

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水処理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估

陈同斌^{1,2}, 庞瑞¹, 王佛鹏¹, 周浪¹, 宋波^{1,3*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为评估镉地质异常区水稻种植的安全性, 在广西西南地区采集自然土壤 41 件, 稻田土壤 479 件, 相应水稻样品 432 组, 测定其 Cd、Cu、Ni 和 Zn 含量以及土壤基本理化性质. 运用单因子污染指数法 (P_i) 对样品污染程度进行评价, 运用相关性分析探究影响稻米中重金属含量的主要因子. 结果表明: ① 稻田土壤 pH 为 6.8; 有机质含量为 $39.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 基于《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 的风险筛选值, 土壤中 Cd、Cu、Ni 和 Zn 超标率分别为 60.75%、2.09%、0.83% 和 1.88%; ② 稻米 Cd 和 Ni 超标率分别为 9.03% 和 4.39%, 考虑秸秆作为饲料和有机肥原料, 其 Cd 相应超标率分别为 6.94% 和 1.16%. ③ 相关性分析表明, 土壤 pH、有机质、重金属总量和有效态含量均是影响稻米中重金属含量的主要因子. 研究区稻米 Cd、Ni 均存在一定超标现象, 可通过种植低积累水稻品种等措施降低稻米中重金属含量.

关键词: 桂西南; 镉异常区; 农田; 稻米; 重金属; 相关性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1855-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201910130

Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi

CHEN Tong-bin^{1,2}, PANG Rui¹, WANG Fo-peng¹, ZHOU Lang¹, SONG Bo^{1,3*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Theory and Technology of Environmental Pollution Control in Guangxi, Guilin 541004, China)

Abstract: To evaluate the safety of rice planting in cadmium geological anomaly areas, 41 natural soil, 479 paddy soil, and 432 rice samples were collected in southwestern Guangxi. The contents of Cd, Cu, Ni, and Zn and soil physical and chemical properties were measured. The single factor pollution index method (P_i) was used to evaluate the degree of contamination of the sample, and correlation analysis were used to explore the main factors affecting the heavy metal content in rice. The results showed that ① soil pH of the paddy field was 6.8; the organic matter content was $39.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; the risk screening value was based on the soil environmental quality standards for soil pollution risk control and control of agricultural land (GB 15618-2018), the exceeding standard rates of Cd, Cu, Ni, and Zn in soil were 60.75%, 2.09%, 0.83%, and 1.88%. ② The over-standard rates of Cd and Ni in rice were 9.03% and 4.39%, respectively. Considering straw as raw material for feed and organic fertilizer, the corresponding over-standard rates of Cd were 6.94% and 1.16%. ③ Correlation analysis showed that soil pH, organic matter, total heavy metal, and available content were the main factors affecting the content of heavy metals in rice. Cd and Ni in the study area all exhibited certain over-standard phenomena, and the low-accumulation rice varieties could be planted to reduce heavy metal content in rice.

Key words: southwest Guangxi; cadmium anomaly area; farmland; rice; heavy metals; correlation

近年来, 稻米污染问题时有报道, 稻米质量安全已成为全社会广泛关注的课题. 稻米重金属污染因毒性大, 能在人体内蓄积, 会对人体神经、消化和血液等系统产生危害, 并有可能引发癌症而引起关注^[1]. 造成稻米重金属污染的主要途径有两种: 一是人为污染, 主要是工业、农业生产及城市生活所带来的废水排放导致; 二是源于地质背景, 主要是由成土母质本身重金属含量高而导致土壤重金属富集, 进而造成稻米中重金属含量超标^[2~4]. 近年来, 我国开展的多目标地球化学调查发现, 在滇黔桂地区存在一个规模巨大的以自然地质背景为主的地球化学异常区, 主要分布在三省交界及附近区域, 总面积约 40 km^2 , 镉平均值达 $1583 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中以广西尤为突出^[5]. 前人的研究结果发现^[6~10], 在广西西部、

西北部和中部等地区土壤 Cd 含量均存在不同程度的超标现象. 宋波等^[11]对广西镉异常区水田土壤进行调查发现, 广西镉异常区水田土 Cd 含量高达 $0.708 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超标率达 56.8%. 可见, 广西地区土壤重金属超标现象严重, 而水稻作为广西第一大粮食作物, 其安全问题理应不容忽视.

我国对人为导致的稻米重金属污染状况的研究已有较多^[12, 13], 但针对地质异常区稻米重金属的研

收稿日期: 2019-10-18; 修订日期: 2019-11-11

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17204047); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂财教函[2018]319号)

作者简介: 陈同斌(1963~), 男, 研究员, 主要研究方向为重金属污染土壤修复与废弃物资源化, E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

究较少,有学者发现广西中部地质异常区稻米均未出现超标现象^[8],也有学者发现在广西部分地区稻米均存在超标现象^[9,10].可见,在广西不同地区,稻米 Cd 含量差异较大.在这些研究中,由于研究区范围相对较小,样本量偏少等原因,有必要进一步开展更为系统的调查.本文以广西西南六县地区为例,研究土壤及水稻秸秆和稻米中 Cd、Cu、Zn 和 Ni 这 4 种重金属的含量,探讨广西地质异常区下稻米的安全性,旨在为土壤的合理开发利用和粮食的安全生产提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区背景

研究区位于广西壮族自治区西南部(东经 106°29′~108°06′,北纬 22°29′~24°01′),如图 1 所示.据调查资料显示,广西地球化学异常区主要分布在桂林市、来宾市、南宁市、河池市、百色市和崇左市及其管辖的县级行政区.本课题组之前对河池市和来宾市等地区土壤重金属含量已有较为详细的调查研究^[14~22],发现其重金属含量超标主要与矿业活动影响有关,同时结合研究区地形地貌以及农作物种植情况等,因此选择广西西南部的田阳县、田东县、隆安县、天等县、大新县和平果县作为研究对象.这些地区为典型的喀斯特岩溶地貌,其母岩碳酸盐岩在成土过程中发生淋溶,使得重金属易富集,造成土壤中重金属背景偏高,为典型的地质高背景区.该地区常年种植水稻,采样区内无发达工业,未见显著的区域性人为污染.

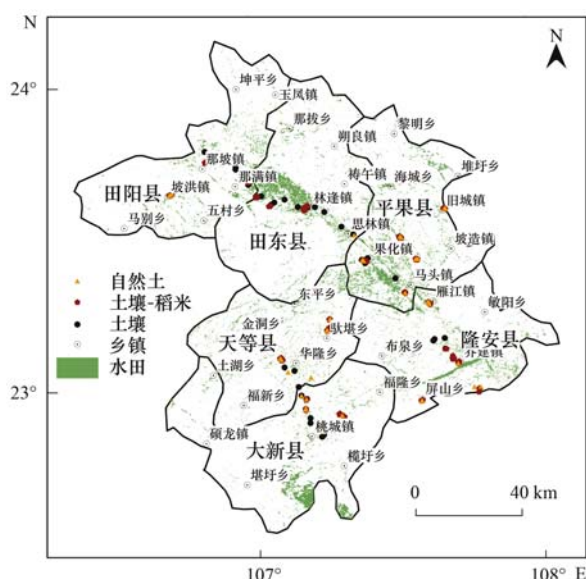


图 1 采样点位置分布示意

Fig. 1 Sample point location distribution

1.2 样品采集与分析

2017 年 7 月在广西西南地区进行采样,共采集

自然土壤 41 件,稻田土壤 479 件,并同步采集水稻样品 432 件.自然土壤采样尽量选择在远离人类活动或受人类活动影响较小的山地或植被发育完好地方,刨去 0~30 cm 上层土,单点采集深度在 30 cm 以下.稻田土壤和水稻样品采集过程中,选择远离公路和工矿企业的农田,尽量使点位分散,稻田土壤采样深度为 0~20 cm.样品采集后,土壤样品在室内自然风干,去除植物根系和石块等杂质后,用玛瑙研钵研磨过 0.850 mm 和 0.149 mm 尼龙筛,将样品分别装于信封袋保存备用.水稻秸秆以及稻米进行分离后用去离子水洗净后,置于烘箱中烘干,用粉碎机粉碎后密封保存.

土壤 pH 测定采用玻璃电极法,水土比为 2.5:1;土壤有机质测定采用水合热重铬酸钾氧化-比色法;土壤及水稻秸秆和稻米中重金属元素全量分析采用美国环保署推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法^[23];土壤重金属有效态采用 DTPA(二乙烯三胺五乙酸)浸提法提取.由美国 PerkinElmer 公司生产的 ELAN DRC-e 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定 Cd、Cu、Ni 和 Zn 含量.分析过程中所用试剂均为优级纯,实验用水为超纯水,所用器皿均在 10% 的硝酸中浸泡 24 h 以上.分析过程加入 GBW 07404(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、GBW(GSV-1)灌木枝叶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%,样品 Cd、Zn、Cu 和 Ni 的回收率分别为 90.02%~103.54%、90.55%~107.9%、89.91%~108.9% 和 92.60%~108.4%.

1.3 评价方法

1.3.1 样品重金属污染评价

采用单因子污染指数法对样品中 4 种重金属进行评价.单项污染指数法能够比较直观地反映环境中各项污染指标的情况,计算公式为:

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

式中, P_i 为样品中重金属 i 的单项污染指数; C_i 为样品中重金属 i 的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为样品中重金属 i 的限量值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.土壤样品中重金属限量值以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15619-2018)中的风险筛选值为评价标准;稻米中 Cd 以《食品安全国家标准 食品污染物限量》(GB 2762-2017)中限定值 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为评价标准;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)中限定值 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为稻米 Zn 和 Cu 评价标准;由傅逸根等^[24]的研究结果,以限定值 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为稻米 Ni 的评价标

准;水稻秸秆以《有机肥料》(NY 525-2012)和《饲料卫生标准》(GB 13078-2017)中规定的限值 3.0 mg·kg⁻¹和 1.0 mg·kg⁻¹分别进行评价. $P_i \leq 1.00$,样品未受到污染; $1.0 < P_i \leq 2.00$,样品受到轻度污染; $2.0 < P_i \leq 3.00$,样品受到中度污染, $P_i > 3.00$,样品属于重度污染.

1.3.2 稻米富集系数

稻米富集系数(BCF)可以反映稻米从土壤中吸收富集重金属的能力,用稻米中重金属含量与对应土壤中重金属含量的比值表示.其表达式为:

$$BCF = C_R / C_S \quad (2)$$

式中,BCF 为富集系数; C_R 为稻米中重金属的含量; C_S 对应土壤中同一重金属的含量.BCF 越大,表明稻米对重金属的富集能力越强.

1.4 数据处理

图形处理采用 ArcGIS 10.2 绘制,利用 SPSS 23.0 对原始数据进行相关统计分析.

2 结果与分析

2.1 自然土壤各项指标含量特征

使用 Grubbs 检验法剔除异常值后,研究区自然

土壤 Cd、有效态 Cd 以及有效态 Cu 含量呈对数正态分布,因此用几何平均值表征.其余指标均符合正态分布,因此用算术均值表征(表 1).研究区自然土壤 pH 为 6.9,整体处于中性水平.有机质含量为 35.36 g·kg⁻¹,整体处于丰富等级.Cd、Cu、Ni 和 Zn 总量分别为 1.333、35.95、52.58 和 174.9 mg·kg⁻¹,其中 Cd 的变异系数大于 1,属强变异程度,表明研究区自然土壤 Cd 含量差异较大.经单样本 *t* 检验,研究区自然土壤 Cd、Cu、Ni 和 Zn 与百色地区土壤背景值存在显著性差异($P < 0.01$),均高于百色地区土壤背景值^[25].潘根兴等^[26]提出将有效态重金属与重金属总量的比值称为活化率,用以表征重金属元素的后动强度,并且土壤中的有效态重金属是能被植物所吸收和同化的部分,其有效态的含量决定了其生物有效性的高低.研究区自然土壤 Cd、Cu、Ni 和 Zn 活化率分别为 25.78%、4.79%、0.72% 和 1.45%,其中 Cd 的生物有效性最高.

2.2 稻田土壤各项指标含量特征及重金属污染评价

研究区土壤各项指标含量经对数转换后为正态分布,因此以几何均值表征各指标含量,见表 2.研究区稻田土壤 pH 为 6.8,整体处于中性水平,变异

表 1 研究区自然土壤各指标含量特征¹⁾

Table 1 Characteristics of natural soil indicators in the study area

土壤指标	分布类型	样本数/个	范围	平均值 ± 标准差	中位数	几何平均值 (几何标准差)	变异系数/%
pH	正态	41	5.3 ~ 8.1	6.9 ± 0.7	7.1	7.0(1.1)	9.43
OM	正态	41	7.97 ~ 57.62	35.36 ± 14.45	39.21	31.75(1.674)	40.87
Cd	对数正态	40	0.144 ~ 10.53	2.402 ± 2.624	1.508	1.333(3.222)	109.2
Cu	正态	40	11.46 ~ 72.59	35.95 ± 13.44	35.35	33.38(1.499)	37.39
Ni	正态	39	10.52 ~ 116.5	52.58 ± 27.39	47.78	44.46(1.889)	52.09
Zn	正态	40	41.33 ~ 413.7	174.9 ± 87.78	170.0	152.6(1.739)	50.19
有效态 Cd	对数正态	40	0.010 ~ 3.240	0.711 ± 0.847	0.357	0.331(3.960)	119.1
有效态 Cu	对数正态	41	0.212 ~ 6.885	2.101 ± 1.738	1.529	1.519(2.344)	82.72
有效态 Ni	正态	37	0.027 ~ 0.979	0.371 ± 0.227	0.317	0.301(2.051)	61.19
有效态 Zn	正态	35	0.441 ~ 5.199	2.280 ± 1.226	1.920	1.966(1.782)	53.77

1) OM 表示土壤有机质含量,单位为 g·kg⁻¹;有效态表示土壤中 DTPA(二乙烯三胺五乙酸)浸提的重金属含量,所有重金属含量单位为 mg·kg⁻¹

表 2 水稻土壤各项指标含量¹⁾

Table 2 Content of each index in paddy soil

元素	范围	平均值 ± 标准差	中位数	几何平均值 (几何标准差)	变异系数 /%	超标率 /%	P_i (基于筛选值)
pH	4.6 ~ 7.9	6.8 ± 0.6	6.9	6.8(1.1)	8.1	—	—
OM	16.15 ~ 93.00	40.44 ± 10.3	41.10	39.00(1.312)	25.50	—	—
全 Cd	0.124 ~ 7.894	1.168 ± 1.150	0.766	0.784(2.431)	98.50	60.75	1.461
全 Cu	1.601 ~ 99.62	34.68 ± 11.91	34.75	32.48(1.473)	34.35	2.09	0.406
全 Ni	2.068 ~ 121.0	33.45 ± 15.06	30.73	30.44(1.571)	45.03	0.83	0.325
全 Zn	8.279 ~ 635.3	136.9 ± 73.96	112.4	122.7(1.579)	54.03	1.88	0.053
有效态 Cd	0.055 ~ 5.875	0.447 ± 0.446	0.297	0.317(2.254)	99.78	—	—
有效态 Cu	1.353 ~ 22.07	5.359 ± 2.071	5.198	5.004(1.455)	38.65	—	—
有效态 Ni	0.047 ~ 2.58	0.46 ± 0.301	0.400	0.391(1.784)	65.44	—	—
有效态 Zn	0.513 ~ 49.78	3.949 ± 4.879	2.664	2.863(2.044)	123.6	—	—

1) OM 表示土壤有机质含量,单位为 g·kg⁻¹;有效态表示土壤中 DTPA(二乙烯三胺五乙酸)浸提的重金属含量,所有重金属含量单位为 mg·kg⁻¹

系数为 8.1%, 表明稻田土壤 pH 值变化幅度较小, 此结果与前人的研究结果一致^[27]. 研究区稻田土壤 pH 略低于自然土壤, 原因可能与施肥等人类活动有关. 有机质含量 $39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其整体处于丰富等级. 稻田土壤有机质含量是全国第二次土壤普查耕层土壤有机质平均含量 $19.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 2 倍, 是广西区耕层土壤有机质平均含量 $26.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 1.5 倍, 同时也高于研究区自然土壤有机质含量, 其原因可能与水稻秸秆等残体腐烂后有机质还田, 以及人为施加肥料等耕作活动影响有关^[28,29].

土壤中 Cd、Cu、Ni 和 Zn 总量几何均值分别为 0.784、32.48、30.44 和 $122.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各重金属含量低于研究区自然土壤, 可能是因为长期种植水稻带走了部分重金属. 其中 Cd 的变异系数为 98.5%, 为高度变异, 表明研究区稻田土壤总 Cd 含量差异较大. 用单因子污染指数法, 对研究区水田土壤重金属污染状况进行评价. 结果表明, 稻田土壤 Cd、Cu、Ni 和 Zn 超标率分别为 60.75%、2.09%、0.83% 和 1.88%, 其中 Cd 的超标率最为严重; 其单项污染指数分别为 1.461、0.406、0.325 和 0.053, 其中 Cd 的单项污染指数大于 1, 表明研究区稻田土壤 Cd 整体处于轻度污染水平. 文献^[30]中规定, 到 2020 年, 受污染耕地安全利用率达到 90% 左右, 到 2030 年, 受污染耕地安全利用率达到 95% 以上, 因此以安全利用率达 95% 作为评估标准, 土壤中只有 Cd 存在风险. 在大新县、隆安县、平果县、天等县、田东县和田阳县土壤 Cd 超标率分别为 100% (50/50)、70.65% (65/92)、95.54% (107/112)、96.08% (49/51)、5.49% (5/91) 和 18.07% (15/83). 利用 ArcGIS 10.2 软件绘制稻田土壤 Cd 污染指数空间分布, 见图 2. 稻田土壤 Cd 存在中-重度污染现象的地区主要有隆安县、大新县、天等县和平果县.

土壤中有有效态 Zn 的变异系数为 123.6%, 属于强变异, 表明土壤中有有效态 Zn 具体较高的离散程度. 稻田土壤中 Cd、Cu、Ni 和 Zn 的活化率分别为 40.43%、15.41%、1.28% 和 2.3%. 与自然土壤相比, 稻田土的活化率高于自然土壤, 这可能与人为活动影响有关. 与前人研究结果相比, 研究区稻田土壤总镉及有效态镉均低于广西西部地区^[6]. 经单样本 *t* 检验, 总镉与广西西部地区存在显著性差异 ($P < 0.01$); 有效态 Cd 与广西西部地区无显著性差异 ($P > 0.05$). 与广西西北稻田土壤重金属含量相比^[7], 研究区 Cd 和 Zn 含量显著低于广西西北地区 ($P < 0.01$), Cu 显著高于广西西北地区 ($P < 0.01$). 某镀锌厂周围^[31]稻田土壤 Cd、Cu 和 Zn 的活化率分为

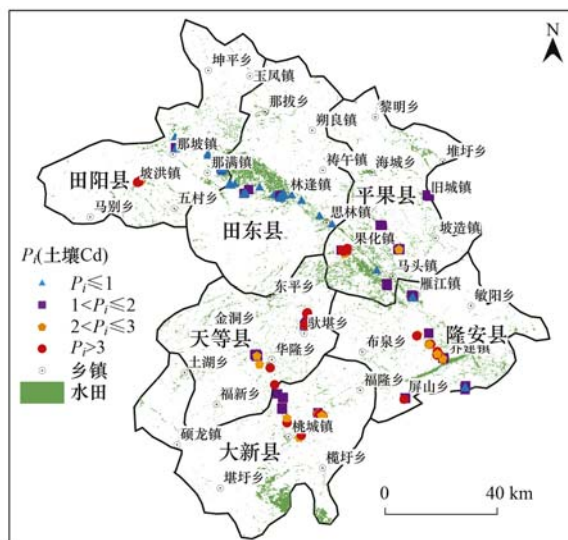


图2 土壤 Cd 单项污染指数空间分布示意

Fig. 2 Spatial distribution of soil Cd single pollution index

46.6%、26.6% 和 10.5%, 某铅锌冶炼厂^[32]周围农田土壤 Cd 和 Zn 的活化率最大值分别为 71.90% 和 55.55%, 均高于本研究区, 可见受工矿业影响的污染区重金属有效性远高于镉地质异常区.

2.3 水稻种植安全性评估

稻米作为主食, 其安全性与人体健康密切相关. 水稻秸秆因会用于还田或作为饲料喂养牲畜, 从而间接地会对土壤和人体带来一定的影响, 因此将从稻米和秸秆两个部分对水稻种植的安全性进行评估. 根据土十条^[30]中规定, 以安全利用率达 95% 作为评估标准.

水稻不同部位重金属含量经对数转换后为正态分布, 因此以几何均值表征各部位重金属含量. 分别根据《有机肥料》(NY 525-2012) 和《饲料卫生标准》(GB 13078-2017) 中的规定对秸秆中重金属污染进行评价. 在这两种标准中, 并无关于 Cu、Ni 和 Zn 含量的相关指标, 因此仅对 Cd 进行评价, 见表 3. 水稻秸秆作为饲料和肥料时超标率分别为 6.94% 和 1.16%. 水稻秸秆用于饲料时, 其超标率大于 5%, 因此存在安全隐患, 需采取必要的措施加以控制.

在大新县、隆安县、平果县、天等县、田东县和田阳县秸秆 (饲料) Cd 超标率分别为 0 (0/38)、4.55% (4/88)、16.67% (18/108)、2.04% (1/49)、2.60% (2/77) 和 5.56% (4/72). 利用 ArcGIS 10.2 软件绘制秸秆 (饲料) Cd 单项污染指数空间分布, 结果见图 3(a). 秸秆 (饲料) Cd 污染的地区主要在平果县、隆安县等地.

根据不同重金属含量限值 (详见 1.3.1 节) 分别评价稻米中各重金属污染状况, 见表 3. 稻米中 Cd、Cu、Ni 和 Zn 的含量几何均值分别为 0.039、

1.508、0.126 和 19.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 Cd 和 Ni 两种元素具有超标现象, 超标率分别为 9.03% 和 4.39%, 以 Cd 的超标情况最为严重. 水稻 Cd 的变异系数为 165.7%, 属于强变异程度, 表明研究区水稻中 Cd 的分布差异较大, 含量不均匀. 水稻 Cd 超标率大于 5%, 因此存在安全隐患, 需要采取必要的措施加以控制. 在大新县、隆安县、平果县、天等县、田东县和田阳县水稻 Cd 超标率分别为 0 (0/38)、

23.86% (21/88)、5.56% (6/108)、14.29% (7/49)、5.19% (4/77) 和 1.39% (1/72). 利用 ArcGIS 10.2 软件绘制水稻 Cd 单项污染指数空间分布, 结果见图 3(b). 水稻 Cd 存在中-重度污染现象的地区主要在隆安县. 将土壤和水稻 Cd 超标地区进行比对, 发现两者分布并非完全匹配, 造成这种状况的原因可能与土壤 pH、有机质和水稻种类有关, 但具体原因有待需进一步研究.

表 3 水稻不同部位重金属含量及污染评价

Table 3 Heavy metal content and pollution assessment in different parts of rice									
类别	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何均值 (几何标准差) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数	饲料标准 超标率/%	P_i (饲料)	肥料标准 超标率/%	P_i (肥料)
秸秆 Cd	0.045 ~ 4.985	0.385 ± 0.560	0.210	0.239 (2.413)	145.45%	6.94	0.385	1.16	0.128
类别	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何均值 (几何标准差) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	超标率 /%	P_i		
稻米 Cd	0.002 ~ 1.176	0.070 ± 0.116	0.033	0.039 (2.631)	165.7	9.03	0.195		
稻米 Cu	0.186 ~ 5.931	1.757 ± 0.882	1.749	1.508 (1.823)	50.20	0	0.151		
稻米 Ni	0.026 ~ 1.757	0.156 ± 0.138	0.116	0.126 (1.839)	88.46	4.39	0.314		
稻米 Zn	8.874 ~ 42.1	19.86 ± 3.436	19.85	19.55 (1.202)	17.30	0	0.460		

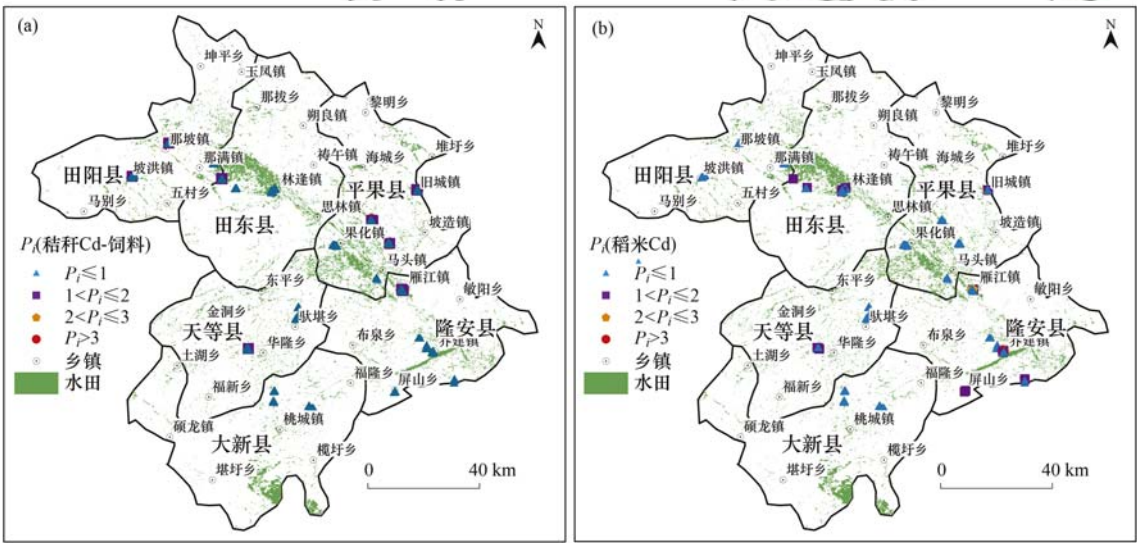


图 3 秸秆 (饲料) 和稻米 Cd 单项污染指数空间分布示意

Fig. 3 Schematic representation of the spatial distribution of single pollution index of straw (feed) and rice Cd

2.4 稻米对重金属的生物富集

稻米对土壤重金属的富集能力直接关系到稻米生产和食用安全, 为更加细致地了解镉异常区稻米对重金属的富集能力, 将研究区稻米各重金属富集系数与前人研究结果进行比对, 见表 4. 在本研究区内, 稻米 Zn 的富集能力最强, 为 0.159, 其次是 Cd, 为 0.050. 由于 Zn 本身就是水稻正常生长所必须的元素, 本身就对其会有一定的富集能力, 而 Cd 作为非必需元素, 稻米对其的吸收能力远高于其他元素, 可见稻米容易积累 Zn 和 Cd, 这与前人研究结果一致^[20,21]. 在广西中部镉异常区, 稻米 Cd、Cu 和 Ni 的富集系数均高于研究区域; 在广西南丹矿业影响区

和长江三角洲受城市化和工业化影响的污染地区, Cd 的富集系数分别为研究区的 15.5 倍和 4.9 倍. 可见, 镉地质异常区稻米中重金属的生物富集系数明显低于人类活动导致的污染区稻米富集系数.

2.5 稻米中各重金属相关性分析

由于稻米中只有 Cd 和 Ni 两种元素具有超标现象, 因此利用 SPSS 23.0 对研究区稻米中 Cd 和 Ni 与土壤各项指标进行相关性分析, 结果见表 5. 从整体来看, 稻米中 Cd 和 Ni 与土壤 pH 和有机质在 0.01 水平下呈显著性负相关, 表明土壤 pH 和有机质含量越高, 稻米中 Cd 和 Ni 含量越低. 从整体来看, 稻米中 Cd 与土壤中总 Cd 和有效态 Cd 并无显

表 4 不同地区稻米重金属富集系数
Table 4 Heavy metal enrichment factors of rice in different regions

项目	地区	Cd	Cu	Ni	Zn	文献
人为影响区	广西南丹	0.777	0.047	—	0.089	[33]
	长江三角洲	0.245	0.175	—	0.250	[34]
地质异常区	广西中部	0.083	0.071	0.008	0.131	[8]
	广西岩溶区	0.076	0.056	0.006	0.079	[10]
	广西西南地区	0.050	0.046	0.004	0.159	本研究

表 5 稻米中 Cd、Ni 与土壤不同指标相关性分析¹⁾
Table 5 Correlation analysis of different indicators of heavy metals and soil in rice

土壤各项 指标	从整体分析		从不同 pH 等级下分析					
	Cd	Ni	5.5 < pH ≤ 6.5 (n = 125)		6.5 < pH ≤ 7.5 (n = 270)		pH > 7.5 (n = 29)	
			Cd	Ni	Cd	Ni	Cd	Ni
pH	-0.221 **	-0.250 **	0.038	-0.031	-0.165 **	-0.137 *	-0.233	-0.051
OM	-0.131 **	-0.249 **	0.056	-0.106	-0.212 **	-0.245 **	-0.074	-0.059
总 Cd	-0.065	-0.162 **	0.180 *	-0.170	-0.100	-0.108	0.583 **	0.040
总 Ni	-0.054	0.031	-0.002	-0.060	-0.011	0.134 *	0.155	0.192
有效态 Cd	-0.034	-0.132 **	0.154	-0.177 *	-0.059	-0.079	0.546 **	0.000
有效态 Ni	0.157 **	0.293 **	0.079	0.283 **	0.138 *	0.245 **	0.518 **	0.056

1) * 表示在 0.05 水平下显著相关; ** 表示在 0.01 水平下显著相关

著相关性,因此根据《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中将研究区土壤 pH 划分为 4 个部分,即 $\text{pH} \leq 5.5$ 、 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 、 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 和 $\text{pH} > 7.5$,根据此等级划分将研究区稻米中各重金属与土壤各项指标进行相关性分析,结果见表 5。当 $\text{pH} \leq 5.5$ 时,样本数只有 8 个,分析结果可能存在一定偏差,因此不对该部分进行相关性分析。当 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 时,稻米 Cd 仅与土壤总 Cd 在 0.05 水平上显著相关,稻米 Ni 与有效态 Ni 在 0.01 水平上显著相关。当 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 时,稻米 Cd 与土壤 pH 和有机质在 0.01 水平上呈显著负相关。当 $\text{pH} > 7.5$,稻米 Cd 与土壤总 Cd 和有效态 Cd 在 0.01 水平上呈显著性正相关性。可见,对稻米重金属含量影响较大的因素主要是土壤中重金属有效态含量、土壤 pH 和有机质含量。

土壤重金属有效态含量越高,稻米中重金属含量越高。土壤 pH 及有机质含量越高,稻米中重金属含量越低。造成这种状况的原因可能是土壤 pH 增加会使土壤有机质的表面电荷增加,从而增加土壤对重金属的吸附能力,导致土壤中可交换态重金属浓度的降低,而可交换重金属是植物直接吸收利用的形态,从而导致稻米中重金属含量降低。土壤有机质与重金属离子的络合作用对土壤中重金属的迁移和固定有着重要的影响,重金属可以与有机质发生多种物理、化学和生物作用,从而使土壤中重金属表现出不同的赋存形态,而土壤重金属形态是决定土壤重金属生物有效性的关键。土壤有机质的增高,会使土壤中重金属的有机结合态和铁锰氧化物结合

态的含量逐渐升高,可交换态重金属含量降低^[35~37]。

3 讨论

3.1 稻米 Cd 污染成因分析

3.1.1 人为原因

研究区稻米 Cd 和 Ni 存在超标现象,而土壤中重金属含量是影响稻米吸收重金属的主要因子。研究区为镉地质异常区水稻种植区域,在水稻生长过程中,农业活动输入,比如施肥和秸秆还田等人为活动难以避免,但工业或矿业活动可以排除。根据 2.5 节的内容可知,稻米中 Cd 和 Ni 含量与土壤 pH 和有机质具有显著相关性,而秸秆还田和施加肥料影响土壤 pH 和有机质的改变,因此不能排除人为活动对稻米重金属含量的影响。秸秆和肥料除了会影响土壤理化性质的改变,也有可能带来部分重金属进入土壤。根据 2.3 节的内容可知,研究区水稻秸秆存在一定超标现象,因此秸秆还田不但会提升土壤有机质含量,还会带来部分重金属进入土壤。文献[38]显示,我国化肥总用量从 1980 年的 1 269.4 万 t 达到 2016 年的 6 022.6 万 t。有研究发现^[39,40],腐殖酸肥料能明显提高土壤的有机质含量以及土壤 pH。随着化肥总用量的增加,化肥的安全性亦值得关注。黄绍文等^[41]对南方 12 省(市)商品有机肥中重金属含量情况的研究显示,鸡粪和猪粪 Cd 超标率为 10.3% 和 20.0%,这些肥料的连续施用不但会增加土壤有机质的含量,还会带来部分重金属进入土壤,从而使稻米中重金属含量增加。郑志斌^[42]的研究发

现,长期施用有机肥和含氯化肥会使稻米中 Cd 含量增加 372% 和 460%。综上所述,水稻秸秆还田以及施加肥料均有可能导致土壤中重金属含量的增加,从而导致稻米重金属含量的增加。

3.1.2 自然原因

据资料显示,研究区为典型的喀斯特岩溶地貌,其母岩为碳酸盐岩,碳酸盐岩风化成土的岩土体积变化,很容易导致重金属 Cd 元素的富集。马宏宏等^[10]的研究发现,广西碳酸盐岩区稻田土壤 Cd 含量均值为 $1.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超标率达 95.6%,稻米超标率为 8.8%。宋波等^[11]对广西镉异常区土壤调查结果显示,广西镉异常区自然土壤中 Cd 含量均值为 $0.915 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水田土壤 Cd 含量为 $0.708 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均远高于广西土壤 Cd 背景值和我国土壤 Cd 背景值。贵州省罗甸北部喀斯特地区耕地土壤 Cd 含量几何均值为 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[43]。根据唐豆豆等^[8]对广西地质高背景区的调查中 Cd、Cu、Ni 和 Zn 含量分别为 0.80、42.3、51.6 和 $177 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,也均远高于广西地区各重金属元素的背景值,但 Cd 与本文调查的稻田土壤 Cd 含量值 $0.784 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 接近。碳酸盐岩 Cd 背景值高及碳酸盐岩风化成土 Cd 的相对富集,是喀斯特地区土壤 Cd 含量高的主要自然因素。综上可知,在地质背景异常区,土壤重金属含量超标现象确实较为严重,稻米也均存在一定超标现象。导致地质高背景的原因除了与成土母质有关,还与土壤类型以及土地利用方式等因素有关^[44,45],且水稻本身就是容易富集 Cd 的农作物^[46],与其他农作物相比,水稻更容易带来风险。

3.2 稻米重金属污染控制措施

有研究表明,土壤 pH、重金属有效态和有机质是影响稻米重金属含量的重要因素^[47-49]。根据本文相关性分析可知,稻米中各重金属含量与重金属有效态含量呈显著正相关,与土壤 pH 和有机质呈显著负相关性。因此可通过使用硅肥和钙镁磷肥等提高土壤 pH,或施加有机肥及通过秸秆还田等方法提升土壤有机质含量,从而抑制稻米对土壤重金属的吸收;或使用化学钝化手段,即向土壤中添加石灰和生物炭等化学钝化剂降低土壤中重金属的生物有效性,从而抑制土壤重金属向稻米中转移。廖敏等^[50]的研究则表明,随着 pH 的升高,镉的吸附量和吸收能力急剧上升,最终发生沉淀。也有学者发现^[51,52],土壤有机质可以固定土壤中的 Cd,但低分子的有机酸或腐殖酸也活化 Cd,从而提升土壤 Cd 的生物有效性,因此有机质对土壤的影响是双向的,通过增加有机质来治理重金属污染存在不确定性。稻米本身属于易富集 Cd 的农作物^[46],因此也可通

过种植相对低积累的水稻品种,从而降低稻米对人体的危害。

3.3 有待进一步研究内容

根据文章中调查结果发现,研究区土壤 Cd 超标严重地区与稻米和 Cd 超标严重地区并不相匹配,造成这种状况的原因可能与土壤理化性质和水稻品种有关,但具体原因有待进一步研究。

4 结论

(1) 基于《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 的风险筛选值,稻田土壤中 Cd、Cu、Ni 和 Zn 超标率分别为 60.75%、2.09%、0.83% 和 1.88%。

(2) 基于《饲料卫生标准》(GB 13078-2017) 和《有机肥料》(NY 525-2012) 标准,水稻秸秆超标率分别为 6.94% 和 1.16%,水稻秸秆用于饲料时存在一定的风险。

(3) 稻米中 Cd、Cu、Ni 和 Zn 的含量分别为 0.039、1.508、0.126 和 $9.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中 Cd 和 Ni 两种元素具有超标现象,超标率分别为 9.03% 和 4.39%。

(4) 以安全利用率达 95% 作为评估标准,土壤和稻米中只有 Cd 存在风险,秸秆作为饲料时 Cd 存在风险。土壤 Cd 污染主要分布在大新县、天等县和平果县等地区;稻米 Cd 污染主要分布在隆安县、天等县、平果县和田东县等地区;秸秆(基于饲料)Cd 污染的地区主要在平果县、隆安县和田东县等地。

(5) 相关性分析表明,土壤 pH、有机质、重金属总量和有效态含量均是影响稻米中重金属含量的主要因子。

参考文献:

- [1] 余涛,杨忠芳. 重金属元素摄入总量与健康安全评估——以湖南洞庭湖地区为例[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 196-202.
Yu T, Yang Z F. Intake amount of heavy metal elements and health and safety assessments—a case study of the Dongting Lake area, Hunan, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 196-202.
- [2] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, et al. Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 107: 140-147.
- [3] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, et al. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 261: 387-397.
- [4] Martín J A R, Ramos-Miras J J, Boluda R, et al. Spatial relations of heavy metals in arable and greenhouse soils of a Mediterranean environment region (Spain)[J]. Geoderma, 2013, 200-201: 180-188.
- [5] 谢学锦,程志中,张立生,等. 中国西南地区 76 种元素地球

- 化学图集[M]. 北京:地质出版社, 2008. 138-152.
- [6] 黄玉溢, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 桂西地区稻田土壤重金属污染现状调查及评价[J]. 南方农业学报, 2014, **45**(2): 240-243.
- Huang Y Y, Chen G F, Xiong L M, *et al.* Survey and evaluation of heavy metal contamination of paddy soil in western Guangxi [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, **45**(2): 240-243.
- [7] 郑富海, 黎宁, 张卫, 等. 桂西北稻田重金属污染及健康风险评价[J]. 西南农业学报, 2017, **30**(8): 1886-1893.
- Zheng F H, Li N, Zhang W, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of paddy soil in Northwestern Guangxi [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **30**(8): 1886-1893.
- [8] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(1): 18-26.
- Tang D D, Yuan X Y, Wang Y M, *et al.* Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(1): 18-26.
- [9] 李杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. 中国岩溶, 2018, **37**(1): 43-52.
- Li J, Zhu L X, Tang Z Q. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, South China [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, **37**(1): 43-52.
- [10] 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 soil-crop system from a typical carbonate rocks area in Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [11] 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.
- [12] 蒋昭琼. 达州市稻米重金属污染状况及健康风险评价[J]. 环境工程, 2015, **33**(S1): 669-672.
- Jiang Z Q. Heavy metal pollution and health risk assessment of rice in Dazhou City [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(S1): 669-672.
- [13] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中As、Pb、Cd污染及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2314-2320.
- Len M, Zeng M, Wang L H, *et al.* Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(11): 2314-2320.
- [14] 李黎, 宋波, 陈同斌, 等. 广西西江流域土壤铜含量状况调查与风险评估[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(4): 644-656.
- Li L, Song B, Chen T B, *et al.* Copper concentration in soil of Xijiang River basin of Guangxi and risk assessment [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(4): 644-656.
- [15] 刘畅, 宋波, 张云霞, 等. 西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 899-908.
- Liu C, Song B, Zhang Y X, *et al.* Spatial variability and contamination of arsenic in soils of Xijiang River basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 899-908.
- [16] 宋波, 杨子杰, 张云霞, 等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1888-1900.
- Song B, Yang Z J, Zhang Y X, *et al.* Accumulation of Cd and its risks in the soils of the Xijiang River drainage basin in Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1888-1900.
- [17] 宋波, 张云霞, 庞瑞, 等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- Song B, Zhang Y X, Pang R, *et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang River draining of Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- [18] 王佛鹏, 宋波, 黄宇妃, 等. 广西西江流域土壤中铬空间分布与背景值再研究[J]. 土壤学报, 2018, **55**(4): 889-899.
- Wang F P, Song B, Huang Y F, *et al.* Further study on spatial distribution and background value of chromium in soil in Xijiang River basin, Guangxi, China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(4): 889-899.
- [19] 杨子杰, 宋波, 陈同斌, 等. 广西西江流域土壤Zn积累和分布特征及生态风险[J]. 生态与农村环境学报, 2017, **33**(12): 1064-1074.
- Yang Z J, Song B, Chen T B, *et al.* Accumulation, distribution and ecological risk of Zn in soils in the Xijiang River valley of Guangxi [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, **33**(12): 1064-1074.
- [20] 杨子杰, 宋波, 王佛鹏, 等. 广西西江流域土壤Sb含量特征分布与污染评价[J]. 环境污染与防治, 2018, **40**(12): 1436-1442, 1448.
- Yang Z J, Song B, Wang F P, *et al.* Content distribution of Sb and its pollution assessment in soils of Guangxi Xijiang River basin [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018, **40**(12): 1436-1442, 1448.
- [21] 于洋, 宋波, 陈同斌, 等. 西江流域土壤镍含量特征及风险评估[J]. 环境污染与防治, 2018, **40**(6): 698-703, 709.
- Yu Y, Song B, Chen T B, *et al.* Content characteristics and risk assessment of Ni in soils of Xijiang River basin [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018, **40**(6): 698-703, 709.
- [22] 张云霞, 宋波, 陈同斌, 等. 广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2446-2455.
- Zhang Y X, Song B, Chen T B, *et al.* Spatial distribution study and pollution assessment of Pb in soils in the Xijiang River drainage of Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2446-2455.
- [23] USEPA. Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils [R]. Washington, DC: USEPA, 1996.
- [24] 傅逸根, 胡欣, 俞苏霞. 食品中镍限量卫生标准的研究[J]. 浙江省医学科学院学报, 1999, (1): 9-11.
- [25] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法及其广西土壤背景值[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992.
- [26] 潘根兴, 高建芹, 刘世梁, 等. 活化率指示苏南土壤环境中重金属污染冲击初探[J]. 南京农业大学学报, 1999, **22**(2): 46-49.
- Pan G X, Gao J Q, Liu S L, *et al.* Activity index as an indicator of environmental stress of heavy metal elements on soils in southern Jiangsu, China [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, **22**(2): 46-49.
- [27] 谢传维. 广西岩溶地区土壤类型及特性[J]. 广西农学院学

- 报, 1982, (1): 83-93.
- [28] 杨帆, 李荣, 崔勇, 等. 我国南方秸秆还田的培肥增产效应[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (1): 10-14.
Yang F, Li R, Cui Y, *et al.* Effect of straw returning on improving soil fertility and increasing crop yield in southern China [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011, (1): 10-14.
- [29] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 2017, **54**(5): 1047-1056.
Yang F, Xu Y, Cui Y, *et al.* Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(5): 1047-1056.
- [30] 刘劲松, 胡俊良, 张鲲, 等. 柿竹园矿区及周边农田土壤重金属形态分布与生物有效性研究[J]. 金属矿山, 2018, **47**(11): 155-160.
Liu J S, Hu J L, Zhang K, *et al.* Study on speciation and bioavailability of heavy metals of agricultural soils in Shizhuyuan mining and its adjacent area [J]. Metal Mine, 2018, **47**(11): 155-160.
- [31] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z Q, *et al.* Natural colonization of plants on five lead/zinc mine tailings in Southern China [J]. Restoration Ecology, 2005, **13**(1): 49-60.
- [32] 中华人民共和国国务院. 土壤污染防治行动计划[Z]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2016.
- [33] 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 等. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2919-2926.
Tian M L, Zhong X M, Zhang Y X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2919-2926.
- [34] Chen H Y, Yuan X Y, Li T Y, *et al.* Characteristics of heavy metal transfer and their influencing factors in different soil-crop systems of the industrialization region, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **126**: 193-201.
- [35] 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.
- [36] 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 等. 土壤 pH 值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. 中国矿业, 2017, **26**(6): 79-83.
Yang X M, Ren G M, Li L X, *et al.* Effect of pH value on heavy metals form of soil and their relationship [J]. China Mining Magazine, 2017, **26**(6): 79-83.
- [37] 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.
- [38] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2018 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [39] 苏群, 孙磊, 杜红, 等. 腐植酸肥料对茶园土壤改良的应用效果[J]. 磷肥与复肥, 2019, **34**(8): 34-36.
Su Q, Sun L, Du H, *et al.* Application effect of humic acid fertilizer on soil improvement of tea garden [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, **34**(8): 34-36.
- [40] 李鹏程, 苏学德, 王晶晶, 等. 腐植酸肥与菌肥配施对果园土壤性质及葡萄产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (1): 121-126.
Li P C, Su X D, Wang J J, *et al.* Effects of humic acid fertilizer and biological fertilizer on soil properties and grape yield and quality [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2018, (1): 121-126.
- [41] 黄绍文, 唐继伟, 李春花. 我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(1): 162-173.
Huang S W, Tang J W, Li C H. Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(1): 162-173.
- [42] 郑志斌. 长期施肥对紫色土—作物体系铅镉铬富集的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [43] 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.
- [44] 张天蛟, 刘刚, 王圣伟. 基于 GIS/RS 的不同土地利用类型重金属面源污染比较[J]. 农业机械学报, 2014, **45**(S1): 124-132.
Zhang T J, Liu G, Wang S W. Estimation of heavy metal pollution loads from non-point sources based on GIS/RS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, **45**(S1): 124-132.
- [45] 兰砥中. 湖南某典型铅锌矿区农业土壤及农作物中重金属的风险评价[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- [46] Qishlaqi A, Moore F, Forghani G. Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **172**(1): 374-384.
- [47] Kawada T, Suzui S. A review on the cadmium content of rice, daily cadmium intake, and accumulation in the kidneys [J]. Journal of Occupational Health, 1998, **40**(4): 264-269.
- [48] 易亚科. 土壤 pH 值对低镉积累水稻品种镉吸收及生长发育的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- [49] 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.
- [50] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 1999, **19**(1): 81-86.
Liao M, Huang C Y, Xie Z M. Effect of pH on transport and transformation of cadmium in soil-water system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, **19**(1): 81-86.
- [51] 余贵芬, 蒋新, 孙磊, 等. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. 生态学报, 2002, **22**(5): 770-776.
Yu G F, Jiang X, Sun L, *et al.* A review for effect of organic substances on the availability of cadmium in soils [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, **22**(5): 770-776.
- [52] Frohne T, Rinklebe J. Biogeochemical fractions of mercury in soil profiles of two different floodplain ecosystems in Germany [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2013, **224**(6): 1591.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)