

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

**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

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 ..... 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)

基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 ..... 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)

上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 ..... 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)

广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 ..... 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)

重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 ..... 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)

济南市夏、冬季 PM<sub>2.5</sub> 中化学组分的季节变化特征及来源解析 ..... 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)

聊城冬季一重污染过程 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及成因分析 ..... 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)

夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 ..... 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)

晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析 ..... 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)

北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 ..... 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)

合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 ..... 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏楨, 王凤 (4060)

填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 ..... 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)

北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 ..... 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)

基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 ..... 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王朕, 滕彦国, 王金生 (4086)

透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 ..... 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)

黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 ..... 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)

黄河干流宁夏段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 ..... 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若琦, 崔锋 (4114)

伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 ..... 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)

马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 ..... 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)

柳江盆地浅层地下水硝态氮水特征和成因分析 ..... 徐进, 何江涛, 彭颖, 曾颖 (4142)

地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 ..... 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)

三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 ..... 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)

蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 ..... 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)

铅改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 ..... 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)

洱河流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 ..... 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)

我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 ..... 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)

东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 ..... 储瑜, 何肖微, 曾中, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)

处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 ..... 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)

华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 ..... 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)

制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 ..... 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)

人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 ..... 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)

城市污水管网中不同生化作用的基质流向 ..... 姚翔译, 石炬, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)

微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 ..... 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)

UV 强化草酸络合 Fe<sup>3+</sup> 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 ..... 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)

焦化废水 A/O<sup>2</sup> 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 ..... 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)

长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 ..... 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)

NaCl 盐度对 A<sup>2</sup>/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 ..... 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)

温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 ..... 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)

游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 ..... 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)

HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 ..... 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)

长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 ..... 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)

广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 ..... 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)

紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 ..... 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)

秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 ..... 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)

低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 ..... 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)

臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 ..... 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殿波 (4359)

再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 ..... 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)

黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 ..... 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)

村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 ..... 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)

《环境科学》征订启事 (3986)      《环境科学》征稿简则 (4050)      信息 (4085, 4104, 4337)

# 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析

宋波<sup>1,2</sup>, 张云霞<sup>1</sup>, 庞瑞<sup>1</sup>, 杨子杰<sup>1</sup>, 宾娟<sup>1</sup>, 周子阳<sup>1</sup>, 陈同斌<sup>1,3\*</sup>

(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:** 为探明西江流域农田土壤重金属污染分布特征及主要影响因素, 采集 2 187 个农田土壤样品, 测试其重金属含量. 采用地统计理论与 GIS 空间插值相结合的方法研究重金属元素的空间结构和分布特征; 利用潜在生态风险指数作风险评估; 采用相关性分析和主成分分析等多元统计方法解析重金属来源. 结果表明, 西江流域农田土壤 7 种重金属元素在土壤中均有一定程度的富集, 其中重金属 Cd 富集情况最为明显, 独立样本 *T* 检验结果显示, 旱地土壤与水田土壤重金属含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 水田土壤 Cd 含量显著高于相应旱地土壤; 西江流域农田土壤 Cd 存在较高的潜在生态风险. 相关分析和主成分分析结果显示, 土壤中 Pb、Zn、As、Cd、Cu 的富集是由矿业活动、交通和污水灌溉等人为因素引起的, Ni 和 Cr 则受成土母质等自然因素影响较大. 从空间分布上看, 流域上游 As、Cd、Pb、Zn、Cu 高含量区均分布于刁江流域及大环江流域, 其中 Cd 高值分布范围最广, 南丹县大厂车河地区高值样点最为密集, 说明矿区活动给当地农田土壤造成了一定程度的重金属污染.

**关键词:** 西江流域; 重金属; 污染来源; 生态风险; 空间分布

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4317-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201712161

## Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi

SONG Bo<sup>1,2</sup>, ZHANG Yun-xia<sup>1</sup>, PANG Rui<sup>1</sup>, YANG Zi-jie<sup>1</sup>, BIN Juan<sup>1</sup>, ZHOU Zi-yang<sup>1</sup>, CHEN Tong-bin<sup>1,3\*</sup>

(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:** In order to determine the distribution characteristics of heavy metal pollution in farmland soils and related influencing factors in the Xijiang River Basin, 2 187 farmland soil samples were collected and their heavy metal contents were tested. The spatial structure and distribution characteristics of heavy metal elements were studied using a combination of geostatistics theory and GIS spatial interpolation. The potential ecological risk index was employed for risk assessment. Multivariate statistical methods, such as correlation analysis and principal component analysis, were used to analyze heavy metal sources. Results showed that farmland soils in the Basin were enriched with seven kinds of heavy metal to some extent, with Cd accumulation being the most evident. T-test independent samples results showed significant differences in heavy metal content between dry and field paddy soils ( $P < 0.05$ ). Cd content in paddy soils was significantly higher than in corresponding dry land soils. Cd in farmland soils in Xijiang River exhibited higher potential ecological risk. Correlation analysis and principal component analysis showed that enrichment of Pb, Zn, As, Cd, and Cu in soil was due to anthropogenic factors such as mining activities, traffic, and sewage irrigation, while Ni and Cr were influenced by natural factors, such as soil parent material. High-content areas of As, Cd, Pb, Zn, and Cu in the upper reaches of the basin are all distributed in the Diaojiang River basin and the Dahuanjiang River basin. Cd was most widely distributed. The most intensive sampling sites indicated that mining activities have caused some degree of heavy metal pollution in local farmland soils.

**Key words:** Xijiang River basin; heavy metal; source analysis; ecological risk; spatial distribution

土壤是人类赖以生存的基础, 也是农产品安全的根本保证, 土壤污染对农产品与地下水质量安全、生态安全、人类生存发展有着直接影响<sup>[1]</sup>. 目前我国土壤重金属污染特征明显, 流域性污染态势凸显, 高背景地区土壤重金属叠加污染突出, 我国耕地土壤重金属污染严重. 流域是以地表水与地下水为纽带, 通过自然分水线包围起来并密切连接区域水循环、土地覆被, 且易受外界胁迫影响的综合地理区域, 也是一个复杂的生态地域系统<sup>[2-4]</sup>. 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<sup>[5]</sup>.

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. 西江流域作为广西主要的粮食产区

收稿日期: 2017-12-20; 修订日期: 2018-03-12

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); 广西科技重大专项(桂科AA17204047-2)

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与风险评估, E-mail: songbo@glut.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: chentb@igsrr.ac.cn

和矿业活动密集区, 重金属污染历史遗留问题突出. 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. 目前对西江流域土壤重金属污染问题, 局部研究多于整体研究, 研究对象包括小尺度的典型矿区周边农田土壤<sup>[6-9]</sup>、以县域为研究单位的耕地土壤<sup>[10]</sup>及受矿业活动影响的小流域沿岸土壤, 如刁江沿岸土壤<sup>[11, 12]</sup>、大环江周边土壤<sup>[13]</sup>, 也有针对整个西江流域的土壤重金属污染研究, 但只是针对单个重金属元素 Cd<sup>[14-16]</sup>. 为了探明流域性农田土壤重金属污染分布规律及主要影响因素. 为此, 对西江流域广西段农田土壤进行了重金属污染调查, 基于地统计理论并结合 GIS 技术对砷 (As)、铅 (Pb)、镉 (Cd)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、镍 (Ni)、铬 (Cr) 等 7 种重金属的含量分布特征进行分析, 并对其进行污染评价.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

西江流域是珠江水系的主干流, 河长 2 075 km, 在广西境内的流域面积占自治区总面积的 86%<sup>[15]</sup>, 地处亚热带季风气候区. 本研究区域为西江流域广西段 (图 1), 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 4 市 15 县 (图 1). 作为广西主要的粮食产区和矿业活动密集区, 西江流域面积广, 东西跨度大, 农业土壤面积约有 4 万 km<sup>2</sup>, 流域上游的河池地区是我国西南地区重要的有色金属生产基地, 矿产资源丰富, 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; 南丹蕴藏着丰富的砷矿, 其储量分布占全国的和全球的 27% 和 19%; 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.

### 1.2 样品采集与分析方法

2013 年 7 月 ~ 2015 年 11 月, 结合西江流域农田土地利用类型、矿产点分布与地形示意, 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与地形因素, 对采样点分布进行适度调整, 最后共采集到土壤样品 2 187 个 (图 2), 旱地、水田土壤分别为 1 441 和 746 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,

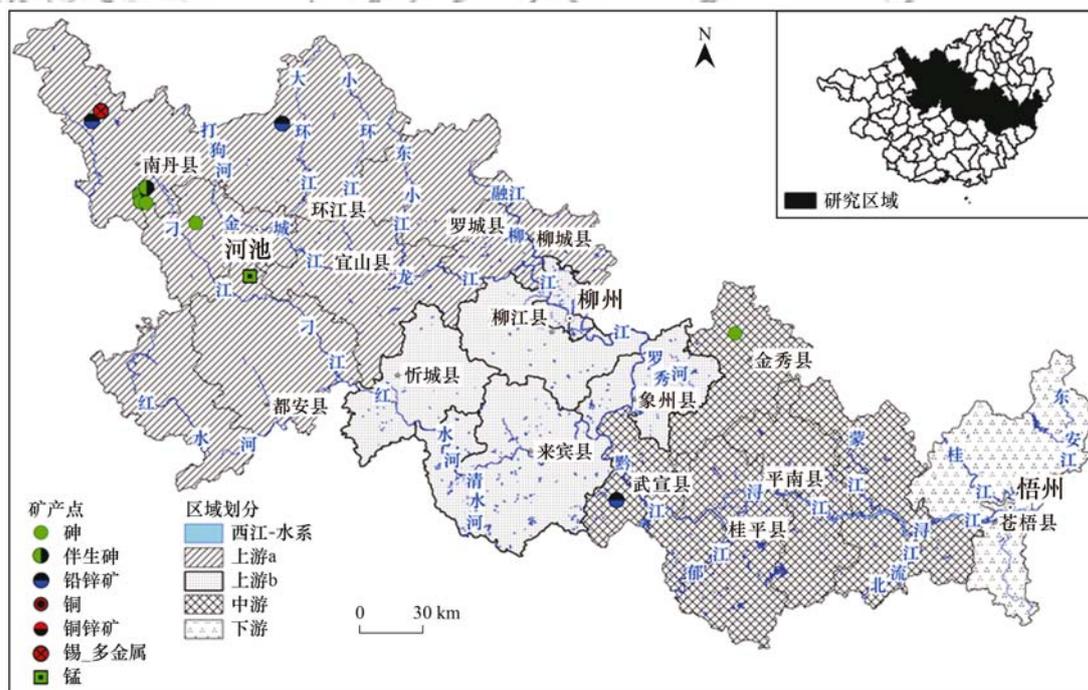


图 1 广西西江流域子流域划分及矿产点分布

Fig. 1 Distribution of sub-watersheds and minerals in the Xi Jiang River basin of Guangxi

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  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$  法消解, 用原子荧光光谱法 (AFS-9700) 测定土壤 As 含量, 石墨炉原子吸收分光光度计 (AA-700) 测定 Cd、Pb 含量, 使用 ICP-OES 测定 Cu、Pb、Zn、Ni、Cr 含量。

分析过程中加入国家标准土壤样品 (GSS-4 和 GSS-6) 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)。

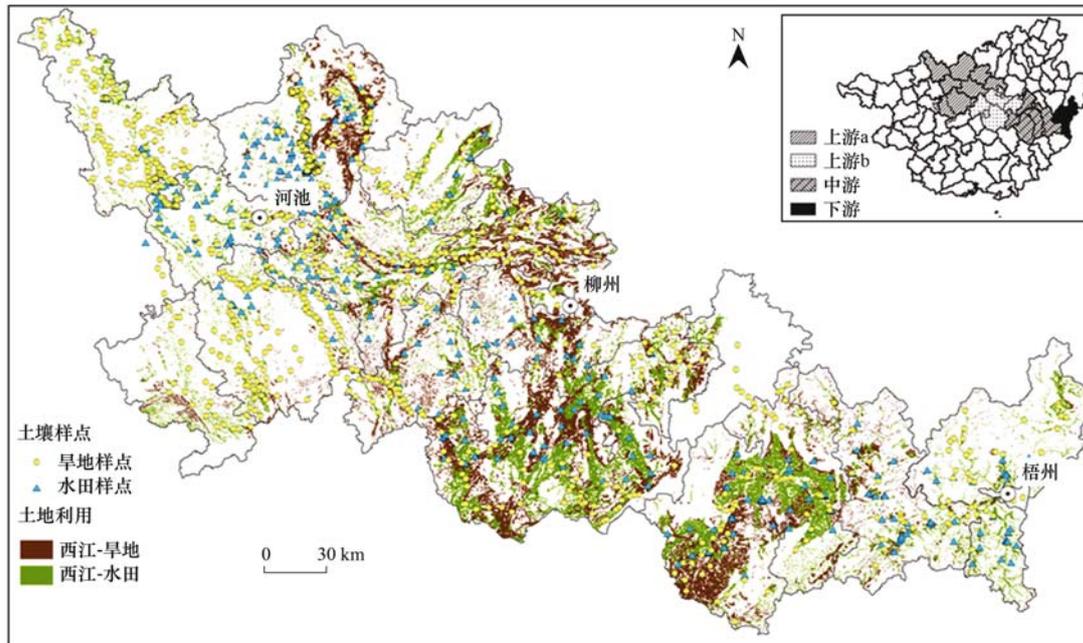


图2 广西西江流域农田土壤样点分布

Fig. 2 Distribution of soil sampling sites in the Xijiang River basin of Guangxi

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法是对单个污染因子的污染程度进行评价, 其表达式为:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中,  $P_i$  为土壤中污染物  $i$  的环境质量指数;  $C_i$  为污染物  $i$  的实测浓度;  $S_i$  为污染物  $i$  的评价标准, 采用《国家土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 二级标准为参照。若  $P_i > 1.0$  说明土壤中该重金属含量超标, 土壤被污染; 当  $P_i \leq 1.0$  时, 说明该重金属含量尚在背景值含量 95% 的置信区间范围内, 可认为未受污染;  $P_i$  的值越大, 表明该重金属累积情况越严重。

#### 1.3.2 综合污染评价方法

内梅罗指数在反映土壤重金属污染物的综合污染状况的同时, 更加突出了污染物高值对土壤环境质量的影响。其表达式如下:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{P_{\text{max}}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中,  $P_{\text{综合}}$  为土壤综合污染指数;  $P_{\text{max}}$  为农田耕作层土壤中重金属的最大单项污染指数;  $P_{\text{ave}}$  为农田耕作层土壤重金属的单项污染指数的平均值。若  $P_{\text{综合}} \leq 1$  为未污染; 若  $1 < P_{\text{综合}} \leq 2$  为轻度污染; 若  $2 < P_{\text{综合}} \leq 3$  为中度污染;  $P_{\text{综合}} > 3$  为重度污染。

#### 1.4 土壤环境生态风险评估

瑞典科学家 Hakanson<sup>[17]</sup> 提出的潜在生态风险指数法, 最初被用于评估区域沉积物的潜在生态风险。由于它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, 应用范围不断拓展, 现已被广泛用于土壤环境生态风险研究。根据该方法, 某一土壤中第  $i$  种重金属的潜在生态风险指数及多种重金属的潜在生态风险指数 RI 计算公式如下:

$$C_r^i = C_s^i/C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_r^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i$$

式中,  $C_i^r$  为重金属  $i$  相对于区域背景值<sup>[18]</sup> ( $C_n^i$ ) 的污染指数;  $C_s^i$  为土壤中重金属  $i$  的实测浓度;  $E_r^i$  为重金属  $i$  的潜在生态风险指数;  $T_r^i$  为重金属  $i$  的毒性响应指数; RI 为土壤中  $m$  种重金属的复合生态风险指数;  $m$  为考察的重金属个数. 重金属毒性响应指数参考如下<sup>[23]</sup>: As(10)、Pb(5)、Cd(30)、Cu(5)、Zn(1)、Ni(4)、Cr(4).

根据潜在生态风险指数可将土壤污染分为如下 5 级<sup>[19]</sup>:  $E_r^i < 40$  低潜在生态风险;  $40 \leq E_r^i < 80$  中等潜在生态风险;  $80 \leq E_r^i < 160$  中高等潜在生态风险;  $160 \leq E_r^i < 320$  高等潜在风险;  $E_r^i > 320$  极高等潜在风险.

复合生态风险指数 RI 对土壤重金属污染进行评估, 分等级方法如下<sup>[20]</sup>:  $RI < 150$  低生态风险;  $150 \leq RI < 300$  中等生态风险;  $300 \leq RI < 600$  高等生态风险;  $RI \geq 600$  极高生态风险.

### 1.5 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, 非正态分布的数据进行正态转

换, 相关性分析计算 Pearson 相关系数,  $P < 0.05$  表示差异有统计学意义. 样点分布图、空间插值分析均在 ArcGIS 10.2 平台上完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属含量统计分析

对西江流域 7 种农田土壤重金属含量进行描述性统计(表 1), As、Pb、Cu、Zn、Ni、Cr 经对数转换后均符合正态分布, Cd 经 Box-Cox( $\lambda = -0.034$ ) 变换后符合正态分布, 用几何均值表述土壤重金属含量. 农田土壤 As、Pb、Cd、Cu、Zn、Ni、Cr 的几何均值分别为 19.6、80.84、0.74、27.05、118.0、24.78、77.53  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 所有元素中只有 Cd 的几何均值超过《国家土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 二级标准. 有研究显示<sup>[21]</sup> 西江流域农田土壤 pH 低于 6.5, 农田土壤 Pb、Cd、Cu、Zn、Ni 的超标率分别 20.76%、67.15%、14.39%、29.75%、26.84%. 其中 Cd 的超标情况最为明显, 几何均值为标准的 2.36 倍.

表 1 西江流域农田土壤重金属含量统计值

Table 1 Heavy metal concentrations in farmland soil in the Xijiang river basin

土壤类型	元素	范围 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中位数 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	算术均值 $\pm$ 算术标准差 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	几何均值 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (几何标准差)	变异系数	GB 15618-1995	
							参考值 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	超标率 /%
旱地土壤 ( $n=1441$ )	As	0.44 ~ 2.286	19.25	56.8 $\pm$ 174.6	22.91 (3.00)	3.07	40	24.01
	Pb	1.06 ~ 2.326	126.2	218.6 $\pm$ 284.6	116.7 (3.23)	1.30	250	26.02
	Cd	0.001 ~ 29.19	0.552	2.07 $\pm$ 3.999	0.576 (5.39)	1.94	0.3	56.48
	Cu	2.14 ~ 317.9	27.2	36.45 $\pm$ 35.06	28.04 (2.002)	0.96	50	16.38
	Zn	4.34 ~ 11.113	126.5	290.7 $\pm$ 580.8	151.6 (2.81)	2.00	200	33.93
	Ni	2.84 ~ 316.7	24.38	33.82 $\pm$ 30.71	24.75 (2.22)	0.91	200	21.37
	Cr	8.0 ~ 847.5	70.03	91.36 $\pm$ 82.22	73.30 (1.86)	0.90	150	10.3
水田土壤 ( $n=746$ )	As	0.67 ~ 909.0	13.32	24.44 $\pm$ 53.84	14.67 (2.29)	2.19	30	14.34
	Pb	2.12 ~ 3.464	35.13	93.26 $\pm$ 225.1	40.63 (3.04)	2.41	250	8.92
	Cd	0.002 ~ 66.46	0.878	1.85 $\pm$ 3.459	0.87 (3.54)	1.87	0.3	77.66
	Cu	3.0 ~ 495.8	25.94	29.77 $\pm$ 24.97	25.2 (1.75)	0.84	50	9.19
	Zn	2.008 ~ 4.247	84.6	160.5 $\pm$ 300.9	72.33 (3.79)	1.87	200	19.2
	Ni	4.0 ~ 151.0	29.0	36.4 $\pm$ 24.90	28.9 (2.04)	0.68	200	32.13
	Cr	7.0 ~ 478.0	102.0	107.8 $\pm$ 62.72	90.77 (1.91)	0.58	250	7.41
总体 ( $n=2187$ )	As	0.44 ~ 2.286	16.5	45.44 $\pm$ 144.8	19.6 (2.81)	3.19	—	—
	Pb	1.06 ~ 3.464	73.7	174.9 $\pm$ 272.0	80.84 (3.51)	1.55	250	20.76
	Cd	0.001 ~ 66.46	0.71	2.34 $\pm$ 4.624	0.74 (4.73)	1.97	0.3	67.15
	Cu	2.14 ~ 495.8	26.6	34.27 $\pm$ 32.65	27.05 (1.92)	0.95	50	14.39
	Zn	2.008 ~ 11.113	111.6	253.2 $\pm$ 567.4	118.0 (3.33)	2.24	200	29.75
	Ni	2.84 ~ 316.7	25.07	32.59 $\pm$ 24.93	24.78 (2.16)	0.76	200	26.84
	Cr	7.0 ~ 847.5	78.0	93.36 $\pm$ 68.85	77.53 (1.83)	0.74	—	—

从不同土地利用类型的土壤来看, 旱地土壤中 As、Pb、Cu、Zn 的几何均值分别是水田土壤中相应几何均值的 1.56、2.87、1.11、2.1 倍. 独立样本  $T$  检验结果显示, 旱地土壤与水田土壤重金属几何均

值存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 水田土壤 Cd、Ni 的几何均值显著高于相应旱地土壤. 作为广西主要的粮食产区, 西江流域的农业种植面积较大, 种植结构存在差异, 旱地种植的种类较多, 化肥和农药施加

的种类和数量不同, 旱地土壤 Cu、Zn 含量高与大量施加化肥和农药有关<sup>[22]</sup>。有研究发现<sup>[23]</sup>, 旱地相对水田更易富集 As、Cu、Cr、Zn。根据土壤利用方式和采样点(图 2)可以发现, 水田土壤的采样点大多分布在河池和中下游地区, 水田 Cd 含量高可能与矿业活动有关, 而 Ni 含量差异主要是由于地质背景所导致的。

与标准差相比, 变异系数可消除重金属含量不同量纲的影响, 反映 7 种重金属含量数据的离散性。根据相关研究者对变异程度的分类<sup>[24]</sup>, 所有重金属变异系数均大于 0.36, 均属于高度变异性质, 表明西江流域农田土壤重金属变异程度较高, 样本含量数据空间分布离散性比较大, 且分布不均匀, 差异性极大, 极有可能受到外界因素影响。

## 2.2 不同子流域农田土壤重金属空间分布特征分析

对研究区 4 个子流域(图 1)农田土壤重金属数据进行半变异函数拟合<sup>[22]</sup>, 得到最优模型(表 2)。由表 2 可知, 西江流域上游 a 区土壤 As、Cd、Pb、Cu、Zn、Ni、Cr 含量具有中等空间自相关性。上游 b 区土壤 Zn、Cu、Ni、Cr 含量具有强烈的空间自相关性, As、Pb、Cd 空间自相关性较明显。中游土壤 Cd、Pb、Zn、Ni 含量具有明显的空间自相关性, As、Cr 空间具有强烈空间自相关性。下游土壤 Cd、Pb、Zn、Cu、Ni、Cr 含量具有强烈的空间自相关性, As 空间自相关性较明显。整体上, 西江流域土壤重金属含量流域特征明显, 上游 a 区和中游地区有较多的矿业活动, 土壤重金属含量不仅受到自然条件

表 2 西江流域子流域半变异函数模型拟合

Table 2 Parameters of theoretic semivariogram model for the sub-watershed of the Xijiang River basin

元素	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 [ $C_0 / (C_0 + C)$ ]
As	上游 a 区	指数模型	29 637	0.69	1.06	0.65
	上游 b 区	球状模型	9 435	0.32	0.96	0.33
	中游	指数模型	1 665	0.18	0.75	0.23
	下游	高斯模型	1 332	0.06	0.24	0.27
Cd	上游 a 区	指数模型	41 070	0.47	0.90	0.53
	上游 b 区	指数模型	3 300	0.25	0.83	0.31
	中游	指数模型	8 400	0.19	0.69	0.28
	下游	高斯模型	6 660	0.04	0.37	0.09
Pb	上游 a 区	指数模型	17 871	0.62	1.12	0.56
	上游 b 区	球状模型	3 600	0.24	0.59	0.41
	中游	球状模型	3 072	0.16	0.50	0.32
	下游	高斯模型	1 392	0.17	0.74	0.231
Zn	上游 a 区	指数模型	27 639	0.66	1.17	0.57
	上游 b 区	高斯模型	6 000	0.15	0.61	0.24
	中游	球状模型	1 860	0.36	1.02	0.35
	下游	球面模型	5 330	0.04	0.39	0.11
Cu	上游 a 区	球状模型	20 202	0.56	0.93	0.59
	上游 b 区	球状模型	4 500	0.008	0.39	0.02
	中游	球状模型	2 340	0.21	0.48	0.43
	下游	球状模型	1 584	0.04	1.09	0.04
Ni	上游 a 区	指数模型	4 000	0.25	0.81	0.31
	上游 b 区	球状模型	3 000	0.14	0.79	0.17
	中游	球面模型	3 120	0.25	0.81	0.31
	下游	高斯模型	1 440	0.02	0.86	0.02
Cr	上游 a 区	指数模型	4 200	0.27	0.48	0.55
	上游 b 区	指数模型	3 014	0.16	1.03	0.15
	中游	球状模型	3 828	0.19	1.09	0.18
	下游	高斯模型	1 080	0.03	0.27	0.10

的影响, 还受到矿业活动等人为因素的影响。而下游地区土壤重金属有显著的空间自相关性, 结构性变异为主, 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<sup>[25, 26]</sup>并依据《国家

土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)对土壤重金属含量划分等级绘制西江流域农田重金属含量空间分布图(图 3), 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

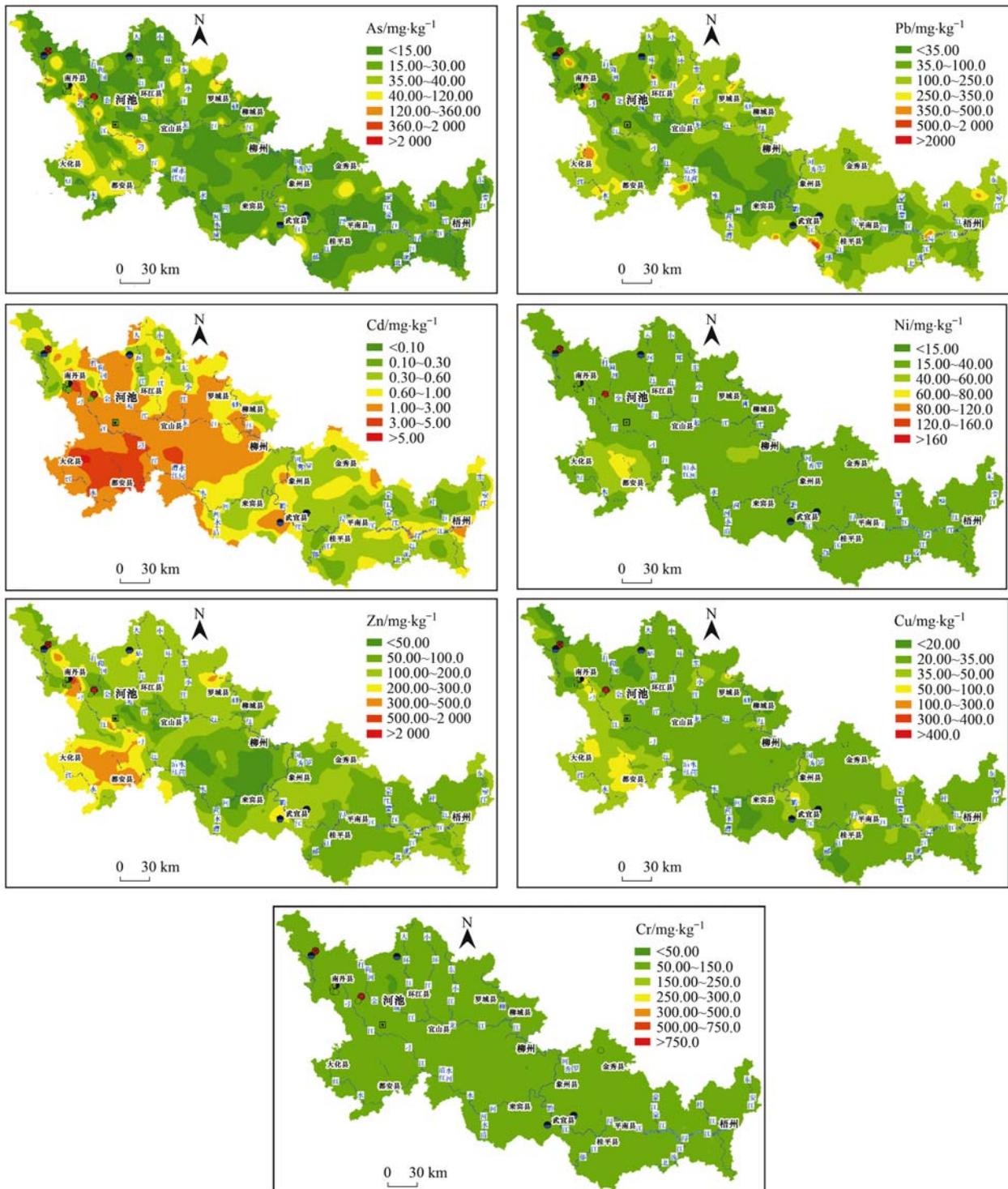


图3 西江流域农田土壤重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals in farmland soils in the Xijiang River basin

高于其他地区,最高值达 $2286\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,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 $0.440\sim 40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. Pb总体小于 $250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,即未超过国家土壤环境Pb含量限值二级标准.高Pb含量样点在刁江上游的聚积远大于刁江下游都安段,中游局部地区(武宣县)存

在Pb高值.上游Cd含量明显高于中下游,上游Cd含量大部分超过 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,高Cd含量区集中于南丹大厂车河矿区、刁江流域都安段-忻城段、柳江县及大化与都安相夹的区域. Ni总体小于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,即未超过国家土壤环境Pb含量限值二级标准,红水河与刁江所夹区域Ni含量较高且成片

较为突出. Zn 高值主要分布于刁江流域上游、刁江流域都安段以及大环江流域, 整体上 Zn 在刁江上游的聚积远大于刁江下游都安段, 柳江-合山-忻城地区形成大面积 Zn 的低值范围. Cu 整体含量小于  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 刁江流域上游及大环江流域下游土壤部分含量较高, 中游局部地区(武宣县)存在 Cu 高值. Cr 含量总体小于  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 综上, 西江流域农田土壤重金属由上游、中、下游呈现总体递减趋势, 局部地区有高值出现, 流域上游 As、Cd、Pb、Zn、Cu 高含量区均分布于刁江流域及大环江流域, 其中 Cd 高值分布范围最广, 以上游最为突出, 南丹县大厂车河地区高值样点最为密集; Ni、Cr 在红水河和刁江所夹区域的高值影响广泛而突出.

### 2.3 农田土壤重金属污染评价与风险评估

划分研究区 4 个子流域并计算内梅罗综合污染指数(表 3). 结果表明, 西江流域农田土壤重金属综合污染指数表现为: 上游 a 区 > 上游 b 区 > 3 > 中游 > 2 > 下游 > 1, 西江流域农田土壤重金属遭受不

同程度的污染, 流域上游土壤为重度污染, 中游为中度污染, 下游为轻度污染. 从  $P_i$  值可发现, 流域内 Cd 均遭受不同程度的污染. 流域上游 a 区 As、Cd、Zn 的单因子污染指数均大于 1, Pb 的单因子污染指数为 0.801, 存在局部矿业活动影响区域 Pb 污染, 上游 a 区呈现 As、Cd、Zn、Pb 的复合污染, 上游 b 区 Cd 污染突出, 中游为 Cd、Pb 污染, 下游为 Cd 污染. 说明这些重金属元素极有可能在该地区富集, 人类活动对其造成了一定的影响. 西江流域各子流域的内梅罗指数偏大, 一方面是该研究方法过度突出了单因子指数最大值的权重, 夸大的结果掩盖了流域内部土壤污染的真实状况, 另一方面, 从全国角度考虑, 广西多地处于地质异常区, 重金属本底值含量较高. 但该指数在一定程度上仍能够反映出西江流域土壤重金属污染现状, 即流域局部存在不同程度的土壤重金属污染问题, 且污染物的主要类型有所不同, 流域上游局部重金属污染问题较为突出.

表 3 西江流域子流域农田土壤重金属内梅罗指数评价

Table 3 Nemero index of heavy metals in farmland soils in sub-watersheds of the Xijiang River basin

重金属	上游 a 区		上游 b 区		中游		下游	
	$P_i$	$P_{\text{综}}$	$P_i$	$P_{\text{综}}$	$P_i$	$P_{\text{综}}$	$P_i$	$P_{\text{综}}$
As	1.486		0.441		0.566		0.343	
Cd	8.027		5.115		2.937		2.094	
Pb	0.801		0.469		1.430		0.381	
Zn	1.609	5.586	0.355	3.712	0.462	2.206	0.401	1.103
Cu	0.686		0.514		0.803		0.638	
Ni	0.783		0.843		0.683		0.725	
Cr	0.571		0.540		0.476		0.260	

依据西江流域土壤重金属背景值作为参考值计算出西江流域 4 个子流域农田土壤环境中 As、Cd、Pb、Zn、Cu、Ni、Cr 的潜在生态风险指数与复合生态风险指数(表 4). 结果表明, 农田土壤重金属的复合生态风险指数 RI 呈如下规律: 流域上游 a 区、上游 b 区、中游、下游的 RI 等级划分依次为: 中等生态风险、中等生态风险、低生态风险和低生态风险, 可见流域上游土壤环境生态状况不容乐观. 流域内, 上、中、下游 Cd 潜在生态风险系数均大于 40, 流域 Cd 污染呈现中等-中高-中等潜在生态风险, Cd 是整个西江流域农田土壤环境产生潜在生态风险的主导因子. 流域内 Pb、Cu、Zn、Ni、Cr 潜在生态风险系数均小于 40, 存在较低的潜在生态风险.

### 2.4 农田土壤重金属来源解析

通过对土壤重金属元素间关联度的相关分析,

有助于推测各重金属之间是否具有同源性或来源识别<sup>[27]</sup>. 在对西江流域土壤重金属含量进行描述性统计分析的基础上, 利用 Pearson 相关分析, 分析了各种金属元素间的相关系数, 结果如表 5 所示. 结果表明, 西江流域各元素间的相关系数均低于 0.8, 各元素间相关程度介于弱-低-中度之间. Cd 与其他元素间均有显著相关性, Pb 和 Zn 的相关性系数超过 0.5, 而 Cr-Pb 呈现显著负相关 ( $P < 0.01$ ), Ni 和 Cr 的相关性系数达 0.48 ( $P < 0.01$ ), 综上所述, As、Cd、Pb、Zn、Cu 可能有相同的来源, Ni、Cr 可能有相同来源.

根据污染物浓度提取了 3 个主成分因子, 主成分因子的累积贡献率为 70.17% (表 6), 可以反映 7 种污染物的污染情况<sup>[28]</sup>. 第一主成分的贡献率为 35.38%, 在 Zn、Pb 的含量上的载荷较高, 分别为

表 4 西江流域子流域土壤重金属潜在生态风险指数与复合生态风险指数

Table 4 Potential ecological risk index and compound ecological risk index of heavy metals in sub-watersheds of the Xijiang River basin

项目	指数	流域划分			
		上游 a 区	上游 b 区	中游	下游
As	$E_r$ (级别)	13.29(低)	4.31(低)	7.62(低)	7.01(低)
Cd	$E_r$ (级别)	129.0(中等)	147.8(中高)	46.4(中高)	33.22(中等)
Pb	$E_r$ (级别)	8.81(低)	5.60(低)	4.65(低)	4.81(低)
Zn	$E_r$ (级别)	2.32(低)	1.04(低)	1.31(低)	1.19(低)
Cu	$E_r$ (级别)	6.52(低)	2.48(低)	6.78(低)	5.65(低)
Ni	$E_r$ (级别)	3.04(低)	4.89(低)	3.32(低)	7.20(低)
Cr	$E_r$ (级别)	3.66(低)	3.01(低)	3.34(低)	0.92(低)
	RI(级别)	166.6(中等生态风险)	169.1(中等生态风险)	73.42(低生态风险)	60.0(低生态风险)

表 5 西江流域农田土壤重金属相关性分析<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation analysis of heavy metal content in farmland soils of the Xijiang River basin

	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr
As	0.224 **	0.253 **	0.335 **	0.331 **	0.060 **	0.011
Cd		0.218 **	0.145 **	0.282 **	0.205 **	0.109 **
Pb			0.381 **	0.673 **	0.163 **	-0.087 **
Cu				0.298 **	0.289 **	0.144 **
Zn					0.205 **	-0.024
Ni						0.480 **

1) \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

0.894、0.875，且二者的相关性较高，结合 Pb、Zn 的重金属含量分布状况，其二者高值出现南丹县以及武宣县周边农田。第一主成分中 2 种重金属可能受到相同的污染源影响。而研究区刁江流域上中游及大环江流域上游坐落着众多大中型采矿场、选矿厂等，以锡-多金属及铅锌矿矿床居多<sup>[29, 30]</sup>，最为人所熟知的有南丹县大厂矿床<sup>[31]</sup>、河池市五圩矿床<sup>[32]</sup>及环江县北山矿床<sup>[33]</sup>，其中南丹县大厂矿田已有一千余年的开采历史，是世界上公认最大的锡多金属矿田之一，伴生砷、镉、铅、锌、铜含量高，尾矿中部分重金属品味甚至达到了国家工业品味指标，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，矿业活动频繁。将影响西江流域农田土壤重金属的第一因子视为“工矿业因子”较为合理。第二主成分的贡献率为 20.89%，Ni、Cr 的载荷均高达 0.8 以上，这两种元素在 0.01 水平上呈显著相关，结合 Ni、Cr 的含量分布状况发现，Ni 总体小于  $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，Cr 含量总体小于  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，即未超过国家土壤环境 Pb、Cr 含量限值二级标准。有研究发现<sup>[26, 34, 35]</sup>，Cr、Ni 含量主要受成土母质的影响，因此，将第二主成分视为“成土因子”较为合理。第三主成分中 As、Cu 的载荷较高，且具有显著的相关性，根据西江流域 As、Cu 空间分布图(图 3)可以看出，As、Cu 主要高值出现在刁江以及红水河沿岸农田中，洪涝易发

的季节，堆放的尾矿库溃坝，这使得尾矿中部分重金属随着水流迁移，并污染流域周边农田土壤。位于流域上游的河池地区享有“有色金属之乡”的美誉，流域上游频繁的矿业活动催生了繁忙的交通运输业，特别是重型车辆，在河池地区较为常见，车辆经过的地方扬尘较大，南丹县某矿区矿石开采及运输过程所致的扬尘与矿屑是当地土壤重金属 As、Cd、Cu 复合污染的主要污染源<sup>[34]</sup>，可见矿业活动通过影响交通运输、污水灌溉等，以大气、水体为载体，间接影响着流域内土壤重金属的含量分布。故将第三主成分视为“污灌和交通源因子”较为合理。Cd 在第三个成分中均有相当的载荷，Cd 的来源受 3 个主成分共同影响，第三主成分中的因子系

表 6 西江流域农田土壤重金属含量因子分析

Table 6 Principal component analysis of heavy metals in farmland soils of the Xijiang River basin

项目	第一主成分	第二主成分	第三主成分
As	0.078	-0.119	0.895
Cd	0.227	0.316	0.418
Pb	0.894	0.001	0.199
Cu	0.284	0.239	0.627
Ni	0.231	0.833	0.052
Zn	0.875	0.058	0.197
Cr	-0.188	0.848	0.085
特征值	2.477	1.462	0.896
累积贡献率/%	35.38	56.27	70.17

数高于第二主成分, 可见, 污灌和大气沉降等人为活动较地质背景对 Cd 含量的影响更为突出。

### 3 结论

(1) 西江流域农田土壤 As、Pb、Cd、Cu、Zn、Ni、Cr 的含量分别为 19.6、80.84、0.74、27.05、118.0、24.78、77.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。基于《国家土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 二级标准, 农田土壤 Pb、Cd、Cu、Zn、Ni 的超标率分别 20.76%、67.15%、14.39%、29.75%、26.84%, 其中 Cd 富集状况最明显。独立样本 *T* 检验结果显示, 旱地土壤与水田土壤重金属含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 水田土壤 Cd 含量显著高于旱地土壤。

(2) 流域上游 As、Cd、Pb、Zn、Cu 高含量区均分布于刁江流域及大环江流域, 其中 Cd 高值分布范围最广, 南丹县大厂车河地区高值样点最为密集, 西江流域农田土壤 Cd 存在较高的潜在生态风险。

(3) 土壤中 Pb、Zn、As、Cd、Cu 的富集是由矿业活动、交通和污水灌溉等人为因素引起的, Ni 和 Cr 则受成土母质等自然因素影响较大。

#### 参考文献:

- [1] Wen H J, Zhang Y X, Cloquet C, *et al.* Tracing sources of pollution in soils from the Jinding Pb-Zn mining district in China using cadmium and lead isotopes [J]. *Applied Geochemistry*, 2015, **52**: 147-154.
- [2] 艾娇燕, 蔡亚娟, 邓超冰, 等. 流域环境风险评估研究进展 [J]. *环境监测管理与技术*, 2015, **27**(4): 8-12.  
Ai J Y, Cai Y J, Deng C B, *et al.* Research progress of environmental risk assessment in river basin [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2015, **27**(4): 8-12.
- [3] 王炳权, 钱新. 流域累积性环境风险评估研究进展 [J]. *环境保护科学*, 2013, **39**(2): 88-92.  
Wang B Q, Qian X. Research progress on watershed accumulating environmental risk assessment [J]. *Environmental Protection Science*, 2013, **39**(2): 88-92.
- [4] 许妍, 高俊峰, 赵家虎, 等. 流域生态风险评估研究进展 [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.
- [5] Hu X F, Su Y, Ye R, *et al.* Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications [J]. *CATENA*, 2007, **70**(3): 428-436.
- [6] Wang X F, Deng C B, Xu G P, *et al.* Heavy metals in soil and sugarcane accumulation in agricultural area along Huanjiang river in Guangxi, China [J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2017, **14**(1): 143-154.
- [7] 蔡刚刚, 张学洪, 梁美娜, 等. 南丹大厂矿区周边农田土壤重金属健康风险评估 [J]. *桂林理工大学学报*, 2014, **34**(3): 554-559.
- [8] Cai G G, Zhang X H, Liang M N, *et al.* Health risk assessment of heavy metals pollution in farmland soil surrounding Dachang ore district in Nandan [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2014, **34**(3): 554-559.
- [8] 程韵韵. 典型区域农田土壤重金属污染时空变化特征及影响因素研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. 2-49.
- Cheng Y Y. Temporal and spatial characteristics and source identification of heavy metal contamination in typical region cropland [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. 2-49.
- [9] 刘勇. 广西某矿区农用地土壤重金属含量分析与污染评价 [D]. 南宁: 广西师范学院, 2012. 1-53.
- Liu Y. Analysis and assessment on the heavy metal content and pollution of farmland soil in a mining field of Guangxi [D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 2012. 1-53.
- [10] 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估 [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.
- [11] 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.
- [12] 宋书巧, 吴欢, 黄钊, 等. 刁江沿岸土壤重金属污染特征研究 [J]. *生态环境学报*, 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.
- [13] 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. 1-43.  
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. 1-43.
- [14] 张云霞, 宋波, 陈同斌, 等. 广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2446-2455.  
Zhang Y X, Song B, Chen T B, *et al.* Spatial distribution study and pollution assessment of Pb in soils in the Xijiang river draining of Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2446-2455.
- [15] 刘畅, 宋波, 张云霞, 等. 西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 899-908.  
Liu C, Song B, Zhang Y X, *et al.* Spatial variability and contamination of arsenic in soils of Xijiang river basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 899-908.
- [16] 宋波, 杨子杰, 张云霞, 等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1888-1900.  
Song B, Yang Z J, Zhang Y X, *et al.* Accumulation of Cd and its risk in the soils of the Xijiang river draining basin of Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1888-1900.

- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [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, DOI: 10.13671/j. hjkxxb. 2018. 0089.  
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, DOI: 10.13671/j. hjkxxb. 2018. 0089.
- [19] 李雪华. 镉矿区沉积物生态风险评价及修复技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013. 1-83.  
Li X H. Ecological risk assessment on sediments in Sb-mining area and development of restoration technology [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. 1-83.
- [20] 陈同斌. 区域土壤环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2015. 20-83.
- [21] 黄玉溢, 林世如, 杨心仪, 等. 广西土壤成土条件与铁铝土成土过程特征研究[J]. *西南农业学报*, 2008, **21**(6): 1622-1625.  
Huang Y Y, Lin S R, Yang X Y, *et al.* Soil-forming conditions and ferrallisols formation features in Guangxi [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, **21**(6): 1622-1625.
- [22] 孙亚乔, 钱会, 段磊, 等. 土地利用方式对土壤重金属含量的影响分析[J]. *安徽农业科学*, 2010, **38**(7): 3613-3615.  
Sun Y Q, Qian H, Duan L, *et al.* Analysis on effects of land and use ways on soil heavy metals contents [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(7): 3613-3615.
- [23] 陈惠芳, 李艳, 吴豪翔, 等. 富阳市不同类型农田土壤重金属变异特征及风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, **29**(2): 164-169.  
Chen H F, Li Y, Wu H X, *et al.* Characteristics and risk assessment of heavy metals pollution of farmland soils relative to type of land use [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, **29**(2): 164-169.
- [24] 沈思渊. 土壤空间变异研究中地统计学的应用及其展望[J]. *土壤学进展*, 1989, **17**(3): 11-24.
- [25] 李思米. 基于 GIS 的中尺度土壤重金属空间插值分析及污染评价——以江苏省南通市为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2005. 1-41.  
Li S M. Study on Gis-based middle-scaled heavy metal spatial interpolation of farmland soil and the pollution appraisal-A case of Nantong in Jiangsu Province [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005. 1-41.
- [26] 王菲, 吴泉源, 吕建树, 等. 山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3144-3150.  
Wang F, Wu Q Y, Lü J S, *et al.* Spatial characteristics and environmental risk of heavy metals in typical gold mining area of Shandong province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3144-3150.
- [27] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. *地理学报*, 2012, **67**(7): 971-984.  
Lü J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 971-984.
- [28] 赵彦锋, 郭恒亮, 孙志英, 等. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源[J]. *地理科学*, 2008, **28**(1): 45-50.  
Zhao Y F, Guo H L, Sun Z Y, *et al.* Principle component analyses based on soil knowledge as a tool to indicate origin of heavy metals in soils [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, **28**(1): 45-50.
- [29] 鹿心社. 全国省级矿产资源规划图集[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [30] 王永勤. 中国固体燃料非金属矿产图集[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [31] 王登红, 陈毓川, 陈文, 等. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代[J]. *地质学报*, 2004, **78**(1): 132-138.  
Wang D H, Chen Y C, Chen W, *et al.* Dating the Dachang giant Tin-polymetallic deposit in Nandan, Guangxi [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, **78**(1): 132-138.
- [32] 钟铿, 陈维田, 胡德刚. 广西矿产资源梗概及其开发前景[J]. *广西地质*, 1988, **5**(2): 5-19.  
Zhong K, Chen W T, Hu D G. Outline of the mineral resources in Guangxi and their exploitation in future [J]. *Geology of Guangxi*, 1988, **5**(2): 5-19.
- [33] Šajn R, Halamić J, Peh Z, *et al.* Assessment of the natural and anthropogenic sources of chemical elements in alluvial soils from the Drava River using multivariate statistical methods [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **110**(3): 278-289.
- [34] 骆永明, 章海波, 滕应, 等. 长江、珠江三角洲土壤及其环境[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [35] 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, (3): 69-73.  
Sun B D, Pan Q Y. The discovery Beishan of Beishan Pb-Zn pyrite deposit in Huanjiang county, Guangxi [J]. *Guangxi Geology*, 1994, (3): 69-73.

## CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China .....	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province .....	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai .....	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province .....	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing .....	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Summer and Winter in Ji'nan City .....	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM <sub>2.5</sub> Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer .....	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng .....	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing .....	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City .....	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face .....	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing .....	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment .....	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads .....	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River .....	..... ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions .....	..... XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring .....	..... LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin .....	..... WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO <sub>3</sub> Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin .....	..... XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution .....	..... ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir .....	..... ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment .....	..... LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment .....	..... HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin .....	..... LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-jiang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China .....	..... NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu .....	..... CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater .....	..... WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China .....	..... HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes .....	..... HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification .....	..... ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network .....	..... YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process .....	..... WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate .....	..... HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O <sup>2</sup> and A/O/H/O Processes .....	..... WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System .....	..... YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A <sup>2</sup> /O Process .....	..... ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process .....	..... CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB) .....	..... SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification .....	..... AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage .....	..... LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi .....	..... SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar .....	..... LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System .....	..... LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite .....	..... XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves .....	..... ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms .....	..... HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment .....	..... LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis .....	..... JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)