

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



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术

李娜^{1,2}, 贺红周³, 冯爱煊^{1,2}, 李伟³, 蒋珍茂^{1,2}, 魏世强^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715; 3. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401147)

摘要: 渝西地区是重庆市粮食主产区, 区域土壤污染特征为以镉(Cd)为主的轻中度污染区。选择该区域酸性和钙质两类典型紫色稻田土壤, 开展了低累积水稻品种联合钝化剂的田间原位修复试验, 比较了水稻低累积品种常两优 772 联合使用硅钙肥、铁粉、生物质炭和秸秆有机肥 4 种钝化剂的修复效果。结果表明: ①在酸性和钙质两类紫色稻田土壤上, 除 Fe 粉外的其他 3 种钝化剂均提高了水稻稻谷产量, 酸性紫色稻田土壤上以秸秆有机肥效果最好, 增产 47.43%; 而在钙质稻田土壤上则以生物质炭最好, 增产 23.95%。②酸性紫色稻田土壤(pH=4.75)上单纯低累积水稻品种不能满足水稻安全生产要求, 联合钝化剂施用稻米 Cd 含量降幅为 14.81%~54.88%, 除硅钙肥外其他 3 种钝化剂稻米 Cd 含量均达到安全食用标准(0.2 mg·kg⁻¹, GB 2762-2017); 而钙质紫色稻田土壤(pH=7.77)上不同处理稻米 Cd 含量在 0.012~0.030 mg·kg⁻¹之间, 均未超过安全标准, 但施用钝化剂(除生物质炭外)仍然可使稻米 Cd 含量降低, 降幅为 26.67%~59.00%。③钝化剂影响 Cd 在稻株体内的转运, 以酸性土壤为例, 硅钙肥可降低茎中 Cd 向糙米的转运, Fe 粉和生物质炭可减少根部 Cd 的富集并降低茎中 Cd 向糙米的转运, 秸秆有机肥可降低根系 Cd 向茎中的转运。④添加 4 种钝化剂均能促进土壤 Cd 向残渣态转化, 降低土壤中有有效 Cd 含量, 进而降低了水稻各器官中 Cd 的积累。在酸性土壤中生物质炭对土壤 Cd 的钝化效果最好, 钙质土壤中则是秸秆有机肥钝化效果最好。⑤酸性土壤上硅钙肥和秸秆有机肥显著提升了酸性土壤 pH 值和有机质含量, 相应地土壤有效 Cd 含量降低了 39.45% 和 34.69%; 在钙质土壤上此现象则不明显。

关键词: 镉(Cd); 钝化剂; 水稻; 土壤; 有效性

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4637-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904230

Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing

LI Na^{1,2}, HE Hong-zhou³, FENG Ai-xuan^{1,2}, LI Wei³, JIANG Zhen-mao^{1,2}, WEI Shi-qiang^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China; 3. Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401147, China)

Abstract: The western Chongqing region is the main grain-producing area in Chongqing. This region's soils are characterized by light-to-moderate cadmium (Cd) pollution. Two types of typical paddy soils in this area (acidic and calcareous purple soils) were selected for the development of safe rice production techniques using in situ field remediation experiments. These involved a low-Cd-accumulating rice variety (Changliangyou 772) grown either alone or in combination with heavy metal passivators (silicon-calcium fertilizer, iron powder, biochar, and straw organic fertilizer). The results showed that: ① all of the passivators except for the Fe powder increased rice yields from both types of soils. Straw organic fertilizer showed the best results for the acidic purple paddy soil, with a rice-yield increase of 47.43%, while biochar performed best for the calcareous paddy soil, increasing yields by 23.95%; ② The low-accumulation rice variety alone could not meet the requirements of safe rice production in the acid purple paddy soil (pH = 4.75); however, combined with passivators (with the exception of the silicon-calcium fertilizer), Cd content in rice grains was reduced by 14.81%-54.88% to within the national safe food standard for rice (0.2 mg·kg⁻¹, GB 2762-2017). The Cd content of rice grains varied between 0.012 and 0.030 mg·kg⁻¹ in the calcareous purple paddy soil (pH = 7.77), under various treatments, which was far lower than the safety standard. The application of passivators (with the exception of biomass charcoal) further reduced the Cd content of rice by 26.67%-59.00% nevertheless; ③ The use of passivators altered Cd transportation and distribution in the rice plant. Taking the acidic soil as an example, silicon-calcium fertilizer inhibited the transport of Cd from the stems to the rice grains, Fe powder and biochar reduced the enrichment of Cd in roots and inhibited the transport of Cd from the stems to the rice grains, and straw organic fertilizer inhibited the transport of Cd from the roots to the stems; ④ The application of passivators promoted the transformation of soil Cd from labile forms into residual form, reduced the bioavailability of Cd in the soil, and, thus, reduced the accumulation of Cd in the rice plants. In the acidic soil, biochar showed the best effect, while straw organic fertilizer performed best in calcareous soils. ⑤ Silicon-calcium fertilizer and straw organic fertilizer significantly increased the pH and organic matter content of acid soils. Consequently, the soil available Cd content decreased by 39.45% and 34.69%, respectively, while no such effects were observed for

收稿日期: 2019-04-24; 修订日期: 2019-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600); 重庆市科学技术委员会重点研发计划项目(cstc2017shms-zdyfX0008)

作者简介: 李娜(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属修复, E-mail: 1070753409@qq.com

* 通信作者, E-mail: sqwei@swu.edu.cn

the calcareous soil.

Key words: cadmium (Cd); passivators; rice; soil; availability

随着我国经济的快速发展,农田重金属污染问题日趋严重.稻田重金属污染不仅影响水稻产量^[1],而且还通过食物链危害人群健康^[2].据2014年全国土壤污染状况调查公报显示,我国耕地土壤以重金属污染为主,其中以镉(Cd)污染最为普遍,其点位超标率高达7%,在所有污染物中排列第一位^[3].水稻是我国主要粮食作物,同时也是Cd易累积作物^[4,5],因此Cd污染稻田土壤安全利用与修复成为农田重金属污染防治的焦点之一.

安全利用是轻中度重金属污染农田污染防治的优先策略.已有修复技术包括物理、化学、生物等多种技术,其中植物修复和钝化修复技术,由于其实施的简单性、成本低廉性和控制效果的显著性^[6],而在重金属污染土壤安全利用与修复中受到广泛重视.水稻Cd低累积品种选育利用不同水稻品种Cd吸收的基因型差异,控制和减少Cd在稻米中的累积^[7];原位钝化修复通过施用钝化剂,调节土壤理化性质、以及重金属的土壤化学过程,改变其在土壤中的赋存形态,降低其生物有效性,从而减少水稻重金属积累^[8].但水稻Cd低累积筛选一般耗时较长,且具有区域适配性,土壤Cd污染钝化修复效果也因土壤性质和钝化剂的种类不同而异.因此,筛选适配区域气候条件的Cd低累积水稻品种、研发针对区域土壤类型、污染特征的土壤钝化剂,是Cd污染稻田土壤安全利用的关键,成为各地重金属污染土壤修复技术研发的热点^[9~13].目前一些地区已筛选出适应当地气候条件的Cd低累积水稻品种并应用于生产.各地筛选推荐的钝化剂包括硅钙物质、含磷材料、有机物料、黏土矿物、金属氧化物、生物炭等类型^[14~16].不同种类钝化剂对土壤重金属活性调控机制存在差异,如有机肥可改善土壤理化形状,增加土壤吸附能力^[11],石灰性类材料则主要提升土壤pH,改变Cd的赋存形态^[17],铁粉可促进水稻根系表面铁膜形成,减少对Cd的吸收^[18],因此,其土壤适宜性也有所不同.

目前适配钝化剂筛选常以盆栽试验和室内的研究居多^[17,19,20],而在实际污染田块开展的比选研究偏少.由于土壤性质的复杂性和作物对生长环境的强烈依赖性,盆栽试验获得的结果尚需原位田间试验验证^[21~23].同时,如何将Cd低累积品种选育与钝化技术有机结合,形成区域适配技术模式也需要深入探讨.

渝西地区是重庆市粮食主产区,常年粮食产量在600万t以上,接近全市粮食总产的一半.区域农产品产地土壤污染普查结果表明,该区域无机污染物总超标率为21.9%,其中Cd的超标率最高,为17.2%.Cd污染土壤主要以轻微-轻度污染为主,占超标点位的94.5%,实现这类土壤的安全利用对于全市保障粮食供给,维护农产品安全具有重要意义.但目前本地低Cd累积水稻筛选尚在进行中,缺乏定型品种,钝化剂缺乏大面积实际应用,尚未建立适配本地区域特征的稻田重金属污染修复与安全利用技术模式.为此,本文尝试从处于同一气候带的湖南省引进筛选定型的低Cd累积水稻品种常两优772^[24],通过田间试验,探讨其在渝西地区主要类型紫色稻田土壤的适应性与降Cd效果,研究比较4种常见的钝化剂(秸秆有机肥、生物质炭、硅钙肥和铁粉)^[11]联合低累积水稻品种,在渝西地区主要类型稻田土壤-酸性和钙质Cd轻度污染紫色土上实现水稻安全生产的可行性,以期建立适配本区域特征的Cd污染稻田安全利用技术模式提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验时间和地点

本研究采用田间小区试验方法,于2018年4月28日至8月16日分别在渝西的江津区和潼南区典型稻田进行.江津区土壤为酸性紫色稻田,潼南区土壤为钙质紫色稻田,两者Cd污染程度接近,均属于轻微污染.供试土壤基本理化性质见表1.

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the experimental soils

土壤类型	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	全N /g·kg ⁻¹	全P /g·kg ⁻¹	全K /g·kg ⁻¹	碱解N /mg·kg ⁻¹	速效P /mg·kg ⁻¹	速效K /mg·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	Cd 全量 /mg·kg ⁻¹
酸性	4.75	26.19	0.93	0.256	15.59	220.71	6.71	90.06	19.99	0.413
钙质	7.77	43.69	1.32	0.557	18.15	194.67	4.29	93.57	17.60	0.471

1.2 试验材料

考虑湖南和重庆均处于亚热带季风性湿润气候

带,气候具有相似性,本研究供试低累积型水稻品种——常两优772从湖南引进,为中国科学院亚热带

农业生态研究所在湖南定型. 采用的钝化剂分别为秸秆有机肥(由重庆市万植巨丰生态肥业有限公司以秸秆粉、麸皮为主要基质制得)、生物质炭(由江苏华丰农业生物工程有限公司, 以秸秆、稻壳和木料高温 600℃ 制备)、硅钙肥(由山东淄博金禾肥料有限公司提供)和 Fe 粉(试剂). 其中秸秆有机肥有机质含量为 174.08 g·kg⁻¹, pH 为 7.91, Cd 含量为 0.537 mg·kg⁻¹, 内含腐殖酸和有益菌; 生物质炭 pH 为 10.9, 有机炭含量为 57.14 g·kg⁻¹, Cd 含量为 0.110 mg·kg⁻¹; 硅钙肥有效硅(SiO₂) ≥ 24%, 活性钙(CaO) ≥ 32%, pH 为 10.01, Cd 含量为 0.274 mg·kg⁻¹.

1.3 处理设置与田间小区布设

两个试验点均设置 Cd 低累积水稻、低累积品

种联合 4 种钝化剂共 5 个处理, 各处理钝化剂用量见表 2 所示. 每个处理 3 个重复, 随机区组排列, 共 15 个试验小区, 每个小区面积为 4 × 5 = 20 m², 小区之间垒土隔离并用塑料薄膜盖土埂至土下 0.3 m, 以避免串流. 于 2018 年 4 月 27 日移栽秧苗, 栽种规格为每小区 13 行, 每行 25 窝, 行距 30.5 cm, 窝距 20 cm. 钝化剂按设计用量在秧田整理时一次性施用并与土壤混匀; 肥料施用按照当地推荐用量, 每亩施纯 N 10 kg, P₂O₅ 4 kg, K₂O 3 kg, 氮肥(尿素)80% 作为基肥, 20% 作为分蘖期追肥, 磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)作为基肥一次性施用; 其他田间管理方法与当地常规种植一致. 于 8 月 16 日水稻成熟期全小区收获计产.

表 2 试验处理及钝化剂用量

Table 2 Experimental treatments and passivation agent dosage			
处理编号	处理	钝化剂用量/kg·亩 ⁻¹	钝化剂用量/kg·小区 ⁻¹
L-CK	Cd 低累积水稻	—	—
L-SiCa	低累积水稻 + 硅钙肥	150	4.5
L-BC	低累积水稻 + 生物质炭	200	6
L-Fe	低累积水稻 + 铁粉	10	0.3
L-SOF	低累积水稻 + 秸秆有机肥	500	15

1.4 样品采集与分析

1.4.1 样品采集

土壤样品: 在试验实施前采用蛇形多点采样法采集表层土壤(0 ~ 20 cm)混合样品作为基础土样, 测定土壤基本理化性质. 在水稻成熟期按处理采样, 相同处理小区按采用五点采样法采集混合样品. 土壤样品自然风干、磨细, 分别过 1 mm 和 0.25 mm 备用.

植物样品: 在成熟期按处理随机采集各小区整株稻株 3 株, 形成处理混合样. 先用自来水洗 3 遍, 再用去离子水洗净, 将植株根、茎、叶和籽粒分开, 105℃ 杀青 30 min, 然后在 65℃ 烘干至恒重, 称取水稻根茎叶和水稻籽粒干重. 用小型脱壳机将水稻籽粒脱壳, 制备稻米样品. 水稻各部位(根、茎、叶和稻米)研磨粉碎后密封保存备用.

1.4.2 样品分析方法

土壤 pH、有机质、CEC 等基本性质参数采用常规方法^[25]测定. 土壤全 Cd 采用王水(HNO₃: HCl = 1: 3) + 高氯酸消解, 植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 消化, 消解液中的 Cd 用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定, 元素 Cd 的检出限在 0.006 μg·L⁻¹. 土壤有效 Cd 的测定尚无统一的方法, 一些研究表明 1 mol·L⁻¹ 中性 NH₄OAc 适应性较广, 所提取土壤的 Cd 与作物 Cd 含量有很好的相关性^[26], 因此本文采用 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提剂提

取; 土壤 Cd 形态分级采用改进 BCR 连续提取法^[27], 将土壤 Cd 区分为酸可提取态(AE), 可还原态(RED), 可氧化态(OXD)和残留态(RES)4 种形态. 土壤样品 Cd 元素测定时标准物质编号为 GBW-07428(GSS-14), Cd 元素的回收率为 103%; 水稻样品分析使用的标准物质编号为 GBW10044(GSB-22), Cd 元素的回收率为 105%. 每个样品分析取 3 个平行样, 用平行样测定结果的平均值扣掉空白作为基础数据, 所有数据误差范围在 15% 内.

1.5 数据分析

收获后对水稻进行考种计算每窝有效分蘖数, 每穗籽粒数、结实率、千粒重.

稻谷理论产量(kg·亩⁻¹) =
有效分蘖数(株·窝⁻¹) × 穗粒数(粒·穗⁻¹) ×
结实率(%) × 千粒重(g) × 10⁻³

按下列公式计算不同处理下水稻对 Cd 的富集系数(BCF)和转运系数(TF):

富集系数 BCF_{根/土壤} =
水稻根 Cd 含量(mg·kg⁻¹) /
土壤 Cd 含量(mg·kg⁻¹) × 100%

转运系数 TF_{茎/根} =
水稻茎 Cd 含量(mg·kg⁻¹) /
水稻根 Cd 含量(mg·kg⁻¹) × 100%

转运系数 TF_{叶/茎} =
水稻叶 Cd 含量(mg·kg⁻¹) /
水稻茎 Cd 含量(mg·kg⁻¹) × 100%

转运系数 $TF_{\text{糙米/茎}} = \frac{\text{水稻籽粒 Cd 含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{水稻茎 Cd 含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})} \times 100\%$

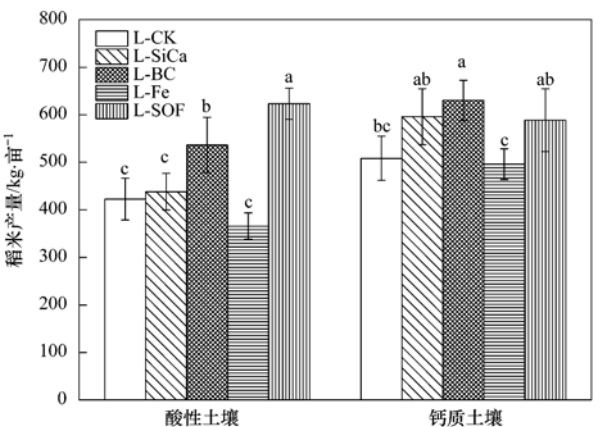
所有数据用 Excel 2010 处理, Origin 8.5 作图, 由 SPSS 21.0 进行相关数据的单因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 不同钝化剂施用对稻谷产量的影响

本试验的稻谷实收产量比理论产量低 5% ~ 10%, 但相对高低顺序一致. 考虑实际收获过程中的稻谷损失的不完全一致性, 本文采用理论产量来分析处理之间水稻产量的差异. 重庆市水稻平均单产约 $500 \text{ kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ [28], 本试验品种常两优 772 在酸性和钙质紫色水稻土上, 不同处理水稻稻谷产量变幅分别为 $366.04 \sim 623.10 \text{ kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ 和 $495.97 \sim 630.16 \text{ kg} \cdot \text{亩}^{-1}$, 最高产量和最低产量分别相差 70% 和 27%, 相同处理钙质土壤的水稻产量高于酸性土壤. 引进低 Cd 累积品种产量在本地正常产量范围内, 说明该品种适应本地区生态环境条件, 可在本地种植.

不同处理之间稻谷产量差异显著(图 1). 在酸性土壤上, 除铁粉外的 3 种钝化剂均能提高水稻稻谷产量, 增产幅度在 3.69% ~ 47.43% 之间, 其中生物质炭和秸秆有机肥处理与单纯低累积品种比较, 产量差异达到统计差异显著性水平 ($P < 0.05$), 以秸秆有机肥处理下的水稻产量增幅最高. 在钙质土壤上, 除铁粉外的其他 3 种钝化剂也提高了水稻稻谷产量, 增幅为 15.78% ~ 23.95%, 以生物质炭处理增产效果最好, 并且达到统计差异显著性水平.



图中字母相同表示同种土壤处理间无显著差异, 字母不同表示有显著差异 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同钝化剂处理的水稻产量

Fig. 1 Rice yields for the different treatments

2.2 不同钝化剂施用对稻谷产量构成的影响

钝化剂施用对水稻产量构成产生了影响(表 3). 在酸性土壤中, 不同处理水稻有效分蘖数在 19 ~ 23 株·窝⁻¹之间, 施用秸秆有机肥显著增加了水稻有效分蘖数 ($P < 0.05$); 穗粒数为变幅为 146 ~ 195 粒·穗⁻¹, 生物质炭和秸秆有机肥显著提高了水稻的穗粒数, 增幅分别为 28.29% 和 27.63%; 钝化剂对稻谷千粒重无明显影响, 不同处理千粒重在 19 g 左右; 在钙质土壤中, 施用生物质炭和秸秆有机肥对水稻有效分蘖数有显著提升作用 ($P < 0.05$), 每窝平均增加约 2 株; 施用硅钙肥显著提高水稻的穗粒数, 增幅为 10.59%; 施用 Fe 粉显著增加了稻谷千粒重, 但穗粒数显著减少. 两种土壤上, 钝化剂对结实率均无显著影响. 可见, 生物质炭和秸秆有机肥对稻谷产量的提升主要是通过增加有效分蘖数和穗粒数而实现.

表 3 不同钝化剂处理下稻谷产量构成¹⁾

Table 3 Composition of rice yields under the different treatments

处理	酸性土壤				钙质土壤			
	有效分蘖数 /株·窝 ⁻¹	穗粒数 /粒·穗 ⁻¹	结实率 /%	千粒重 /g	有效分蘖数 /株·窝 ⁻¹	穗粒数 /粒·穗 ⁻¹	结实率 /%	千粒重 /g
L-CK	20 ± 1b	152 ± 10b	70 ± 3a	19.00 ± 0.81a	17 ± 2b	170 ± 4b	85 ± 2a	19.62 ± 0.60b
L-SiCa	21 ± 3ab	158 ± 12b	65 ± 3a	18.95 ± 0.84a	17 ± 1ab	188 ± 11a	85 ± 1a	20.40 ± 0.07ab
L-BC	21 ± 2ab	195 ± 12a	65 ± 2a	18.50 ± 0.52a	19 ± 1a	180 ± 7ab	85 ± 3a	20.00 ± 0.27b
L-Fe	19 ± 1b	146 ± 7b	65 ± 1a	18.73 ± 0.79a	18 ± 1ab	150 ± 8c	83 ± 1a	21.53 ± 1.35a
L-SOF	23 ± 1a	194 ± 8a	67 ± 6a	19.2 ± 0.94a	19 ± 1a	165 ± 4b	85 ± 2a	20.43 ± 0.67ab

1) 表内同一列中字母相同表示同种土壤处理间无显著差异, 字母不同表示有显著差异 ($P < 0.05$), 下同

2.3 不同钝化剂施用对稻米镉含量的影响

不同处理水稻籽粒中的 Cd 含量如图 2 所示. 酸性和钙质水稻土上, 单纯低累积品种处理稻谷糙米 Cd 含量分别为 $0.297 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.030 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 其中酸性紫色土壤中糙米 Cd 含量超过国

家食品中污染物限量标准 (GB 2762-2017) $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但与同条件下当地主推水稻品种和两优 332 和宜香优 2115 [29] 相比, 引进低 Cd 累积品种常两优 772 稻米 Cd 含量较之减少 20% 左右, 表现出了较好的 Cd 低积累性.

在相似土壤 Cd 污染水平下, 钙质紫色稻田土壤上不同处理糙米 Cd 含量为 0.012 ~ 0.030 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均满足国家食品中污染物限量标准; 酸性紫色土壤中糙米 Cd 含量较钙质水稻土高约 1 个数量级, 变幅在 0.134 ~ 0.297 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 且单一低 Cd 累积品种尚不能满足水稻安全生产要求, 可见, 水稻籽粒 Cd 累积受土壤酸度的深刻制约, 改善土壤的酸碱环境可以降低 Cd 的生物有效性^[30]. 联合使用钝化剂均可进一步降低糙米 Cd 含量, 酸性稻田土壤上生物质炭、铁粉、秸秆有机肥处理糙米 Cd 含量分别 0.134、0.175 和 0.184 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别较单一低累积品种处理降低 54.88%、41.08% 和 38.05%, 均符合国家食品中 Cd 限量标准; 即使在钙质水稻上, 钝化剂(除生物质炭外)施用仍然使得糙米 Cd 含量降低了 26.67% ~ 59.00%, 以施用秸秆有机肥和铁粉效果最好, 差异达到 $P < 0.05$ 统计差异显著性水平.

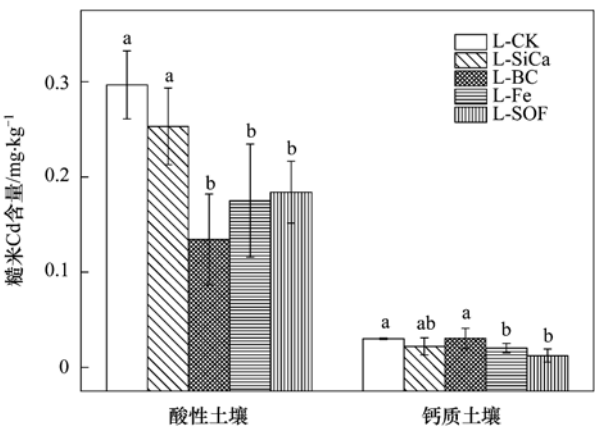


图2 不同处理影响下糙米 Cd 含量

Fig. 2 Cd contents in rice grains for the different treatments

2.4 不同钝化剂对水稻稻株生物量及镉吸收、转运的影响

不同钝化剂处理下的水稻各部位生物量以及 Cd 含量如表 4 所示. 酸性土壤上, 不同钝化剂施用水稻的各部位生物量均有所增加, 除 Fe 粉外 3 种

表 4 不同钝化剂处理下水稻各部位干重及 Cd 含量

Table 4 Dry weight and Cd content in various parts of rice treated with different passivators

土壤类型	处理	生物量/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			Cd 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
		根	茎	叶	根	茎	叶
酸性	L-CK	11.62 ± 1.15b	36.18 ± 0.75a	20.05 ± 0.96a	24.45 ± 1.82bc	1.86 ± 0.11b	0.39 ± 0.01b
	L-SiCa	14.90 ± 1.95a	37.56 ± 0.31a	20.64 ± 5.01a	25.77 ± 2.5b	2.17 ± 0.04a	0.46 ± 0.01a
	L-BC	13.02 ± 1.45a	40.21 ± 3.42a	22.39 ± 3.77a	20.12 ± 0.15c	1.72 ± 0.09bc	0.21 ± 0.00c
	L-Fe	11.80 ± 0.42b	37.14 ± 4.03a	19.55 ± 1.23a	15.35 ± 1.0d	1.42 ± 0.04c	0.20 ± 0.02c
	L-SOF	13.59 ± 1.19a	42.80 ± 1.55a	21.09 ± 6.44a	31.08 ± 2.4a	1.59 ± 0.01c	0.20 ± 0.01c
钙质	L-CK	16.07 ± 2.60b	23.29 ± 1.74b	11.14 ± 0.87a	0.43 ± 0.01c	0.055 ± 0.001a	0.034 ± 0.00c
	L-SiCa	20.23 ± 1.06ab	36.28 ± 2.59a	15.46 ± 4.40a	0.62 ± 0.02a	0.027 ± 0.006c	0.037 ± 0.00b
	L-BC	17.08 ± 2.30b	29.95 ± 3.5ab	15.42 ± 1.87a	0.53 ± 0.04b	0.043 ± 0.004ab	0.044 ± 0.001a
	L-Fe	18.76 ± 4.88ab	27.86 ± 4.14b	13.53 ± 2.38a	0.36 ± 0.00d	0.042 ± 0.001b	0.027 ± 0.001d
	L-SOF	23.18 ± 2.97a	30.44 ± 4.08ab	15.56 ± 1.57a	0.59 ± 0.02a	0.025 ± 0.007c	0.025 ± 0.00d

钝化剂均显著提高了根系生物量($P < 0.05$), 增幅为 12.05% ~ 28.23%, 对其他部位生物量的影响统计差异不显著性. 在钙质紫色土上, 秸秆有机肥显著增加了根系生物量, 硅钙肥显著增加了稻株茎的生物量, 其他处理对稻株根、茎、叶生物量的影响无显著统计差异. 酸性土壤上水稻根、茎、叶各部分 Cd 含量均远高于钙质土壤上稻株相应部位 Cd 含量(表 4), 两种土壤上水稻根系 Cd 含量均远高于茎叶, 说明酸性土壤中 Cd 的活性高, 易于被稻株吸收累积, 水稻吸收的 Cd 主要累积在根系.

水稻从土壤中吸收和富集重金属能力可以分别用富集系数(BCF)和转运系数(TF)来表征. 施用钝化剂影响了水稻对 Cd 的吸收和在体内的转运分配, 从而影响稻米中 Cd 的累积. 在酸性紫色土上, 单纯低累积品种对照处理根、茎、叶 Cd 平均含量分别为 24.45、1.86 和 0.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硅钙肥施用分别使稻株根、茎、叶 Cd 含量增加了 5.40%、

16.67% 和 17.95%, 统计差异显著($P < 0.05$), 同时根系对土壤 Cd 的富集系数 $\text{BCF}_{\text{根}}$ 、根系 Cd 向茎的转运系数 $\text{TF}_{\text{茎/根}}$ 均有所增加(表 5), 但茎向糙米的转运系数 $\text{TF}_{\text{糙米/茎}}$ 则降低了 27.04%, 因此, 最终糙米 Cd 含量仍然较对照降低 14.81%, 意味着硅钙肥可能主要通过影响 Cd 在稻株体内的转运, 进而减少糙米 Cd 累积; 生物质炭减少了根、茎、叶中 Cd 的含量, 其中叶 Cd 含量显著降低了 46.15%, 同时根系对土壤 Cd 的富集系数 $\text{BCF}_{\text{根}}$ 、茎向糙米的转运系数分别降低了 10.78%、52.20%, 因此糙米 Cd 含量较对照显著降低达 54.88%, 表明生物质炭既可降低根系对土壤 Cd 的富集也可抑制 Cd 向糙米的转运; Fe 粉施用分别使稻株根、茎、叶 Cd 含量降低了 37.22%, 23.65% 和 48.72%, 统计差异显著($P < 0.05$), 同时根系对土壤 Cd 的富集系数 $\text{BCF}_{\text{根}}$ 、茎向糙米的转运系数 $\text{TF}_{\text{糙米/茎}}$ 分别降低了 35.75%、8.81%, 相应糙米 Cd 含量较对照显著降低了

41.10%，表明 Fe 粉对水稻 Cd 的吸收和转运均有显著降低效果，但铁粉施用显著降低了水稻产量；秸秆有机肥的施用促进了稻株根系对 Cd 的富集，BCF_根 较对照增加了 31.35%，但减少了根系 Cd 向茎的转运，TF_{茎/根}、TF_{糙米/茎} 均有所降低，茎、叶中 Cd 含量分别显著降低了 14.52% 和 48.72%，最终糙米 Cd 含量仍然较对照显著降低 38.05%。在钙质紫色土上，尽管不同处理糙米 Cd 含量均满足标准要求，但除生物质炭外，钝化剂仍然可使糙米 Cd 含量进一步降低。

表 5 不同钝化剂处理低累积水稻 Cd 富集系数 BCF 和转运系数 TF

处理	酸性土壤				钙质土壤			
	BCF _根	TF _{茎/根}	TF _{叶/茎}	TF _{糙米/茎}	BCF _根	TF _{茎/根}	TF _{叶/茎}	TF _{糙米/茎}
L-CK	54.954	0.076	0.212	0.159	0.925	0.128	0.612	0.543
L-SiCa	57.289	0.084	0.212	0.116	1.408	0.044	1.344	0.802
L-BC	49.030	0.086	0.124	0.076	1.114	0.082	1.017	0.704
L-Fe	35.310	0.093	0.142	0.145	0.392	0.230	0.638	0.596
L-SOF	72.181	0.051	0.130	0.125	1.333	0.042	0.989	0.603

2.5 钝化剂对土壤镉赋存形态和有效性的影响

2.5.1 对土壤镉全量和乙酸铵提取态镉含量的影响

钝化剂通过调控土壤 Cd 形态转化，进而影响土壤中 Cd 的有效性和水稻对 Cd 的累积。不同处理土壤 Cd 全量及 NH₄OAc 可提取态有效 Cd (NH₄OAc-Cd) 占比如图 3 所示。酸性土壤 Cd 全量范围为 0.410 ~ 0.450 mg·kg⁻¹，NH₄OAc-Cd 含量为 0.088 ~ 0.147 mg·kg⁻¹，占 Cd 总量的 19.56% ~ 33.10%；钙质紫色土壤 Cd 含量在 0.441 ~ 0.474 mg·kg⁻¹ 之间，NH₄OAc-Cd 含量为 0.016 ~ 0.025 mg·kg⁻¹，占 Cd 总量的 3.60% ~ 5.59%。酸性土壤上有效 Cd 占比远高于钙质土壤。不同处理经过一季水稻种植，土壤全量 Cd 含量均无显著变化。

两种土壤上钝化剂施用均降低了 NH₄OAc-Cd 的含量。酸性土壤上的降幅为 2.04% ~ 39.45%，以硅钙肥和秸秆有机肥降幅最大，分别较对照减少 39.45% 和 34.69%，差异显著；钙质土壤上的降幅

其中，硅钙肥主要降低根系 Cd 向地上部的转运，Fe 主要降低根系对土壤 Cd 的吸收富集，秸秆有机肥主要减少根系 Cd 向地上部的转运。

综上，低累积水稻常两优 772 中 Cd 的积累主要集中在根部，其次是根、茎、叶、籽粒。钝化剂或减少根系对 Cd 的吸收富集或改变其在稻株体内的分配转运，从而减少糙米中 Cd 的累积，不同钝化剂的影响方向和程度有所差异，从而表现出不同的钝化效果。

为 2% ~ 33%，只有硅钙肥处理有效 Cd 降低幅度最大为 33%，较对照差异显著。不同处理对土壤 NH₄OAc-Cd 含量与最终水稻籽粒 Cd 降幅高低顺序并不完全一致(见图 2)，这一方面说明两种土壤上 NH₄OAc 可提取态有效 Cd 含量并不能完全反映土壤 Cd 对水稻的有效性，同时也与不同钝化剂对水稻吸收的 Cd 在稻株体内转运分配的影响差异有关。

2.5.2 对土壤镉形态转化的影响

经过了一季水稻的种植，两种土壤不同处理 Cd 的赋存形态如表 6 所示。酸性土壤和钙质土壤中的对照组 AE-Cd 含量分别占 Cd 总量的 47.6% 和 64.08%，施加钝化剂(除硅钙肥外)处理使酸性土壤 AE-Cd 降低 3.77% ~ 10.85%，施加钝化剂处理使钙质土壤 AE-Cd 降低 6.35% ~ 14.05%，而 RES-Cd 含量则分别较对照增加 5.00% ~ 60.00% 和 4.76% ~ 57.14%；RED 和 OXD 没有发生显著性变

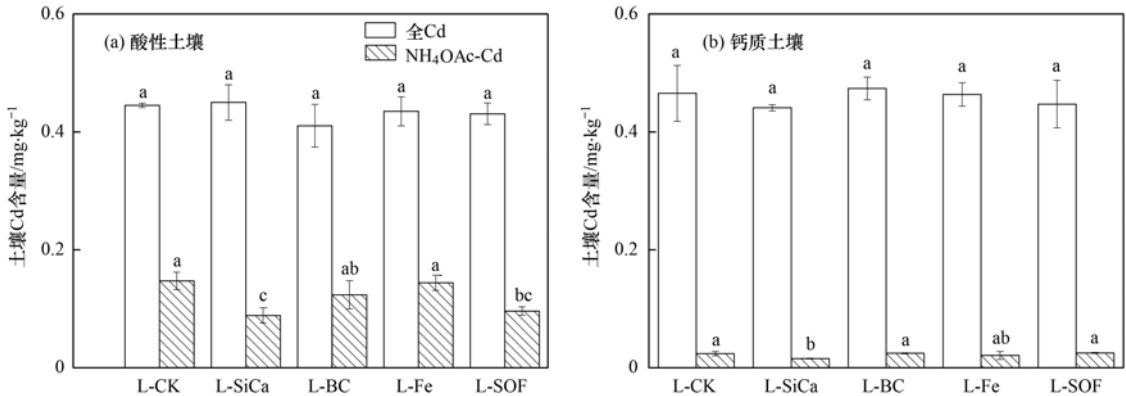


图 3 不同钝化剂处理下土壤 Cd 含量

Fig. 3 Cadmium content of soils treated with different passivators

化. 说明施加钝化剂有利于促进土壤 Cd 的形态向活性比较低的 RES 转化, 从而降低 Cd 的生物有效性. 在酸性土壤中生物质炭的钝化效果优于其他钝化剂, 钙质土壤中则是硅钙肥钝化效果较好.

为进一步分析稻米 Cd 累积与土壤 Cd 形态的关系, 以不同处理稻米 Cd 含量作为因变量 Y , 土壤中 Cd 的 4 个形态 $AE(X_1)$ 、 $RED(X_2)$ 、 $OXD(X_3)$ 和 $RES(X_4)$ 的 Cd 含量作为自变量, 进行多元线性回归分析, 其结果如表 7 所示. 在酸性土壤中, 水稻籽粒 Cd 含量与土壤 Cd 的各个形态之间存在显

著依存关系, 水稻糙米 Cd 含量主要受到 $AE-Cd$ 、 $OXD-Cd$ 以及 $RES-Cd$ 含量影响较大, 其中稻米 Cd 含量与 $AE-Cd$ 达到极显著相关 ($P < 0.01$), $RES-Cd$ 含量对水稻糙米中 Cd 的吸收累积具有明显的负贡献. 然而在钙质土壤中水稻籽粒 Cd 含量与土壤 Cd 各形态含量关系则不明显. 可能因为钙质土壤的 pH 值较高, 土壤 Cd 的生物有效性较低, 水稻籽粒累积 Cd 含量较酸性土壤低约 1 个数量级, 因此水稻籽粒 Cd 含量与土壤 Cd 各形态含量没有显著依存关系.

表 6 成熟期土壤不同形态 Cd 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 6 Fractionation of Cd in soil at the mature rice stage/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$					
土壤类型	处理	AE	RED	OXD	RES
酸性	L-CK	0.212 ± 0.006a	0.185 ± 0.014a	0.026 0 ± 0.003a	0.020 ± 0.00b
	L-SiCa	0.211 ± 0.016a	0.176 ± 0.025a	0.036 1 ± 0.003a	0.026 ± 0.003ab
	L-BC	0.189 ± 0.011b	0.162 ± 0.012a	0.026 7 ± 0.002a	0.032 ± 0.001a
	L-Fe	0.203 ± 0.015ab	0.184 ± 0.0145a	0.027 8 ± 0.003a	0.027 0 ± 0.003a
	L-SOF	0.204 ± 0.008ab	0.182 ± 0.019a	0.027 0 ± 0.002a	0.021 ± 0.003ab
钙质	L-CK	0.299 ± 0.027a	0.160 ± 0.010a	0.022 ± 0.003a	0.021 ± 0.003b
	L-SiCa	0.265 ± 0.014b	0.157 ± 0.006a	0.023 ± 0.001a	0.033 ± 0.007a
	L-BC	0.269 ± 0.011ab	0.163 ± 0.012a	0.022 ± 0.001a	0.022 ± 0.001ab
	L-Fe	0.280 ± 0.004ab	0.159 ± 0.010a	0.023 ± 0.002a	0.022 ± 0.002ab
	L-SOF	0.257 ± 0.018b	0.162 ± 0.008a	0.022 ± 0.001a	0.031 ± 0.008a

表 7 水稻籽粒 Cd 含量与土壤各形态 Cd 含量的线性回归方程¹⁾

Table 7 Linear regression equations for the Cd content of rice grains in relation to soil Cd fractions		
土壤类型	回归方程	F 值
酸性	$Y = 2.801X_1 + 0.302X_2 + 3.046X_3 - 2.730X_4 - 0.444$	2.78 *
钙质	$Y = 0.425X_1 + 1.778X_2 + 5.371X_3 - 0.017X_4 - 0.477$	2.004

1) 样本量 $N = 33$, * 表示显著性水平 $P < 0.05$

2.5.3 不同钝化剂对土壤 pH 及有机质的影响

土壤 pH 值、有机质含量等均是影响 Cd 形态和有效性的重要因素^[31, 32], 施用钝化剂对土壤 pH、有机质含量等基本性质的影响, 也是其产生不同钝化效果的重要原因. 如图 4 所示, 施用钝化剂

后酸性土壤的 pH 范围为 4.51 ~ 5.58, 有机质含量为 28.68 ~ 32.37 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 添加硅钙肥和秸秆有机肥显著增加了土壤 pH 值和有机质含量, pH 分别较对照增加了 0.98 和 1.04 个 pH 单位, 有机质含量分别提高了 3.85% 和 3.43%, 且秸秆有机肥处理使

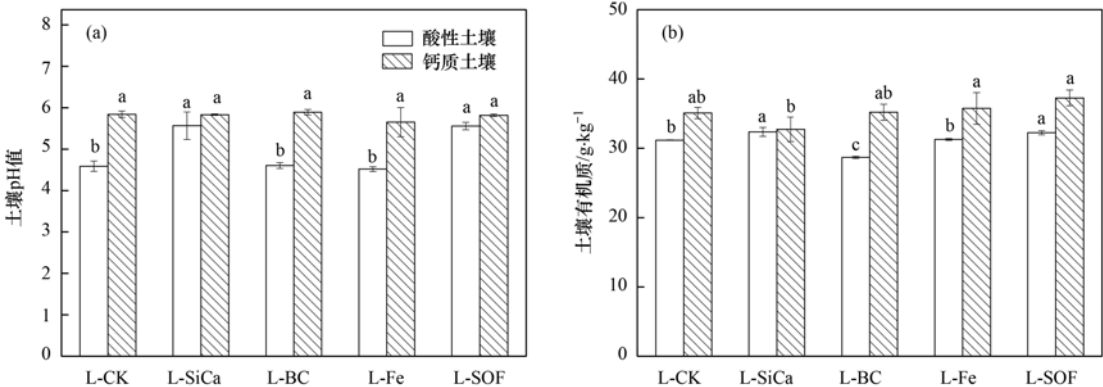


图 4 不同钝化剂处理下土壤 pH 和有机质

Fig. 4 Soil pH and organic matter contents under the different treatments

糙米 Cd 含量显著降低, 满足国家食品安全标准值, 但硅钙肥降 Cd 效果并不显著, 可能还与其对水稻生长、Cd 吸收和稻株体内 Cd 的转运分配的影响有关。在钙质土壤中 pH 为 7.60 ~ 7.74, 有机质含量为 42.17 ~ 46.70 g·kg⁻¹, 施加钝化剂对土壤 pH 值和有机质含量均没有显著影响。

3 讨论

渝西地区目前农田土壤 Cd 一般在 1 mg·kg⁻¹ 以下^[33], 以轻微至轻度污染居多, 安全利用是本区域农田重金属污染防治与修复的重点。本研究中试验田块土壤 Cd 含量在 0.4 ~ 0.5 mg·kg⁻¹ 之间, 反映了该区域稻田土壤典型 Cd 污染状态。试验结果表明, 从相似气候区引进低 Cd 累积水稻品种是可行的, 其稻谷产量与本地主推品种相当且糙米 Cd 含量明显降低。钙质稻田土壤上糙米 Cd 含量比酸性土壤低 1 个数量级, 无论施用钝化剂与否, 糙米 Cd 含量均可满足标准要求; 而在酸性紫色水稻土上, 单纯低 Cd 累积水稻品种仍然存在稻米 Cd 超标的风险, 因此, 酸性稻田土壤是稻米 Cd 超标风险控制的重点。

酸性紫色稻田土壤上, 低 Cd 累积品种联合钝化剂施用可有效控制稻米 Cd 积累, 实现稻米安全品质达标。但不同钝化剂对水稻的增产和降 Cd 效果差异较大。其中, 生物质炭和秸秆有机肥兼具降镉和增产双重效果, 两者均显著增加了稻谷穗粒数, 前者还显著增加了单窝有效穗数。研究表明生物质炭表面含有丰富的羟基等含氧官能团, 具有较高的阳离子交换量, 对重金属有很强的吸持能力, 对水稻稻米 Cd 有很好的控制效果^[34~36], 同时生物质可改善土壤结构, 协调土壤养分供应增加作物产量^[37]; 有机肥含有大量腐殖质类物质, 特别是以秸秆为原料的有机肥, 腐殖质类物质芳香化组分含量较高, 对 Cd 等重金属具有强力络合固定作用, 同时还含有各种作物养分, 本研究还发现两者均降低了稻株茎 Cd 向籽粒的转运, 因此两者增产和降镉效果均较好。铁粉施用显著降低了根系 Cd 富集系数及茎叶向糙米的转运系数, 糙米 Cd 含量也明显降低, 但是稻谷产量有所降低。研究表明, 铁粉施用有利于根系表面铁膜的形成, 铁膜较厚可阻碍 Cd²⁺ 在水稻根系的吸收和向地上部转移、土壤中 Fe²⁺ 可与 Cd²⁺ 竞争水稻根表吸附点位^[18], 同时, 铁粉在土壤中可形成含铁氧化物, 增加土壤对 Cd 的固定^[38], 进而有效减少糙米对 Cd 的累积。但是 Fe 粉成分单一, 含铁物质的施用会降低土壤作物营养如磷的有效性^[39], 以 Fe 粉作为钝化剂应配合

其他措施, 避免水稻产量降低。硅钙肥使酸性土壤稻谷产量有所增加, 而糙米镉含量有所降低, 但统计差异不显著。

钝化剂通过影响土壤性质、改变重金属在土壤中的吸附、沉淀、离子交换和络合作用^[40, 41]等过程, 进而制约重金属在土壤中的形态和活性。在酸性紫色土上, 硅钙肥和秸秆有机肥显著增加了土壤 pH 值, 提高了土壤有机质含量, 降低了 NH₄OAc 可提取态 Cd 的含量; 供试 4 种钝化剂均促进了土壤 Cd 由交换态(AE-Cd)向低活性的残余态(RES-Cd)的转化, 而还原态(RED)和(OXD)的变化不显著, 而稻米中 Cd 的含量主要受到 AE-Cd、OXD-Cd 以及 RES-Cd 含量的制约。不同类型钝化剂对糙米 Cd 累积的效应是其对土壤性质、Cd 形态转化及其稻株体内 Cd 转运分配影响的综合结果。

4 结论

(1) 从相似气候带湖南引进的低 Cd 累积水稻品种——常两优 772, 可适应重庆渝西地区种植, 产量水平与当地主推品种相当, 同时保持了良好地降 Cd 效果, 糙米 Cd 含量可较相似条件下的当地品种降低 20% 左右。

(2) 重庆渝西粮食主产区轻微-轻度 Cd 污染土壤上, 稻米 Cd 安全风险主要存在于酸性紫色稻田土壤上, 该类土壤上单纯种植低 Cd 累积水稻品种尚存在糙米 Cd 超标风险, 而联合钝化剂施用, 可显著降低稻米 Cd 累积, 实现糙米 Cd 含量达标; 而在相似污染水平钙质紫色土上, 糙米 Cd 含量较酸性土壤低 1 个数量级, 无论施用钝化剂与否, 均满足国家标准要求。

(3) 不同种类钝化剂对稻谷产量和对糙米的降 Cd 效果不同。在酸性土壤中, 钝化剂水稻增产效果大小顺序为: 秸秆有机肥 > 生物质炭 > 硅钙肥 > 铁粉; 对糙米的降 Cd 效果大小顺序为: 生物质炭 > 铁粉 > 秸秆有机肥 > 硅钙肥; 而在钙质土壤中水稻增产效果为: 生物质炭 > 硅钙肥 > 秸秆有机肥 > 铁粉; 对糙米的降 Cd 效果大小顺序为: 秸秆有机肥 > 铁粉 > 硅钙肥 > 生物质炭。酸性紫色土上, 生物质炭和秸秆有机肥兼具增产和降 Cd 双重作用, 糙米 Cd 含量满足标准要求。

(4) 钝化剂影响土壤性质、改变土壤 Cd 形态, 从而对水稻 Cd 的吸收转运和籽粒 Cd 累积产生不同效应。酸性紫色土上生物质炭促进了土壤 Cd 的形态向活性比较低的 RES 转化, 秸秆有机肥显著增加了土壤 pH 值和有机质含量; 钙质紫色土主要表现为秸秆有机肥促进了土壤 Cd 的形态向活性比较

低的 RES 转化, 从而降低对水稻 Cd 的吸收和向籽粒中 Cd 的转运。

参考文献:

- [1] 徐加宽, 杨连新, 王余龙, 等. 水稻对有毒重金属元素的吸收与分配机理的研究进展[J]. 植物学通报, 2005, **22**(5): 614-622.
Xu J K, Yang L X, Wang Y L, *et al.* Advances in the study uptake and accumulation of heavy metal in rice (*Oryza sativa*) and its mechanisms[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2005, **22**(5): 614-622.
- [2] 许彬彬. 基于采样策略的污染产区土壤—水稻重金属迁移转化模型及健康损害成本评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. 1-10.
- [3] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.
- [4] 杨祥田, 周翠, 何贤彪, 等. 田间试验条件下不同基因型水稻对 Cd 和 Pb 的吸收分配特征[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 438-444.
Yang X T, Zhou C, He X B, *et al.* Uptake and partition of Cd and Pb among rice genotypes in contaminated paddy soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 438-444.
- [5] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4283-4290.
Wang M E, Peng C, Chen W P. Effects of rice cultivar and typical soil improvement measures on the uptake of Cd in rice grains[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4283-4290.
- [6] Xu L, Cui H B, Zheng X B, *et al.* Changes in the heavy metal distributions in whole soil and aggregates affected by the application of alkaline materials and phytoremediation[J]. RSC Advances, 2017, **7**(65): 41033-41042.
- [7] 黄宇, 廖敏, 叶照金, 等. 两种低镉积累水稻镉含量与土壤镉的剂量-效应关系及调控[J]. 生态与农村环境学报, 2017, **33**(8): 748-754.
Huang Y, Liao M, Ye Z J, *et al.* Cd concentrations in two low Cd accumulating varieties of rice and their relationships with soil Cd content and their regulation under field conditions [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, **33**(8): 748-754.
- [8] 宁皎莹, 周根娣, 周春儿, 等. 农田土壤重金属污染钝化修复技术研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2016, **15**(2): 156-162.
Ning J Y, Zhou G D, Zhou C E, *et al.* Researches on the passivation of heavy metals in agricultural soils: a review[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2016, **15**(2): 156-162.
- [9] 罗远恒, 顾雪元, 吴永贵, 等. 钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(5): 890-897.
Luo Y H, Gu X Y, Wu Y G, *et al.* In-situ remediation of cadmium-polluted agriculture land using stabilizing amendments [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(5): 890-897.
- [10] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(6): 1585-1590.
Liu Z B, Ji X H, Peng H, *et al.* Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(6): 1585-1590.
- [11] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(4): 721-728.
Li J R, Xu Y M, Lin D S, *et al.* In situ immobilization remediation of heavy metals in contaminated soils: a review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(4): 721-728.
- [12] 丁凌云, 蓝崇钰, 林建平, 等. 不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响[J]. 生态环境, 2006, **15**(6): 1204-1208.
Ding L Y, Lan C J, Lin J P, *et al.* Effects of different ameliorations on rice production and heavy metals uptake by rice grown on soil contaminated by heavy metals [J]. Ecology and Environment, 2006, **15**(6): 1204-1208.
- [13] 王霞, 仓龙, 杨杰, 等. 不同生物质炭和矿物钝化材料对镉污染稻田土壤的修复研究[J]. 广东农业科学, 2018, **45**(4): 80-86.
Wang X, Cang L, Yang J, *et al.* Remediation of Cd contaminated paddy soil using different kinds of biochar and mineral materials: a field trial [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, **45**(4): 80-86.
- [14] 王林, 徐应明, 孙扬, 等. 海泡石及其复配材料钝化修复镉污染土壤[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(9): 2093-2098.
Wang L, Xu Y M, Sun Y, *et al.* Immobilization of cadmium contaminated soils using sepiolite and its compound materials [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, **4**(9): 2093-2098.
- [15] 梁学峰, 徐应明, 王林, 等. 天然黏土联合磷肥对农田土壤镉铅污染原位钝化修复效应研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 1011-1018.
Liang X F, Xu Y M, Wang L, *et al.* In-situ immobilization of cadmium and lead in a contaminated agricultural field by adding natural clays combined with phosphate fertilizer [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(5): 1011-1018.
- [16] Sizmur T, Wingate J, Hutchings T, *et al.* Lumbricus terrestris L. does not impact on the remediation efficiency of compost and biochar amendments [J]. Pedobiologia, 2011, **54**(S1): 211-216.
- [17] 李婧, 陈森, 周艳文, 等. 不同土壤钝化剂对土壤镉生物有效性的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, **45**(36): 94-97.
Li J, Chen S, Zhou Y W, *et al.* Effects of different passivators on bio-availability of Cd in soil [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, **45**(36): 94-97.
- [18] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, **27**(9): 3930-3939.
Ji X H, Liang Y C, Lu Y H, *et al.* The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(9): 3930-3939.
- [19] 于亚琴. 不同钝化材料对重金属钝化稳定性机理研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2017.
- [20] 康宏宇, 林健, 张乃明, 等. 不同钝化材料对重金属污染土壤的钝化效果研究[J]. 中国农学通报, 2015, **31**(35): 176-180.
Kang H Y, Lin J, Zhang N M, *et al.* Passivation effect of different passive materials on heavy metal polluted soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, **31**(35): 176-180.
- [21] 孙丽娟, 秦秦, 宋科, 等. 镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(7): 1377-1386.
Sun L J, Qin Q, Song K, *et al.* The remediation and safety utilization techniques for Cd contaminated farmland soil: a review

- [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(7): 1377-1386.
- [22] Zhen R L, Chen Z, Cai C, *et al.* Mitigating heavy metal accumulation into rice (*Oryza sativa* L.) using biochar amendment-a field experiment in Hunan, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(14): 11097-11108.
- [23] 朱颖. 生物炭和石灰石对大冶市农田土壤镉的原位钝化修复[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. 1-5.
- [24] 陈彩艳, 唐文帮. 筛选和培育镉低积累水稻品种的进展和问题探讨[J]. 农业现代化研究, 2018, **39**(6): 1044-1051.
- Chen C Y, Tang W B. A perspective on the selection and breeding of low-Cd rice [J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, **39**(6): 1044-1051.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [26] 尹君, 张毅功, 肖崇彬. 土壤中有效态镉测定方法探讨[J]. 河北农业大学学报, 1993, **16**(4): 37-41.
- Yin J, Zhang Y G, Xiao C B. The study of analysing available cadmium in soil[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1993, **16**(4): 37-41.
- [27] 张朝阳, 彭平安, 宋建中, 等. 改进 BCR 法分析国家土壤标准物质中重金属化学形态[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(11): 1881-1884.
- Zhang C Y, Peng P A, Song J Z, *et al.* Utilization of modified BCR procedure for the chemical speciation of heavy metals in Chinese soil reference material[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(11): 1881-1884.
- [28] 谭长华. 浅析重庆地区水稻高产稳产低耗高效综合栽培技术[J]. 南方农业, 2017, **11**(1): 44-45.
- [29] 邓华健, 肖广全, 陈玉成, 等. 重庆市郊稻米 Cd 风险的原位钝化削减[J]. 环境工程学报, 2018, **12**(12): 3415-3425.
- Deng H J, Xiao G Q, Chen Y C, *et al.* In-situ passivation in Cd polluted paddy fields of Chongqing suburb for rice healthy control [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, **12**(12): 3415-3425.
- [30] 陈齐, 邓潇, 陈珊, 等. 典型土壤不同提取态 Cd 与水稻吸收累积的关系[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2538-2545.
- Chen Q, Deng X, Chen S, *et al.* Correlations between different extractable cadmium levels in typical soils and cadmium accumulation in rice accumulation in rice [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2538-2545.
- [31] Liu K, Lv J L, He W X, *et al.* Major Factors influencing cadmium uptake from the soil into wheat plants [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **113**: 207-213.
- [32] 孙约兵, 王朋超, 徐应明, 等. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4720-4726.
- Sun Y B, Wang P C, Xu Y M, *et al.* Immobilization remediation of Cd and Pb contaminated soil: remediation potential and soil environmental quality [J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4720-4726.
- [33] 何峰. 重庆市农田土壤-粮食作物重金属关联特征与污染评价[D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.
- [34] 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 等. 低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4348-4358.
- Xie X M, Fang Z P, Liao M, *et al.* Potential to ensure safe production from rice fields polluted with heavy cadmium by combining a rice variety with low cadmium accumulation, humic acid, and sepiolite[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4348-4358.
- [35] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, **44**(4): 541-547.
- Yuan J H, Xu R Q. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils[J]. Soils, 2012, **44**(4): 541-547.
- [36] Chen D, Hu G, Li R Y, *et al.* Low uptake affinity cultivars with biochar to tackle Cd-tainted rice—A field study over four rice seasons in Hunan, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 1489-1498.
- [37] 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 等. 土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3716-3721.
- Guo W J, Liang X F, Lin D S, *et al.* Adsorption of Cd²⁺ on biochar from aqueous solution [J]. Environmental Science, 2013, **34**(9): 3716-3721.
- [38] Violante A, Ricciardella M, Pigna M. Adsorption of heavy metals on mixed Fe-Al oxides in the absence or presence of organic ligands[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, **145**(1-4): 289-306.
- [39] Masue Y, Loeppert R H, Kramer T A. Arsenate and arsenite adsorption and desorption behavior on coprecipitated aluminum; iron hydroxides [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(3): 837-842.
- [40] Mahar A, Wang P, Li R H, *et al.* Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: a review[J]. Pedosphere, 2015, **25**(4): 555-568.
- [41] 周慜, 张萌, 陆友伟, 等. 土壤中 Pb、Cd 的稳定化修复技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2015, **37**(5): 83-89.
- Zhou M, Zhang M, Lu Y W, *et al.* A review on remediation of lead and cadmium in soil using stabilization technologies [J]. Environmental Pollution and Control, 2015, **37**(5): 83-89.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)