

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

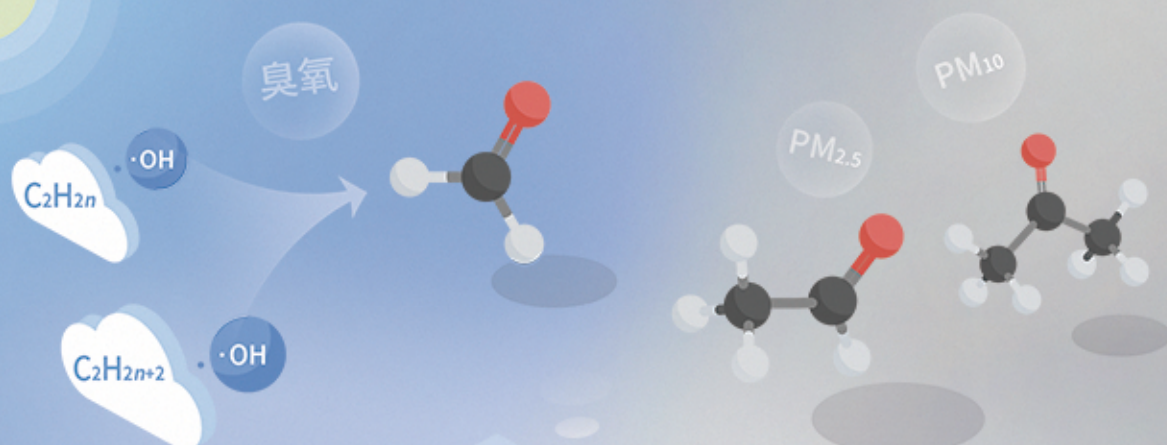
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期
Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测	顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)
基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析	杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)
中原城市群典型城市秋冬季大气 PM _{2.5} 污染特征及溯源	苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)
沈阳市冬季大气 PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析	王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)
保定地区 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)
基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析:以南京市观测为例	胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)
2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源	高璟赞, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐邈, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)
柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析	刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)
天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析	罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)
2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)
2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势	赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)
大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析	李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)
叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比	岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)
东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟	张冰, 张芊芊, 应光国 (127)
松花江哈尔滨段及阿什河抗生菌的分布规律与生态风险评估	杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)
东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估	李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)
河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估	周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)
无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估	王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)
清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估	刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)
会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险	李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼 (184)
三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化	陈昭宇, 李思悦 (195)
不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布	岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)
基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险	张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)
分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制	闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)
丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素	郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)
太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应	郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)
石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量	邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王莹燕, 王子芳 (251)
前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响	陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)
浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制	陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)
填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响	刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)
FeMnNi-LDHs 对水中 As(Ⅲ) 的吸附性能与机制	廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)
硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制	张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)
某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征	颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)
不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替	李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)
天然富硒土地划定的富硒阈值	王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)
融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测	高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴伟杰, 刘楚藩 (343)
南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟	戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)
闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险	林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)
干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响	杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)
三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应	蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宁, 周航, 廖柏寒 (378)
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	郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)
不同施肥措施对水稻土壤微生物拮抗性的影响	郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)
氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性	张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)
黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征	钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)
生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制	冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)
植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响	张瑞海, 宋振, 付卫东, 郭玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)
黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应	史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)
等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响	何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)
秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响	孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)
生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响	杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)
氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响	俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)
微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累	赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)
无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟	阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)
基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析	孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交籼稻籽粒Cd累积及产量的影响

杨茹¹, 陈馨睿¹, 张颖¹, 崔俊义², 武立权^{1,3}, 马友华², 廖江⁴, 何海兵^{1*}

(1. 安徽农业大学农学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 3. 江苏省现代作物生产协同创新中心, 南京 210095; 4. 重庆市武隆区农业农村委, 重庆 408500)

摘要: 干湿交替灌溉具有节水高产特性,但在重金属Cd污染稻田,干湿交替灌溉常导致稻米Cd含量 $>0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,通过添加钝化剂可能对水分高效利用及优质稻米生产具有显著的调控效应。为此,本研究以吸收能力较强的籼型亚种为试材,在前期筛选出的高积累品种(深两优1813)和低积累品种(两优6206)基础上,于Cd轻度污染稻田设置灌溉制度和钝化剂双因素多水平处理开展大田小区试验。结果表明,干湿交替灌溉下,成熟期土壤有效态Cd含量较移栽前降低17.13%~61.01%,而传统淹灌水稻的降低幅度为-43.45%~21.07%,干湿交替灌溉较传统淹灌表现出显著降低土壤有效态Cd含量($P<0.05$)。水稻植株地上部各器官Cd含量则表现为干湿交替灌溉处理明显高于传统淹水灌溉处理。不同钝化剂处理相比较,多孔纳米陶瓷+石灰处理对于降低土壤有效态Cd含量和籽粒Cd含量效果最好,显著优于多孔纳米陶瓷、石灰+有机肥、石灰+生物炭、石灰及不施任何钝化剂处理($P<0.05$)。深两优1813和两优6206在多孔纳米陶瓷+石灰组合修复模式下的籽粒Cd含量分别为 $0.23\sim0.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.16\sim0.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。产量在灌溉制度、品种、钝化剂处理间差异不显著($P>0.05$)。干湿交替灌溉的籽粒Cd含量在多孔纳米陶瓷+石灰组合模式下存在超标风险(深两优1813品种为 $0.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;两优6206品种为 $0.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但通过选用低积累品种,籽粒Cd含量具有可预见性的达标($<0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)潜力。因此,干湿交替灌溉+多孔纳米陶瓷和石灰组合修复模式+低积累品种可视为Cd轻度污染稻田节水高产优质稻米的调优生产模式。

关键词: 杂交籼稻; 干湿交替灌溉; 混合钝化; 纳米材料; 镉(Cd)

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0368-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202005182

Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation

YANG Ru¹, CHEN Xin-rui¹, ZHANG Ying¹, CUI Jun-yi², WU Li-quan^{1,3}, MA You-hua², LIAO Jiang⁴, HE Hai-bing^{1*}

(1. College of Agriculture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production, Nanjing 210095, China; 4. Agricultural and Rural Committee of Wulong, Chongqing 408500, China)

Abstract: Wetting-drying alternation irrigation (WDI) can harvest high grain yield under effective irrigation water saving conditions. However, the kernel cadmium (Cd) content usually exceeds the national standard of $0.20\text{ mg Cd per kg kernel}$ in WDI. Applying a passivating agent with high-efficient repairing capabilities could be a feasible approach to reduce Cd content lower than $0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in WDI. Therefore, a field experiment was conducted with different irrigation regimes and passivating agents in a mildly Cd-polluted paddy field, of which the irrigation regimes were WDI and traditional flooded irrigation (FI) and the six passivating agents treatments were CK (no passivating agent; T1), slaked lime with $1\ 125\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (T2), $1\ 125\text{ kg}$ slaked lime and $3\ 000\text{ kg}$ biochar per hectare (T3), $1\ 125\text{ kg}$ slaked lime and $3\ 000\text{ kg}$ organic fertilizer per hectare (T4), $1\ 500\text{ kg}$ porous Nano stupalith per hectare (T5), and $1\ 125\text{ kg}$ slaked lime combined with $1\ 500\text{ kg}$ porous Nano stupalith per hectare (T6). Two typical Indica hybrid rice varieties with a high accumulated capacity named cultivar Shenliangyou 1813 and a low accumulated trait named cultivar Liangyou 6206 were utilized. The main reason that Indica hybrid rice cultivars were selected was their higher absorbed and accumulated characteristics than that of Japonica rice. The results indicated that available Cd content of the soil significantly declined with 17.13%-61.01% decreasing amplitude at maturity when compared with pre-transplanting in WDI; however, the reduction was in the range of -43.45%-21.07% for the FI treatment across cultivars and passivating agents treatments. The available Cd content at maturity was significantly greater in FI than in WDI ($P<0.05$). In contrast, WDI had higher Cd content on stem, leaf, and kernel organs at maturity than with FI treatment of both cultivars and all of the passivating agents ($P<0.05$). Generally, the T1 treatment had the maximum available Cd content in the soil layer and highest accumulated Cd content on different aboveground organs, followed by the T2, T3, T4, T5, and T6 treatments considering both cultivars and irrigation regimes. The Cd kernel contents were $0.23\sim0.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.16\sim0.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

收稿日期: 2020-05-18; 修订日期: 2020-07-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300505, 2017YFD0301305); 安徽省重点研究与开发计划项目(1804h07020150); 安徽省自然科学基金项目(1908085MC67)

作者简介: 杨茹(1986~),女,硕士,助理实验师,主要研究方向为水资源高效利用与稻米安全生产, E-mail: yangru@ahau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: hhlb_agr@ahau.edu.cn

for cultivars Shenliangyou 1813 and Liangyou 6206, respectively, in the T6 treatment. The higher Cd kernel content was generally related to a larger Cd content in the stem organ. For the grain yield, no significant differences were observed among cultivars, irrigation regimes, or passivating agents treatments ($P > 0.05$). Under WDI, the kernel Cd content was still slightly higher than $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the T6 treatment ($0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for cultivar Shenliangyou 1813 and $0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for cultivar Liangyou 6206); however, there is a predictability potential to produce lower than $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ kernel content in the T6 treatment if a cultivar with low accumulated capacity is used. Thus, the combined mode of the WDI + T6 + cultivar with accumulated low Cd content could be considered an optimized cultivation scheme to obtain no Cd contaminated kernels with high grain yield and water-use efficiency in mildly polluted paddy fields.

Key words: indica hybrid rice; wetting-drying alternation irrigation; multiple passivation combination; nano material; cadmium (Cd)

我国是水稻主要产出国和消费国,近十年来,我国水稻总产维持在 2.0 亿 t 左右,平均总消费量约为 1.9 亿 t,供需关系基本处于平衡状态,自给率较高^[1],消费需求由数量型(高产)向质量型(优质丰产)转变。重金属作为评价卫生品质重要组成部分,是衡量优质稻米的最基本指标。在众多重金属污染中,镉(Cd)污染现象尤为严重,每年将近 1 417 t 镉通过大气沉降、家畜粪便、化肥以及灌水等途径进入农田^[2],且 Cd 输入量按年 $4 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的增量进入土壤, Luo 等^[3]以 1990 年土壤背景值为基准,预估至 2040 年,我国所有耕地的 Cd 含量均可能将高于农用地土壤污染风险值 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中长江三角洲、珠江三角洲和东北老工业基地等部分区域土壤污染问题较其他地区突出^[4]。长江三角洲和珠江三角洲是我国水稻主产区,考虑到水稻 Cd 吸收能力显著高于粳稻^[5],因此, Cd 污染稻田水稻安全生产直接关系到我国粮食安全和人类健康安全。

我国土壤 Cd 含量明显低于欧美发达国家水平,但因我国土壤酸化现象严重,土壤中可被作物直接吸收的有效态 Cd 含量显著增加,进而增大了我国“Cd 大米”生产风险,当土壤 pH 值小于 5.3 时,即便在健康土地上,稻米 Cd 含量仍出现超标现象^[2],因此,减少土壤有效态 Cd 含量相对于降低土壤 Cd 绝对量对于稻米安全生产是更高效和更直接途径。原位钝化修复是指向污染土壤增施钝化剂改变土壤理化性质如 pH 值和氧化还原电位,以期通过钝化材料与 Cd 发生吸附、络合、氧化还原、拮抗及沉淀等机制,达到降低土壤 Cd 有效态含量的目的,被视为中度和轻度污染农田高效低成本的修复手段^[6]。常见钝化剂分为无机类、有机类和有机-无机结合类,石灰、有机肥和生物炭分别是各分类下应用相对较广以及研究频率较高的钝化剂^[7~9],但其对土壤 Cd 的钝化效果以及减少作物对 Cd 的吸收的调控效应与土壤类型、污染程度以及基因型等存在明显差异^[10]。总体来讲,复合钝化剂的使用较单一钝化剂在应对不同土壤背景下均表现出更高效的修复效果^[11~13]。近年来研究表明,纳米材料在对土壤 Cd 吸附和钝化作用方面具有明显优势^[14]。崔俊

义等^[15]通过在轻度污染稻田比较多孔纳米陶瓷材料、石灰和生物炭等钝化材料的修复效果,结果表明多孔纳米陶瓷材料较石灰和生物炭显著降低稻田土壤有效态 Cd 含量和籽粒 Cd 含量,多孔纳米陶瓷和石灰耦合较单一修复或其他组合模式表现出更好的修复效果。因多孔纳米陶瓷材料介孔结构复杂、数量繁多、比表面积高以及在 pH 2 ~ 11 范围内均带负电荷等特性,确保其具有超强吸附能力^[14],基于多孔纳米陶瓷材料的复合修复模式可能是未来稻田安全高效修复的重点方向之一。

稻田水分管理是影响土壤有效态 Cd 含量以及各器官 Cd 含量的农艺调控措施。在水资源紧缺条件下,节水高产的高水分利用效率生产模式是应对水资源危机的重要保障^[16]。相对于传统淹水管理,采用干湿交替灌溉的节水栽培后,稻田土壤有效态 Cd 含量由 8.0% ~ 16.9% 上升到 21.8% ~ 28.5%^[17],但也有研究认为,干湿交替灌溉的稻田土壤有效态 Cd 含量较淹灌呈持平甚至下降趋势^[18,19]。对于水稻植株各器官吸收和累积 Cd 来说,有研究认为灌浆期干湿交替灌溉较淹灌增加了根系 Cd 的累积量,同时显著降低了茎叶和籽粒等器官的 Cd 含量;全生育期干湿交替灌溉会显著增加地上部各器官 Cd 含量^[20~22]。同时也有研究表明,干湿交替灌溉下籽粒 Cd 含量与传统淹灌模式差异不显著^[18,23],造成节水栽培对土壤有效态 Cd 含量和籽粒累积 Cd 含量差异的原因可能与补充灌溉下限标准、气候类型以及基因型差异均有关。

尽管节水灌溉的水稻栽培方式对重金属污染稻田的修复能力存在较大争议,但通过在节水管理稻田里增加不同类型的钝化剂均能进一步降低土壤有效态 Cd 含量以及籽粒 Cd 的累积量^[24~27]。在单一灌溉制度下,干湿交替灌溉土壤有效态 Cd 显著高于淹水灌溉,但通过加入石灰钝化剂处理,两种灌溉制度下土壤有效态 Cd 含量甚至可低至相同水平^[25]。由此表明,通过添加适宜钝化剂,可在 Cd 污染稻田实现节水高产安全稻米生产。那么,对于具有高吸收能力的籼稻而言,基于干湿交替灌溉的纳米及其他复合钝化剂的混合修复技术是否具有高效地

修复能力尚不清楚.为此,本研究拟选用不同 Cd 吸收能力的籼稻品种,设置干湿交替灌溉和包含纳米钝化材料的复合钝化处理,通过探明基因型、灌溉制度以及钝化剂对土壤有效态 Cd 及籽粒 Cd 累积量的耦合调控效应,以期提出 Cd 污染稻田中籼杂交稻优质高产水分高效利用($Cd < 0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的调优栽培制度.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在安徽省内 Cd 轻度污染稻田(Cd 含量

为 $0.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)进行,试验地块土质为中壤土,土壤全氮含量 $1.49\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $106.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $17.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质含量为 $18.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 pH 值为 6.10.

1.2 试验设计

在前期品种筛选基础上,选用镉低积累籼稻品种两优 6206(V1)和高积累籼稻品种深两优 1813(V2)为参试材料,设置灌溉制度和钝化剂双因素多水平处理,其中灌溉制度设置传统淹灌处理(W1)和干湿交替灌溉(W2)处理,钝化剂设置 6 个处理,具体信息详见表 1.

表 1 灌溉制度和钝化剂处理信息¹⁾

Table 1 Details of irrigation regimes and passivating agents

处理编号	处理细则	钝化剂经济投入 /元·hm ⁻²
W1	整个生育期内保持 3~5 cm 浅水层	
W2	分蘖期水层自然落干 5 d 后补充灌溉至 2~3 cm 浅水层,之后落干 2~3 d 补充灌溉	
T1	空白处理,即不添加任何钝化修复剂	0
T2	石灰;施用 $1\,125\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	2\,250
T3	石灰+生物炭;T2 基础上,7 d 后按 $3\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增施生物炭	9\,750
T4	石灰+生物有机肥;T2 基础上,7 d 后按 $3\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增施生物有机肥	5\,850
T5	多孔陶瓷纳米材料; $1\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 多孔陶瓷纳米材料	1\,950
T6	石灰+多孔陶瓷纳米材料;T2 基础上,7 d 后增施 $1\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 多孔陶瓷纳米材料	4\,200

1)灌溉水质无污染;石灰、生物炭、生物有机肥和纳米材料携带 Cd 含量分别为 1.02 、 0.10 、 0.56 及 $0.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,所有钝化剂均属于碱性材质, $\text{pH}>7.5$,钝化剂 Cd 含量符合 GB/T 23349-2009 国标标准 $\leq 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,生物炭和生物有机肥的有机质含量分别为 $460\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $538\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,具体信息参照文献[15];石灰、生物炭、生物有机肥和多孔陶瓷纳米材料每吨单价分别按 $2\,000$ 、 $2\,500$ 、 $1\,200$ 和 $1\,300$ 元计

本研究采用裂区试验设计,灌溉制度为主区,品种为裂区,钝化剂为再裂区,每处理 3 次重复,每个小区面积为 20 m^2 ,具体试验小区分布见图 1.为防止水分和肥料在各小区间的相互影响,小区间起田埂并用塑料包膜隔开.整个生育期施肥总量:纯 N 为 $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.氮肥运筹按基肥:分蘖肥:孕穗肥比例为 $5:2:3$;钾肥一半以基肥施入,另一半以穗肥的形式施入,磷肥全部基施.对于生物炭和有机肥处理小区,因其提供肥源,应折算为 NPK 后补施相应的氮磷钾肥,具体用量参照文献[15],人工拔草,其他管理参照高产田.

1.3 数据测定与分析方法

1.3.1 土壤有效态 Cd 含量测定

分别于移栽前和收获期利用 5 点取样法取 0~20 cm 土层样品,将土样置于阴凉通风处让其自然风干.研磨风干土过 100 目筛,过筛细土用于有效态 Cd 含量测定.有效态 Cd 含量利用原子吸收分光光度计(Z700P)火焰法测定,具体方法参照国家标准《土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法》(GB/T 23739-2009).最后计算种植后土壤有效态 Cd 变化幅度:

重复 1	W1V1T1	W1V1T3	W1V1T2	W1V1T4	W1V1T6	W1V1T5
	W1V2T3	W1V2T2	W1V2T5	W1V2T4	W1V2T3	W1V2T6
	W2V2T5	W2V2T6	W2V2T2	W2V2T3	W2V2T4	W2V2T1
	W2V1T2	W2V1T1	W2V1T3	W2V1T6	W2V1T5	W2V1T4
重复 2	W2V2T4	W2V2T3	W2V2T5	W2V2T1	W2V2T6	W2V2T2
	W2V1T2	W2V1T1	W2V1T3	W2V1T5	W2V1T4	W2V1T5
	W1V1T4	W1V1T3	W1V1T5	W1V1T2	W1V1T1	W1V1T6
	W1V2T1	W1V2T2	W1V2T6	W1V2T3	W1V2T4	W1V2T5
重复 3	W1V2T5	W1V2T6	W1V2T2	W1V2T4	W1V2T1	W1V2T3
	W1V1T1	W1V1T2	W1V1T6	W1V1T2	W1V1T5	W1V1T4
	W2V2T1	W2V2T6	W2V2T2	W2V2T5	W2V2T4	W2V2T3
	W2V1T2	W2V1T1	W2V1T3	W2V1T6	W2V1T5	W2V1T4

处理编号说明见表 1

图 1 田间试验小区分布示意

Fig. 1 Plot distribution in paddy field

土壤有效态 Cd 变化幅度=(收获后土壤有效态 Cd 含量-移栽前土壤有效态 Cd 含量)/移栽前土壤有效态 Cd 含量 $\times 100\%$.

1.3.2 地上部各器官 Cd 含量的测定

成熟期于每个小区内获取 6 穴水稻植株,按照茎鞘、叶片和籽粒分装,烘干至恒重,磨样过筛,利用德国耶拿 Z700P 原子吸收分光光度计石墨炉法测定地上部各器官 Cd 含量,测定方法参见文献[15].

1.3.3 测产

每个小区实收测产,稻谷含水量按 13.50% 计.

1.4 数据计算和统计分析

用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS16.0 统计分析, LSD 法进行多重比较, 一般线性模型 (GLM) 分析品种、灌溉制度和钝化剂互作效应, 皮尔森双尾检验法进行相关性分析, Origin 8.5 软件作图及曲线模拟。

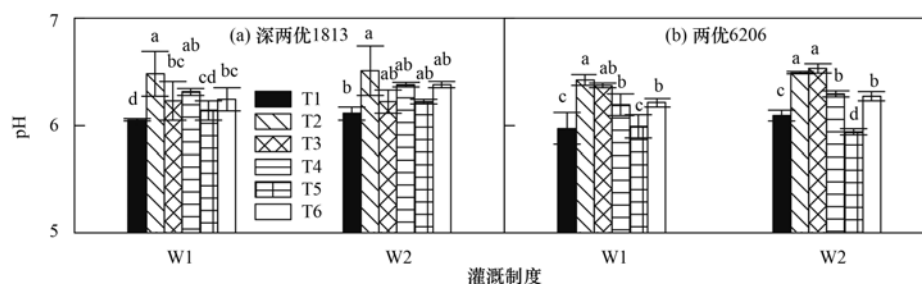
2 结果与分析

2.1 灌溉制度和钝化剂处理对土壤 pH 值和有效态 Cd 含量的影响

如图 2 所示, 不同灌溉制度和品种的 pH 值在钝化剂处理下相较对照 (T1 处理) 均有不同程度地提升, 其中 T2 处理提升幅度最大, pH 值显著高于 T1 处理 ($P < 0.05$)。T5 处理的提升幅度最小, 与 T1 处理差异不显著 ($P > 0.05$)。在同一钝化剂处理下, pH 值在

不同水分处理间和品种间的差异不显著 ($P > 0.05$)。

品种、钝化剂以及灌溉制度均对土壤有效态 Cd 含量有显著影响 ($P < 0.05$, 图 3), 其中钝化剂和灌溉制度对降低土壤有效态 Cd 含量有显著的互促效应 ($P < 0.05$), 但其他组合模式对土壤有效态 Cd 含量无显著的互作效应 ($P > 0.05$)。在同一钝化剂处理及灌溉制度下, 深两优 1813 土壤有效态 Cd 含量均显著高于两优 6206 品种 19.18% ($P = 0.0001$, 图 3)。在不同钝化剂处理间, 两品种和不同灌溉制度均表现为 T1 处理有效态 Cd 含量最高, 整体看来, T5 和 T6 处理对降低土壤有效态 Cd 含量效果最好 (图 3)。不同灌溉制度相比, W1 处理土壤有效态 Cd 含量高于 W2 处理 37.16% ~ 45.11%, 其中两优 6206 在处理间的波动较深两优 1813 更大 (图 3)。



同一水分处理下不同小写字母表示在 5% 水平差异显著, 下同

图 2 不同灌溉制度下钝化剂对土壤 pH 值的影响

Fig. 2 Effects of different passivating agents on pH at soil layer in different irrigation regimes

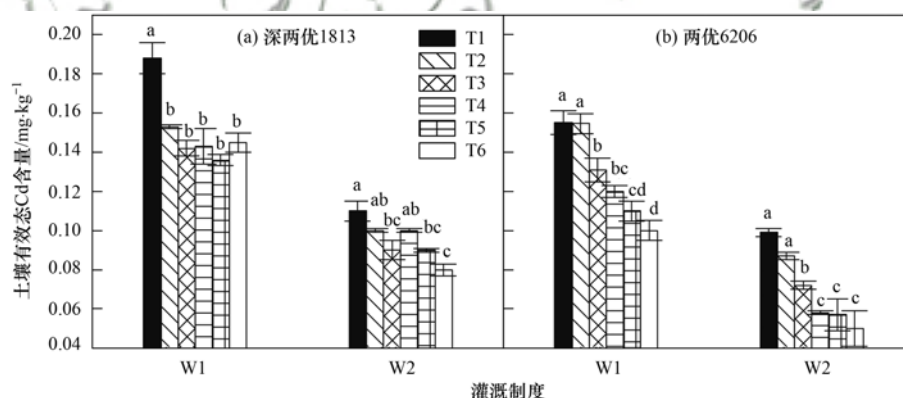


图 3 不同灌溉制度下钝化剂对土壤有效态 Cd 含量的影响

Fig. 3 Effects of different passivating agents on available Cd content at soil layer in different irrigation regimes

移栽前土壤有效态 Cd 平均含量为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从图 4 可以看出, 收获后两品种及不同钝化剂处理的土壤有效态 Cd 含量在干湿交替灌溉 (W2) 处理下均有所降低, 降幅为 17.13% ~ 61.01%。淹水灌溉 (W1) 处理的土壤有效态 Cd 含量除了两优 6206 品种的 T3、T4、T5 和 T6 处理较移栽前降低外, 其他均呈现增加的趋势。总体看来, T4、T5 和 T6 处理相较其他钝化剂处理能够有效降低土壤有效态 Cd 含量, 其中 T6 与 W2 耦合处理效果最好, 降幅高达 37.86% ~ 61.01%。两品种相比

较, 两优 6206 较深两优 1813 更能够有效降低土壤有效态 Cd 含量。

2.2 灌溉制度和钝化剂处理对水稻地上部各器官 Cd 含量的影响

钝化剂处理显著影响各器官 Cd 含量 ($P < 0.05$, 图 5), 其中 T5 ~ T6 处理下各器官 Cd 含量显著低于其他处理, 茎鞘、叶片和籽粒分别较对照显著降低 4.30% ~ 42.96%、14.29% ~ 48.39% 和 40.00% ~ 45.45%。深两优 1813 各器官 Cd 含量显著高于两优 6206 ($P < 0.01$), 其中茎器官 Cd 含量差

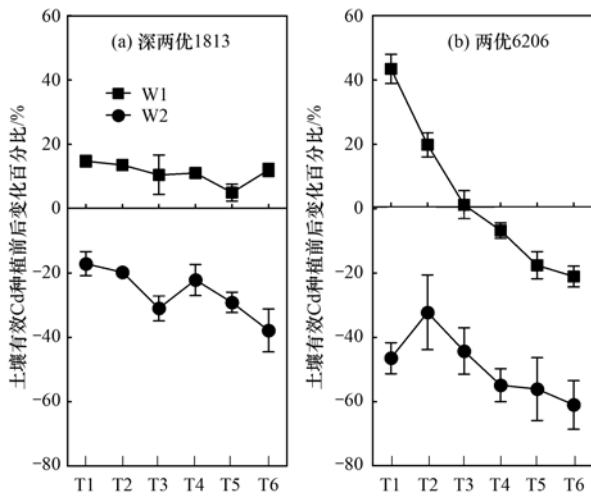


图4 灌溉制度和钝化剂作用下土壤有效态Cd种植前后变幅

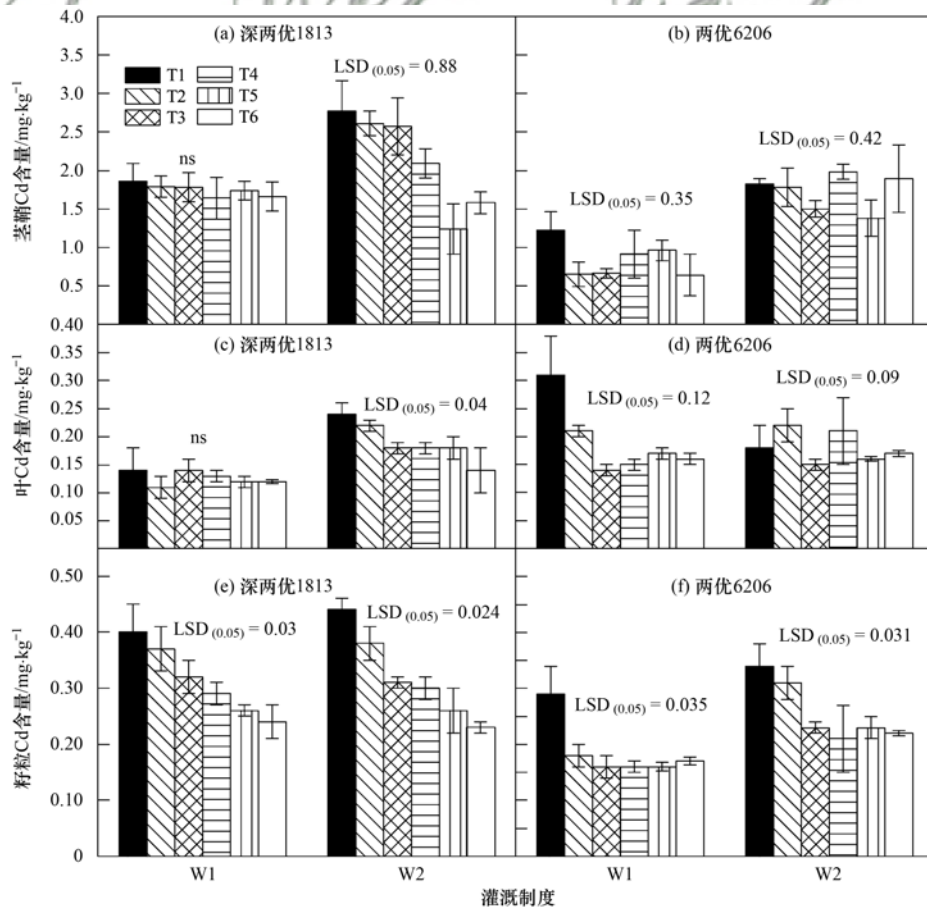
Fig. 4 Ratio of available Cd from preplant to harvest of different passivating agents and irrigation regimes of cultivar SLY1813 and cultivar LY6260

异最大,高出34.03%,籽粒和叶片Cd含量分别高出12.48%和32.11%。不同灌溉制度下,W2处理各器官Cd含量明显高于W1处理。深两优1813在两种灌溉制度下籽粒Cd含量表现为T1>T2>T3>T4>

T5>T6,所有钝化处理的值均高于国家安全标准($0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。两优6206在淹水灌溉(W1)条件下T2、T3、T4、T5和T6处理籽粒Cd含量均低于该标准,其中T4、T5和T6处理小于 $0.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图5);干湿交替灌溉(W2)条件下,钝化剂处理的籽粒Cd含量显著低于对照处理,其中T6处理最低,均值为 $(0.21 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有1个小区的测定值低于 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 标准(图5)。互作分析表明,除钝化剂和灌溉制度对茎秆和叶片Cd含量有显著的互作效应外($P < 0.05$),品种、灌溉制度和钝化剂对地上部各器官Cd含量均无显著的互作效应($P > 0.05$)。

2.3 土壤有效态Cd含量与水稻地上部各器官Cd含量的相关性分析

由表2可知,土壤有效态Cd含量与其种植前后的变化幅度($P = 0.01, R^2 = 0.94$)及籽粒Cd含量($P > 0.05, R^2 = 0.15$)呈现正相关关系,与茎、叶Cd含量呈负相关关系。籽粒Cd含量与土壤有效态Cd含量、土壤有效态Cd含量种植前后的变化幅度、茎鞘Cd含量、叶片Cd含量均呈正相关关系,其中与



LSD_(0.05) 表示在 5% 差异水平的 LSD(最小显著性差异法)值; ns 表示无显著差异

图5 不同灌溉制度下钝化剂对不同镉吸收能力水稻品种地上部各器官Cd含量的影响

Fig. 5 Effects of different passivating agents on Cd content on stem, leaf, and spikelet organs of cultivar SLY1813 and cultivar LY6260 under different irrigation regimes

表 2 土壤有效态 Cd 含量和地上部各器官 Cd 含量相关性

Table 2 Relationships of Cd content among soil layer and aboveground organs					
	So. Cd	SoR. Cd	St. Cd	Le. Cd	Spike. Cd
So. Cd	1	0.94 ***	-0.21	-0.25	0.15
SoR. Cd		1	-0.27	-0.09	0.05
St. Cd			1	0.11	0.77 **
Le. Cd				1	0.22
Spike. Cd					1

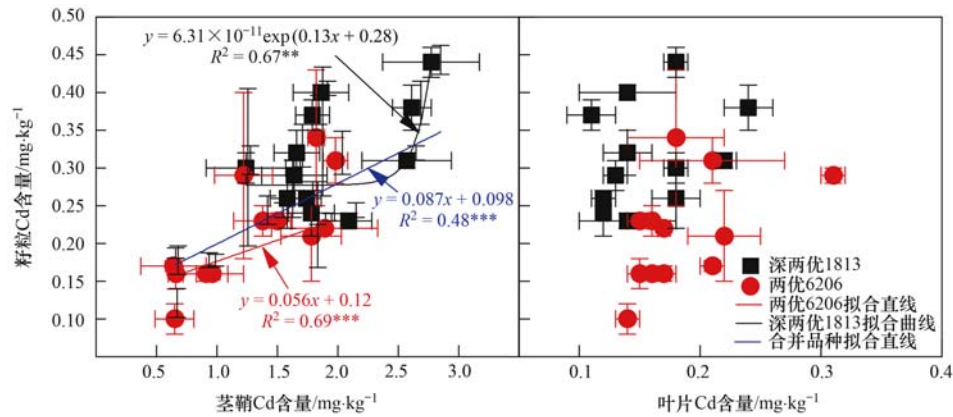
1) So. Cd、SoR. Cd、St. Cd、Le. Cd 和 Spike. Cd 分别表示土壤有效态 Cd 含量、土壤有效态 Cd 含量种植前后变幅百分比、茎鞘 Cd 含量、叶片 Cd 含量以及籽粒 Cd 含量；** 和 *** 分别表示在 1% 和 0.1% 水平显著相关

茎鞘 Cd 含量呈显著正相关关系 ($P = 0.01$, $R^2 = 0.77$). 深入分析表明, 籽粒 Cd 含量 (y) 与茎鞘 Cd

含量 (x) 满足 $y = 0.087x + 0.098$ 线性函数关系, 但存在显著的基因型差异, 两优 6206 的籽粒 Cd 含量与茎鞘 Cd 含量呈线性关系, 而深两优 1813 品种的籽粒 Cd 含量与茎鞘器官 Cd 含量呈现指数函数关系 (图 6).

2.4 灌溉制度和钝化剂处理对水稻产量的影响

如图 7 所示, 两品种水稻产量差异不显著 ($P > 0.05$), 不同灌溉处理相比较, W2 处理产量略高, 比 W1 处理高出 3.2%. 就不同钝化剂处理来看, T4 和 T5 处理的产量水平最高, T1 处理最低, 处理间的产量差在 $0.49 \times 10^3 \sim 0.79 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 总体表现为 W2 和 T5 处理耦合提升产量幅度最大, 为 $0.61 \times 10^3 \sim 0.79 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.



(a) 茎鞘与籽粒 Cd 含量的关系, (b) 叶片与籽粒 Cd 含量的关系

图 6 茎叶器官 Cd 含量与籽粒 Cd 含量相关性

Fig. 6 Relationships between the organs of stem, leaf, and spikelet organs

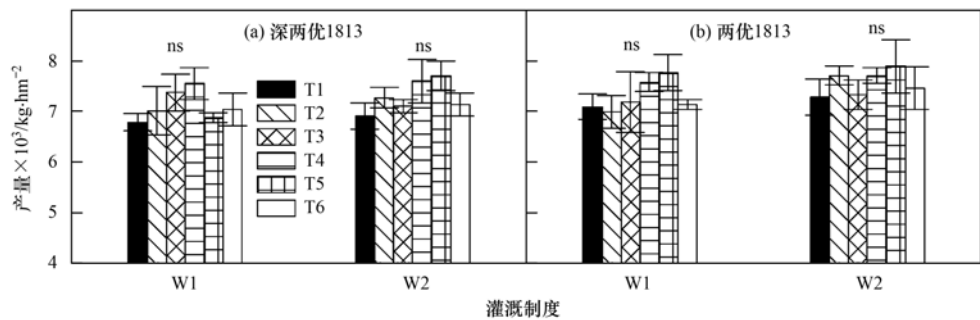


图 7 不同灌溉制度下钝化剂对不同镉吸收能力水稻品种产量的影响

Fig. 7 Effects of different passivating agents on grain yield of cultivar SLY1813 and cultivar LY6260 under different irrigation regimes

3 讨论

3.1 灌溉制度和钝化剂处理对土壤有效态 Cd 含量的调控效应及机制

土壤 pH 是调控土壤有效态 Cd 含量的重要因子, pH 增加能显著降低土壤有效态 Cd 含量^[25]. 本研究中所有钝化剂均属于碱性物质 (见试验方法部分), 故添加钝化剂处理的 pH 值不同程度增加 (图 2), 较 CK 相比, 所有钝化剂处理均降低了土壤有效

态 Cd 含量 (图 3), 这与前人研究结果基本一致^[12,25,28~30]. 虽然 T1 处理对土壤 pH 值增幅效果最优 (图 2), 但从最终钝化效果来看, 以 T6 处理的钝化效果最好 (T6 处理土壤有效态 Cd 含量最低), 明显优于 T5、T4、T3 和 T2 处理 (图 3)^[15], 这可能与不同钝化剂材料对土壤 Cd 含量的吸附-解吸机制不同有关. 增加石灰后, 土粒表面负电荷增加, 促使土粒吸附 Cd^{2+} , 以此降低有效态 Cd 含量^[31,32], 增加氧化复合态和残渣态比重^[12,25]; 生物炭具有疏松多

孔的结构特征和较大的比表面积、孔径孔容面积,羧基等含氧官能团较多,能与镉形成络合物促进 Cd 由酸溶态向残渣态转化^[33];有机肥在耗氧过程中,铁氧化物及锰氧化物还原,促使有效态 Cd 含量降低^[34];纳米陶瓷材料的多孔特征显著增强其对 Cd 有吸附能力,高效降低土壤有效态 Cd 含量^[14]. 从不同钝化剂降低土壤有效态 Cd 含量的作用途径来看,本研究中所添加钝化剂显著降低了酸溶态和可还原态 Cd 含量,残渣态 Cd 含量明显增加,但对可氧化态 Cd 含量的影响较小^[35],其中 T6 处理的变幅最大,酸溶态 Cd 和可还原态 Cd 含量降幅大约为 26% 和 32%,残渣态 Cd 含量增幅为 29.07% ~ 33.79%^[35]. 说明多孔纳米陶瓷材料可能主要通过吸附作用,能同时使酸溶态和可还原态 Cd 含量向残渣态转化,以此降低土壤有效态 Cd 含量(图 3),最终减少水稻地上部吸收与累积(图 5).

本研究结果表明 W2 处理 pH 值较 W1 处理轻微增加(图 2),但 W2 处理土壤有效态 Cd 含量明显低于 W1 处理(图 3),而前人研究表明,在干湿交替灌溉下,土壤有效态 Cd 含量显著高于传统淹灌处理^[17,25],与前人研究结果不一致可能与干湿交替灌溉制度差异所引起的土壤水分不同有关^[18],史磊等^[25]通过在水稻分蘖期 1 次和灌浆期 2 次的落干至重度胁迫复水方式实现干湿交替灌溉目的,肖思思等^[17]则建立水层到水层落干 30 d 后的方式模拟极度重度的干湿交替灌溉,而本研究采用水层落干后 3 ~ 5 d 补充灌溉的轻度干湿交替灌溉制度. 稻田长时间干旱环境下,土层更易形成高氧化环境,进而有利于土壤中有效态 Cd 含量升高^[36]. 此外,该研究区域内的中稻分蘖期梅雨季节发生(6 月中下旬至 7 月初),因受较大降雨影响,建立干湿交替灌溉制度的起始时间实则推迟至分蘖末期(7 月中下旬),稻田分蘖末期至成熟期建立的干湿交替灌溉制度较传统淹水灌溉处理能有效降低土壤有效态 Cd 含量^[18],且随着干湿交替灌溉频次的增加,土壤有效态 Cd 含量降低幅度越大^[19].

3.2 灌溉制度和钝化剂处理对籽粒 Cd 含量的调控效应及机制

忽略品种和灌溉制度因素,纳米材料 + 石灰的组合模式较石灰 + 生物炭、石灰 + 有机肥以及其他单一钝化剂施用均表现出更低的籽粒 Cd 含量(图 5),这与崔俊义等^[15]的研究结果一致. 相对于其他钝化剂材料,纳米材料除了在降低土壤有效态 Cd 含量和籽粒 Cd 含量有较高的优势外(图 3 和图 5),其材料本身的 Cd 含量较低($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 见试验设计部分),仅为常用钝化剂石灰材料和生污有机

肥材料的 10.05% 和 18.21%,说明利用多孔纳米材料钝化剂,土壤中的外源 Cd 增加风险系数较低. 从经济投入角度看,以纳米材料 + 石灰的 T6 处理的投入成本约为 $4200 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 1),仅占生物炭 + 石灰及生物有机肥 + 石灰处理的 72% 和 43%. 由此表明,纳米材料作为 Cd 污染稻田的钝化剂具有低投入高修复低风险特征.

钝化剂材料结构特征及理化特性决定了其钝化潜力,而实际钝化效果还与钝化剂的用量有关. 在蔬菜作物中,大幅高效抑制 Cd 的石灰用量建议为 $2.25 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[31],过高或过低均不利于钝化效应,生物炭施用量为 $1 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时对稻田的降镉效果最为明显^[27]. 当将石灰、赤泥和高岭土混合修复稻田 Cd 时,施用总量为 $4.50 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,按 6:2:4 的比例施用在降低籽粒 Cd 方面能发挥最大互促效应^[13]. 但对于纳米材料和石灰耦合发挥最大互促效应的优化用量目前尚不清楚,纳米材料 + 石灰复合钝化效果可能还有一定提升空间.

与传统淹水灌溉相比,干湿交替灌溉的籽粒 Cd 含量明显增加^[18,20,25,36],本研究表现出相似规律(图 5). 在干湿交替灌溉下,低吸收品种在纳米材料 + 石灰组合模式籽粒 Cd 含量为 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5),虽然较国标高出 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但部分小区已表现出低于 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的结果,加之优化组合的钝化效果还有挖掘空间,降低至低于国标值具有明显的可预见性. 此外,干湿交替灌溉能在显著地降低灌溉次数和灌溉用水量下获得高产(图 7),这在节水高产的同时,减少了稻田 Cd 的输入风险和土壤累积风险. 因此,集成全生育期阶段性干湿交替灌溉 + 低吸收品种 + 纳米材料 + 石灰的稻田管理制度是中籼杂交稻优质丰产高效(资源高效和修复高效)以及生态友好协同实现的重要途径.

一般来说,土壤有效态 Cd 含量越低,作物各器官累积 Cd 含量越小^[18,20,25],本研究不同钝化处理间对土壤有效态 Cd 含量和各器官累积 Cd 含量的调控效应符合该规律,即较低土壤有效态 Cd 含量的钝化剂处理,其各器官 Cd 含量也较低(图 3 和图 5). 从最新研究结果来看,成熟期土壤有效态 Cd 含量与地上部器官 Cd 含量没有严格的一致性^[37],即在低土壤有效态 Cd 含量下,地上部累积 Cd 含量存在更高的现象,本研究在不同水分处理间发现相似的趋势,与传统淹灌相比,干湿交替灌溉在降低土壤有效态 Cd 含量情况下,地上部籽粒 Cd 含量明显增加(图 5),可能主要受土壤水分变化引起的根系吸收能力与再分配特性所支配. 籽粒的 Cd 受两方面影响,一是灌浆期直接吸收,二是抽穗前储存在茎秆

和叶器官的再转运,茎秆抽穗前储存的 Cd 再转运是籽粒 Cd 含量的主要来源^[38],本研究结果在一定程度上支撑这一观点,在成熟期,干湿交替灌溉处理茎秆 Cd 含量显著高于传统淹水灌溉,可能与其在抽穗期茎秆累积较高的 Cd 含量有关,最终籽粒在干湿交替灌溉下显著高于传统淹水处理(图 5),说明减少抽穗期茎秆 Cd 含量可能对于降低籽粒 Cd 含量具有重要意义。移栽至抽穗期间,因分蘖期受频繁降雨影响,干湿交替灌溉次数为 3~4 次,较传统淹水灌溉相比,有限的干湿交替灌溉次数对降低土壤 Cd 含量有限^[19],为干湿交替灌溉根系充分吸收提供了一定保障,加之干湿交替灌溉处理下根系吸收能力增加^[16],可能使得干湿交替灌溉下抽穗期地上部各器官累积量显著高于传统淹水灌溉处理,最终导致干湿交替灌溉在成熟期籽粒中较高的 Cd 含量。而在灌浆期,随着干湿交替灌溉频次不断增加,土壤有效态 Cd 含量显著降低,但灌浆期土壤 Cd 含量的差异对地上部各器官,特别是籽粒器官的影响有限。该结果表明,抽穗前采用淹水灌溉减少地上部累积,而抽穗后干湿交替灌溉减少土壤有效态 Cd 含量的阶段性控制灌溉处理,可能对于协同降低籽粒和土壤有效态 Cd 含量具有积极作用,后续需针对阶段性控制灌溉制度和钝化剂对籽粒和土壤 Cd 含量的互作调控效应及其作用机制进行深入研究。

3.3 品种、灌溉制度和钝化剂修复效果的权重评估及未来研究展望

基于李昂等^[7]建立的概率分布算法评估修复效果,该算法及规则认为:当农产品镉降低率大于 57.10% 或有效态降低率大于 50.10% 时,修复效果评估为优。当农产品镉降低率介于 44.50%~57.10% 或有效态降低率介于 36.70%~50.10% 时,修复效果评估为良;当农产品镉降低率介于 34.50%~44.50% 或有效态降低率介于 26.90%~36.70% 时,修复效果评估为中;而当农产品镉降低率小于 34.50% 或有效态降低率小于 26.90% 时,效果可初步评估为差。对于品种而言,低吸收品种较高吸收品种籽粒 Cd 和土壤有效态 Cd 降低率为 32.05% 和 19.18%,修复等级为差;干湿交替灌溉较传统淹水灌溉降低了土壤有效态 Cd 为 40.81%,修复等级为良好,T6 复合钝化处理的籽粒 Cd 和土壤有效态 Cd 分别较 T1 处理降低了 41.50% 和 32.08%,修复等级为良好。而干湿交替灌溉+低吸收品种+T6 处理耦合模式下,籽粒 Cd 含量和土壤有效态 Cd 含量分别降低了 50.00% 和 73.40%,修复等级达到优,说明基因型+灌溉制度+新型钝化材料的复合钝化作用具有明显的促进效应,其中灌

溉制度和混合钝化在降低籽粒 Cd 含量的贡献度可能高于基因型,这可能与灌溉制度与钝化剂之间存在显著的互作效应有关^[26,27]。

品种、农艺以及钝化修复是实现 Cd 污染稻田优质高效安全生产的基础。在农艺方面还有一些潜在的关键种植技术可运用于 Cd 污染稻田,以此进一步提高 Cd 稻田的健康生产。①种植制度,华中稻区属于长江三角洲核心板块,该区以水稻种植为主,同时该区是我国重要的两熟制地区,存在稻-麦轮作、稻-油轮作、稻-绿肥轮作以及单季稻冬闲田模式。罗芬等^[39]通过 3 a 的大田定位试验,提出南方三熟制地区降低水稻籽粒 Cd 含量轮作模式为稻-稻-油菜,两熟制地区籽粒低 Cd 含量的轮作制度有待系统研究。②秸秆全量还田下两熟制周年肥料运筹制度。小麦秸秆还田后,土壤氧化还原电位降低 3.60%~22.40%^[40],对降低土壤有效态 Cd 具有积极的调控作用。以氮肥为主的肥料周年运筹可能在降低籽粒 Cd 含量方面具有重要作用,以尿素为主要 N 肥源条件下,增加尿素用量增加了籽粒 Cd 含量^[41,42],以缓控释肥为 N 源,硫加树脂双层包膜尿素较硫包膜尿素、树脂包膜尿素以及普通尿素降低了籽粒 Cd 含量,但当前对肥料调控土壤有效态 Cd 和籽粒 Cd 含量机制的认知较欠缺。

4 结论

(1)在轻度污染稻田,多孔陶瓷纳米材料+石灰复合修复模式较石灰、生物炭、有机肥、石灰+生物炭、石灰+有机肥及多孔陶瓷纳米材料表现出低投入高修复低风险特征。结合低积累水稻品种,无论传统淹灌还是干湿交替灌溉处理,多孔陶瓷纳米材料+石灰复合修复均具有降低籽粒 Cd 含量低于国标($0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的潜力。

(2)轻度污染条件下,灌溉制度和钝化剂的修复等级为良好,优于品种差异对稻田的修复能力及籽粒的调控效应,且灌溉制度和钝化剂之间对降低稻田有效态 Cd 含量具有明显的互促优势。采用抽穗前期淹水灌溉,淹水后期干湿交替灌溉的阶段性控制灌溉技术耦合纳米材料的修复组合模式,可能对于协同降低 Cd 污染稻田土壤有效态 Cd 含量和籽粒 Cd 含量具有较大潜力。

参考文献:

- [1] 李腾飞,苏毅清,刘丹妮.我国稻米产业的发展现状、面临困境及应对策略研究[J].食品工业,2016,37(10):224-229.
Li T F, Su Y Q, Liu D N. Research on status quo, difficult position and development strategy of rice processing industry[J]. The Food Industry, 2016, 37(10): 224-229.
- [2] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公

- 报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [3] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [4] 赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略[J]. 中国科学院院刊, 2015, **30**(4): 452-458.
- Zhao Q G, Luo Y M. The macro strategy of soil protection in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, **30**(4): 452-458.
- [5] Shen B B, Wang X M, Zhang Y, *et al.* The optimum pH and Eh for simultaneously minimizing bioavailable cadmium and arsenic contents in soils under the organic fertilizer application[J]. Science of the Total Environment, 2020, **711**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135229.
- [6] Kede M L F M, Correia F V, Conceicao P F, *et al.* Evaluation of mobility, bioavailability and toxicity of Pb and Cd in contaminated soil using TCLP, BCR and earthworms[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, **11**(11): 11528-11540.
- [7] 李昂, 侯红, 苏本营, 等. 基于CNKI文献分析的镉污染土壤钝化技术概况及效果评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(8): 1677-1684.
- Li A, Hou H, Su B Y, *et al.* Assessment of heavy metal passivation technology and evaluation of cadmium-contaminated soil based on CNKI literature analysis[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(8): 1677-1684.
- [8] 邢金峰, 仓龙, 任静华. 重金属污染农田土壤化学钝化修复的稳定性研究进展[J]. 土壤, 2019, **51**(2): 224-234.
- Xing J F, Cang L, Ren J H. Remediation stability of in situ chemical immobilization of heavy metals contaminated soil: a review[J]. Soils, 2019, **51**(2): 224-234.
- [9] 张治国, 胡友彪, 郑永红, 等. 土壤重金属污染修复技术研究统计及分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2019, **39**(1): 7-15.
- Zhang Z G, Hu Y B, Zheng Y H, *et al.* Research statistics and analysis on remediation technology of heavy metals contaminated soils[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2019, **39**(1): 7-15.
- [10] 胡红青, 黄益宗, 黄巧云, 等. 农田土壤重金属污染化学钝化修复研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(6): 1676-1685.
- Hu H Q, Huang Y Z, Huang Q Y, *et al.* Research progress of heavy metals chemical immobilization in farm land[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(6): 1676-1685.
- [11] 杨海君, 张海涛, 刘亚宾, 等. 不同修复方式下土壤-稻谷中重金属含量特征及其评价[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(23): 164-171.
- Yang H J, Zhang H T, Liu Y B, *et al.* Characteristics and its assessment of heavy metal content in soil and rice with different repair methods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(23): 164-171.
- [12] 袁林, 赖星, 杨刚, 等. 钝化材料对镉污染农田原位钝化修复效果研究[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(3): 90-97.
- Yuan L, Lai X, Yang G, *et al.* In-situ remediation of cadmium-polluted agriculture land using passivating materials[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(3): 90-97.
- [13] 李阳, 尹英杰, 朱司航, 等. 不同混施钝化剂对水稻吸收累积Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(2): 247-255.
- Li Y, Yin Y J, Zhu S H, *et al.* Effects of different combined amendments on Cd uptake and accumulation by rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(2): 247-255.
- [14] 李朋飞. 多孔纳米改性材料对土壤Cd、Pb的修复效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. 8-9.
- Li P F. Remediation of porous nano-modified materials on Cd and Pb in soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. 8-9.
- [15] 崔俊义, 马友华, 陈亮妹, 等. 原位钝化-低积累品种联合修复镉污染农田研究[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(7): 77-83.
- Cui J Y, Ma Y H, Chen L M, *et al.* Study on phytoremediation of cadmium contaminated farmland by in-situ inactivation and plant inhibition[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(7): 77-83.
- [16] 何海兵, 杨茹, 廖江, 等. 水分和氮肥管理对灌溉水稻优质高产高效调控机制的研究进展[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(2): 305-318.
- He H B, Yang R, Liao J, *et al.* Research advance of high-yielding and high efficiency in resource use and improving grain quality of rice plants under water and nitrogen managements in an irrigated region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(2): 305-318.
- [17] 肖思思, 李恋卿, 潘根兴, 等. 持续淹水和干湿交替预培养对2种水稻土中Cd形态分配及高丹草Cd吸收的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 351-355.
- Xiao S S, Li L Q, Pan G X, *et al.* Effect of submerging and wetting-redrying on Cd speciation and uptake by sorghum hybrid sudangrass in two paddy soils under spiked Cd[J]. Environmental Science, 2006, **27**(2): 351-355.
- [18] Hu P J, Li Z, Yuan C, *et al.* Effect of water management on cadmium and arsenic accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) with different metal accumulation capacities[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, **13**(5): 916-924.
- [19] 邓林, 李柱, 吴龙华, 等. 水分及干燥过程对土壤重金属有效性的影响[J]. 土壤, 2014, **46**(6): 1045-1051.
- Deng L, Li Z, Wu L H, *et al.* Influence of moisture and drying process on soil heavy metal availability[J]. Soils, 2014, **46**(6): 1045-1051.
- [20] 黄冬芬, 奚岭林, 王志琴, 等. 结实期灌溉方式对水稻品质和不同器官镉浓度与分配的影响[J]. 作物学报, 2018, **34**(3): 456-464.
- Huang D F, Xi L L, Wang Z Q, *et al.* Effects of irrigation regimes during grain filling on grain quality and the concentration and distribution of cadmium in different organs of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, **34**(3): 456-464.
- [21] 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.
- [22] 苏雨婷, 赵英杰, 谷子寒, 等. 灌溉方式对土壤有效镉含量与双季稻产量形成及镉累积分配的影响[J]. 作物研究, 2018, **32**(3): 180-187.
- Su Y T, Zhao Y J, Gu Z H, *et al.* Effect of irrigation mode on soil available Cd content and yield formation and Cd accumulation and distribution of double-cropping rice[J]. Crop Research, 2018, **32**(3): 180-187.

- [23] 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.
- [24] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 水分调控和钝化剂处理对水稻土壤镉的钝化效应及其机理[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(7): 1316-1321.
- Li J R, Xu Y M, Lin D S, *et al.* Immobilization of cadmium in a paddy soil using moisture management and amendments [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(7): 1316-1321.
- [25] 史磊, 郭朝晖, 梁芳, 等. 水分管理和施用石灰对水稻镉吸收与运移的影响[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(24): 111-117.
- Shi L, Guo Z H, Liang F, *et al.* Effects of lime and water management on uptake and translocation of cadmium in rice [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(24): 111-117.
- [26] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 生物炭耦合水分管理对稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(4): 696-704.
- Liyuan X L, Ye C C, Liu Y L, *et al.* Bioavailability of arsenic and cadmium, and their cumulative control in rice grown on arsenic-cadmium-contaminated paddy soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(4): 696-704.
- [27] 王义, 王勃然, 周文涛, 等. 生物炭与水分管理耦合对晚稻镉迁移与积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(7): 1479-1485.
- Wang Y, Wang B R, Zhou W T, *et al.* Effects of biochar application and water management coupling on cadmium transfer and accumulation in late-season rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(7): 1479-1485.
- [28] Fuentes A, Lloréns M, Sáez J, *et al.* Comparative study of six different sludges by sequential speciation of heavy metals [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(3): 517-525.
- [29] 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.
- [30] 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 等. 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5540-5549.
- Wu Q M, Liu G, Wang H F, *et al.* Hydrocalumite passivation effect and mechanism on heavy metals in different Cd-contaminated farmland soils [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5540-5549.
- [31] 陈宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg Cd Pb 的植物可利用性的调控研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(5): 549-552.
- Chen H, Chen Y C, Yang X C. Regulation of phyto-availability of Hg, Cd, Pb in soil by limestone [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2003, **22**(5): 549-552.
- [32] Kim S C, Hong Y K, Oh S J, *et al.* Effect of chemical amendments on remediation of potentially toxic trace elements (PTEs) and soil quality improvement in paddy fields [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, **39**(2): 345-352.
- [33] 陈思慧, 张亚平, 李飞, 等. 钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(3): 563-572.
- Chen S H, Zhang Y P, Li F, *et al.* Remediation of Cd-polluted paddy soils using amendments combined with agronomic measures [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 563-572.
- [34] Han Y S, Park J H, Kim S J, *et al.* Redox transformation of soil minerals and arsenic in arsenic-contaminated soil under cycling redox conditions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **378**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120745.
- [35] 崔俊义. 农田土壤轻度镉污染原位钝化修复技术的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018. 33-36.
- Cui J Y. Study on in situ passivation remediation technology of mild cadmium pollution in farmland soil [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018. 33-36.
- [36] Arao T, Kawasaki A, Baba K, *et al.* Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(24): 9361-9367.
- [37] 魏宾斌, 周航, 刘佳伟, 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.
- [38] 刘建国. 水稻品种对土壤重金属镉铅吸收分配的差异及其机理[D]. 扬州: 扬州大学, 2004. 45-46.
- Liu J G. Variations among rice cultivars in the uptake and translocation of cadmium and lead from soil, and the mechanisms [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004. 45-46.
- [39] 罗芬, 张玉盛, 周亮, 等. 种植制度对水稻籽粒铅、镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(7): 1470-1478.
- Luo F, Zhang Y C, Zhou L, *et al.* Effect of cropping system on Cd and Pb content in rice grains [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(7): 1470-1478.
- [40] 金鑫, 蔡林运, 李刚华, 等. 小麦秸秆全量还田对水稻生长及稻田氧化还原物质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (5): 80-85.
- Jin X, Cai L Y, Li G H, *et al.* Effects of all wheat crop straw application on rice growth and redox substance in rice fields [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013, (5): 80-85.
- [41] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 氮肥品种和用量对水稻产量和镉吸收的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(2): 281-285.
- Jiaka L T, Yu H, Feng W Q, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer type and application rate on cadmium uptake and grain yield of paddy rice [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(2): 281-285.
- [42] 黄荣, 徐应明, 黄青青, 等. 不同水分管理下施用尿素对土壤镉污染钝化修复效应及微生物结构与分布影响[J]. 环境化学, 2018, **37**(3): 523-533.
- Huang R, Xu Y M, Huang Q Q, *et al.* Effects of urea on in-situ remediation of Cd polluted paddy soil and the structure and distribution of soil microbes under different water management [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(3): 523-533.

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i>	(1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i>	(9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i>	(30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i>	(38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i>	(55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i>	(65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i>	(88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i>	(97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i>	(106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i>	(114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo	(127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i>	(136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i>	(147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i>	(159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i>	(166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i>	(175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i>	(184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue	(195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i>	(204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao	(211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i>	(234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i>	(242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i>	(263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i>	(274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i>	(283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i>	(315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i>	(323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i>	(333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i>	(343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i>	(353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i>	(368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i>	(386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i>	(394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i>	(403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i>	(411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i>	(433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i>	(443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i>	(450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i>	(459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i>	(467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i>	(477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i>	(485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i>	(492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i>	(501)