [19] Yu H Y, Wang X Q, Li F B, et al. Arsenic mobility and bioavailability in paddy soil under iron compound amendments at

- different growth stages of rice[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 136-147.
- [19] Yamaguchi N, Nakamura T, Dong D, et al. Arsenic release from flooded paddy soils is influenced by speciation, Eh, pH, and iron dissolution[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(7): 925-932
- [20] Wang X Q, Yu H Y, Li F B, et al. Enhanced immobilization of arsenic and cadmium in a paddy soil by combined applications of woody peat and $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$: Possible mechanisms and environmental implications[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 535-543.
- [21] Qiao J T, Liu T X, Wang X Q, et al. Simultaneous alleviation of cadmium and arsenic accumulation in rice by applying zero-valent iron and biochar to contaminated paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2018, 195: 260-271.
- [22] 杜彩艳, 王攀磊, 杜建磊, 等. 生物炭、沸石与膨润土混施对玉米生长和吸收 Cd、Pb、Zn 的影响研究 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(1): 190-198.
- Du C Y, Wang P L, Du J L, et al. Influence of fixed addition of biochar, zeolite and bentonite on growth and Cd, Pb, Zn uptake by maize[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(1): 190-198.
- [23] Khan K A, Stroud J L, Zhu Y G, et al. Arsenic bioavailability to rice is elevated in Bangladeshi paddy soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(22): 8515-8521.
- [24] Chang C H, Wei C C, Lin L H, et al. Humic acids enhance the microbially mediated release of sedimentary ferrous iron[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(5): 4176-4184.
- [25] Palmer N E, Freudenthal J H, von Wandruszka R. Reduction of arsenates by humic materials[J]. *Environmental Chemistry*, 2006, 3(2): 131-136.
- [26] 赵一鸣, 董颖博, 林海, 等. 土壤理化性质对重金属形态的影响 [J]. *农业工程*, 2018, 8(12): 38-43.
- Zhao Y M, Dong Y B, Lin H, et al. Influence of soil physical and chemical properties on forms of heavy metals[J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(12): 38-43.
- [27] 胡敏, 李芳柏. 土壤微生物铁循环及其环境意义 [J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 683-698.
- Hu M, Li F B. Soil microbe mediated iron cycling and its environmental implication[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 683-698.
- [28] Lovley D R, Coates J D, Blunt-Harris E L, et al. Humic substances as electron acceptors for microbial respiration[J]. *Nature*, 1996, 382(6590): 445-448.
- [29] Wang X Q, Liu T X, Li F B, et al. Effects of simultaneous application of ferrous iron and nitrate on arsenic accumulation in rice grown in contaminated paddy soil[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2018, 2(2): 103-111.
- [30] Dong M F, Feng R W, Wang R G, et al. Inoculation of Fe/Mn-oxidizing bacteria enhances Fe/Mn plaque formation and reduces Cd and As accumulation in Rice Plant tissues[J]. *Plant and Soil*, 2016, 404(1/2): 75-83.
- [31] Mladenov N, Zheng Y, Miller M P, et al. Dissolved organic matter sources and consequences for iron and arsenic mobilization in Bangladesh aquifers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(1): 123-128.
- [32] 董远鹏, 刘喜娟, 董梦阳, 等. 腐殖质和硝酸钙对赤泥团聚体形成的促进作用 [J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(10): 1205-1210.
- Dong Y P, Liu X J, Dong M Y, et al. Improvement effect of calcium nitrate and humus on the aggregate formation in bauxite residue[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(10): 1205-1210.
- [33] 彭惠, 邓华健, 徐浩然, 等. 石灰对生物炭和腐殖酸阻控水稻 Cd 吸收的效应 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(1): 329-337.
- Peng H, Deng H J, Xu H R, et al. Effect of lime on biochar and humic acid controlling cadmium uptake in rice[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(1): 329-337.
- [34] 陈美淇, 马垒, 赵炳梓, 等. 木泥炭对红黄壤性水田土壤有机质提升和细菌群落组成的影响 [J]. *土壤*, 2020, 52(2): 279-286.
- Chen M Q, Ma L, Zhao B Z, et al. Effects of woody peat on quick improvement of soil organic matter and bacterial community composition in newly reclaimed red-yellow paddy soils[J]. *Soils*, 2020, 52(2): 279-286.

(责任编辑: 王育花)

RESEARCH OF AGRICULTURAL MODERNIZATION (Bimonthly)

Vol. 42, No. 2 (Sum. No. 243)

Mar., 2021

CONTENTS

Analysis of agricultural non-point source pollution issue in waters and technical strategy of comprehensive prevention and control in rural area of China	LI Yu-yuan, LI Xi, MENG Cen, WU Jin-shui (185)
Research on estimation method of national non-point source pollution loading from planting system	QIU Jie, SHE Dong-li, XIA Yong-qi (198)
Study on carbon release characteristics and denitrification performance of different solid carbon sources	ZHU Hui-xiang, ZHANG Shu-nan, PENG Ying-xiang, XIAO Jin, LIU Feng, XIAO Run-lin, DAI Gui-jin, ZHU Xiao-jiao (206)
Effects of swine wastewater manure application on soil nitrogen surplus characteristics of facility cabbage field	FU Li, WANG Gui-yun, DU Lian-zhu, YANG Liu, ZHANG Ke-qiang, DU Hui-ying (215)
Effect of seasonal drought and wetness on soil nitrate leaching loss on the slope of tea garden	LIU Fei, LAI Xiao-ming, ZHU Qing, LIAO Kai-hua (223)
The policy evolution of livestock and poultry manure governance	ZHAO Yue, LI Cui-xia (232)
Present situation and problems of decentralized treatment of rural domestic sewage	PENG Bin, HU Si-yuan, WANG Zhu, XU Guo-liang, MO Ling-zi, LI Yu-kun, LI Man-lin, LI Xing-zi (242)
Attenuation of antibiotics and antibiotic resistant bacteria during swine wastewater treatment and phosphate recovery process	WANG Lei, HUANG Xu (254)
Study on removal effect of swine wastewater pollutants by straw material biological substrate system	JIANG Lei, GUO Ning-ning, LIU Ming-yu, PENG Jian, LI Xi, ZHANG Man-yi, LI Yu-yuan, WU Jin-shui (263)
Assessment of soil environmental quality and potential ecological risk in a drinking water source in Hunan Province	CHEN Xiang, PENG Ying-xiang, LONG Rui, XING Hong-lin, LIU Feng, LIU Xin-liang, XIE Hua, WANG Yi, GUO Zhao-hui (275)
Factors restraining uptake/translocation of heavy metals (metalloids) related with plant roots and its mechanisms	LIU Zi-qing, YANG Ji-gang, WU Zi-han, LI Zeng-fei, SONG Bian-lan, FENG Ren-wei (284)
Formation, properties and the fixation in arsenic of iron (hydr)oxide-phylosilicate complexes	YANG Zhong-lan, ZENG Xi-bai, SUN Ben-hua, SU Shi-ming, WANG Ya-nan, ZHANG Nan, ZHANG Yang, WU Cui-xia (294)
Effects of long-term fertilization on accumulation and availability of Cd, Zn and Cu in paddy soil	YANG Min, HE Lu-lu, RAO Zhong-xiu, HUANG Dao-you, TIAN Ying-bing, ZHU Han-hua, XU Chao, ZHANG Quan (302)
Study on the simultaneous remediation of Cd and As contamination in the paddy soil by applying iron modified woody peat	DU Yan-hong, WANG Xiang-qin, LIU Chuan-ping, YI Cong-sheng, PENG Xiao-xiao, LI Fang-bai (311)
Effect of pig slurry on the availability of heavy metals in soils with different pH	HAN Jin, FAN Di-wu, GUO Yan-hui, SHEN Jian-hua, HAN Jian-gang (321)
Acute toxicity of single and co-exposure of lead and cadmium to <i>Eisenia foetida</i> and response of their burrowing behavior	LIU Chang-e, XIAO Yan-lan, TAN Jia-xin, PAN Ying, DUAN Chang-qun, MENG Xiang-huai, WANG peng, YUAN Xin-qi (330)
Investigation on tolerance, accumulation and physiological responses of <i>Macleaya cordata</i> to lead	CAI Bin, CHEN Yong-hua, DU Lu, HE Lang-jun (339)
Progress on arsenic contamination removing by constructed wetlands	YANG Gang, MA Yun-long, BAI Yin-ping, ZHOU Lei, LIU Kun (349)
Effects of shrimp aquaculture on the physiochemical properties of sediment and interstitial water in mangroves	QIN Ying-ying, LUO Wan-ci, LIANG Ming-zhong, WEI Ming-yue, GAO Chang-hao, ZHENG Hai-lei (357)
Study on the method of pregermination of wetland plants under saline and alkaline stress	SUN Hui, CHENG Rui, CHENG Xian-wei, YAN Bai-xing, ZHU Hui (367)

Editors in duty TONG Cheng-li, WANG Yu-hua

欢迎订阅 2021 年《农业现代化研究》

欢迎订阅 欢迎投稿

《农业现代化研究》是由中国科学院主管、中国科学院亚热带农业生态研究所主办的农业综合性学术刊物，科学出版社出版。其办刊宗旨是探索和研究具有中国特色的农业现代化理论、战略、方针、道路及我国农业现代化进程中的有关科学技术、经济、生态、社会各方面协调发展问题，促进国内外学术交流与合作，为我国农业可持续发展和农业现代化建设服务。它是以农业现代化为主题内容，以自然科学为主，兼融人文社会科学为特色的学术性、综合性农业学术期刊。注重以宏观和综合为主，宏观战略与微观技术相结合，综合性与专业性相结合，自然科学与社会科学相结合，理论与实际相结合的原则。主要刊登农业发展战略和农业基础科学及其交叉学科的基础理论研究和应用研究方面的学术论文、科研报告、研究简报等。内容包括农业发展战略、农业可持续发展、区域农业、生态农业、农业生物工程、信息农业、农村生态环境、农业经济、农业产业化、农业系统工程、农业机械化、高新技术应用、资源利用与保护、国外农业等。

《农业现代化研究》从 1992 年起一直被列入全国中文核心期刊，并编入《中国学术期刊（光盘版）》、中国期刊网、万方数据库、中国科学引文数据库、中国科技期刊数据库和 CABI 文摘库、Agrindex 等国际权威检索系统。曾先后被评为中国科学院优秀期刊、湖南省一级期刊和优秀期刊。

《农业现代化研究》为双月刊，逢单月出版。大 16 开国际版本，每册定价 15.00 元。向国内外公开发售，国内邮发代号 42—46，全国各地报刊发行局（所）均可订阅；国外由中国国际图书贸易总公司负责发行，代号：BM6665。主要读者对象：农业院校师生，广大农业科技工作者，各级领导干部和管理人员。

编辑部地址：湖南长沙市芙蓉区远大二路 644 号 中国科学院亚热带农业生态研究所，邮编：410125

联系电话：0731-84615231；E-mail: nyxdhyj@isa.ac.cn

网址：http://nyxdhyj.isa.ac.cn/ch/index.aspx；微信公众号：nyxdhyj

农业现代化研究
NONGYE XIANDAIHUA YANJIU

（双月刊，1980 年创刊）

第 42 卷第 2 期（总第 243 期）2021 年 03 月

RESEARCH OF AGRICULTURAL
MODERNIZATION

(Bimonthly, started in 1980)

Vol. 42, No. 2 (Sum. No. 243) Mar., 2021

主 管	中国科学院	Administrated by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院亚热带农业生态研究所	Sponsored by	Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences
出 版	科学出版社 (北京东黄城根北街 16 号, 邮编: 100717)	Published by	Science Press (16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China)
主 编	王克林	Chief Editor	WANG Ke-lin
编 辑	《农业现代化研究》编辑部 地址: 湖南长沙市芙蓉区远大二路 644 号 邮编: 410125 电话: 0731-84615231 E-mail: nyxdhyj@isa.ac.cn	Edited by	Editorial Department of Research of Agricultural Modernization
印 刷 装 订	湖南省农业科学院印刷厂	Address	No. 644, Yuanda 2nd Road, Furong District, Changsha City, Hunan, China
国内总发行	中国邮政集团公司湖南省报刊发行局	Postal Code:	410125 Telephone: 0731-84615231
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 地址: 北京 399 信箱 邮编: 100044	Distributed	China International Book Trading Corporation
订 购 处	全国各地邮政局(所)	Abroad by	(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

ISSN 1000-0275
CN 43-1132/S

国内邮发代号 42—46
国外发行代号 BM6665

国内外公开发售
定价: 15.00 元