

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

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

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业源挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石化工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骝骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽琚,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难凝有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价

刘畅¹, 宋波^{1,2*}, 张云霞¹, 雷梅³, 田美玲¹, 余元元¹, 庞瑞¹

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

摘要: 以广西西江流域为研究区域, 采集表层土壤2 585个, 采用地统计分析与GIS相结合的方法研究流域内土壤As含量空间变异规律与污染分布。结果表明: 西江流域表层土壤As含量为23.82 mg·kg⁻¹, 高于广西土壤背景值及西江流域自然土壤As含量值, 上游(刁江、环江流域)As含量(30.22 mg·kg⁻¹)显著高于流域其他区域。土壤As含量: 矿区土壤 > 旱地土壤 > 自然土壤 > 水田土壤, 矿区土壤As含量显著高于其他类型。As含量高值聚类区集中于刁江流域中上游及大环江流域中下游, 南丹北部远离矿区的六寨镇及大、小环江流域上游形成明显的低值聚类区。流域土壤As有明显的空间自相关性, 以结构性变异为主, 上游As含量由西北向东南递减, 流域特征明显, 高As含量区沿刁江流域自然分布, 流域中下游土壤As含量基本处于0.44~40 mg·kg⁻¹之间; 流域土壤样本As总体介于无污染-轻度污染之间, 污染在金城江区及南丹县的分布较为突出, 这与当地频繁的矿业活动关系密切, 建议采取治理措施并加强雨季尾矿库安全排查力度, 以保障当地居民的生产与生活质量。

关键词: 西江流域; 土壤; 砷; 空间变异; 污染评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0899-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708244

Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin

LIU Chang¹, SONG Bo^{1,2*}, ZHANG Yun-xia¹, LEI Mei³, TIAN Mei-ling¹, YU Yuan-yuan¹, PANG Rui¹

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

Abstract: In this study, 2 585 soil samples were collected in the Xijiang River Basin in Guangxi Zhuang Autonomous Region and the spatial variability and contamination of Arsenic in soils were evaluated using geostatistical and GIS tools. The results showed that the concentrations of As in surface soils (23.82 mg·kg⁻¹) were higher than the background values of the Guangxi and Xijiang Rivers in natural soils; the upstream values (Diaojiang River and Huanjiang River) (30.22 mg·kg⁻¹) were significantly higher than those in other regions. Concentrations of As in soil samples were in the order of soil in mining areas > soil in dryland > natural soil > paddy soil. As in mining areas were significantly higher than in other areas; high As concentrations were measured in the upstream of the Diaojiang River basin and the downstream of the Huanjiang River Basin. Low concentration clusters were in the six villages of Nandan, which are far from the mine, and in the upper reaches of the Dahuanjiang River and Xiaohuanjiang River Basin. Spatial autocorrelations of arsenic in the watershed soil were evident and the structural variability was dominant. The concentration of As in the upper reaches decreased from the northwest to the southeast. High As concentrations were distributed naturally along the river basin; concentrations in the middle and lower reaches of the basin were between 0.44 mg·kg⁻¹ and 40 mg·kg⁻¹. The concentration levels of As in total soil samples ranged from no-pollution to slight pollution, and the pollution was mainly distributed in the administrative areas of the city and the intensive areas of mining activities, among which the soil pollution in Jinchengjiang River and Nandan counties was more prominent. Effective measures should be taken to strengthen the safety level of tailings reservoirs during the rainy season, so as to maintain the production levels while protecting living standards of local residents.

Key words: Xijiang River Basin; soil; As; spatial variation; pollution assessment

流域作为密切连接区域水循环、土地覆被的综合生态系统, 是协调资源开发与环境保护的最佳途径^[1,2]。土壤作为流域系统内的时空连续变异性, 是人类活动不可替代的环境因子, 亦是人体健康与食物安全的基本保障。随着社会经济的发展与气候变化的影响, 流域内灾害频发、环境污染严重, 其中重金属的累积效应突出^[3,4]。

广西是我国砷潜在污染风险最大的地区之

一^[5]。西江流域作为广西主要的粮食产区和矿业活动密集区, 包括砷在内的重金属污染历史遗留问题

收稿日期: 2017-08-30; 修订日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41261082); 广西自然科学基金重大项目(2013GXNSFEA053002); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(002401013001); “八桂学者”建设工程专项

作者简介: 刘畅(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域环境调查与风险评估、污染土壤修复, E-mail: 505954190@qq.com

* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

突出. 已关停取缔小采矿、小选矿及小冶炼厂后所遗留的大量废矿石、尾矿、废渣未得到妥善处理, 而现有工矿企业污染源集中且排放量大^[6]. 宋书巧等人以土壤环境质量(GB 15618-1995)Ⅲ级为评价标准, 认为刁江整个流域土壤普遍受到 As 污染^[7, 8]. 唐成^[9]的研究表明, 大环江两岸农田土壤 As 污染问题突出. 由于流域性土壤重金属污染问题的特殊性, 进行污染评估及空间变异特性研究对于流域土壤重金属生态风险防控具有积极意义. 为探明流域性 As 污染分布规律, 基于大尺度的西江流域土壤 As 污染及空间变异规律研究亟待展开.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西江流域广西段, 面积广, 东西跨度大, 地势西北高而东南低, 盆地为主; 气候属亚热带季风型, 高温多雨但时空分配不均, 降水集中的 5~8 月易出现洪涝灾害; 纬度地带性和经度地带性差异明显. 研究区以刁江和红水河(上游)、黔江和浔江(中游)及西江(下游)的主要河段的沿江区域为主, 涉及 4 市及 15 个县, 其中上游以碳酸盐岩地层为主, 中游下游以非碳酸盐岩层为主^[10, 11]. 按图 1 划分, 研究区上游分两部分讨论, 上游①为典型的有

色金属矿业密集区, 土壤重金属污染问题突出, 该区以刁江、金城江和环江流域为主, 包括河池市金城江区、宜州市、南丹、环江、都安、大化、罗城和柳城县; 上游②为可能的矿业活动影响区及工业产业聚集区, 该区以红水河和柳江流域为主, 包括柳州市、合山市、来宾市兴宾区、忻城、象州和柳江县. 中游为典型的粮食作物主产区, 拥有广西最大的平原“浔郁平原”, 该区以黔江、浔江流域为主, 包括桂平市、武宣、平南、藤县和金秀县. 下游为“三圈一带”(珠三角经济圈、北部湾经济圈、大西南经济圈和珠江—西江经济带)区域经济辐射区, 是连接广西与广东的重要通道, 至此西江流经广西东大门而汇入珠江三角洲, 该研究区涉及梧州市和苍梧县两地.

1.2 样品采集与分析

2013 年 7 月~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图、矿产点分布图与地形图, 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 km² 一个. 实际采样中, 利用 GPS 定位, 考虑土地利用类型的变化与地形因素, 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

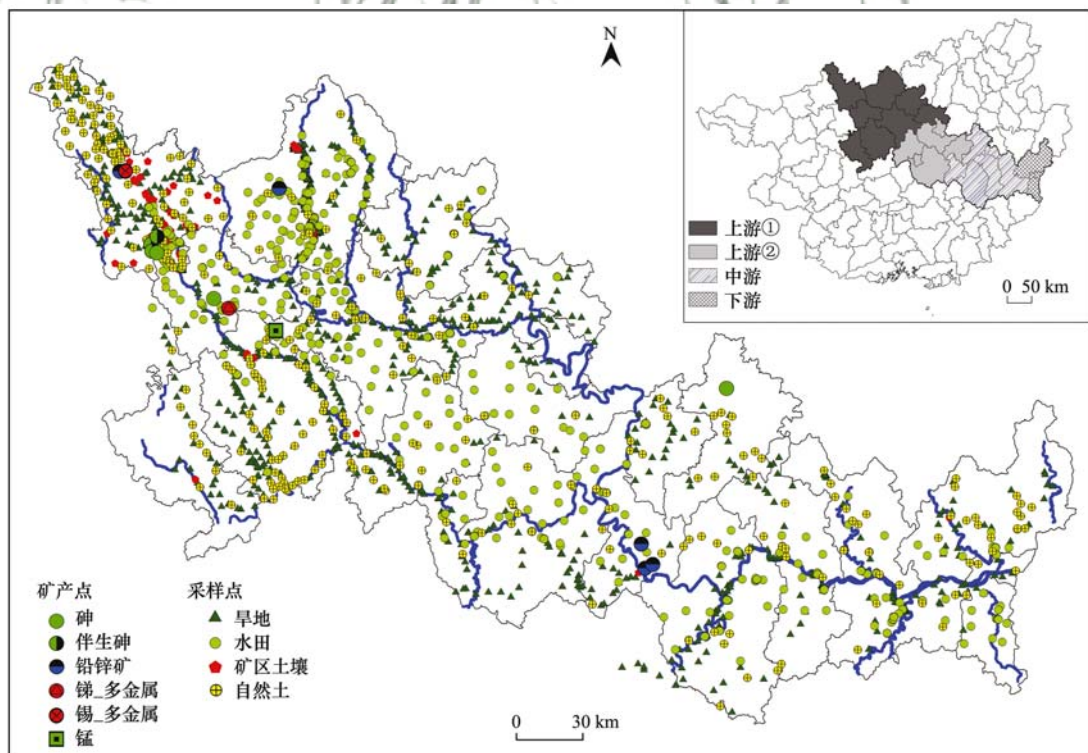


图 1 西江流域有色金属矿及土壤样点分布示意

Fig. 1 Distribution of nonferrous metals in soils and sampling sites in Xijiang River Basin

壤样品 2 585 个, 其中, 自然土壤 297 个, 均在远离污染源、植被发育完好且具有代表性的地方采集; 矿区土壤 177 个, 为矿区周边的非农用土壤; 旱地、水田土壤分别为 1 391 和 739 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. 除自然土壤每个地方采集一个样品外, 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. 研磨前去除碎石与植物残体等杂物, 过 0.149 mm 尼龙筛备用.

采用美国环保署推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法进行土壤样品消解, 用原子荧光光谱法 (AFS-9700) 测定土壤 As 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.

1.3 数据处理及评价方法

1.3.1 空间聚类与冷热点分析

空间聚类将空间数据按属性的相似度进行分类, 同类对象具有较高的相似度, 而不同类对象间差异较大. ArcGIS 平台下的 Anselin Local Moran's I 工具既是查找热点和冷点位置的有效工具, 又可以识别具有统计学上的显著性 (0.05 水平) 的空间异常值 (高值由低值围绕或低值由高围绕的值)^[12]. 如果某采样点的局部指数为正数且数值较高, 则该采样点 As 含量与邻近的采样点有类似的高或低含量, 这些样点有空间聚集性. 空间聚集包括高高值聚集 (HH, 热点) 和低低值聚集 (LL, 冷点). 如果某采样点的局部指数是负数且数值较高, 则采样点为空间离散点, 空间离散包括低高值 (LH) 和高低值 (HL) 离散.

1.3.2 土壤污染评价

对西江流域土壤砷, 采用地累积指数法进行污染评价 [式 (1)]. 这种方法在反映土壤重金属自然分布变化特征的同时, 更多强调了污染的历史累积作用.

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C}{kB} \quad (1)$$

式中, C 为西江流域土壤砷含量的实测值; B 为西江流域各县市砷背景值^[13]; 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.

1.3.3 土壤潜在生态风险评估

根据瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态风

险指数法 [式 (2)], 对西江流域土壤 As 进行潜在生态风险系数评估.

$$C_f = C_s / C_n$$

$$E_r = T_r \times C_f \quad (2)$$

式中, C_f 为 As 相对于背景值 C_n 的污染指数; C_s 为土壤 As 含量的实测值; E_r 为 As 的潜在生态风险指数; T_r 为 As 的毒性响应系数. 文中 As 参考毒性响应系数为 10. 根据潜在生态风险指数可将土壤污染分为如下几级: $E_r < 40$ 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; $E_r > 320$ 极高等潜在风险.

1.3.4 数据处理

利用 SPSS 18.0 对土壤 As 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, 空间插值图、空间自相关分析在 ArcGIS 10.2 平台上完成.

2 结果与分析

2.1 土壤 As 含量的描述性统计

原数据经对数转换后符合正态分布, 用几何均值表述土壤 As 含量. 西江流域土壤 As 含量范围、算数均值、几何均值分别为: 0.01 ~ 171 523、382.9 和 23.82 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 对西江流域采样土壤分为自然土壤、矿区土壤、旱地土壤和水田土壤这 4 类进行讨论 (表 1). 结果显示, 以上 4 类土壤 As 的含量范围分别为 0.01 ~ 143.3、5.57 ~ 171 523、0.44 ~ 2 286 和 0.67 ~ 909.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 算术均值分别为 25.20、5 007、56.80 和 24.44 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 几何均值分别为 17.03、484.2、22.91 和 14.67 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤 As 含量趋势上来看: 矿区土壤 > 旱地土壤 > 自然土壤 > 水田土壤, 而独立样本 T 检验结果表明, 矿区土壤 As 含量显著高于其他类型. 水田土壤 As 含量显著低于旱地土壤, 但与自然土壤无显著性差异. 土壤 As 变异程度: 矿区土壤 > 旱地土壤 > 水田土壤 > 1 > 自然土壤, 矿区、旱地及水田土壤具有强变异性, 自然土壤 As 为中等程度变异, 可见 4 种不同土壤类型中的 As 含量具有一定差异, As 含量在矿区土壤、旱地及水田土壤中的变化比在自然土壤中的变化更大, 矿区土壤、旱地及水田土壤受外来源影响较大. 按流域范围分上游①、上游②、中游和下游, 对西江流域采样土壤 As 含量进行讨论 (表 2). 结果显示, 上游① As 含量 (30.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著高于上游② (13.69

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、中游($13.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)及下游($11.86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，土壤样本 As 超标率呈现：上游①>中游>上游②>下游。

以国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)为参照，西江流域自然土壤 As 含量高于 I 级标准限值($15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)及广西土壤 As 背景值($13.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[13]，矿区土壤 As 含量几何均值为Ⅲ级标

准临界值($40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 12 倍，样点超标率约 84%，其中，上游与下游矿区土壤样点超标率分别为 84%和 67%。旱地与水田土壤 As 含量总体均未超出Ⅱ级标准规定的限制值，但两者样点超标率分别为 25%和 14%，其中，上游农田土壤样点超标率(旱地 26%，水田 17%)明显高于下游(旱地 18%，水田 8%)。

表 1 西江流域土壤 As 含量统计结果

Table 1 Statistics of soil As concentrations in Xijiang River Basin

土壤类型	N	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	算术均值 $\pm$ 标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分位值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						峰度	偏度	变异系数
					5%	25%	50%	75%	90%	95%			
自然土壤	293	0.01~143.3	25.20 ± 21.52	17.03	1.71	10.49	19.52	33.58	51.72	67.12	5.01	1.88	0.85
矿区土壤	177	5.57~171.532	5.007 ± 15.390	484.2	13.56	59.99	440.9	3.179	12.250	21.600	79.2	7.89	3.07
旱地土壤	1377	0.44~2.286	56.80 ± 174.6	22.91	5.39	11.58	19.25	40.09	84.11	174.5	75.0	8.04	3.07
水田土壤	738	0.67~909.2	24.44 ± 53.84	14.67	4.78	9.14	13.32	20.56	37.74	60.50	119	9.35	2.19
总体	2585	0.01~171.000	382.9 ± 4.211	23.82	5.11	10.84	17.96	38.20	101.1	368.6	1087	29.0	10.9

表 2 西江流域土壤 As 含量分区统计结果

Table 2 Statistics of soil As concentrations in Xijiang River Basin

流域范围	N/N1/N2/N3/N4 /个	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	算术均值 $\pm$ 标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分位值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						超标率 /%
					5%	25%	50%	75%	90%	95%	
上游①	1862/185/174/1073/430	0.01~1.71E5	523.1 ± 4.954	30.22	6.03	12.06	21.24	47.84	179.4	820.8	37.8
上游②	277/40/0/146/91	0.67~143	18.34 ± 16.39	13.69	2.68	9.49	14.44	20.61	36.39	45.47	15.2
中游	350/49/2/129/170	0.44~2.320	26.72 ± 126.1	13.47	2.95	8.72	13.32	20.81	43.06	62.58	17.7
下游	96/19/1/29/47	1.63~71.7	15.68 ± 12.67	11.86	3.18	7.21	11.17	20.01	34.17	40.80	14.6

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

2.2 空间聚类与冷热点分析

由于原数据 As 含量呈右偏态分布，利用 lnAs 含量数据做空间冷热点分析(图 2)。不难发现，有 5 个区域存在着明显的高值聚类(HH)，包括南丹北部的芒场镇、刁江流域上游及都安段、大环江流域中下游，以及藤县北部。结合矿点分布图不难发现，高值聚类区多分布于多金属矿区周边及受污灌影响的耕作区，沿河流分布特征明显，高值样点以矿区土壤和旱地土壤为主，可见该地区土壤 As 含量受矿业活动、地表径流与污灌的多重影响，并明显受到地形因素的制约。受刁江上游矿山开发的影响，污染源周边聚集众多高 As 含量的土壤样点。众多研究表明，尾砂是导致刁江流域 As 污染的主要原因。由于刁江上游矿区尾砂以颗粒较细的细沙和粉砂为主，尾砂易随地表径流迁移扩散至刁江，且易在风力作用下迁移扩散至周边土壤环境中^[14]。随着距离的增加，As 表现出从污染源至下游的迁

移性^[15]。刁江流经都安段时地势降低，大量河漫滩出现，农田面积增大，污水灌溉增多，特别是丰水期刁江洪涝灾害频发，刁江沿岸部分农田土壤多次遭受洪水淹没，由此两岸旱地土壤呈现 As 的高值聚类。低值聚类区(LL)在西江流域上游的分布主要有：南丹北部的六寨镇、大环江流域上游、都安地区以及龙江流域右岸，自然土壤和水田土壤为主。结合地形图分析，这些样本点主要分布在海拔 500 m 以上的山区，并远离污染源(如大型矿床)，一方面这些低值聚类点位于污染源发生地的上游地区，污染物无法通过地表径流及水系迁移至上游，污染源又多处于山间谷地，地形闭塞，矿业活动产生的废气烟尘及交通扬尘易在局部富集沉降；另一方面，多数样本点多采集于较少受人为扰动的地区。流域中下游的黔江浔江主干流流经的地区及象州地区也表现出显著的低值聚类，这些地区是广西重要的粮食产区，沿岸水田土壤多呈现 As 含量低

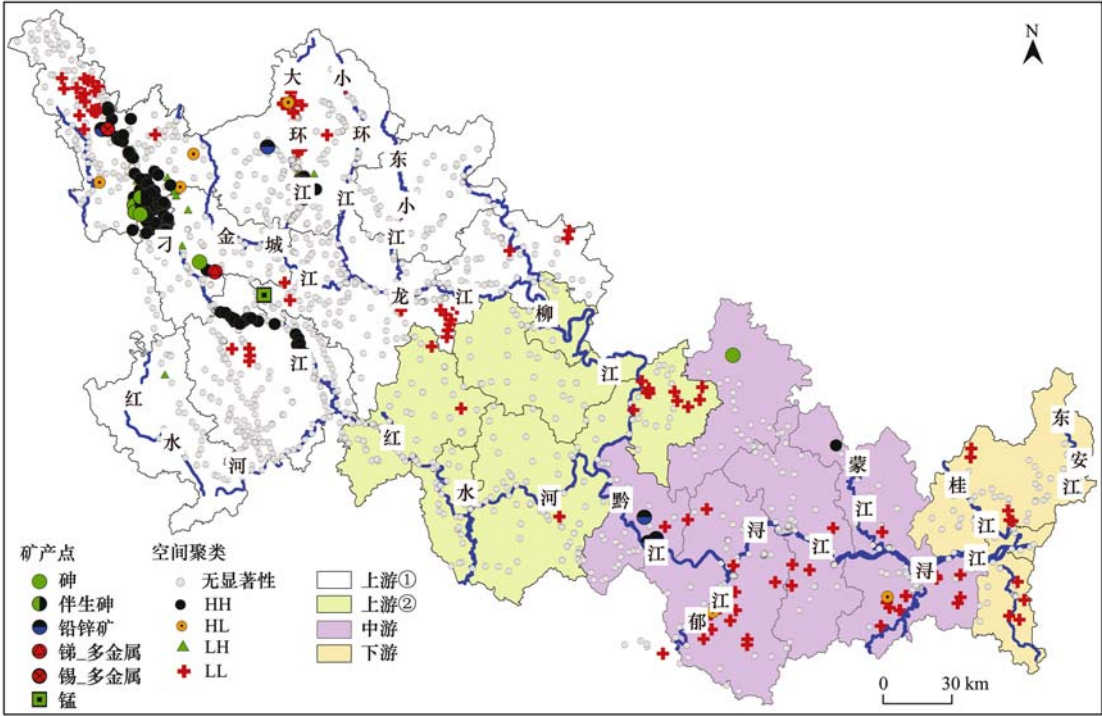


图2 土壤样点 As 空间聚类
Fig. 2 Spatial clustering of As contamination in soil

值空间聚集,利用 ArcGIS 提取低值聚类点中 As 含量值,并与西江流域自然土壤 As 含量值比较,通过独立样本 T 检验发现,低值聚类区 As 含量与西江流域自然土壤 As 含量无显著性差异.空间异常值多数分布于刁江流域上游及大环江流域中下游,以低高值聚类(LH)为主,即高值中包含着低值异常.中下游 2 个空间异常值均为高低值聚类(HL),即低值中包含着高值异常.通过人工判别并与原始记录对照,判定这些点可能由实验误差引起,不会对研究结果产生重要影响,将其作为异常值删除,而不参与 As 含量空间变异分析.

2.3 砷含量空间分布

对研究区土壤 As 数据进行半变异函数拟合,得到最优模型(表 3).

块金常数 C_0 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 $C_0 + C$ 表示随机性变异与结构性变异之和,块金系数 $C_0 / (C_0 + C)$ 表示由随机部分引起的空间变异性占总体变异的比

组成,不适合采用空间插值的方法进行 As 含量空间预测.由表 3 可知,西江流域上游及下游土壤 As 含量具有强烈的空间自相关性,中游土壤 As 含量具有明显的空间自相关性,反映出西江流域 As 含量的结构性变异较大,即受气候、地形、植被和土壤母质等自然条件影响显著.成土母质是土壤形成发育的基础,直接影响土壤质地、土层厚度与矿物组成,间接影响到土壤对重金属的吸附能力,特别是成土母质风化过程,会直接影响土壤重金属的本底值含量.气候是土壤形成的要素之一,并决定着成土母质的物理、化学风化和淋溶过程的强度^[16].地形因素主要影响物质和能量的再分配.植被与土壤的相互作用影响着立地条件下土壤重金属元素的迁移、转化与富集,且不同树龄、不同类型的树种、树木的不同器官对重金属元素的吸收量与归还量不尽相同^[17,18].根据广西地质图、地形图以及况雪源^[19]等的研究,西江流域上游与中下游在气候、地形、成土母质、植被分布方面有着明显的不同.西江流域上游为典型的碳酸盐岩地层、中亚热气候带、植被类型以中亚热带常绿阔叶林和藤刺灌丛为主,海拔较之中下游高,其中南丹金属矿带为流域典型的 As 高地质背景区.流域中下游以非碳酸盐岩地层为主、南亚热气候带、植被类型为南亚热带季风常绿阔叶林,地势起伏低缓.综上,不同的气

候、地形、植被与土壤母质条件必然影响西江流域 As 含量的空间分布,而通过对流域内 As 含量的结构性变异分析发现,以上因素对 As 含量的空间分布影响显著.

采用普通 Kriging 插值方法绘制西江流域 As 含量空间分布图(图 3),可见研究区 As 含量空间分

布特征明显:流域上游 As 含量由西北向东南递减,并呈现出明显的流域特征,高 As 含量区沿刁江流域自然分布,且上游矿业密集区 As 含量显著高于其他地区,最高值达到 $97\,434\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;流域中下游土壤除个别地区 As 含量超出 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以外,整体基本处于 $0.44\sim40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间.

表 3 半变异函数模型拟合参数
Table 3 Parameters of the theoretic semivariogram models

西江流域	理论模型	变程/m	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	块金系数/%	决定系数 R^2	残差(RSS)
上游①	指数模型	13 500	0.251	2.313	10.85	0.182	1.94
上游②	球状模型	4 400	0.001	0.581	0.17	0.348	0.042 5
中游	指数模型	172 500	0.45	1.201	37.47	0.863	0.067 6
下游	指数模型	7 110	0.078	0.604	12.91	0.553	0.122

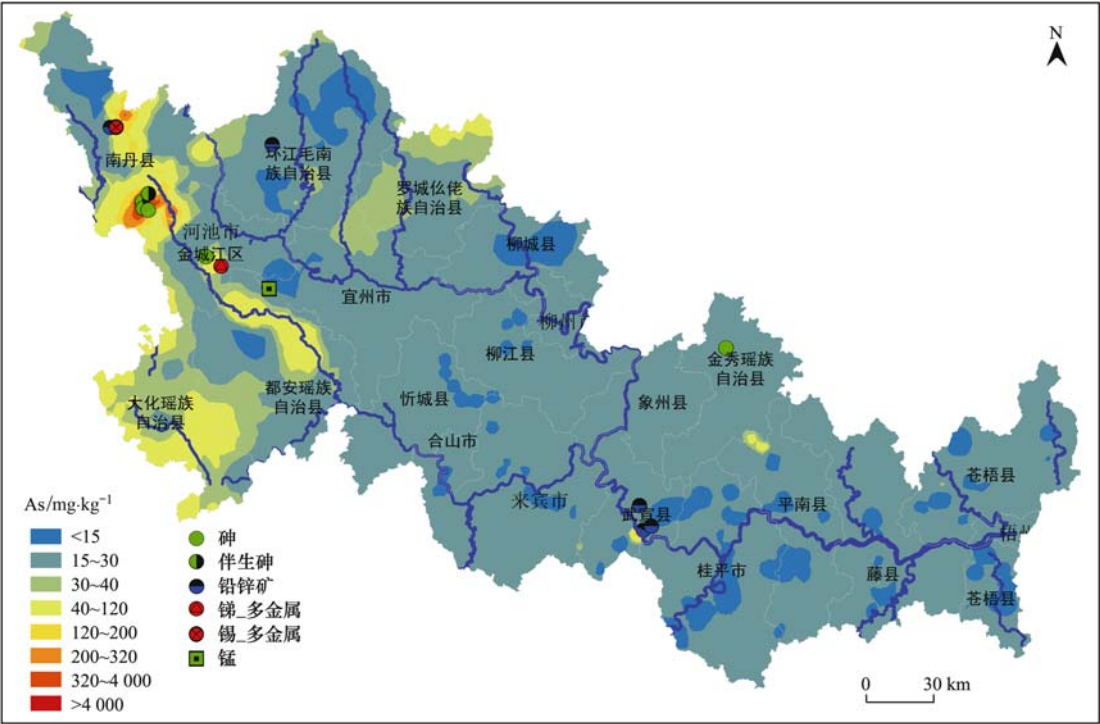


图 3 As 含量空间分布
Fig. 3 Spatial clustering of As contamination in soil

2.4 砷污染评价

以县级行政区为单位,对西江流域土壤 As 污染状况进行评价(表 4).不难发现,西江流域土壤样本 As 总体介于无污染-轻微-轻度污染之间,上游①、上游②、中游及下游土壤 As 无污染样本所占比例分别为 65.9%、74.8%、82.9%和 61.5%,轻微-轻度污染样本所占比例分别为 24.6%、22.7%、14.3%和 35.7%.其中 I_{geo} 大于 0 的地区主要分布在河池市金城江区、柳州市市辖区、梧州市和南丹

县,流域上游①金城江区及南丹县 I_{geo} 指数大于 1,两地土壤总体受轻度 As 污染,但两者高度污染 As 样本比例分别高达 10.9%和 12.0%.

2.5 砷潜在生态风险评估

研究区不同流域土壤环境中 As 的潜在生态风险指数如表 5.

不同流域划分下,土壤 As 的潜在生态风险指数呈现如下规律:流域上游①>中游>上游②>下游,等级划分依次为:中高生态风险、低生态风险、

低生态风险和低生态风险,可见流域上游①区土壤 环境生态状况不容乐观.

表 4 流域各县市土壤 As 污染特征

Table 4 Characteristics of soil As pollution in counties

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①	金城江区	192	17.5	1.06	38.0	37.5	8.9	4.7	10.9
	南丹县	435	21.68	1.02	49.2	21.2	7.1	10.6	11.9
	柳城县	70	9.75	-0.11	57.1	40.0	2.9	0.00	0.00
	环江县	692	20.06	-0.55	69.1	28.2	1.2	1.4	0.1
	大化县	29	37.13	-0.8	75.9	20.7	0.0	0.0	3.4
	都安县	223	37.13	-0.93	81.2	12.6	1.3	3.1	1.8
	宜州市	157	21.06	-1.04	85.4	13.4	1.2	0.0	0.0
	罗城县	64	38.56	-1.27	93.8	3.1	3.1	0.0	0.0
上游②	柳州市	7	10.06	0.48	14.3	71.4	14.3	0.0	0.0
	忻城县	78	10.9	-0.15	48.7	50.0	1.3	0.0	0.0
	合山市	10	13.1	-0.36	90.0	0.0	10.0	0.0	0.0
	兴宾区	105	15.82	-0.73	79.1	20.9	0.0	0.0	0.0
	象州县	48	18.06	-1.47	81.3	16.7	2.0	0.0	0.0
	柳江县	29	81.78	-3.11	100	0.0	0.0	0.0	0.0
中游	桂平市	99	13.14	-0.82	81.8	17.2	1.0	0.0	0.
	武宣县	35	21.89	-0.83	74.3	22.9	0.0	0.0	2.8
	平南县	85	16.36	-0.85	88.2	9.4	1.2	1.2	0.0
	藤县	114	24.78	-1.42	81.6	17.5	0.9	0.0	0.0
	金秀县	17	55.61	-2.39	94.1	5.9	0.0	0.0	0.0
下游	梧州市	13	8.9	0.78	23.1	69.2	7.7	0.0	0.0
	苍梧县	83	10.35	-0.54	72.3	27.7	0.0	0.0	0.0

表 5 流域土壤重金属潜在生态风险指数

Table 5 Potential ecological risk index of heavy metals in watershed soils

As	上游①	上游②	中游	下游
E _r	131.2	6.968	8.413	5.68
级别	中高	低	低	低

3 讨论

与国内其他主要区域相比,广西西江流域表层土壤砷含量值均高于长江三角洲(8.3 mg·kg⁻¹)^[20]、珠江三角洲(13.16 mg·kg⁻¹)^[21]地区,但明显低于湘江流域(43.68 mg·kg⁻¹)^[22]及伊犁河流域(35.9 mg·kg⁻¹)^[23].珠江三角洲与长江三角洲是我国经济与环境发展具有代表性的地区,也是目前我国乡镇企业分布最密集,城市化、工业化与农业现代化程度最高的地区.两者的土壤As背景值均未超过全国土壤As背景值,而西江流域土壤As背景值是全国土壤As背景值的1.8倍,流域内部分地区的背景值高出全国土壤As背景值8倍之多.高砷地质条件是诱发砷释放与砷污染的重

要根源^[24],加之人为活动的作用,使得西江流域表层土壤砷含量高于长江三角洲与珠江三角洲地区.相对地,湖南湘江流域的地质条件背景与西江流域相似,坐拥“世界有色金属博物馆”的湘江流域地区矿业开发、冶炼和化工等工业活动密集,高砷地质背景条件,加之悠久的矿业开采冶炼历史,使得湘江流域土壤As不断积累,单从平均含量比较,湘江流域土壤As含量约为西江流域As含量的1.8倍,是西江流域上游①(刁江、环江流域)As含量的1.4倍.可见,比起湘江流域,西江流域土壤As积累状况较为乐观.反观之,伊犁河流域是个农牧业历史悠久,工业上以轻工业为主的地区,带入土壤的As主要来自化肥的施用与工业废水的排放,该流域土壤As背景值约为西江流域土壤As背景值

的 0.7 倍,但值得注意的是该流域土壤 pH 绝大部分大于 8.0,而 pH 值是影响土壤 As 解吸的重要因素。研究表明, pH > 8.0 时,伊犁河流域土壤解吸 As 加剧,污染加重。

通过对西江流域不同土地利用类型中 As 含量的分析,发现水田土壤中 As 含量反而低于旱地土壤中 As 含量。这一结果与凌乃规等^[25]有关广西不同类型农田土壤重金属含量状况的研究结果相似。根据笔者调查发现,西江流域上游由于受重金属污染的历史累积影响,众多水田已改为旱地耕作。另外,旱地土壤中 As 含量较高可能与其成土母质大部分为石灰岩有关,而水田的石灰岩母质只占极少数。有研究表明,石灰岩中 As 平均背景值高于砂页岩、河流冲积物、洪积物、花岗岩和紫色岩^[26]。

对西江流域约 5.8 万 km² 范围内土壤 As 污染的调查结果表明,污染区域主要集中于流域上游,以南丹县最为突出,这与翟丽梅等人对西江流域农田土壤 Cd 污染的调查结果类似^[27],可见以南丹为核心的周边区域土壤呈现重金属复合污染特征。根据研究区土壤 As 空间分布图结合流域内的矿产点分布图来看,流域上游矿业活动释放的含 As 污染物是导致土壤 As 污染的主要来源之一,污染的可能途径包括大气的沉降、污染物随河流的迁移与污水灌溉,其中,地表径流在污染物的扩散中扮演了重要角色。短时间内,暴雨形成的较大地表径流携带矿区尾砂等污染物,通过冲沟、溪涧注入河流。在工矿业活动区一定范围内,污染物沿河流两岸分布的特点明显,相关研究也体现了这种流域性污染特征^[28, 29]。汛期,洪水易携带上游选矿后的尾砂污染农田土壤。有研究表明,刁江沿岸土壤 As 污染问题与洪水淹没状况密切相关,受刁江河水污灌影响的土壤 As 含量显著高于非污灌土壤^[8]。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,污染物释放后若不能及时回收处理,污染物的扩散便会紧随其后^[30, 31],因此流域沿岸土壤的针对性治理迫在眉睫。另外,降水集中的 5~8 月,西江流域易发生洪涝灾害,期间矿区尾矿库溃坝的风险更大,污染一旦发生或扩散,从经济角度讲,除了污染修复工作造成的直接经济损失外,其他潜在间接损失,如污染土壤在自然状态下提供生态服务能力的下降,更是难以估计的,建议在此期间加大矿区安全排查力度,以防患于未然,从而避免污

染物随河流迁移至更远的地方。由于矿业废弃物的产生与持续性存在,流域上游历史性矿山开采与加工造成的环境污染仍将持续,西江流域上游土壤 As 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 As 含量范围、均值、几何均值分别为: 0.01 ~ 171 523、382.9 和 23.82 mg·kg⁻¹, 变异程度为强变异性。空间分布表现为: 上游①(刁江、环江流域) As 含量显著高于上游②(红水河、柳江流域)、中游及下游, 矿区土壤 As 含量显著高于水田、旱地与自然土壤中 As 含量。

(2) 空间聚类与冷热点分析表明, 高值聚类区集中分布于南丹北部的芒场镇、刁江流域中上游及大环江流域中下游, 多处于多金属矿区下游及周边区域, 低值聚类区主要分布于南丹北部的六寨镇、大环江和小环江流域上游及黔江浔江主干流流经的农田区域。

(3) 流域土壤 As 有明显的空间自相关性, 以结构性变异为主。流域上游 As 含量由西北向东南递减, 流域特征明显, 高 As 含量区沿刁江流域自然分布, 流域中下游土壤 As 含量基本处于 0.44 ~ 40 mg·kg⁻¹ 之间。

(4) 西江流域土壤样本 As 总体介于无污染-轻度污染之间, 河池市金城江区及南丹县土壤 As 污染突出, 流域上游①呈中高潜在生态风险。这与当地频繁的矿业活动关系密切, 建议采取治理措施并加强雨季尾矿库安全排查力度, 以保障当地居民的生产与生活质量。

参考文献:

- [1] 徐兰, 罗维, 周宝同. 基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价——以洋河为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 580-590.
Xu L, Luo W, Zhou B T. Landscape ecological risk assessment of farming-pastoral ecozone based on land use change—a case study of the Yanghe watershed, China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(4): 580-590.
- [2] 许妍, 高俊峰, 赵家虎, 等. 流域生态风险评价研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 284-292.
Xu Y, Gao J F, Zhao J H, et al. The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 284-292.
- [3] 刘梅, 李发鹏, 卢善龙, 等. 流域系统重金属污染研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15622-15626, 15637.
Liu M, Li F P, Lu S L, et al. Research advances in heavy metal pollution of river basin system[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(25): 15622-15626, 15637.
- [4] 廖建波. 流域复合环境系统中重金属的归趋与综合风险评

- 价——以北江为例[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- Liao J B. Fate and comprehensive risk assessment of heavy metals in watershed composite environmental systems—a case study of the Beijiang River [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [5] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题[J]. 地理研究, 2008, **27**(1): 201-212.
- Xiao X Y, Chen T B, Liao X Y, *et al.* Regional distribution of arsenic contained minerals and arsenic pollution in China[J]. Geographical Research, 2008, **27**(1): 201-212.
- [6] 河池市环保局. 加快推进河池市土壤污染综合治理 积极探索土壤污染综合防治新模式[EB/OL]. <http://kthjje.cn/index.php?s=/Index/artical/aid/242/>, 2015-04-17.
- [7] 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 Diaojiang River, Guangxi Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, **23**(4): 485-490.
- [8] 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 Diaojiang River [J]. Ecology and Environment, 2005, **14**(1): 34-37.
- [9] 唐成. 大环江两岸农田土壤重金属污染现状及其健康风险评估[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- Tang C. Status and health risk assessment of heavy metal pollution of farmland soil in two sides of Great Huanjiang River [D]. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [10] 文泽伟. 龙江—柳江—西江流域的水化学特征和重金属污染研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- Wen Z W. Study on hydrochemistry characteristics and heavy metal pollution in the Longjiang-Liujiang-Xijiang watershed [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [11] 广西壮族自治区地方志编纂委员会. 广西通志[M]. 南宁: 广西人民出版社, 2003.
- [12] Esri. How Cluster and Outlier Analysis (Anselin Local Moran's I) works [EB/OL]. <http://desktop.arcgis.com/zh-cn/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-cluster-and-outlier-analysis-anselin-local-m.htm>.
- [13] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法及广西土壤背景值[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992.
- [14] 蹇丽, 李慧君, 吴琳, 等. 广西高砷区采矿业污染河流治理探讨[J]. 环境科学与管理, 2012, **37**(4): 108-111, 148.
- Jian L, Li H J, Wu L, *et al.* Discussion on heavy metal pollution treatment of Diaojiang River [J]. Environmental Science and Management, 2012, **37**(4): 108-111, 148.
- [15] 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.
- [16] 席承藩. 土壤是气候变化的长期记录者[J]. 第四纪研究, 1990, **10**(1): 82-90.
- Xi C P. Soil condition recording the long term climatic change [J]. Quaternary Sciences, 1990, **10**(1): 82-90.
- [17] 许春雪. 树木年轮学在重建土壤重金属污染史中的应用研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2005.
- [18] 李先琨, 苏宗明, 吕仕洪, 等. 广西岩溶植被自然分布规律及对岩溶生态恢复重建的意义[J]. 山地学报, 2003, **21**(2): 129-139.
- Li X K, Su Z M, Lv S H, *et al.* The spatial pattern of natural vegetation in the Karst regions of Guangxi and the ecological signality for ecosystem rehabilitation and reconstruction [J]. Journal of Mountain Science, 2003, **21**(2): 129-139.
- [19] 况雪源, 苏志, 涂方旭. 广西气候区划[J]. 广西科学, 2007, **14**(3): 278-283.
- Kuang X Y, Su Z, Tu F X. Climate regionalization of Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2007, **14**(3): 278-283.
- [20] 张明, 陈国光, 刘红樱, 等. 长江三角洲地区土壤重金属含量及其分异特征[J]. 土壤通报, 2012, **43**(5): 1098-1103.
- Zhang M, Chen G G, Liu H Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of heavy metal in soils of Yangtze River delta [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, **43**(5): 1098-1103.
- [21] 孙彬彬. 珠江三角洲土壤元素时空变化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- [22] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 260-265.
- Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, *et al.* Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang River basin [J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 260-265.
- [23] 陈洪, 特拉津·那斯尔, 杨剑虹. 伊犁河流域土壤重金属含量空间分布及其环境现状研究[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(3): 100-105.
- Chen H, Te La-jin · Na Si-er, Yang J H. Study of spatial distribution of heavy metal elements content and its environment status in the Ili River valley region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(3): 100-105.
- [24] 刘永轩. 南方典型高砷区土壤砷形态空间分异与形成规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- Liu Y Y. The spatial distribution and formation of different arsenic species in typical high arsenic regions in southern China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [25] 凌乃规. 广西不同类型农田土壤重金属含量状况分析[J]. 农业环境与发展, 2010, **27**(4): 91-94.
- [26] 郑武. 广西桂东北地区农业土壤环境若干重金属元素背景值的调查[J]. 生态与农村环境学报, 1993, **9**(4): 39-42, 63-64.
- [27] 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.
- [28] 缪雄谊, 叶思源, 郝玉培, 等. 黄河三角洲表层土壤重金属环境质量评价[J]. 海洋科学, 2016, **40**(2): 65-76.
- Miao X Y, Ye S Y, Hao Y P, *et al.* Assessment of heavy metal contamination in the surface soil of the Yellow River Delta, China [J]. Marine Sciences, 2016, **40**(2): 65-76.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Zhao Y C, Xu X H, Huang B, *et al.* Using robust kriging and sequential Gaussian simulation to delineate the copper- and lead-contaminated areas of a rapidly industrialized city in Yangtze River Delta, China[J]. *Environmental Geology*, 2007, **52**(7): 1423-1433.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2017年10月31日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续16次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.



CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/CAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)