

广西西江流域土壤 Sb 含量特征分布与污染评价*

杨子杰¹ 宋波^{1,2#} 王佛鹏¹ 张云霞¹ 庞瑞¹ 李葵¹ 周子阳¹

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘要 系统分析和评价了广西西江流域土壤 Sb 含量特征及污染状况。研究结果表明, 西江流域土壤 Sb 跨度大, 为 0.04~3 495.00 mg/kg, 上游地区的 Sb 含量显著高于下游。西江流域土壤 Sb 的背景值为 4.76 mg/kg, 显著高于广西 Sb 背景值(2.12 mg/kg); 矿区土壤、旱地土壤、水田土壤 Sb 分别为 546.00、6.65、2.38 mg/kg, 以《土壤环境质量标准》(15618—2008) 二级标准为限定值, 超标率分别为 81.4%、45.2%、15.1%。Sb 高值聚类区集中于南丹县的南部、刁江流域上游、都安县北部段、忻城县南部以及宜州市北部, 而上游地区的南丹县北部以及下游的黔江、浔江、蒙江主干流流经的地区及象州地区形成明显的低值聚类区; Sb 高值区主要集中在刁江流域的南丹县、都安县以及宜州市, 流域特征明显; 流域土壤样本 Sb 总体介于无污染至中度污染之间, 污染主要分布于河池地区的都安县、河池市以及南丹县, 这主要与上游的矿业活动和高背景 Sb 有关。

关键词 西江流域 土壤 Sb 污染评价

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.12.022

Content distribution of Sb and its pollution assessment in soils of Guangxi Xijiang River Basin YANG Zijie¹, SONG Bo^{1,2}, WANG Fopeng¹, ZHANG Yunxia¹, PANG Rui¹, LI Li¹, ZHOU Ziyang¹. (1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin Guangxi 541004)

Abstract: The soil Sb distribution and its pollution status in Xijiang River Basin of Guangxi were analyzed in this study. Results showed that the Sb in Xijiang River Basin presented a large span with the concentration ranged 0.04-3 495.00 mg/kg. Sb content in upstream was significantly higher than that in downstream. The background value of soil Sb in Xijiang River Basin was 4.76 mg/kg, which was significantly higher than that of Guangxi (2.12 mg/kg). The concentration of Sb in mining soil, dryland soil and paddy soil was 546.00, 6.65 and 2.38 mg/kg, respectively. According to class II of "Environmental quality standard for soils" (GB 15618-2008), 81.4%, 45.2% and 15.1% of mining soil, dryland soil and paddy soil exceeded the national standard. The areas with high Sb cluster were distributed in the south of Nandan County, the upper reaches of the Diaojiang River Basin, the northern section of Du'an County, the southern part of Xincheng County and the northern part of Yizhou City. The areas with low Sb cluster were clustered near the northern part of Nandan County and the area the river downstream of Qianjiang, Xunjiang, Mongolia River trunk stream flowing through and Xiangzhou area. High Sb patches occurred in the upper reaches of Diaojiang River Nandan County, Du'an County and Yizhou City, and demonstrated clear basin characteristics. The concentration of Sb ranged from no pollution to medium pollution, and the pollution was mainly distributed in Du'an County, Hechi City and Nandan County of Hechi region, and was mainly attributed to the mining activities upstream and high geological background at local areas.

Keywords: Xijiang River Basin; soil; Sb; pollution assessment

Sb 是一种生物体非必须的、广泛分布于表生环境中的典型毒害重金属元素。自然界中 Sb 常以 Sb³⁺ 化合物的形式存在, 并与 As 的硫化物和氧化物共存^[1]。世界土壤 Sb 背景值为 0.2~10.0 mg/kg^[2], 我国土壤中 Sb 的背景值为 0.38~2.98

mg/kg^[3]。世界卫生组织(WHO)推荐的土壤 Sb 最大允许质量浓度为 3.5 mg/kg^[4]。由于 Sb 的广泛使用, 其对环境的污染和人体健康的危害逐渐显现, 被美国环保署和欧盟列为优先控制污染物^[5]。何孟常等^[6]对湖南 Sb 矿区调查发现, 土壤中 Sb 的质量

第一作者: 杨子杰, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 研究方向为区域环境调查与风险评估、污染土壤修复。* 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.41161056、No.41261082); 广西矿冶与环境科学实验中心资助项目(No.KH2012ZD004); 广西省科技成果转化与推广计划项目(桂科转 1599001-1)。

浓度高达 101~5 045 mg/kg,且稻田土壤 Sb 浓度高于旱地,植物中 Sb 浓度也较高。可见,了解矿区周边 Sb 污染状况十分必要^[7]。

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^[8-9]。由于流域性土壤的特殊性,对其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。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,导致流域上下游面临土壤重金属安全问题。目前,广西境内西江流域南丹、都安等地区的土壤 Sb 存在不同程度的 Sb 污染,但是针对整个西江流域土壤 Sb 含量的系统调查鲜有报道。为此,本研究对广西西江流域土壤 Sb 污染进行全面调查,通过掌握土壤 Sb 的含量特征及污染状况,以期对耕地土壤污染的有效防控和农作物的安全生产提供科学依据。

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的一部分,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,有 Pb-Zn、As、伴生 As、Mn、Cu、Sn、Sb 等矿石,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有 47 家,选矿厂 70 多家。Sb 矿是广西的优势矿产之一,主要分布于河池大厂—五圩一带(丹池成矿带)及桂西北隆林、西林等地,其矿石质量好,矿床规模较大^[10]。

根据矿业活动的密集程度将广西西江流域划分为上下游,上游主要为流经有色金属矿业活动密集的河池地区,主要的县市有南丹县、环江县、罗城县、柳城县、都安县、忻城县以及河池市和宜州市。下游为矿业活动比较少的地区,主要的县市有金秀县、象州县、武宣县、桂平县、平南县、藤县以及苍梧县和梧州市。上下游包括的河流有大小环江、金城江、龙江、刁江、红水河、打狗河、黔江、淘江等。广西重金属污染历史遗留问题突出,现有工矿企业污染源集中且排放量大,特别是河池地区,大部分冶炼企业周边土壤污染严重。

1.2 样品采集与分析

本次在西江流域上下游共采集土壤样品 1 344 个,采样点用全球定位系统(GPS)定位。根据土地利用方式,样品分为旱地土壤、水田土壤、矿区土壤

和自然土壤。参照调查区的土地利用分布、矿产分布和地形图,重点关注西江干流和主要支流两岸与周边区域,将受矿业活动影响相对集中的地区作为重点研究对象,采集距离矿区 1~2 km 以内或者矿业密集的乡镇等近矿区的农田土壤,包括旱地土壤样品 786 个和水田土壤样品 317 个;采集上游矿厂、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壤样品 43 个;于地势相对比较高、上风向处、远离人类工农业活动、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 198 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 Sb 背景值数据。土壤样品采样点分布见图 1。

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;其余土壤样品均为混合样品,从 10 m×10 m 的正方形 4 个顶点和中心共 5 个点 0~20 cm 土层等量采集样品,均匀混合。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。

采用王水消解蒸气发生—原子荧光光谱法测定样品中 Sb 含量。分析过程中加入土壤标准样品(GSS-4)和空白样进行质量控制,样品回收率均在 90%~110%,测定过程中所用试剂均为优级纯,所有用水均为超纯水。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

对不同类型土壤样品进行 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,非正态分布的数据用中位值表征。采用 ArcGIS 10.2 进行空间分析与空间聚类与冷热点分析,用 SPSS 19.0 进行正态分布统计检验、单样本 T 检验和独立样本 T 检验等。

1.3.2 空间聚类与冷热点分析方法

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显著性(0.05 水平)的空间异常值^[11]。如果某采样点的局部指数为正数且数值较高,则该采样点 Sb 含量与邻近的采样点有类似的

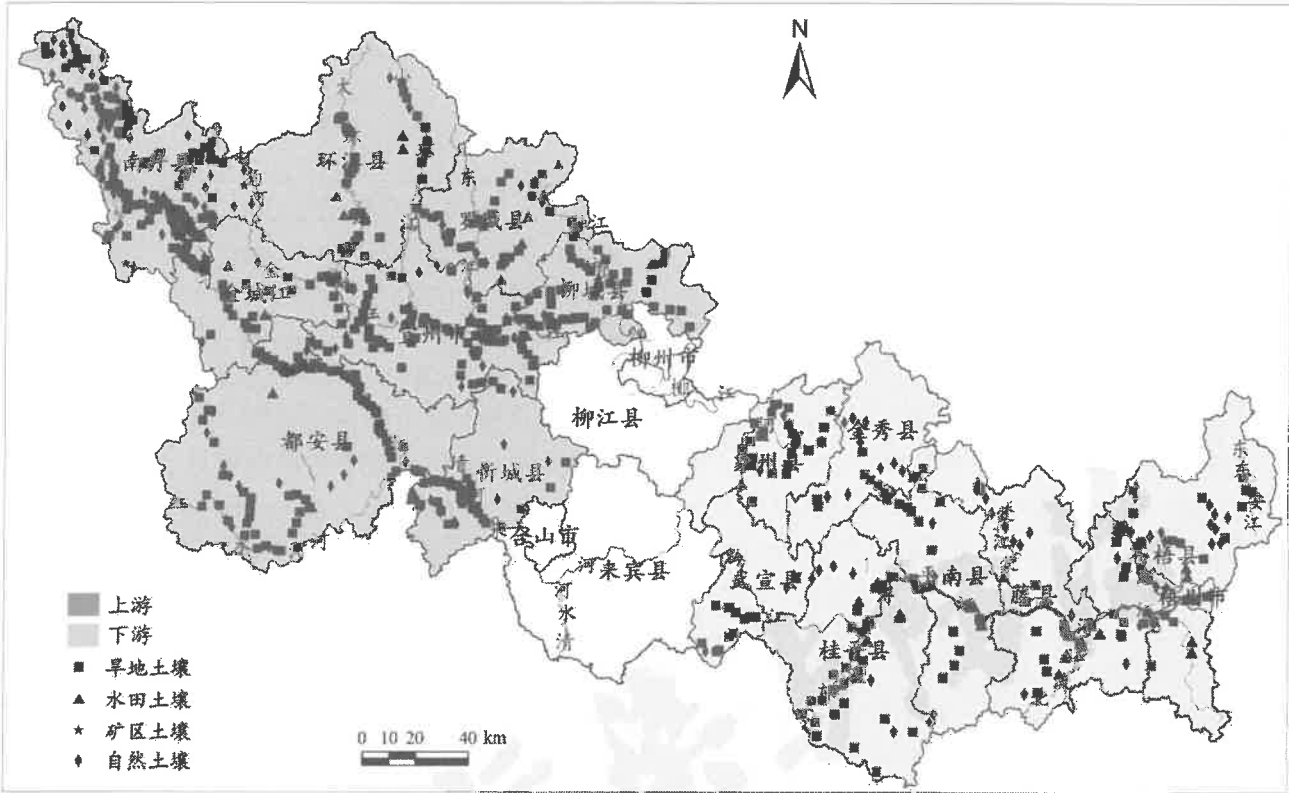


图1 土壤采样点分布

Fig.1 Sketch map of the soil sampling sites

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(H-H,热点)和低低值聚集(L-L,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离散(L-H)和高低值离散(H-L)。

1.3.3 土壤污染评价

采用地积累指数法对西江流域土壤Sb污染进行评价,该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。其表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{c_n}{1.5BE_n} \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为土壤Sb污染的地积累指数; c_n 为Sb实测质量浓度,mg/kg; BE_n 为Sb背景值,mg/kg。分级标准: $I_{geo} \leq 0$,无污染; $0 < I_{geo} \leq 1$,轻中度污染;

$1 < I_{geo} \leq 2$,中度污染; $2 < I_{geo} \leq 3$,中强度污染; $3 < I_{geo} \leq 4$,强度污染; $4 < I_{geo} \leq 5$,极强污染; $5 < I_{geo} \leq 10$,极严重污染。

以《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)中的二级标准限值(10 mg/kg)为指标,计算农田土壤(水田土壤和旱地土壤)和矿区土壤Sb的超标率。

2 分析与讨论

西江流域不同类型土壤及上下游土壤Sb统计分别见表1、表2。

由表1可知,西江流域土壤Sb跨度大,为0.04~3 495.00 mg/kg,平均值为40.70 mg/kg,几何均值为6.50 mg/kg,采样点超标率为37.3%。由表2可知,西江流域上游、下游土壤Sb质量浓度分别为0.04~3495.00、0.09~589.00 mg/kg,中位数

表1 不同类型的土壤Sb质量浓度统计
Table 1 Statistical results of Sb concentration in the soils under different lands

项目	分布类型	范围 /(mg·kg ⁻¹)	平均值±标准差 /(mg·kg ⁻¹)	中位数 /(mg·kg ⁻¹)	几何均值±几何标准差 /(mg·kg ⁻¹)	峰度	偏度	超标率 /%
自然土壤	对数正态	0.10~186.00	17.70±30.60	3.83	4.76±6.05	8.9	2.80	
旱地土壤	偏态	0.04~1 023.00	31.40±88.40	6.65	8.00±5.03	53.7	6.58	45.2
矿区土壤	原始正态	0.10~3 495.00	546.00±630.00	528.00	148.00±12.05	11.0	2.61	81.4
水田土壤	偏态	0.28~714.00	9.49±46.20	2.38	3.10±6.03	184.0	12.9	15.1
总计	偏态	0.04~3 495.00	40.70±162.00	4.45	6.50±5.62	175.0	10.70	37.3

表 2 西江流域上下游土壤 Sb 统计
Table 2 Statistical results of Sb in upstream and downstream of Xijiang River Basin

流域范围	分布类型	范围 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值士标准差 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	中位数 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	几何均值士几何标准差 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	超标率 /%
上游	偏态	0.04~3 495.00	54.00±189.00	7.27	9.28±5.68	45.6
下游	偏态	0.09~589.00	7.69±31.20	2.31	2.70±3.81	19.6

分别为 7.27、2.31 mg/kg,平均值分别为 54.00、7.69 mg/kg,几何均值分别为 9.28、2.70 mg/kg,超标率分别为 45.6%和 19.6%。独立样本 *T* 检验结果可知,上游土壤 Sb 含量显著高于下游,这与翟丽梅等^[12]对西江流域农田土壤 Cd 污染的调查结果类似,可推断出上游的土壤 Sb 积累程度大于下游。

2.1 西江流域土壤 Sb 背景值研究

环境中 Sb 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,其土壤重金属背景值会有所不同^[13]。近 30 年来,广西西江流域的上游河池等地区,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的土壤污染物背景值,合理评价土壤污染状况。基于此,本研究采集了 198 个自然土壤样品,进行西江流域上下游土壤 Sb 背景值研究。

由表 1 可见,自然土壤 Sb 为 0.10~186.00 mg/kg,土壤 Sb 含量经对数转换后呈正态分布,因此自然土壤 Sb 含量需用几何均值表征,因此西江流域土壤 Sb 背景值为 4.76 mg/kg,此外自然土壤 Sb 含量的变异系数为 1.73,属于强变异。根据数据分析,Sb 异常区主要分布在河池地区的南丹县、都安县、忻城县、宜州市以及河池市,这些地方都存在比较高的背景样点,且 Sb 梯度和浓度集中十分明显。西江流域有着丰富的金属矿,Sb 矿又主要分布于河池大厂—五圩一带(丹池成矿带),还有环江县北山铅锌黄铁矿矿床^[14]、广西武宣县六峰山铅锌矿床^[15]。可见,由于成土母质对土壤 Sb 含量的影响,导致 Sb 背景值异常高。而我国现行土壤标准没有针对不同地区的特点进行区别对待,不足以反映研究区的真实 Sb 污染状况。单样本 *T* 检验结果显示,西江流域土壤 Sb 背景值显著高于广西土壤 Sb 背景值(2.12 mg/kg^[16])、我国土壤 Sb 背景值(1.21 mg/kg^[17])。造成此差异的原因一方面由于前人所调查样本量偏少,另一方面可能是本次研究与前人研究的时间跨度较远,在自然原因条件下,导致 Sb 含量积累。

2.2 土壤 Sb 含量统计

从表 1 可知,水田土壤和旱地土壤 Sb 呈偏态分

布,矿区土壤 Sb 含量呈正态分布,因此用中位值和算术平均值分别表征农田土壤和矿区土壤 Sb 含量。4 种类型土壤中,矿区土壤的 Sb 质量浓度最高,最大值高达 3 495.00 mg/kg,平均值为 546.00 mg/kg,矿区土壤 Sb 几何标准差最高,为 12.05 mg/kg,可知矿区土壤 Sb 分布极其不均匀。采样点超标率达 81.4%,说明大部分矿区土壤存在 Sb 积累。

旱地土壤和水田土壤的 Sb 中位值分别为 6.65、2.38 mg/kg,质量浓度分别为 0.04~1 023.00、0.28~714.00 mg/kg。相对矿区土壤,农田土壤的几何标准差较小,表明 Sb 含量水平普遍较高。旱地土壤和水田土壤的超标率分别为 45.2%、15.1%,可初步推断,旱地土壤 Sb 积累相对较多。独立样本 *T* 检验显示,旱地土壤、水田土壤和矿区土壤 Sb 含量均显著高于自然土壤 Sb 含量,矿区土壤 Sb 含量显著高于农田土壤,旱地土壤与水田土壤也有显著差异,推断可知,旱地土壤、水田土壤和矿区土壤均有一定的 Sb 积累现象。

2.3 土壤 Sb 空间分布及污染特征

2.3.1 空间聚类与冷热点分析

由于原始数据 Sb 含量分布明显右偏,利用土壤原始 Sb 的对数值做空间冷热点分析(见图 2),不难发现,有 5 个区域存在明显的高值聚类,包括南丹县的南部、刁江流域上游、都安县北部段、忻城县南部以及宜州市北部。结合矿点分布可知,高值聚类区多分布于金属矿区周边,沿河流分布特征明显,加之广西全省 87%的采选企业分布在上游河池地区^[18],可见该地区土壤 Sb 含量受矿业活动及河流作用的双重影响,并明显受到地形因素的制约,污染的途径包括大气的沉降、污染物随河流的迁移与污染灌溉,水体在其中扮演着重要的角色。低值聚类区主要分布在西江流域上游南丹县北部,这些样点远离污染源(大型矿床),一方面污染物因地形因素受到阻隔,另一方面受人为扰动较少。西江流域下游的黔江、浔江、蒙江主干流流经的地区及象州地区也表现出明显的低值聚类。这些地区是广西重要的粮食产区,远离上游的矿业活动区,沿岸农田土壤呈现 Sb 含量低值空间聚集,说明这些

地区土壤未受到 Sb 污染困扰,有助于更好地开展农业生产活动。空间异常值多数分布于大小环江、柳城县以及下游地区,以高低值离散为主,即低值中包含着高值异常。

2.3.2 Sb 含量空间分布

土壤是不均匀、具有高度空间变异的混合物,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^[19]。对研究区土壤 Sb 数据进行半变异函数拟合,采用球面模型进行 Kriging 插值,得到土壤 Sb 含量的空间分布(见图 3)。

从图 3(a)可知,Sb 高值区主要集中在南丹县南部、金城江地区、都安县、宜州市、罗城县以及忻城县

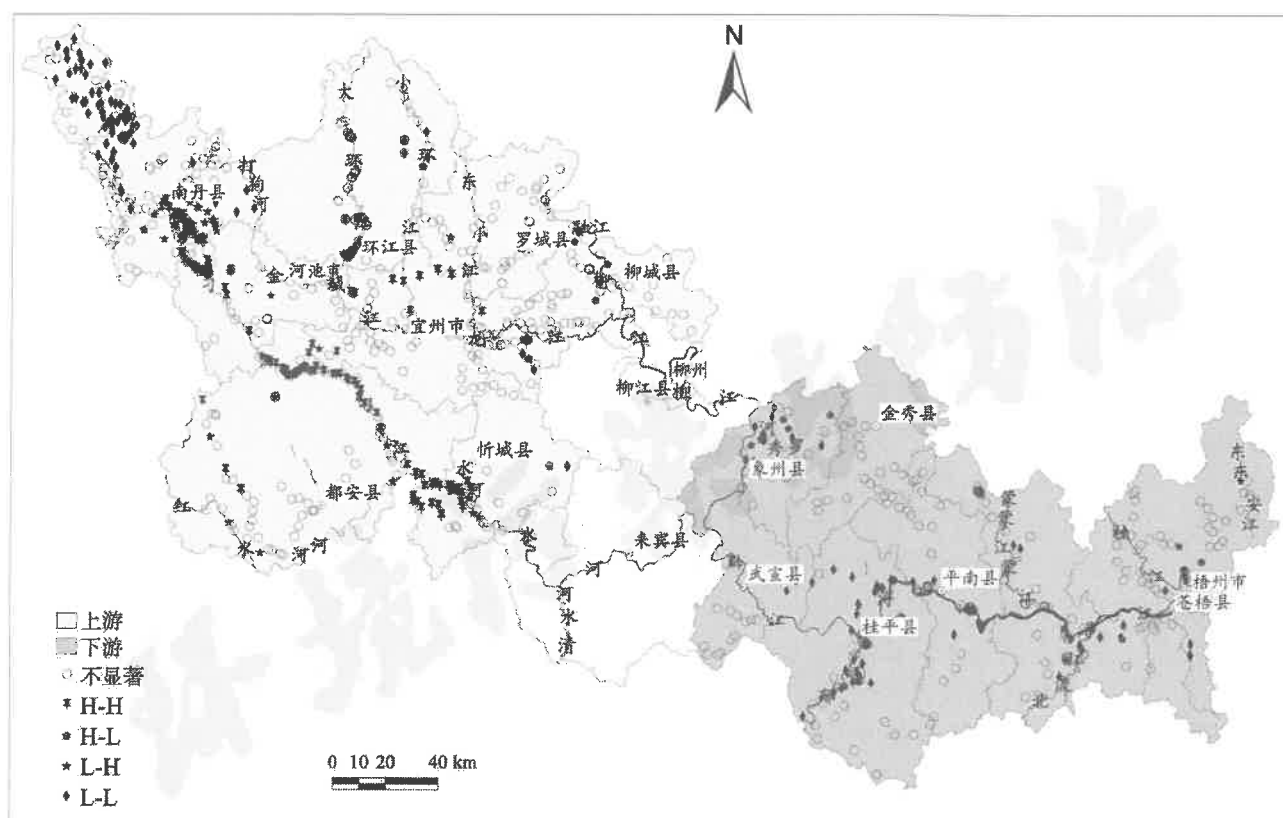


图 2 土壤样点 Sb 空间聚类
Fig.2 Spatial clustering of Sb contamination in soil

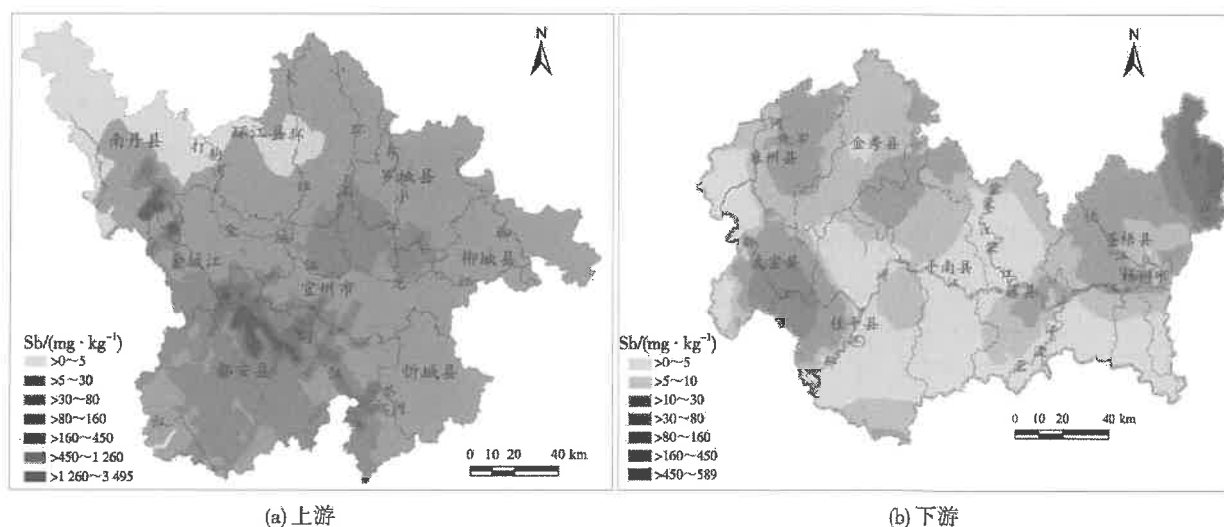


图 3 西江流域上下游土壤 Sb 的空间分布
Fig.3 Geographical distribution of Sb in upstream and downstream of Xijiang River Basin

的西南部,特别是都安县的大部分地区 Sb 质量浓度在 40~60 mg/kg,其北部地区 Sb 主要集中在 160~450 mg/kg。南丹县的南部的大厂、车河、长老乡呈大面积 Sb 高值区,最高值达 3 495.00 mg/kg。环江县、柳城县、忻城县以及南丹县除了南部的其余地区 Sb 总体在 10 mg/kg 以下。由图 3(b)可知,下游大部分地区 Sb 在 10 mg/kg 以下,只有武宣县和苍梧县呈现部分面积的 Sb 高值区,武宣县的 Sb 高值主要在 40~60 mg/kg,而苍梧县东北部 Sb 主要分布在 60~160 mg/kg,最高达到 589.00 mg/kg。

结合上下游 Sb 空间含量分布,流域 Sb 高值区范围广,以上游最为突出,沿刁江到达都安段以及大环江流域下游,主要集中在刁江流域的南丹县、都安县以及宜州市,流域特征明显。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积累形成,土壤 Sb 污染问题日趋严峻,Sb 污染事件呈高发态势。在工矿业活动区一定范围内,污染物沿河流分布的特点明显,DOMINGUEZ 等^[20]的研究也体现了这种流域性污染特征。河池地区降水集中在 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,还存在的其他潜在间接损失难以估计,如污染土壤在自然状态下提供生态服务能力的下降等。建议在此期间加大矿区安全排查力度,防患于未然,从而避免污染物随河流迁移。流域性环境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,污染物将迅速扩散^[21],因此流域沿岸土壤的针对性治理迫在眉睫。

2.3.3 西江流域土壤 Sb 污染评价

对西江流域上下游不同类型土壤的 Sb 累积状

况进行分析,结果见表 3。可见,96.6%的旱地土壤、99.4%的水田土壤采样点 $0 < I_{geo} \leq 1$,为轻中度污染;近 50%矿区土壤采样点 $I_{geo} > 3$,为强度以上污染,37.20%的矿区土壤处于轻中度污染。可见,由于其土壤利用类型的特殊性及可能导致的种植物安全问题需要进一步的关注。

以县级行政区为单位,对西江流域上下游土壤 Sb 污染状况进行评价,结果见表 4。可以看出,Sb 总体介于无污染至中度污染,无污染、轻中度污染和 中度污染的采样点比例分别为 57.5%、7.4% 和 16.1%。经计算,上游 $I_{geo} > 1$ 的地区有都安县、河池市,为中度污染, $0 < I_{geo} \leq 1$ 的地区有罗城县、南丹县和忻城县,为轻中度污染,其余地区 $I_{geo} < 0$ 。上游地区都安县土壤 Sb 处于强度污染、极强污染和极严重污染的比例分别为 12.0%、3.7% 和 12.7%,河池市为 3.2%、1.6% 和 13.6%,南丹县为 8.1%、5.4% 和 7.2%。下游地区各县市除了梧州市总体上 $I_{geo} > 1$,为中度污染外,其余地区总体上 I_{geo} 均小于 0,处于无污染状态。总体而言,西江流域 Sb 的累积较严重的地区为矿业活动密集区的都安县、河池市以及南丹县,其余地区基本无 Sb 累积。可见矿业活动对周边土壤的影响具有局部性,即局部点源污染使得周围环境中的重金属含量急剧上升,但影响范围却非常有限,这种局限性受到地形、水域分布及人为活动等因素影响,这与 ZHAO 等^[22]的研究观点相同。尽管如此,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^[23],西江流域上游土壤 Sb 污染需得到当地政府与居民的长期关注。

3 结论与建议

(1) 西江流域土壤 Sb 跨度大,为 0.04~3 495.00 mg/kg,平均值为 40.70 mg/kg,几何均值为 6.50 mg/kg,采样点超标率为 37.3%。

(2) 西江流域土壤 Sb 的背景值为 4.76 mg/kg,

表 3 不同类型土壤样品的 I_{geo} 分布
Table 3 I_{geo} distribution of different types of soil

I_{geo}	累积程度	旱地土壤	矿区土壤	水田土壤
$I_{geo} \leq 0$	无污染	0	0	0
$0 < I_{geo} \leq 1$	轻中度污染	96.6	37.2	99.4
$1 < I_{geo} \leq 2$	中度污染	1.4	9.3	0
$2 < I_{geo} \leq 3$	中强度污染	0.9	4.7	0.3
$3 < I_{geo} \leq 4$	强度污染	0.9	16.3	0
$4 < I_{geo} \leq 5$	极强污染	0	18.6	0
$5 < I_{geo} \leq 10$	极严重污染	0.2	13.9	0.3

表4 西江流域各县市土壤Sb污染特征
Table 4 Characteristics of soil Sb in different counties of Xijiang River Basin

项目		所占比例/%						
		无污染	轻中度污染	中度污染	中强度污染	强度污染	极强污染	极严重污染
上游	都安县	33.9	13.8	13.8	10.1	12.0	3.7	12.7
	环江县	81.3	11.6	6.2	0.9	0	0	0
	河池市	72.0	14.4	27.2	12.0	3.2	1.6	13.6
	柳城县	49.2	0	47.7	3.1	0	0	0
	罗城县	43.8	17.5	24.6	12.3	1.8	0	0
	南丹县	55.4	2.7	5.9	15.3	8.1	5.4	7.2
	忻城县	28.6	0	9.5	57.1	0	0	4.8
	宜州市	56.2	4.5	23.6	9.0	4.5	1.1	1.1
下游	苍梧县	66.0	0	30.2	1.9	0	0	1.9
	桂平县	82.8	12.9	2.8	1.5	0	0	0
	金秀县	83.3	0	16.7	0	0	0	0
	平南县	85.5	6.5	4.8	3.2	0	0	0
	藤县	78.8	5.0	15.0	0	1.2	0	0
	梧州市	0	0	66.7	33.3	0	0	0
	武宣县	77.0	15.4	7.6	0	0	0	0
	象州市	77.0	0	20.5	0	2.5	0	0
总计	57.5	7.4	16.1	9.3	3.7	1.7	4.3	

显著高于广西和全国土壤Sb背景值。西江流域矿区土壤、旱地土壤、水田土壤Sb分别为546.00、6.65、2.38 mg/kg,超标率分别为81.4%、45.2%、15.1%。

(3) 空间聚类与冷热点分析表明,高值聚类区集中于南丹县的南部、刁江流域上游、都安县北部段、忻城县南部以及宜州市北部,多处于多金属矿区及周边区域。低值聚类区主要分布于上游南丹县北部,下游象州地区及黔江、浔江、蒙江主干流流经的农田区域。

(4) 土壤Sb空间分布显示,Sb高值区均分布在刁江流域的南丹县、都安县以及宜州市,流域特征明显,下游地区的武宣县和苍梧县出现小面积的Sb高值区,其余地区的Sb基本在10 mg/kg以下。

(5) 西江流域土壤Sb总体介于无污染至中度污染之间,污染集中于河池地区的都安县、河池市以及南丹县,这与上游密集的矿业活动密切相关。对长期居住在矿区及周边地区的居民可能产生潜在风险,可进一步通过土壤-植物-人体体系展开锑风险评估,同时采取相应措施以控制风险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] 陆素芬,宋波,伏凤艳,等.南丹矿业活动影响区蔬菜重金属含量及健康风险[J].生态与农村环境学报,2016,32(3):478-485.
- [2] FILELLA M,BELZILE N,CHEN Y W,Antimony in the environment;a review focused on natural waters.Part 2.Relevant solution chemistry[J].Cheminform,2002,57(1/2):125-176.
- [3] 项萌,张国平,李玲,等.广西河池铅锑矿冶炼区土壤中锑等重金属的分布特征及影响因素分析[J].地球与环境,2010,38(4):495-500.
- [4] MCCALLUM R L.Occupational exposure to antimony compounds[J].Journal of Environmental Monitoring,2005,7(12):1245-1250.
- [5] WU F C,FU Z Y,LIU B J,et al.Health risk associated with dietary co-exposure to high levels of antimony and arsenic in the world's largest antimony mine area[J].Science of the Total Environment,2011,409(18):3344-3351.
- [6] 何孟常,季海冰,赵承易,等.锑矿区土壤和植物中重金属污染初探[J].北京师范大学学报(自然科学版),2002,38(3):417-420.
- [7] 李航彬,杨志辉,袁平夫,等.湘中锑矿区土壤重金属锑的污染特征[J].环境科学与技术,2011,34(1):70-74.
- [8] 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.
- [9] 宋长青,杨桂山,冷疏影.湖泊及流域科学研究进展与展望[J].湖泊科学,2002,14(4):289-300.
- [10] 唐朝霞,石顺勇,唐义辉,等.广西锑矿资源现状与找矿潜力探讨[J].科技与企业,2015(12):90-91.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

(下转第1448页)

