

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



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

广西高镉异常区水田土壤 Cd 含量特征及生态风险评价

宋波¹, 王佛鹏¹, 周浪¹, 吴勇², 庞瑞¹, 陈同斌^{1*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004)

摘要: 本研究调查了广西高镉异常区水田土壤中重金属 Cd 的含量水平, 评估其对环境潜在生态风险。通过初步筛查和详细调查两部分, 分批次采集高镉异常区土壤样品共 912 件, 测定土壤 Cd 含量, 并运用单因子污染指数法和潜在风险指数法对水田土壤 Cd 污染程度及潜在风险进行评价。结果表明: ①初查中自然土壤、水田土壤和旱地土壤 Cd 几何均值分别为 0.915、0.591 和 0.593 mg·kg⁻¹。②详查中土壤 pH 为 4.6~8.7, 介于酸性和弱碱性间。若以《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018) 为标准, 平果县、天等县、大新县、隆安县和柳城县水田土壤样点 Cd 超标严重, 融水县水田土壤样点无污染; 以土壤基线值为评价标准, 田东县、柳城县和融水土壤样点中 Cd 均为无污染状态; 田阳县、平果县、天等县、大新县、隆安县和融安县水田土壤 Cd 处于轻度-中度污染的比例分别为: 4.2%、3.7%、14.9%、2.6%、7.1% 和 1.4%。③9 个县市水田土壤中 Cd 呈现不同级别潜在生态风险。天等县、大新县和隆安县部分水田土壤样点 Cd 处于高等生态风险, 比例为 4.3%、2.6%、2.4%; 田阳县、平果县、融安县和柳城县水田土壤 Cd 表现为中-中高等潜在风险; 田东县和融水县处于低潜在生态风险。总体上, 研究区水田土壤中 Cd 整体偏高, 长此以往可能会对水稻安全种植产生影响, 最终对当地居民产生健康威胁, 应引起重视。建议开展对研究区土壤镉生物有效性和水稻镉累积状况研究, 以便科学合理地评估其生态风险和健康风险。

关键词: 高镉异常区; 水田土壤; 生态风险; 广西

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2443-10 DOI: 10.13227/j. hjkx. 201806202

Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi

SONG Bo¹, WANG Fo-peng¹, ZHOU Lang¹, WU Yong², PANG Rui¹, CHEN Tong-bin^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To investigate the levels of heavy metal Cd in paddy soils in high cadmium anomaly areas in Guangxi, and to assess their potential ecological risks to the environment. Through preliminary screening and detailed investigation, 912 pieces of soil samples from high-cadmium abnormal area were collected in multiple batches to determine the soil Cd content. The single-factor pollution index method and potential risk index method were used to control the Cd pollution degree of paddy soil. Potential risks were evaluated. The results showed that: ① The average Cd values of natural soil, paddy soil, and dryland soil in the initial screening were 0.915, 0.591, and 0.593 mg·kg⁻¹, respectively. ② In the detailed investigation, the soil pH is 4.6-8.7, which is between acidic and weakly alkaline. If the Soil Environmental Quality Standard (GB 15618-2018) is used as the evaluation standard, the Cd of the soil sample in Pingguo County, Tiandong County, Long'an County, and Liucheng County is seriously exceeded, and the soil sample in the paddy field of Rongshui County is not polluted. Based on the soil baseline value, the Cd in the soil samples of Tiandong County, Liucheng County, and Rongshui County were non-polluting. In the paddy soils of Tianyang County, Pingguo County, Tianxian County, Daxin County, Long'an County, and Rong'an County, the proportion of Cd in mild to moderate pollution was 4.2%, 3.7%, 14.9%, 2.6%, 7.1%, and 1.4%, respectively. ③ Cd in paddy soils of nine counties and cities presents different levels of potential ecological risks. The soil Cd of some paddy fields in Tiandong County, Daxin County, and Long'an County was at a high ecological risk ratio of 4.3%, 2.6%, and 2.4%. The soil Cd of Tianyang County, Pingguo County, Rong'an County, and Liucheng County was medium-Middle and high potential risks. Tiandong County and Rongshui County are at low potential ecological risks. In conclusion, the overall Cd in the paddy soil of the study area is high, which may affect the safe planting of rice in the long-term. It will eventually pose a health threat to local residents and should be taken care of. It is recommended to carry out research on soil cadmium bioavailability and rice cadmium accumulation in the study area in order to assess its ecological risk and health risk more scientifically and reasonably.

Key words: high cadmium anomaly area; paddy field soil; ecological risk; Guangxi

土壤作为重要的环境组成成分之一, 是保障农作物安全生产的基础, 而土壤重金属状况将直接影响农作物的品质。土壤中重金属主要来源有两种: 一是源自地质背景, 主要由成土母质本身重金属含量高而导致土壤重金属富集^[1]; 二是源自人类活动, 主要是工业、农业生产和城市生活带来的污染^[2]。值得注意的是, 近年来我国开展的

多目标地球化学调查发现, 在滇黔桂存在一个规

收稿日期: 2018-06-24; 修订日期: 2018-11-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600); 广西科技重大专项(桂科 AA17204047-2); 科技成果转化与推广计划项目(桂科转 1599001-1)

作者简介: 宋波(1972~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为重金属污染土壤修复和区域环境调查, E-mail: songbo@glut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

模巨大的以自然地质背景为主的镉地球化学异常区,异常区内镉的平均值达 $1.215 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[3]. 广西的西部和北部包含在内,其中平果-河池地区异常强度高,且梯度和浓集中心十分明显,位于右江褶皱系及周围地区. 众所周知,镉(cadmium, Cd)是典型的有毒有害、人体非必须的微量元素,是优先控制的人类致癌物和食品污染物,也是全球性污染物之一^[4].

广西典型的喀斯特岩溶地貌使得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. 水稻是广西的第一大粮食作物,而且是易富集 Cd 的农作物之一^[5]. 与其他土地利用方式相比,水田土壤 Cd 超标更容易带来健康风险. 因此了解高镉异常区水田土壤中 Cd 含量现状显得极其重要. 目前多数学者围绕以矿山开采、金属冶炼产生的废水、废渣排放等人为因素的角度对广西部分地区水田土壤中 Cd 含量进行调查研究^[6~9],当然也有针对典型高背景镉地区进行土壤重金属生态风险评价研究^[10, 11],但其研究范围和调查样本量均较小. 因此,对广西高镉异常区开展大规模的水田土壤 Cd 含量特征调查分析及其潜在生态风险评价成为亟需解决的问题.

本研究首先根据文献[3]中 Cd 的地球化学分布图进行初步筛选,了解 Cd 的空间分布状况,然后选出周边无工业污染和未受到显著的人为污染,且由成土母质带来的高镉富集的水田集中分布区域作为研究对象,深入了解广西高镉异常区水田土壤中 Cd 含量水平,同时利用 Hakanson^[12]提出的潜在生态危害指数法对水田土壤 Cd 的潜在生态危害进行评价,旨在为土壤的合理利用提供重要的参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区背景

广西的高镉异常区主要分布在西部和北部,课题组曾对广西西江流域农田土壤(旱地和水田)Cd 含量进行详细调查研究^[13],见图 1 中蓝色区域. 因此本次将调查区域设定在广西的西部、西南部和北部部分地区,研究区及样点分布如图 1 所示. 所调查的区域属南亚热带和亚热带季风气候,主要河流包括右江、左江、黑水河、刁江、柳江. 研究区属较典型的喀斯特地貌,出露地层主要为三叠系、泥盆系和石炭系,土壤呈弱酸性或弱碱性,主要由碳酸盐岩风化作用形成.

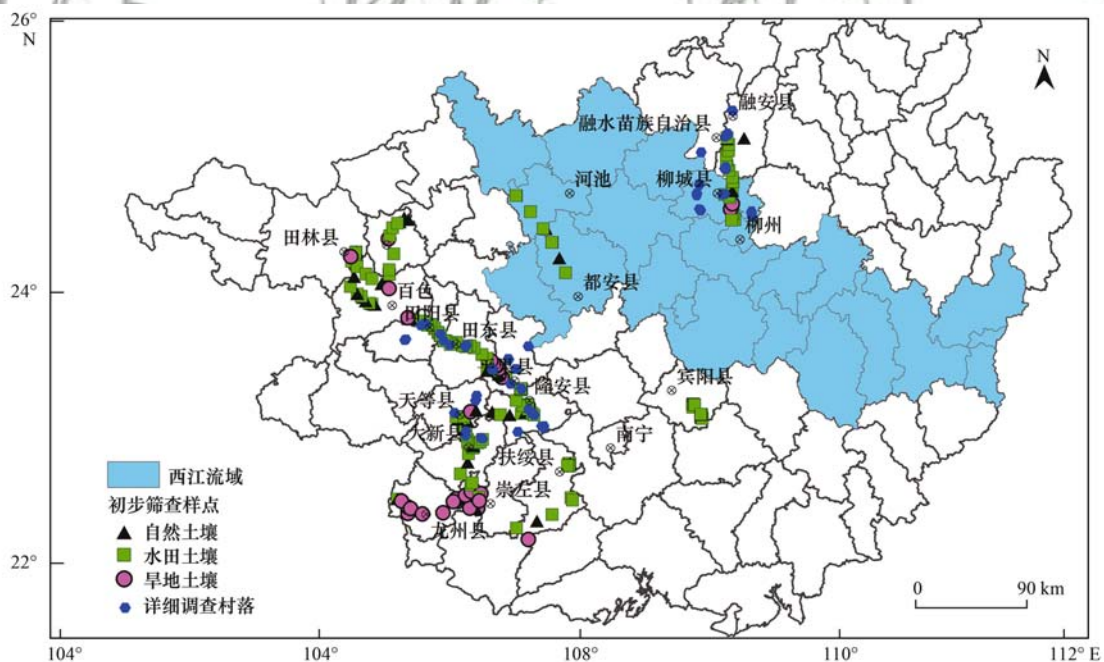


图 1 研究区样点分布示意

Fig. 1 Sketch map of the research area

1.2 样品采集与前处理

初步筛查土壤样品采集于 2017 年 4 月,共采集样品 213 件. 根据其土地利用方式,分成了水田土壤、自然土壤、旱地土壤,样品数量分别为:145 件、38 件和 30 件. 详细调查土壤样品采集于 2017

年 7~11 月,共采集样品 699 件,其中自然土壤 48 件,水田土壤 651 件. 根据初筛的调查结果,并以《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018)中农用地土壤污染风险筛选值为依据,根据标准中水田土壤中 Cd 的最低标准值 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为基准,按照 1 倍、2

倍的数量关系将研究划分成高镉 ($> 0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、中镉 ($0.3 \sim 0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、低镉 ($< 0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 区域, 同时结合地形地貌和水田分布等因素, 将详查区域缩小到田阳县、田东县、平果县、隆安县、天等县、大新县、柳城县、融安县和融水苗族自治县中的 2~4 个乡镇村落. 采集土壤样品原则: 对于自然土壤, 选择远离人类活动或受人类活动影响较小的山地、植被发育完好地方, 采用单点采集, 深度为 20~30 cm; 对于农田土壤, 布点过程中综合考虑农田的规模、连片性及周围环境等因素. 在初筛过程中, 水田和旱地土壤均为混合样品, 从 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的正方形 4 个顶点和中心点共 5 个点采集表层土壤 (0~20 cm), 均匀混合后用四分法从中选取 1 kg 土壤作为混合样品. 在详查过程中, 根据该村落农田分布情况, 用单点采集的方式取样, 并使样品密度保持在每件 2 km^2 .

土壤样品自然风干后除去石块等杂质, 研磨、过 0.149 mm 筛, 储存于信封袋中, 用于理化性态分析. 整个过程中无外来重金属污染.

1.3 样品分析与质量控制

土壤样品中元素含量分析采用全消解的处理方法, 采用美国环保署推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法^[14], 由美国 PerkinElmer 公司产的 ELAN DRC-e 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定 Cd 含量. 土壤 pH 值采用玻璃电极法, 水土比为 2.5:1. 分析过程中所用试剂均为优级纯, 实验用水均为超纯水, 所用器皿均在 10% 的硝酸中浸泡 24 h 以上. 分析过程采用国家标准土壤样品 (GSS-4) 和空白进行质量控制, 分析样品的重复数为 10%~15%, 样品回收率在 90%~110% 之间.

1.4 图形处理与数据处理

图形处理则采用 ArcGIS 10.2 绘制, 利用 SPSS 19.0 对原始数据进行相关统计分析.

1.5 评价方法

土壤环境质量评价中, 若以背景值作为土壤清洁与否的标注则过于严格, 因此, 夏增禄^[15]建议采用基线值作为土壤污染评价指标, 对于正态分布的数据, 土壤基线值用自然背景算术均值与 2 倍算术标准差之和表征; 对于对数正态分布的数据, 土壤基线值则用自然背景几何均值与几何标准差平方的乘积表征.

土壤重金属污染评价采用单项污染指数法, 单项污染指数法针对的是单一污染物, 计算公式如下:

$$P = C/S \tag{1}$$

式中, P : 重金属 Cd 单项污染指数, C : 重金属 Cd 含

量实际值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. S : 样品重金属 Cd 含量的限量标准值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 以基线值作为限量标准值. 当 $P \leq 1$ 时, 无污染; $1 < P \leq 2$ 时, 轻度污染; $2 < P \leq 3$ 时, 中度污染; $P > 3$ 时, 重度污染.

采用得到国际上广泛应用的瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态风险指数法. 该方法不仅考虑到重金属的含量, 而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起, 采用具有可比的、等价属性指数分级法进行评价^[16]. 此方法应用范围不断拓展, 现已被广泛应用于土壤环境生态风险研究. 根据该方法, 土壤中重金属 Cd 的潜在生态风险系数表达式为:

$$E_r = T_r \cdot (C_s/C_n) \tag{2}$$

式中, C_n : 重金属 Cd 相对于研究区的背景值; C_s : 土壤中重金属 Cd 的实测浓度; T_r : 重金属 Cd 毒性响应系数, 采用 Hakanson 制定的标准系数 30; E_r : 重金属 Cd 的潜在生态风险系数.

根据潜在生态风险系数可将土壤污染分级, 见表 1.

表 1 E_r 分级标准

Table 1 Grand standards of E_r	
污染系数 (E_r)	污染程度
$E_r < 40$	低潜在生态风险
$40 \leq E_r < 80$	中等潜在生态风险
$80 \leq E_r < 160$	中高等潜在生态风险
$160 \leq E_r < 320$	高等潜在风险
$E_r \geq 320$	极高等潜在风险

2 结果与分析

2.1 初查土壤重金属 Cd 含量特征

初查土壤样品中 Cd 含量基本统计结果见表 2. 自然土壤 Cd 含量经对数转换后为正态分布, 因此自然土壤镉含量用几何均值来表示^[17], 为 $0.915 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于广西西江流域土壤 Cd 背景值 $0.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[18], 是广西土壤 Cd 背景值 $0.267 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[19] 的 3.4 倍, 是我国 A 层土壤 Cd 几何均值 $0.074 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 12 倍多. 水田土壤和旱地土壤 Cd 含量范围分别为 $0.107 \sim 6.833 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.111 \sim 4.205 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 两种不同类型土壤中 Cd 的偏度和峰度系数均较大, 表明 Cd 变化幅度大, 与平均值偏离较远, 而且两者的变异系数都大于 1, 属于强变异, 具有较高的离散度. 统计样本中, 若以《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018) 为依据, 根据农田土壤 pH 值的不同, 水田土壤和旱地土壤 Cd 的超标率分别为 54.5% 和 73.3%. 经独立样本 T 检验, 水田土壤、旱地土壤与自然土壤样品中 Cd 含

量存在显著差异($P < 0.01$). 广西属于典型的喀斯特地貌, 土壤主要由碳酸盐系石灰岩发育而来, 加之石灰岩母质发育的土壤中 Mn、Ni、Zn、Pb、As、

Cd 等重金属元素背景值含量通常高于其它成土母质发育的土壤^[20], 使得土壤中 Cd 含量均呈现出偏高的状况.

表 2 不同类型土壤 Cd 含量基本统计特征

Table 2 Basic statistical characteristics of Cd content in different types of soil

土壤类型	样本数量	pH 范围	全 Cd 含量范围 /mg·kg ⁻¹	算术均值 ± 标准差 /mg·kg ⁻¹	几何均值(标准差) /mg·kg ⁻¹	峰度系数	偏度系数	变异系数
自然土壤	38	4.4 ~ 8.1	0.026 ~ 12.89	2.502 ± 3.215	0.915(2.049)	3.177	1.833	1.28
水田土壤	145	4.8 ~ 7.9	0.107 ~ 6.833	0.970 ± 1.060	0.596(1.524)	6.678	2.181	1.09
旱地土壤	30	4.8 ~ 7.9	0.111 ~ 4.205	0.939 ± 0.981	0.593(1.517)	2.904	1.715	1.04

通过对抽样调查的乡镇村落的土壤 Cd 含量进一步统计分析, 属于柳州、柳城县和融安县土壤中 Cd 含量范围在 0.218 ~ 10.07 mg·kg⁻¹; 宾阳县土壤 Cd 含量为 0.170 ~ 0.466 mg·kg⁻¹; 在扶绥县、崇左县、龙州县、大新县、天等县和隆安县范围内土壤 Cd 范围为 0.170 ~ 12.89 mg·kg⁻¹; 平果县、田东县、田阳县、百色、田林县和凌云县抽样区土壤 Cd 范围在 0.026 ~ 4.266 mg·kg⁻¹; 都安县和河池土壤 Cd 含量为 0.307 ~ 4.010 mg·kg⁻¹. 同时针对不同类型土壤中 Cd 含量状况绘制了分级符号分布图(图 2), 并与 Cd 地球化学分布图对比后发现, 此次调查结果与图集中 Cd 含量高低值分布区具有一致性, 因此初步筛查结果可为详细调查提供可靠依据.

阳县、田东县、平果县、宾阳县和百色市属于低镉区域, 田林县、凌云县、融安县、柳城县、和柳州市属于中隔区域, 天等县、大新县、隆安县属于高镉区域; 从土壤类型来看, 龙州县、崇左县和扶绥县主要以旱地为主, 其它县市则以水田为主. 地形资料显示来看, 西部的田林县和凌云县地形主要以石林、盆地和山谷为主, 主要以种植茶叶为主, 水田分布不成规模. 河池市和都安县则受采矿业影响较大.

综上所述, 以实验分析结果为基础, 结合调查区土地利用方式、交通状况、地形地貌、有无工业等因素, 最终选择田阳县、田东县、平果县、隆安县、天等县、大新县、柳城县、融安县和融水苗族自治县中的 2~4 个乡镇村落的水田土壤作为详细调查研究对象.

在图 2 中, 从土壤 Cd 含量等级分布来看, 田

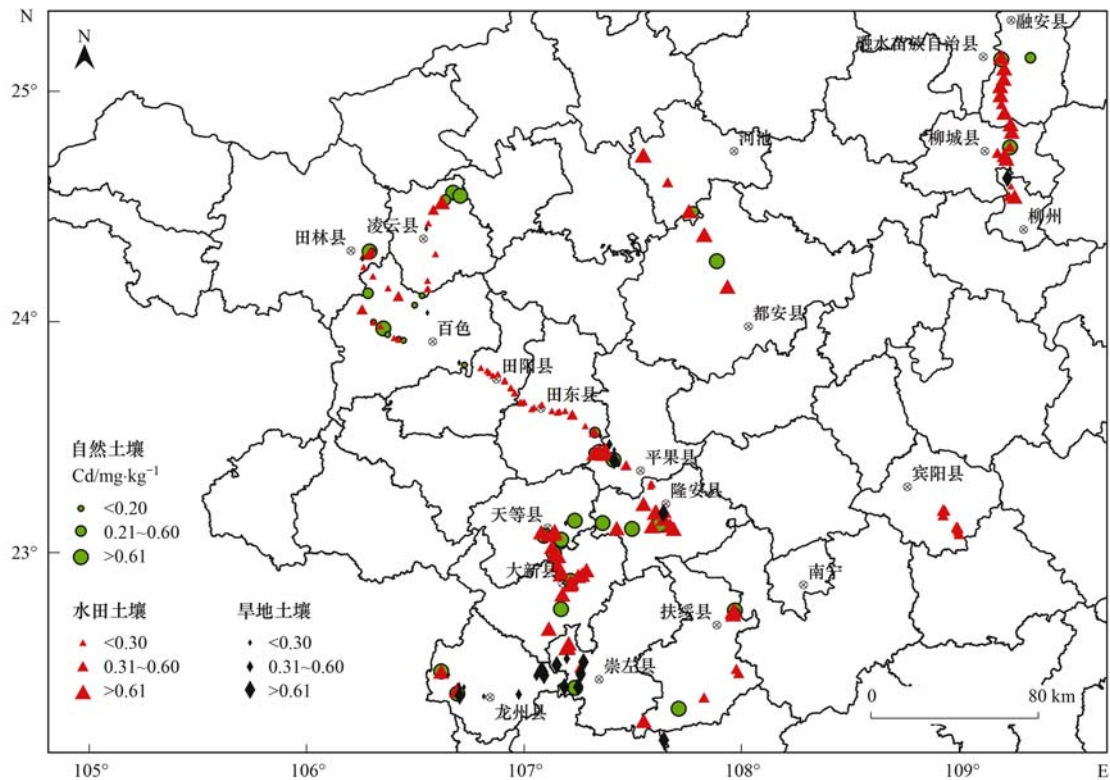


图 2 不同类型土壤 Cd 含量分布

Fig. 2 Distribution of Cd content in different types of soil

2.2 详查区土壤中 Cd 含量特征及污染评价

对详查中抽样的乡镇村落按照从属的县市进行划分,对其土壤 Cd 含量进行统计(表 3).从偏度和峰度系数来看,原始数据均呈右偏峰态,同时不同类型土壤中 Cd 含量的变异系数较大,而变异系数较大是由于偏高值较多引起的,就会引起算术均值增大,因此对于离散程度较大的数据用几何均值更有代表性^[21].

对自然土壤而言,抽样区土壤中 Cd 几何均值为 1.069 mg·kg⁻¹,是广西西江流域土壤 Cd 背景值 0.56 mg·kg⁻¹ 的 1.9 倍,要显著高于广西土壤 Cd 背景值 0.267 mg·kg⁻¹^[19].以《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018)中农用地污染风险筛选值中水田土壤 Cd 含量最低标准值(0.3 mg·kg⁻¹)为依据,按照水田土壤 Cd 几何均值的大小,将不同县市土壤 Cd 含量分为 3 个等级,即高镉(>0.6 mg·kg⁻¹)、中镉(0.3~0.6 mg·kg⁻¹)、低镉(<0.3 mg·kg⁻¹).地处西南地区的平果县、天等县、大新县、隆安县

和中部的柳城县土壤中 Cd 含量处于较高水平,归属于高镉区域;位于西部的田东县、田阳县和中部的融安县则属于中隔区域;融水县土壤 Cd 含量相对其它县市较低,则划分到低镉区域.整个研究区水田土壤 Cd 几何均值为 0.708 mg·kg⁻¹,低于浙江北部的地质高背景地区土壤 Cd 含量(0.96 mg·kg⁻¹)^[10].

在自然界中,地表岩石通过风化过程和成土过程形成了土壤,因此同一区域内土壤中的重金属含量相对一致,但是在抽样区部分县市自然土壤 Cd 含量要明显高于所在区域中水田土壤中 Cd 含量,这可能是由于水田土壤常年种植农作物水稻,水稻是易于吸附土壤中 Cd,使得水田土壤中 Cd 含量偏低而自然土壤 Cd 含量偏高;而另外一部分县市自然土壤 Cd 含量要低于水田土壤 Cd 含量,可能是由于在这些县市中采集的自然土壤样本量较少造成的.总体而言详查区域内水田中 Cd 含量总体水平较高,表现出一定的累积趋势.

表 3 不同县市土壤重金属 Cd 含量基本统计特征

Table 3 Basic statistical characteristics of Cd content in different counties and cities								
抽样区	土壤类型	样本数量	范围 /mg·kg ⁻¹	算术均值 ± 标准差 /mg·kg ⁻¹	几何均值 (标准差) /mg·kg ⁻¹	峰度	偏度	变异系数
田阳县	自然土壤	3	3.909~10.53	7.249±3.312	6.701(1.243)	—	-0.075	0.45
	水田土壤	72	0.167~4.398	0.754±1.093	0.424(1.482)	3.919	2.265	1.44
田东县	水田土壤	77	0.141~0.851	0.343±0.096	0.331(1.122)	9.583	1.929	0.27
平果县	自然土壤	12	0.143~5.223	1.426±1.567	0.852(1.599)	2.446	1.737	1.09
	水田土壤	108	0.453~4.945	1.464±0.898	1.254(1.266)	2.290	1.559	0.61
天等县	自然土壤	7	0.204~15.28	4.159±6.147	1.237(2.140)	0.421	1.417	1.47
	水田土壤	47	0.412~6.585	1.726±1.462	1.351(1.331)	3.384	1.994	0.84
大新县	自然土壤	6	1.624~2.975	2.290±0.504	2.244(1.100)	-0.977	0.312	0.22
	水田土壤	38	0.932~6.016	1.852±0.941	1.695(1.189)	9.610	2.631	0.50
隆安县	自然土壤	8	0.219~6.587	1.987±2.313	1.045(1.716)	1.153	1.440	1.16
	水田土壤	85	0.291~7.893	1.277±1.376	0.905(1.386)	8.043	2.666	1.07
柳城县	自然土壤	8	0.071~5.818	1.276±2.177	0.329(2.066)	2.115	1.771	1.71
	水田土壤	133	0.179~2.599	0.837±0.481	0.693(1.325)	-0.188	0.531	0.57
融水县	水田土壤	21	0.163~0.338	0.236±0.050	0.231(1.099)	-0.884	0.157	0.21
融安县	自然土壤	4	0.263~7.091	2.665±3.026	1.499(1.798)	3.169	1.696	1.13
	水田土壤	70	0.078~4.757	0.993±1.080	0.501(1.689)	0.490	1.087	1.08
合计	自然土壤	48	0.071~15.28	2.469±3.229	1.069(1.846)	5.114	2.116	1.30
	水田土壤	651	0.078~7.893	1.052±1.043	0.708(1.471)	7.586	2.347	0.99

抽样区土壤 pH 范围 4.6~8.7,整体处于酸性和弱碱性之间.若以《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018)中农用地污染风险筛选值为评价标准,结果见表 4.则属于高镉区域的平果县、天等县、大新县、隆安县和柳城县的水田土壤中 Cd 的超标率严重,其中最严重的平果县、天等县和大新县土壤 Cd 超标率在 95% 以上,隆安县和柳城县水田土

壤 Cd 超标率在 68% 和 60% 左右.高镉区域土壤 Cd 超标严重,可能是该区域土壤 pH 偏酸性造成的,在酸性条件下,土壤中吸收的镉离子易于发生活化迁移;处于中隔区域的田阳县、田东县和融安县土壤 Cd 平均超标率在 20.8%、3.9% 和 38.6%;融水县的土壤 Cd 含量处于安全线以下,无污染样点.总体来看,在抽样区共采集 651 个水田土壤样

本中, 根据不同 pH 范围内限定值的不同, 样本中 Cd 的超标率达到了 56.8%. 可见广西高镉异常区内水田土壤中 Cd 超标严重, 特别是在平果县、天

等县、大新县、隆安县和柳城县管辖区域内的村落, 水田土壤环境质量不容乐观, 原则上应当采取农艺调控, 替代种植水稻等措施.

表 4 水田土壤 Cd 超标评价结果¹⁾

Table 4 Evaluation results of Cd exceeding standard in paddy soil

抽样区	pH 范围	个数(超标个数)				超标率/%
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5	
田阳县	5.6~7.3	—	46(5)	26(10)	—	20.8
田东县	5.7~7.3	—	31(3)	46(1)	—	3.9
平果县	4.6~7.9	7(7)	14(14)	75(75)	12(8)	96.3
天等县	5.3~7.2	1(1)	9(9)	37(35)	—	95.7
大新县	6.1~7.9	—	1(1)	25(25)	12(12)	100
隆安县	5.9~7.7	—	23(22)	58(35)	4(1)	68.2
柳城县	6.1~8.7	—	21(6)	66(36)	46(37)	59.4
融水县	6.2~8.0	—	5(0)	13(0)	3(0)	0
融安县	5.1~8.1	11(0)	30(4)	19(15)	10(8)	38.6
合计	4.6~8.7	19(8)	180(64)	365(232)	87(66)	56.8

1) 《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018) 中农用地污染风险筛选值: 当 pH≤5.5 时, 限定值为 0.3 mg·kg⁻¹; 当 5.5<pH≤6.5 时, 限定值为 0.4 mg·kg⁻¹; 当 6.5<pH≤7.5 时, 限定值为 0.6 mg·kg⁻¹; 当 pH>7.5 时, 限定值为 0.8 mg·kg⁻¹

然而由于成土母质对土壤 Cd 含量的影响, 使得调查区 Cd 背景值偏高, 若用《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018) 作为土壤污染的评价标准, 造成的结果是, 一些土壤重金属背景值较高的地区容易被认为是重金属超标而污染, 而一些土壤背景值较低的地区, 即使已经污染很严重, 也会被认为是无污染的. 因此采用基线值进行评价更能反映不同地区的客观情况^[22].

抽样区自然土壤 Cd 含量原数据经对数转换后成正态分布, 因此土壤基线值为 3.642 mg·kg⁻¹. 采用单因子污染指数法计算得到不同县市区划水田土壤 Cd 的污染统计结果, 具体见表 5. 评价结果显示, 在高镉区域的平果县、天等县、大新县和隆安县的土壤样点中 Cd 处于轻度污染的比例达到了 3.7%、14.9%、2.6% 和 5.9%. 这 4 个县市中天等县的土壤污染样点比例最高, 另外隆安县中有一个土壤样点处于中度污染; 属于中隔区域的田阳县和融安县土壤样点 Cd 达到轻度污染的比例分别为 4.2% 和 1.4%; 田东县、柳城县和融水县土壤样点 Cd 均处于无污染状态. 总体来看, 抽样区共有 21 个土壤样点 Cd 处于轻度污染, 所占比例为 3.2%; 调查区 96.8% 的土壤样点 Cd 处于无污染状态.

相关研究结果显示, 广西农田土壤重金属 Cd 的超标率大于 75%^[10], 同样在广西西江流域 72.9% 土壤样点中 Cd 含量超过了广西土壤背景值^[9]. 同处于高镉异常区的云南省和贵州省, 云南泔江沿岸农田土壤 Cd 的超标率为 100%, 42.22% 的农田处于重度污染状态^[23]; 遵义市土壤中 Cd 含量超标率达到了 74.51%^[24]. 由此可见, 由自然因

表 5 水田土壤单因子污染指数法评价结果

Table 5 Evaluation result of single factor pollution index method in paddy soil

抽样区	样本数量	个数(比例/%)		
		$P_i \leq 1$ 无污染	$1 < P_i \leq 2$ 轻度污染	$2 < P_i \leq 3$ 中度污染
田阳县	72	69(95.8)	3(4.2)	—
田东县	77	77(100)	—	—
平果县	108	104(96.3)	4(3.7)	—
天等县	47	40(85.1)	7(14.9)	—
大新县	38	37(97.4)	1(2.6)	—
隆安县	85	79(92.9)	5(5.9)	1(1.2)
柳城县	133	133(100)	—	—
融水县	21	21(100)	—	—
融安县	70	69(98.6)	1(1.4)	—
合计	651	629(96.6)	21(3.2)	1(0.2)

素造成的镉高背景区内农田土壤 Cd 普遍超标, 需要引起足够的重视.

综上所述, 以国家标准作为评价标准, 得到水田土壤 Cd 污染的程度要远高于以土壤基线值为标准的评价结果, 这也充分说明了成土母质对土壤中重金属的影响. 由于成土母质对土壤中 Cd 含量的影响, 导致土壤中本底值偏高, 而我国现行标准中并没有针对不同地区的特定进行区别对待, 若采用统一的评价标准, 将不足以反映出研究区真实的 Cd 污染状况; 因此, 在考虑当地的地质地貌、成土母质等相关因素后, 采用更合理的土壤基线值进行污染评价则能够更真实地反映研究区土壤 Cd 的污染情况.

2.3 详查区水田土壤中 Cd 潜在生态风险评价

抽样调查区水田土壤中 Cd 潜在生态风险评价见表 6. 根据潜在风险指数(E)的几何均值大小可

知,除了大新县的生态风险指数在 40 以上,具有中等潜在生态风险外,其它县市的水田土壤 Cd 均为低潜在生态风险,说明大新县土壤 Cd 污染相对严重,其土壤质量状况相较于其它县市不容乐观.通过进一步计算不同县市水田土壤 Cd 的潜在生态风险指数分级频率可以看出,属于高镉区域的天等县、大新县和隆安县的部分水田土壤样点的生态风险指数(E)大于 160,具有高等潜在风险,同时这 3 个县市中土壤样点处于中等-中高等潜在风险的比例分别达到了 31.9%、55.3%、23.1%;田阳县、

平果县和融安县处于低潜在生态风险的比例分别为 83.3%、63.9%、62.9%;田东县和融水县水田土壤 Cd 完全处于低潜在生态风险($E < 40$),其土壤生态质量相对其它县市较好.整体来看,抽样区 76.3%的水田土壤样点处于低潜在生态风险范围内,特别注意的是平果县、天等县、大新县、隆安县和融安县抽样的水田土壤样点均有较高等级的潜在风险,因此,由土壤 Cd 含量整体偏高的特殊性而可能导致的农产品水稻的安全问题需要进一步加强关注.

表 6 水田土壤 Cd 潜在生态风险指数

抽样区	Table 6 Potential ecological risk index of Cd in paddy soil							
	生态风险指数(E)			个数(比例/%)				
	范围	算术均值	几何均值	低潜在生态风险	中等潜在生态风险	中高等潜在生态风险	高等潜在风险	极高等潜在风险
田阳县	4.70 ~ 123.5	21.17	11.91	60(83.3)	4(5.6)	8(11.1)	—	—
田东县	3.95 ~ 23.87	9.621	9.291	77(100)	—	—	—	—
平果县	12.72 ~ 138.8	41.07	35.19	69(63.9)	29(26.9)	10(9.2)	—	—
天等县	11.55 ~ 184.8	48.45	37.91	30(63.8)	10(21.3)	5(10.6)	2(4.3)	—
大新县	26.15 ~ 168.8	51.97	47.57	16(42.1)	18(47.4)	3(7.9)	1(2.6)	—
隆安县	8.18 ~ 221.5	35.83	25.39	64(75.3)	12(14.9)	7(8.2)	2(2.4)	—
柳城县	5.03 ~ 72.95	23.51	19.45	116(87.2)	17(12.8)	—	—	—
融水县	4.57 ~ 9.47	6.619	6.474	21(100)	—	—	—	—
融安县	2.19 ~ 133.5	27.87	14.06	44(62.9)	22(31.4)	4(5.7)	—	—
合计	2.19 ~ 221.5	29.52	19.87	497(76.3)	112(17.2)	37(5.7)	5(0.8)	—

3 讨论

3.1 镉异常成因分析

广西属于典型喀斯特地区,受地形地貌和成土母质等因素的影响,该地区普遍存在高背景镉异常情况.资料显示^[25],在区域底层构造上,田阳县、田东县、平果县、隆安县同属于三叠系,大新县、天等县、融水县、融安县、柳城县则介于泥盆系和石炭系.三叠系岩性主要为碳酸盐岩和陆源碎屑浊积岩,泥盆系则以浅海台地相碳酸盐和盆地相硅质岩及陆相碎屑岩为主;在区域断裂构造上,详查区域的九个县市地处右江断裂带和宜山-柳城断裂带,断裂带两侧则主要以碳酸盐岩为主.在地表岩石不断风化成土过程中,由碳酸盐岩发育而来的土壤中 Cd 含量较高.何腾兵等^[26]的研究发现有碳酸盐系石灰岩发育而来的土壤中 Cd 含量高于其它母质发育的土壤,表明土壤 Cd 含量主要受其母岩(质)的影响.李杰等^[27]的研究指出广西南宁市郊水稻种植区的土壤中 Cd 含量相对偏高,这与研究区主要的岩石类型碳酸盐岩有关,Cd 在碳酸盐岩中含量达到 0.567 mg·kg⁻¹.

在详查过程中,出现部分县市自然土壤中 Cd 含量明显低于水田土壤 Cd 含量的情况.在着重避

开周边无工业污染的前提下,那么人类农业生产活动是造成这种结果的根本原因.广西岩溶地区由于地质构造特殊、成土母质缺乏成土物质、水土流失严重以及矿物营养元素土壤存储能力弱等特点,致使土壤营养成分含量低,因而刺激了对化肥和农药的过分需求^[20].有研究结果表明,农业上施肥对土壤中重金属积累产生直接影响^[28].广西化肥施用强度大,2000 ~ 2008 年,全区农作物总播种面积由 625.86 万 hm² 下降到 569.56 万 hm²,而化肥施用量(折纯)却由 157.76 万 t 增加到了 222.58 万 t,单位播种面积化肥施用量(折纯)由 252 kg·hm⁻² 增加到 391 kg·hm⁻²,年均增长 6.89%;农药单位面积使用量由 6.62 kg·hm⁻² 增长到 8.46 kg·hm⁻²^[10].在实际调查中,一亩地需要施复合肥 80kg 左右.长期使用含重金属的化肥,无疑将大大提高农田土壤重金属的累积速率和数量.另外,过量的使用化肥还会导致土壤酸度增加,使土壤重金属活性增强,导致重金属更易被农作物吸收,从而加重重金属污染的危害.综上所述,抽样区水田土壤中 Cd 含量异常原因主要受到自然因素和人为因素的共同影响.

3.2 镉污染风险

通过对高镉异常区水田土壤 Cd 含量的调查分

析,发现水田土壤中 Cd 含量普遍偏高,其中平果县、天等县、大新县、隆安县、柳城县较为突出. 采用潜在生态风险指数法得到各个县市水田土壤 Cd 的潜在生态风险系数,除了田东县和融水县的水田土壤 Cd 处于低潜在生态风险外,其它县市水田土壤 Cd 均具有中等-中高等-高等潜在生态风险,由此可推断,高镉异常区水田土壤中重金属 Cd 表现出一定的累积趋势.

土壤重金属可以通过多种暴露途径被人摄取,最常见的包括农产品食用暴露、接触暴露和无意吸食土壤暴露^[16],其中农产品食用暴露是人体摄入 Cd 的主要来源. 土壤中重金属可通过农作物-人体系统中累积迁移,从而对人体健康构成严重威胁. 本研究调查区域均以水稻种植为主,而水稻易于富集 Cd^[29]. 表 7 为广西部分地区在分别受到自然地质高背景影响和高强度人类活动影响后土壤-水稻中 Cd 含量状况.

表 7 广西部分地区土壤-水稻 Cd 含量¹⁾
Table 7 Soil-rice Cd content in parts of Guangxi

项目	地区	土壤 Cd/mg·kg ⁻¹		水稻 Cd/mg·kg ⁻¹	
		范围	均值	范围	均值
自然高背景	崇左市 ^[11]	0 ~ 21.88	4.08	0.12 ~ 0.45	0.24
	广西中部 ^[10]	—	0.80	—	0.07
	南宁市郊 ^[33]	—	1.84	—	0.002 5
人类活动	南丹 ^[34]	0.66 ~ 0.9	0.78	0.05 ~ 0.07	0.06
	横县等 ^[6]	0.02 ~ 7.33	0.53	—	0.29
	西江流域 ^[9]	1.43 ~ 33.6	—	n. d. ~ 6.37	—

1) “—”表示参考文献中未列出相关数据

另外从表 7 中还可以得知,无论是受自然地质背景影响还是人类活动影响,土壤中 Cd 总含量和水稻中 Cd 含量并没有明显的一致性,即土壤 Cd 总量高使得水稻 Cd 含量也高的态势. 由此可知,植物对土壤中 Cd 的吸收并不完全由土壤中 Cd 总含量决定. 有研究表明,镉在土壤中的植物有效性在很大程度上取决于镉在土壤中存在的形态^[35]. 换言之,重金属总量相同,但不同形态的比例分布不同,便会产生不同的生物效应与环境效应. 另外,本研究中对土壤 Cd 的污染评价和生态风险评价都是基于土壤中 Cd 的总量进行评价的,而研究表明,土壤中重金属元素总浓度是不足以评价其毒性、有益性以及生物有效性的,还应测定元素在特定样品中存在的形态以及其在各载体间转换规律,才能可靠地评价重金属元素对环境和生态体系的影响^[32].

3.3 有待进一步研究内容

广西存在着高镉异常区是客观存在的事实,此次抽样调查的土壤主要为水田土壤,因此水田土壤的质量就决定了水稻生产的安全性. 因此,应进一

步开展对该抽样调查区域中水稻 Cd 含量的调查,并开展人体健康风险评估. 可以从调查采样有限“点”的研究上升到对水稻产地区域范围内“面”的研究,即结合土壤 pH、SOM、CEC 等理化性质,应用多元回归分析建立水稻 Cd 含量的预测模型,进而从区域层面上综合评价土壤环境质量对水稻质量的影响,为保障农产品安全生产提供科学依据.

总体上,高镉异常区中水田土壤中 Cd 含量普遍偏高,不同县市水田土壤 Cd 均具有不同程度的潜在生态风险,因此应对高镉异常区水田土壤 Cd 超标现象给予高度重视,可通过改变种植方式、使用改良剂以降低土壤 Cd 的植物有效性,减少土壤中 Cd 向农作物的迁移转化量,从而降低土壤 Cd 的潜在生态风险及保证水稻的安全生产.

4 结论

(1)初步筛选调查中,自然土壤中 Cd 含量均值为 0.915 mg·kg⁻¹,是广西土壤 Cd 背景值 0.267 mg·kg⁻¹ 的 3.4 倍. 以基线值(3.841 mg·kg⁻¹)作为

标准, 水田土壤和旱地土壤的超标率分别为 2.83% 和 3.33%。经独立样本 T 检验, 农田土壤呈现出一定的镉累积状况。

(2) 详细调查区域中, 平果县、天等县、大新县、隆安县、柳城县水田土壤 Cd 几何均值大于 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为高镉区域; 田阳县、田东县和融安县土壤 Cd 几何均值介于 $0.3 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 属于中隔区域; 融水县土壤 Cd 含量最低, 为 $0.231 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属于低镉区域。

(3) 研究区县市土壤 pH 介于酸性和弱碱性之间, 以《土壤环境质量标准》(GB 15618-2018) 农用地土壤污染风险筛选值为依据, 9 个县市中平果县、天等县、大新县、隆安县和柳城县水田土壤 Cd 样点超标严重。以土壤基线值为标准运用单因子污染指数评价结果显示: 田东县、柳城县和融水土壤样点中 Cd 均为无污染状态; 田阳县、平果县、天等县、大新县、隆安县和融安县部分水田土壤 Cd 处于轻度-中度污染, 其中天等县和融安县水田土壤 Cd 污染较严重。

(4) 研究区 9 个县市水田土壤中 Cd 呈现不同程度的潜在生态风险, 田东县和融水县水田土壤 Cd 处于低潜在生态风险, 田阳县、平果县、柳城县和融安县水田土壤 Cd 表现出中-中高等潜在生态风险, 而天等县、大新县和隆安县部分水田土壤样点 Cd 具有高等生态风险。

参考文献:

- [1] 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 等. 三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2390-2398.
Liu Y Z, Xiao T F, Ning Z P, et al. Cadmium and selected heavy metals in soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: distribution and source recognition[J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2390-2398.
- [2] 张孝飞, 林玉锁, 俞飞, 等. 城市典型工业区土壤重金属污染状况研究[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(4): 512-515.
Zhang X F, Lin Y S, Yu F, et al. Pollution of heavy metals in urban soils of typical industrial and surrounding residential area in Nanjing city[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, **14**(4): 512-515.
- [3] 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.
- [4] WHO. Trace elements in human nutrition and health[M]. Geneva: World Health Organization, 1996.
- [5] Zwicker R, Promsawad A, Zwicker B M, et al. Cadmium content of commercial and contaminated rice, *Oryza sativa*, in Thailand and potential health implications[J]. Bulletin Of Environmental Contamination And Toxicology, 2010, **84**(3): 285-288.
- [6] 陈桂芬, 雷静, 黄雁飞, 等. 广西稻田镉污染状况及硅对稻米镉的消减作用[J]. 南方农业学报, 2015, **46**(5): 772-776.
Chen G F, Lei J, Huang Y F, et al. Status of heavy metal contamination of paddy soil in Guangxi and effect of silicon fertilizer to reduce Cd content of brown rice[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, **46**(5): 772-776.
- [7] 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.
- [8] 凌乃规. 广西不同类型农田土壤重金属含量状况分析[J]. 农业资源与发展, 2010, **27**(4): 91-94.
- [9] 翟丽梅, 廖晓勇, 阎秀兰, 等. 广西西江流域农业土壤镉的空间分布与环境风险[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(6): 661-667.
Zhai L M, Liao X Y, Yan X L, et al. Spatial variation and environment risk of cadmium in agricultural land in the Xijiang River Draining of Guangxi Province[J]. China Environmental Science, 2009, **29**(6): 661-667.
- [10] 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.
- [11] 吴玉峰. 广西典型高背景镉地区的生态风险评价[D]. 南宁: 广西师范学院, 2016. 5-10.
Wu Y F. Ecological risk assessment of the typical high cadmium background in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 2016. 5-10.
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [13] 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.
- [14] 陈同斌, 郑表明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 117-122.
Chen T B, Zheng Y M, Chen H, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. Environmental Science, 2004, **25**(1): 117-122.
- [15] 夏增禄, 李森照, 李廷芳. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987. 107-110.
- [16] 陈同斌. 区域土壤环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2015. 9-11.
- [17] 夏增禄. 土壤元素背景值表示方法探讨[J]. 农业环境科学学报, 1986, (2): 19-22, 18.
- [18] 王佛鹏, 宋波, 周浪, 等. 广西西江流域土壤重金属背景值再研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(9): 3695-3702.
Wang F P, Song B, Zhou L, et al. Redistribution of heavy metal background in soil of Xijiang River Basin in Guangxi[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(9): 3695-3702.
- [19] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法 & 广西土壤背景值[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992. 216-223.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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 & Control*, 2018, **40**(6): 698-703, 709.
- [23] 金修齐, 王朋, 郭秉林, 等. 小尺度农田土壤 Pb、Zn 和 Cd 空间分布及污染评价——以云南泔江沿岸某农田为例[J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(11): 6190-6195.
- Jin X Q, Wang P, Guo B L, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of Pb, Zn and Cd in small scale farmland soil—A case study of a farmland along the Bijiang River in Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(11): 6190-6195.
- [24] 王大霞. 贵州遵义县农田土壤重金属污染特征及空间变异研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2010. 17-25.
- [25] 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(北京), 2017. 10-15.
- Liu S F. Fractal analysis on geochemical distribution and anomaly separation in the Guangxi Zhuang Autonomous Region [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017. 10-15.
- [26] 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.
- [27] 李杰, 朱立新, 战明国, 等. 南方典型丘陵区酸性土壤重金属地球化学分布特征及来源分异解析[J]. *地质学报*, 2016, **90**(8): 1978-1987.
- Li J, Zhu L X, Zhan M G, *et al.* The geochemical distribution characteristics and source analysis of heavy metals in the typical hilly acidic soil region of south China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, **90**(8): 1978-1987.
- [28] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(2): 466-480.
- Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(2): 466-480.
- [29] Kawada T, Suzuki 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.
- [30] 秦俊法, 李增禧. 镉的人体健康效应[J]. *广东微量元素科学*, 2004, **11**(6): 1-10.
- Qin J F, Li Z X. The effect of Cadmium on human health[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2004, **11**(6): 1-10.
- [31] 郑富海, 黎宁, 张卫, 等. 桂西北稻田重金属污染及健康风险评估[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.
- [32] 张丽娥, 莫招育, 覃健, 等. 广西大厂矿区下游农村土壤重金属污染及儿童健康风险评估[J]. *环境与健康杂志*, 2014, **31**(6): 512-516.
- Zhang L E, Mo Z Y, Qin J, *et al.* Contamination of heavy metals in soils and health risk assessment in children in a downstream village of Dachang mining area in Guangxi [J]. *Journal of Environment and Health*, 2014, **31**(6): 512-516.
- [33] 黄碧燕, 韦宇宁. 广西南宁市郊区土壤及其农副产品重金属污染状况监测与评价[J]. *农业环境与发展*, 2000, **17**(4): 20-22.
- [34] 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.
- [35] 刘俐, 高新华, 宋存义, 等. 土壤中镉的赋存行为及迁移转化规律研究进展[J]. *能源环境保护*, 2006, **20**(2): 6-9.
- Liu L, Gao X H, Song C Y, *et al.* Progress in the study of cadmium occurrence and transportation in soils [J]. *Energy Environmental Protection*, 2006, **20**(2): 6-9.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)