

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

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

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM_{2.5}浓度时空变化定量模拟 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM_{2.5}中无机离子垂直分布特征 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM_{2.5})成分图谱 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM_{2.5}成分谱特征 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH₄浓度及其通量变化特征初探 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 李力, 朱耕, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

茶普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A²/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭原位减量工艺中抗生素的去除 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO₂释放的影响 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估

宋波^{1,2}, 杨子杰¹, 张云霞¹, 王佛鹏¹, 周浪¹, 李藜¹, 钟雪梅^{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. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004)

摘要: 为了解广西西江流域土壤 Cd 含量分布特征及风险, 结合土地利用方式进行大规模抽样调查, 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 2 512 个样品, 测试其 Cd 含量. 结果表明, 西江流域土壤 Cd 的背景值为 0.514 mg·kg⁻¹, 显著高于前人研究结果(0.148 mg·kg⁻¹)和广西土壤背景值(0.267 mg·kg⁻¹); 旱地、水田、矿区土壤 Cd 含量分别为 0.559、0.787、5.71 mg·kg⁻¹, 水田土壤和矿区土壤 Cd 含量显著高于自然土壤; 以西江流域土壤 Cd 含量背景值和基线值为限定值, 超标率分别为 51.2%、66.7%、77.8% 和 35.2%、39.6%、71.4%, 矿区土壤和农田土壤都有明显的 Cd 积累趋势; 从土壤 Cd 空间分布及污染特征来看, 西江流域总体土壤 Cd 含量为 0.726 mg·kg⁻¹, 高 Cd 含量斑块主要集中在西江流域上游河池地区的南丹县、大化县、都安县、环江县和宜州市, 以及柳江县、武宣县和象州县等地区, 这些地方出现了重度甚至极重度污染、中等-强污染累积程度和高等-极高等潜在生态风险. 总体上, 广西西江流域上游地区的农业土壤、矿区土壤 Cd 污染问题突出, 属于高 Cd 风险区域, 土壤生态状况不容乐观, 这主要与上游矿业密集区的矿业活动和地质高背景 Cd 有关, 长期居住在矿区及周边地区的居民, 以及食用这一区域生产的农产品, 可能对部分当地居民的健康产生危害. 建议进一步通过土壤-植物-人体体系展开镉风险评估, 同时采取相应措施以控制风险.

关键词: 西江流域; 土壤; 镉; 积累; 风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1888-13 DOI: 10.13227/j.hjxk.201707238

Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi

SONG Bo^{1,2}, YANG Zi-jie¹, ZHANG Yun-xia¹, WANG Fo-peng¹, ZHOU Lang¹, LI Li¹, ZHONG Xue-mer^{1*}

(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. College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To understand the distribution and risk of soil cadmium (Cd) in the Xijiang River drainage basin in Guangxi, a total of 2512 soil samples were collected nonferrous metal mining area, farmland (paddy soils and dryland soils) and the background soils, in the Xijiang River drainage basin in Guangxi. The results showed that Cd concentration was 0.514 mg·kg⁻¹ in background soils significantly higher than previously resulted(0.148 mg·kg⁻¹) and that in Guangxi background soil(0.267 mg·kg⁻¹). The geometric average concentration of Cd in dryland soils, paddysoils and mining soils was 0.559, 0.787, 5.71 mg·kg⁻¹, respectively, which were significantly higher than background soils. The Cd concentration exceeded the background soils and baseline by 51.2% and 35.2% in dryland soil, 66.7% and 39.6% in paddy soil, 77.8% and 71.4% in mining soil, high Cd concentration occurred in the Nandan County, Dahua County, Duan County, Huanjiang County and Yizhou City, as well as Liujiang County, These regions have developed severe and even extremely serious pollution, medium-high pollution accumulation and higher-extremely high potential ecological risks. The Cd-pollution in soils in agricultural and mining soils in upstream of Xijiang River in Guangxi is serious, due to mining activities and high Cd geological background. People in the mining area and surrounding areas who live on local crops, vegetables, may expose to the Cd-pollution. It is recommended to further develop a Cd risk assessment through a soil-plant-human system, taking appropriate measures to control risk.

Key words: Xijiang River basin; soil; cadmium; accumulation; risks

Cd 是一种剧毒的重金属元素^[1,2], 在自然界中常伴生在 Pb、Zn 等金属矿石中, 这些矿石的开采、冶炼和加工均会引起伴生的 Cd 进入土壤环境^[3,4]. 有研究表明, Cd 可通过植物进入生物体造成毒害, 从而引发高血压、骨质疏松症等疾病, 影响酶活性以及人体部分必须元素的吸收, 抑制生物体的生长等^[1]. 1968 年研究显示日本富山县神通川流域居

民长期饮用受镉污染的河水, 并食用此水灌溉的含

收稿日期: 2017-07-27; 修订日期: 2017-09-17

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: 宋波(1972~), 男, 博士, 教授, 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: songbo@glut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zxm@glut.edu.cn

镉稻米后诱发“骨痛病”^[1]。

西江流域作为广西主要的粮食产区和矿业活动密集区, 由于采矿、选矿等不合理的开发堆放, 导致整个流域面临严重的土壤镉安全问题。Cd 具有强迁移特性, 矿业活动中释放的 Cd 往往会引起更大范围的污染^[5]。目前, 对广西境内西江流域某些地区, 如大环江^[6,7]、南丹大厂^[8]、刁江沿岸^[9]和都安^[10]等土壤镉进行过调查, 发现存在不同程度的镉污染。但是鲜有针对整个西江流域土壤镉含量的研究, 缺乏对西江流域土壤镉含量的系统调查。为了了解广西西江流域镉含量分布特征和污染状况, 对研究区土壤进行大规模取样调查, 了解耕地土壤中镉含量的分布特征及污染状况, 以为耕地污染的有效防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为广西西江流域一部分, 主要为流经有色金属矿业活动密集的河池地区及其下游区域, 覆盖了 19 个县市, 其中 5 个市(河池市、柳州市、来宾市、玉林市、梧州市), 以及 14 个县(市), 面积 6.5 万余 km²。主要包括的河流有大环江、小环江、金城江、龙江、刁江、红水河、打狗河、黔江、浔江和西江段下游。西江流域不仅是广西重要的农

业生产区, 同时有色金属矿产资源也极其丰富, 尤其上游地区中素有“有色金属之乡”之称的河池地区(图 1), 有铅锌、砷、伴生砷、锰、铜、锡等矿石, 它是我国西南地区重要的有色金属生产基地, 其中有色金属采掘企业就有 47 家, 选矿厂 70 多家, 主要分布在南丹、罗城、金城江、环江等地, 下游地区的武宣县含有铅锌矿以及象州县的砷矿等等。

1.2 样品采集与分析

土壤样品采集于 2012 年 7 月至 2015 年 11 月, 样点遍及广西境内西江流域, 起于流域上游矿业活动密集的河池地区, 至其影响区的中下游。样品利用 GPS 定位, 共采样 2 512 个(图 2)。根据土地利用方式, 分为旱地土壤、水田土壤、矿区土壤和自然土壤^[1]。参照调查区的土地利用方式分布图、矿产点分布图和地形图, 重点关注西江干流和主要支流两岸与周边区域, 针对受矿业活动影响的农田土壤(旱地土壤和水田土壤), 对相对集中的地区作为重点研究对象, 采集于离矿区 1~2 km 以内或者矿业密集的乡镇等近矿区的农田土壤, 分别采集旱地土壤样品 1 314 个和水田土样 733 个; 对于矿区土壤, 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矿区土样 185 个; 选择地势相对比较高、上风向处、远离人类工

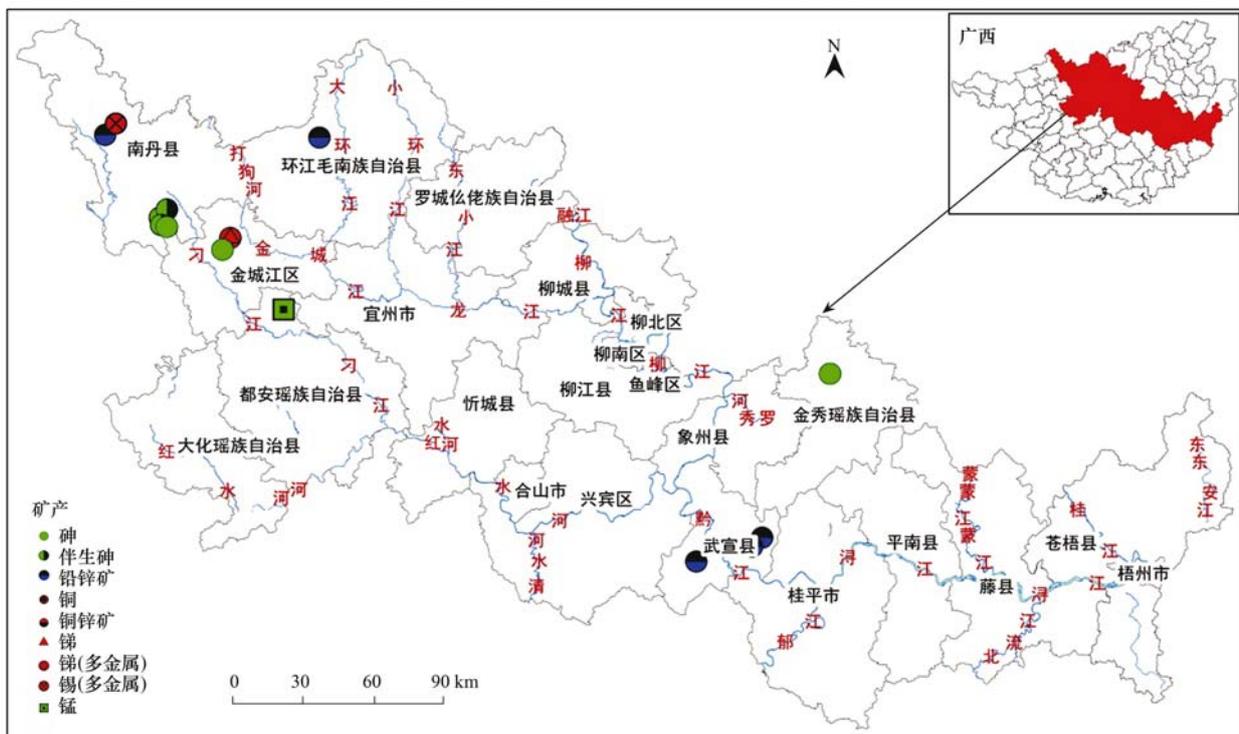


图 1 广西西江流域矿产分布

Fig. 1 A sketch map showing the minerals in the Xijiang River drainage basin in Guangxi

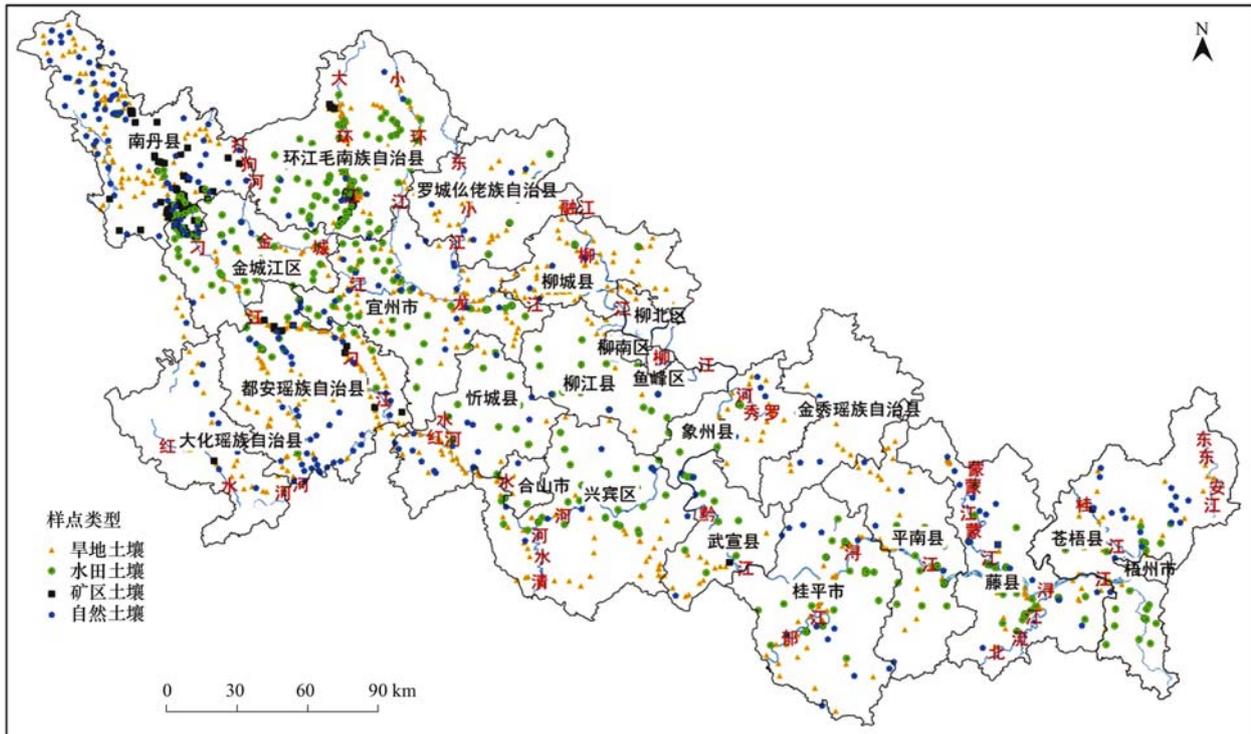


图2 广西西江流域土壤镉调查样点分布示意

Fig. 2 A sketch map showing the sampling sites of Cd in the Xijiang River drainage basin in Guangxi

农业活动、没有或人为影响小的自然林地和荒草地采集自然土壤样品 280 个, 以便对研究区自然土壤进行再调查, 提供更为合理的土壤镉背景值数据。

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; 其余土样均为混合样品, 从 10 m×10 m 的正方形 4 个顶点和中心共 5 个点采集 0~20 cm 样品, 均匀混合后用四分法从中选取 1 kg 土壤作为混合样品。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 尼龙筛备用。样品的采集、混合、粉碎和研磨等处理均使用木头、塑料或玛瑙等工具。

采用 USEPA 推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解法对土壤样品进行前处理^[11], 并用石墨炉-原子吸收光谱法测定样品中镉含量。分析过程中加入土壤标准样品 (GSS-4) 和空白进行质量控制, 样品回收率均在 90%~110% 之间, 所用试剂均为优级纯, 所有水均为超纯水 (亚沸水)。质量控制结果符合国家标准, 测定偏差控制在 ±10% 以内, 选 10% 的样品进行重复测试, 相对误差结果在 ±5% 以内。

1.3 数据处理及评价方法

1.3.1 数据处理

对所采不同类型的土壤样品进行 Kolmogorov-Smirnov 正态检验, 样本均值采用符合正态分布的

算术或几何均值表征; 非正态分布的数据进行正态转换。采用 ArcGIS 10.2 进行克里格插值和空间分析, SPSS 19.0 用来进行正态分布统计检验、单样本 T 和独立样本 T 检验等。

1.3.2 土壤污染评价

土壤环境质量评价中, 若以背景值作为土壤清洁与否的标准, 则过于严格, 因为区域自然土壤背景值也存在一定的变异。夏增禄^[2]建议采用基线值作为土壤污染评价标准, 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。

土壤重金属污染评价方法采用单项污染指数^[12], 单项污染指数法针对的是单一的污染物, 单项污染指数计算公式如下:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中, P_i 为重金属单项污染指数, C_i 为重金属含量实际值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 S_i 为样品重金属含量的限量标准值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 以基线值为限量标准值进行单项污染指数计算。当 $P_i \leq 1$ 时, 无污染; $1 < P_i \leq 2$ 时, 轻度污染; $2 < P_i \leq 3$ 时, 中度污染; $P_i > 3$ 时, 重度污染。

对西江流域土壤镉采用地积累指数法进行污染

评价. 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积累作用. 地积累指数法 (index of geoaccumulation, I_{geo}) 又称为 Muller 指数, 其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. 其表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5BE_n} \right)$$

式中, c_n 为元素的实测浓度; 1.5 为修正指数; BE_n 为背景值. 分级标准: $I_{geo} \leq 0$, 无污染; $0 < I_{geo} \leq 1$, 轻度-中等污染; $1 < I_{geo} \leq 2$, 中等污染; $2 < I_{geo} \leq 3$, 中等-强污染; $3 < I_{geo} \leq 4$, 强污染; $4 < I_{geo} \leq 5$, 强-极严重污染; $5 < I_{geo} \leq 10$ 极严重污染.

瑞典科学家 Hakanson^[13] 提出的潜在生态风险指数法, 不仅考虑到重金属的含量, 而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起, 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系数 E_n^i 表达式为:

$$E_n^i = T_r^i \cdot (C_s^i / C_n^i)$$

式中, C_n^i 第 i 种土壤重金属的背景值; C_s^i 为土壤中重金属 i 的实测浓度; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数, E_n^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数. 查阅资料可知, 土壤镉的毒性响应系数为 30^[14].

根据潜在生态风险系数可将土壤污染分为如下几级^[15]: $E_n^i < 40$ 低潜在生态风险; $40 \leq E_n^i < 80$ 中等潜在生态风险; $80 \leq E_n^i < 160$ 中高等潜在生态风险; $160 \leq E_n^i < 320$ 高等潜在风险; $E_n^i > 320$ 极高等潜在风险.

2 结果与分析

2.1 土壤镉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, 涉重工业分布和有色金属矿业活动密集, 土壤环境发生了巨大的变化, 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. 对于西江流域自

然土壤, 前人曾对广西区开展自然土壤重金属含量调查, 在 5.8 万 km^2 研究区内所布的自然土壤样点仅为 30 个^[16], 且样点分布相对分散. 基于此, 对研究区自然土壤镉背景值进行再调查, 共采集了 280 个背景样品, 因此, 以本研究的自然土壤值作为西江流域的土壤镉背景值更具代表性.

西江流域背景土壤镉含量经对数转换后呈正态分布 (图 3), 因此自然土壤镉含量用几何平均值来表征, 为 $0.514 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1), 几何标准差为 1.49, 含量范围为 $0.002 \sim 20.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数为 1.79, 因此可得到基线值为 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 广西喀斯特地貌显著, 存在高背景重金属镉的情况, 主要分布在广西的西南部、西北部、中部^[17]; 在 2006 ~ 2010 年开展的广西土壤污染普查中发现广西喀斯特地区土壤 Cd 元素含量异常, 平均值达到 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 还有, 根据文献^[18]可知, 镉异常分布高度集中, 主要分布在滇黔桂三省区交界附近区域, 西至云南个旧、东至柳州、北至滇黔川交界、南至中越边界, 异常区总面积约 $40 \times 10^4 \text{ km}^2$, 特别是河池地区 Cd 强度异常高, 且梯度和浓度集中十分明显. 初步调查结果显示, 自然土壤含量高达 $13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 针对自然土壤镉含量绘制等级符号化分布 (图 4), 可知, 西江流域上游的镉背景值比较高, 统计可知河池地区镉几何均值含量比其他地区都高, 为 $1.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 由图 4 可知, 镉异常区主要分布在河池地区的南丹县、环江县、大化县、金城江区和都安县, 还有罗城、宜州、合山市、忻城和武宣, 这些地方都存在比较高的背景样点, 这可能与当地富含铅锌矿及其伴生镉矿有关. 经统计, 本研究的自然土壤镉含量是前人研究的镉土壤背景值^[16] ($0.148 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 3.4 倍. 单样本 T 检验结果 ($P = 0.00 < 0.01$) 表明, 前人研究的土壤镉背景值与本研究的自然土壤镉含量存在显著差异. 另外背景土壤镉含量比广西 ($0.267 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[19])、中国 ($0.097 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[20]) 和日本 ($0.413 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[20]) 的镉背景值高, 造成此差异的原因一方面可能由于前人所谓

表 1 西江流域不同类型的土壤镉含量统计

Table 1 Descriptive statistics of Cd contents in the soils under different land types in the Xijiang River drainage basin

土壤类型	分布类型	N	算术均值 (标准差)	几何均值 (标准差)	范围 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	峰度	偏度	变异系数	超出背景值 百分率/%	超出基线值 百分率/%
旱地土壤	对数正态	1 314	1.95 (3.59)	0.559 (1.70)	0.001 ~ 25.7	14.6	3.51	1.84	51.2	35.2
矿区土壤	对数正态	185	49.1 (129.8)	5.709 (2.61)	0.010 ~ 990.3	39.7	5.98	2.64	77.8	71.4
水田土壤	对数正态	733	1.76 (2.59)	0.787 (1.39)	0.002 ~ 22.6	15.3	3.41	1.47	66.7	39.6
自然土壤	对数正态	280	1.36 (2.43)	0.514 (1.49)	0.002 ~ 20.4	27.1	4.54	1.79	—	—
总计	—	2 512	5.30 (37.4)	0.726 (1.78)	0.001 ~ 990.3	532.2	21.4	7.05	52.0	35.2

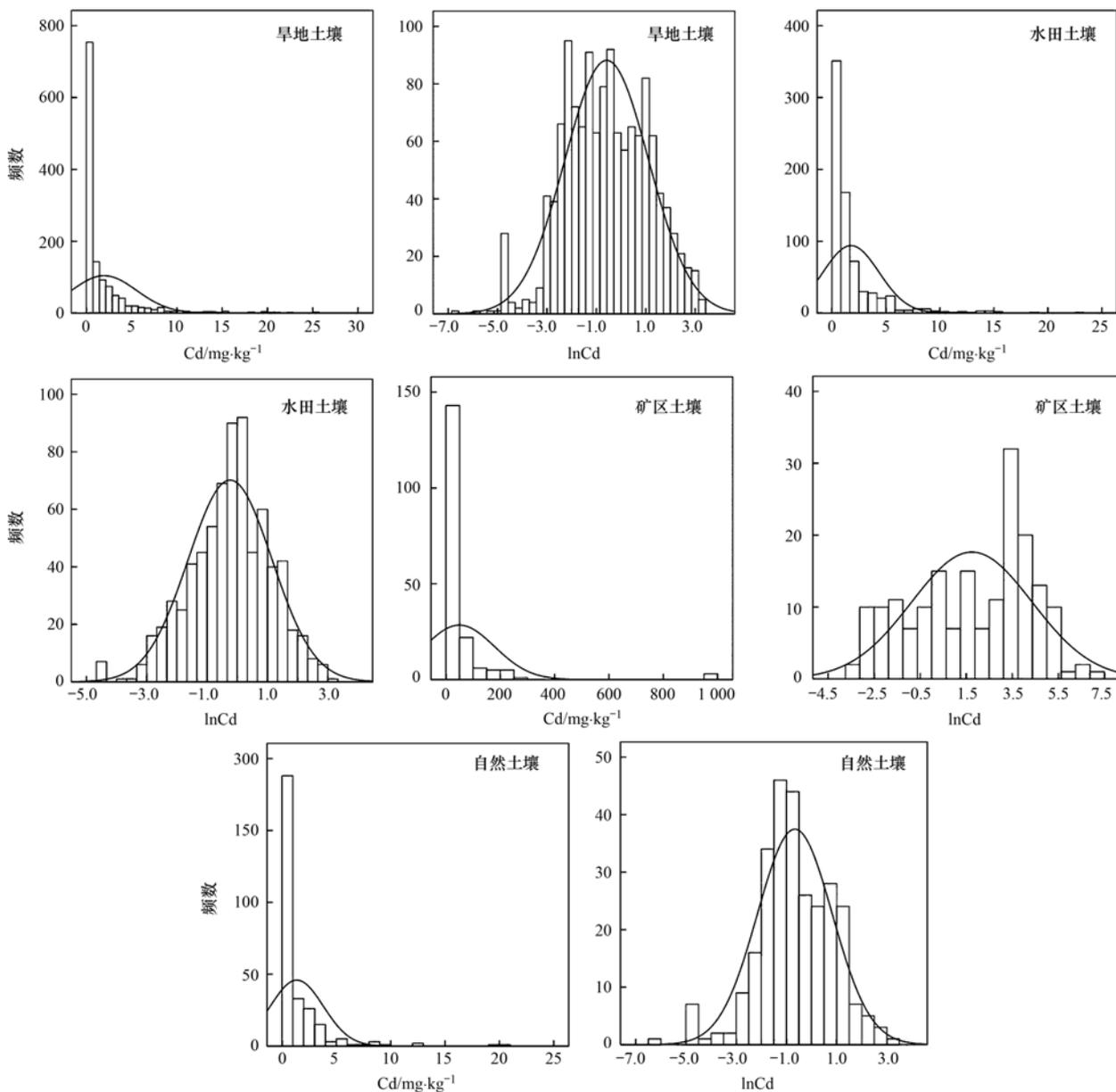


图3 不同类型土壤镉含量及对数转换后频数分布

Fig. 3 Distribution of cadmium in different types of soils and the frequency distribution after logarithmic conversion

查样本量偏少;另一方面可能为本研究与前人研究时间相隔较远,而在此段时间内由于自然原因,导致Cd含量又有所积累.

2.2 矿区和农田土壤镉含量特征

经统计发现,各类型土壤镉含量呈偏态分布,经对数转换后均符合正态分布(图3),因此用几何均值来表征土壤镉含量大小.土壤Cd含量统计可知(表1),镉含量的最小值为 $0.001 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最大值达 $990.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,几何均值为 $0.726 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是自然土壤($0.514 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的1.43倍.四种类型土壤中以矿区土壤的镉含量最高,几何平均值为 $5.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,含量最高达 $990.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可能采

集的样品是尾砂或尾砂与矿区耕地土壤混合在一起的缘故.矿区土壤镉含量的标准差为4种土壤类型中最高的,达2.61,表明其含量分布极不均匀.以背景值与基线值为限定值,超标率分别为77.8%和71.4%.矿区的变异系数为2.64,属于强变异程度,为4种类型土壤中最高,说明西江流域矿区土壤镉含量受到了外界干扰因素.

旱地土壤和水田土壤中镉含量几何平均值分别为 $0.559 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.787 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,镉含量范围分别为 $0.001 \sim 25.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.002 \sim 22.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,农田土壤的几何标准差较小,表明农田土壤样品镉含量的变异较小,镉含量水平普遍较

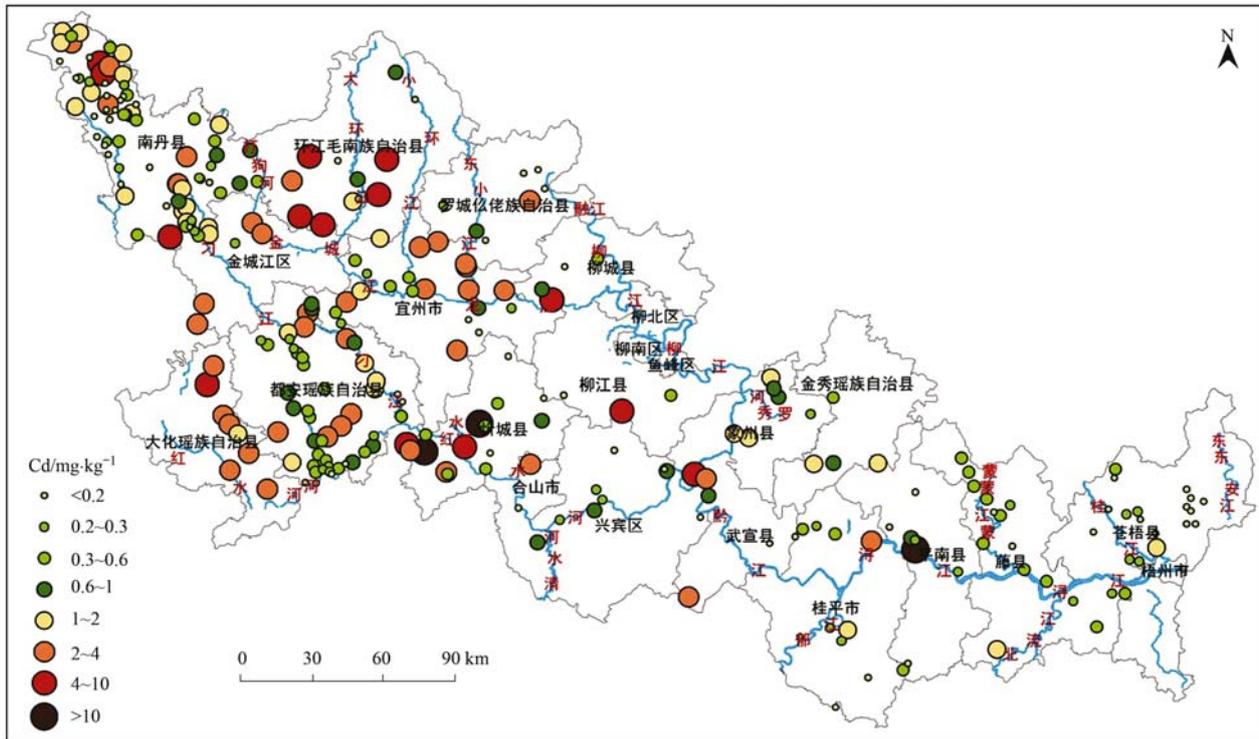


图4 西江流域自然土壤 Cd 含量等级化分布

Fig. 4 A sketch map showing the distribution of the different Cd contents in the natural soils of the Xijiang River drainage basin

高。可初步推断,农田土壤镉积累相对较多。以背景值为限定值,旱地土壤和水田超标率分别为 51.2% 和 66.7%;以基线值为限定值,超标率分别为 35.2% 和 39.6%,由此可推断西江流域部分农田土壤存在镉积累。旱地土壤和水田土壤的变异系数都大于 1,属于强变异,说明农田土壤样本存在高镉含量区域。经独立样本 T 检验,矿区土壤、水田土壤的镉含量均显著高于西江流域土壤镉背景值(矿区土壤, $P < 0.01$; 水田土壤, $P < 0.01$),表现出较明显的积累趋势;旱地土壤、矿区土壤的镉含量与水田土壤有显著差异(旱地土壤, $P < 0.01$; 矿区土壤, $P < 0.01$);旱地土壤镉含量与矿区土壤也有显著差异($P < 0.01$),这 3 种土壤类型中均有积累现象。

总体上,各类型土壤 Cd 含量均有一定的差别,都表现出一定变异程度,其中矿区土壤镉含量变异系数最大。河池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、大化县等以及来宾的武宣县等地区,这些地方富含铅锌矿及伴生镉矿,加上分布密集的铅锌冶炼行业企业等。说明西江流域土壤镉含量受到了矿业活动等外界干扰因素,农田土壤、矿区土壤中表现出一定程度的镉积累,其可能导致的食品安全问题更

值得关注。

2.3 土壤重金属镉空间分布及污染特征

2.3.1 镉含量空间分布

由于土壤是一个不均匀、具有高度空间变异的混合体,采集的土壤样本不能代表整个区域的土壤,仅能代表样本点本身的土壤质量状况,而利用 ArcGIS 软件结合 Kriging 插值法可以直观地了解研究区重金属污染风险的分布^[21]。通过对比,土壤镉含量选用高斯模型进行克里格插值^[22],得到含量分布图(图 5)。

西江流域土壤 Cd 含量整体分布特点为:由上游至中、下游方向土壤 Cd 含量呈总体递减趋势,且流域上游 Cd 含量显著高于其他区域($P < 0.05$)。西江流域土壤 Cd 含量总体大于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中上游的一半地区的镉含量主要集中在 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高 Cd 含量区集中在与南丹大厂车河矿区、刁江流域都安段—忻城段、柳江县及大化与都安相夹的区域,最高值达到 $990.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;流域中下游土壤除象州县和武宣县的部分地区 Cd 含量在 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之外,其余 Cd 含量 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。总体上,Cd 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,以上游的河池地区最为突出,南丹县大厂、车河地区高值样点

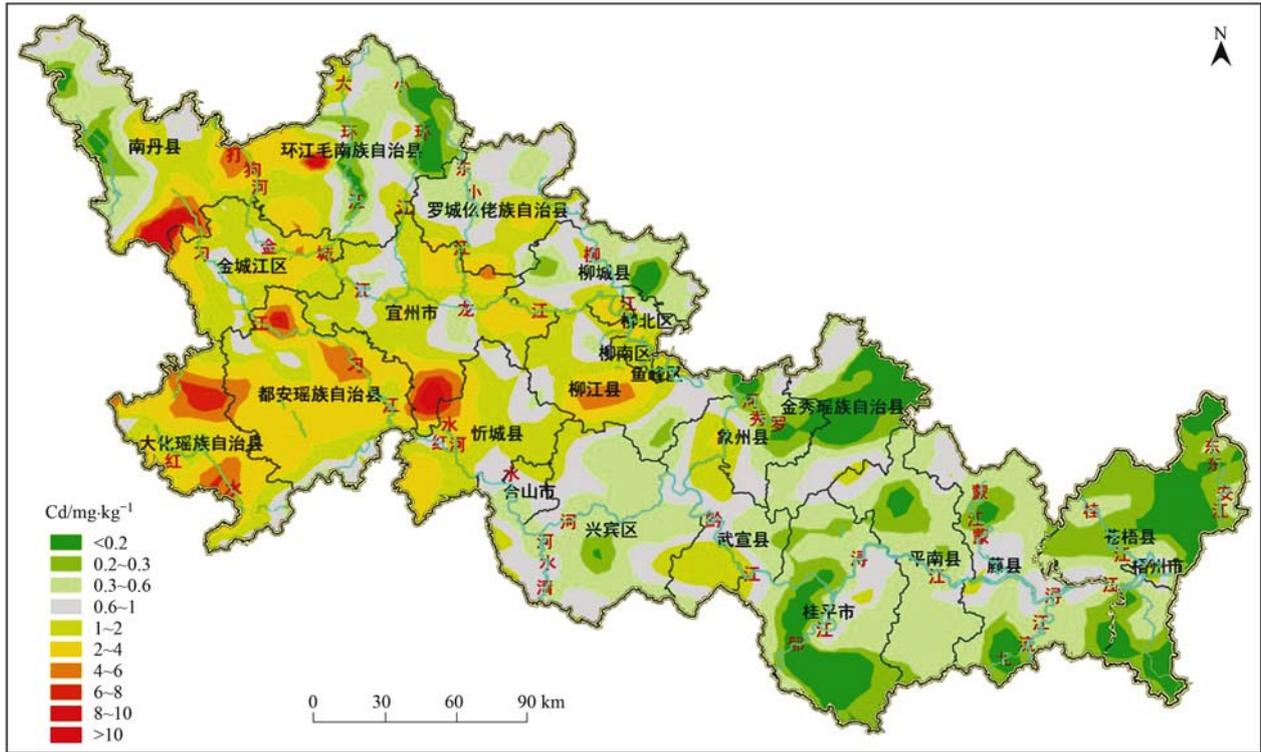


图 5 广西西江流域土壤 Cd 含量空间分布

Fig. 5 Geographical distribution of Cd contents in the Xijiang River drainage basin in Guangxi

最为密集.

2.3.2 土壤镉单项污染指数空间分布

基于土壤基线值($1.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)绘制土壤镉单项污染指数空间分布图(图 6)可知,西江流域上游

地区的 Cd 污染问题比较严重,中下游 Cd 污染不突出.河池地区的南丹县、环江县、金城江区、都安县、大化县和宜州市,以及柳州和忻城县都出现了中度-重度 Cd 污染,尤其这些地方的部分地区, P_i

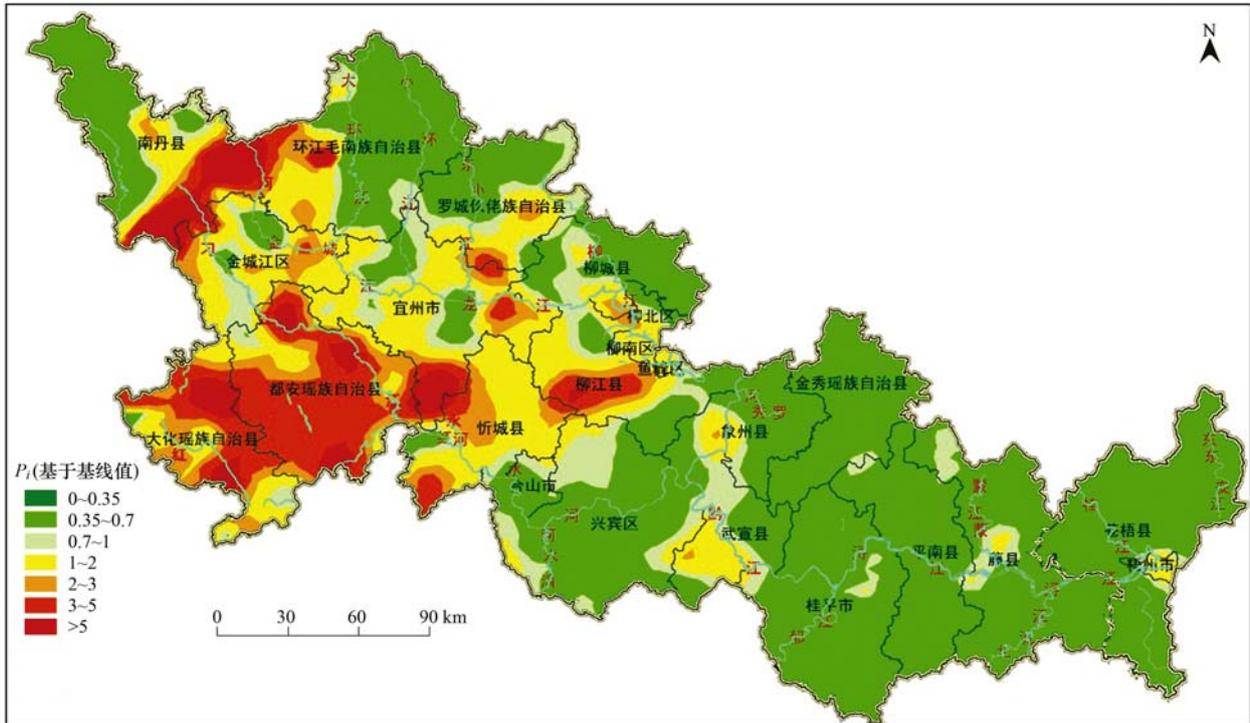


图 6 广西西江流域土壤 Cd 单项污染指数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of single pollution index of soil Cd in the Xijiang River drainage basin in Guangxi

>5, 为极重度 Cd 污染, 且污染面积较大. 象州县和武宣县的部分地区也出现了轻度 Cd 污染, 这不仅因为武宣县和象州县集中了铅锌矿及其伴生矿, 而且与土壤镉背景值(图 4) 比较高有关. 翟丽梅等^[23] 的研究也证明了, 西江流域高 Cd 农田污染地区主要分布在上游矿业活动密集的 0~80 km 区域内, 土壤 Cd 含量显著高于其他区域($P < 0.05$). 由此可推断, 广西河池市的重金属污染在长期的矿山开采、冶炼、加工以及工业化进程中累积形成, 土壤 Cd 污染问题日趋严峻, Cd 污染事件呈高态势.

2.3.3 土壤镉的地累积指数

以土壤类型对西江流域土壤 Cd 累积状况进行分析. 西江流域镉背景值为 $0.514 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 因此, 由 I_{geo} 表达式可推算出各类型土壤的地累积指数(表 2). 统计分析可知, 除自然土壤外, 其他三类土壤的地累积指数平均值为 $-0.01 < 0$, 即处于无污染级别的土壤约占 50%, 而约 27% 的土壤点处于中-强度污染之间. 具体来看, 有 42.3% 的矿区土壤样点表现为极强污染级别, 农田土壤镉累积程度在强度以上的土壤约占 7%. 除自然土壤所有样点外, 旱地、矿区、水田土壤分别有 57.9%、25.9% 和 45.6% 的样点污染指数处于 0 级别, 为无污染. 总体来看, 对于农田土壤, 约 70% 的土壤处

于无-轻度累积级别, 而 30% 的土壤处于中-强累积程度之间; 而对于矿区土壤, 约 60% 的土壤属于强度累积以上, 10% 土壤处于轻-中度累积. 因此, 其利用土壤类型的特殊性及其可能导致的种植物安全问题需要进一步的关注.

表 2 土壤镉含量地累积指数结果/%

I_{geo}	地累积程度	旱地土壤	矿区土壤	水田土壤
<0	无	57.9	25.9	45.6
0~1	轻-中	11.6	5.9	24.0
1~2	中度	12.7	5.9	14.0
2~3	中度-强度	9.4	9.2	11.2
3~4	强度	5.4	4.3	3.7
4~5	强度-极度	2.7	6.5	1.5
5~10	极强	0.3	42.3	0

以县级行政区为单位, 对西江流域土壤 Cd 累积状况进行评价(图 7). 不难发现, I_{geo} 大于 0 的地区分布在市一级的行政区域及矿业活动密集区, 如河池的部分地区累积程度比较严重, 刁江流域所在的南丹县、都安县和大化县都出现了强度累积以上, 特别是南丹县的南部出现极强累积程度, 而环江所在的环江县、宜州市的土壤样点介于轻度-中度-强度污染之间. 正如宋书巧等^[9] 的研究表明, 受上游矿山开发的影响, 刁江沿岸存在明显的 As、Pb、Zn、Cd 复合污染带, 其污染区与洪水淹没区呈

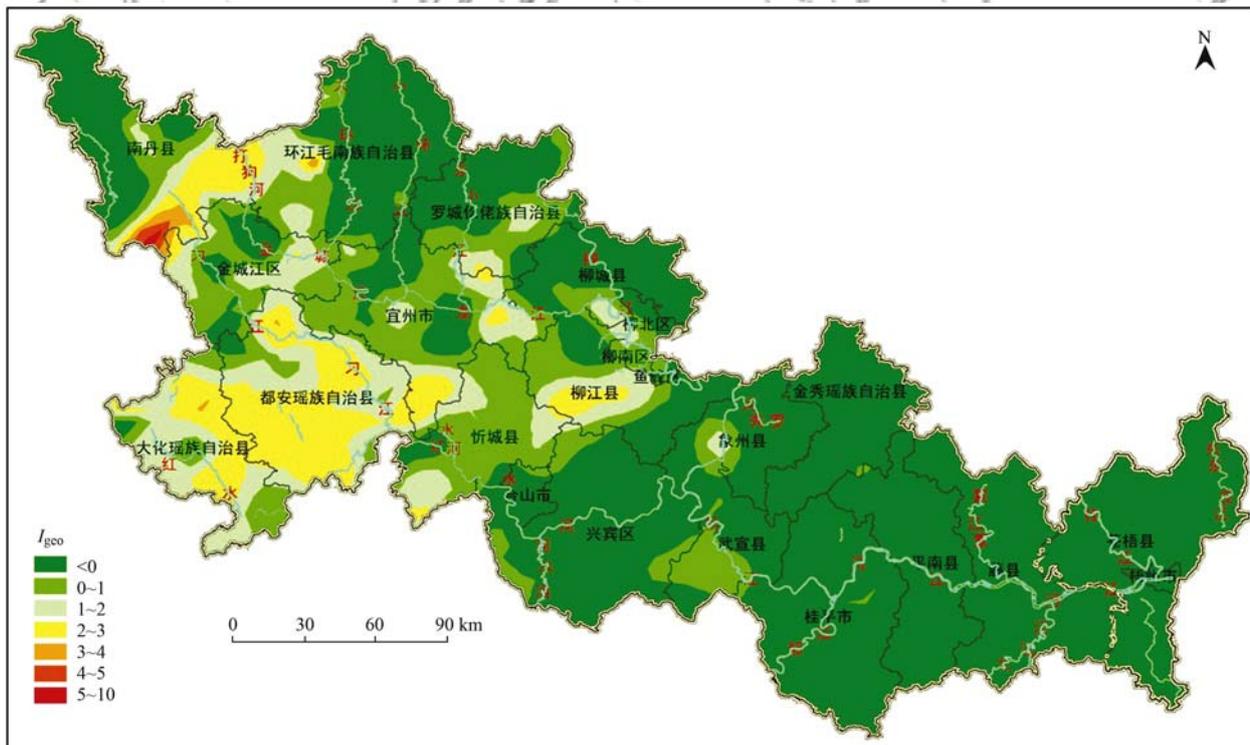


图 7 广西西江流域土壤 Cd 地累积指数空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of accumulation index of soil Cd in the Xijiang River drainage basin in Guangxi

现高度的一致性. 唐成等^[24]的研究表明, 大环江两岸农田 Cd 污染问题突出. 柳州市的柳北和柳南区有轻微累积现象, 柳江县有轻微-轻度-中度-强度累积现象, 以及来宾市的忻城县的大部分地区处于轻微累积, 只有小部分处于轻-中度累积. 西江流域其余部分, 除了象州县和武宣县出现轻微累积现象, 剩下的都处于无 Cd 累积现象. 总体上, 西江流域的 Cd 累积比较严重的是河池地区的南丹县、都安县、宜州市和大化县, 以及柳州市的柳江县和罗城县的小部分区域, 其余地区基本上无 Cd 累积.

2.3.4 土壤镉的潜在生态风险系数

根据 E_n^i 表达式计算出矿区土壤及农田土壤镉的潜在生态风险系数, 基于 GIS 工具可得出其空间分布(图 8). 可知, 西江流域下游地区基本上处于

低潜在生态风险($E_n^i < 40$), 除了武宣县、象州县的部分地区出现中-中高潜在生态风险($40 < E_n^i < 160$), 可推断密集的涉重工业分布和有色金属矿业活动加强了对土壤 Cd 的积累. 而西江流域上游大部分地区都处于中高等潜在生态风险以上, 如柳州市的罗城县和柳江县出现了中高等-高等潜在生态风险($80 < E_n^i < 320$), 特别是河池大部分地区的潜在生态风险系数处于 160~320, 尤其是南丹县南部的大厂、车河, 都安、大化以及宜州市的南部处于极高潜在生态风险($E_n^i > 320$), 特别注意的是南丹县、都安县以及大化县的个别地区潜在生态风险近达上万以上, 由此可推断, 长期的矿山开采以及密集的涉重金属的开发和冶炼, 造成河池地区土壤生态状况不容乐观.

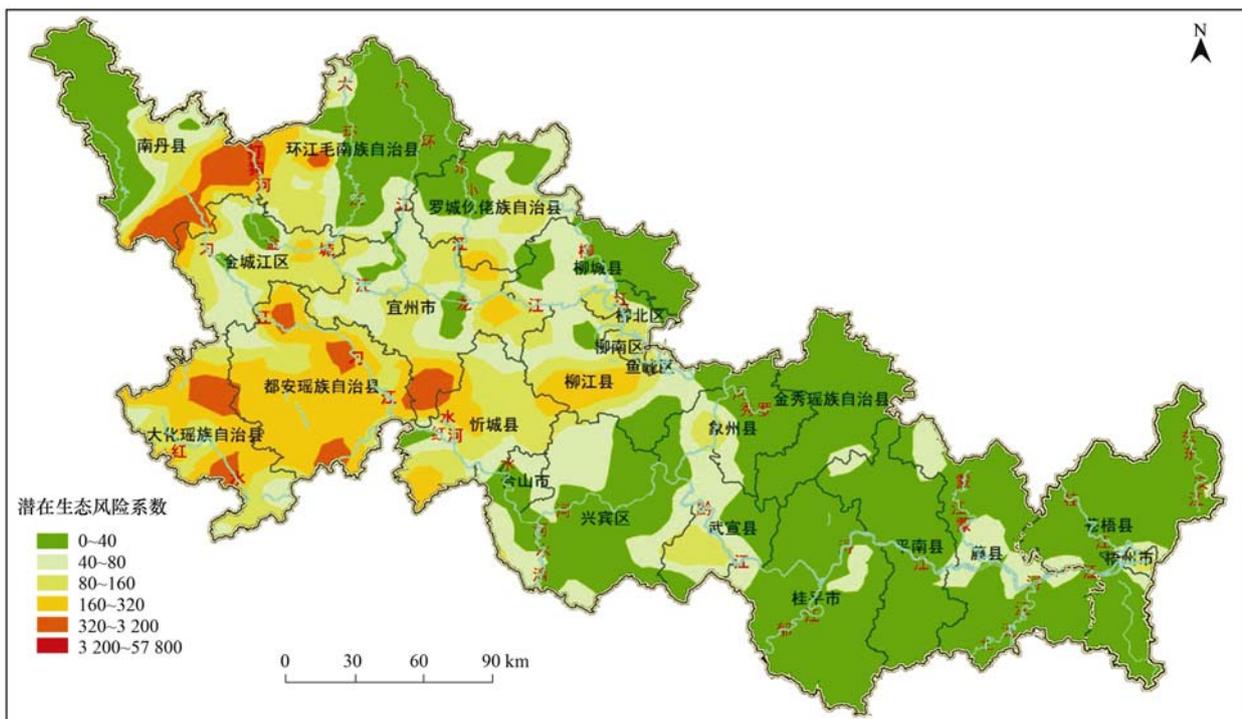


图 8 广西西江流域土壤 Cd 潜在生态风险系数空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the potential ecological risk coefficient of soil Cd in the Xijiang River drainage basin in Guangxi

3 讨论

3.1 镉污染成因分析

环境中镉的来源可能会受到自然以及人为因素的影响. 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^[25]. 由 Cd 背景值等级分化图不难发现, 西江流域 Cd 总体含量为 $0.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 河池地区, 柳州地区土壤镉背景值较高. 如前所述, 广西岩溶地区普遍存在高背景镉异常区的情况, 据前期调查发现, 自然地理环境

下有的地区土壤中镉浓度达 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[17] 以上. 西江流域有着丰富的金属矿, 位于桂西北地区的丹池成矿带, 是我国南方一条重要的北西向有色金属成矿带^[26, 27], 产于走向北偏东、向东倾斜的两条正断层控制的上、下盘的东岗岭组和“北山礁”礁顶白云岩带中的环江县北山铅锌黄铁矿矿床^[28, 29], 广西武宣县六峰山铅锌矿床发现了 10 多个铅锌矿体, 探获铅锌资源量达中型矿床规模等等^[30]. 可见, 由于成土母质等对土壤镉含量的影响, 导致镉背景值含量异常高, 而我国现行标准没有针对不同地区的

特点进行区别对待,不足以反映研究区真实的镉污染状况;从样点类型与县级行政区为单位,对西江流域土壤镉含量分布、单项污染指数、地累积指数状况进行评价,不难发现,污染区主要集中在河池地区的南丹县、环江县、金城江区、都安县、大化县和宜州市,以及柳州和忻城县,还有象州县和武宣县,这些地区都主要集中在刁江流域和环江流域,加之广西全区 87% 的采选冶企业分布在河池市(表 3),其中又主要聚集在广西河池的南丹、环江和金城江区三个地区,由此,密集的矿业开采活动和 Cd 重金属的开发和冶炼等矿业活动对镉含量显著升高有着极大的主导作用. 西江流域的刁江^[10]流域农田和环江^[28]流域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. 这与河段内含 Cd 污染物通过农业灌溉和洪水这两个途径进入了当地土壤有关,矿业活动由此引起更大范围的土壤 Cd 超标问题. 综上所述,广西土壤成土母质中本底镉含量较高,另外,广西矿产资源十分丰

表 3 广西重金属污染重点防控区企业数量

Table 3 Number of enterprises in the key heavy pollution control area in Guangxi

序号	地区	采选业	冶炼业	合计
1	河池南丹县	45	7	52
2	河池金城江区	15	16	31
3	河池环江县	14	7	21
4	柳州	5	2	7
5	钦州	3	0	3
6	来宾	1	5	6
7	百色	0	8	8
8	梧州	1	1	2
9	贺州	1	2	3
10	桂林	0	1	1
11	玉林	1	0	1
12	崇左	1	0	1
	合计	87	49	136

表 4 西江流域部分地区土壤-农作物 Cd 含量

Table 4 Cadmium content in soil-crops from part of the Xijiang River Basin

地区	土壤			农作物	
	类型	Cd/mg·kg ⁻¹	E_n^i	类型	Cd/mg·kg ⁻¹
刁江沿岸 ^[9]	水稻土	4.98	290	大米	1.180
	玉米地	4.98	290	玉米	0.078
	桑叶地	31.6	1844	桑叶	0.1
环江尾砂库溃坝影响区 ^[36]	农田土壤	0.270 ~ 185.1	15.75 ~ 10 803	叶菜	0.001 ~ 0.521
				根茎	0.001 ~ 0.521
				瓜果	0.001 ~ 1.322
南丹矿区周边 ^[37]	矿区	0.200 ~ 958.0	11.67 ~ 55 914	大米	0.013 ~ 0.056 3
				玉米	0.001 ~ 0.521
				蔬菜	0.000 ~ 1.066

富,西江流域上游矿产资源的不合理开采及“三废”的排放等导致污染物随河流而迁移,是造成土壤镉污染的一个重要原因.

3.2 镉污染风险

Cd 污染主要集中在西江流域的上游地区,特别是南丹县、都安县、大化县、环江县和宜州市,以及柳州的柳江县和柳北县,Cd 含量普遍高, $P_i > 3$,为重度污染,属于强地累积程度.在矿山开采的过程中,产生诸多的环境污染问题,矿业“三废”的排放和生产管理严重地影响到周边的生态环境和生活环境,特别是矿区周边的农田更容易受到重金属污染,进而直接危害到居民的健康安全.自 1968 年日本将“骨痛病”列为镉危害引起的公害病之后,其安全摄入问题引起世界关注. Cd 移动性强,与其他重金属污染物相比更容易进入植物体^[4],镉通过食物链途径会在食物链末端积累达到较高浓度^[31].食物是人体摄入镉的主要来源,不同农作物对镉的吸收能力有较大差别,但是蔬菜、稻米相对能够富集更多的镉^[32, 33].本课题组前期调查研究发现,西江流域土壤 pH 范围为 6 ~ 7.李志博等^[34]结合土壤总 Cd 和土壤 pH 应用多元回归分析建立了稻米 Cd 含量的预测模型, pH 分别为 6、7 时土壤 Cd 的临界值分别为 0.79 mg·kg⁻¹、1.49 mg·kg⁻¹,而本研究中, Cd 含量大于 1.49 mg·kg⁻¹ 的农田土壤和矿区土壤约占比例分别为 30% 和 60%,对于这部分土壤的水稻可能会给当地居民带来健康风险.

李泽琴等^[35]的研究发现,土壤镉在潜在生态风险模式中,属于多种重金属生态风险的突出型,危害最为严重.西江流域上游的河池大部分地区的平均潜在生态风险在 320 左右,属于高等潜在生态风险系数,长此以往势必会对农作物、人类产生毒害作用.已有研究中西江流域部分地区土壤-农作物中含镉量(范围)分别见表 4.

一般来说,蔬菜中镉含量与土壤中镉含量呈正相关显著关系,不同蔬菜种类对Cd的富集能力不同,且发现叶菜类和茄果类的富集能力最强,其次为根茎类、葱蒜类、瓜类、豆类^[38, 39]。由表4可知,对于Cd含量比较高的土壤,植物的镉富集含量也相对较高。根据《食品中污染物限量》(GB 2762-1995),瓜果类、根茎类蔬菜、叶菜及其他蔬菜中含镉含量限值分别为0.1、0.1、0.2、0.05 mg·kg⁻¹,可知部分农作物已超标。翟丽梅等^[23]的调查可知,距上游矿区0~80 km流域范围内的水稻籽粒Cd的含量对该区域人体健康存在严重风险,人体Cd摄入量的均值已达454 μg·(人·d)⁻¹,而人体每天Cd摄入量的安全量应该保持在30 μg·(人·d)⁻¹以下^[40],因此长期摄入当地Cd含量超标的大米会对人体健康产生严重危害。因此,西江流域典型的镉污染区(河池地区的南丹、大化、都安、环江)周边农作物受到明显的镉污染,而生活在Cd污染区域内人群使用本地生产的粮食、蔬菜等作物对人体健康存在潜在危害。

矿产资源开采过程中,暴露于地表的含镉废石、尾砂及冶炼废渣在地表风化、淋滤,被活化的镉以各种形式逸散到周围环境中。生活在矿区及周边地区的居民接触重金属的途径很多,无意的经口摄入和皮肤接触被污染的土壤,以及吸入污染的扬尘这3种途径也是重金属进入人体的重要途径^[41],其中对于儿童而言,通常以经口摄入的重金属总量最大。余元元等^[37]的研究发现,南丹县大厂镇和车河镇公路两旁的灰尘对长期生活在道路两旁的居民存在较大的健康风险,对于喜欢在公路两旁玩耍的儿童尤为严重。摄入或吸入过量的镉会对人体的免疫系统、泌尿系统、骨骼、神经系统、生殖系统等造成损伤,同时镉还具有较强的致癌、致畸、致突变的作用^[42]。本研究中,Cd含量积累最为显著的是矿区土壤,尤其是居住在矿业密集区或金属冶炼、加工企业等周边地区,污染途径广,人群流量大,交通密集,暴露风险远远大于其他地方,应引起当地居民和相关部门的高度重视。建议对土壤镉含量较高的上游地区,减少暴露在空气中的土地面积,避免产生扬尘。

总体上,镉污染风险主要在镉矿、铅锌矿等伴镉矿相对丰富及采选冶活动较密集的河池地区的南丹县、大化县、都安县、环江县和宜州市,以及柳江县、武宣县和象州县等地区,应对这些区域的镉污染威胁予以重点关注,可通过种植镉超积累植物

并辅以农艺措施进行镉污染土壤植物修复;还可通过施用改良剂,降低土壤镉的生物有效性,减少从镉向农作物转移,从而降低土壤镉污染的潜在风险。

4 结论

(1) 西江流域土壤镉的背景值为0.51 mg·kg⁻¹,分别是前人研究结果(0.148 mg·kg⁻¹)和广西土壤背景值(0.267 mg·kg⁻¹)的3.4倍和1.9倍。

(2) 旱地、水田、矿区土壤镉含量分别为0.56、0.79、5.71 mg·kg⁻¹,显著高于自然土壤镉含量,以西江流域土壤镉的背景值和基线值为限定值,超标率分别为51.2%、66.7%、77.8%和35.2%、39.6%、71.4%,矿区土壤和农田土壤都有明显的镉积累趋势。

(3) 从土壤镉空间分布及污染特征来看,西江流域总体土壤镉含量为0.73 mg·kg⁻¹,高含量镉地区主要集中西江流域上游河池地区的南丹县、大化县、都安县、环江县和宜州市,以及柳江县、武宣县和象州县等地区,出现了重度甚至极重度污染、中等-强污染累积程度和高等-极高等潜在生态风险。总体上,广西西江流域上游地区的农业土壤、矿区土壤Cd污染问题突出,土壤生态状况不容乐观,这主要与上游矿业密集区的矿业活动密切相关,可能对长期居住在矿区及周边地区的居民产生潜在风险,建议进一步通过土壤-植物-人体体系展开镉风险评估,同时采取相应措施以控制风险。

参考文献:

- [1] 陈怀满,林玉锁,韩凤祥,等.土壤-植物系统中的重金属污染[M].北京:科学出版社,1996.253.
Chen H M, Lin Y S, Han F X, et al. Heavy metal pollution in soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996. 253.
- [2] 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,1987.107-110.
- [3] Bi X Y, Feng X B, Yang Y G, et al. Quantitative assessment of cadmium emission from zinc smelting and its influences on the surface soils and mosses in Hezhang County, southwestern China [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(22): 4228-4233.
- [4] Satarug S, Baker J R, Urbenjapol S, et al. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population[J]. Toxicology Letters, 2003, 137(1-2): 65-83.
- [5] Simón M, Ortiz I, Garcí I, et al. Pollution of soils by the toxic spill of a pyrite mine (Aznaolcollar, Spain) [J]. Science of the Total Environment, 1999, 242(1-3): 105-15.
- [6] 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,2013.26-38.
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. 26-38.
- [7] 王德光, 宋书巧, 蓝唯源, 等. 环江县大环江沿岸土壤重金属污染特征研究[J]. 广西农业科学, 2009, **40**(3): 280-283.
Wang D G, Song S Q, Lan W Y, *et al.* Characteristics of heavy metals pollution in soils along riverside of Huanjiang river[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2009, **40**(3): 280-283.
- [8] 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.
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.
- [9] 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.
- [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] USEPA. Risk-based concentration table [R]. Washington DC: USEPA, 2000. 165.
- [12] Cheng J L, Shi Z, Zhu Y W. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(1): 50-54.
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [14] 李雪华. 镉矿区沉积物生态风险评估及修复技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
LI X H. Ecological risk assessment on sediments in Sb-mining area and development of restoration technology [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [15] 陈同斌. 区域土壤环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [16] 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.
- [17] 吴玉峰. 广西典型高背景镉地区的生态风险评估[D]. 南宁: 广西师范学院, 2016. 211.
Wu Y F. Ecological risk assessment of the typical high cadmium background in Guangxi [D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 2016, 211.
- [18] 谢学锦, 程志中, 张立生, 等. 中国西南地区 76 种元素地球化学图集[M]. 北京: 地质出版社, 2008. 104.
- [19] 国家环境保护局, 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.
- [20] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. 中国环境监测, 1991, **7**(1): 1-6.
- [21] 钟雪梅, 于洋, 陆素芬, 等. 金属矿业密集区广西南丹土壤重金属含量特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(9): 1694-1702.
Zhong X M, Yu Y, Lu S F, *et al.* Evaluation of heavy metal contamination in soils in mining-intensive areas of Nandan, Guangxi[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(9): 1694-1702.
- [22] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 405.
- [23] 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.
- [24] 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估[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.
- [25] 苏春田, 唐健生, 潘晓东, 等. 不同地质条件下土壤重金属质量评价比较[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(4): 25-28.
Su C T, Tang J S, Pan X D, *et al.* Evaluation comparison of heavy metals quality in soil in difference geological conditions [J]. Environmental Monitoring in China, 2012, **28**(4): 25-28.
- [26] 范森葵. 广西大厂锡多金属矿田地质特征、矿床模式与成矿预测[D]. 长沙: 中南大学, 2011. 23.
Fan S K. The geological characteristics, genesis and metallogenic prediction of Dachang Tin-Polymetallic Ore Field, Guangxi [D]. Changsha: Central South University, 2011. 23.
- [27] 唐龙飞. 广西大厂铜坑矿床深部铋铜矿成矿规律研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014. 4-5.
Tang L F. Study on metallogenic regularity of zinc-copper ore in Tongkeng Deposit, Dachang, Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2014. 4-5.
- [28] 孙邦东, 潘其云. 广西环江县北山铅锌黄铁矿床发现史[J]. 广西地质, 1994, **7**(3): 69-73.
Sun B D, Pan Q Y. The Discovery Beishan of Beishan Pb-Zn pyrite deposit in Huanjiang County, Guangxi [J]. Gangxi Geology, 1994, **7**(3): 69-73.
- [29] 谢世业, 陈大经, 辛厚勤, 等. 广西环江县北山地区喷流沉积铅锌矿资源潜力及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2004, **18**(3): 217-219.
Xie S Y, Chen D J, Xin H Q, *et al.* Mineralization potentiality and prospecting direction for lead-zinc deposit of Sedimentation-Exhalation in Beishan Region, Huanjiangxian, Guangxi [J]. Mineral Resources and Geology, 2004, **18**(3): 217-219.
- [30] 李巍, 黄大放. 广西武宣县六峰山铅锌矿床地质特征及找矿远景[J]. 南方国土资源, 2006, (8): 32-33, 36.
- [31] 杨惠芬, 李明元, 沈文. 食品卫生理化检验标准手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997. 126.
- [32] Watanabe T, Zhang Z W, Qu J B, *et al.* Background lead and cadmium exposure of adult women in Xian City and two farming villages in Shaanxi Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2000, **247**(1): 1-13.
- [33] Ishihara T, Kobayashi E, Okubo Y, *et al.* Association between cadmium concentration in rice and mortality in the Jinzu River

- basin, Japan[J]. *Toxicology*, 2001, **163**(1): 23-28.
- [34] 李志博, 骆永明, 宋静, 等. 基于稻米摄入风险的稻田土壤镉临界值研究: 个案研究[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(1): 76-81.
- Li Z B, Luo Y M, Song J, *et al.* Critical values for Cd in paddy field based on Cd risk of rice consumption: a case study[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(1): 76-81.
- [35] 李泽琴, 侯佳渝, 王浆臻. 矿山环境土壤重金属污染潜在生态风险评价模型探讨[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(5): 509-516.
- Li Z Q, Hou J Y, Wang J Z. Potential ecological risk assessment model for heavy metal contamination of agricultural soils in mining areas[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(5): 509-516.
- [36] 陆素芬, 宋波, 蒙冬柳, 等. 环江尾砂库溃坝影响区农田土壤和蔬菜中重金属含量测定与健康风险评价[J]. *环境工程*, 2015, **33**(10): 130-134.
- Lu S F, Song B, Meng D L, *et al.* Heavy metal contents in soil and vegetables of a tailing spill in Huanjiang and human health risks assessment [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(10): 130-134.
- [37] 余元元, 黄宇妃, 宋波, 等. 南丹县矿区周边土壤与农产品重金属含量调查及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2015, **34**(11): 2133-2135.
- Yu Y Y, Huang Y F, Song B, *et al.* Investigation on heavy metal content and health risk assessment of soil and agricultural products in Nandan County Mining Area [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(11): 2133-2135.
- [38] 陈红亮, 龙黔, 谭红. 贵州北部菜地土壤镉含量与蔬菜镉污染的关系[J]. *四川农业大学学报*, 2011, **29**(3): 342-345, 352.
- Chen H L, Long Q, Tan H. On the relation of cadmium concentration in vegetable soil to cadmium contamination in vegetables of Northern Guizhou [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2011, **29**(3): 342-345, 352.
- [39] 郭海涛. 不同蔬菜吸收积累镉的差异研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009. 225.
- Guo H T. Differences of absorption and accumulation of cadmium by vegetables [D]. Beijing: Capital Normal University, 2009. 225.
- [40] Tripathi R M, Raghunath R, Krishnamoorthy T M. Dietary intake of heavy metals in Bombay city, India[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **208**(3): 149-159.
- [41] 谢华, 刘晓海, 陈同斌, 等. 大型古老锡矿影响区土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险[J]. *环境科学*, 2008, **26**(12): 3503-3507.
- Xie H, Liu X H, Chen T B, *et al.* Concentration and health risk of heavy metals in vegetables and soils in region Affected by an Ancient Tin Ore [J]. *Environmental Science*, 2008, **26**(12): 3503-3507.
- [42] 苗亚琼, 林清. 广西土壤重金属镉污染及对人体健康的危害[J]. *环境与可持续发展*, 2016, **41**(5): 171-173.
- Miao Y Q, Lin Q. Pollution caused by heavy metal cadmium to the soil in Guangxi and its harm to human Health [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, **41**(5): 171-173.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamnox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)