

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

连续4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量

薛毅¹, 尹泽润¹, 盛浩^{1*}, 马颢榴¹, 周清¹, 宋达清², 张杨珠¹

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 株洲县农业局土肥站, 渌口 412000)

摘要: 商品有机肥由于可能含镉(Cd), 并在施入后对水稻土中Cd的有效性具有“抑制”和“激活”的双重作用, 导致施有机肥的稻米降Cd效应目前仍存在较大不确定性。通过选取湘东地区典型水稻土(紫泥田土种), 连续4 a 定位监测了大田施用商品有机肥对双季稻稻米的降Cd效应, 探索稻米Cd含量与双季稻不同生育期土壤Cd有效性、土壤因子(pH、土壤活性有机碳组分与铁氧化物)的关系。结果表明, 施有机肥降低双季稻糙米Cd含量28%~56%, 且晚稻糙米Cd含量降幅(43%~56%)高于早稻糙米Cd含量的降幅(28%~45%), 降幅的年际波动小。一方面, 施有机肥也导致双季稻某些生育期(分蘖盛期自齐穗期)土壤有效态Cd含量平均下降6%~7%; 土壤交换态Cd含量降低11%, 土壤有机结合态Cd含量提高14%, 直接反映土壤Cd有效性的降低。另一方面, 施有机肥也稳定提升土壤pH值0.1~0.3个单位, 促进土壤环境由酸性向微酸性发展, 土壤活性有机碳组分(轻组有机碳、粗颗粒有机碳和细颗粒有机碳)含量大幅提升(53%、77%和107%), 间接反映土壤Cd有效性的降低。本研究表明, 紫泥田连续施有机肥后, 土壤Cd有效性下降是双季稻米Cd含量降低的关键驱动因素。

关键词: 土壤重金属; 土壤Cd形态; 潜育性水稻土; 大田施肥试验; Cd污染耕地修复与治理; pH

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1880-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201910025

Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer

XUE Yi¹, YIN Ze-run¹, SHENG Hao^{1*}, MA Hao-liu¹, ZHOU Qing¹, SONG Da-qing², ZHANG Yang-zhu¹

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Soil and Fertilizer Station of Zhuzhou County, Lukou 412000, China)

Abstract: Because commercial organic fertilizers may contain cadmium (Cd) and may cause the dual effect of “inhibition” and “activation” on Cd availability in paddy soil with organic fertilizer input, the reduction of rice Cd following organic fertilizer application is still uncertain. Herewith, typical purple mud paddy fields were selected in the eastern Hunan Province. The effect of commercial organic fertilizer input on Cd reduction of double-rice paddy ecosystem was monitored for four consecutive years. The relationships between brown rice Cd content, soil available Cd, and soil factors (pH, soil labile organic carbon fractions, and iron oxide) at different growth stages in double-rice paddy fields were investigated. Results showed that the input of organic fertilizer reduced the Cd content in brown rice by 28%-56%. Meanwhile, the decrease of Cd content in brown rice of late rice (43%-56%) was higher than that of early rice (28%-45%), and the inter-annual fluctuation of the decrease was relatively small. On the one hand, soil available Cd content decreased by 6%-7% during several growth stages of double-rice (from tillering peak stage to full heading stage) with organic fertilizer input. Additionally, the content of soil exchangeable Cd was decreased by 11%, whereas the content of organic bound Cd was increased by 14%. This directly reflects the decrease of soil Cd availability. On the other hand, the soil pH value was steadily increased by 0.1-0.3 units following organic fertilizer input, which promoted the development of soil from acidity to slight acidity. Besides, the content of soil active organic carbon (light fraction organic carbon, coarse particulate organic carbon, and fine particulate organic carbon) was increased significantly (53%, 77%, and 107%, respectively). This indirectly reflects the decrease in soil Cd availability. This study implies that the decrease of soil Cd availability may be the primary driving force for the reduction of rice Cd content with consecutive organic fertilizer input in purple mud paddy fields.

Key words: soil heavy metal; soil Cd fractions; water-logged paddy soil; field fertilization experiment; remediation of Cd-contaminated cultivated soil; pH

近几十年来,在工业化、城市化和现代集约化农业快速发展的背景下,由于工矿业污染、农业过度施肥与污染源灌溉的人类活动,造成水稻土中重金属元素的输入量和累积量超出土壤本身自净能力,并在作物可食用部分中累积和通过食物链传递,威胁着人类健康^[1]。水稻(*Oryza sativa* L.)是全球重要的粮食作物之一,稻米也是世界上近一半人口的主食。中国南部地区是水稻的主要种植区,长期植稻形成的水稻土呈酸性。在中、轻度污染水田中种植水稻

所生产的稻米,米镉(Cd)含量容易超出中国食品安全标准(0.2 mg·kg⁻¹, GB 2762-2017)。由于稻米是人类饮食中主要的Cd摄入来源,因此针对中、轻度Cd污染耕地土壤的治理成为公众、政府和科学界关

收稿日期: 2019-10-08; 修订日期: 2019-11-01

基金项目: 湖南省农业委员会项目(农业部农办财函[2015]38号); 国家自然科学基金项目(41571234); 湖南农业大学“1515”学术创新团队项目

作者简介: 薛毅(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤环境质量演变、修复与提升, E-mail: 943328710@qq.com

* 通信作者, E-mail: shenghao82@hunau.edu.cn

注的焦点之一。

近年来,针对中、轻度 Cd 污染耕地土壤的治理,已开发出一系列技术,如化学固持、农田水分管理、化学淋洗和生物修复;其中,原位化学固持技术成为固定土壤 Cd 有效性的的重要手段^[2]。水田施有机肥是一种传统农艺管理措施,具有成本低、易操作的特点,在污染水稻土治理上极具潜力^[3]。然而,由于有机肥的来源广泛,也是土壤重金属的主要来源之一,这导致施有机肥在 Cd 污染水稻土治理效果上仍具有不确定性。水田施有机肥技术并未整合到当前 Cd 污染稻土治理的主流技术(如 VIP)当中^[4,5]。目前,大田或盆栽施肥试验表明,施有机肥对稻米 Cd 含量的调控作用具有降低^[6,7]、升高^[8,9]和无显著影响^[10],而施有机肥对水稻土 Cd 有效性的作用机制仍有待深入研究^[11]。特别是,水田增施有机肥后,土壤环境因子(如 pH、土壤有机质组分和铁氧化物)协同变化,可能综合控制土壤 Cd 的有效性^[12,13]。此外,已有施有机肥治理 Cd 污染水稻土的研究大多是盆栽试验或短期大田试验,长期的大田定位监测相对缺乏^[14~16]。因此,本文选取湘东地区典型高产双季稻田(紫泥田)作为研究

对象,定位监测连续 4 a 大田施用商品有机肥,双季稻植株和土壤 Cd 含量、Cd 形态和土壤环境因子的动态变化,目的在于:①明确双季稻田连续施有机肥对稻米降 Cd 效果的年际变异;②量化双季稻田施有机肥后,稻米 Cd 含量与土壤 Cd 有效性的关系;③探索水田土壤环境因子对土壤 Cd 有效性的影响。通过上述研究,以期为中、轻度 Cd 污染水稻土治理和水田有机肥推广提供科学依据和基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于湘东地区的株洲市,地貌属湘江中游典型低丘岗地(海拔 59 m),是典型的中亚热带湿润季风气候。据气象站资料,当地年均温 17.5℃,年均降雨量 1 389 mm。土壤亚类为紫色页岩风化物发育、经长期水耕熟化作用形成的潜育性水稻土,土种为紫泥田^[17]。传统种植制度为双季稻-冬闲,水田淹水种稻的历史长达 50 年以上,长期精耕细作,多为高产田。农田水利基础设施良好,排灌方便。供试土壤试验前的初始基本理化性质可参见表 1。

表 1 试验地 0~20 cm 表土的初始理化性质

Table 1 Initial physiochemical properties of 0-20 cm topsoil in the studied paddy field sites

项目	土壤容重 /g·cm ⁻³	土壤水提 pH	土壤有机质 /g·kg ⁻¹	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	总镉 /mg·kg ⁻¹	有效态镉 /mg·kg ⁻¹
参数值	1.03±0.06	5.53±0.19	33.48±2.02	12.62±1.04	2.04±0.04	0.54±0.04	16.25±0.78	0.821±0.050	0.488±0.079

1.2 供试材料

供试早稻品种为湘早籼 17 号,晚稻品种为天优华占。供试有机肥为湖南省政府 2015 年统一招标采购的商品有机肥(山田悦 5% 有机肥,绿丰源生物有机肥料有限公司,湖南长沙),主要原料为鸡粪,有机质含量≥45%,N+P₂O₅+K₂O≥5%,pH 值 8.38,总 Cd 含量 0.946 mg·kg⁻¹,符合中国商品有机肥重金属限量标准(3 mg·kg⁻¹,NY 525-2012 有机肥料)。

1.3 试验设计

2015 年 3 月,于春耕前,在株洲市株洲县,选取地势较平坦、面积较大的传统双季稻种植区域作为大田定位试验样区。在所选双季稻种植样区内,随机选取形状较规整、种植历史和管理措施清晰的 4 块双季稻田作为试验监测的重复田块。田块面积约 0.1~0.3 hm²,在田块中间,修筑高约 30 cm 田埂,将田块一分为二,分别设置对照和施有机肥处理小区。田埂覆盖薄膜,同时各处理修筑独立的排、灌水沟,防止相互串水。

在早、晚稻翻耕时,各人工撒施商品有机肥 1

次,每次施用量 2.25 t·hm⁻²。在水稻生育期内,从插秧至水稻黄熟期前,保持田间全程淹水管理,直至水稻收获前半月落干排水。其他田间管理(耕作、水肥和病虫害)均按当地习惯进行。当地双季稻耕作习惯浅耕,施肥习惯“一基一追”,其中基肥为 30% 复合肥(18:5:7)600 kg·hm⁻²,追肥为尿素 75 kg·hm⁻²、氯化钾 75 kg·hm⁻²,养分总投入量折算成纯 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别为 142.5、30.0 和 87.0 kg·hm⁻²。

1.4 样品采集与分析

在水田春耕前和双季稻不同生育期(返青期、分蘖盛期、孕穗期、齐穗期和黄熟期),采用自制非金属土钻^[18],按“S”取样法,采集各小区耕层(0~15 cm)混合土壤样品。土壤样品带回室内,经去除土壤异物、风干后,研磨过 10 目、60 目和 100 目尼龙筛备用。在早、晚稻黄熟期,随机选取土壤采样点附近 6~8 株水稻,采集植株带回室内(每个小区共 30~40 株水稻),分出稻谷、稻草和稻根,充分烘干。稻谷脱粒分出糙米,稻草和稻根剪碎,充分磨细,过

100 目筛后备用. 水稻黄熟后, 采用收获法测定整个试验小区的稻谷产量.

土壤总 Cd 采用硝酸-盐酸-高氯酸-氢氟酸消解, 石墨炉原子吸收分光光度法测定 (GB/T 17141-1997); 土壤有效态 Cd 采用 DTPA 浸提, 火焰原子吸收分光光度法测定 (GB/T 23739-2009); 植株中 Cd 含量采用硝酸-高氯酸消解, 石墨炉原子吸收分光光度法测定 (GB/T 5009.15-2014); 土壤 Cd 形态采用 Tessier 连续提取法, 将 Cd 赋存形态分为可交换态 (EXC-Cd)、碳酸盐结合态 (CB-Cd)、铁锰氧化物结合态 (OX-Cd)、有机结合态 (OM-Cd) 和残渣态 (RES-Cd)^[19]; 土壤轻组有机碳采用 $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ NaI 重液法提取, 烧失法测定碳含量^[20]; 土壤颗粒有机碳采用湿筛法提取, 重铬酸钾外加热容量法测定碳含量^[21]. 其他土壤基本理化性质按文献[22]的方法进行测定. 植株和土壤 Cd 含量均在具有省级计量认证资质的湖南省农业科学院农化检测中心完成. 为保证数据的可靠性和稳定性, 采用国家土壤成分分析标准物质 GBW07428 和大米粉成分分析标准物质 GBW(E)100349 进行质量控制, 相对标准偏差低于 5%.

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 以及 SPSS 22.0 软件进行数据处理、统计分析和制图. 施有机肥处理小区和对照小区的均值比较采用配对 t 检验, 显著性水平设 0.05, 极显著性水平设 0.01.

2 结果与分析

2.1 双季稻糙米 Cd 含量

紫泥田连续 4 a 施有机肥稳定地降低双季稻糙米 Cd 含量, 降幅为 28%~56% (图 1). 在 4 a 的观测期内, 糙米 Cd 含量年均降幅的年际波动较小: 49% (2015 年)、40% (2016 年)、47% (2017 年) 和 42% (2018 年). 这种年际波动或与区域气候的年际变化有关. 然而, 晚稻糙米 Cd 含量的平均降幅为 50% (范围 43%~56%), 高于早稻糙米 Cd 含量的平均降幅 39% (范围 28%~45%). 这可能因早、晚稻糙米 Cd 含量的差异所导致 (图 1). 在施有机肥处理与对照小区中, 晚稻糙米 Cd 含量 ($0.707 \sim 0.874 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $1.392 \sim 1.665 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 普遍高于早稻糙米 Cd 含量 ($0.201 \sim 0.814 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $0.341 \sim 1.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 这种早、晚稻糙米 Cd 含量差异可能与当地农业气象因素的年内季节变化 (晚稻生育期间的气温相对较高、降雨相对较少) 有关. 但是, 在 4 a 的观测期内, 晚稻糙米 Cd 含量的年际波动幅度 ($-7\% \sim 15\%$) 却明显低于早稻糙米 Cd 含量的年际波动幅度 ($-59\% \sim 67\%$), 这也反映晚稻糙米中 Cd 不仅积累水平相对较高, 也相对较为稳定. 早稻糙米 Cd 含量的年际波动或主要与区域内小气候的年际变化有关, 2015 年和 2017 年早稻糙米 Cd 含量较低, 这可能因 2015 年和 2017 年早稻生育期间 (5~7 月) 气温偏低, 降雨量明显较多所导致.

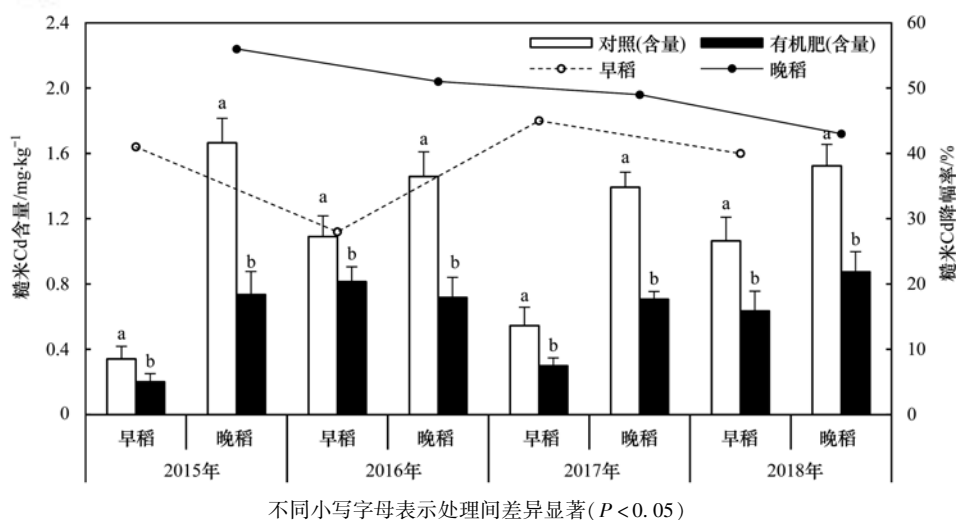


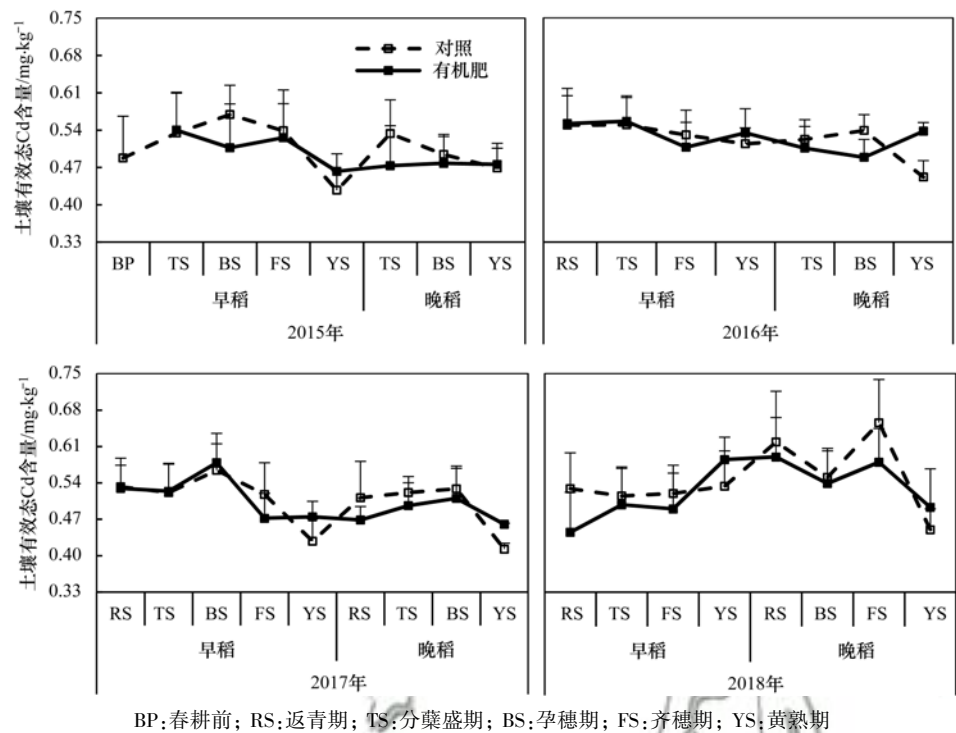
图 1 双季稻田施有机肥处理和对照小区的糙米 Cd 含量及其降幅

Fig. 1 Brown rice Cd content and its reduction under organic fertilizer input and control plots in double-rice fields

2.2 紫泥田土壤 Cd 含量

在 4 a 的研究期内监测到, 与对照相比, 双季稻田施有机肥处理小区土壤有效态 Cd 含量在水稻生长季的某些生育期 (如孕穗期和齐穗期) 有一定程度降低的现象 (6% 和 7%), 这可能与这段时期降雨

量较多且保持田间持续淹水有关 (图 2). 然而, 在水稻黄熟期, 土壤有效态 Cd 含量则呈明显升高的现象 (9%), 或主要与水稻收获前的排水落干管理措施有关. 土壤有效态 Cd 含量为 $0.427 \sim 0.658 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 具有明显的季节变化, 大致呈“双峰”型,



BP:春耕前; RS:返青期; TS:分蘖盛期; BS:孕穗期; FS:齐穗期; YS:黄熟期

图2 双季稻田施有机肥处理和对照小区土壤有效态镉含量的季节动态

Fig. 2 Seasonal changes in soil available Cd content under organic fertilizer input and control plots in double-rice fields

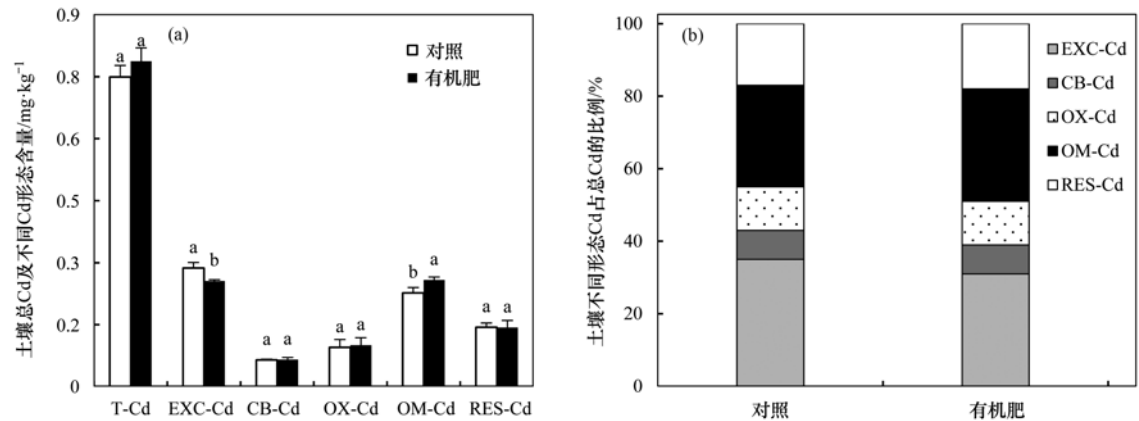
在早、晚稻的孕穗期前后出现峰值(0.518 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在黄熟期出现谷值(0.462 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

紫泥田经连续4 a 施有机肥后,虽然未观察到土壤总Cd 含量有显著变化,但土壤不同形态的Cd 含量发生明显变化;其中,土壤交换态Cd 含量下降11%,土壤有机态Cd 含量则升高14%,而土壤碳酸盐结合态、铁锰氧化结合态和残渣态Cd 含量均未发生显著的变化(图3)。这反映紫泥田连续地施有机肥会改变土壤中不同形态的Cd 的分配比例,并可能导致交换态Cd 向有机态Cd 的形态转化。紫泥田土壤Cd 以交换态、有机态和残渣态为主,占总Cd 的比例分别为35%、28%和17%,而铁锰氧化结合态和残渣态Cd

所占比例则相对较低,分别仅为12%和8%。

2.3 紫泥田土壤基本化学性质

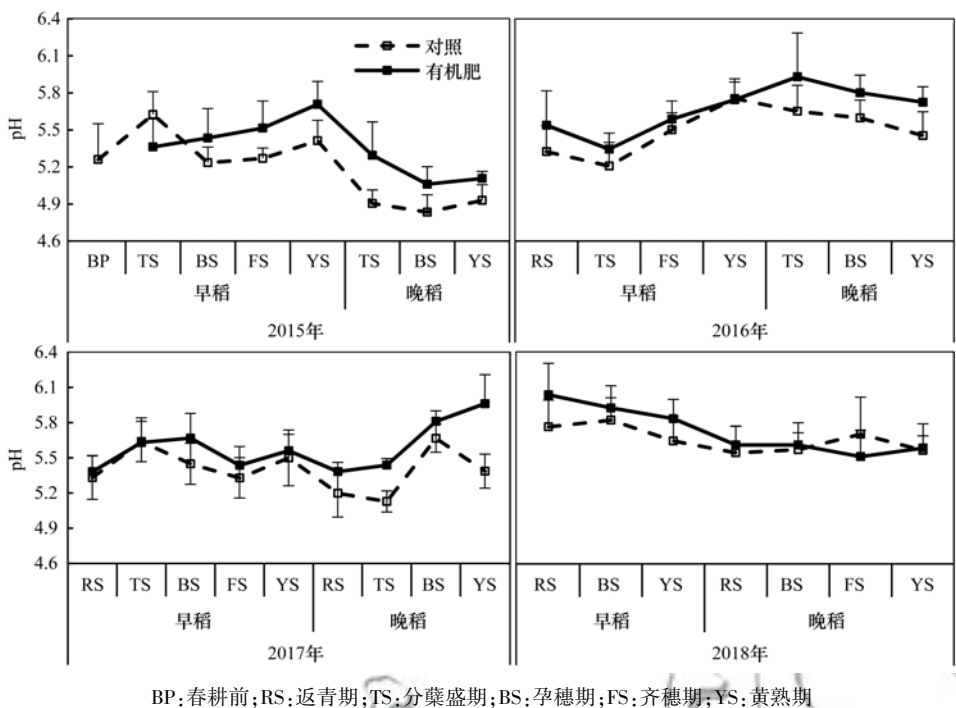
在4 a 研究期内监测到,与对照相比,双季稻田施有机肥处理小区土壤pH 值保持着稳定升高0.1~0.3 个单位的趋势(图4)。有机肥投入对土壤pH 值的提升作用具有季节性,一般在分蘖盛期的提升幅度最大(平均0.22 个单位),而在齐穗期的提升幅度最小(平均0.06 个单位)。在试验前,初始土壤的平均pH 值为5.26,属酸性土壤,连续4 a 的有机肥投入,土壤pH 值逐年升高。至第4 年(2018 年),施有机肥小区土壤平均pH 值升高至5.82,朝中性土壤方向发展。土壤pH 值升高的原因,可能是有机



T-Cd:总镉; EXC-Cd:交换态Cd; CB-Cd:碳酸盐结合态Cd; OX-Cd:铁锰氧化结合态Cd; OM-Cd:有机结合态Cd; RES-Cd:残渣态Cd; (a)中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

图3 双季稻田施有机肥处理和对照小区土壤总Cd、Cd 形态含量及其占总Cd 的比值

Fig. 3 Contents of total Cd and Cd fractions in soil and their ratios to total Cd in soil under organic fertilizer input and control plots in double-rice fields



BP:春耕前;RS:返青期;TS:分蘖盛期;BS:孕穗期;FS:齐穗期;YS:黄熟期
图4 双季稻田施有机肥处理和对照小区土壤pH值的季节动态
Fig. 4 Seasonal changes in soil pH under organic fertilizer input and control plots in double-rice fields

肥本身的pH值(8.26)明显高于土壤本底pH值,有机肥连续施入后提高了土壤pH值。

尽管紫泥田土壤初始的SOC含量已处于较高水平(表1),但连续4a施有机肥后,SOC含量仍提升11%(表2);特别是,土壤活性有机碳含量的提升幅度更高,轻组有机碳、粗颗粒有机碳和细颗粒有机碳含量分别提升53%、77%和107%。未观察到施有机肥对土壤游离态氧化铁、非晶质态氧化铁含量有显著影响。

表2 双季稻田施有机肥处理和对照小区土壤有机碳组分与铁组分含量¹⁾

Table 2 Contents of soil organic carbon fractions and iron fractions under organic fertilizer input and control plots in double-rice fields		
化学指标	对照	有机肥
土壤有机碳	23.15 ± 1.39b	25.78 ± 1.56a
轻组有机碳	3.39 ± 0.67b	5.19 ± 0.56a
细颗粒有机碳	2.24 ± 0.17b	3.97 ± 0.27a
粗颗粒有机碳	1.61 ± 0.08b	3.32 ± 0.15a
游离态氧化铁	24.45 ± 0.66a	24.49 ± 0.97a
非晶质态氧化铁	6.40 ± 0.07a	6.80 ± 0.36a

1)有机碳组分单位为g·kg⁻¹,铁组分单位为mg·kg⁻¹;每列不同小写字母表示处理间的差异显著(P<0.05)

2.4 糙米Cd、土壤Cd与土壤pH的关系

回归分析表明,施有机肥后,土壤有效态Cd含量与土壤pH值呈极显著线性负相关关系(图5)。在一定的土壤pH值范围内(4.63~7.14),随着土壤pH值升高,土壤有效态Cd含量明显降低。此外,双季稻糙米Cd含量与水稻分蘖盛期、齐穗期土壤有效态Cd含量均呈显著线性正相关关系(图6)。

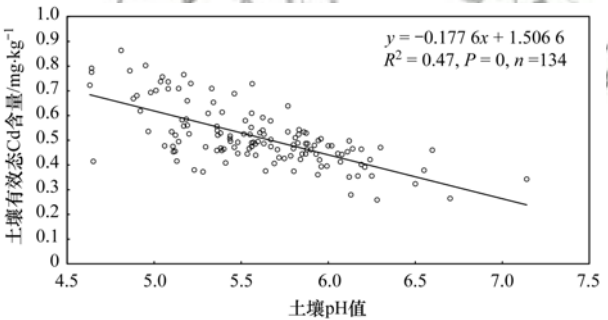


图5 土壤有效态镉含量与土壤pH值的关系
Fig. 5 Relationship between soil available Cd content and soil pH

2.5 双季稻产量

施有机肥明显增加早、晚稻产量,但增产量具有一定的年际波动(图7),也可能与局地小气候的年际波动有关。在4a研究期内,随着有机肥投入年限的延长,双季稻产量呈逐年递增的趋势。至试验第4年(2018年),有机肥处理小区的早、晚稻产量分别为7 193.1 kg·hm⁻²和8 854.8 kg·hm⁻²。

3 讨论

当前的大田或盆栽施肥试验表明,施有机肥对稻米Cd含量的调控作用仍具有较大不确定性,其降低^[6,7]、升高^[8]和无显著影响稻米Cd含量的研究均有报道(表3)。本研究中,连续4a施用商品有机肥,降低双季稻糙米Cd含量28%~56%。这一降幅与Zeng等^[6]报道的短期大田有机肥试验中米Cd含量的降幅(34%~57%)和Li等^[7]报道的盆栽有机肥试验中米Cd含量的降幅(35%~44%)相一致。

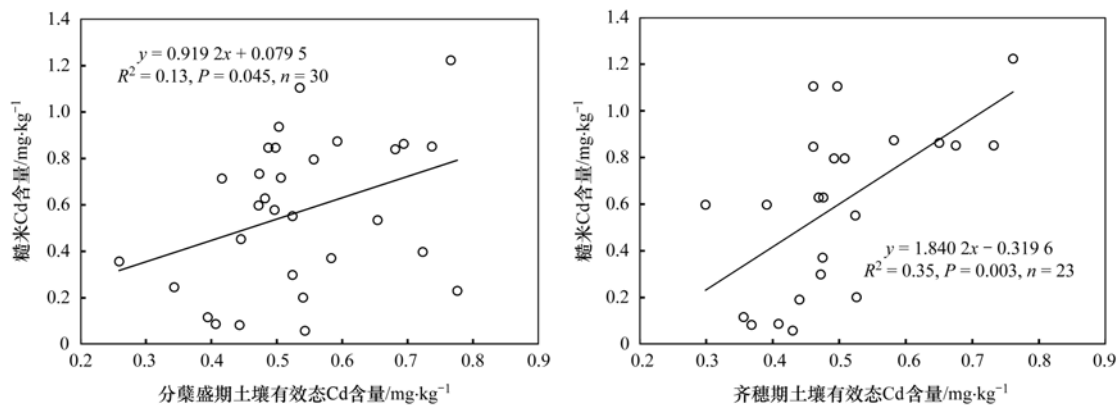
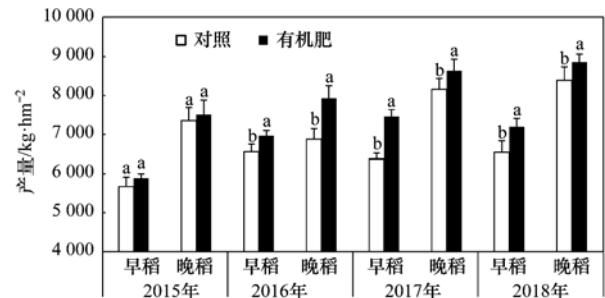


图 6 糙米镉含量与土壤有效态镉含量的关系

Fig. 6 Relationship between Cd content in brown rice and available Cd content in soil



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)
图 7 双季稻田施有机肥处理和对照小区稻谷产量

Fig. 7 Rice yield under organic fertilizer input and control plots in double-rice fields

表 3 施有机肥对稻米 Cd 和土壤有效态 Cd 含量的变化率/%

Table 3 Change in rice Cd and soil available Cd content after organic fertilizer application/%

项目	水稻生长季	米镉	土壤有效态镉	文献
大田试验	早稻	34 ~ 57	10 ~ 13	[6]
	早稻	41	14	[23]
	早稻	-20	-9 ~ -17	[24]
	中稻	23	4 ~ 14	[15]
	晚稻	14 ~ 21	5 ~ 8	[16]
	晚稻	21 ~ 67	66 ~ 89	[25]
	晚稻	63	27	[26]
	晚稻	15 ~ 79	6 ~ 25	[27]
	晚稻	-281	-121	[28]
	双季稻	-38 ~ -152	-17 ~ -88	[8]
盆栽试验	双季稻	-67 ~ -83	ND	[9]
	双季稻	28 ~ 56	3 ~ 11	本研究
	早稻	3 ~ 22	ND	[14]
	晚稻	53	5	[29]
	晚稻	90	ND	[30]
	ND	35 ~ 44	13 ~ 20	[7]

1) 负值、正值和 ND 分别代表增加、降低和无数据

尽管稻米中 Cd 主要来源于稻根吸收土壤中的 Cd,但水稻吸收 Cd 的动态规律和关键调控机制仍不清楚.许多研究表明,施有机肥在降低稻米 Cd 含量的同时,也降低土壤有效态 Cd 含量^[6,7].在 4 a 的研究期间,大田施有机肥也导致双季稻不同生育期(如孕

穗期、齐穗期)土壤有效态 Cd 含量呈不同程度的下降(图 2),反映水田施有机肥对土壤 Cd 具有钝化作用.有水培试验表明,孕穗期、抽穗期是控制镉米形成的关键时期^[31].本试验中也发现,米 Cd 含量与分蘖盛期、齐穗期土壤有效态 Cd 含量呈显著的正相关关系(图 6),这表明,双季稻米 Cd 的积累与关键生育期(分蘖盛期至齐穗期)土壤 Cd 有效性具有密切关系.因此,降低双季稻分蘖盛期至齐穗期的土壤 Cd 有效性,可能是阻控稻米 Cd 积累的一条重要途径.

土壤 Cd 有效性与土壤环境因子紧密相关.施有机肥调控水田土壤 Cd 有效性主要体现在两方面:一方面,施有机肥显著提高土壤有机质及其活性组分(如颗粒有机碳、轻组有机碳)的含量(表 2),促进水田土壤中的 Cd 由活性较高的交换态,向活性相对较低的其他形态(如有机态)发生转化(图 3).本试验中,连续 4 a 施有机肥后,土壤交换态 Cd 含量下降 11%,土壤有机态 Cd 含量则升高 13%,这也表明施有机肥导致土壤生物易利用态 Cd(土壤交换态 Cd)含量下降,甚至向中等可利用态和难利用态发生转化,从而降低土壤 Cd 的生物有效性.据报道,有机物质能直接通过表面吸附、表面基团的配位和离子交换作用,促使土壤中的 Cd 与土壤有机质、铁锰氧化物的紧密结合,提高土壤中有机结合态 Cd 和铁锰氧化态 Cd 的比例,降低土壤中交换态 Cd 的比例^[32].也有研究发现,土壤颗粒有机质结构中存在大量的羧基、羟基和酚羟基的官能团,这些官能团能在短时间内与土壤中 Cd 相结合,产生富集作用,增强土壤对 Cd 的吸附^[13].

另一方面,由于本试验中施用的有机肥本身呈碱性,pH 值达到 8.25,明显高于酸性紫泥田土壤 pH 值(5.26),这也导致双季稻不同生育期土壤 pH 值均有不同程度地升高(图 4).土壤 pH 值控制着土壤-溶液系统中 Cd 的溶解平衡,也是影响土壤中

Cd 迁移、转化和生物有效性的重要土壤环境因子之一^[26]。据报道,随着土壤 pH 值升高,土壤胶体表面负电荷量增加,土壤 Cd 吸附能力增强;此外,随着土壤 pH 值升高,OH⁻ 浓度升高,形成 Cd(OH)₂ 沉淀的机会增大,此时 Cd 与土壤吸附点位的亲和力要比自由态强,这降低了土壤 Cd 的生物有效性和稻米 Cd 含量^[33]。本研究中,在一定土壤 pH 范围内(4.63~7.14),双季稻不同生育期(分蘖盛期和齐穗期)土壤有效态 Cd 含量与土壤 pH 值呈显著负相关(图 5)。据陈楠等^[34]的研究报道,土壤 pH 值介于 4~9 时,土壤交换态 Cd 含量与土壤 pH 呈极显著线性负相关。Huang 等^[27]的试验也显示,施有机肥(猪粪、鸡粪)提高土壤 pH 值 0.11~0.74 个单位,分别降低土壤交换态 Cd 含量和米 Cd 含量 6%~25% 和 15.3%~79.3%,土壤交换态 Cd 含量与土壤 pH 呈极显著线性负相关。

然而,也有研究指出,施有机肥显著提高稻米 Cd 含量,与此同时也提高土壤有效态 Cd 含量或土壤总 Cd 含量(表 3)。例如,Rao 等^[8]的报道指出,在 30 a 的大田有机肥长期试验中,米 Cd 含量降低 -38%~-152%,推测可能与有机肥施用后活化土壤 Cd,降低土壤有效态 Cd 含量 -17%~-88% 有关。李本银等^[28]的研究也发现,施有机肥降低水田土壤 pH 值 0.32 个单位,降低土壤有效态 Cd 含量 -121%,降低米 Cd 含量 -281%;究其原因,其有机物质中 Cd 含量(1.79 mg·kg⁻¹)较高,施入水田后提升了水田土壤 Cd 含量,导致土壤有效态 Cd 含量上升,也造成米 Cd 含量上升。这似乎也说明,土壤 Cd 的有效性是调控米 Cd 含量的关键因子之一。

尽管本研究中,连续 4 a 施用有机肥降低米 Cd 含量和土壤 Cd 活性,但由于有机肥的来源和成分复杂、水稻土类型多样、水稻品种生理耐性与环境适应能力存在差异,这些都可能导致稻米 Cd 积累和土壤 Cd 活性的变化。由于有机物对水稻 Cd 吸收和积累的调控机制复杂,因此施有机肥对稻米的降 Cd 机制还有待更大范围、更长时间和更深层次的动态监测与深入研究。

4 结论

(1)在湘东地区的紫泥田中,连续 4 a 施用商品有机肥显著降低双季稻米 Cd 含量,而且晚稻米 Cd 含量的降幅高于早稻米 Cd 含量的降幅。双季稻米 Cd 含量降幅的年际波动较小,反映有机肥具有较稳定的降 Cd 效果和持续性。

(2)与此同时,施有机肥也明显降低双季稻某些生育期(分蘖盛期至齐穗期)土壤有效态 Cd 含

量,改变不同形态的土壤 Cd 的分配比例。特别是,施有机肥降低土壤交换态 Cd 含量,提升土壤有机态 Cd 含量,这可能促进土壤中生物易利用态 Cd 向中等可利用态或难利用态 Cd 发生转化。连续 4 a 施用商品有机肥也显著改变土壤环境因子,促进土壤环境由酸性向微酸性方向发展,土壤有机碳含量显著提高,特别是活性有机碳组分(颗粒有机碳与轻组有机碳)的大幅提高,是直接或间接导致土壤 Cd 有效性下降的土壤因子。本研究表明,紫泥田连续施有机肥后,土壤 Cd 有效性的下降是导致双季稻米 Cd 含量降低的关键因素。

参考文献:

- [1] Zeng F F, Wei W, Li M S, *et al.* Heavy metal contamination in rice-producing soils of Hunan Province, China and potential health risks[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, **12**(12): 15584-15593.
- [2] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments - a review[J]. *Waste Management*, 2008, **28**(1): 215-225.
- [3] Saengwilai P, Meeinkuirt W, Phusantisampan T, *et al.* Immobilization of cadmium in contaminated soil using organic amendments and its effects on rice growth performance [J]. *Exposure and Health*, 2019, doi. org/10. 1007/s12403-019-00312-0.
- [4] 彭鸥,刘玉玲,铁柏清,等. 调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4287-4294. Peng O, Liu Y L, Tie B Q, *et al.* Effect of conditioning agent combined with flooding measures on absorption and accumulation of cadmium in rice[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4287-4294.
- [5] 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.
- [6] Zeng H Y, Chen L H, Yang Y, *et al.* Basal and foliar treatment using an organic fertilizer amendment lowers cadmium availability in soil and cadmium uptake by rice on field micro-plot experiment planted in contaminated acidic paddy soil[J]. *Soil and Sediment Contamination; An International Journal*, 2019, **28**(1): 1-14.
- [7] Li J R, Xu Y M. Immobilization of Cd in paddy soil using moisture management and amendment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(7): 5580-5586.
- [8] Rao Z X, Huang D Y, Wu J S, *et al.* Distribution and availability of cadmium in profile and aggregates of a paddy soil with 30-year fertilization and its impact on Cd accumulation in rice plant[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 198-204.
- [9] Xu Y L, Tang H M, Liu T X, *et al.* Effects of long-term fertilization practices on heavy metal cadmium accumulation in the surface soil and rice plants of double-cropping rice system in Southern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(20): 19836-19844.
- [10] 王果,陈建斌,庄卫民. 有机物料对镉、铜污染土壤上水稻生长及镉、铜吸收的影响[J]. *福建农业学报*, 1998, (S1): 27-32. Wang G, Chen J B, Zhuang W M. Effect of organic materials on rice growth and its uptake of cooper and cadmium on Cd and Cu

- polluted soils[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 1998, (S1): 27-32.
- [11] Hamid Y, Tang L, Sohail M I, *et al.* An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 80-96.
- [12] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3409-3417.
- Hu X F, Tian Z Q, Liang L, *et al.* Comparative analysis of different soil amendment treatments on rice heavy metal accumulation and yield effect in Pb and Cd contaminated farmland[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3409-3417.
- [13] 李秋言, 赵秀兰. 紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 2146-2153.
- Li Q Y, Zhao X L. Enrichment characteristics of heavy metals in particulate organic matter of purple paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 2146-2153.
- [14] 刘利杉, 黄运湘, 黄楚瑜, 等. 水溶性有机肥料对水稻产量和镉吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(5): 826-831.
- Liu L S, Huang Y X, Huang C Y, *et al.* Effects of water-soluble organic fertilizer on yield of rice grain and cadmium absorption in rice grain and straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(5): 826-831.
- [15] 方雅瑜, 邹慧玲, 尹晓辉, 等. 赤泥和有机肥对镉、铅在水稻中吸收分布的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, **33**(5): 466-476.
- Fang Y Y, Zou H L, Yin X H, *et al.* Effects of red-mud and organic fertilizer on cadmium and lead absorption and distribution in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, **33**(5): 466-476.
- [16] 谢运河, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同有机肥对土壤镉镉生物有效性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(3): 826-832.
- Xie Y H, Ji X H, Wu J M, *et al.* Effect of different organic fertilizers on bioavailability of soil Cd and Zn [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(3): 826-832.
- [17] 湖南省农业厅. 湖南土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1989.
- [18] 盛浩, 张亮, 周清, 等. 一种重金属污染土壤表土采样器[P]. 中国专利: CN 206753575U, 2017-12-15.
- [19] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [20] 李洁, 盛浩, 周萍, 等. 亚热带丘陵几种林地土壤剖面有机碳和轻组有机碳的分布[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(4): 851-857.
- Li J, Sheng H, Zhou P, *et al.* The profile of organic carbon and light fraction organic carbon in several types of subtropical hilly woodland soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(4): 851-857.
- [21] 周萍, 张旭辉, 潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, **12**(6): 765-771.
- Zhou P, Zhang X H, Pan G X. Effect of long-term fertilization on content of total and particulate organic carbon and their depth distribution of a paddy soil: an example of Huangnitui from the Tai Lake region, China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, **12**(6): 765-771.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] Li B, Yang L, Wang C Q, *et al.* Effects of organic-inorganic amendments on the cadmium fraction in soil and its accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(14): 13762-13772.
- [24] 谢国雄, 王京文, 张丹, 等. 商品有机肥对作物产量及土壤与农产品中重金属积累的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, **32**(29): 97-104.
- Xie G X, Wang J W, Zhang D, *et al.* Effects of commercial organic fertilizer application on crop yield and heavy metals accumulation in soil and agricultural products [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, **32**(29): 97-104.
- [25] Meng J, Zhong L B, Wang L, *et al.* Contrasting effects of alkaline amendments on the bioavailability and uptake of Cd in rice plants in a Cd-contaminated acid paddy soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(9): 8827-8835.
- [26] 冉洪珍, 郭朝晖, 肖细元, 等. 改良剂连续施用对农田水稻Cd吸收的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 1117-1123.
- Ran H Z, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Effects of continuous application of soil amendments on cadmium availability in paddy soil and uptake by rice [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 1117-1123.
- [27] Huang Q Q, Yu Y, Wan Y N, *et al.* Effects of continuous fertilization on bioavailability and fractionation of cadmium in soil and its uptake by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **215**: 13-21.
- [28] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(1): 129-135.
- Li B Y, Huang S M, Zhang Y T, *et al.* Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, **16**(1): 129-135.
- [29] Yin B K, Zhou L Q, Yin B, *et al.* Effects of organic amendments on rice (*Oryza sativa* L.) growth and uptake of heavy metals in contaminated soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(2): 537-546.
- [30] Mori M, Kotaki K, Gunji F, *et al.* Suppression of cadmium uptake in rice using fermented bark as a soil amendment [J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 487-494.
- [31] 彭鸥, 铁柏清, 叶长城, 等. 稻米镉关键积累时期研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, **34**(3): 272-279.
- Peng O, Tie B Q, Ye C C, *et al.* The key period of cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, **34**(3): 272-279.
- [32] 王海波, 尚艺婕, 史静. 生物炭对土壤镉形态转化的影响[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(4): 22-26.
- Wang H B, Shang Y J, Shi J. Influence of biochar on the transformation of soil cadmium form[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(4): 22-26.
- [33] 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 等. 几种有机物料对设施菜田土壤Cd、Pb生物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 4011-4019.
- Zhou G Y, Jiang H M, Yang J C, *et al.* Effects of different organic materials on bio-availability of Cd, Pb in a contaminated greenhouse soil [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 4011-4019.
- [34] 陈楠, 张昊, 杨慧敏, 等. 土壤pH对土壤镉形态及稻米镉积累的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2018, **44**(2): 176-182, 209.
- Chen L, Zhang H, Yang H M, *et al.* Effects of soil pH on soil cadmium formations and its accumulation in rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2018, **44**(2): 176-182, 209.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)