

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

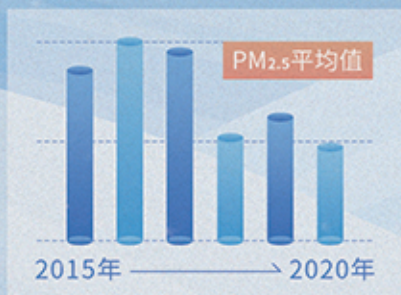
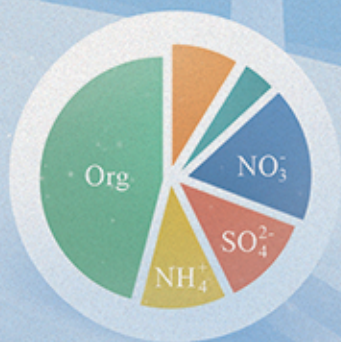
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

柳州地源性镉异常区稻米重金属积累效应与健康风险

朱亮亮¹, 王佛鹏¹, 唐乐斌¹, 肖乃川¹, 董心月¹, 韦美溜¹, 宋波^{1,2*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 桂林 541004)

摘要: 为探讨地源性镉异常区土壤重金属在稻米中迁移转化特征, 并评估水稻安全种植性, 以广西柳州市典型地区水田为研究对象, 共采集土壤与稻米成对样品 91 组, 测试 Cd 等重金属、土壤 pH 和有机质含量。结果表明: ①与背景值相比, 水田土壤 Cd、Cu、Ni 和 Zn 分别超背景值 92.31%、34.07%、36.26% 和 90.11%; 与相关标准中的筛选值相比, Cd 和 Zn 含量的点位超标率为 30.53% 和 25.26%, 超标点位主要分布于浮石镇; ②稻米 Cd 和 Ni 含量的点位超标率分别为 35.16% 和 3.30%, 其中大良镇稻米 Cd 富集系数最高且稻米 Cd 超标率最高; ③相关性分析显示, 土壤 pH 是稻米重金属的主要影响因子, 且稻米 Cd 和 Ni 具有相似来源; ④稻米健康风险评估结果显示, 大良镇稻米 Cd 的 THQ 值大于 1.0, 说明该地区稻米 Cd 存在潜在健康风险。所有乡镇 TTHQ 值均大于 1.0, 且显示出儿童高于成年女性, 成年女性高于成年男性, 表明合理的膳食结构对于预防不同年龄和性别重金属摄入至关重要。因此, 柳州地源性镉异常区水稻种植存在一定的风险, 需要针对性采用不同的安全利用措施加以管控。

关键词: 柳州; 地源性; 镉异常区; 稻米; 健康风险

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4219-13 DOI: 10.13227/j.hjks.202111201

Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou

ZHU Liang-liang¹, WANG Fu-peng¹, TANG Le-bin¹, XIAO Nai-chuan¹, DONG Xin-yue¹, WEI Mei-liu¹, SONG Bo^{1,2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to explore the migration and transformation characteristics of soil heavy metals in rice in an area of ground source cadmium anomaly and to evaluate the safe planting of rice, a total of 91 pairs of soil and rice samples were collected from paddy fields in the typical area of Liuzhou city, Guangxi province, and the contents of heavy metals such as Cd, soil pH, and organic matter were tested. The results showed that: ① Cd, Cu, Ni, and Zn in the paddy field exceeded the background values of 92.31%, 34.07%, 36.26%, and 90.11%, respectively. Compared with the screening values in the Soil Environmental Quality Agricultural Land Soil Pollution Risk Control Standard, Cd and Zn exceeded 30.53% and 25.26%, respectively. Super standard points were mainly distributed in Fushi Town. ② Cd and Ni exceeded 35.16% and 3.30%, respectively, and Daliang town had the highest Cd enrichment coefficient and Cd exceeded rate. ③ Correlation analysis showed that soil pH was the main influencing factor of heavy metals in rice, and Cd and Ni had similar pollution sources in rice. ④ The results of rice health risk assessment showed that the THQ value of rice Cd in Daliang town was greater than 1.0, indicating the potential health risk of rice Cd in this area. The TTHQ values were all greater than 1.0, indicating that the risks to children were higher than those to adult women, which were higher than those of adult men, showing that reasonable dietary structure is crucial to prevent heavy metal intake in different ages and genders. Therefore, there are certain risks in rice planting in the Liuzhou area of ground source cadmium anomaly, which need to be controlled using different safety utilization measures.

Key words: Liuzhou; ground source; cadmium anomaly area; rice; health risks

土壤是人类赖以生存的重要载体。土壤性质的主要影响因素是自然地质背景和人类活动^[1]。人类活动(工业生产和车辆排放等)释放的重金属通过一系列过程与土壤结合,从而影响了土壤中的生物有效性;自然地质背景主要由于成土母质风化和土壤淋溶等作用导致。有研究表明,人类活动影响下的重金属污染土壤的生物可利用率高于自然地质背景所致的土壤重金属污染^[2]。但是由于不同研究地区的地质背景情况不同,其生物有效性亦存在差别。当前人们主要关注人类活动导致的土壤重金属污染,而对自然地质背景缺乏重视。众所周知,镉是一种移动性强且生物毒性大的重金属^[3,4],也是相关规划中重点控制的 5 种重金属污染物之一^[5]。刘意章

等^[6]研究重庆高镉地质背景发现,对于风险筛选值而言,土壤 Cd 含量的点位超标率为 100%, 91.3% 的土壤样品 Cd 达到了严重污染及以上。易甜等^[7]通过采集湖北省地质高背景区土壤发现所有采样点 Cd 含量均超过湖北省土壤背景值,超标倍数最大高达 2.47 倍。与此同时土壤中的镉极易通过食物链进入人体并产生毒害作用,长期食用镉污染土壤中产出的镉超标作物,严重时会造成骨痛病、高血压和肾功能紊乱等疾病^[8]。对广西岩溶地质高背景区土

收稿日期: 2021-11-18; 修订日期: 2021-12-28

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17204047)

作者简介: 朱亮亮(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: 275624361@qq.com

* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

壤-水稻系统 Cd 等重金属含量调查发现,水稻籽实富集现象十分明显并且陈家乐等^[9]发现运积型地质高背景稻田种植的稻米 Cd 存在较大的致癌风险.

广西是水稻生产和消费大省^[10]. 镉对于水稻而言是非必要元素,但水稻却极易富集镉^[11]. 王佛鹏等^[12]的研究发现,广西的柳州市融安县和融水县属于地源性镉异常区,但在土壤中镉含量明显异常的情况下种植的水稻中镉含量如何? 何为影响稻米镉积累的主要因素? 因此,摸清地源性镉异常区水田土壤环境质量现状和稻米重金属含量迫在眉睫,这不仅是环境治理和土壤可持续利用的需要,也是开展农业安全生产、无公害农产品和绿色有机食品生产的需要. 为了探讨地源性镉异常区下稻米的重金属积累效应与健康风险,以柳州市融安县和融水县的典型地区作为研究区域,对土壤和稻米中的 Cd、Cu、Ni 和 Zn 全量和有效态进行分析,采用单因子指数法对土壤重金属进行评价,并运用目标危险系数法对人体健康进行评估,旨在为当地和地源性镉异常区的人们提供水稻安全种植的依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

据陈同斌等^[13]的调查得知广西柳州部分地区存在一个地源性镉异常情况. 宋波等^[14]对广西高镉异常区研究发现,融安县水田土壤 $\omega(\text{Soil-Cd})$ 几何均值为 $0.501 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 融水县水田土壤 $\omega(\text{Soil-Cd})$ 几何均值为 $0.231 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 含量均超过当地自然背景值. 故将研究区域选在广西柳州市北部

的融安县和融水县(图 1). 研究区地处低纬度范围,位于北纬 $24^{\circ}46' \sim 25^{\circ}34'$,东经 $109^{\circ}13' \sim 109^{\circ}47'$. 融安县地势东北高西南低,主要以中低陡坡、岩溶峰丛地貌、低山缓坡地貌和沉积平原地貌为主^[15]; 融水县东南部 and 东北部为低山地区,南端为丘陵岩溶区. 县境底层露出地层为盆泥系和石炭系. 属中亚热带季风气候,气候温和,光热充足,雨量充沛,年平均降雨量为 $1\,348 \text{ mm}$,常年主导风向为东南风. 另外研究区域水资源丰富,主要河流为融江. 由于自然条件优越,农业生产发达,以粮食生产为主,水稻种植一年一季. 未受到重工业及其他产业人为污染的影响.

1.2 样品采集和分析

1.2.1 样品采集

根际土壤-水稻样品于 2017 年 7 月开始进行采集,共采集水田根际土壤与稻谷成对样品 91 件. 样品采集过程中,综合考虑外界因素影响,避免外来土和近期新翻动过的土层,并去除表面杂物和土中的砾石等. 选择长势较好的水稻进行采集,以 GPS 确定其点位,采用单点采样法采集水稻,并收集水稻根部 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 处土壤. 稻米样品用去离子水清洗干净后,在 80°C 下烘干至恒重,然后使用 2199 全智能精米机对稻米脱壳,不锈钢打磨机粉碎后装入信封中待测;土壤样品待自然风干后,用玛瑙研钵研磨过 0.83 mm (20 目) 和 0.15 mm (100 目) 尼龙筛,装入信封袋备用.

1.2.2 样品分析

土壤样品测试理化性质,包括土壤的 pH、有机质(OM)含量, Cd、Cu、Ni 和 Zn 的全量及有效态.

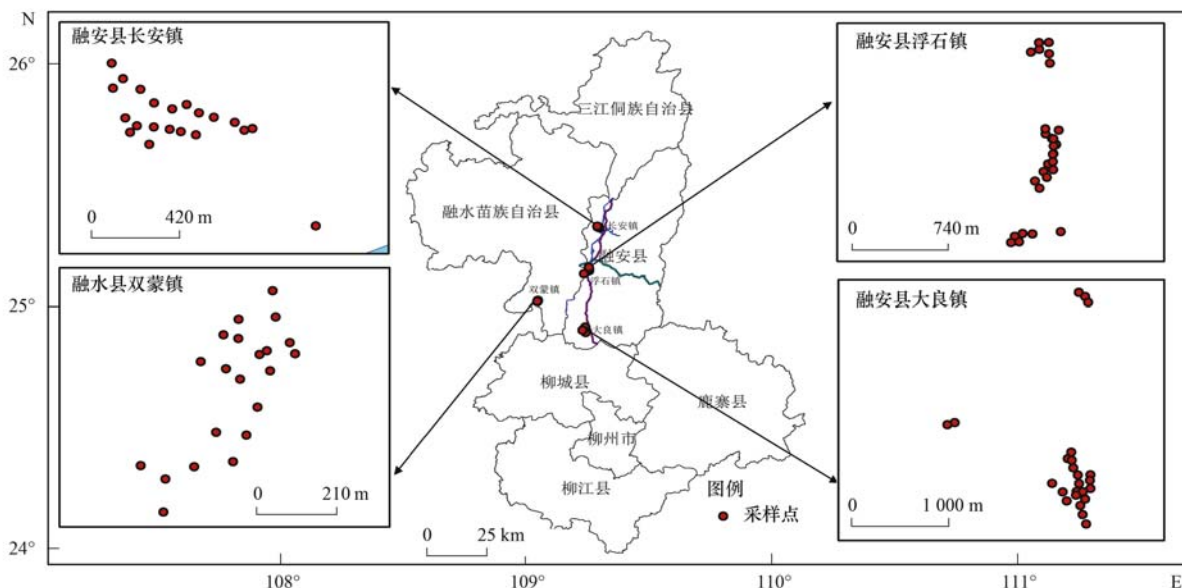


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Sketch map of the studied area

水稻样品测试稻米中 Cd、Cu、Ni 和 Zn 含量. 其中土壤 pH 采用玻璃电极法,水土比为 2.5:1; 土壤有机质采用水合热重铬酸钾氧化-比色法; 土壤及稻米中的重金属全量分析采用美国环保署推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法,由美国 PerkinElmer 公司生产的 ELANDRC-e 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定; 土壤重金属有效态采用 DTPA(二乙烯三胺五乙酸)浸提法提取. 分析过程中所用试剂均为优级纯,实验室用水为超纯水,所用器皿均在 10% 的硝酸中浸泡 24 h 以上. 分析过程加入 GBW 0740(GSS-4)土壤成分分析标准物质、GBW 10045(GSB-23)湖南大米成分分析标准物质和空白进行质量控制,分析样品的重复数为 10%~15%,土壤样品 Cd、Cu、Ni 和 Zn 的回收率均在 92.0%~102.4%,稻米样品 Cd、Cu、Ni 和 Zn 的回收率范围在 86.9%~107.0%.

1.3 评价方法

1.3.1 单因子指数法

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, i 为污染评价元素; C_i 为元素 i 的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为 i 元素的评价标准值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 当 $P_i \leq 1$ 时样品未受到污染, $1 < P_i \leq 2$ 时,受到轻度污染, $2 < P_i \leq 3$,受到中度污染, $P_i > 3$ 时,样品受到重度污染. 本研究 Cd、Cu、Ni 和 Zn 采用土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618-2018)中的风险筛选值.

1.3.2 稻米富集系数

稻米富集系数(BCF)即稻米中重金属含量与对应土壤中重金属含量的比值. 同时也是描述重金属在稻米中积累趋势的重要指标.

$$\text{BCF} = C_R/C_S \quad (2)$$

式中,BCF 为稻米富集系数; C_R 为稻米中重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_S 为对应土壤中同一重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. BCF 越大时,表明稻米对于重金属的富集能力越强.

1.3.3 稻米重金属健康风险评价

重金属日均摄入量(DI)即当地居民经过稻米途径摄入的重金属含量. 计算如下:

$$\text{DI} = C_{\text{hm}} W_{\text{rice}} \quad (3)$$

式中, C_{hm} 为大米中的重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; W_{rice} 为居民的稻米日均消费量, $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$. 广西居民的稻米日均消费量为 $0.361 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ [16].

健康风险评价采用美国环保署(US EPA)推荐的目标危险系数(THQ)进行评价. THQ 是以污染物暴露剂量与参考计量的比值来表征健康风险水平,计算模型为:

$$\text{THQ} = \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times W_{\text{rice}} \times C_{\text{hm}}}{\text{RfD}_0 \times B_w \times \text{AT}_n} \quad (4)$$

式中,EF 为暴露时间(以 $365 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 计); ED 为暴露年限或期望寿命(a),以 70 a 计; RfD_0 代表口服参考剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$. Cd、Cu、Ni 和 Zn 的口服参考剂量(RfD_0)分别为 0.001、0.04、0.02 和 $0.3 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; B_w 为人群的平均体重,kg. 儿童的体重为 33 kg,成年男性和女性的体重分别为 63 kg 和 54 kg; AT_n 为非致癌源的平均暴露时间($\text{ED} \times 365 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$) [17~19].

鉴于重金属对于人体健康的影响一般是由多种元素叠加作用的结果,因此,采用总目标危险系数(TTHQ)对稻米中重金属元素的危害进行评价,公式如下:

$$\text{TTHQ} = \sum_{i=1}^n \text{THQ}_i \quad (5)$$

式中,TTHQ 为第 i 种重金属元素的目标危险系数. 当 TTHQ 小于 1.0 时表明对人体健康没有负面影响; TTHQ 大于 1.0 时表明对人体健康产生负面影响的可能性极大; 当 TTHQ 大于 10.0 时表明将对人体健康产生慢性毒性效应.

1.4 数据处理

图形处理采用 ARCGIS 10.2 绘制,利用 SPSS 25.0 对原始数据进行相关统计分析.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量特征分析

经测定,研究区域土壤 ω (OM) 平均值为 $35.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,整体处于丰富等级. 土壤 pH 均值为 6.60,介于 5.10~8.10,整体处于中性水平. 研究区域整体土壤 ω (Soil-Cd)、 ω (Soil-Cu)、 ω (Soil-Ni) 和 ω (Soil-Zn) 的几何均值分别为 0.440、15.06、20.70 和 $111.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 以广西融安县 [ω (Cd) = $0.140 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (Cu) = $0.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (Ni) = $20.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (Zn) = $55.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] 和融水县 [ω (Cd) = $0.080 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (Cu) = $17.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (Ni) = $21.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (Zn) = $53.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] 自然背景值为参考[20],研究区域土壤 Cd、Cu、Ni 和 Zn 分别超背景值 92.31%、34.07%、36.26% 和 90.11%,其中 Cd 含量超标率最高,主要原因与研究区域处于地源性 Cd 异常区密不可分. 以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中的风险筛选值为基准,各抽样点的土壤 Cu 和 Ni 全量均没有超过该标准,而土壤 Zn 含量的点位超标率为 25.26%,Cd 为 30.53%. 与农用地污染风险管控值相比,只有 Cd 存在部分高

于管控值,超标率为4.40%,说明该地区农田土壤中的Cd元素是需要重点关注的对象。

柳州市不同抽样点水田土壤重金属含量分析结果见图2。由采集各乡镇的土壤数据来看,长安镇、浮石镇、大良镇和双蒙镇pH中位数分别为5.60、7.30、6.20和6.80。浮石镇土壤中重金属Cd、Cu、Ni和Zn含量均最高,与背景值相比,所有元素均超背景值100%;与标准相比,Cd和Zn分别为筛选值的3.58和1.18倍,超标点位达100%和85.19%。大良镇Cd居第二,其超Cd土壤背景值95.24%。双蒙镇的Cd含量位居第三,抽样区土壤Cd全部超过背景值。长安镇的Cd含量最低,土壤Cd超背景值71.43%。

在耕作层土壤重金属含量空间分布研究中,变异系数常用于表征重金属元素在空间上的离散和变异程度,当变异系数越大时,表明受到外界条件的影响越大。研究区域4种重金属的变异系数在50%~140%之间,其中重金属Cd的变异系数最大,为131.6%。浮石镇土壤Cd含量明显高于其他3个乡镇,约为最低的12倍。采样调研时并未发现浮石镇附近存在明显的工业活动和人为污染,因此导致这

一现象的最可能原因是浮石镇地处于地源性镉异常区域的中心位置,造成其Cd含量偏高。其余变异系数为:Zn > Cu > Ni,表明重金属含量空间分布极不均匀,而Cd元素受外部影响较其他重金属元素大。

单因子污染指数法可以评价水田土壤单一重金属的污染程度,并且通过单因子评价可以确定研究区域主要特征重金属污染物^[21]。因此,为更细致了解4个乡镇的水田土壤重金属污染状况,采用单因子指数法进行分析。通过单因子污染指数数据可知,水田土壤重金属Cd、Cu、Ni和Zn单因子污染指数范围分别为0.228~7.928、0.046~0.728、0.076~0.572和0.171~1.828。如图3所示,浮石镇Cd的 P_i 值大于3.0,处于严重污染,其余均无污染,按照从大到小的排序为:浮石镇>大良镇>长安镇>双蒙镇;而浮石镇Zn的 P_i 值大于1.0,处于轻微污染,其余均处于无污染状态,从大到小排序为:浮石镇>长安镇>双蒙镇>大良镇。Cu和Ni均处于无污染状态,单因子污染指数按照大小顺序排序为:浮石镇>长安镇>大良镇>双蒙镇。Cd元素各抽样点间的 P_i 差值尤其明显,最大值约为最小值的35倍,表明了各采样点

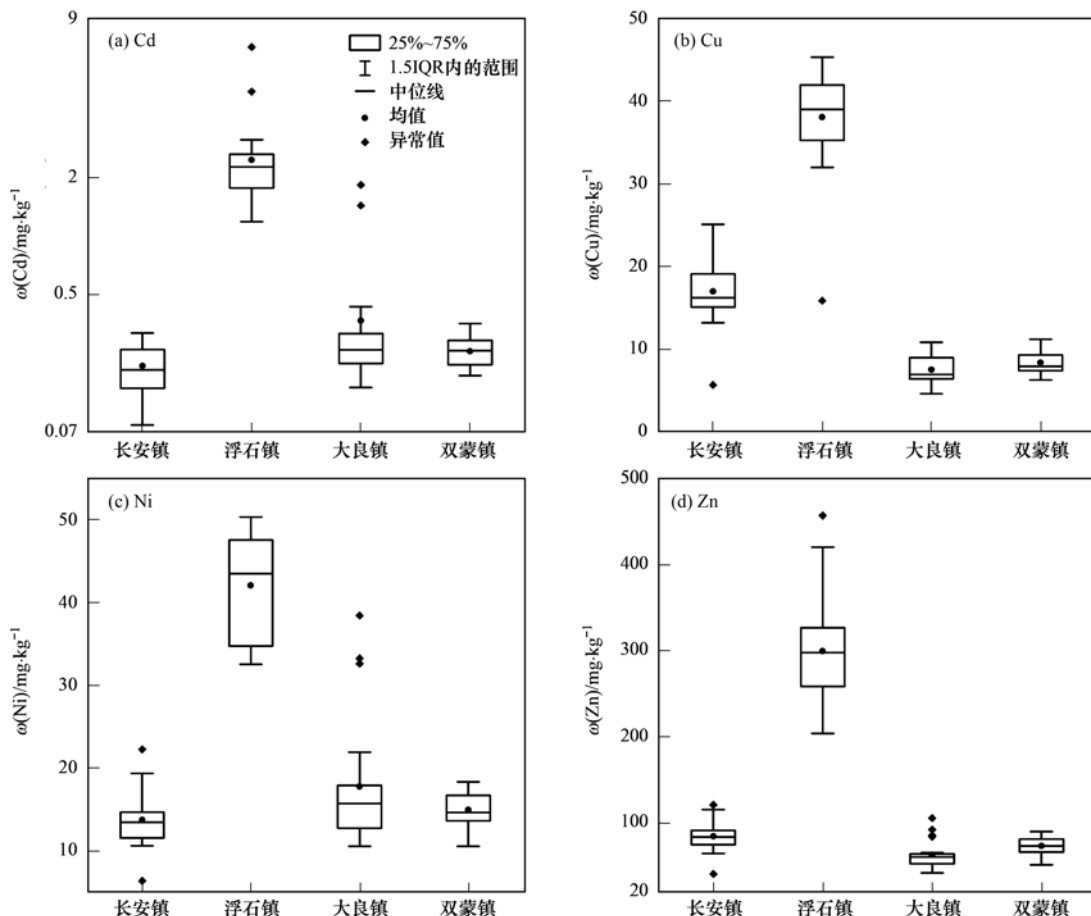


图2 不同抽样点土壤重金属含量统计

Fig. 2 Statistical map of soil heavy metal content in different sampling points

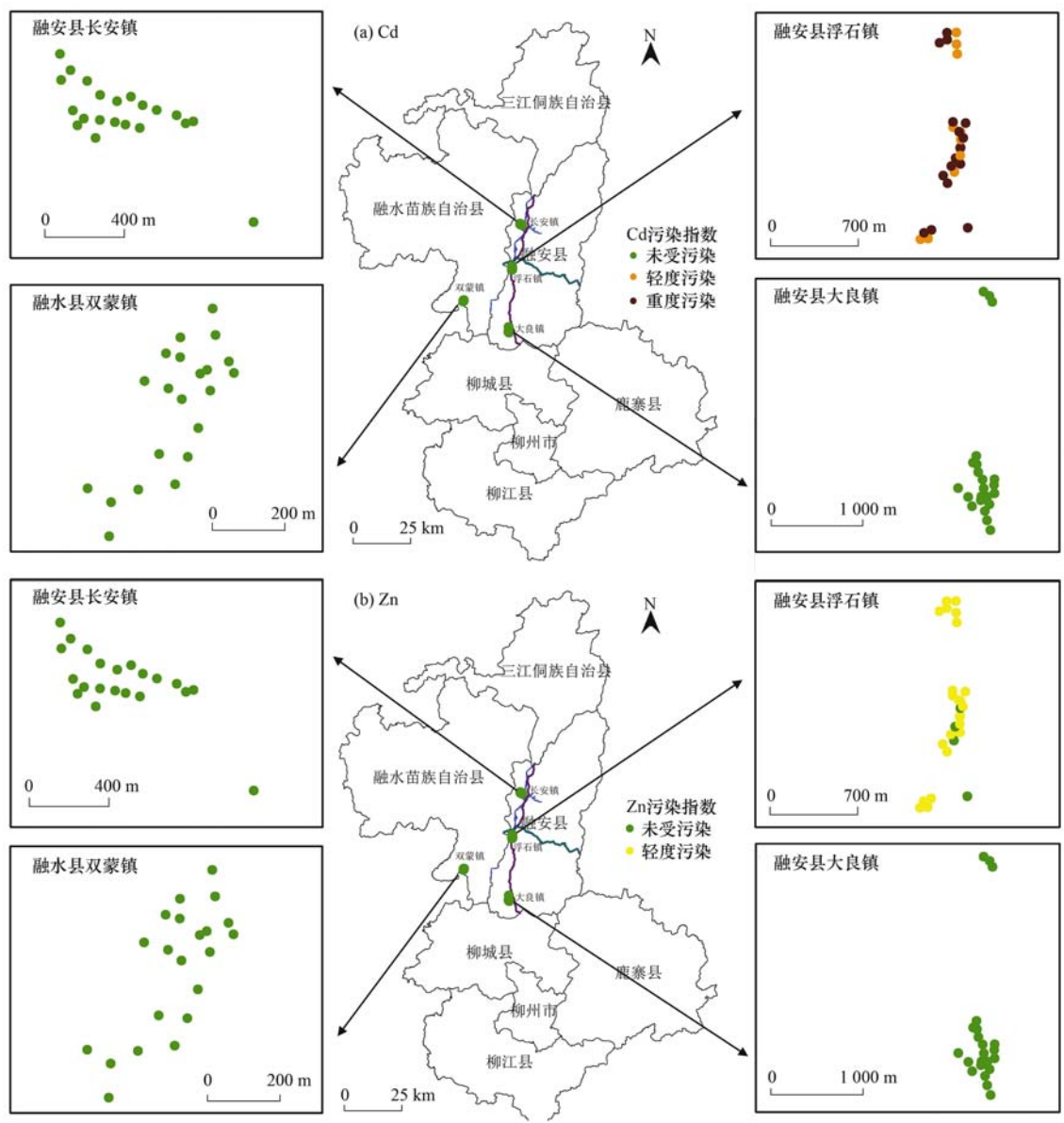


图3 研究区域 Cd 和 Zn 污染指数分布

Fig. 3 Cd and Zn pollution index distribution in the study area

水田土壤中的 Cd 含量可能受到了外在条件的影响,从而导致某采样点 Cd 含量偏高. 综合来看, Cd 是研究区域内的主要污染因子.

2.2 土壤重金属有效态含量特征

为更清楚探明研究区域土壤状况,研究了其重金属有效态分布及含量特征. 研究区域整体 $\omega(\text{DTPA-Cd})$ 为 $0.028 \sim 1.986 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{DTPA-Cu})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Ni})$ 和 $\omega(\text{DTPA-Zn})$ 分别为 $0.653 \sim 9.997$ 、 $0.174 \sim 1.486$ 和 $0.673 \sim 45.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. $\omega(\text{DTPA-Cd})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Cu})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Ni})$ 和 $\omega(\text{DTPA-Zn})$ 的几何均值分别 0.241 、 2.418 、 0.532 和 $5.108 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 不同抽样点重金属有效态含量见图 4. 长安镇 $\omega(\text{DTPA-Cd})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Cu})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Ni})$ 和 $\omega(\text{DTPA-Zn})$ 几何均值分别为 0.085 、 2.527 、 0.370 和 $3.825 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 浮石镇

$\omega(\text{DTPA-Cd})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Cu})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Ni})$ 和 $\omega(\text{DTPA-Zn})$ 几何均值分别为 1.191 、 6.556 、 0.711 和 $27.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 大良镇 $\omega(\text{DTPA-Cd})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Cu})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Ni})$ 和 $\omega(\text{DTPA-Zn})$ 几何均值分别为 0.138 、 1.449 、 0.678 和 $2.721 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最后, 双蒙镇 $\omega(\text{DTPA-Cd})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Cu})$ 、 $\omega(\text{DTPA-Ni})$ 和 $\omega(\text{DTPA-Zn})$ 几何均值分别为 0.156 、 1.097 、 0.409 和 $1.524 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 各乡镇重金属有效态含量与土壤重金属全量分布基本一致, 其中浮石镇各重金属有效态含量均高于其他 3 个地区. 计算有效态 Cd 占全量比例发现, 双蒙镇占比最高, 为 69.2% ; 其次是大良镇、浮石镇和长安镇, 分别占 60.5% 、 55.4% 和 48.4% .

2.3 稻米中重金属含量特征及污染评价

不同乡镇稻米重金属含量统计结果如图 5 所

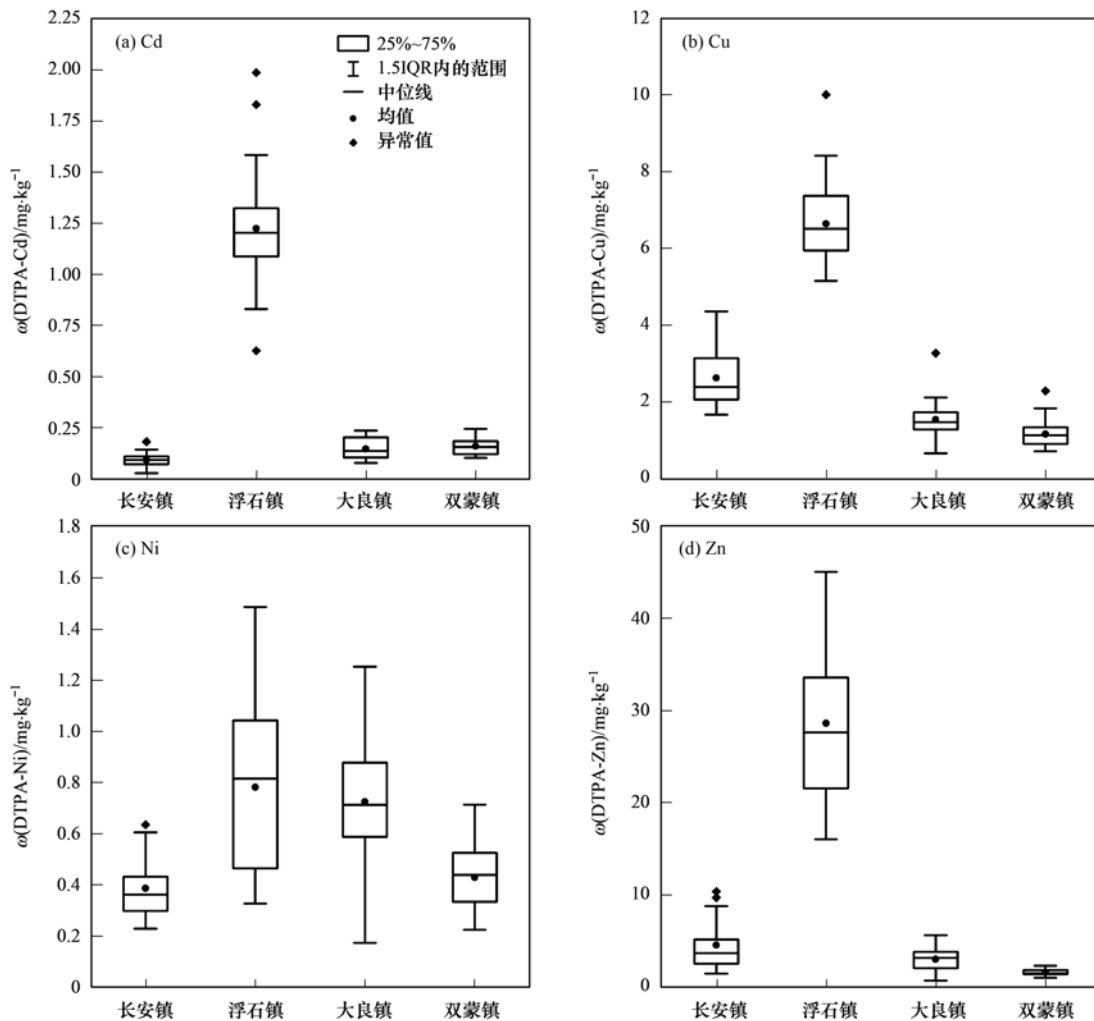


图4 不同抽样点重金属有效态含量统计

Fig. 4 Statistical diagram of effective content of heavy metals at different sampling points

示. 长安镇稻米中金属 $\omega(\text{Rice-Cd})$ 、 $\omega(\text{Rice-Cu})$ 、 $\omega(\text{Rice-Ni})$ 和 $\omega(\text{Rice-Zn})$ 几何均值分别为 0.094、2.187、0.488 和 19.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 浮石镇稻米几何均值是 0.128、1.651、0.234 和 19.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 大良镇和双蒙镇稻米重金属几何均值分别为 0.178、1.484、0.328、15.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.069、1.476、0.343、16.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 从整体看来, 稻米中 $\omega(\text{Rice-Cd})$ 、 $\omega(\text{Rice-Cu})$ 、 $\omega(\text{Rice-Ni})$ 和 $\omega(\text{Rice-Zn})$ 的范围分别为 0.009 ~ 1.488、0.570 ~ 4.865、0.094 ~ 1.462 和 9.404 ~ 31.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 几何均值分别为 0.112、1.673、0.343 和 17.92 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 变异系数分别为 117.9%、48.11%、67.85% 和 20.57%. 其中 Zn 元素的变异系数小于 40%, 说明 Zn 元素在稻米中分布比较均匀, 受后期人为活动的影响较小; 而 Cd、Cu 和 Ni 的变异系数均大于 40%, 说明这 3 种元素在稻米中的分布差异较大, 尤其是 Cd 的变异系数大于 100%, 说明 Cd 元素在稻米中的分布极不均匀.

为了更进一步了解重金属在稻米中的积累趋

势, 探寻地源性镉异常区稻米对重金属的富集能力, 计算了稻米的富集系数, 如图 6 所示. 4 个抽样区均显示稻米 Cd 的富集系数最高, Zn 次之, Cu 居第三, Ni 最低. 门中华等^[22]的研究发现, Zn 属于水稻生长的必需元素, 因此富集能力相对其他元素较强. 而 Cd 元素并不属于水稻生长的必需营养元素, 却具有较强的富集能力, 主要是因为相较于其它元素而言, 水稻极易富集 Cd. 且有相关研究发现^[23], 当土壤中的矿质营养元素比较缺乏时, Cd 会通过一些生物化学作用进入到水稻的细胞内, 故其富集能力最高. 比较 4 个抽样区的稻米 Cd 富集系数发现, 大小顺序为: 大良镇 > 长安镇 > 双蒙镇 > 浮石镇. 主要原因可能与土壤重金属 Cd 对水稻有“低促高抑”现象相关^[24~26]. 浮石镇土壤重金属 Cd 含量过高, 水稻对 Cd 的吸收速率减缓, 导致其富集系数极速下降. 而低含量的重金属对土壤根际微生物和植物体内酶活性有一定的刺激作用, 可以促进植物生长, 提高其富集能力^[27]. 同时, 由于 4 个采样点所种植水稻品种具有一定的差异, 不同的水稻品种对不同土壤的敏

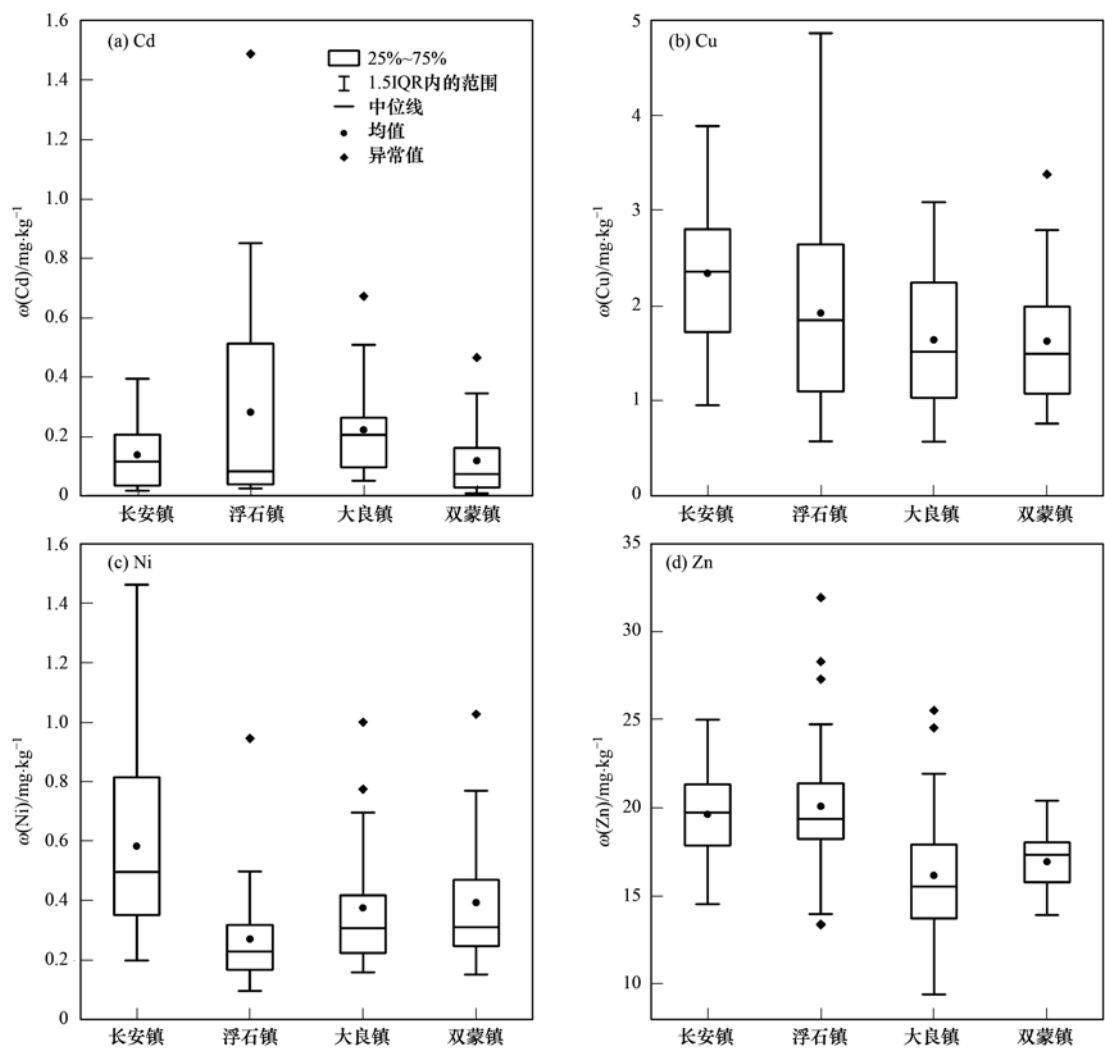


图5 稻米重金属含量统计

Fig. 5 Statistics of heavy metal content in rice

敏感性和耐受性不一样. 大良镇所种水稻可能在基因型等各方面具有一定优势, 导致其稻米 Cd 富集系数最高.

本研究稻米 Cd 污染评价以《食品安全国家标准 食品污染物限量》(GB2762-2017) 作为评价标准, Cu 和 Zn 以《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜和锌等 8 种元素限量》(NY 861-2004) 为参考依据. 整体上, 稻米中 Cd 含量点位超标率为 35.16%, 而 Cu 和 Zn 含量无超标现象. 比较不同抽样区发现, 浮石镇和大良镇稻米 Cd 点位超标率分别为 40.74% 和 54.55%; 长安镇稻米 Cd 为 28.57%; 双蒙镇稻米 Cd 为 14.29%. 大良镇稻米 Cd 含量点位超标率最高, 双蒙镇最低.

2.4 稻米的重金属含量与土壤性质的相关性

由于稻米中的 Cd 和 Ni 含量超标, 故利用 SPSS 25.0 对研究区域农田土壤的各项指标与稻米 Cd 和 Ni 含量的关系进行相关性分析, 结果如图 7 所示. 通过图 7(a) 可知, 针对整个研究区域而言, 稻米 Cd

和 Ni 与土壤 pH 在 0.01 水平下呈现出显著负相关, 表明土壤 pH 越高, 稻米 Cd 和 Ni 含量越低. 由于稻米 Cd 与土壤总 Cd 和有效态 Cd 并无显著关系, 因此对各乡镇单独进行分析. 如图 7(b) 所示, 长安镇稻米 Ni 与土壤 pH 在 0.01 水平显著负相关. 图 7(c) 表明, 浮石镇稻米 Cd、Ni 与 pH 均呈现负相关, 同时稻米 Cd 与稻米 Ni 在 0.01 水平下呈现显著正相关, 表明稻米中 Cd 和 Ni 具有相似的来源. 图 7(d) 可知, 大良镇的稻米 Cd 与 pH、有机质呈现显著负相关且稻米 Ni 与稻米 Cd 同样在 0.01 水平下呈现显著正相关. 最后, 根据图 7(e) 可知, 稻米 Ni 与土壤有效态 Ni 在 0.05 水平下相关; 且与浮石镇和大良镇同样呈现出稻米 Cd 与 Ni 具有相似来源的现象.

有研究显示^[28~30], 影响稻米重金属量较大的因素为土壤中重金属有效态含量、土壤 pH 和有机质, 且影响重金属生物有效性的主要是土壤 pH 和有机质含量. 通过相关性分析, 了解到对于研究区域稻米

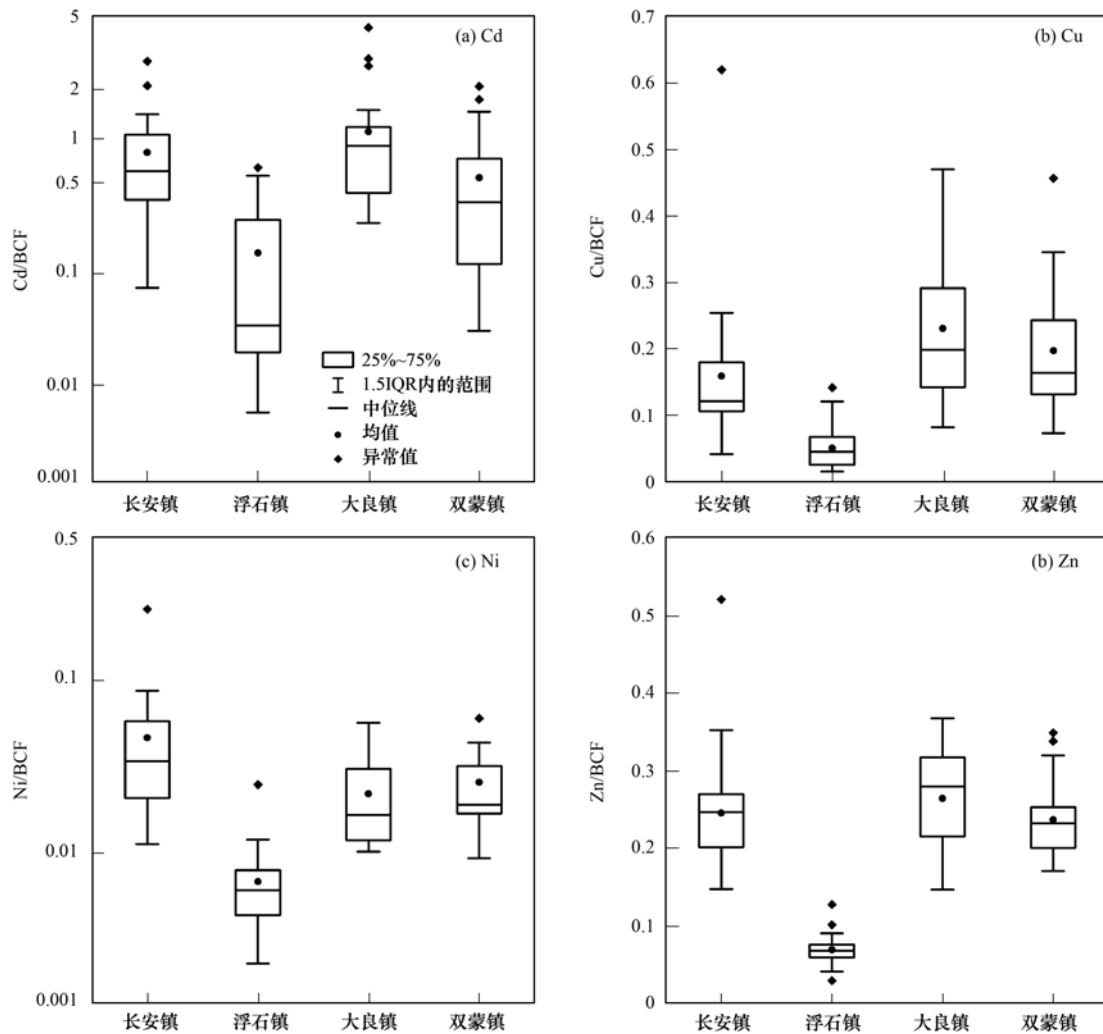


图6 不同抽样区稻米对各元素的生物富集系数

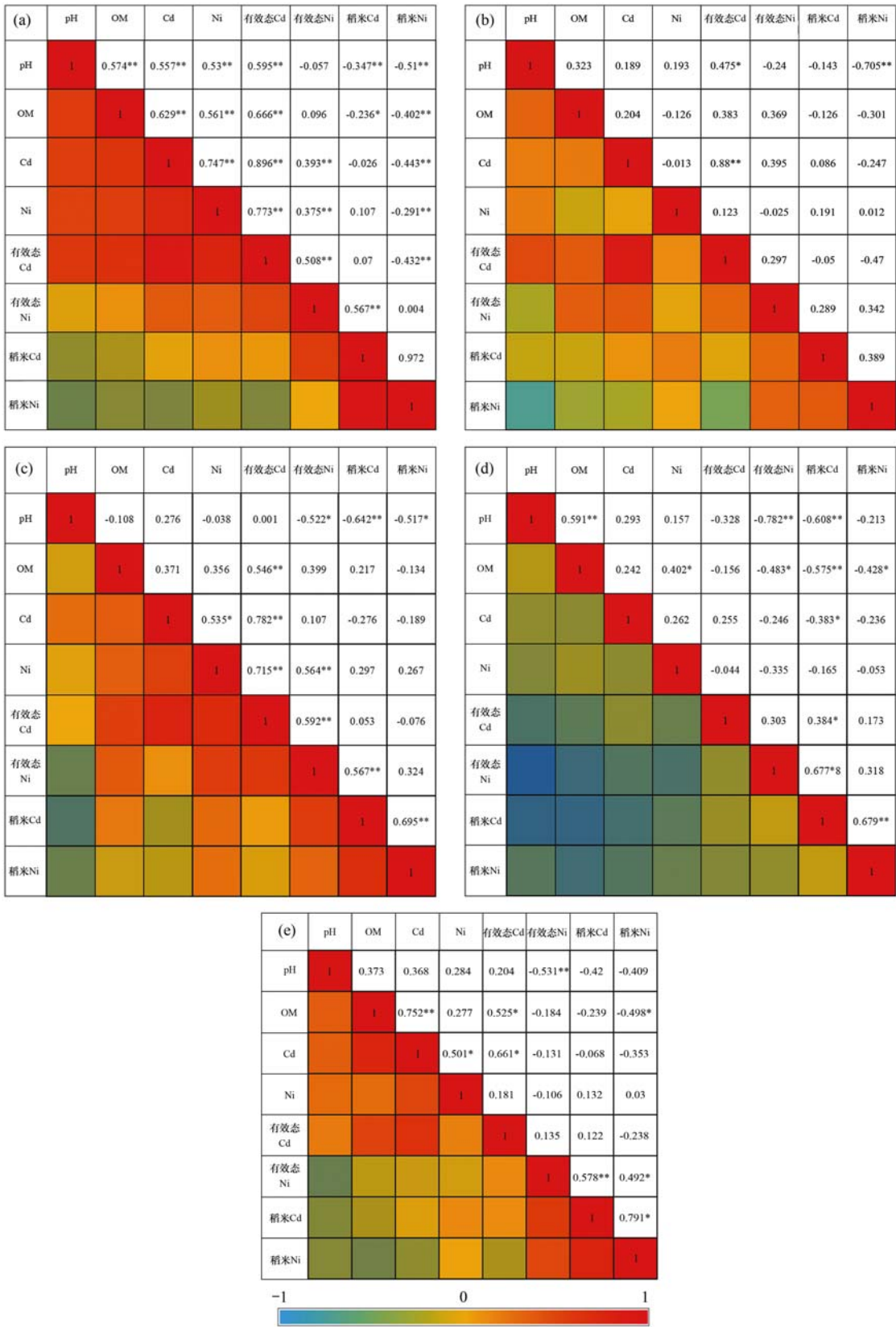
Fig. 6 Bioenrichment coefficients of rice to various elements in different sampling areas

而言,影响稻米中 Cd 和 Ni 第一大因素为土壤 pH 值.同时也发现大良镇、浮石镇和双蒙镇稻米中的 Cd 和 Ni 元素具有相似来源,其来源可能与其处于地源性 Cd 异常区相关.

2.5 稻米重金属健康风险评价

广西壮族自治区居民的大米日均消耗量为 $0.361 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$,则长安镇通过大米途径摄入的 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 分别为 0.034 、 0.790 、 0.176 和 $7.029 \text{ mg} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$;浮石镇重金属日均摄入量为 0.046 、 0.596 、 0.084 和 $7.101 \text{ mg} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$;大良镇和双蒙镇群众对重金属的日均摄入量分别为 0.064 、 0.536 、 0.118 、 $5.660 \text{ mg} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 0.025 、 0.533 、 0.124 、 $6.083 \text{ mg} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$.通过计算 4 个抽样点稻米的重金属 THQ 值,评估其对人体健康危害.如表 1 所示,不同重金属的 THQ 值(儿童、成年男性、成年女性)大小顺序依次为: $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni}$,其中 4 个乡镇 Cu、Ni 和 Zn 的 THQ 值小于 1.0,表明对人体健康

不产生威胁;大良镇 Cd 的(儿童、成年男性、成年女性)THQ 值均超过安全基准值 1.0,表明在这个区域的稻米 Cd 存在污染,对人体健康具有潜在的风险;而浮石镇和长安镇仅有儿童的 THQ 值超过 1.0. 4 种重金属的 THQ 值全部显示出儿童高于成年女性,成年女性高于成年男性,说明居民食用稻米时儿童和成年女性的健康风险更高,合理的膳食结构对于预防不同年龄和性别的重金属摄入至关重要.从多种重金属综合风险 TTHQ 值来看,研究区域的 TTHQ 值均大于 1.0,说明该区域居民食用稻米会对人体健康产生负面影响的可能性极大,且大良镇 TTHQ 值显著大于其余采样点,尤其应重点关注. 4 个乡镇的 TTHQ 值均显示成年男性对于稻米的摄入重金属的耐受程度高于成年女性,成年女性高于儿童,因此,女性和儿童的健康风险应重点关注.总之,无论成人还是儿童,男性还是女性若长期食用该地区稻米都可能会对身体带来不同程度的损害.



(a) 整体相关性分析, (b) 长安镇相关性分析, (c) 浮石镇相关性分析, (d) 大良镇相关性分析, (e) 双蒙镇相关性分析; * 表示在 0.05 水平下显著相关, ** 表示在 0.01 水平下显著相关

图 7 相关性分析
Fig. 7 Correlation analysis

表 1 不同采样点大米重金属 THQ 值

Table 1 Heavy metal THQ values of rice at different sampling points

采样点	元素	THQ 值		
		儿童	成年男性	成年女性
长安镇	Cd	1.028	0.539	0.628
	Cu	0.598	0.313	0.366
	Ni	0.267	0.140	0.163
	Zn	0.710	0.372	0.434
浮石镇	Cd	1.400	0.733	0.856
	Cu	0.452	0.237	0.276
	Ni	0.128	0.067	0.078
	Zn	0.717	0.376	0.438
大良镇	Cd	1.947	1.020	1.190
	Cu	0.406	0.213	0.248
	Ni	0.179	0.094	0.110
	Zn	0.572	0.299	0.349
双蒙镇	Cd	0.755	0.395	0.461
	Cu	0.404	0.211	0.247
	Ni	0.188	0.098	0.115
	Zn	0.614	0.322	0.375

3 讨论

3.1 土壤重金属来源

广西属于典型的喀斯特岩溶地区,而喀斯特地貌的岩溶特性使土壤不保水肥,富含重金属离子^[31].当岩石风化,岩石中的各类重金属 Cd、Cu、Ni 和 Zn 等元素释放进入土壤,致使土壤中的重金属含量高于其原本的土壤背景值.柳州市融安县和融水县位于地源性镉异常区,主要是由于该区域土壤在成土过程中受到各种自然因素的影响.有研究显示^[32],融安县和融水县介于泥盆系和石灰系.一方面,石炭系以海相碳酸岩为主,其分布广泛,有机质含量高,易与重金属形成螯合物,难以迁移,导致土壤重金属含量偏高.另一方面,泥盆系主要是碳酸岩为主,碳酸岩在风化过程中由于黏土矿物,铁锰氧化物(结核)的形成,对重金属有着较强的吸附作用,因此,碳酸岩地区容易出现次生富集型的高背景区.同时,广西属于亚热带季风气候,可以促进岩石风化,风化过程中镉大量地释放到地表环境中,对土壤、水和粮食产生镉污染.李丽辉等^[33]综述了云南省各类土壤与母岩中 As、Cd 的地球化学背景及异常分布特征,分析得出 As、Cd 异常主要是由高含量的母岩(碳酸盐岩)造成的;马宏宏等^[34]对碳酸盐岩区稻田土壤的研究发现,稻田土壤 $\omega(\text{Soil-Cd})$ 均值为 $1.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过国家风险筛选值 95.6%;唐启琳^[35]对贵州省罗甸北部喀斯特地区耕地土壤的研究显示,当地耕地土壤 $\omega(\text{Soil-Cd})$ 几何均值为 $1.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远远高于当地背景值.因此,可见喀斯特地区的土壤重金属含量普遍高于其他区域,成土母质是导致土壤 Cd 异常的主要因素,但土地利

用方式和土壤类型也与土壤重金属含量有一定的相关性.

3.2 稻米重金属超标风险措施

通过研究发现土壤 pH、有机质和有效态含量均会对稻米的重金属含量产生很大的影响,因此若要降低稻米体内重金属含量,必须采取一定措施减弱或阻断土壤-稻米重金属的迁移.前文通过相关性分析发现,稻米重金属含量与土壤 pH 紧密相关,而浮石镇和双蒙镇的土壤 pH 并不存在显著性差异,且 pH 均值为中性水平,因此,对于这两个乡镇,一方面可以采用施加有机肥或秸秆还田来提升土壤有机质含量,从而抑制稻米对重金属的吸收;另一方面,可以通过土壤钝化的方法,降低土壤重金属的植物有效性,减少土壤重金属向农作物的迁移转化量.薛毅等^[36]的研究发现连续 4 a 施用有机肥可以显著降低稻米 Cd 含量,且有机肥具有较稳定的降 Cd 效果和持续性.同时,短期内秸秆还田配施石灰可以显著降低土壤中水溶性重金属的含量,也能降低水稻籽粒中重金属的积累^[37].pH 呈中性时,在水稻秧苗喷施锌叶面肥不仅可以增加水稻产量,而且可以降低稻米中 Cd 的含量^[38].就长安镇和大良镇来说,其土壤 pH 均为弱酸性,出现土壤重金属含量未超标但稻米超标的现象.因此,若要保证稻米的生产安全,一方面可以向土壤中添加一定量的石灰、硅肥或钙镁磷肥从而提高土壤的 pH;另一方面,通过品种筛选,选出低积累品种,降低稻米对于重金属的吸收富集,确保稻米的食用安全.项佳敏等^[39]发现秀水 519 糙米中镉含量仅为杂交水稻浙优 15 的 50% 左右,表明低积累水稻品种对降低糙米镉积累有明显的效果.不同的灌溉方式也会对稻米重金属含量产生一定影响^[40],采用适当的灌溉方式可以降低稻米对 Cd 的吸收富集.相关研究表明,淹水会抑制镉向地上部转移,从而降低稻米镉积累^[41].水旱轮作或不同的轮作模式也会影响水稻对重金属的富集能力^[42].因此,改变种植方式和采用不同的水分管理模式也可在一定程度上降低稻米对重金属的富集,保证研究区域的稻米安全和降低人体健康风险.

由于地源性 Cd 异常区下耕地土壤受到多重外界条件因素影响,农田土壤中 Cd 的生物可给性与不同类型土壤之间 Cd 含量的差异都会对其上种植的作物产生极大影响^[43],由此可知,地源性耕地土壤具有一定的复杂性.本研究区域内,Cd 总量差异大导致浮石镇有效态含量较其他乡镇高.就浮石镇土壤-稻米而言,呈现出土壤 Cd 含量高,稻米 Cd 的含量较低的特点,这与冯金飞^[44]的研究结果相一致,作物 Cd 含量高值区分布与土壤 Cd 高值区分布

存在明显差异,说明土壤 Cd 含量高的区域作物含量并不一定高^[44]。然而,相较于大良镇,其稻米 Cd 点位超标率达 54.55% 而土壤却均不超标,造成这一现象的主要原因可能是与当地所种植的水稻品种密切相关。代子雯等^[45]在地质高背景农田土壤下种植不同品种水稻盆栽发现,YZ 品种稻米 Cd 含量显著高于其他品种。同时,有研究表明浙优 18、甬优 9 和甬优 12 等杂交稻品种的 Cd 积累能力均要高于其它常规稻^[46]。窦韦强等^[47]也发现田间环境中影响稻米 Cd 富集的因素众多。由于不同地区种植水稻的品种存在差异,且不同品种水稻所拥有的基因型不同,从而导致 Cd 在水稻系统中的吸收、转运和积累产生极大的区别。有研究表明,基因型 *OsNramp5*、*OsHMA5* 和 *OsHMA2* 等对 Cd 在水稻内的富集和转运起着主要的控制作用^[48,49]。总之,若要对地源性 Cd 异常区下的耕地土壤进行管理是十分棘手和复杂的,社会更应加强对于此类耕地土壤的关注和重视。

4 结论

(1)研究区域水田土壤 Cd、Cu、Ni 和 Zn 均存在点位超过土壤背景值,其中 Cd 超背景值占比最高,为 92.31%;Cd 和 Zn 超过风险筛选值 30.53% 和 25.26%,超标点位主要分布于浮石镇;依照单因子指数法发现 Cd 是研究区域内的主要污染因子。

(2)比较乡镇的稻米 Cd 富集系数发现:大良镇 > 长安镇 > 双蒙镇 > 浮石镇。且大良镇 Cd 的点位超标率最高,高达 54.55%。

(3)相关性分析表明,土壤 pH 为稻米重金属的主要影响因子,且稻米 Cd 和 Ni 具有相似的来源。

(4)稻米重金属健康评价结果显示,大良镇重金属 Cd 的 THQ 值大于 1.0,该研究区域稻米 Cd 存在污染;稻米重金属 TTHQ 值均大于 1.0,成年男性对于稻米的摄入重金属的耐受程度高于成年女性和儿童。

参考文献:

- [1] 曹司旺,董亚杰,徐丛笑. 基于成分分析法判断土壤重金属来源[J]. 科教导刊: 电子版, 2016, (3): 187.
- [2] 何腾兵,董玲玲,李广枝,等. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要重金属含量差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 188-193.
He T B, Dong L L, Li G Z, et al. Differences of heavy metal contents in soils derived from different parent materials/rocks in karst mountain area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(1): 188-193.
- [3] Mendez-Armenta M, Rios C. Cadmium neurotoxicity [J]. Encyclopedia of Environmental Health, 2011: 474-481, doi: 10.1016/B978-0-444-52272-6.00381-0.
- [4] Lindström M. Urban land use influences on heavy metal fluxes and surface sediment concentrations of small lakes[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, 126(3): 363-383.
- [5] 徐应星,李军. 硅和磷配合施入对镉污染土壤的修复改良[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 340-343.
Xu Y X, Li J. Silicon and phosphorus-mediated improve soil contaminated by cadmium [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 340-343.
- [6] 刘意章,肖唐付,熊燕,等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2877-2884.
Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, et al. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China [J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2877-2884.
- [7] 易甜,彭立军,崔文文,等. 湖北省地质高背景地区水稻-镉的耕地安全生产阈值研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(24): 164-168, 214.
Yi T, Peng L J, Cui W W, et al. Study on rice-cadmium of safety production threshold of cultivated land in high geological background area of Hubei province [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(24): 164-168, 214.
- [8] 温华,魏世强. 镉污染土壤植物萃取技术的研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21(5): 52-55.
Wen H, Wei S Q. Advances in phytoextraction of cadmium contaminated soil [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2004, 21(5): 52-55.
- [9] 陈家乐,相满城,唐林茜,等. 运积型地质高背景稻田土壤重金属污染和人体健康风险评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2334-2340.
Chen J L, Xiang M C, Tang L X, et al. Assessing heavy metal pollution and human health risk of paddy soil with high geological background of transportation and deposition [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2334-2340.
- [10] 张海龙,李祥平,胡国成,等. 广西某矿区周边耕地土壤和蔬菜、大米重金属含量特征[J]. 环境化学, 2015, 34(9): 1755-1757.
- [11] Mori M, Kotaki K, Gunji F, et al. Suppression of cadmium uptake in rice using fermented bark as a soil amendment [J]. Chemosphere, 2016, 148: 487-494.
- [12] 王佛鹏,肖乃川,周浪,等. 桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 876-885.
Wang F P, Xiao N C, Zhou L, et al. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals on farmland of geochemical anomaly area in southwest Guangxi [J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 876-885.
- [13] 陈同斌,庞瑞,王佛鹏,等. 桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1855-1863.
Chen T B, Pang R, Wang F P, et al. Safety assessment of rice planting in soil cadmium geological anomaly areas in southwest Guangxi [J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1855-1863.
- [14] 宋波,王佛鹏,周浪,等. 广西高镉异常区水田土壤 Cd 含量特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2443-2452.
Song B, Wang F P, Zhou L, et al. Cd content characteristics and ecological risk assessment of paddy soil in high cadmium anomaly area of Guangxi [J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2443-2452.
- [15] 文海涛,吴福,卢志文,等. 广西柳州市岩溶塌陷成因类型与时空分布特征[J]. 矿产与地质, 2019, 33(4): 753-758.

- Wen H T, Wu F, Lu Z W, *et al.* Genetic type and time-space distribution characteristics of karst collapse in Liuzhou city, Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2019, **33**(4): 753-758.
- [16] 张静, 施向东, 庞洁, 等. 2014—2018年南宁市大米重金属含量监测及膳食风险评估[J]. *职业与健康*, 2020, **36**(19): 2649-2653.
- Zhang J, Shi X D, Pang J, *et al.* heavy metal content monitoring and dietary risk assessment of rice in Nanning city from 2014-2018[J]. *Occupation and Health*, 2020, **36**(19): 2649-2653.
- [17] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1076-1085.
- Li R Z, Pan C R, Xu J J, *et al.* Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1076-1085.
- [18] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J]. *中国农业科学*, 2006, **39**(8): 1589-1597.
- Chen T B, Song B, Zheng Y M, *et al.* A survey of lead concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risks[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, **39**(8): 1589-1597.
- [19] 魏军晓, 耿元波, 岑况. 北京市售大米重金属含量监测及膳食风险评估[J]. *现代食品科技*, 2018, **34**(6): 267-273.
- Wei J X, Geng Y B, Cen K. The heavy metal content monitoring and dietary risk assessment of commercial rice in Beijing[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2018, **34**(6): 267-273.
- [20] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法及广西土壤背景值[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992: 216-217.
- [21] 张云, 胡正生, 王艳, 等. 某氧化铜矿尾矿区重金属污染特征及农作物健康风险评价[J]. *有色金属工程*, 2021, **11**(4): 125-132.
- Zhang Y, Hu Z S, Wang Y, *et al.* Heavy metals pollution characteristics and crop health risk assessment around a copper oxide Tailings pond[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, **11**(4): 125-132.
- [22] 门中华, 王颖. 锌在植物营养中的作用[J]. *阴山学刊*, 2005, (2): 8-12.
- [23] 蒋逸骏, 胡雪峰, 舒颖, 等. 湘北某镇农田土壤-水稻系统重金属累积和稻米食用安全研究[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(2): 410-420.
- Jiang Y J, Hu X F, Shu Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in the soil-rice system and assessment of dietary safety of the rice produced in the paddy fields-a case study of a town in the northern part of Hunan province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(2): 410-420.
- [24] 杨定清, 傅绍清, 青长乐. 镍的作物效应及临界值研究[J]. *四川环境*, 1994, **13**(1): 19-23.
- Yang D Q, Fu S Q, Qing C L. A study on critical value and effects of nickel on crops[J]. *Sichuan Environment*, 1994, **13**(1): 19-23.
- [25] 慕姝, 何森, 王卓, 等. 铅的作物效应研究进展[J]. *吉林农业科学*, 2010, **35**(3): 12-14.
- Mu S, He M, Wang Z, *et al.* Progress in researches on the effect of Pb on plants[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2010, **35**(3): 12-14.
- [26] 张国庆. 土壤—小麦系统中汞和铬生态毒理效应的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [27] 赵建忠, 李冉, 封朝晖. 镉在小白菜体内的累积规律及其生物效应研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (4): 40-43.
- Zhao J Z, Li R, Feng C H. A study on the physiological effects of cadmium on Bok Choy and its accumulation therein[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2009, (4): 40-43.
- [28] Shahid M, Dumat C, Khalid S, *et al.* Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system[M]// Gunther F A, De Voogt P. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Cham: Springer, 2016, **241**: 73-137.
- [29] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(4): 1266-1273.
- Zhong X L, Zhou S L, Huang M L, *et al.* Chemical form distribution characteristic of soil heavy metals and its influencing factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(4): 1266-1273.
- [30] 黄丹丹. 淹水和有机质对土壤镉活性消长行为的影响及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [31] 阮玉龙, 李向东, 黎廷宇, 等. 喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害[J]. *地球与环境*, 2015, **43**(1): 92-97.
- Ruan Y L, Li X D, Li T Y, *et al.* Heavy metal pollution in agricultural soils of the karst areas and its harm to human health[J]. *Earth and Environment*, 2015, **43**(1): 92-97.
- [32] 刘舒飞. 广西地球化学区带规律与异常分布分形解析[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [33] 李丽辉, 王宝禄. 云南省土壤 As、Cd 元素地球化学特征[J]. *物探与化探*, 2008, **32**(5): 497-501.
- Li L H, Wang B L. Geochemical characteristics of As and Cd in soils of Yunnan province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, **32**(5): 497-501.
- [34] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 449-459.
- Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [35] 唐启琳. 贵州省罗甸北部喀斯特地区土壤和农作物中镉的分布特征及风险评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [36] 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 等. 连续 4a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1880-1887.
- Xue Y, Yin Z R, Sheng H, *et al.* Reduction of soil cadmium activity and rice cadmium content by 4-year-consecutive application of organic fertilizer[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1880-1887.
- [37] 倪中应, 沈倩, 章明奎. 秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, **34**(3): 215-225.
- Ni Z Y, Shen Q, Zhang M K. Effects of crop straw returning with lime on activity of Cu, Zn, Pb and Cd in paddy soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, **34**(3): 215-225.
- [38] 刘静, 李筑江, 王萍, 等. 不同叶面肥对稻米重金属含量的影响[J]. *农业与技术*, 2021, **41**(8): 1-4.
- [39] 项佳敏, 谢国雄, 章明奎. 镉低积累品种与调理剂降低黑色岩系农田水稻镉吸收的效果[J]. *江西农业学报*, 2020, **32**(7): 12-16.
- Xiang J M, Xie G X, Zhang M K. Effects of planting low Cd accumulation varieties and applying amendments on reducing Cd uptake by rice in farmland derived from black rocks[J]. *Acta*

- Agriculturae Jiangxi, 2020, **32**(7): 12-16.
- [40] 陈丽娜, 柳晓娟, 刘文菊, 等. 水分管理模式对水稻根区砷铁磷动态变化规律的影响[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(1): 93-98.
- Chen L N, Liu X J, Liu W J, *et al.* Dynamics of As, Fe and P concentrations in the rhizosphere of rice plants growing under three water regimes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, **23**(1): 93-98.
- [41] 葛颖, 马进川, 邹平, 等. 水分管理对镉轻度污染农田水稻镉积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, **40**(3): 79-86.
- Ge Y, Ma J C, Zou P, *et al.* Improving water management to reduce Cd accumulation in rice in lightly Cd-polluted paddy soils [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, **40**(3): 79-86.
- [42] 黄涂海. 镉污染农田土壤的分类管控实践[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [43] 崔岩山, 陈晓晨. 土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 403-408.
- Cui Y S, Chen X C. Bioaccessibility of soil cadmium and its health risk assessment [J]. Environmental Science, 2010, **31**(2): 403-408.
- [44] 冯金飞. 高速公路沿线农田土壤和作物的重金属污染特征及规律[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [45] 代子雯, 方成, 孙斌, 等. 地质高背景农田土壤下不同水稻品种对 Cd 的累积特征及影响因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2016-2023.
- Dai Z W, Fang C, Sun B, *et al.* Cadmium accumulation characteristics and impacting factors of different rice varieties under paddy soils with high geological backgrounds [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 2016-2023.
- [46] 陈德, 叶雪珠, 张棋, 等. 不同水稻品种对 Cd、Zn 的积累特性[J]. 浙江农业科学, 2020, **61**(10): 2113-2118, 2121.
- Chen D, Ye X Z, Zhang Q, *et al.* Accumulation characteristics of Cd and Zn in different rice varieties [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, **61**(10): 2113-2118, 2121.
- [47] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 稻米镉的生物富集系数与其影响因素的量化关系[J]. 土壤, 2021, **53**(4): 788-793.
- Dou W Q, An Y, Qin L, *et al.* Quantitative relationship between the bioconcentration factor of rice cadmium and its influencing factors [J]. Soils, 2021, **53**(4): 788-793.
- [48] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(2): 750-759.
- [49] 叶长城, 陈喆, 彭鸥, 等. 不同生育期 Cd 胁迫对水稻生长及镉累积的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(8): 3201-3206.
- Ye C C, Chen Z, Peng O, *et al.* Effects of cadmium stress on growth and cadmium accumulation in rice at different growth stages [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(8): 3201-3206.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jiangshugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)