

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铖, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 $PM_{2.5}$ 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铖, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦亮, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 虎发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对砷污染土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全生产的影响

王港, 余海英*, 李廷轩, 唐婵

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要:为实现镉(Cd)污染农田稻米安全生产,以中度Cd污染农田为研究对象,通过连续2 a的大田试验,对比分析了间歇性淹水和全生育期淹水2种淹水模式下,玉石粉、生物炭和粉煤灰这3种钝化材料施用后对土壤pH,有效Cd和稻米Cd含量的影响。结果表明:①单一淹水处理下,全生育期淹水和间歇性淹水处理均可提高土壤pH,土壤有效Cd降低率分别为3.81%~17.27%和2.25%~6.74%,全生育期淹水处理Cd降低效果优于间歇性淹水处理,但降幅在年际间差异明显;②2种淹水模式下,施用3种钝化材料均可进一步提高土壤pH,并促使土壤中可交换态Cd向残渣态Cd转变,但3种钝化材料在全生育期淹水模式下的钝化效果更好。间歇性淹水模式下,配施3种钝化材料使土壤pH提高0.19~2.20个单位,土壤有效Cd降低率为4.72%~22.68%,稻米Cd降低2.60%~75.75%,降幅在材料间差异显著,表现为:玉石粉>生物炭>粉煤灰;全生育期淹水模式下,配施3种钝化材料使土壤有效Cd降低5.06%~36.63%,稻米Cd降低13.28%~77.01%,亦表现为:玉石粉>生物炭>粉煤灰;③2种淹水模式下,分别配施3种钝化材料,均可显著降低土壤有效Cd含量和稻米Cd含量,但其中仅以全生育期淹水配施玉石粉的组合处理能使本试验条件下的Cd中度污染农田达水稻安全生产标准。该组合处理模式下,连续2 a土壤有效Cd降低率分别达36.63%和25.16%,稻米 $\omega(\text{Cd})$ 为0.058 mg·kg⁻¹(2019年)和0.170 mg·kg⁻¹(2020年),均低于国家水稻安全生产标准0.2 mg·kg⁻¹,实现水稻安全生产。

关键词:淹水模式;镉(Cd);钝化;水稻;安全生产

中图分类号:X171.5 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2022)02-1015-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105053

Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments

WANG Gang, YU Hai-ying*, LI Ting-xuan, TANG Chan

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Cadmium (Cd) accumulation in rice has become a serious public concern; thus, it is important to find an effective approach to reducing Cd accumulation in rice grains to ensure food safety. To investigate the effects of different amendments on Cd accumulation in rice in Cd-contaminated farmland under different flooding treatments, a field experiment with three amendments (jade powder, biochar, and fly ash) and two flooding treatments (intermittent flooding and flooding throughout the whole growth period) was conducted. The results showed that: ① without amendment application, the soil pH significantly increased, whereas the soil available Cd concentration decreased by 3.81%-17.27% and 2.25%-6.74% with the treatments of flooding throughout the whole growth period and intermittent flooding, respectively. Additionally, the immobilizing efficiency of the treatment of flooding throughout the whole growth period was better than that of intermittent flooding; ② under different flooding treatments, amendment application improved soil pH, resulting in a decrease in the soil available Cd concentration along with an increase in the residual Cd concentration. Under the treatment of intermittent flooding, the soil pH increased by 0.19-2.20 units, and the soil available Cd concentration and Cd concentration in rice grains decreased by 4.72%-22.68% and 2.60%-75.75%, respectively, with the application of different amendments. Under the treatment of flooding throughout the whole growth period, the application of different amendments decreased the soil available Cd concentration and Cd concentration in rice grains by 5.06%-36.63% and 13.28%-77.01%, respectively. The immobilizing efficiency in both flooding treatments was jade powder > biochar > fly ash. ③ Under different flooding treatments, the application of amendments significantly reduced the soil available Cd concentration and Cd concentration in rice grains. Among the three amendments, jade powder showed the best capacity of immobilizing efficiency with the treatment of flooding throughout the whole growth period; the soil Cd reduction rates were 36.63% and 25.16%, and the Cd concentrations in rice grains were 0.058 and 0.170 mg·kg⁻¹ in 2019 and 2020, respectively. The Cd concentrations in rice grains were within the limitation of the National Food Hygienic Standard of China. Therefore, combining flooding throughout the whole growth period with jade powder can be considered as an ideal strategy for ensuring rice safety in Cd-contaminated farmland.

Key words: flooding treatment; cadmium; amendments; rice; safety production

近年来随着工业化的快速发展和农业的不合理灌溉和施肥,大量的外源重金属Cd进入农田土壤。根据文献[1],Cd点位超标率达到7.0%,Cd污染农田面积约有 $2.786 \times 10^9 \text{ m}^2$ 。水稻(*Oryza sativa* L.)作为我国主要的粮食作物,极易富集土壤中的Cd^[2,3],并易随食物链进入人体,严重危害身体健康^[4]。文献[5]明确要求加大Cd污染农田的综合防

治力度,保障农田安全生产。因此从源头保证农产品质量安全,实现污染土壤的安全利用已成为急需解

收稿日期: 2021-05-07; 修订日期: 2021-07-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600); 四川省重大科技专项(2018SZDX0029)

作者简介: 王港(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染防治与安全生产, E-mail: wanggang6180@163.com

* 通信作者, E-mail: haiyingaa1@163.com

决的重要课题。

常见的 Cd 污染土壤修复技术包括物理修复、化学修复、生物修复和农艺调控等技术措施^[6,7]。其中钝化修复技术因材料来源广和易于实施而受到学者们的广泛关注和研究^[8-10]；钝化材料可调节土壤性质并提供吸附位点,使 Cd 产生吸附、络合、沉淀和离子交换等一系列反应,从而降低其在土壤中的生物有效性和可迁移性,减轻 Cd 对植物的毒害^[11,12]。目前国内外学者对钝化材料进行了广泛筛选和改性研究,但大多局限于室内培养或盆栽试验^[13,14]；田间效应,尤其是长期效应的研究还相对较少。钝化材料进入土壤后的化学行为和钝化效果受土壤性质和水分条件等诸多因素的影响,因此实际生产中应考虑拟种作物的土壤环境条件和水肥管理措施^[15,16]。而对于水稻而言,不同水分管理模式下土壤化学和生物学特性差异显著,其对钝化材料的影响也不容忽视。学者们对水稻种植下的不同灌溉模式进行了广泛而深入地研究^[17],结果表明全生育期灌溉、干湿交替灌溉和间歇湿润灌溉等,对土壤-水稻系统中 Cd 的有效性具有一定的调控作用^[18,19]。但是如何实现钝化处理与淹水措施联合调控的优化组合,实现水稻安全生产还需要进一步地

探讨。

前期通过盆栽和大田试验筛选得到的效果较好的钝化材料玉石粉、粉煤灰和生物炭,能降低土壤有效 Cd,减少作物 Cd 积累,但之前的研究集中在旱作栽培,缺乏对水作条件的应用和探讨。因此本研究利用玉石粉、粉煤灰和生物炭为材料,基于水稻种植条件下,通过连续 2 a 的大田试验,分析全生育期淹水和间歇性淹水处理下,3 种钝化材料对 Cd 污染土壤的钝化效果,探讨不同组合模式对水稻 Cd 积累的差异,以期获得适宜于中、轻度 Cd 污染农田水稻安全生产的技术模式并提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本试验区位于成都平原某市,试验区气候类型为亚热带季风气候,年平均气温 15.7℃,年日照时数 1 011.3 h,年平均降雨量为 1 053.2 mm。试验地土壤类型为水稻土,基本理化性质如表 1 所示,土壤 pH 为 5.41, ω (总 Cd) 为 0.545 mg·kg⁻¹,依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)的水田 Cd 风险筛选值 0.4 mg·kg⁻¹ (5.5 < pH ≤ 6.5),本试验田属于中度 Cd 污染农田。

表 1 试验田土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested field

项目	pH	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	ω (全氮) /g·kg ⁻¹	ω (碱解氮) /mg·kg ⁻¹	ω (有效磷) /mg·kg ⁻¹	ω (速效钾) /mg·kg ⁻¹	ω (全 Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (有效 Cd) /mg·kg ⁻¹
参数	5.41	44.87	1.15	111.33	40.21	49.67	0.545	0.178

1.2 供试材料

供试水稻品种:泸优 616,由四川农业大学农学院提供。

供试钝化材料:粉煤灰、玉石粉和生物炭,基本理化性质如表 2 所示;其中生物炭为市场购买,粉煤灰为火电厂的燃煤废弃物,玉石粉为天然钙质石材加工过程中产生的废弃石粉,3 种钝化材料的重金属含量均符合《土壤调理剂 通用要求》(NY/T 3034-2016)和《生物炭基有机肥料》(NY/T 3618-2020)。

供试肥料:硫酸钾型复合肥(N 14%、P₂O₅ 16%和 K₂O 15%)。

表 2 供试材料基本性质

Table 2 Basic properties of tested material

材料	获取途径	pH	粒径/mm
粉煤灰	四川成都	10.23	0.15
玉石粉	四川雅安	8.56	0.07
生物炭	贵州毕节	9.17	0.15

1.3 试验设计与处理

本试验设置 2 种淹水模式,4 种土壤处理,共 8

个处理,每处理设 3 次重复(表 3),共计 24 个小区,每小区面积为 12 m² (3 m × 4 m),随机区组排列,各小区采用覆塑料薄膜的田埂分隔,外设保护行。其中 2 种淹水模式为:①全生育期淹水,在水稻生长期始终保持 3 ~ 4 cm 水层的淹水处理;②间歇性淹水,水稻移栽后,仅在水稻返青期、分蘖期和拔节期进行淹水处理,淹水期间保持田间水层在 3 ~ 4 cm 左右,其余生长时期不做淹水处理,保证水稻正常需水量。4 种土壤处理为:①不施用钝化材料、②粉煤灰、③玉石粉和④生物炭(表 3),分别于水稻移栽前 15 d,将钝化材料均匀撒施于土壤表面,经翻耕、混匀和平整土地后进行水稻移栽。在水稻移栽 7 d 后,施用复合肥,施用量为 600 kg·hm⁻² (40 kg·亩⁻¹)。水稻的栽培、施肥和病虫害防治均按当地种植习惯进行。本试验分别于 2019 年和 2020 年的 5 ~ 10 月实施。

1.4 样品的采集与制备

植株样采集:分别于 2019 和 2020 年 10 月水稻成熟期采样,每小区随机选取 3 个 1 m² 样方的水

稻,记录各样方有效穗数,自然风干后测产;同时每小区随机采集 6 株植株样,用自来水和去离子水先后冲洗干净植株,随后将籽粒于烘箱内 75℃ 烘干至恒重,粉碎后备用待测。

表 3 试验田不同处理方式及其用量

Table 3 Different treatment methods and dosage of test fields		
水分管理	土壤处理	钝化材料用量/kg·m ⁻²
间歇性淹水	不施用	—
	粉煤灰	1.125
	玉石粉	1.125
	生物炭	1.125
全生育期淹水	不施用	—
	粉煤灰	1.125
	玉石粉	1.125
	生物炭	1.125

土壤样品采集:分别于 2019 和 2020 年 4 月钝化材料施用前和 10 月水稻收获后,按“S 型采样法”,采集各小区耕层(0~20 cm)混合土样,剔除杂物,自然风干后过 20 目和 100 目尼龙筛备用待测。

1.5 测定项目与方法

土壤 Cd 全量:采用 HNO₃-HClO₄-HF(5:1:1,体积比)消化,原子吸收分光光度计测定(GB/T 17141-1997);土壤有效态 Cd 含量:采用二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提,原子吸收分光光度计测定(GB/T 23739-2009);土壤 Cd 形态:采用改进的 Tessier 六级连续提取法,分为水溶态 Cd、可交换态 Cd、碳酸盐结合态 Cd、铁锰氧化物结合态 Cd、有机络合态 Cd 和残渣态 Cd^[20,21];土壤 pH:采用按水土比 2.5:1(除 CO₂ 去离子水)浸提,pH 计测定^[22];籽粒 Cd 含量:采用 HNO₃-HClO₄(5:1,体积比)消化,原子吸收分光光度计测定(GB 5009.15-2014)。

测定过程中土壤样品分析采用土壤标样(GBW07456),水稻籽粒样品采用糙米标样[GBW(E)100377]和空白样品进行质量控制.土壤 Cd 全量、土壤有效态 Cd 含量、土壤 Cd 形态和水稻样品在分析过程中 Cd 的回收率分别为 98%~102%、98%~101%、96%~104% 和 98%~103%。

1.6 数据统计与分析

水稻籽粒 Cd 富集系数(BCF) = $C_{\text{grain}}/C_{\text{soil}}$

土壤有效 Cd 降低率(E) = $\frac{X_0 - X_n}{X_0} \times 100\%$

式中, C_{grain} 为水稻籽粒 Cd 含量(mg·kg⁻¹), C_{soil} 为土壤总镉含量(mg·kg⁻¹), X_0 为处理前土壤有效态 Cd 含量(mg·kg⁻¹), X_n 为处理后土壤有效态 Cd 含量(mg·kg⁻¹)。

本研究中使用 Excel 2017 进行数据处理,SPSS

22.0 进行统计分析,Origin 9.0 进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 两种淹水模式下施用钝化材料对土壤 pH 的影响

连续 2 a 的田间试验表明,2 种淹水模式下,不同土壤处理均可提高原酸性土壤 pH,但提升幅度因材料不同而差异明显(表 4),表现为:玉石粉>生物炭>粉煤灰>不施用.玉石粉处理后,土壤 pH 可由本底的酸性提升至中性,分别增加 1.34~2.2 个单位(间歇性淹水)和 1.41~2.02 个单位(全生育期淹水)。

表 4 不同淹水模式下钝化处理对土壤 pH 的影响

Table 4 Effect of amendment on soil pH under different flooding treatments			
淹水模式	土壤处理	pH	
		2019 年	2020 年
间歇性淹水	不施用	5.46	5.67
	粉煤灰	5.77	5.87
	玉石粉	7.61	6.75
	生物炭	5.60	6.18
全生育期淹水	不施用	5.47	5.77
	粉煤灰	5.83	5.92
	玉石粉	7.43	6.82
	生物炭	6.14	6.24

2.2 两种淹水模式下施用钝化材料对土壤有效 Cd 及 Cd 形态分布的影响

连续 2 a 的田间试验均证明,2 种淹水模式下,3 种钝化材料均能降低土壤有效 Cd 含量,但降低效果在材料间的差异明显(表 5),表现为:玉石粉>生物炭>粉煤灰>不施用.玉石粉处理后,土壤有效 Cd 含量降幅最大,分别降低 14.66%~22.68%(间歇性淹水)和 25.16%~36.63%(全生育期淹水),表明全生育期淹水更有利于降低土壤有效 Cd 的含量.全生育期淹水模式下,玉石粉、生物炭和粉煤灰对土壤有效 Cd 的钝化效果均优于间歇性淹水模式,其土壤有效 Cd 含量分别较间歇性淹水模式下土壤有效 Cd 进一步降低 2.48%~21.97%(玉石粉)、5.58%~10.7%(生物炭)和 0.34%~7.1%(粉煤灰)。

由图 1 可知,2 种淹水模式下的土壤 Cd 形态分布均表现为:残渣态>可交换态>铁锰氧化物结合态>有机络合态>碳酸盐结合态>水溶态.施用钝化材料可进一步降低土壤表面结合态 Cd 含量,同时增加有效性低的残渣态 Cd 的含量.与间歇性淹水模式相比,全生育期淹水模式下,4 种土壤处理下铁锰氧化物结合态 Cd 含量分别增加了 13.90%~25.24%(玉石粉)、10.83%~21.53%(生

物炭)、19.86%~20.52%(粉煤灰)和15.14%~26.33%(不施用);全生育期淹水模式下,同一钝化材料对活性态Cd的降低效果均优于间歇性淹水模式,以施用玉石粉处理效果最好,这与有效Cd的变化情况一致.

2.3 两种淹水模式下施用钝化材料对水稻产量及籽粒Cd含量的影响

由表6可看出,连续2a的田间试验中,2种淹水模式下,施用3种钝化材料均可提高水稻产量,但产量提升幅度不显著且在钝化材料间亦无显著差异.

表5 不同淹水模式下钝化处理对土壤有效Cd降低效果的影响

Table 5 Effect of amendment on the decrease in soil DTPA-Cd under different flooding treatments

淹水模式	土壤处理	Cd降低率/%	
		2019年	2020年
间歇性淹水	不施用	6.74	2.25
	粉煤灰	13.92	4.72
	玉石粉	14.66	22.68
	生物炭	11.53	9.82
全生育期淹水	不施用	17.27	3.81
	粉煤灰	21.02	5.06
	玉石粉	36.63	25.16
	生物炭	22.23	15.40

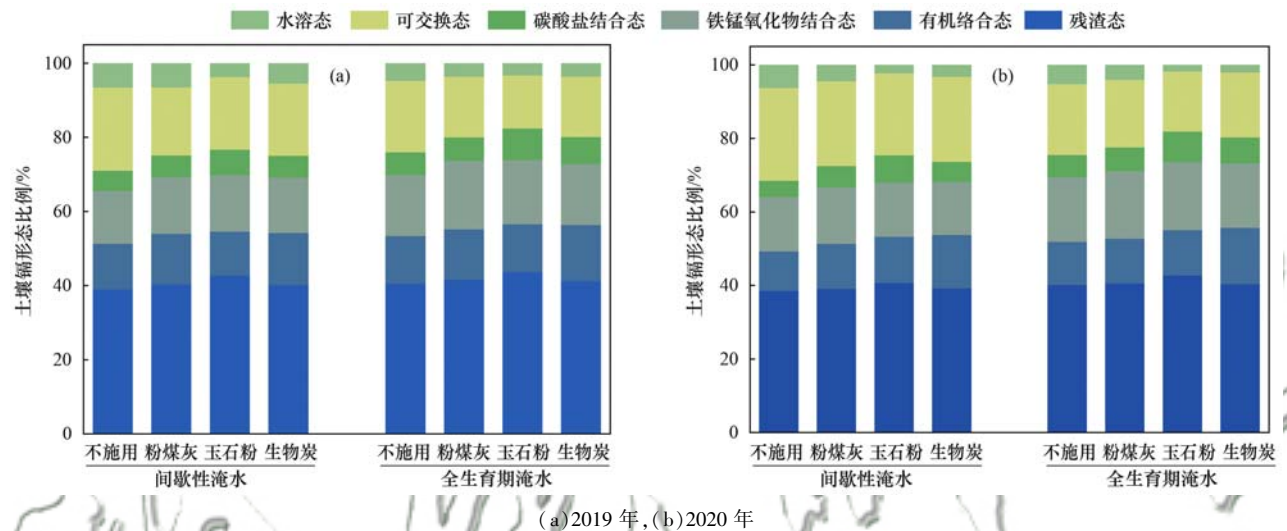


图1 不同淹水模式下钝化处理对土壤Cd形态的影响

Fig. 1 Effect of amendment on Cd chemical fractions in soil under different flooding treatments

由图2可知,连续2a的田间试验均证明,施用钝化材料可显著降低2种淹水模式下的水稻籽粒Cd含量,但全生育期淹水模式下的籽粒Cd含量降幅更大,含量更低,且差异达显著水平.间歇性淹水条件下,施用粉煤灰、玉石粉和生物炭后,水稻籽粒Cd含量分别降低了2.60%~20.95%、15.48%~

75.75%和13.45%~47.08%,全生育期淹水条件下,降幅更大,分别为13.28%~27.74%(粉煤灰)、62.52%~77.01%(玉石粉)和53.13%~67.44%(生物炭).此外,3种钝化材料虽在一定程度上降低了污染农田的水稻籽粒Cd含量,但不同钝化材料的作用效果差异显著,其中以玉石粉效果最佳,表

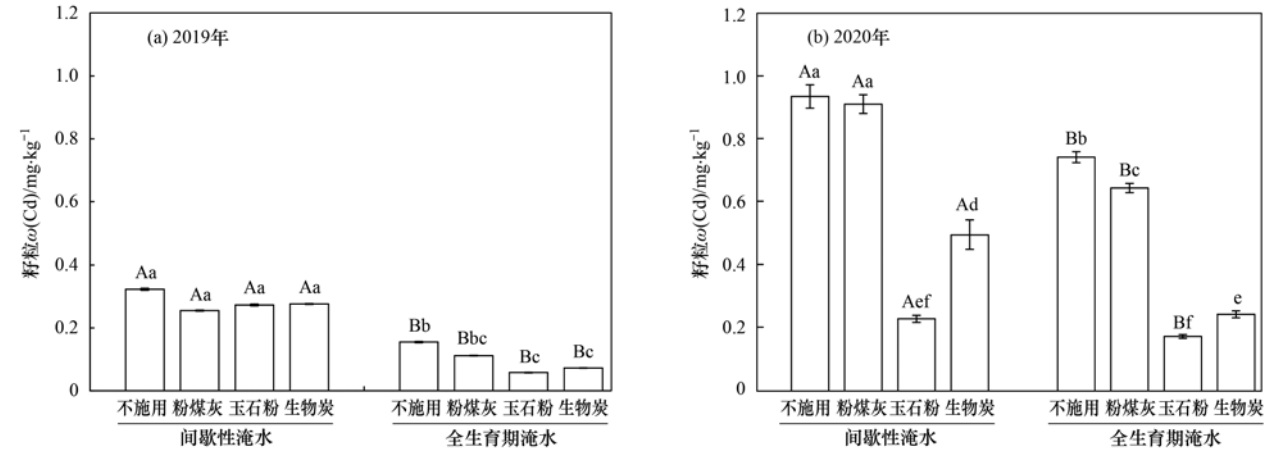


图2 不同淹水模式下钝化处理对水稻籽粒Cd含量的影响

Fig. 2 Effects of amendment on Cd concentration in rice grains under different flooding treatments

现为:玉石粉 > 生物炭 > 粉煤灰,尤其在全生育期淹水模式下,施用玉石粉可连续 2 a 使水稻籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到国家水稻安全生产标准,仅为同年间歇性淹水 + 玉石粉处理下籽粒 Cd 含量的 21.28% (2019 年) 和 75.13% (2020 年)。

表 6 不同淹水模式下钝化处理对水稻产量的影响¹⁾

Table 6 Effects of amendment on rice yield under different flooded treatments			
淹水模式	土壤处理	单产/ $\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$	
		2019 年	2020 年
间歇性淹水	不施用	520 $\pm$ 5b	525 $\pm$ 3b
	粉煤灰	530 $\pm$ 5a	529 $\pm$ 6ab
	玉石粉	530 $\pm$ 6a	530 $\pm$ 6ab
	生物炭	534 $\pm$ 4a	536 $\pm$ 2a
全生育期淹水	不施用	520 $\pm$ 4b	523 $\pm$ 4b
	粉煤灰	527 $\pm$ 4ab	529 $\pm$ 3ab
	玉石粉	526 $\pm$ 4ab	530 $\pm$ 5ab
	生物炭	532 $\pm$ 2a	533 $\pm$ 4a

1) 不同小写字母表示同一淹水模式间差异显著 ($P < 0.05$)

就水稻籽粒 Cd 的富集系数而言(表 7), 2 a 的观测结果均表现为:全生育期淹水 + 钝化 < 间歇性淹水 + 钝化 < 全生育期淹水 < 间歇性淹水,表明全生育期淹水和钝化的组合处理模式最有利于降低土壤 Cd 向水稻籽粒的迁移和富集,该淹水模式下,籽

粒 Cd 富集系数在不同钝化材料间的差异表现为:玉石粉 < 生物炭 < 粉煤灰,以玉石粉处理后的籽粒 Cd 富集系数最低。

由表 8 可知,在本试验条件下,土壤钝化处理、淹水处理和年际变化均会影响水稻籽粒 Cd 的降低效果。统计分析表明,钝化处理对水稻籽粒 Cd 降低效果的贡献率最高,为 65.16%,而淹水处理的贡献率为 7.55%,年际间差异的影响仅为 3.83%。表明在综合考虑大田试验条件下年际间环境和气候等差异特征的基础上,钝化是影响水稻籽粒 Cd 含量的首要因素。

表 7 不同淹水模式下钝化处理对水稻籽粒 Cd 富集系数的影响

Table 7 Effects of amendment on BCF of Cd in rice grains under different flooding treatments			
淹水模式	土壤处理	BCF 籽粒	
		2019 年	2020 年
间歇性淹水	不施用	0.593	1.714
	粉煤灰	0.468	1.670
	玉石粉	0.501	0.416
	生物炭	0.507	0.907
全生育期淹水	不施用	0.284	1.359
	粉煤灰	0.206	1.178
	玉石粉	0.107	0.312
	生物炭	0.133	0.442

表 8 不同淹水模式下钝化处理对水稻籽粒 Cd 降低效果的方差分析

Table 8 ANOVA of the effect of amendments on Cd reduction in rice grains under different flooding treatments						
变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著水平(P)	贡献率/%
淹水	0.292	1	0.292	241.354	<0.01	7.55
钝化	2.519	3	0.84	693.932	<0.01	65.16
年际间	0.148	1	0.148	122.406	<0.01	3.83
淹水 $\times$ 钝化	0.167	3	0.056	46.063	<0.01	4.32
淹水 $\times$ 年际间	0.068	1	0.068	56.159	<0.01	1.76
钝化 $\times$ 年际间	0.517	3	0.172	142.411	<0.01	13.37
淹水 $\times$ 钝化 $\times$ 年际间	0.115	3	0.038	31.797	<0.01	2.97
误差	0.039	32	0.001			
总和	3.866	47				

3 讨论

3.1 两种淹水模式对土壤 pH 及重金属 Cd 有效性的影响

在连续 2 a 田间试验中,2 种淹水模式均能提高土壤 pH,降低土壤有效 Cd 含量,但以全生育期淹水模式效果更好,籽粒 Cd 含量更低。全生育淹水模式下,水溶态 Cd 和可交换态 Cd 含量明显降低,铁锰氧化物结合态 Cd 含量明显增加。这是因为土壤长期淹水会使土壤发生还原反应,由氧化状态转变为还原状态,进而对 pH 有明显的影响^[23];在酸性土壤中淹水,还原反应消耗掉大量的 H^+ ,使 pH 上升^[24~26],从而增加土壤胶体表面负电荷,增加土壤

胶体对 Cd^{2+} 的吸附。而长期淹水,还有利于土壤中原有铁锰氧化物的溶解和新的铁锰氧化物生成,而新的铁锰氧化物具有无定形或微晶形结构,具有更多的吸附位点和吸附容量,能够大量吸附 Cd^{2+} ,进而影响 Cd 形态的再分配^[27,28],降低土壤 Cd 有效性,从而使土壤有效 Cd 含量减少^[29]。有研究表明土壤淹水后可交换态 Cd 占总 Cd 的质量分数明显下降,且下降的部分向活性较低的铁锰氧化物结合态转化^[30]。同时张雨婷等^[31]的研究发现,长期淹水能使水稻根部形成根表铁膜,可阻碍 Cd 从根向茎叶的转移,减少糙米对 Cd 的富集。有研究表明,在长期淹水厌氧模式下,水稻为适应环境其根系形成大量通气组织,植物叶片将大气中的氧气输送到根系,

进而由根系将氧气释放到根际,同时土壤中存在的还原性物质二价铁离子发生氧化生成铁氧化物/氢氧化物沉积植物根表.这种沉积于植物根表的物质称为铁膜,它是具有特殊的物理或化学结构的两性胶体^[32,33].故而其可以通过共沉淀和吸附重金属,进而减少重金属进入植株的数量.而淹水时间越长,越有利于根表铁膜的形成和发育,水稻根表铁膜对Cd的富集随铁膜的厚度增加而增加,进而减少水稻对Cd的吸收和积累^[34,35].因此2种淹水模式均能提高土壤pH,降低土壤Cd的有效性,而全生育期淹水模式效果更优.

3.2 全生育期淹水模式下施用钝化材料对水稻安全生产的影响

在连续2a田间试验中,施用钝化材料可进一步提高2种淹水模式下的土壤pH,降低土壤有效Cd含量和稻米Cd含量,而全生育期淹水模式下的土壤有效Cd和籽粒Cd含量降幅更大,含量更低,以全生育期淹水联合玉石粉处理的降低效果最好,能连续2a实现水稻安全生产,这与前期旱作栽培的研究结果一致^[36,37],表明3种钝化材料尤其是玉石粉在水或者旱种植条件下具有良好的钝化效应.钝化材料施入土壤后,一方面通过本身与 Cd^{2+} 发生的物理和化学反应降低 Cd^{2+} 活性.其中,生物炭富含有机官能团,能够络合Cd降低其有效性^[38];粉煤灰含有硅酸盐和金属氧化物,可以与Cd发生专性吸附和沉淀作用,降低Cd的活性^[39];玉石粉主要组成为 CaCO_3 ,可通过水解反应产生 OH^- ,进而能显著提高土壤pH^[40],同时 CaCO_3 可与土壤中的 Cd^{2+} 生成共沉淀,降低Cd的有效性,进而减少植物对Cd的吸收^[41].另一方面钝化材料作为土壤调理剂可在一定程度上改变土壤物理化学状态,本研究中3种钝化材料均为碱性,施入土壤后能提高土壤pH,增加土壤胶体表面负电荷,促进土壤胶体对Cd的吸附,使土壤中 Cd^{2+} 生成 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 和 CdCO_3 沉淀,降低土壤中Cd的有效性^[42,43].此外淹水可降低土壤Eh,导致铁锰氧化物发生还原溶解,增加无定型氧化铁锰含量,而无定形结构具有更多的吸附位点和吸附容量,可吸附更多的Cd^[44],表明淹水与钝化的组合处理可进一步提升土壤Cd的钝化效应,其中以钝化起主要作用.

本试验中全生育期淹水联合玉石粉处理对镉污染稻田的修复效果最佳,稳定性最好,仅该处理下实现了连续2a水稻安全生产.此外,全生育期淹水联合玉石粉处理在实现水稻安全生产的同时,还能增加水稻产量.且玉石粉为天然钙质石材加工过程中产生的废弃石粉,在本地来源广泛,兼顾低成本、低

风险和高效益的优势.可见,在中轻度Cd污染农田,全生育期淹水联合玉石粉钝化处理是实现水稻安全生产的良好模式.

4 结论

就Cd污染农田的水稻生产而言,全生育期淹水可较间歇性淹水更有利于改良土壤酸性并显著降低土壤有效Cd含量和籽粒Cd含量.2种淹水模式下,施用粉煤灰、生物炭和玉石粉可进一步促进土壤中活性态Cd向残渣态Cd的转化,且3种钝化材料在全生育期淹水处理下的钝化效果均显著优于间歇性淹水处理,其中又以玉石粉效果最佳,该组合处理可显著降低土壤有效Cd、籽粒Cd富集系数和籽粒Cd含量,并连续2a实现中度Cd污染农田的水稻安全生产,是实现Cd污染农田水稻安全生产的良好模式.

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[R].北京:环境保护部,2014.
- [2] Irshad M K, Noman A, Alhaithloul H A S, et al. Goethite-modified biochar ameliorates the growth of rice (*Oryza sativa* L.) plants by suppressing Cd and As-induced oxidative stress in Cd and As co-contaminated paddy soil [J]. Science of the Total Environment, 2020, 717, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137086.
- [3] Kunene S C, Lin K S, Mdlovu N V, et al. Speciation and fate of toxic cadmium in contaminated paddy soils and rice using XANES/EXAFS spectroscopy [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 383, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121167.
- [4] Gu Y, Wang P, Zhang S, et al. Chemical speciation and distribution of cadmium in rice grain and implications for bioavailability to humans [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(19): 12072-12080.
- [5] 秦皇岛市农业农村局.农业农村部办公厅关于印发《轻中度污染耕地安全利用与治理修复推荐技术名录(2019年版)》的通知[EB/OL]. <http://nyncj.qhd.gov.cn/home/details?code=Ng%CE%B3%CE%B3&id=4480&pcode=MA%CE%B3%CE%B3>, 2020-08-06.
- [6] 张迪,吴晓霞,丁爱芳,等.生物炭和熟石灰对土壤镉铅生物有效性和微生物活性的影响[J].环境化学,2019,38(11): 2526-2534.
Zhang D, Wu X X, Ding A F, et al. Effects of hydrated lime and biochar on the bioavailability of Cd and Pb and microbial activity in a contaminated soil [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(11): 2526-2534.
- [7] 王玉婷,王紫玥,刘田田,等.钝化剂对镉污染土壤修复效果及青菜生理效应影响[J].环境化学,2020,39(9): 2395-2403.
Wang Y T, Wang Z Y, Liu T T, et al. Effects of amendments on remediation of cadmium-contaminated soil and physiological characteristics of pakchoi [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(9): 2395-2403.
- [8] 张静静,朱爽阁,朱利楠,等.不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J].环境科学,2020,41(1): 460-468.

- Zhang J J, Zhu S G, Zhu L N, *et al.* Effects of different amendments on fractions and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium and nickel [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 460-468.
- [9] 魏忠平, 朱永乐, 赵楚桐, 等. 生物炭吸附重金属机理及其应用技术研究进展[J]. *土壤通报*, 2020, **51**(3): 741-747.
- Wei Z P, Zhu Y L, Zhao C T, *et al.* Research advances on biochar adsorption mechanism for heavy metals and its application technology[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(3): 741-747.
- [10] 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 等. 两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3535-3548.
- Yuan F, Tang X J, Wu J Z, *et al.* Simultaneous immobilization of arsenic, lead, and cadmium in paddy soils using two iron-based materials [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3535-3548.
- [11] 周春海, 张振强, 黄志红, 等. 不同钝化剂对酸性土壤中重金属的钝化修复研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, **36**(33): 71-79.
- Zhou C H, Zhang Z Q, Huang Z H, *et al.* Passivation and remediation of heavy metals in acid soil with different passivators: a research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, **36**(33): 71-79.
- [12] Shan S P, Guo Z H, Lei P, *et al.* Impacts of a compound amendment on Cd immobilization, enzyme activities and crop uptake in acidic Cd-contaminated paddy soils[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, **101**(4): 243-249.
- [13] 丁园, 敖师营, 陈怡红, 等. 4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 4037-4044.
- Ding Y, Ao S Y, Chen Y H, *et al.* Immobilization mechanism of four kinds of amendments on Cu and Cd in polluted paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 4037-4044.
- [14] 郝金才, 李柱, 吴龙华, 等. 铅镉高污染土壤的钝化材料筛选及其修复效果初探[J]. *土壤*, 2019, **51**(4): 752-759.
- Hao J C, Li Z, Wu L H, *et al.* Preliminary study on cadmium and lead stabilization in soil highly polluted with heavy metals using different stabilizing agents[J]. *Soils*, 2019, **51**(4): 752-759.
- [15] 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 Environment Sciences*, 2018, **27**(7): 1377-1386.
- [16] 易镇邪, 苏雨婷, 谷子寒, 等. 不同生育阶段间歇灌溉对镉污染稻田双季稻产量构成与镉累积的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(5): 364-368.
- Yi Z X, Su Y T, Gu Z H, *et al.* Effects of intermittent irrigation at different growth stages on yield components and cadmium accumulation of double-cropping rice in Cd-contaminated paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(5): 364-368.
- [17] 褚光, 徐冉, 陈松, 等. 干湿交替灌溉对籼粳杂交稻产量与水分利用效率的影响及其生理基础[J]. *中国农业科学*, 2021, **54**(7): 1499-1511.
- Chu G, Xu R, Chen S, *et al.* Effects of alternate wetting and soil drying on the grain yield and water use efficiency of indica-japonica hybrid rice and its physiological bases [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, **54**(7): 1499-1511.
- [18] 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 等. 不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3855-3861.
- Wei B Y, Zhou H, Liu J W, *et al.* Effects of different treatments with water management combined with leaf spraying silicon fertilizer on Cd accumulation in rice[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3855-3861.
- [19] 崔晓莹, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(11): 2177-2184.
- Cui X Y, Qin J H, Li H S. Effect of different water management modes on rice (*Oryza sativa* L.) growth and heavy metal transport characteristics [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(11): 2177-2184.
- [20] Tang X Y, Zhu Y G, Cui Y S, *et al.* The effect of ageing on the bioaccessibility and fractionation of cadmium in some typical soils of China[J]. *Environment International*, 2006, **32**(5): 682-689.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 944-952.
- Li Y X L, Ye C C, Liu Y L, *et al.* Bioavailability of silicon fertilizer coupled water management on soil bioavailability and cumulative control of rice in compound contaminated paddy soils [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 944-952.
- [24] 郑顺安, 吴泽霖, 杜兆林, 等. 风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 386-393.
- Zheng S A, Wu Z Y, Du Z L, *et al.* Combined effect of weathered coal based amendments and soil water management on methylmercury accumulation in paddy soil and rice grains [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 386-393.
- [25] 王瑞昕, 杨静, 方正, 等. 水分管理对水稻籽粒砷累积及根际土壤细菌群落多样性的影响[J]. *土壤学报*, 2021, **58**(6): 1574-1584.
- Wang R X, Yang J, Fang Z, *et al.* Effects of water management on selenium accumulation in rice grains and bacterial community diversity in rhizosphere soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(6): 1574-1584.
- [26] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤 pH 对镉形态影响的研究进展[J]. *土壤*, 2020, **52**(3): 439-444.
- Dou W Q, An Y, Qin L, *et al.* Advances in effects of soil pH on cadmium form [J]. *Soils*, 2020, **52**(3): 439-444.
- [27] 朱丹妹, 刘岩, 张丽, 等. 不同类型土壤淹水对 pH、Eh、Fe 及有效态 Cd 含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(8): 1508-1517.
- Zhu D M, Liu Y, Zhang L, *et al.* Effects of pH, Eh, Fe, and flooded time on available-Cd content after flooding of different kinds of soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(8): 1508-1517.
- [28] 毛凌晨, 叶华. 氧化还原电位对土壤中重金属环境行为的影响研究进展[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(10): 1669-1676.
- Mao L C, Ye H. Influence of redox potential on heavy metal behavior in soils: a review [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(10): 1669-1676.

- [29] 贺前锋, 桂娟, 刘代欢, 等. 淹水稻田中土壤性质的变化及其对土壤镉活性影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(12): 2260-2268.
He Q F, Gui J, Liu D H, *et al.* Research progress of soil property's changes and its impacts on soil cadmium activity in flooded paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(12): 2260-2268.
- [30] Wang J, Wang P M, Gu Y, *et al.* Iron-manganese (oxyhydro) oxides, rather than oxidation of sulfides, determine mobilization of Cd during soil drainage in paddy soil systems [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(5): 2500-2508.
- [31] 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 等. 典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2512-2521.
Zhang Y T, Tian Y B, Huang D Y, *et al.* Effects of water management on cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) growing in typical paddy soil[J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2512-2521.
- [32] 刘春英, 陈春丽, 弓晓峰, 等. 湿地植物根表铁膜研究进展[J]. 生态学报, 2014, **34**(10): 2470-2480.
Liu C Y, Chen C L, Gong X F, *et al.* Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(10): 2470-2480.
- [33] Zhao M, Liu X W, Li Z T, *et al.* Inhibition effect of sulfur on Cd activity in soil-rice system and its mechanism[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **407**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124647.
- [34] 陈佳, 赵秀兰. 水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1535-1544.
Chen J, Zhao X L. Effects of water management and silicon application on iron plaque formation and uptake of arsenic and cadmium by rice[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1535-1544.
- [35] Mao P, Zhuang P, Li F, *et al.* Phosphate addition diminishes the efficacy of wollastonite in decreasing Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) in paddy soil [J]. Science of the Total Environment, 2019, **687**: 441-450.
- [36] 谢霏. Cd 污染土壤钝化材料的筛选及钝化效应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
Xie F. Research on selection of amendments and the immobilization effects of Cd-contaminated soils [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [37] 韩熙, 张锡洲, 余海英. 钝化材料复配对土壤 Cd 生物有效性的影响[J]. 环境工程学报, 2018, **12**(10): 2884-2891.
Han X, Zhang X Z, Yu H Y. Effects of compounds of passivation materials on bioavailability of Cd in soils[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, **12**(10): 2884-2891.
- [38] 尹光彩, 陶琳, 宋小旺, 等. 不同原料生物炭的改性及其吸附/钝化 Cd(II) 效果[J]. 土壤通报, 2020, **51**(3): 748-756.
Yin G C, Tao L, Song X W, *et al.* A review on the modification, Cd (II) adsorption/passivation of biochars prepared by different raw materials[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, **51**(3): 748-756.
- [39] Buema G, Lupu N, Chiriac H, *et al.* Performance assessment of five adsorbents based on fly ash for removal of cadmium ions[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, **333**, doi: 10.1016/j.molliq.2021.115932.
- [40] 王科积, 韩熙, 张锡洲, 等. 钝化材料复配对镉污染土壤中镉的固定效果[J]. 核农学报, 2020, **34**(2): 433-441.
Wang K J, Han X, Zhang X Z, *et al.* Study on effects of passivation material on the fixation of Cd in Cd-contaminated soil [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, **34**(2): 433-441.
- [41] 谢霏, 余海英, 李廷轩, 等. 矿物材料对 Cd 污染土壤中 Cd 的钝化效果[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(4): 2548-2553.
Xie F, Yu H Y, Li T X, *et al.* Effects of mineral materials on passivation effect of Cd in Cd-contaminated soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(4): 2548-2553.
- [42] Xie X J, Yan L, Li J X, *et al.* Cadmium isotope fractionation during Cd-calcite coprecipitation: insight from batch experiment [J]. Science of the Total Environment, 2021, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143330.
- [43] Li X W, Zhang Q W, Yang B. Co-precipitation with CaCO_3 to remove heavy metals and significantly reduce the moisture content of filter residue[J]. Chemosphere, 2020, **239**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124660.
- [44] 汤家庆, 张绪, 黄国勇, 等. 水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1185-1190.
Tang J Q, Zhang X, Huang G Y, *et al.* Effect of water regimes on Pb and Cd immobilization by biochar in contaminated paddy soil[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1185-1190.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)