

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价

张云霞¹, 宋波^{1,2*}, 陈同斌^{1,3}, 伏凤艳¹, 黄飞¹, 庞瑞¹, 潘惠妹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; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 为了解广西西江流域土壤 Pb 含量分布特征, 采集有色金属矿区土壤、农田土壤(水田土壤和旱地土壤)和自然土壤共 2 594 个样品, 采用地统计分析与 GIS 相结合的方法研究流域内土壤 Pb 含量空间分布特征与污染状况. 结果表明, 西江流域土壤 Pb 背景值为 51.84 mg·kg⁻¹, 单样本 T 检验结果表明, 显著高于前人背景值研究结果(22.08 mg·kg⁻¹)和广西土壤背景值(20.50 mg·kg⁻¹). 矿区土壤、旱地土壤和水田土壤 Pb 含量分别为 655.9、116.7 和 40.63 mg·kg⁻¹, 矿区土壤 Pb 含量显著高于其他类型土壤. 以《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)和土壤基线值为参考值, 超标率分别为 57.69%、16.40%、8.92% 和 54.95%、8.09%、2.03%, 矿区和农田土壤存在明显的 Pb 积累. 流域土壤 Pb 有明显的空间自相关性, 以结构性变异为主. 西江流域上游至中、下游土壤 Pb 呈现总体递减趋势, 流域特征明显, 高 Pb 含量样点在刁江上游的聚集远大于刁江下游都安段. 西江流域土壤样本 Pb 总体介于轻度污染-中度污染之间, 金城江区及南丹县土壤 Pb 污染突出, 与当地频繁的矿业活动密切相关.

关键词: 西江流域; 土壤; 铅; 污染评价; 空间分布

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2446-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709242

Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi

ZHANG Yun-xia¹, SONG Bo^{1,2*}, CHEN Tong-bin^{1,3}, FU Feng-yan¹, HUANG Fei¹, PANG Rui¹, PAN Hui-mei¹

(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 University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To obtain data for the accumulation of Pb and its risk in soils in the Xijiang River drainage of Guangxi, 2 594 samples were collected from nonferrous metal mining soils, farmland soils (paddy soils and dryland soils), and the background soils in the drainage area. Geostatistical analysis combined with GIS was used to study the soil spatial distribution characteristics and pollution distribution of the soil Pb content. The results showed that the Pb background value of the soil was 51.84 mg·kg⁻¹ in the Xijiang River Basin, and the results of the single sample T test showed that the soil background value was significantly higher than that of a previous study (22.08 mg·kg⁻¹) and the soil background value (20.50 mg·kg⁻¹) in Guangxi province. The geometric mean concentration of Pb in the mining soils, dryland soils, and paddy soils were 655.9, 116.7, and 40.63 mg·kg⁻¹, respectively, significantly higher than that in other soils. Using GB 15618-1995 and the baseline as the limiting value, the corresponding exceedance rate of the mining soils, dryland soils, and paddy soils were 57.69%, 16.40%, and 8.92% and 54.95%, 8.09%, and 2.03%. The mining soils and farmland soils had an obvious lead accumulation trend. There was an obvious spatial autocorrelation of Pb in the soil, and the structural variation was dominant. The content of Pb in the upper reaches of the Xijiang River reached the middle and lower reaches of the Xijiang River, and the soil Pb was characterized by an obvious decrease. The accumulation of high Pb content in the upper reaches of Diaojiang River is much larger than that in the lower reaches of Diaojiang River. The content of Pb in soil samples in the Xijiang River Basin was mainly rated between mild pollution and moderate pollution, and the pollution was concentrated in the municipal administrative area and the mining activity area. The pollution of the soil in Jinchengjiang and Nandan counties was closely related to the frequent local mining activities.

Key words: Xijiang River basin; soil; lead; pollution assessment; spatial distribution

铅(Pb)广泛存在于自然界中,是已知毒性最大、积累性极强的重金属之一^[1].长期蓄积在人体内会严重损害神经、造血系统及消化系统,对婴儿、儿童的智力和身体发育影响尤为严重^[2].土壤中 Pb 可通过食物链进入人体内,对人体健康造成

收稿日期: 2017-09-26; 修订日期: 2017-11-05

基金项目: 广西自然科学基金项目(2013GXNSFEA053002); 广西“八桂学者”建设工程专项; 国家自然科学基金项目(41161056, 41261082)

作者简介: 张云霞(1992~),女,硕士,主要研究方向为污染土壤修复和区域环境调查与风险评估, E-mail: 15755373612@163.com

* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

危害^[3, 4]。土壤中 Pb 除自然源外，主要来源于汽车尾气，工矿业生产和污水灌溉等人为源^[5]。

近年来，土壤重金属污染现象引起广泛关注，国内外学者开展大量关于土壤重金属污染评价和污染空间分布特征方面的研究工作。大量研究表明^[6-8]，基于地统计分析 GIS 的方法为解决土壤重金属污染空间分布、污染评价等问题提供了行之有效的途径，但对于选择合适的参考值来评价重金属污染程度仍是一个难点。

广西作为 Pb 的五大生产基地之一，Pb 矿产丰富。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，重金属易富集，土壤中重金属背景偏高。西江是珠江流域的主干流，在广西的流域面积占整个自治区面积的 86%，是广西主要的粮食产区^[9]。据《广西区铅锌冶炼行业企业排名》统计，广西总共有 100 家铅锌冶炼行业企业，西江流域上游河池地区铅锌矿活动密集，包括 Pb 在内的重金属污染历史遗留问题突出。有学者以土壤环境质量（GB 15618-1995）Ⅲ级为评价标准^[10, 11]，表明刁江整个流域土壤受到不同程度 Pb 污染。有研究表明^[12]，大环江两岸农田土壤 Pb 污染问题突出。为了探明西江流域 Pb 污染分布规律，基于大尺度的流域土壤 Pb 污染及空间变异规律研究亟待展开。本研究对西江流域主要农田土壤、有色金属矿区土壤和自然土壤进行实地抽样调查，考察有色金属矿业活动对流域内土壤 Pb 积累情况，以为流域性土壤 Pb 环境风险控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西江是珠江水系的主干流，在广西境内的流域面积占整个自治区总面积的 86%^[9]。研究区域如图 1，自上游河池地区起至下游梧州地区，主要以刁江、金城江和大小环江（上游 a 区）、柳江和红水河（上游 b 区）黔江和浔江（中游）及西江（下游）等主要河段的沿江区域为主，涉及 5 市及 14 个县（河池市金城江区、南丹县、环江县、罗城县、都安县、宜州市、忻城县、合山市、来宾市、柳州市市辖区、柳江县、柳城县、象州县、金秀县、武宣县、桂平市、平南县、藤县、苍梧县、梧州市）。西江流域不仅是广西主要的粮食生产区，同时铅锌矿矿产资源极其丰富^[13, 14]，位于桂西北地区的丹池成矿带，代表性矿床有马鞍山铅锌矿；位于环江县的北山铅锌黄铁矿床；位于武宣县的重要铅锌矿产地，广西武宣县盘龙-古立-朋村铅锌矿等中型铅锌矿。铅锌矿开采历史悠久，矿业活动密集区，主要分布在南丹、罗城、金城江、环江、武宣等地。

1.2 样品采集与分析

2013 年 7 月至 2015 年 11 月，按照自然土壤、矿区土壤、水田与旱地的分类采样原则，结合西江流域土地利用类型、矿产点分布与地形，通过网格布点，在现有数字底图上确定采样点的基本分布与抽样数，使样品采集密度保持在每 3 km 一个。实际采样中，利用 GPS 定位，考虑土地利用类型的变化

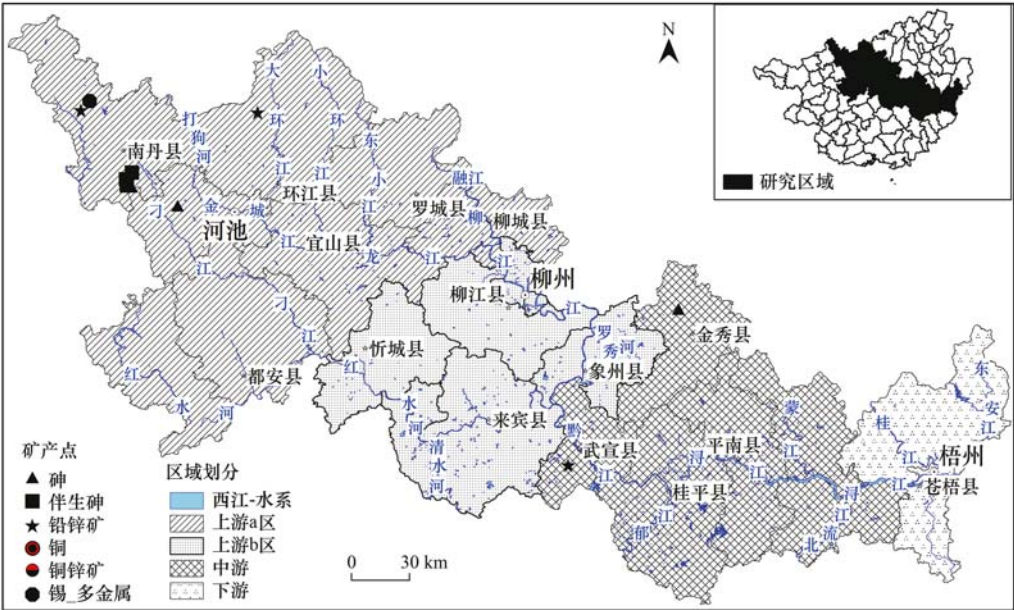


图 1 广西西江流域有色金属矿产示意

Fig. 1 Map showing the nonferrous minerals in the Xijiang River basin of Guangxi

与地形因素,对采样点分布进行适度调整,并对矿区土壤加密布点调查,最后共采集到土壤样本2 594个(图2),其中,自然土壤292个,均在远离污染源、地势相对比较高、植被发育完好且未明显受到人为扰动影响的自然林地或荒草地采集自然土壤;矿区土壤178个,采集于矿厂、冶炼厂遗址、尾砂库等有色金属矿区的无农业种植及矿业密集区周边的非农用土壤;旱地、水田土壤分别为1 384和740个,主要针对农田相对集中的地区抽样采集,以使其更具代表性,一般样点布置于具有一定规模的粮食、蔬菜作物产区,或以村为单元的居民自种小型耕地土壤,旱地土壤中种植的作物以甘蔗、玉米最具代表性.土壤样本采集原则:自然土壤,采用单点采集,刨去表层枯枝落叶

和腐殖质层,取5~10 cm土层;矿区与农田土壤均采集多点混合样,采样深度均在0~20 cm,四分法保留1 kg后装于布袋中.土样在室内风干,研磨前去除碎石与植物残体等杂物,过0.149 mm尼龙筛后备用.样品采集、运输、保存与分析过程中避免与金属器具接触.

样品采用EPA推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮,用石墨炉原子吸收光谱法(AA700,美国P.E.公司)测定Pb含量.分析过程中加入国家标准土壤样品(GSS-4)和空白进行质量控制,样品回收率在90%~110%之间,测定偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内,选10%的样品做重复测试,相对误差在 $\pm 5\%$ 以内,分析过程中所用试剂均为优级纯,所用的水均为超纯水(亚沸水).

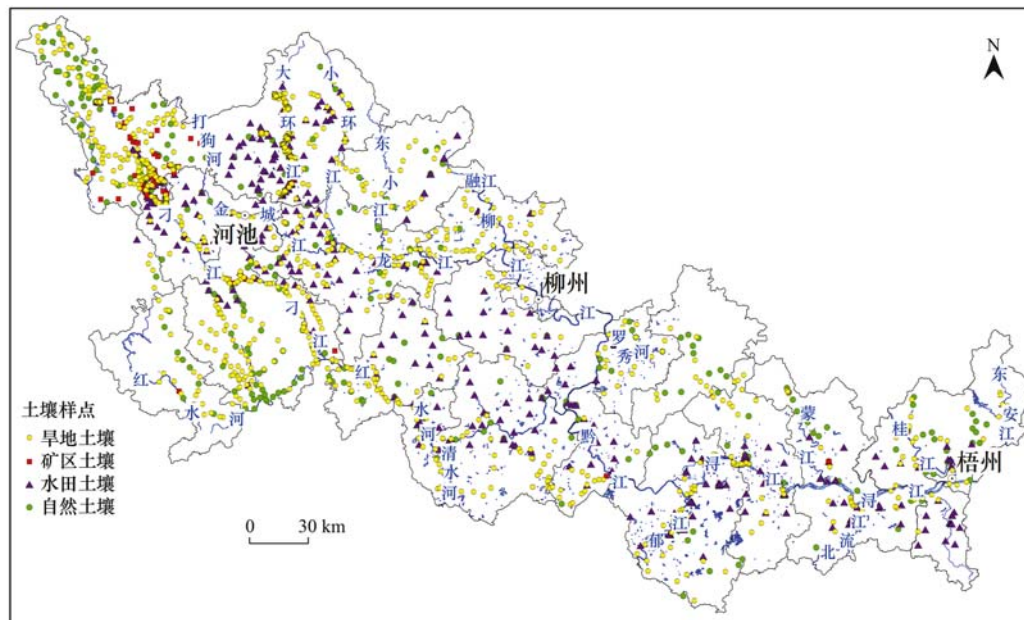


图2 广西西江流域土壤Pb调查样点示意

Fig. 2 Map showing the sampling sites for Pb in the Xijiang River basin of Guangxi

1.3 数据处理与评价方法

1.3.1 土壤污染评价

目前,土壤重金属污染评价方法有很多.不同的评价方法适用的范围有所差异,得出的结果也不尽相同.本研究采用地积累指数法对土壤Pb污染程度进行评价^[15].

地累积指数法^[16]充分考虑了自然地质及人为活动对重金属污染的影响,广泛地应用到沉积物以及其它物质中重金属积累的污染评价.其表达式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_i}{k B_i}$$

式中, C_i 为西江流域土壤重金属污染物 i 的含量实

测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_i 为污染物 i 的背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; k 用于校正区域背景值差异(一般取常数1.5,无量纲).分级标准: $I_{\text{geo}} \leq 0$, 无污染; $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$, 轻微污染; $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$, 轻度污染; $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$, 中度污染; $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$, 偏重污染; $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$, 重污染; $I_{\text{geo}} > 5$ 高度污染.

本研究中的农田土壤(水田土壤和旱地土壤)和矿区土壤分别采用《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)以及土壤基线值^[17]作为样品中重金属含量的限量标准值.广西大多数土壤呈酸性或强酸性,因此农田土壤Pb含量以二级标准限定值 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为参比值,矿区土壤以三级标准限定值

500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为参比值, 自然土壤以一级标准限定值 35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为参比值.

1.3.2 数据处理

利用 SPSS 18.0 对土壤重金属含量进行经典统计分析, 半变异函数的拟合及相关参数的确定采用 GS + 7.0 进行处理, 样点分布图、空间插值分析均在 ArcGIS 10.2 平台上完成.

2 结果与分析

2.1 土壤铅背景值再研究与基线值

近 30 年来, 广西西江流域上游河池等地区涉重工业和有色金属矿业活动密集, 土壤环境发生了较大的变化, 需要获得更具代表性土壤污染物背景值, 合理评价土壤污染状况. 有学者于 1992 年曾在研究区内所布的自然土壤样点数偏少 ($n = 30$)^[18], 不排除存在一定的偶然性. 基于此, 对研究区自然土壤 Pb 背景值进行再调查, 共采集了 292 个样品进行统计分析, 自然土壤 Pb 含量经对数转换后符合正态分布, 因此用几何均值表征自然土壤 Pb 含量. 由于不同地区的地质条件不同, 地球化学特征和人类活动等特点具有很大不同, 因此国家环境质量标准 (GB 15618-1995) 对于矿区的评价并非十分符合, 若直接采用背景值评价标准太过严格, 因此采用基线值作为背景值和异常值的界限, 具有更加严格的意义^[19, 20]. 夏增禄^[17] 指出对于正态分布的数据, 土壤基线值等于土壤背景值加上 2 倍的算术标准差, 对于对数正态分布的数据, 土壤基线值等

于其几何均值乘以几何标准差的平方. 西江流域自然土壤 Pb 几何均值和标准差分别为 51.84 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 3.285, 含量范围为 0.61 ~ 1 044 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 1.37, 则可推算出 Pb 的土壤基线值为 559.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 本研究的自然土壤 Pb 含量高于前人研究的 Pb 土壤背景值 (22.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 69.65%, 通过单样本 T 检验结果 ($P = 0.00 < 0.01$) 表明, 本研究与前人背景值研究结果有显著差异.

西江流域自然土壤 Pb 含量等级化分布见图 3, 经统计, 58.56% 的自然土壤 Pb 含量高于一级标准限定值 35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 主要分布在南丹县、环江县、大化县、金城江区、都安县、宜州市和罗城县. 西江流域自然土壤 Pb 含量 (51.84 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 比广西区^[21] (20.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、北京市 (20.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[22]、太湖流域 (20.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[23]、第二松花江流域 (16.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[23] 的 Pb 背景值高. 广西是典型的喀斯特岩溶地貌, 位于桂西北的丹池成矿带, 是我国南方一条重要的北向西有色金属成矿带, 有资料显示, 在凭祥-河池地区存在 52 200 km^2 的高 Pb 异常区^[24], 结合自然土壤 Pb 空间分布图 (图 4), 发现在矿业活动密集区自然土壤 Pb 含量并没有呈现出较大的差异, 故部分地区自然土壤 Pb 含量较高与土壤母质有关.

2.2 农田与矿区土壤铅含量特征

原数据经对数转换后符合正态分布, 用几何均值表述农田 (旱地和水田) 和矿区土壤 Pb 含量 (表 1). 结果表明, 旱地土壤和水田土壤铅含量分别为

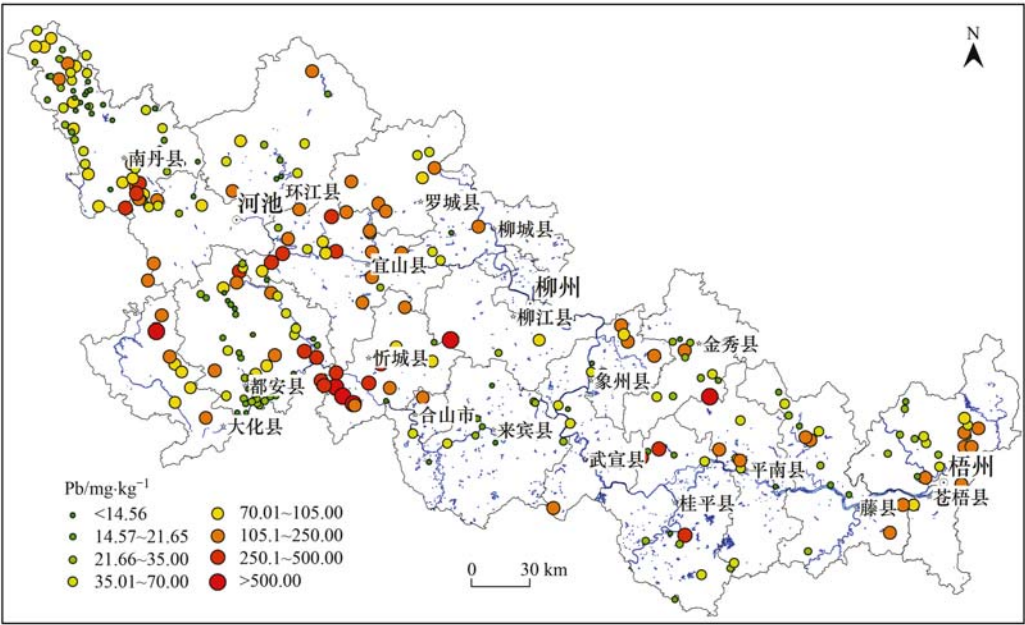


图 3 西江流域自然土壤 Pb 含量等级化分布

Fig. 3 Map showing the Pb content distribution in natural soil in the Xijiang River basin

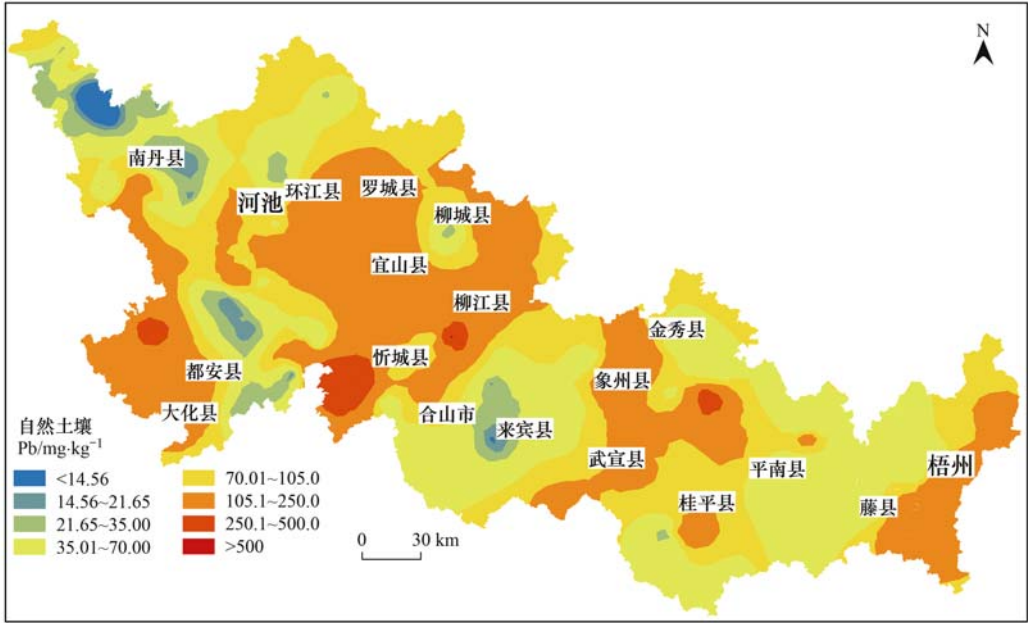


图 4 西江流域自然土壤 Pb 含量空间分布

Fig. 4 Geographical distribution of Pb content in natural soil in the Xijiang River basin

116.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 40.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 含量范围分别为 1.06 ~ 2 326 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2.12 ~ 3 464 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 极差较大, 表明旱地和水田土壤 Pb 离散程度与变异程度较大, 说明农田土壤 Pb 含量受到外界因素影响. 以基线值为参照, 旱地土壤和水田土壤的超标率分别为 8.09%和 2.03%, 以《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 为标准, 超标率分别为 16.40%和

8.92%, 说明西江流域部分农田土壤存在 Pb 积累. 旱地土壤和水田土壤的变异系数分别为 1.30 和 2.41, 属于强变异程度, 说明农田土壤存在高 Pb 区域, 与平均值偏离较远^[6]. 根据独立样本 *T* 检验分析结果, 旱地土壤含量显著高于自然土壤(旱地土壤, $P=0.00<0.01$), 水田土壤与自然土壤含量差异不显著(水田土壤, $P=0.574>0.05$).

表 1 西江流域不同土壤类型 Pb 含量统计值

Table 1 Statistics for Pb concentrations in different types of soil in the Xijiang River basin

土壤类型	N/个	分布类型	算术均值±标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何均值(标准差) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数	超出基 线值/%	超标率 /%
旱地土壤	1 384	对数正态	218.6 ± 284.6	116.7 (3.229)	1.060 ~ 2 326	126.2	1.30	8.09	16.40
矿区土壤	178	对数正态	3 235 ± 11 100	655.9 (6.345)	12.36 ~ 135 800	637.6	3.43	54.95	57.69
水田土壤	740	对数正态	93.26 ± 225.1	40.63 (3.042)	2.12 ~ 3 464	35.13	2.41	2.30	8.92
自然土壤	292	对数正态	100.4 ± 137.8	51.84 (3.285)	0.61 ~ 1 044	47.09	1.37	—	—
总计	2 594	对数正态	376.5 ± 3 012	88.77 (4.112)	0.61 ~ 135 800	76.09	8.00	9.86	—

矿区土壤 Pb 含量为 655.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 含量范围为 12.36 ~ 135 800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 3.43, 属于强变异程度, 与西江流域上游密集矿业活动有关. 另外矿区个别土壤 Pb 含量达上万或十几万 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可能采集样品是尾砂或尾砂与矿区耕地土壤混合在一起的缘故. 以基线值和《土壤环境质量标准》为标准, 超标率分别为 54.95% 和 57.69%. 经过独立样本 *T* 经验结果 ($P=0.00<0.01$) 表明, 矿区土壤 Pb 含量显著高于自然土壤. 河池等地区涉重工业和有色金属矿业活动密集, 尤其是河池地区的南丹县、环江县、金城江、大化

县以及来宾的武宣县等地区, 这些地方富含铅锌矿, 加上分布密集的铅锌冶炼行业企业等, 说明矿业活动对西江流域矿区土壤 Pb 存在明显的积累效应有一定的贡献.

2.3 不同流域土壤 Pb 含量特征

将西江流域土壤以刁江、金城江和大小环江(上游 a 区)、柳江和红水河(上游 b 区)黔江和浔江(中游)及西江(下游)等主要河段的沿江区域为主划分不同的流域(表 2). 统计结果表明, 土壤 Pb 含量范围、算术均值、几何均值分别为: 0.61 ~ 135 800、376.5 和 88.77 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 上游 a 区 Pb 含

量(98.87 mg·kg⁻¹)显著高于上游 b 区(64.93 mg·kg⁻¹)、中游(51.93 mg·kg⁻¹)及下游(57 mg·kg⁻¹)。上游 a 区和中游变异系数分别为 7.50 和 4.84 显著高于上游 b 区和下游地区,属于强变异程度,西江流域土壤 Pb 含量受外界干扰,这可能与上游 a 区河池地区以及中游武宣地区铅锌矿的

开采和冶炼有关。以国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)为参照,上游与下游矿区土壤样点超标率分别为 59.4%和 33.3%,上游农田土壤样点超标率(旱地 11.2%,水田 3.44%)明显高于中下游(旱地 2.51%,水田 4.63%),这可能与西江流域上游密集的矿业活动有关。

表 2 西江流域不同流域 Pb 含量统计值¹⁾

Table 2 Statistics of Pb concentrations for different river basin soils in the Xijiang River basin							
流域范围	N/N1/N2/N3/N4	算术均值 ± 标准差 /mg·kg ⁻¹	几何均值(标准差) /mg·kg ⁻¹	中值	极小值	极大值	变异系数
上游 a 区	1 867/184/175/1 075/433	471.1 ± 3 533	98.87(4.830)	85.55	0.77	135 800	7.50
上游 b 区	277/41/0/145/91	125.2 ± 152.9	64.93(3.456)	63.08	1.75	1 090	1.22
中游	352/50/2/130/170	142.8 ± 691.2	51.93(3.633)	44.04	0.61	12 800	4.84
下游	95/19/1/29/46	89.61 ± 91.99	57.0(2.699)	48.32	1.06	545.8	1.03

1) N、N1、N2、N3、N4 分别表示总样本、自然土壤、矿区土壤、旱地及水田土壤的样本量

2.4 Pb 含量空间分布

对研究区土壤 Pb 数据进行半变异函数拟合,得到最优模型(表 3)。

块金常数 C₀ 表示测量误差及采样尺度的非连续性而产生的随机变异,基台值 C₀ + C 表示随机性变异与结构性变异之和,块金系数 C₀/(C₀ + C) 表示由随机部分引起的空间变异性占总体变异的比列,土壤 Pb 含量的空间变异性可根据块金系数大小进行划分。若块金系数 < 25% 说明变量有强烈的空间相关性,25% ~ 50% 说明变量有明显的空间自相关,50% ~ 75% 时变量有中等空间自相关,而 > 75% 时变量空间自相关弱,变异主要由随机变异组成,不适合采用空间插值的方法进行 Pb 含量空间预

测^[6]。由表 3 可知,西江流域上游 a 区中游及下游土壤 Pb 含量具有强烈的空间自相关性,上游 b 区土壤 Pb 含量空间自相关性明显,反映出西江流域 Pb 含量的结构性变异较大,即受植被、地形、气候和土壤母质等自然条件影响显著。

采用普通 Kriging 插值方法^[25]绘制西江流域 Pb 含量空间分布图(图 5),可见西江流域 Pb 含量空间分布特征明显:由上游至中、下游土壤 Pb 呈现总体递减趋势,中游局部地区(武宣县)存在 Pb 高值,上游 a 区 Pb 含量显著高于其他地区,主要分布在刁江上游河池地区和红水河大化境内,且高 Pb 含量样点在刁江上游的聚集远大于刁江下游都安段。

表 3 半变异函数模型拟合参数

Table 3 Parameters of models of the theoretical semivariogram							
流域范围	理论模型	变程/m	块金值(C ₀)	基台值(C ₀ + C)	块金系数 [C ₀ /(C ₀ + C)]	决定系数 R ²	残差 RSS
上游 a 区	指数模型	4 900	0.338	2.521	0.134	0.362	1.120
上游 b 区	球状模型	45 400	0.639	1.356	0.471	0.949	0.036
中游	球状模型	4 700	0.070	1.605	0.044	0.294	0.649
下游	高斯模型	6 220	0.090	0.666	0.135	0.724	0.015

2.5 土壤 Pb 污染评价

基于土壤类型对西江流域 Pb 积累状况分析,西江流域自然土壤 Pb 含量为 51.84 mg·kg⁻¹,得出各类型土壤地积累指数(表 4)。结果表明,除自然土壤外,其他 3 种类型土壤处于无污染状态(I_{geo} < 0)的土壤样点为 47.97%,处于轻微-轻度污染的土壤样点为 24.27%。其中,有 31.46%的矿区土壤样点表现为偏重-重度污染级别,农田土壤 Pb 积累程度在中度以上的土壤约占 28.19%。农田土壤总体处于无污染,局部存在污染。矿区土壤大部分处于

污染状态。因此,基于不同土地利用方式下土壤及农产品的质量安全问题需要进一步研究。

表 4 土壤 Pb 含量地积累指数结果/%

Table 4 Geoaccumulation index of Pb in soil/%				
I _{geo}	等级划分	旱地土壤	矿区土壤	水田土壤
<0	无污染	36.39	16.29	80.43
0 ~ 2	轻微-轻度污染	43.64	14.04	12.15
2 ~ 3	中度污染	13.14	15.17	5.53
3 ~ 5	偏重-重度污染	6.82	31.46	1.75
>5	高度污染	0.	23.03	0.13

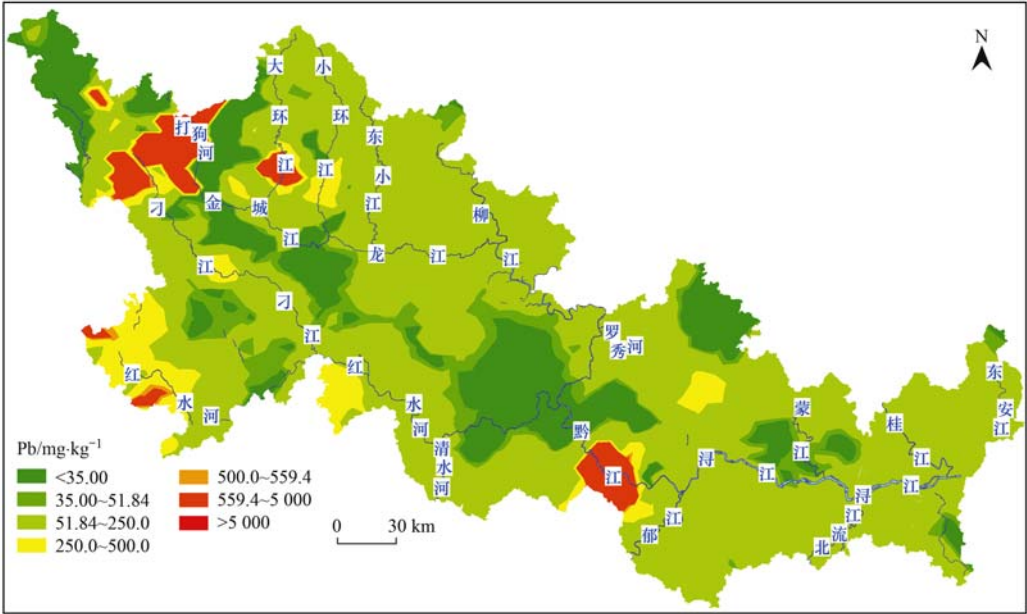


图 5 西江流域土壤 Pb 含量空间分布

Fig. 5 Geographical distribution of Pb contents in Xijiang River basin of Guangxi

由于土壤母质和人为活动的影响,不同地区土壤 Pb 背景值的差异较大,以县级行政区为单位,以广西各县市土壤背景值^[18]为标准,利用地累积指数法对西江流域土壤重金属污染状况进行评价(表 5)。结果表明,西江流域土壤样本 Pb 总体介于轻度-中度污染之间,上游 a 和 b 区、中游及下游土

壤 Pb 无污染样本所占比例分别为 18.53%、35.74%、48.30% 和 33.68%,轻微-轻度污染样本所占比例分别为 36.42%、29.60%、30.11% 和 42.11%,中度污染样本所占比例分别为 16.71%、18.05%、14.49% 和 16.84%,偏重-重污染样本所占比例分别为 22.17%、16.61%、6.25% 和

表 5 西江流域各县市土壤 Pb 污染特征

Table 5 Characteristics of Pb pollution in soil in the Xijiang River basin

流域范围	地区	N	背景值 /mg·kg ⁻¹	I _{geo}	污染样本比例/%				
					无污染	轻微-轻度污染	中度污染	偏重-重污染	高度污染
上游 a 区	金城江区	192	15.28	1.67	13.02	46.35	13.54	25.00	2.08
	南丹县	433	28.73	1.23	30.48	32.56	12.70	13.63	10.62
	柳城县	70	19.05	1.19	20.00	44.29	35.71	0.00	0.00
	罗城县	64	16.08	1.93	7.81	6.25	0.00	0.00	0.00
	环江县	698	21.92	2.15	16.76	31.52	15.62	29.08	7.02
	大化县	30	9.63	3.83	0.00	0.00	20.00	66.67	13.33
	都安县	223	9.63	1.98	9.42	43.50	22.87	18.83	5.38
上游 b 区	宜州市	157	15.32	1.31	20.38	45.22	17.83	16.56	0.00
	柳州市	7	23.51	1.01	28.57	14.29	57.14	0.00	0.00
	忻城县	78	15.26	2.03	21.79	14.10	23.08	41.03	0.00
	合山市	10	15.57	1.73	20.00	40.00	20.00	20.00	0.00
	兴宾区	105	24.21	0.41	45.71	34.29	11.43	8.57	0.00
	象州县	48	26.80	1.05	22.92	45.83	27.08	4.17	0.00
	柳江县	29	33.08	-0.19	65.52	27.59	3.45	3.45	0.00
中游	桂平市	99	23.82	0.23	51.52	30.30	11.11	6.06	1.01
	武宣县	35	23.21	1.4	17.14	48.57	20.00	11.43	2.86
	平南县	85	14.81	0.82	44.71	21.18	18.82	14.12	1.18
	藤县	116	47.66	-0.21	56.03	29.31	14.66	0.00	0.00
	金秀县	17	74.88	-0.69	58.82	41.18	0.00	0.00	0.00
下游	梧州市	13	17.52	1.37	15.38	46.15	15.38	23.08	0.00
	苍梧县	82	24.13	0.61	36.59	41.46	17.07	4.88	0.00

7.37%。 I_{geo} 大于 0 的地区在流域内分布广泛, 特别是梧州市、南丹县、宜州市、平南县和河池市金城江区, 上游 a 区 I_{geo} 指数均大于 1, 特别是大化县 I_{geo} 指数大于 3, 偏重-重度-高度 Pb 污染样本比例高达 80%。 $I_{\text{geo}} < 0$ 的地区有柳江县、藤县和金秀县。

3 讨论

Pb 广泛存在于自然界中, 土壤中 Pb 主要受成土母质和人为因素的影响。由于在不同的环境、地质、地理条件下, 其土壤重金属含量背景值会有所不同。由 Pb 自然土壤含量等级化分级图(图 3)和自然土壤 Pb 空间分布图(图 4)可以看出, 西江流域自然土壤 Pb 含量为 $51.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高背景值地区主要分布于大化县、都安县、忻城县、平南县和柳江县, 低背景地区主要分布在南丹县、来宾县和藤县地区。流域上游河池南丹地区矿业活动密集, 但自然土壤 Pb 含量较低, 由此可以看出, 成土母质对土壤背景值有较大的贡献。

西江流域不同土壤类型以及不同流域土壤类型统计结果显示, 西江流域矿区土壤 Pb 含量均显著高于农田土壤和自然土壤, 流域上游、中游、下游也有相同的规律。广西西江流域有着丰富的铅锌矿及伴生矿资源, 上游南丹有色金属矿业经济区, 作为广西六大矿业经济区之一, 包含大厂、五圩和北山这 3 个矿田, 矿点总数超过 200 处, 在黔江武宣地区有最为重要的铅锌产地, 结合西江流域 Pb 空间分布图(图 5), 发现高 Pb 区域主要分布在河池南丹地区、黔江武宣地区, 与矿业活动区具有较高的一致性, 表明矿业活动是土壤 Pb 积累的主要因素。有研究表明^[26], 土壤 pH 值、有机质、氮磷含量是影响土壤 Pb 含量的重要因素, 土壤酸化会增强土壤对 Pb 的富集能力, 而有机质的含量较高则会降低土壤对 Pb 的富集, 西江流域中游地区是典型的粮食作物主产区, 西江流域不同土壤类型的 Pb 含量有显著的差异, 除了与工业活动有关, 也与农业活动、土壤质地有一定的关系。

由各县市地积累指数可以看出, 土壤 Pb 总体介于轻度污染-中度污染之间, 污染区主要集中在上游河池地区的南丹县、环江县、都安县以及武宣地区, 这些地区都主要集中在刁江流域和环江流域。根据研究区土壤 Pb 空间分布图与流域内的矿产点分布图来看, 流域上游矿业活动释放的含 Pb 污染物是导致土壤 Pb 污染的主要来源之一, 西江流域上游 b 区, 即红水河、柳江流域 Pb 含量显著

低于上游 a 区(刁江、环江流域), 下游地区(西江) Pb 含量显著低于中游(浔江流域), 污染的可能途径包括大气的沉降^[27]、污染物随河流的迁移与污水灌溉, 特别是水体在其中扮演了重要的角色。在工矿业活动区一定范围内, 污染物沿河流分布的特点明显^[28]。西江流域的刁江^[29]流域农田和环江流域^[30]周边农田发生过污灌事件, 出现尾矿库垮坝事故, 由于突发性的尾矿及废水泥石流外排, 对尾矿库下游的农田、土壤、地表水体及人畜造成不可估量的严重污染及危害。作为长期处于高度动态变化中的生态系统之一, 加之地形等限制因素的影响, 流域沿岸土壤的污染治理具有挑战性^[31]。西江流域上游土壤 Pb 污染需得到当地政府与居民的长期关注。

4 结论

(1) 西江流域土壤 Pb 背景值和基线值分别为 $51.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $559.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 通过单样本 T 检验结果表明, 显著高于前人背景值研究结果($22.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

(2) 西江流域矿区土壤、旱地土壤和水田土壤 Pb 含量分别为 655.9 、 116.7 和 $40.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 矿区土壤 Pb 含量显著高于其他类型土壤。以《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)和土壤基线值为参考值, 超标率分别为 57.69%、16.40%、8.92% 和 54.95%、8.09%、2.03%, 矿区和农田土壤存在明显的 Pb 积累。矿区土壤 Pb 含量显著高于其他土壤类型。

(3) 从土壤 Pb 空间分布来看, 西江流域上游至中、下游土壤 Pb 呈现总体递减趋势, 流域特征明显, 高 Pb 含量样点在刁江上游的聚集远大于刁江下游都安段。西江流域土壤样本 Pb 总体介于轻度污染-中度污染之间, 金城江区及南丹县土壤 Pb 污染突出, 与当地频繁的矿业活动关系密切。

参考文献:

- [1] 宋波, 张学洪, 蒙冬柳, 等. 桂林市菜地土壤和蔬菜铅含量调查与污染评价[J]. 环境科学研究, 2012, 25(10): 1155-1160.
Song B, Zhang X H, Meng D L, et al. Lead concentrations and contamination assessment in vegetables and soils in Guilin[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(10): 1155-1160.
- [2] 周小勇, 雷梅, 杨军, 等. 某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3675-3678.
Zhou X Y, Lei M, Yang J, et al. Effect of lead on soil quality and human health around a lead smelter[J]. Environmental Science, 2013, 34(9): 3675-3678.

- [3] 袁波, 傅瓦利, 蓝家程, 等. 菜地土壤铅、镉有效态与生物有效性研究[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(5): 130-134.
Yuan B, Fu W L, Lan J C, *et al.* Study on the available and bioavailability of lead and cadmium in soil of vegetable plantation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, **25**(5): 130-134.
- [4] Tepanosyan G, Maghakyan N, Sahakyan L, *et al.* Heavy metals pollution levels and children health risk assessment of yerevan kindergartens soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **142**: 257-265.
- [5] Li S W, Liu X, Sun H J, *et al.* Effect of phosphate amendment on relative bioavailability and bioaccessibility of lead and arsenic in contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **339**: 256-263.
- [6] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 270-279.
Liu S, Wu Q Y, Cao X J, *et al.* Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 270-279.
- [7] Benhaddya M L, Hadjel M. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(3): 1473-1486.
- [8] 陈秀端. 中国城市土壤重金属空间分布与污染研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(12H): 60-65.
Chen X D. Study on the Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metal in urban soil of China [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(12H): 60-65.
- [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] 刘永轩, 黄泽春, 蹇丽, 等. 广西刁江沿岸土壤 As, Pb 和 Zn 污染的分布规律差异[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 485-490.
Liu Y X, Huang Z C, Jian L, *et al.* Differentiation of As, Pb and Zn pollution distributions in soils along Diaojang river, Guangxi province [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, **23**(4): 485-490.
- [11] 宋书巧, 吴欢, 黄钊, 等. 刁江沿岸土壤重金属污染特征研究[J]. 生态环境, 2005, **14**(1): 34-37.
Song S Q, Wu H, Huang Z, *et al.* The characteristics of heavy metals in soils along Diaojang River [J]. Ecology and Environment, 2005, **14**(1): 34-37.
- [12] 唐成, 宋同清, 杨钙仁, 等. 大环江两岸农田重金属污染现状及健康风险评价[J]. 农业现代化研究, 2013, **34**(5): 613-616.
Tang C, Song T Q, Yang G R, *et al.* Status and health risk assessment of heavy metal pollution of farmland soil in two sides of great Huanjiang river [J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, **34**(5): 613-616.
- [13] 褚培强. 广西铅锌矿矿床类型及找矿远景[J]. 广西地质, 1992, **5**(1): 1-11.
- Chu P Q. The patterns of lead-zinc deposits and their prospecting in Guangxi[J]. Geology of Guangxi, 1992, **5**(1): 1-11.
- [14] 田吉宁, 崔工伟, 余鑫, 等. 铅锌尾矿作矿化剂应用探讨[J]. 广西节能, 2001, (1): 21-22.
- [15] 周金波, 汪峰, 楼一鼎, 等. 宁波市农田土壤重金属污染状况调查[J]. 浙江农业科学, 2016, **57**(8): 1301-1303.
- [16] 柴世伟, 温琰茂, 张亚雷, 等. 地积累指数法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, **34**(12): 1657-1661.
Chai S W, Wen Y M, Zhang Y L, *et al.* Application of index of geoaccumulation (I_{geo}) to pollution evaluation of heavy metals in soil [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, **34**(12): 1657-1661.
- [17] 夏增禄. 土壤环境容量研究[J]. 环境科学, 1986, **7**(5): 34-44, 95.
Xia Z L. Studies on soil-environmental capacity [J]. Environmental Science, 1986, **7**(5): 34-44, 95.
- [18] 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. 216-223.
- [19] Chen M, Ma L Q, Harris W G. Baseline concentrations of 15 trace elements in florida surface soils [J]. Journal of Environmental Quality, 1999, **28**(4): 1173-1181.
- [20] 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 等. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987. 57.
- [21] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-382.
- [22] 李纯, 岑况, 王雪. 北京市主要公园土壤中铅含量及污染评价[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(10): 64-66.
Li C, Cen K, Wang X. Lead concentration in soil of urban parks in Beijing and their pollution assessment [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **29**(10): 64-66.
- [23] 李健, 郑春江. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [24] 谢学锦, 程志忠, 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. 104.
- [25] 王学军, 席爽. 北京东郊污灌土壤重金属含量的克立格插值及重金属污染评价[J]. 中国环境科学, 1997, **17**(3): 225-228.
Wang X J, Xi S. Kriging analysis and heavy metal pollution assessment for soil from eastern suburb of Beijing City [J]. China Environmental Science, 1997, **17**(3): 225-228.
- [26] 刘琼峰, 李明德, 段建南, 等. 农田土壤铅、镉含量影响因素地理加权回归模型分析[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(3): 225-234.
Liu Q F, Li M D, Duan J N, *et al.* Analysis on influence factors of soil Pb and Cd in agricultural soil of Changsha suburb based on geographically weighted regression model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(3): 225-234.
- [27] 李山泉, 杨金玲, 阮心玲, 等. 南京市大气沉降中重金属特征及对土壤环境的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(1): 22-29.
Li S Q, Yang J L, Ruan X L, *et al.* Atmospheric deposition of heavy metals and their impacts on soil environment in typical urban areas of Nanjing [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(1): 22-29.
- [28] Domínguez M T, Alegre J M, Madejón P, *et al.* River banks and

- channels as hotspots of soil pollution after large-scale remediation of a river basin[J]. *Geoderma*, 2016, 261: 133-140.
- [29] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2964-2971.
- Wu Y, Yang J, Zhou X Y, *et al.* Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an autonomous county of Guangxi zhuang autonomous region, China [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2964-2971.
- [30] 孙邦东, 潘其云. 广西环江县北山铅锌黄铁矿矿床发现史 [J]. *广西地质*, 1994, 7(3): 69-73.
- Song B D, Pan Q Y. The discovery beishan of beishan Pb-Zn pyrite deposit in Huanjiang county, Guangxi [J]. *Guangxi Geology*, 1994, 7(3): 69-73.
- [31] Mayes W M, Jarvis A P, Burke I T, *et al.* Dispersal and attenuation of trace contaminants downstream of the Ajka bauxite residue (red mud) depository failure, Hungary [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(12): 5147-5155.

环境科学

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)