

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素: 以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应

李林峰^{1,2,3,4}, 王艳红^{1,2,3,4}, 李义纯^{1,2,3,4}, 唐明灯^{1,2,3,4}, 李奇^{1,2,3,4}, 艾绍英^{1,2,3,4*}

(1. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广州 510640; 2. 农业部南方植物营养与肥料重点实验室, 广州 510640; 3. 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640; 4. 广东省农业面源污染监测评估与防控工程技术研究中心, 广州 510640)

摘要: 土壤重金属生物有效性和水稻自身的生理活动共同决定糙米的重金属累积。选取广州市郊一土壤镉(Cd)总量未超标但糙米Cd存在超标风险的稻田开展田间小区试验,以土壤重金属有效态和水稻生理阻隔为切入点,研究富硅调理剂(JD)、钙镁调理剂(YY)、富硅调理剂+淹水灌溉(JD+YS)和钙镁调理剂+淹水灌溉(YY+YS)处理对早、晚稻产量、糙米重金属含量、Cd和铅(Pb)富集系数、土壤重金属总量、土壤理化性质以及土壤Cd和Pb形态分布的影响。结果表明:①在土壤 ω (总Cd)仅为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的CK处理中,其早稻糙米 ω (Cd)均值可达 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。早稻品种(杂交稻)糙米对Cd和总As的富集能力强于晚稻品种(常规稻),而对Pb的富集能力不及晚稻品种(常规稻);②单施调理剂JD和YY对早、晚稻糙米的Cd和Pb累积没有明显的阻控效应,但JD+YS和YY+YS处理能显著地抑制早、晚稻糙米的Cd和Pb累积,且以JD+YS处理效果更加明显。JD+YS对早稻Cd和Pb累积的降幅达65.8%和68%,对晚稻的降幅达71.43%和49.15%。JD+YS处理通过提高土壤pH值和维持较低的氧化还原电位,促进土壤Cd和Pb由酸可提取态向还原态和残渣态的转化,明显降低了土壤Cd和Pb的有效态含量;同时,其提供的有效态Si、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 养分供应通过生理阻隔和竞争Cd离子转运通道,进一步抑制了早、晚稻对土壤Cd和Pb的吸收及向糙米的转运。研究成果可为糙米Cd和Pb阻控产品和技术的研发与应用提供科学依据,对指导华南双季稻区的水稻安全生产具有重要意义。

关键词: 水稻; 土壤调理剂; 水分管理; 稻米Cd和Pb累积; 土壤Cd和Pb形态分布

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0472-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106010

Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice

LI Lin-feng^{1,2,3,4}, WANG Yan-hong^{1,2,3,4}, LI Yi-chun^{1,2,3,4}, TANG Ming-deng^{1,2,3,4}, LI Qi^{1,2,3,4}, AI Shao-ying^{1,2,3,4*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China; 4. Guangdong Engineering Research Center for Monitoring and Prevention of Agricultural Non-point Source Pollution, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The bioavailability of heavy metals in soil and the physiological activities of rice determine the accumulation of heavy metals in brown rice. In this study, a field experiment was conducted in a rice paddy in which the total amount of Cd in the soil did not exceed the national standard, whereas the Cd in rice grains was at risk of overreaching in the suburbs of Guangzhou city. The bioavailability of heavy metals in the soil and the physiological barrier of rice were taken as the starting point. The early and late rice yield, brown rice heavy metal content, Cd and Pb enrichment coefficient, total soil heavy metals, soil physical and chemical properties, and soil Cd and Pb species distribution were investigated under the Si-rich amendment (JD), Ca-Mg amendment (YY), Si-rich amendment + flooding irrigation (JD + YS), and Ca-Mg amendment + flooding irrigation (YY + YS) treatments. The results showed that: ① the total ω (Cd) in the soil was only $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the CK treatment. However, the average ω (Cd) in the grain of early rice reached up to $0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The early rice varieties (hybrid rice) had a more vital ability to accumulate Cd and total As in brown rice than that in late rice varieties (conventional rice) but a lower capacity for Pb accumulation. ② JD and YY application alone had no noticeable inhibitory effect on the accumulation of Cd and Pb in brown rice; however, JD + YS and YY + YS treatments significantly inhibited the accumulation of Cd and Pb in brown rice in both early and late rice, especially in the JD + YS treatment, which decreased the Cd and Pb accumulation by 65.8% and 68% for early rice and by 71.43% and 49.15% for late rice, respectively. The primary mechanism of JD + YS was to increase soil pH and maintain a low redox potential to promote soil Cd and Pb to be transformed from acid-soluble to a reduced state and residue state, thus decreasing Cd and Pb to migrate from the soil to the rice. At the same time, it effectively suppressed the absorption and transportation of Cd and Pb by early and late rice via the physiological barrier effect of Si nutrition and the competition for transportation channels between calcium and magnesium ions and cadmium and inhibited the accumulation of Cd and Pb in the brown rice of early and late rice. These results provide a theoretical basis for the exploration and application of the control technologies in the brown rice Cd and Pb resistance and have important practical significance for guiding the safe production in the rice-growing area in South China.

Key words: rice; soil amendment; water management; Cd and Pb accumulation; Cd and Pb species distribution

我国水稻产量约占粮食总产量的40%,且60%以上人口以大米为主食^[1]。华南稻区历来是我国最

收稿日期: 2021-06-01; 修订日期: 2021-06-22

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2020A151011190); 广东省农业科学院学科团队建设项目(202120TD); 广东省重点领域研发计划项目(2019B020218002); 广东省应用型科技研发专项资金项目(2016B020240009)

作者简介: 李林峰(1986~),男,博士研究生,主要研究方向为农田土壤重金属污染与控制, E-mail: lilinfeng@gdaas.cn

* 通信作者, E-mail: Shaoyingai@21cn.com

大的稻米主产区之一, 20 世纪 90 年代以来, 随着工业化和城市化的快速发展, 大量重金属等污染物涌入农田环境. 由于华南稻区土壤的有机质含量较低, 且土壤酸性, 导致土壤中重金属的生物有效性高, 土壤总 Cd 含量未超标但糙米存在超标风险的情况屡屡发生. 长江三角洲地区土壤和水稻糙米中 Cd 含量空间分布研究表明, 在 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.6 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中, 水稻糙米 Cd 含量未超过食品安全国家标准, 而在 $\omega(\text{Cd}) < 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中, 糙米 $\omega(\text{Cd})$ 却能达到 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1[2]}$; 尽管湖南某水稻种植区土壤 $\omega(\text{Cd}) < 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但区域内水稻糙米 Cd 含量超标率可达 43.3%^[3]; 基于农产品安全的土壤重金属有效态限值研究表明, 要保证 95% 水稻品种糙米重金属含量不超标, 其土壤中 $\omega(\text{有效态 Cd})$ 应低于 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1[4]}$. 因此, 如何有效降低土壤中重金属的生物有效性, 阻控其从土壤向水稻籽粒的运移, 减少糙米的重金属累积, 是维持稻田正常生产能力、保证粮食安全的重大科学问题. 近年来国内学者从农艺调控和土壤改良的角度出发, 构建了一套以土壤钝化和生理阻隔为核心的重金属阻控技术体系, 即“水稻低积累品种 (varieties) + 全生育期淹水灌溉 (irrigation) + 外源碱性物料调节酸碱度 (pH) + 辅助措施 (N)”的 VIP + N^[5-7]. 石灰 (CaO) 作为最典型的碱性土壤调理剂, 通过提高土壤 pH, 降低重金属活性, 减少水稻糙米的重金属累积^[8]. 然而, 长期施用石灰可能加速土壤有机质的分解和养分离子淋失, 并导致土壤复酸化的发生^[9], 而且由于其作用机制单一, 在实际应用中往往难以达到理想的修复效果. 利用营养元

素复配天然矿物制成的复合型调理剂——富硅调理剂 (JD) 和钙镁调理剂 (YY) 不仅能够调节土壤酸性还可为作物提供大量有益元素, 被证实是一种比石灰阻控效果更好的调理剂类型^[10, 11]. 然而, 两种调理剂在田间不同水分条件下对糙米重金属含量的阻控效应及其调控机制目前仍未十分明确. 本文以华南地区土壤重金属总量未超标而糙米超标的典型稻田为研究对象, 以耕层土壤重金属有效态和元素生理阻隔为切入点, 开展早、晚稻田田间小区试验, 比较 JD、YY 和调理剂耦合淹水灌溉组合措施对糙米重金属累积的阻控效果, 通过分析影响水稻糙米中重金属累积的关键因素, 阐明两种调理剂耦合水分管理抑制水稻重金属吸收和转运的相关机制, 以期为华南双季稻区的水稻安全生产提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 试验时间及地点

基于 2019 年开展的水稻种植区的土壤和糙米样品调查结果 (表 1), 综合考虑糙米超标情况、种植现状和灌溉条件等因素, 选择在广州市郊一常年水稻种植区稻田开展田间小区试验 ($\text{N}23.236\,002^\circ$, $\text{E}113.663\,671^\circ$), 该试验点的土壤和水稻糙米的重金属含量见表 1, 水稻品种为广 8 优. 本试验时间为 2020 年 3 ~ 11 月, 该稻田土壤质地为黏壤, 属于亚热带季风气候, 近 10 年平均年降雨量 $2\,193.8 \text{ mm}$, 年均最高气温 26.7°C , 土壤 $\omega(\text{有机质}) 27.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阳离子交换量 (CEC) $5.9 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{碱解氮}) 255 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{有效磷}) 37.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{速效钾}) 112.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 值 5.4.

表 1 田间小区试验土壤和糙米重金属含量情况¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Content of heavy metals in the soil and brown rice in the field experiment/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$						
位置/标准	样品	测定指标				
		$\omega(\text{Cd})$	$\omega(\text{Pb})$	$\omega(\text{Cr})$	$\omega(\text{Hg})$	$\omega(\text{As})$
小区试验田	糙米	0.24	0.01	0.01	<0.003	0.1
	土壤	0.15	82.3	41.8	0.16	2.49
国家标准值	糙米	0.2	0.2	1.0	0.02	0.2(无机砷)
	土壤	0.3	80	250	0.5	30

1) 糙米重金属含量标准依据《食品安全国家标准》(GB 2762-2017), 土壤重金属含量标准依据《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)

1.2 供试材料

供试肥料: 基肥为常规尿素 (含 N 46%) 和硫酸钾 (含 K_2O 50%), 追肥为水稻专用复合肥 (N: P: K = 16: 8: 16, 江苏科邦生态肥有限公司). 供试土壤调理剂: JD 是采用白云石、硅石、石灰石和海泡石等材料经特定工艺煅烧而成的一种粉末状矿物调理剂^[11], YY 为自主研发产品, 主要成分为熟石灰、硫

酸钾和无水硫酸镁^[12], 两种改良剂的 pH 值、重金属和成分含量见表 2. 两种调理剂的重金属含量均符合《受污染耕地治理与修复导则》(NY/T 3499-2019) 中对土壤调理剂等农业投入品中重金属含量的相关规定. 供试水稻品种根据当地水稻种植习惯, 早稻为杂交稻 (广 8 优), 晚稻为常规稻 (象牙香占).

表 2 供试调理剂的 pH 值、重金属含量及钙、镁和硅的质量分数

Table 2 The pH value, heavy metal concentration, and percentage content of calcium, magnesium, and silicon in the soil amendment

调理剂	pH	$\omega(\text{Pb})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{Cr})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{Cd})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{As})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{Hg})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{SiO}_2)$ /%	$\omega(\text{CaO})$ /%	$\omega(\text{MgO})$ /%
JD	11.8	19.2	44.7	0.28	6.59	0.03	9.47	43.94	3.94
YY	12	<0.1	13.1	0.108	8.7	<0.003	/	33.7	4.07

1.3 田间试验设计

试验田包括试验小区、隔离行、排水渠、进水渠和保护行. 试验小区采用随机排列, 每个小区间用田埂隔开, 并用黑色地膜进行覆盖, 防止杂草生长和小区间窜水窜肥. 小区面积统一为 20 m² (长 5 m × 宽 4 m), 设置 1 个对照处理和 4 种不同措施处理: 对照(CK)不施加任何土壤调理剂, 水分管理为常规灌溉, 即分蘖末期烤田控制无效分蘖, 此后水稻生育期待田面水自然落干后再进行灌溉, 直至成熟. JD 和 YY 处理是在 CK 基础上, 分别于早、晚稻插秧前 3~5 d, 采用人工撒施土壤调理剂, 施用量均为 2 250 kg·hm⁻², 该用量参考了广东省耕地安全利用土壤调理剂的全年最大用量(粤农农〔2019〕440 号). 富硅调理剂 + 淹水灌溉(JD + YS)和钙镁调理剂 + 淹水灌溉处理(YY + YS)是在撒施调理剂的基础上结合淹水灌溉, 具体是从分蘖末期至成熟期间, 始终保持 3~5 cm 的田面水层, 维持小区的淹水状态. 各处理均设 3 个重复. 除处理不同以外, 水稻生育期按当地种植习惯统一进行施肥、喷药和杀虫等田间管理.

1.4 样品采集及测定方法

水稻成熟后, 采用人工收割各个小区的稻谷, 现场进行脱粒和称重, 记录各小区的产量. 随后从各个小区稻谷中随机抽取 1 kg 稻谷样品带回实验室, 待风干、脱粒后研磨粉碎, 装入自封袋保存待测. 糙米样品用混合酸(10 mL 硝酸和 1 mL 高氯酸)湿法消解, 定容后分别采用石墨炉原子吸收分光光度计(AAnalyst 800, PerkinElmer, Boston, MA, USA)和原子荧光光度计(AFS-8220, Jitian Instruments, Beijing, China)测定糙米中的 Cd、Pb、Cr 和总 As 含量. 采用国家成分分析标准物质 GBW10048(GSB-26)对整个消解和分析测定过程进行质量控制, 标样总 Cd、Pb、Cr 和 As 回收率分别为 104.2%、96.9%、91.5% 和 98.4%.

采用五点取样法于水稻成熟期在各小区内采集 0~20 cm 的耕层土壤, 每个小区的土壤样品混合成一个样品. 将土壤样品带回实验室风干后研磨过 0.15 mm 尼龙筛, 装入自封袋保存待测. 土壤理化性质的测定参照土壤检测标准(NY/T 1121-2006), 其中, 土壤 pH(2.5:1)用酸度计电位法测定, 土壤有

机质采用重铬酸钾容量法测定, 土壤交换态钙、镁采用乙酸铵浸提法测定, 土壤有效硅采用柠檬酸浸提法测定, 土壤有效态 Cd 和 Pb 采用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)浸提法测定. 土壤 Cd 和 Pb 形态分级采用 BCR 顺序提取法测定^[13].

1.5 数据处理

重金属富集系数用于反映田间条件下土壤中重金属向糙米中转运和累积的综合能力. 重金属富集系数 = 糙米重金属含量/土壤中重金属总量.

采用 IBM SPSS 25.0 进行单因素方差分析, 最小显著性法(LSD)进行不同处理间样本均值的多重比较, 检验水平 0.05; 采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行计算、整理和作图; 采用 Canoco for windows 4.5 软件进行冗余分析(RDA).

2 结果与分析

2.1 早、晚稻产量

不同处理下早、晚稻的产量结果如表 3 所示. 对于早稻, 与 CK 相比, JD、JD + YS 和 YY + YS 处理均表现出增加稻谷产量的趋势, 但未达到显著性水平($P > 0.05$); 对于晚稻, 除 JD 处理外, 其余 3 个处理的稻谷产量均表现出下降的趋势, 尽管仍未达到显著性差异($P > 0.05$). 综合早、晚稻的产量结果, 施加土壤调理剂和淹水灌溉没有明显减少早稻产量, 说明其本身并不会严重抑制水稻的正常生长. 尽管已经按当地水稻种植经验做好了农药喷施, 但 2020 年下半年因病虫源基数、作物布局和气候特点

表 3 不同处理下的水稻产量¹⁾

Table 3 Rice yield treated with different treatments				
作物	处理	各小区产量 /kg·(20 m ²) ⁻¹	亩产(湿重) /kg·亩 ⁻¹	增产/%
早稻	CK	19.01 ± 0.1A	633.3 ± 3.33A	/
	JD	19.65 ± 1.15A	655.6 ± 38.5A	3.5
	YY	19.00 ± 0.5A	633.3 ± 16.7A	0
	JD + YS	19.85 ± 0.75A	661.1 ± 25.5A	4.4
	YY + YS	19.35 ± 0.3A	644.4 ± 9.6A	1.8
晚稻	CK	12.40 ± 1a	413.9 ± 33.7a	/
	JD	12.50 ± 2.8a	416.7 ± 92.8a	0.7
	YY	11.75 ± 1.55a	391.7 ± 52.0a	-5.4
	JD + YS	11.60 ± 1.2a	386.1 ± 39.4a	-6.7
	YY + YS	11.25 ± 0.9a	375.0 ± 30.0a	-9.4

1) 数值为平均值 ± 标准差($n = 3$); 相同大写字母表示早稻不同处理间差异不显著($P > 0.05$), 相同小写字母表示晚稻不同处理间差异不显著($P > 0.05$); 1 hm² = 15 亩

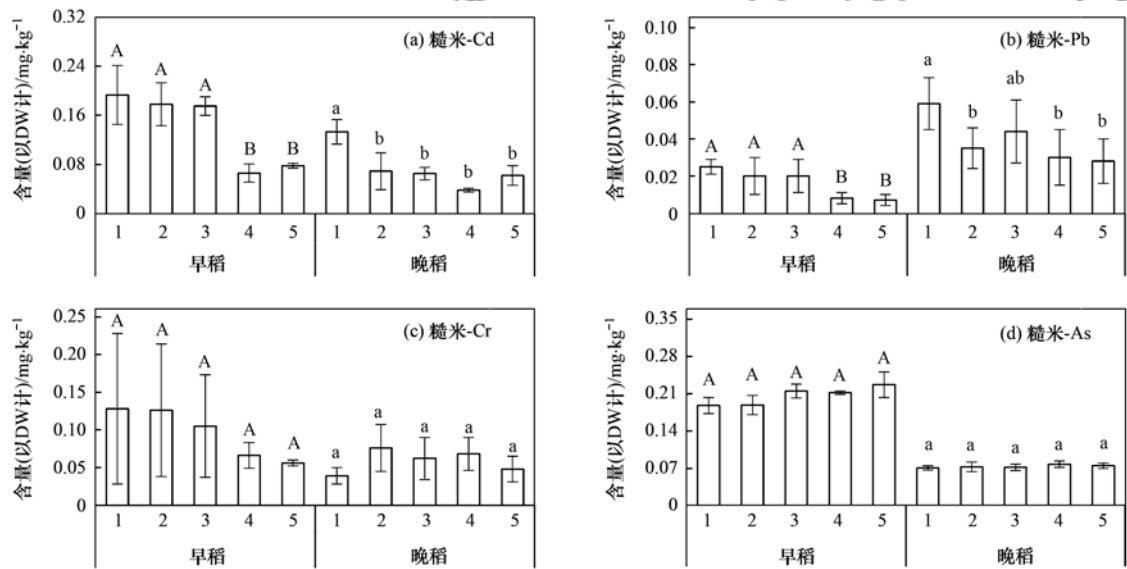
等因素导致的地区性稻飞虱虫害则可能是晚稻产量呈下降趋势的重要原因^[14]. 因此, 调理剂与淹水灌溉对早、晚稻产量的影响可能还需要进一步的田间试验验证.

2.2 早、晚稻的糙米重金属含量

不同处理下早、晚稻糙米重金属含量结果见图 1(糙米 Hg 含量因低于检出限未列出). 对于早稻, CK 处理糙米 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.193 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, JD 和 YY 处理分别降低了 7.77% 和 9.33%, 但未达到显著性水平($P>0.05$); 相比之下, 在结合淹水灌溉后, JD + YS 和 YY + YS 均显著降低了糙米 Cd 含量达 65.8% 和 59.59% [图 1(a), $P<0.05$]. 糙米 Pb 的含量变化与 Cd 类似, 单施 JD 和 YY 未明显地减少糙米 Pb 含量($P>0.05$), 但 JD + YS 和 YY + YS 均显著降低糙米 Pb 含量达 68% 和 72% [图 1(b), $P<0.05$], 表明施用土壤改良剂和淹水灌溉之间存在明显地耦合效应, 两者结合使用可显著促进对早

稻糙米 Cd 和 Pb 的降低效果. 然而, JD + YS 和 YY + YS 处理仍未能影响早稻糙米 Cr 和 As 的累积[图 1(c)和 1(d), $P>0.05$].

对于晚稻, 4 个处理均不同程度地降低了糙米 Cd 含量 ($P<0.05$), 按其降幅依次为: JD + YS (71.43%) > YY + YS (53.38%) > YY (51.13%) > JD (48.12%) [图 1(a)]; 除 YY 处理外, 其余 3 个处理均不同程度地降低了糙米 Pb 含量 ($P<0.05$), YY + YS (52.54%) > JD + YS (49.15%) > JD (40.68%) [图 1(b)]. 综合早、晚稻的结果可知: ①JD + YS 处理对于早、晚稻糙米 Cd 和 Pb 的降低效果最为明显, 且对晚稻的降 Cd 幅度优于早稻, 但对糙米 Cr 和总 As 均无明显阻控作用; ②晚稻(常规稻)的糙米 Cd 和总 As 含量均明显低于早稻(杂交稻), 而 Pb 含量则明显高于早稻, 表明杂交稻对土壤中 Cd 和 As 的富集能力强于常规稻, 而对 Pb 的富集能力弱于常规稻.



1. CK, 2. JD, 3. YY, 4. JD + YS, 5. YY + YS; 不同大写字母表示早稻不同处理间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示晚稻不同处理间差异显著 ($P<0.05$)

图 1 不同处理的早、晚稻糙米重金属含量

Fig. 1 Heavy metal content of brown rice in early and late rice under different treatments

2.3 早、晚稻的土壤重金属含量

对稻田实施安全利用措施的前提是不能造成土壤环境的二次污染. 土壤调理剂的原材料中含天然

矿物成分, 其本身会含有少量重金属元素(表 2). 我们对施加了早、晚稻土壤调理剂处理后的土壤重金属含量进行了测定(表 4), 在本田间小区试验的施

表 4 不同处理的土壤重金属总量¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Total content of heavy metals in the soil with different treatments/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	$\omega(\text{总 Cd})$	$\omega(\text{总 Pb})$	$\omega(\text{总 Cr})$	$\omega(\text{总 Hg})$	$\omega(\text{总 As})$
CK	$0.13 \pm 0.03\text{a}$	$81.65 \pm 7.43\text{a}$	$40.91 \pm 2.04\text{a}$	$0.17 \pm 0.04\text{a}$	$2.56 \pm 0.23\text{a}$
JD	$0.14 \pm 0.02\text{a}$	$80.16 \pm 13.10\text{a}$	$43.98 \pm 4.21\text{a}$	$0.17 \pm 0.05\text{a}$	$2.63 \pm 0.32\text{a}$
YY	$0.12 \pm 0.02\text{a}$	$77.87 \pm 7.76\text{a}$	$41.65 \pm 3.29\text{a}$	$0.16 \pm 0.02\text{a}$	$2.33 \pm 0.30\text{a}$
JD + YS	$0.15 \pm 0.04\text{a}$	$85.10 \pm 17.88\text{a}$	$44.47 \pm 5.87\text{a}$	$0.17 \pm 0.02\text{a}$	$2.51 \pm 0.35\text{a}$
YY + YS	$0.11 \pm 0.02\text{a}$	$75.60 \pm 12.18\text{a}$	$41.66 \pm 4.71\text{a}$	$0.15 \pm 0.03\text{a}$	$2.40 \pm 0.27\text{a}$

1) 数值为平均值 $\pm$ 标准差 ($n=3$); 相同小写字母表示不同处理间差异不显著 ($P>0.05$)

用量前提下,JD 和 YY 的添加均不会导致土壤重金属总量的增加,但在更高用量下是否会增加土壤重金属总量还需进一步验证。

2.4 早、晚稻的重金属富集系数

无论在哪种处理条件下,早、晚稻糙米 Cd 的富集系数均远大于 Pb、Cr 和总 As(表 5),反映了 Cd 在土壤-水稻系统中较强的移动和转运能力,这也是

导致 Cd 能够通过食物链累积威胁人体健康的重要原因。就早稻而言,JD + YS 和 YY + YS 处理显著降低了 Cd 和 Pb 的富集系数,而单独施加 JD 和 YY 均未能降低 Cd、Pb、Cr 和总 As 的富集系数($P > 0.05$);对于晚稻,JD、JD + YS 和 YY + YS 处理显著降低了 Cd 和 Pb 的富集系数,而单独施加 YY 虽降低了 Cd 的富集系数,但未能对 Pb 的富集系数产

表 5 不同处理的早、晚稻糙米重金属富集系数¹⁾

Table 5 Heavy metal enrichment coefficients of brown rice in early and late rice with different treatments

作物	处理	糙米-土壤			
		Cd	Pb	Cr	总 As
早稻	CK	1.52 ± 0.08A	0.000 3 ± 0.000 1A	0.003 ± 0.003A	0.074 ± 0.012A
	JD	1.24 ± 0.11A	0.000 2 ± 0.000 1A	0.003 ± 0.003A	0.073 ± 0.016A
	YY	1.54 ± 0.35A	0.000 3 ± 0.000 1A	0.011 ± 0.015A	0.093 ± 0.008A
	JD + YS	0.47 ± 0.24B	0.000 1 ± 0B	0.001 ± 0.000A	0.086 ± 0.012A
	YY + YS	0.71 ± 0.13B	0.000 1 ± 0B	0.001 ± 0.000A	0.096 ± 0.021A
晚稻	CK	1.06 ± 0.14a	0.000 7 ± 0.000 2a	0.001 ± 0.000a	0.028 ± 0.001a
	JD	0.47 ± 0.16bc	0.000 4 ± 0.000 1b	0.002 ± 0.001a	0.028 ± 0.003a
	YY	0.57 ± 0.17bc	0.000 6 ± 0.000 2ab	0.002 ± 0.001a	0.031 ± 0.007a
	JD + YS	0.26 ± 0.08c	0.000 3 ± 0.000 1b	0.002 ± 0.001a	0.031 ± 0.006a
	YY + YS	0.55 ± 0.04bc	0.000 4 ± 0.000 1b	0.001 ± 0.000a	0.032 ± 0.003a

1) 数值为平均值 ± 标准差($n=3$); 不同大写字母表示早稻不同处理间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示晚稻不同处理间差异显著($P < 0.05$)

生抑制作用($P > 0.05$)。总体上,调理剂联合水分灌溉可显著地降低早、晚稻糙米 Cd 和 Pb 富集系数,且降幅明显优于单施处理。

2.5 土壤理化性质

不同处理下的土壤 pH、土壤交换性 Ca、Mg 和有效 Si 含量具有显著差异(表 6, $P < 0.05$)。对于土壤 pH 值,与 CK 相比(pH 5.69),除 YY 处理以外,其余 3 个处理均显著提高了土壤 pH 值,按提升幅度依次为:JD + YS(31%) > JD(23.2%) > YY + YS(22.8%);对于土壤交换性 Ca,JD 和 JD + YS 处理较 CK 分别增加了 4.5 倍和 5 倍($P < 0.05$),YY 和 YY + YS 处理则与 CK 无明显差异($P > 0.05$);而对于土壤交换性 Mg,JD、YY 和 JD + YS 处理与 CK 相比分别增加了 4.3、4.2 和 4.6 倍($P < 0.05$);与 CK 相比,JD 和 JD + YS 处理的土壤有效 Si 含量分别增加了 4.7 倍和 5.1 倍($P < 0.05$)。以上结果说明,持续淹水条件下施加土壤调理剂可使土壤交换

态 Ca、Mg 和 Si 的增加幅度更加明显,这可能是由于持续淹水条件更有利于土壤调理剂中的矿物组分的充分水解,向土壤中补充大量有效态 Ca、Mg 和 Si 可供水稻吸收和利用。

由 2.2 节的结果可知,调理剂耦合淹水灌溉显著降低了糙米 Cd 和 Pb 含量,而对 Cr 和 As 含量没有明显影响,因此对土壤有效态 Cd 和 Pb 进行了 DTPA 浸提与测定,结果表明,单独施用土壤调理剂 JD 和 YY 对土壤 DTPA-Cd 和 DTPA-Pb 含量均没有显著影响($P > 0.05$),但 JD + YS 和 YY + YS 处理分别降低了土壤 DTPA-Cd 含量 54.2% 和 42.8%,JD 和 JD + YS 处理降低了土壤 DTPA-Pb 含量 26.6% 和 33.6% ($P < 0.05$),证实富硅调理剂和淹水灌溉的耦合效应可显著降低 Cd 和 Pb 在土壤中的生物有效性。

采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)解析了土壤理化性质与早、晚稻糙米 Cd、Pb 和总 As 含

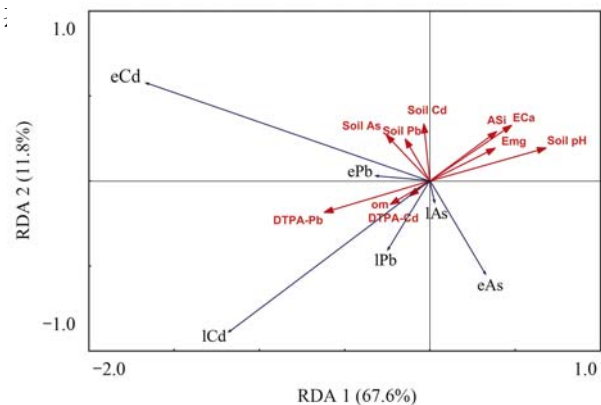
表 6 不同处理下的土壤理化性质¹⁾

Table 6 Physiochemical properties of the soil with different treatments

处理	土壤 pH	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	交换性钙 (以 1/2Ca ²⁺ 计) /cmol·kg ⁻¹	交换性镁 (以 1/2Mg ²⁺ 计) /cmol·kg ⁻¹	ω (有效硅) /mg·kg ⁻¹	ω (DTPA-Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (DTPA-Pb) /mg·kg ⁻¹
CK	5.69 ± 0.37c	28.21 ± 1.78a	2.6 ± 0.56b	0.21 ± 0.03b	40.53 ± 3.82c	0.07 ± 0.02a	12.63 ± 1.56a
JD	7.01 ± 0.81ab	26.74 ± 2.33a	11.6 ± 8.8a	0.91 ± 0.74a	191.57 ± 157.45ab	0.06 ± 0.01a	9.27 ± 2.86b
YY	6.67 ± 0.86abc	26.25 ± 2.64a	6.55 ± 3.41ab	0.88 ± 0.48a	69.63 ± 19.8c	0.06 ± 0.01a	9.97 ± 0.84ab
JD + YS	7.45 ± 0.09a	28.52 ± 2.07a	13.01 ± 2.1a	0.96 ± 0.22a	207.10 ± 40.83a	0.04 ± 0.01b	8.38 ± 1.69b
YY + YS	6.99 ± 0.19ab	25.92 ± 3.42a	6.12 ± 0.91ab	0.59 ± 0.07ab	65.00 ± 6.36c	0.05 ± 0.01b	10.61 ± 0.92ab

1) 数值为平均值 ± 标准差($n=3$); 不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

量的相关关系(图2)。结果显示,RDA 分析第一轴和第二轴解释了土壤理化性质水平上早、晚稻糙米重金属含量变异程度的79.4%,其中第一轴占67.6%,第二轴占11.8%。红色箭头向量表示土壤理化性质(环境因子),黑色箭头向量表示糙米重金属含量,向量间的夹角表示两者的相关关系,锐角表示正相关,钝角表示负相关。拟合结果表明,早、晚稻糙米Cd含量(eCd和ICd)和Pb含量(ePb和IPb)与土壤有效态Cd含量(DTPA-Cd)和土壤有效



eCd:早稻糙米Cd含量;ICd:晚稻糙米Cd含量;ePb:早稻糙米Pb含量;IPb:晚稻糙米Pb含量;eAs:早稻糙米总As含量;IAs:晚稻糙米总As含量;Soil Cd:土壤总Cd含量;Soil Pb:土壤总Pb含量;Soil As:土壤总As含量;DTPA-Cd:土壤有效态Cd;DTPA-Pb:土壤有效态Pb;om:土壤有机质;ASi:土壤有效态Si;ECa:土壤交换态Ca;EMg:土壤交换态Mg;Soil pH:土壤pH值;红色箭头向量表示土壤理化性质(环境因子),黑色箭头向量表示糙米重金属含量,向量间的夹角表示两者的相关关系,锐角表示正相关,钝角表示负相关

图2 糙米重金属含量与土壤理化性质的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis of brown rice Cd concentrations and soil environmental factors

(DTPA-Pb)含量呈正相关,与土壤pH值、土壤有效态Si(ASi)、可交换态Ca(ECa)和可交换态Mg(EMg)含量呈负相关,而与土壤总Cd、总Pb和总As呈弱相关,进一步明确土壤中重金属总量并不是影响糙米重金属累积的关键因素,相比之下,土壤DTPA-Cd和DTPA-Pb含量的下降,以及土壤pH值、有效态Si、可交换态Ca和Mg含量的增加均有利于早、晚稻糙米中Cd和Pb含量的下降,可以推测土壤调理剂和淹水灌溉显著减少早、晚稻糙米Cd和Pb累积的主要原因与其降低土壤Cd和Pb的生物有效性,以及通过Si、Ca和Mg营养实现生理阻控密切相关。

2.6 土壤Cd和Pb的形态分布

为进一步明确不同处理对土壤Cd和Pb有效态的影响机制,采用BCR顺序提取法对土壤Cd和Pb赋存形态进行了分析(图3)。对于Cd,与CK相比,JD+YS、YY+YS和JD处理下的酸可提取态Cd(acid-soluble)占比呈不同程度地下降,主要转化成可还原态(reducible),少部分转化为氧化态(oxidizable)和残渣态(residual),其中以JD+YS的降幅最大,而单施YY对酸可提取态Cd占比几乎无影响,这也与DTPA-Cd含量结果相互佐证(表6)。对于土壤Pb,其酸可提取态占比不足15%,远小于土壤Cd的酸可提取态占比,说明土壤Pb的有效性明显低于Cd,这也是导致水稻糙米对Pb的富集能力远弱于Cd的原因(表5);从Pb的形态分布看,4种处理均不同程度地降低了酸可提取态Pb含量,将其转化为可还原态和残渣态,且仍以JD+YS的降幅最为明显。

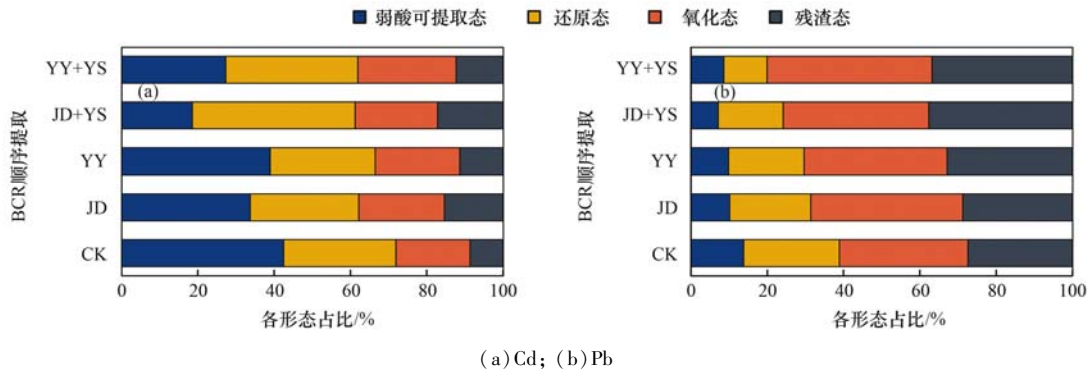


图3 不同处理下土壤中Cd和Pb的BCR形态分级

Fig. 3 BCR distribution of Cd and Pb species in the soil with different treatments

3 讨论

水稻糙米中重金属的累积是土壤-水稻互作的结果,土壤重金属有效态含量和水稻自身的生理活动共同决定糙米中重金属含量的高低^[15,16],本田间

小区试验的土壤重金属总量未超标而糙米重金属含量较高的原因应与此有关。一方面,本田间小区土壤为典型赤红壤,土壤酸性导致胶体颗粒中的重金属溶出率高,加上有机质含量和阳离子交换量低,没有充足的有机质基团或官能团与金属离子形成螯合物

和(或)络合物,导致土壤中重金属多以离子交换态存在,其移动性强且活性高^[17];另一方面,环境温度引起水稻生理活动的加剧也可能导致糙米重金属累积量的显著增加.根据中国气象局广州年均气温统计数据,本小区试验点近3年来的年均气温持续升高,2018 年均气温 26.5℃,2019 年 26.58℃,2020 年 26.67℃.环境温度升高不仅能够促进水稻侧生根生长,提高根系表面积、体积以及根尖数,增强根系对 Cd 的吸收,而且还能加快叶片的蒸腾速率,通过提升蒸腾拉力促进 Cd 从根系经维管束向茎叶以及糙米的转运^[18,19].此外,不同水稻品种由于其生理特性差异也可显著影响对重金属的吸收和累积.本研究结果表明,早稻(杂交稻)品种在糙米 Cd 和总 As 的富集能力上明显强于晚稻(常规稻)品种,而在 Pb 的富集能力上弱于常规稻品种.杂交水稻品种根系较常规稻种更为发达,具有更大的根冠比和根系吸水量,因而对矿质元素离子的吸收能力更强,但同时也可造成吸收的重金属离子浓度的增加,而且杂交水稻比常规水稻对 Cd 具有更强的吸收和向地上部转运的能力^[20~22].由此可见,土壤中 Cd 的生物有效性高和水稻对 Cd 的吸收转运能力强是导致土壤 Cd 总量未超标的情况下糙米 Cd 含量较高的主要原因.本研究以重金属有效态和元素生理阻控为切入点,研究了 JD、YY 和调理剂耦合淹水灌溉对早、晚稻糙米重金属含量的降低效果以及糙米重金属累积的差异,明确了两种调理剂与淹水灌溉之间均存在显著的耦合效应,且以 JD + YS 的效果更为明显,可最大程度地减少糙米 Cd 和 Pb 累积,其作用机制主要体现在两个方面,一是通过降低土壤 Cd 和 Pb 的有效性抑制其在土壤-水稻系统中的运移;二是通过 Si、Ca 和 Mg 养分供应以形成生理阻隔和离子竞争进一步抑制水稻对 Cd 和 Pb 的吸收及向糙米的转运.

土壤 pH 和氧化还原电位(Eh)是调节土壤固液平衡和元素形态分布进而影响重金属有效性的两个关键因素. JD + YS 处理显著地提高了土壤 pH 值,其原因在于 JD 调理剂含有的钙、镁氧化物在淹水环境下更有利于其充分水解,促进去质子化反应(deprotonation reaction)进而提高土壤 pH 值^[23]. 土壤 pH 值的提高会导致土壤颗粒表面负电荷吸附位点的增加,将进一步促进土壤颗粒对金属阳离子的吸附和共沉淀物的形成^[24],有效抑制土壤 Cd 和 Pb 的移动能力,降低其有效态含量,这与 DTPA-Cd 和 DTPA-Pb 含量结果相互佐证(表 6). 造成土壤有效态 Cd 和 Pb 含量下降的另一个关键原因是持续淹水导致的土壤 Eh 下降, Xiao 等^[25]的研究报道在维

持田面水 3 cm 的持续淹水条件下,土壤 Eh 呈持续下降态势,持续淹水期间土壤 Eh 稳定在 -200 ~ -370 mV 之间. 在这种强的还原条件下土壤铁/锰氧化物得以还原、溶解并恢复其胶体活性,促进羟基化和高活性官能团的形成并增加胶体颗粒的比表面积和可变电荷,导致土壤中游离的 Cd 和 Pb 离子被更强地固持于胶体颗粒表面^[26],从而促进土壤中 Cd 和 Pb 赋存形态从移动能力较强的酸可提取态向移动能力较弱的还原态转化,其运移能力被有效抑制. 而在淹水条件下氧化结合态 Cd 含量的增加可能与强还原条件下产生的 S^{2-} 和 Cd^{2+} 生成 CdS 沉淀有关^[27~29]. 残渣结合态被认为是金属离子移动能力最弱的形态,研究发现富 Si 改良剂可促进土壤重金属由可交换态向残渣态的转化,其机制与含 Si 矿物的丰富官能团和土壤中游离的 Cd 和 Pb 离子发生表面络合和共沉淀反应,将可溶态 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 转化为金属硅酸盐和氢氧化物结合态,从而减少土壤 Cd 从固相到液相的通量有关^[30,31]. 综上所述,富 Si 调理剂耦合淹水灌溉的组合措施,通过提高土壤 pH 值和维持较低的氧化还原电位来促进土壤中 Cd 和 Pb 从酸可提取态向还原态和残渣态转化,明显降低土壤 Cd 和 Pb 的有效态含量,从而达到抑制 Cd 和 Pb 从土壤向水稻根系运移的目的.

重金属离子不是水稻生长发育的必需元素,没有特定的转运蛋白负责它们的运输,因此 Cd 和 Pb 离子需通过其它必需元素的离子转运通道才能进入水稻体内^[32]. 研究发现 Cd^{2+} 和 Ca^{2+} 具有相似的离子半径和化学性质,通过添加适量 Ca 离子通道抑制剂可以明显缓解 Cd 胁迫对水稻幼苗生长的抑制作用,表明 Cd^{2+} 可能通过 Ca^{2+} 的离子转运通道进入水稻体内. Cd 胁迫条件下补充适量 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 可以明显增加水稻发芽率、发芽指数和活力指数,减少根芽中的 Cd 含量,降低 Cd 从水稻根向芽中的转移,其原因可能与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cd^{2+} 竞争离子通道或膜表面离子配位体,降低水稻根系对 Cd^{2+} 的吸收有关^[33,34]. 本研究中,两种调理剂耦合淹水灌溉均显著提高了土壤中有效态 Ca 和 Mg 含量,可有效促进水稻根系对相应元素离子的吸收,而充足的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子供应则能通过离子竞争有效抑制水稻对 Cd^{2+} 的吸收和转运. 与钙镁调理剂不同,富 Si 调理剂还可为水稻根系提供大量的有效态 Si 供其吸收利用. 有研究表明^[35,36],施加外源 Si 能够显著地缓解水稻受到的 Cd、As 和 Pb 等重金属胁迫,并减少糙米中的重金属累积,其中 Si 促进水稻根系质外体屏障发育、增强 Cd 的细胞壁固定和区隔化、以及调控 *OsLCD*、*OsNramp5* 和 *OsHMA3* 等 Cd 转运关

键基因的表达是其抑制水稻对 Cd 吸收和转运的主要机制. 不仅如此, Si 还能通过促进水稻根系抗氧化酶活性增强对活性氧自由基的清除能力, 将其代谢成水和分子氧(O_2), 并且通过诱导根系通气组织的形成和发育^[37], 增加根系径向泌氧(ROL), 促进水稻根表铁/锰膜的形成进而增强铁/锰膜对土壤中 Cd 和 Pb 的固定, 有效阻断水稻对 Cd 和 Pb 的吸收和转运^[38]. 综上所述, 富 Si 调理剂耦合淹水灌溉的组合措施一方面通过改变土壤中 Cd 和 Pb 的形态分布, 降低 DTPA-Cd 和 DTPA-Pb 的含量, 从而抑制土壤中 Cd 和 Pb 向水稻根系的运移; 另一方面则通过充足的有效态 Si、Ca 和 Mg 离子供应以形成生理阻控和离子竞争, 进一步抑制水稻对 Cd 和 Pb 的吸收及向糙米中的转运.

尽管本研究明确了两种调理剂与淹水灌溉之间存在明显的耦合效应, 但两个措施对降低水稻糙米 Cd 和 Pb 含量的相对贡献率还有待进一步研究. 此外, 由于 BCR 顺序提取法是根据不同浸提剂的提取能力, 从“操作”层面来分析土壤中重金属的赋存形态, 因此调理剂和淹水灌溉措施对土壤 Cd 和 Pb 的钝化机制还需要采用更直接的微界面表征技术(如同步辐射等)来进一步明确.

4 结论

(1) 土壤 Cd 的生物有效性高和水稻对 Cd 的吸收能力强是导致土壤 Cd 总量未超标的情况下糙米 Cd 含量较高的重要原因. 杂交稻品种对 Cd 和总 As 的富集能力强于常规稻品种, 而对 Pb 的富集能力弱于常规稻品种.

(2) 两种调理剂和淹水灌溉之间均存在明显的耦合效应, 可显著提高对糙米 Cd 和 Pb 的降低效率, 且以富硅调理剂结合淹水灌溉效果更加明显.

(3) 富硅调理剂耦合淹水灌溉通过提高土壤 pH 值和维持较低的氧化还原电位, 促进土壤 Cd 和 Pb 由酸可提取态向还原态和残渣态的转化, 明显降低土壤 Cd 和 Pb 的有效态含量, 而且, 其提供的 Si、Ca 和 Mg 养分供应通过生理阻隔以及竞争离子通道, 进一步抑制早、晚稻对土壤中 Cd 和 Pb 的吸收及向糙米中的转运.

参考文献:

- [1] 史静, 李正文, 龚伟群, 等. 2 种常规水稻 Cd、Zn 吸收与器官分配的生育期变化: 品种、土壤和 Cd 处理的影响[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1): 32-40.
Shi J, Li Z W, Gong W Q, *et al.* Uptake and partitioning of Cd and Zn by two non-hybrid rice cultivars in different growth stages: effect of cultivars, soil type and Cd spike[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1): 32-40.
- [2] 陈岭啸, 宋根先, 袁旭音, 等. 长江三角洲典型地区土壤-水稻系统中 Cd 的分布及其迁移制约因素[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 288-295.
Chen L X, Song Y X, Yuan X Y, *et al.* Distribution of Cd and impact factors on the migration in soil-rice system in typical area of Yangtze River Delta Region[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(3): 288-295.
- [3] 彭华, 戴金鹏, 纪雄辉, 等. 稻田土壤与稻米中的镉含量关系初探[J]. 湖南农业科学, 2013, (7): 68-72.
Peng H, Dai J P, Ji X H, *et al.* Correlation between cadmium content in paddy soil and in rice [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013, (7): 68-72.
- [4] 张云慧, 杜平, 何赢, 等. 基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4262-4269.
Zhang Y H, Du P, He Y, *et al.* Derivation of the Thresholds of available concentrations of heavy metals in soil based on agricultural product safety[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 4262-4269.
- [5] Meng J, Zhong L B, Wang L, *et al.* Contrasting effects of alkaline amendments on the bioavailability and uptake of Cd in rice plants in a Cd-contaminated acid paddy soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(9): 8827-8835.
- [6] 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.
- [7] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 调理剂及农艺措施对污染稻田中水稻吸收镉的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(3): 574-584.
Peng O, Liu Y L, Tie B Q, *et al.* Effects of conditioning agents and agronomic measures on cadmium uptake by rice in polluted rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(3): 574-584.
- [8] 周亮, 肖峰, 肖欢, 等. 施用石灰降低污染稻田上双季稻镉积累的效果[J]. 中国农业科学, 2021, 54(4): 780-791.
Zhou L, Xiao F, Xiao H, *et al.* Effects of lime on cadmium accumulation of double-season rice in paddy fields with different cadmium pollution degrees [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(4): 780-791.
- [9] 孟赐福, 傅庆林, 水建国, 等. 浙江中部红壤施用石灰对土壤交换性钙、镁及土壤酸度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 129-136.
Meng C F, Fu Q L, Shui J G, *et al.* Effect of liming on acidity and exchangeable calcium and magnesium of red soil in central Zhejiang [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(2): 129-136.
- [10] Li L F, Ai S Y, Wang Y H, *et al.* In situ field-scale remediation of low Cd-contaminated paddy soil using soil amendments [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227(9), doi: 10.1007/s11270-016-3041-6.
- [11] 李超, 艾绍英, 唐明灯, 等. 矿物调理剂对稻田土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2143-2154.
Li C, Ai S Y, Tang M D, *et al.* Effects of a mineral conditioner on the forms of Cd in paddy soil and Cd uptake by rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2143-2154.

- [12] 王艳红, 艾绍英, 唐明灯, 等. 一种降低水稻米 Cd 含量的营养型阻控剂及其使用方法 [P]. 中国专利: CN 105080953A, 2017-10-10.
- [13] Kazi T G, Jamali M K, Kazi G H, *et al.* Evaluating the mobility of toxic metals in untreated industrial wastewater sludge using a BCR sequential extraction procedure and a leaching test [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2005, **383** (2): 297-304.
- [14] 广东省农业有害生物预警防控中心. 农作物病虫害情报 [EB/OL]. http://dara.gd.gov.cn/nqyj/content/post_3051751.html, 2020-07-24.
- [15] 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.
- [16] 陈能场, 郑煜基, 雷绍荣, 等. 种植业农产品中重金属超标的成因分析 [J]. *农产品质量与安全*, 2015, (2): 54-60.
- [17] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 我国南方红壤酸化问题及改良修复技术研究进展 [J]. *湖南农业科学*, 2015, (3): 148-151.
- Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Status of red soil acidification and its amelioration technologies in South China [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015, (3): 148-151.
- [18] Ge L Q, Cang L, Liu H, *et al.* Effects of warming on uptake and translocation of cadmium (Cd) and copper (Cu) in a contaminated soil-rice system under Free Air Temperature Increase (FATI) [J]. *Chemosphere*, 2016, **155**: 1-8.
- [19] Ge L Q, Cang L, Yang J, *et al.* Effects of root morphology and leaf transpiration on Cd uptake and translocation in rice under different growth temperature [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23** (23): 24205-24214.
- [20] 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.
- [21] 吴启堂, 陈卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究 [J]. *生态学报*, 1999, **19** (1): 104-107.
- Wu Q T, Chen L, Wang G S. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19** (1): 104-107.
- [22] 王凯荣, 龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究 [J]. *农业环境保护*, 1996, **15** (4): 145-149, 176.
- Wang K R, Gong H Q. Comparative studies on the difference of the uptake and redistribution of environmental Cd by two genic rice [J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, **15** (4): 145-149, 176.
- [23] 吴宏海, 刘佩红, 张秋云, 等. 高岭石对重金属离子的吸附机理及其溶液的 pH 条件 [J]. *高校地质学报*, 2005, **11** (1): 85-91.
- Wu H H, Liu P H, Zhang Q Y, *et al.* Mechanisms of adsorption of heavy metal ions on kaolinite and their solution as a function of pH [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, **11** (1): 85-91.
- [24] Komárek M, Vaněk A, Ettler V. Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides-a review [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **172**: 9-22.
- [25] Xiao W D, Ye X Z, Yang X E, *et al.* Effects of alternating wetting and drying versus continuous flooding on chromium fate in paddy soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **113**: 439-445.
- [26] 黄丹丹, 葛滢, 周权锁. 淹水条件下土壤还原作用对镉活性消长行为的影响 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29** (2): 373-380.
- Huang D D, Ge Y, Zhou Q S. Effect of redox processes on soil Cd activity under submerged conditions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29** (2): 373-380.
- [27] Xia B, Qiu H, Knorr K H, *et al.* Occurrence and fate of colloids and colloid-associated metals in a mining-impacted agricultural soil upon prolonged flooding [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **348**: 56-66.
- [28] Zhang Q, Chen H F, Huang D Y, *et al.* Water managements limit heavy metal accumulation in rice: dual effects of iron-plaque formation and microbial communities [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **687**: 790-799.
- [29] 李义纯, 陈勇, 唐明灯, 等. 硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (11): 5143-5150.
- Li Y C, Chen Y, Tang M D, *et al.* Effects of ferrous sulfate and ferric nitrate on cadmium transportation in the rhizosphere soil-rice system [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (11): 5143-5150.
- [30] Gu H H, Qiu H, Tian T, *et al.* Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil [J]. *Chemosphere*, 2011, **83** (9): 1234-1240.
- [31] Liang X F, Han J, Xu Y M, *et al.* In situ field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite [J]. *Geoderma*, 2014, **235-236**: 9-18.
- [32] 刘仲齐, 张长波. 重金属调控非选择性阳离子通道生理功能的研究进展 [J]. *农业资源与环境学报*, 2017, **34** (1): 1-5.
- Liu Z Q, Zhang C B. Advance in regulation of heavy metals on nonselective cation channels: a review [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, **34** (1): 1-5.
- [33] 滕浪, 何腾兵, 付天岭, 等. 镉离子胁迫下钙镁离子对水稻种子萌发期耐镉性的影响 [J]. *种子*, 2020, **39** (1): 18-25.
- Teng L, He T B, Fu T L, *et al.* Effects of calcium and magnesium ions on cadmium tolerance in rice seed germination under cadmium ion stress [J]. *Seed*, 2020, **39** (1): 18-25.
- [34] Tang R J, Luan S. Regulation of calcium and magnesium homeostasis in plants: from transporters to signaling network [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2017, **39**: 97-105.
- [35] Xiao A W, Li W C, Ye Z H. Effects of Fe-oxidizing bacteria (FeOB) on iron plaque formation, as concentrations and speciation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **190**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110136.
- [36] Ali N, Réthoré E, Yvin J C, *et al.* The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses [J]. *Plants*, 2020, **9** (12), doi: 10.3390/plants9121779.
- [37] Zhang Q, Yan C L, Liu J C, *et al.* Silicon alleviates cadmium toxicity in *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. seedlings in relation to root anatomy and radial oxygen loss [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **76** (1-2): 187-193.
- [38] Huang G X, Ding C F, Li Y S, *et al.* Selenium enhances iron plaque formation by elevating the radial oxygen loss of roots to reduce cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **398**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122860.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)