

基于文献数据的广西典型土壤铅含量特征及其风险研究*

宋波 田美玲 陈同斌[†] 陆素芬 余元元

(桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004)

摘要 为阐述广西土壤铅含量现状及其潜在风险, 通过检索20世纪90年代至今国内外关于广西土壤铅含量的文献, 共筛选出目标文献57篇, 涉及广西20多个地区, 样品5 807个。结果表明, 广西区土壤铅含量范围为18.80~6 350 mg kg⁻¹, 几何均值为147.9 mg kg⁻¹。不同功能区的土壤铅含量分布存在较大差异, 清洁土壤、城区土壤、工矿土壤、非矿区农用土壤和矿区农用土壤铅含量的几何均值分别为26.17、32.88、244.5、42.93和347.6 mg kg⁻¹, 分别是广西土壤铅背景值的1.391倍、1.747倍、12.99倍、2.281倍、18.47倍。调查区域中铅污染指数大于1的样本占总量的23%, 有7%的样本属于重度污染, 主要分布在南丹县、融安县等地, 这可能与该区域的矿业活动有关。基于广西区铅矿产分布及目前未涉及调查的区域, 建议对重污染区南丹、金城江、环江、融安、阳朔和崇左县等地采取治理措施, 对铅锌矿分布较多的大新县、武宣县、岑溪县、贺县等地区作进一步的调查研究。

关键词 土壤; 铅; 风险评估; 广西

中图分类号 X833; X825 **文献标识码** A

铅广泛分布于环境中, 是我国《重金属污染综合防治“十二五”规划》中的5种优先控制污染物之一^[1], 也是联合国粮食及农业组织(FAO)和世界卫生组织(WHO)公布的对人体产生毒性最强的三种金属之一^[2]。研究发现, 地壳岩石中的铅平均含量为16 mg kg⁻¹, 世界范围内土壤铅平均含量通常为2~200 mg kg⁻¹^[3], 而我国土壤铅背景值为26.0 mg kg⁻¹^[4]。土壤中的铅主要来源于地质成矿^[5]、铅锌矿的开采、汽车尾气、锅炉焚烧、油漆以及其他涉铅活动等^[6]。铅极易在土壤中蓄积, 农作物吸收过量的铅表现出毒害效应, 并通过食物链等途径进入人体, 严重威胁人类健康^[7]。

目前, 国内外学者对土壤铅做了大量研究, 我国北京^[8]、广州^[9]、东莞^[10]、昆山^[11]、桂

林^[12]、贵阳^[13]等地及国外的格鲁利亚斯科^[14]、墨西哥^[15]、加济阿巴德^[16]等城市均有相关调查。各地区的调查结果具有一定的参考价值, 但存在信息比较零散及区域差异性问题, 且全面分析区域性土壤铅含量空间分布的研究较少, 尤其针对我国广西区土壤铅含量整体分析的研究更是鲜有报道。广西位于中国西南部, 矿产资源丰富^[17], 素有“有色金属之乡”的美誉。据统计, 我国已探明铅矿保有储量为3 570万t^[18], 铅矿床914个^[19], 居世界前列。广西区内累计查明铅资源储量393.1万t, 保有资源储量175.7万t, 保有率44.69%^[20], 铅锌矿企业有118处, 矿点主要分布于河池、南丹、环江、融安、武宣、阳朔、恭城、岑溪等县市^[21]。在已有报道中, 南丹^[22]、环江^[23]等地

* 广西自然科学基金项目(No. 2013GXNSFEA053002)、“八桂学者”建设工程专项经费和国家自然科学基金项目(41261082)共同资助 Supported by the Guangxi Natural Science Fund Project(No. 2013GXNSFEA053002), the Special Funding for Guangxi “BaGui scholars” Construction Projects Funds and the National Natural Science Foundation of China(No. 41261082)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: chentb@igsrr.ac.cn

作者简介: 宋波(1972—), 男, 湖南溆浦人, 博士, 教授, 主要从事污染土壤修复和区域环境调查与风险评估研究。

E-mail: songbo@glut.edu.cn

收稿日期: 2016-04-20; 收到修改稿日期: 2016-08-22; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-10-12

区矿业活动释放的铅通过土壤及食物链等途径威胁到人类健康。基于公开文献资料,探讨广西区土壤铅总体含量和空间分布状况并进行风险评估,对广西开展土壤铅进一步的污染调查和污染治理工作进行了展望。

1 材料与方法

1.1 文献搜集与整理

从公开发表的文献中检索20世纪90年代以来关于广西土壤铅含量的数据。检索依据为:(1)以中文关键词“土壤、铅、Pb、重金属污染”和英文关键词“soil、lead、Pb、heavy metals、pollution”为关键词在各大数据库(中国知网、万方、维普和Science Direct、Web of Science、Springer等)检索目标文献;(2)在检索到的目标文献中,根据调查区域中不同功能区及背景的差

别,将采样点归为五类功能区土壤:Ⅰ清洁土壤,指基本不受人类活动影响的自然土壤;Ⅱ城区土壤,指城市中心人口密集区的土壤,包括住宅区、公园、商场、医院、学校、各大机构等;Ⅲ工矿土壤,指矿区周边用于农业生产之外的土壤;Ⅳ非矿区农用土壤,指远离工厂的用于农业生产的土壤,包括农田、菜地、茶园、果园、牧场等;Ⅴ矿区农用土壤,指矿区周边用于农业生产的土壤;(3)根据检索到的目标文献,某些文献报道了多种功能区土壤铅含量,因此按土壤功能将该篇文献拆分;(4)检索结果用目标文献中土壤铅含量的平均值表示,单位为 mg kg^{-1} 。检索到的目标文献分布及样点分布如图1所示,一篇目标文献代表一个样本;样点来源于本课题组在桂林市曾开展的调查工作,共192个土壤样点,包括160个农用土壤样点和32个清洁土壤样点,覆盖桂林市全境13个县区。铅锌矿分布情况参照《中国黑色有色金属矿产图集》^[24]。

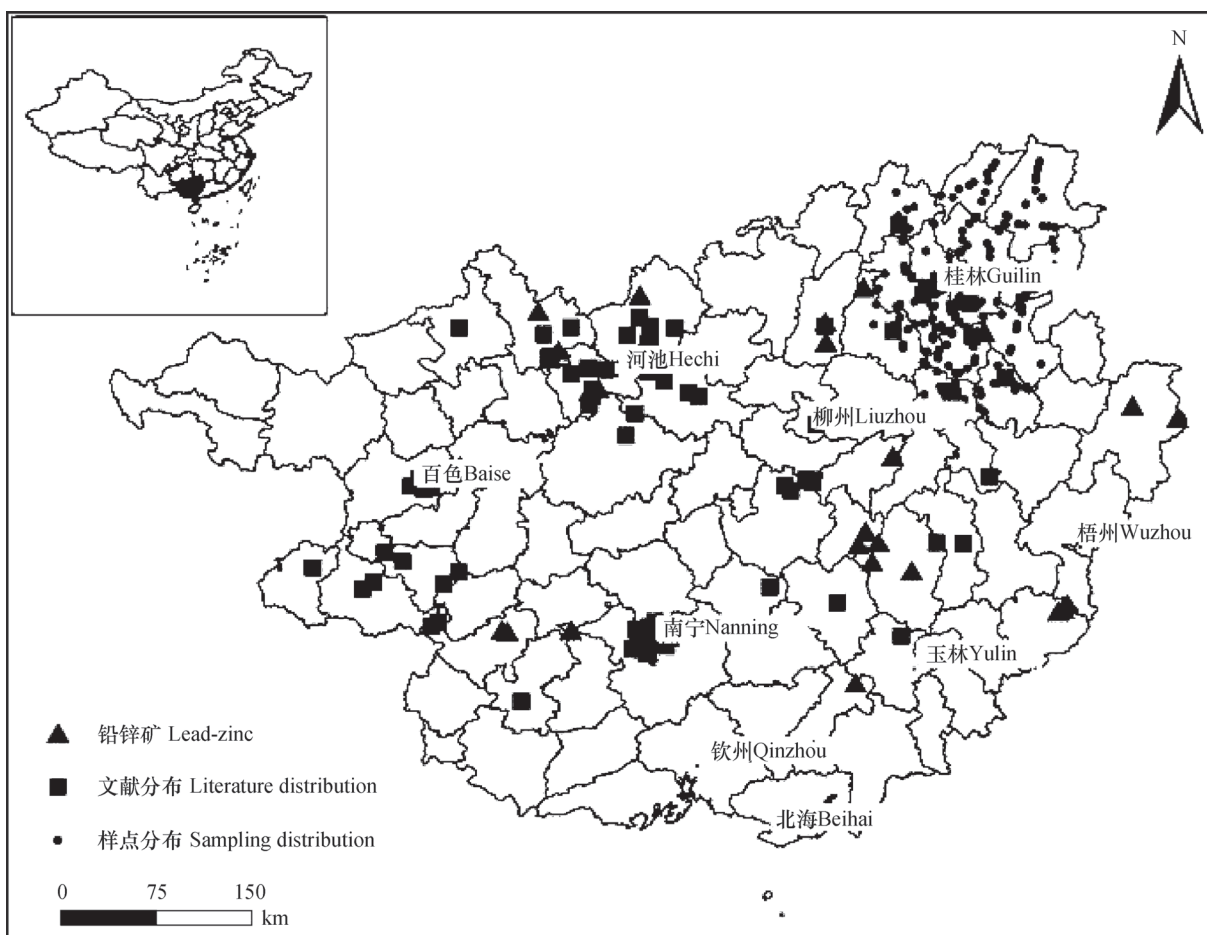


图1 广西土壤铅相关文献及样点分布

Fig. 1 A sketch map showing distribution of relevant literature and sampling sites for soil lead in Guangxi

1.2 数据整理与分析

为使数据具有可比性,方便与我国现行的土壤环境质量标准限值比较,采用以下几点为依据进行归纳整理:(1)目标文献中有对调查区域土壤铅含量作直接表述的,根据样本中数据的分布特征,采用文献中符合正态分布的算术均值或几何均值或中位数来表示该区域土壤铅含量;(2)目标文献中没有对调查区域土壤铅含量作直接表述的,通过文献中的图表获得;(3)数字和图表均没有的不参与比较和计算。

原始数据处理分析采用Origin、SPSS软件完成,土壤重金属含量的空间分布图用ArcGIS等软件制作。

1.3 评价方法

评价方法首先以广西土壤铅背景值^[4]作为标准,求出土壤铅污染累积指数;再用土壤单项污染指数(P)表征土壤铅的污染状况。计算公式如下:

土壤污染累积指数=土壤污染物实测值/污染物背景值

土壤单项污染指数 P =土壤污染物实测值/土壤污染物质量标准

依据《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995),不同土壤环境质量执行不同级别标准值,其中清洁土壤执行一级标准,城区土壤、非矿区农用土壤执行二级标准,工矿土壤及矿区农用土壤执行三级标准。

土壤铅污染分级标准:当 $P \leq 1$ 时,表示土壤未受污染; $1 < P \leq 2$ 时,表示土壤受到轻度污染; $2 < P \leq 3$ 时,表示土壤受到中度污染; $P > 3$ 时,表示土壤受到重度污染,且 P 值越大表示污染越严重。

2 结果与讨论

2.1 不同功能区土壤铅含量特征

由表1可知,广西各地区土壤铅含量存在较大差异,铅含量均值范围为 $18.80 \sim 6\,350 \text{ mg kg}^{-1}$;除黄碧燕和韦宇宁^[25]报道的南宁市市郊部分土壤铅含量低于当地土壤铅背景值外,其他地区土壤铅含量均高于对应地区的土壤铅背景值,表明广西区土壤环境普遍存在铅的累积效应。

搜集到的广西土壤铅样本数为86(其中存在交叉文献),各地区土壤铅含量均值呈偏态分布(图2a),经对数转换后符合正态分布(图2b),其铅含量均值的中值、算术均值、标准差、几何均值和几何标准差分别为99.07、475.0、1 049、 147.9 mg kg^{-1} 和4.150。得出广西区土壤铅含量(几何均值)是其背景值的7.86倍,低于我国《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准限制值。融安县泗顶铅锌矿区的土壤铅含量最高,为 $6\,350 \text{ mg kg}^{-1}$,污染累积指数达到278.5。

2.2 不同功能区土壤铅含量差异

根据调查区域土壤所处地理位置和使用功能的不同,将其分为清洁土壤、城区土壤、工矿土壤、非矿区农用土壤、矿区农用土壤五种类型。五种功能区土壤分别对应的文献有6、4、25、19和32篇(其中存在交叉文献),经Kolmogorov-Smirnov(K-S)正态性检验,清洁土壤、城区土壤和非矿区农用土壤铅含量符合正态分布,对数转换后工矿土壤、矿区农用土壤铅含量符合正态分布,统计结果如表2所示。

通过几何均值比较,发现土壤中铅含量水平表现为矿区农用土壤>工矿土壤>非矿区农用土壤>城区土壤>清洁土壤。由图3a,清洁土壤铅含量的几何均值高于广西土壤铅背景值,较大值出现在柳州市,可能由于当地土壤铅背景值(23.51 mg kg^{-1})较高,虽为远离矿区的清洁土壤,但可能受到风力和雨水等自然因素的动力作用影响,使得土壤中的铅含量形成一定的积累。城区土壤多集中在百色和南宁城区内,百色地区矿产资源丰富,种类繁多,土壤铅积累差异较大,受外来影响也比较大;南宁是广西区首府,人口集中,交通便利,土壤环境中的铅极易受到汽车尾气排放以及人类活动的影响,再加上南宁地区的土壤铅背景值(27.15 mg kg^{-1})较高,导致该地区土壤铅含量普遍偏高。工矿土壤铅含量差异较大(图3b),融安泗顶铅锌矿区土壤铅含量最高,可能由于大量尾矿砂的堆砌及废水的排放,导致该地区土壤环境严重恶化;刁江流域南丹段矿区周边土壤铅含量也很高,由于刁江发源于南丹县大厂、车河境内,大厂、车河的矿产资源非常丰富,随着人们无序开采,“三废”的肆意排放,大量的选洗矿废水和矿砂排入刁江,刁江水通过地下渗流进入两岸土壤,

表1 广西部分地区土壤铅含量统计特征

Table 1 Statistics of soil lead contents in several areas of Guangxi								
功能区土壤划分 Zoning of soil by function	文献调查区域 Regions referred to in literature or under investigation	样点数 Number of sampling sites	范围 Range of contents (mg kg ⁻¹)	均值 Mean (mg kg ⁻¹)	背景值 Background value (mg kg ⁻¹)	累积指数 Accumulation index	采样时间 Sampling time (y)	检测方法 Detection method
清洁土壤Clean soil	百色市那坡县	8	20.98 ~ 52.23	33.49	16.07	2.084	2010	ICP-AES
	广西区境内 ^[4]	202	2.480 ~ 35.16	18.82	18.82	1.000	1990	—
	桂林市各个县 ^[12]	32	13.09 ~ 76.13	31.47	20.32	1.549	2010	GF-AAS
	河池大环江板力村	1	—	22.10	17.63	1.254	2005	ICP-AES
城区土壤Soil in urban area	环江县桑地	25	6.100 ~ 48.70	18.80	17.63	1.066	2007	ICP-MS
	柳州某相对清洁处	1	—	39.00	23.51	1.659	2013 [*]	GF-AAS
	百色市右江区	20	13.61 ~ 27.87	20.74	16.07	1.291	2010	ICP-AES
	百色市右江区	20	13.88 ~ 43.54	20.74	16.07	1.291	2010	ICP-AES
工矿土壤Soil in industrial and mining area	南宁市城区	46	14.68 ~ 415.0	65.56	23.83	2.751	2002	AAS
	南宁市公园	40	17.87 ~ 90.45	41.42	23.83	1.738	2008	ICP-AES
	百色市德保县	10	58.46 ~ 139.7	99.07	16.07	6.165	2010	ICP-AES
	百色市德保县	6	41.58 ~ 169.1	99.07	16.07	6.165	2010	ICP-AES
	百色市靖西县	6	63.74 ~ 85.74	74.74	16.07	4.651	2010	ICP-AES
	百色市靖西县	9	58.01 ~ 86.00	74.74	16.07	4.651	2010	ICP-AES
	大新县下雷镇	9	55.74 ~ 88.01	72.54	18.82	3.854	2007	AAS
	德保县湖润尾矿地	3	52.80 ~ 83.53	67.62	16.07	4.208	2007	AAS
	德保县那甲尾矿地	2	52.80 ~ 83.53	67.62	16.07	4.208	2007	AAS
	德保县钦甲尾矿地	2	52.80 ~ 83.53	67.62	16.07	4.208	2007	AAS
	刁江大厂车河矿区	13	306.0 ~ 6 790	3 660	17.63	207.6	2009	ICP-MS
	广西区西南部 ^[26]	15	—	850.0	18.82	45.17	2013 [*]	GF-AAS
	贵港市城区	47	19.20 ~ 97.00	45.90	18.82	2.439	2008	AAS
	桂平县木圭镇	33	49.75 ~ 92.69	72.00	18.82	3.826	2014 [*]	AAS
桂平县木圭镇南	43	49.75 ~ 92.69	80.80	18.82	4.293	2009	ICP-AES	
河池市都安县 ^[27]	—	—	570.0	17.63	32.33	2012 [*]	AAS	

续表

功能区分 Zoning of soil by function	文献调查区域 Regions referred to in literature or under investigation	样点数 Number of sampling sites	范围 Range of contents (mg kg ⁻¹)	均值 Mean (mg kg ⁻¹)	背景值 Background value (mg kg ⁻¹)	累积指数 Accumulation index	采样时间 Sampling time (y)	检测方法 Detection method
工矿土壤 Industrial and mining area	河池市金城江区 ^[27]	-	-	1 500	17.63	85.08	2012 [*]	AAS
	来宾市凤凰矿区	4	113.1 ~ 289.0	191.8	18.82	10.19	2006	FAAS
	来宾市兴宾区八一矿区	18	113.1 ~ 289.1	204.2	18.82	10.85	2005	AAS
	荔浦县马岭镇荔浦矿区	15	113.1 ~ 289.1	171.7	20.32	8.450	2005	AAS
	柳州市柳江县思荣矿区	3	113.1 ~ 289.0	191.8	22.80	8.412	2006	FAAS
	南丹刁江矿区 ^[28]	6	28.00 ~ 17 200	4 820	17.63	273.5	2001	AFS
	南丹县	-	-	2 250	17.63	127.6	2012 [*]	AAS
	南宁市工业区	9	56.79 ~ 156.1	80.58	23.83	3.381	2008	AAS
	平乐县二塘镇平乐矿区	12	113.1 ~ 289.1	186.1	20.32	9.158	2005	AAS
	融安泗顶铅锌矿区 ^[29]	21	1 420 ~ 18 210	6 350	22.80	278.5	2009	AAS
非矿区农用土壤 Farmland soil in agricultural area	玉林市工业区	13	354.6 ~ 517.3	439.2	24.81	17.70	2008	AAS
	百色市右江区	106	0.200 ~ 63.80	26.18	16.07	1.629	2013 [*]	FAAS
	宾阳县黎塘镇	8	78.60 ~ 84.70	80.95	27.15	2.982	2006	AAS
	广西区12个县旱地	336	4.370 ~ 702.0	-	18.82	-	2010 [*]	FAAS
	广西区32个县园地	1 433	1.820 ~ 496.0	-	18.82	-	2010 [*]	FAAS
	广西区33个县水田	1 574	3.100 ~ 457.0	-	18.82	-	2010 [*]	FAAS
	广西区稻田	50	5.600 ~ 48.80	26.46	18.82	1.406	2011	GF-AAS
	桂林潮田乡毛村	93	-	79.60	20.32	3.917	2008	AAS
	桂林市5城区	79	13.10 ~ 163.0	43.20	20.32	2.126	2009 [*]	AAS
	桂林市各个县 ^[12]	160	10.14 ~ 249.0	38.62	20.32	1.901	2010	GF-AAS
	桂林市临桂县	3	17.50 ~ 46.70	30.27	20.32	1.490	2014 [*]	ICP-MS
	桂林市龙胜县	2	17.50 ~ 46.70	30.27	20.32	1.490	2014 [*]	ICP-MS
	桂林市市郊	35	27.64 ~ 76.95	52.30	20.32	2.574	2006 [*]	FAAS
	桂林市永福县	3	17.50 ~ 46.70	30.27	20.32	1.490	2014 [*]	ICP-MS

续表

功能区土壤划分 Zoning of soil by function	文献调查区域 Regions referred to in literature or under investigation	样点数 Number of sampling sites	范围 Range of contents (mg kg^{-1})	均值 Mean (mg kg^{-1})	背景值 Background value (mg kg^{-1})	累积指数 Accumulation index	采样时间 Sampling time (y)	检测方法 Detection method
非矿区农用土壤 Farmland soil in agricultural area	南宁市河州生态规划区	12	10.15 ~ 89.37	44.55	27.15	1.641	2003 [*]	AAS
	南宁市郊部分菜区	12	26.82 ~ 86.48	48.37	27.15	1.782	2001 [*]	AAS
	南宁市市郊	9	7.030 ~ 136.0	37.38	27.15	1.377	2004 [*]	GF-AAS
	南宁市市郊 ^[25]	8	—	26.94	27.15	0.992	2000 [*]	AAS
	南宁市市郊	57	15.69 ~ 318.0	70.16	27.15	2.584	2006 [*]	FAAS
	南宁市市郊各乡镇	57	15.69 ~ 318.0	70.16	27.15	2.584	2001	AAS
	南宁市武鸣	8	7.030 ~ 136.0	37.38	27.15	1.377	2004 [*]	GF-AAS
	南宁市武鸣华侨区	12	37.60 ~ 90.13	65.44	27.15	2.410	2004 [*]	AAS
	南宁市邕宁	8	7.030 ~ 136.0	37.38	27.15	1.377	2004 [*]	GF-AAS
	3条流域周边铅锌矿附近	29	48.00 ~ 2 970	—	18.82	—	2008	AAS
矿区农用土壤 Farmland soil in industrial and mining area	大新东北部	14	83.85 ~ 1 127	395.3	18.82	21.004	2013	ICP-AES
	大新东北部弃耕地	11	481.3 ~ 1 466	520.1	18.82	27.64	2013	ICP-AES
	大新东北部玉米地	11	86.92 ~ 2 267	412.5	18.82	21.92	2013	ICP-AES
	刁江保平乡	172	53.40 ~ 2 321	1 075	17.63	60.98	2005 [*]	FAAS
	刁江两岸	10	66.90 ~ 1 590	645.8	17.63	36.63	2008	AAS
	刁江沿岸土壤	140	53.40 ~ 1 823	685.2	17.63	38.87	2003	AAS
	桂林阳朔柑橘园	9	70.33 ~ 1 612	749.3	20.32	36.88	2014 [*]	FAAS
	桂林阳朔县水稻田	12	286.9 ~ 1 977	1 132	20.32	55.71	2014 [*]	FAAS
	桂林阳朔县玉米地	12	330.2 ~ 1 991	886.5	20.32	43.63	2014 [*]	FAAS
	河池大环江板力村	7	173.2 ~ 441.6	313.5	17.63	17.78	2005	ICP-AES
	河池金城江将军山	9	21.00 ~ 289.0	96.78	17.63	5.490	2010	ICP-MS
	河池金城江无名山	12	259.0 ~ 2 260	726.8	17.63	41.23	2010	ICP-MS
	河池市金城江区 ^[30]	70	128.0 ~ 39 370	4 382	17.63	248.6	2008	AAS
	河池市金城江区	4	50.63 ~ 544.7	196.3	17.63	11.13	2009	AAS

续表

功能区土壤划分 Zoning of soil by function	文献调查区域 Regions referred to in literature or under investigation	样点数 Number of sampling sites	范围 Range of contents (mg kg ⁻¹)	均值 Mean (mg kg ⁻¹)	背景值 Background value (mg kg ⁻¹)	累积指数 Accumulation index	采样时间 Sampling time (y)	检测方法 Detection method
矿区农用地土壤 Farmland soil in industrial and mining area	环江毛南族自治县 ^[31]	2	42.00 ~ 43.00	42.50	17.63	2.411	2006	ICP-MS
	环江毛南族自治县 ^[31]	5	427.0 ~ 798.0	544.0	17.63	30.86	2006	ICP-MS
	环江县大安乡	17	380.0 ~ 475.0	427.5	17.63	24.25	2009	FAAS
	环江县流域周边	18	87.63 ~ 623.3	261.4	17.63	14.83	2012*	ICP-MS
	环江县洛阳镇	5	278.0 ~ 318.0	298.0	17.63	16.90	2009	FAAS
	环江县桑地	34	81.00 ~ 733.9	324.0	17.63	18.38	2007	ICP-MS
	环江县思恩镇	5	560.0 ~ 596.0	578.0	17.63	32.79	2009	FAAS
	环江县思恩镇	-	310.0 ~ 523.0	416.5	17.63	23.63	2007	AAS
	环江县西北部两岸	127	10.01 ~ 1 337	126.4	17.63	7.170	2013*	ICP-MS
	柳州市某矿区周边	5	27.00 ~ 111.0	53.00	23.51	2.254	2013*	GF-AAS
	南丹县大厂镇 ^[22]	57	79.70 ~ 1 073	428.2	17.63	24.29	2014*	ICP
	南丹县大厂镇	89	90.94 ~ 1 319	508.9	17.63	28.87	2013*	ICP-OES
	南丹县大厂镇	144	64.53 ~ 369.7	151.3	17.63	8.582	2012*	ICP-AES
	南丹县大厂镇	7	32.90 ~ 283.6	130.0	17.63	7.374	2013	AAS
	南丹大厂镇水田土	11	93.30 ~ 2 228	188.3	17.63	10.68	2013	AAS
	思荣复垦区茶园	-	148.0 ~ 204.8	172.7	22.80	7.575	2008	AAS
	思荣复垦区甘蔗园	-	248.5 ~ 313.5	289.0	22.80	12.68		AAS
	思荣复垦区柑橘园	-	143.6 ~ 300.3	220.5	22.80	9.671	2008	AAS

注: *: 对应文献发表的年份; -: 目标参考文献没有报道的数据; Note: *: The year of corresponding literature published; -: The data of target reference without reported

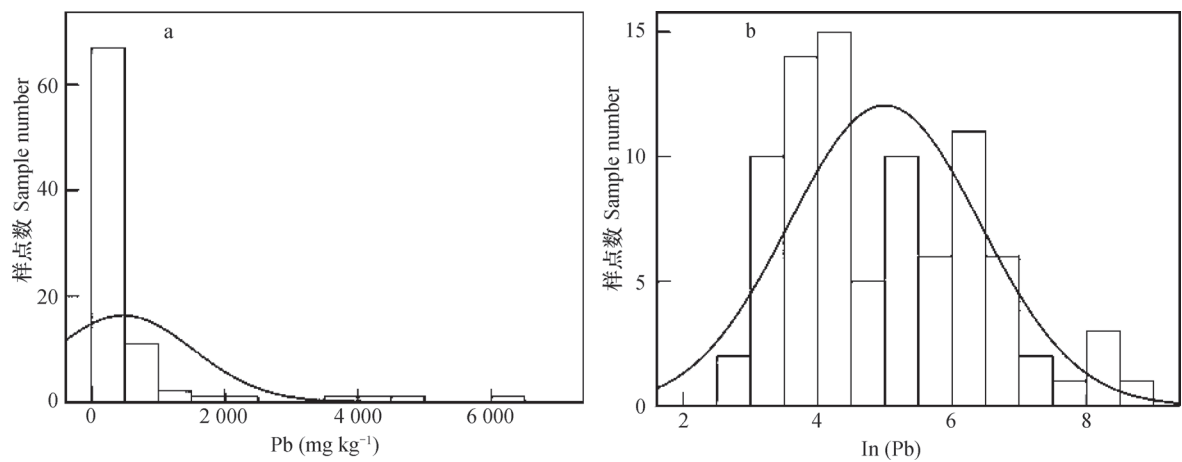


图2 广西部分地区土壤铅含量分布特征
Fig. 2 Frequency distribution of Pb contents in soil of Guangxi

表2 不同功能区土壤铅含量状况

Table 2 Content of lead in soil relative to type of land use							
功能区土壤划分 Zoning of soil by function	文献量 Volumn of literature	样点数 Number of sampling sites	分布类型 Distribution type	范围 Range (mg kg ⁻¹)	几何均值 Geometric mean (mg kg ⁻¹)	变异系数 CV (%)	P _{k-s}
清洁土壤Clean soil	6	269	正态分布	18.80 ~ 39.00	26.17 (1.372)	31.27	0.914
城区土壤Soil in urban area	4	126	正态分布	20.74 ~ 65.56	32.88 (1.758)	57.45	0.915
工矿土壤Soil in industrial and mining area	25	299	对数正态分布	45.90 ~ 6 350	244.5 (4.581)	185.9	0.152
非矿区农用土壤 Farmland soil in agricultural area	19	722	正态分布	26.18 ~ 80.95	42.93 (1.466)	39.96	0.541
矿区农用土壤 Farmland soil in industrial and mining area	32	1 019	对数正态分布	42.50 ~ 4 382	347.6 (2.530)	139.0	0.971
合计Total	86	2 435	对数正态分布	18.80 ~ 6 350	147.9 (4.150)	220.8	0.068

注：P_{k-s}>0.05表示呈正态分布；括号内数据为几何标准差 Note：P_{k-s}>0.05 represents normal distribution and data in “（ ）”，geometric standard deviation

从而使其受到严重污染。河池市金城江区的土壤铅含量也存在偏高现象，刁江流经金城江区，受到源头矿冶活动影响，同时金城江区的矿产也很丰富，其地理环境表现为三面环山，冶炼厂排放的废气烟尘难以扩散，容易在小范围内富集并沉降，从而使该地区的环境受到严重污染，土壤铅含量出现富集现象，农作物重金属含量也可能存在超标风险。非矿区农用土壤铅含量范围为26.18 ~ 80.95 mg kg⁻¹，

几何均值为42.93 mg kg⁻¹，对南宁和桂林地区的研究较多，两地的土壤铅背景值（桂林20.32 mg kg⁻¹）均高于广西土壤铅背景值，同时由于在农耕过程中使用农药，使当地土壤受到一定影响，造成土壤铅的积累现象，但几何均值低于国家《土壤环境质量标准》（GB 15618-1995）二级标准。矿区农用土壤铅含量的几何均值为347.6 mg kg⁻¹，主要集中在桂林阳朔县、大环江、金城江、南丹县大

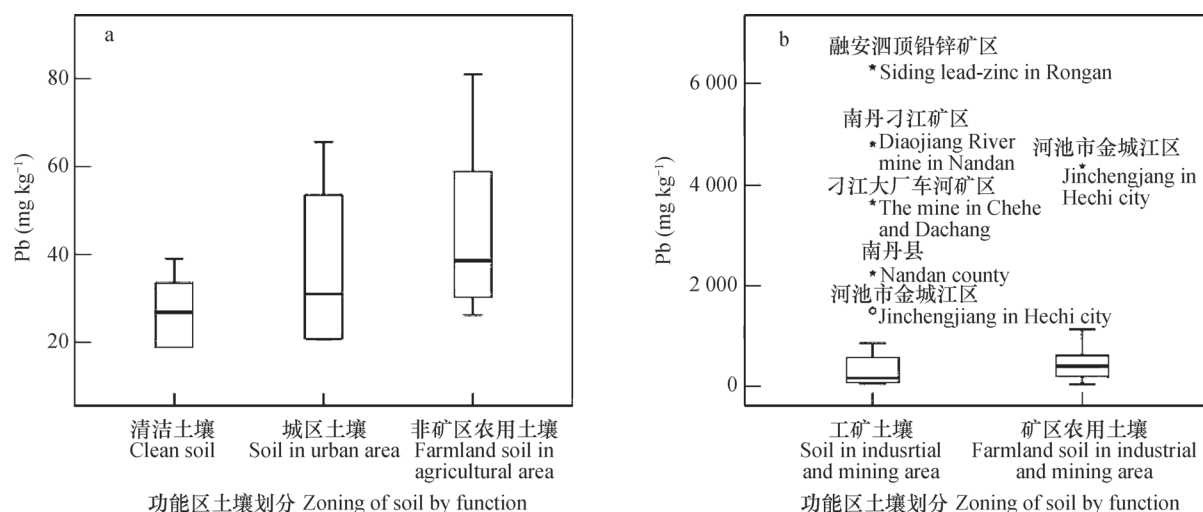


图3 不同功能区土壤铅含量箱式图

Fig. 3 Box plot showing Pb contents in soil in different function zones

厂等地区, 桂林市阳朔县思的村分布有浮选厂, 降雨导致尾矿砂坝塌陷, 尾矿砂四处溢流, 进入思的村, 造成农田大面积污染; 大环江上游分布有北山铅锌矿区、雅脉钢铁厂、都川铅锌矿、驯乐铅锌矿区等有色金属矿区, 曾经洪水将上游部分尾砂库冲垮, 大量颗粒物尾矿被冲入江河, 下渗至沿河两岸土壤, 使其受到严重的铅污染; 金城江区矿产资源丰富, 周边用于农业生产的土壤受到严重影响; 南丹县大厂镇矿产丰富, 地形奇特, 四面环山, 矿产开发中产生的三废污染富集在小区域内无法扩散, 使该地区的土壤受到严重的重金属污染, 以铅最为突出, 同时这些矿区农用土壤在被使用过程中, 化肥、农药、地膜等对土壤环境也存在一定的污染风险。

从变异系数来看, 变异系数 $\leq 10\%$ 时, 表现为弱变异性; 变异系数介于 $10\% \sim 100\%$ 之间表现为中等变异性; 变异系数 $\geq 100\%$ 时表现为强变异性^[32]。通过表2可以看出: 在五种功能区土壤中, 清洁土壤、城区土壤和非矿区农用土壤铅含量的空间变异性表现为中等强度; 工矿土壤、矿区农用土壤铅含量空间变异性强。全部土壤的变异系数为220.8%, 说明研究区的土壤铅含量受人类活动和产业发展影响很大。

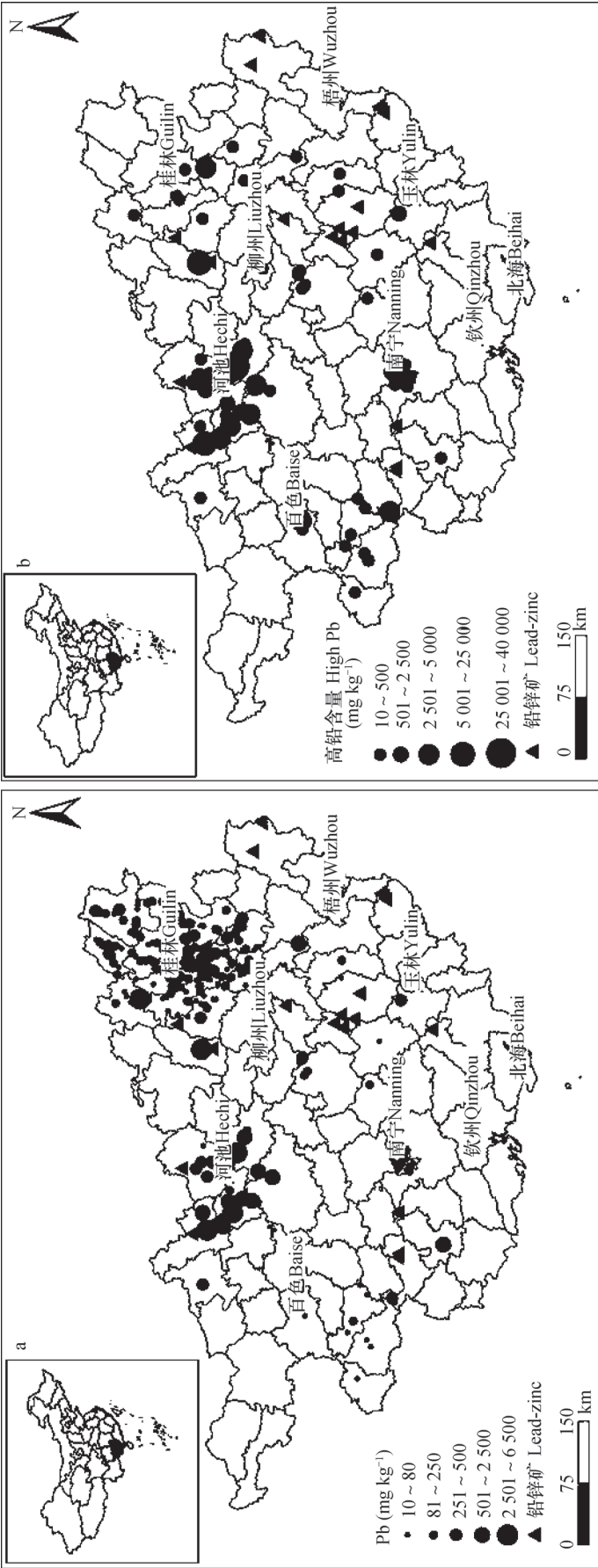
2.3 土壤铅含量空间分布与污染评价

将收集的广西土壤铅含量数据通过Arc GIS 9.3绘图工具得到广西土壤铅含量的空间分布图(图4), 由图4a可以看出, 广西土壤铅含量状况的研

究集中在河池、南宁和桂林等地区, 矿业活动密集区河池地区的南丹、金城江和环江一带研究较多; 对于铅锌矿分布较多的大新县、武宣县、岑溪县、贺县等研究较少。研究区域土壤铅含量空间分布表现为: 在南丹、金城江、环江、融安、阳朔和崇左县等地区出现高值(图4b), 说明这些区域受到周边矿区影响, 土壤环境存在较高铅污染。如周兴等^[28]对南丹刁江流域沿岸已经废弃的尾矿库周边土壤进行调查, 结果表明土壤铅含量最大值为 $17\,200\text{ mg kg}^{-1}$, 平均值达到 $4\,821\text{ mg kg}^{-1}$, 是国家土壤环境质量三级标准的9.6倍。路畅等^[29]报道的融安泗顶铅锌矿区的冶炼厂排污口处铅含量达到 $18\,212\text{ mg kg}^{-1}$, 而冶炼厂产生的废渣是导致该区域污染严重的直接原因。项萌等^[30]发现河池矿产冶炼区土壤铅含量平均值达到 $4\,382\text{ mg kg}^{-1}$, 是背景样品铅含量的57.7倍。

通过与广西土壤铅背景值相比较, 得出清洁土壤、城区土壤、工矿土壤、非矿区农用土壤、矿区农用土壤分别是广西土壤铅背景值的1.391倍、1.747倍、12.99倍、2.281倍、18.47倍。由表1中广西各地区土壤铅含量均值和国家《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)各级标准值, 得出土壤铅污染指数, 大于1的目标文献样本占总量的23%, 有7%的目标文献样本属于重度污染, 其主要分布在南丹县、融安县等地, 这很可能与当地的矿业活动、农用化肥的大量使用有关。

广西土壤铅含量的空间分布状况表明, 部分



注：（a）中Pb指每篇目标文献中土壤铅含量的平均值，其中包括本课题组在桂林曾开展的调查样点；（b）中高铅含量指目标文献中土壤铅含量范围的最大值。Note：（a）Pb refers to mean of soil lead contents in every target literature，including the sampling sites our team surveyed in Guilin；（b）High Pb，refers to maximum value of soil Pb content in the target literature

图4 广西各地区土壤铅均值（a）和最高值（b）空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil lead (a) and maximum soil Pb contents (b) in various function zones of Guangxi

地区铅含量明显高于国家《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)限制值,这可能由于受到人为活动干扰,例如矿区的开发、重工业区域性发展、农业发展等。而各地区成土母质的差异以及背景值的不同是造成广西土壤铅含量在空间上分布不均的初始原因^[33]。

近年来,随着广西铅锌冶炼企业生产能力的提升,开发使用程度也在增大。截至2009年,广西铅需求量约为40万t a⁻¹^[20],铅占用率为61%~70%,消耗率为55.31%^[34]。位于桂西北河池—南丹地区的丹池成矿带是广西最重要的成矿带之一,铅—锌储量超过广西总储量的36.2%^[35],铅矿主要以采矿、选矿和冶炼3种方式进入周围环境,其中选矿活动对铅的环境释放通量贡献最大^[36]。文献显示对重污染区南丹^[27]、金城江^[27]、环江^[31]、融安^[29]、阳朔^[37]和崇左^[26]等地区的研究多集中在调查方面,基于这些地区铅矿产资源丰富,冶炼产业发展的同时使环境遭受到不同程度的铅污染,当地居民的生活和生存条件也受到严重威胁,有必要对这些地区开展进一步的农产品健康风险评估和人群健康风险评价;对于目前研究较少的大新县、武宣县、岑溪县、贺县等地区,铅矿产资源分布较多,其中地处梧州、岑溪地区以佛子冲和东桃为代表的铅—锌成矿区铅锌储量占广西总储量的22.3%^[35],这些地区矿业活动密集,冶炼厂在生产过程中排放的大量有毒有害物质通过尾矿堆的不合理处置、酸性废水排放及干湿沉降等途径^[38-40]使矿区周边土壤受到不同程度的铅污染,农产品安全也间接受到威胁,对这些地区开展土壤重金属污染调查,摸清土壤铅含量状况,全面合理评价广西土壤铅含量迫在眉睫。

3 结 论

受公开文献研究区域的限制,收集到的数据仅覆盖了广西部分地区。为确立今后工作开展方向和更有效地统计分析广西土壤铅含量现状,分别制定以下策略:(1)对广西已调查过的区域(桂林、河池、南宁等)需要根据污染程度,进一步评估土壤铅污染对生态环境和当地人群健康的风险,必要时需加强监管,防止污染扩散;(2)对重污染区域(南丹、金城江、环江、融安、阳朔和崇左等矿业集中区)应进一步开展人体健康与农产品安全多

层次研究,以制定具有针对性的风险控制和治理措施;(3)对涉铅矿业和工业活动的其他未开展或较少开展调查的区域(大新县、武宣县、岑溪县、贺县等)需要作进一步调查,充实广西地区土壤铅含量的空间分布情况。

参 考 文 献

- [1] 吴舜泽,孙宁,卢然,等. 重金属污染综合防治实施进展与经验分析. 中国环境管理, 2015, 7(1): 21—28
Wu S Z, Sun N, Lu R, et al. The progress and empirical analysis on the implementation of comprehensive prevention and control of heavy metal pollution (In Chinese). Chinese Journal of Environmental Management, 2015, 7(1): 21—28
- [2] 程恒怡,刘展华,吴祖军,等. 2012年广西食品中铅污染检测结果调查. 中国卫生检验杂志, 2014, 24(2): 258—260
Cheng H Y, Liu Z H, Wu Z J, et al. Analysis of lead contamination level in food of Guangxi in 2012 (In Chinese). Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2014, 24(2): 258—260
- [3] Martínez C E, Motto H L. Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils. Environmental Pollution, 2000, 107(1): 153—158
- [4] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990
China Environment Monitoring Station. Chinese soil element background values (In Chinese). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990
- [5] 田晖. 西安市街道灰尘中铬、镉、铅赋存状态及环境效应. 北京地质, 2002, 14(2): 34—39
Tian H. Occurrence state of the trace elements of the dust in the street of Xi, an (In Chinese). Beijing Geology, 2002, 14(2): 34—39
- [6] Godwin H A. The biological chemistry of lead. Current Opinion in Chemical Biology, 2001, 5(2): 223—227
- [7] 胡宁静,骆永明,宋静,等. 长江三角洲地区典型土壤对铅的吸附及其与有机质、pH和温度的关系. 土壤学报, 2010, 47(2): 246—252
Hu N J, Luo Y M, Song J, et al. Influences of soil organic matter, pH, and temperature on Pb sorption by four soils in Yangtze River Delta (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(2): 246—252
- [8] 郑袁明,余轲,吴泓涛,等. 北京城市公园土壤铅含量及其污染评价. 地理研究, 2002, 21(4): 418—424
Zheng Y M, Yu K, Wu H T, et al. Lead concentrations of soils in Beijing urban parks and their pollution

- assessment (In Chinese). *Geographical Research*, 2002, 21 (4): 418—424
- [9] 黄银华, 李钺, 李芳柏, 等. 广州市农业表层土壤铜和铅多尺度空间结构. *土壤*, 2015, 47 (6): 1144—1150
- Huang Y H, Li C, Li F B, et al. Multi-scale spatial structure of Cd and Pb in agricultural soils in Guangzhou (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (6): 1144—1150
- [10] 高磊, 陈建耀, 王江, 等. 东莞石马河沿岸土壤重金属污染及生态毒性研究. *土壤学报*, 2014, 51 (3): 538—546
- Gao L, Chen J Y, Wang J, et al. Heavy metal pollution of soils alongside Shima River, Dongguan and its ecotoxicity (In Chinese). *Acta Pedologica sinica*, 2014, 51 (3): 538—546
- [11] 万红友, 周生路, 赵其国, 等. 苏南经济快速发展区土壤Cu、Ni、Pb、Zn形态及其有效性定量分析——以昆山市为例. *土壤学报*, 2010, 47 (4): 652—658
- Wan H Y, Zhou S L, Zhao Q G, et al. Chemical forms of soil Cu, Ni, Pb and Zn and quantitative analysis of their availabilities in regions rapid in economic development in south Jiangsu: A case study of Kunshan City (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (4): 652—658
- [12] 宋波, 张学洪, 蒙冬柳, 等. 桂林市菜地土壤和蔬菜铅含量调查与污染评价. *环境科学研究*, 2012, 25 (10): 1155—1160
- Song B, Zhang X H, Meng D L, et al. Lead concentrations and contamination assessment in vegetables and soils in Guilin (In Chinese). *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25 (10): 1155—1160
- [13] 曹益金, 李晓燕, 王干珍, 等. 贵阳市城区土壤重金属累积现状研究. *土壤通报*, 2012, 43 (2): 484—489
- Cao Y J, Li X Y, Wang G Z, et al. The status of heavy metals accumulation in soil of Guiyang City (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (2): 484—489
- [14] Argyraki A. Garden soil and house dust as exposure media for lead uptake in the mining village of straton, Greece. *Environmental Geochemistry and Health*, 2014, 36 (4): 677—692
- [15] Chabukdhara M, Nema A K. Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: Probabilistic health risk approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 87 (1): 57—64
- [16] Morton-Bermea O, Hernández-Álvarez E, González-Hernández G, et al. Assessment of heavy metal pollution in urban top soils from the metropolitan area of Mexico City. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 101 (3): 218—224
- [17] 广西简介. *中国西部*, 1994 (2): 4—7
- A general survey of Guangxi (In Chinese). *Western China*, 1994 (2): 4—7
- [18] 桂华. 我国有色金属工业产业结构现状分析——铅锌工业现状分析. *有色金属工业*, 1999 (7): 7—9
- Gui H. The analysis of the state of nonferrous industry mix in China (In Chinese). *Nonferrous-metal Industry*, 1999 (7): 7—9
- [19] 陈喜峰, 彭润民. 中国铅锌矿资源形势及可持续发展对策. *有色金属*, 2008, 60 (3): 129—132
- Chen X F, Peng R M. Pb-Zn metal resources condition and strategy for Pb-Zn metals industry sustainable development in China (In Chinese). *Nonferrous Metals*, 2008, 60 (3): 129—132
- [20] 何海洲, 杨志刚, 李水如, 等. 广西优势矿产资源利用现状及保障程度分析. *中国矿业*, 2014, 23 (11): 40—57
- He H Z, Yang Z G, Li S R, et al. Analysis of the utilization status and their guarantee level of superiority mineral resources in Guangxi (In Chinese). *China Mining Magazine*, 2014, 23 (11): 40—57
- [21] 胡世任. 广西通志有色金属工业志. 4. 南宁: 广西人民出版社, 1994
- Hu S R. Guangxi annals Non-ferrous metals industry (In Chinese). 4. Nanning: Guangxi People's Publishing House, 1994
- [22] 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价. *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 (In Chinese). *Journal of Guilin University of Technology*, 2014, 34 (3): 554—559
- [23] 唐成, 宋同清, 杨钙仁, 等. 大环江两岸农田重金属污染现状及健康风险评价. *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 (In Chinese). *Research of Agricultural Modernization*, 2013, 34 (5): 613—616
- [24] 中国地质科学院地质研究所. 中国黑色有色金属矿产图集. 北京: 地质出版社, 1996: 165—168
- Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. China black non-ferrous metal mineral atlas (In Chinese). Beijing: Geology Publishing House,

- 1996: 165—168
- [25] 黄碧燕, 韦宇宁. 广西南宁市郊区土壤及其农副产品重金属污染状况监测与评价. 农业环境与发展, 2000, 17 (4) : 20—22
- Huang B Y, Wei Y N. Heavy metal pollution condition monitoring and evaluation of soil and agricultural sideline products in Nanning, Guangxi (In Chinese) . Agro-Environment and Development, 2000, 17 (4) : 20—22
- [26] 覃朝科, 易鹂, 刘静静, 等. 广西某铅锌矿区废水汇集洼地土壤重金属污染调查与评价. 中国岩溶, 2013, 32 (3) : 318—324
- Qin C K, Yi Y, Liu J J, et al. Investigation and evaluation on heavy metal pollution in the waste water collecting depression in a lead-zinc mine of karst area (In Chinese) . Carsologica Sinica, 2013, 32 (3) : 318—324
- [27] 黄奎贤, 覃柳妹, 吴少珍, 等. 广西河池市重金属污染现状分析与治理对策. 广西科学院学报, 2012, 28 (4) : 320—324+329
- Huang K X, Qin L M, Wu S Z, et al. Situation and remedial measures for heavy metals pollution in Hechi city of Guangxi (In Chinese) . Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2012, 28 (4) : 320—324+329
- [28] 周兴, 宋书巧, 吴欢. 广西刁江流域有色金属矿区尾砂库植物研究. 热带地理, 2003, 23 (3) : 226—230
- Zhou X, Song S Q, Wu H. An investigation of plants on the tailings of abandoned nonferrous mines in the Diaojiang basin of Guangxi (In Chinese) . Tropical Geography, 2003, 23 (3) : 226—230
- [29] 路畅, 王英辉, 杨进文. 广西铅锌矿区土壤重金属污染及优势植物筛选. 土壤通报, 2010, 41 (6) : 1471—1475
- Lu C, Wang Y H, Yang J W. Soil heavy metal pollution and dominant plants selection in Pb-Zn mining areas of Guangxi (In Chinese) . Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41 (6) : 1471—1475
- [30] 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. 地球与环境, 2010, 38 (4) : 495—500
- Xiang M, Zhang G P, Li L, et al. The Characteristics of heavy metals in soil around the Hechi antimony-lead smelter, Guangxi, China (In Chinese) . Earth and Environment, 2010, 38 (4) : 495—500
- [31] 翟丽梅, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 广西环江铅锌矿尾砂坝坍塌对农田土壤的污染及其特征. 环境科学学报, 2008, 28 (6) : 1206—1211
- Zhai L M, Chen T B, Liao X Y, et al. Pollution of agricultural soils resulting from a tailing spill at a Pb-Zn mine: A case study in Huanjiang, Guangxi Province (In Chinese) . Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28 (6) : 1206—1211
- [32] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法. 地理学报, 1997, 52 (2) : 90—98
- Zhang C S, Zhang S, He J B. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjing River system-Geostatistics method (In Chinese) . Acta Geographica Sinica, 1997, 52 (2) : 90—98
- [33] 成杭新, 杨忠芳, 侯青叶, 等. 表层土壤元素背景值研究方法探索. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26 (S1) : 446—447
- Cheng H X, Yang Z F, Hou Q Y, et al. Research methods to explore Surface soil element background values (In Chinese) . Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26 (S1) : 446—447
- [34] 唐献民. 广西有色金属工业做强做大的思考. 2008 (太原) 首届中西部十二省市自治区有色金属工业发展论坛. 太原, 2008: 20—24
- Tang X M. The thinking of stronger about Guangxi nonferrous metals industry. 2008 (Taiyuan) The first BBS about non-ferrous metals industry development including 12 provinces autonomous regions in the Midwest (In Chinese) . Taiyuan, 2008: 20—24
- [35] 杨斌, 彭省临, 李水如, 等. 广西有色金属成矿系列与成矿区带. 矿产与地质, 2007, 21 (1) : 8—11
- Yang B, Peng S L, Li S R, et al. Metallogenic series and metallogenic belt of nonferrous metals in Guangxi (In Chinese) . Mineral Resources and Geology, 2007, 21 (1) : 8—11
- [36] Wang X W, Lang L S, Li Y H, et al. Estimation of lead and zinc emissions from mineral exploitation based on characteristics of lead/zinc deposits in China. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21 (11) : 2513—2519
- [37] 胡清菁, 张超兰, 靳振江, 等. 铅锌矿尾砂重金属污染物对不同土地利用类型土壤性质影响的典范对应分析. 岩矿测试, 2014, 33 (5) : 714—722
- Hu Q J, Zhang C L, Jin Z J, et al. Canonical correspondence analysis for soil properties and heavy metal pollution from Pb-Zn Mine Tailings in different land use types (In Chinese) . Rock and Mineral Analysis, 2014, 33 (5) : 714—722
- [38] Johnson D B. Chemical and microbiological characteristics of mineral spoils and drainage waters at abandoned coal and metal mines. Water, Air and Soil

- Pollution, 2003, 3 (1): 47—66
- [39] Nikolaidis C, Zafiriadis I, Mathioudakis V, et al. Heavy metal pollution associated with an abandoned lead-zinc mine in the Kirki region, NE Greece. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 85 (3): 307—312
- [40] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, et al. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China. *Science of the Total Environment*, 2010, 408 (4): 726—733
- 附录 表1广西部分地区土壤铅含量数据来源文献清单**
- (1) 刘芳, 兰翠玲, 黄科瑞, 等. 广西百色不同功能区土壤重金属污染与来源. *地球与环境*, 2012, 40 (2): 232—237
- (2) 张新英, 刘勇, 吴浩东, 等. 广西河池大环江板力村近岸农田重金属污染分析. *农业环境科学学报*, 2010, 29 (S1): 80—83
- (3) 谭勇壁. 矿区周边重金属污染农田发展桑树种植产业的可行性研究. 南宁: 广西大学, 2008
- (4) 蒋越华, 黎宁. 柳州市某矿区周边土壤重金属污染评价. *农业研究与应用*, 2013 (3): 31—34
- (5) 黄科瑞, 刘芳, 张金磊, 等. 百色不同功能区土壤重金属形态分布及其生态风险评价. *广东农业科学*, 2013 (11): 165—168
- (6) 刘宝庆. 南宁市城区土壤重金属污染状况研究. 广西大学: 2004
- (7) 莫莉萍, 林清, 谢晓聪, 等. 南宁市公园绿地土壤重金属含量与潜在生态风险评价. *广西师范学院学报 (自然科学版)*, 2011, 28 (S1): 1—4
- (8) 李金城, 尹仁湛, 罗亚平, 等. 广西大新锰矿区土壤重金属污染评价. *环境科学与技术*, 2010, 33 (7): 183—185+190
- (9) 王素娟, 李正文, 廖秋佳, 等. 广西矿区土壤镉、铅污染状况研究. *生态科学*, 2008, 27 (1): 50—54
- (10) 刘永轩, 黄泽春, 蹇丽, 等. 广西刁江沿岸土壤As, Pb和Zn污染的分布规律差异. *环境科学研究*, 2010, 23 (4): 485—490
- (11) 李杰, 陈彪, 刘枝刚, 等. 贵港城区土壤重金属的空间分布特征及来源解析. *南方国土资源*, 2013 (4): 29—32
- (12) 陈春强, 邓华, 黄芳芳. 广西桂平锰矿区土壤重金属含量及形态分析. *广西师范大学学报 (自然科学版)*, 2014, 32 (4): 108—114
- (13) 黄芳芳. 广西桂平锰矿露天矿区的生态环境与治理修复研究. 桂林: 广西师范大学, 2011
- (14) 赖燕平, 李明顺, 杨胜香, 等. 广西八一锰矿区土壤和主要农作物重金属含量的研究. *矿产与地质*, 2006, 20 (6): 651—655
- (15) 杨胜香. 广西锰矿废弃地重金属污染评价及生态恢复研究. 桂林: 广西师范大学, 2007
- (16) 胡玉平, 王双飞, 梁晓丽, 等. 南宁市典型工业区土壤重金属污染状况研究. *广西轻工业*, 2008 (12): 109—110
- (17) 赵仕花, 陈晓白, 劳普兰. 玉林市典型工业区重金属铅污染的调查研究. *玉林师范学院学报*, 2009, 30 (5): 60—63
- (18) 陈振威. 广西百色市右江区水果产地土壤重金属含量及评价. *中国园艺文摘*, 2013 (11): 22—23
- (19) 唐建生. 桂中岩溶区铁锰结核土的重金属富集特征及对旱地作物毒害研究. 北京: 中国地质大学, 2011
- (20) 凌乃规. 广西不同类型农田土壤重金属含量状况分析. *农业环境与发展*, 2010 (4): 91—94
- (21) 黄玉溢, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 广西稻田土壤重金属污染评价. *安徽农业科学*, 2013, 41 (26): 10648—10649+10852
- (22) 张敏, 周莉, 曹建华, 等. 桂林毛村土壤钙、锌、铅有效性及pH关系初探. *广西农业科学*, 2008, 39 (6): 796—799
- (23) 黄碧燕. 桂林市菜地土壤重金属含量及其风险评价. *广西农学报*, 2010, 25 (4): 34—36
- (24) 何方永, 曾其国, 彭培好. 广西罗汉果产区土壤铅的地球化学特征. *河南科技大学学报 (自然科学版)*, 2014, 35 (3): 73—77+78—79
- (25) 侯明. 桂林市郊土壤中铅的形态及含量. *桂林工学院学报*, 2006, 26 (1): 93—97
- (26) 陈佩琼, 杨敏, 朱秀凤, 等. 南宁河洲生态农业规划区土壤重金属污染评价. *广西农业生物科学*, 2004, 23 (1): 72—75
- (27) 张超兰, 白厚义. 南宁市郊部分菜区土壤和蔬菜重金属污染评价. *广西农业生物科学*, 2001, 20 (3): 186—189+205
- (28) 陈桂芬, 黄武杰, 张丽明, 等. 南宁市菜地土壤及蔬菜重金属污染状况调查与评价. *广西农业科学*, 2004, 35 (5): 389—392
- (29) 秦波, 白厚义, 陈秀娟, 等. 南宁市郊菜园土壤重金属污染评价. *农业环境科学学报*, 2006, 25 (S1): 45—47
- (30) 秦波. 南宁市郊菜园土壤及蔬菜重金属污染的现状与评价. 南宁: 广西大学, 2002
- (31) 谢文娟, 白厚义, 韦璐阳, 等. 广西武鸣华侨生态农业规划区土壤重金属污染评价. *广西林业科学*, 2004, 33 (2): 67—70
- (32) 刘展华, 唐振柱, 黄江平, 等. 2008年广西铅锌矿区周边农村环境铅污染现状调查. *环境与健康杂志*, 2009, 26 (8): 708—710

- (33) 吕晶晶, 张新英, 吴玉峰, 等. 广西大新县铅锌矿区某屯耕地土壤重金属污染特征及评价. 广西师范学院学报(自然科学版), 2013, 30(4): 51—54
- (34) 周永章, 宋书巧, 杨志军, 等. 河流沿岸土壤对上游矿山及矿山开发的环境地球化学响应——以广西刁江流域为例. 地质通报, 2005, 24(10-11): 945—951
- (35) 凌乃规, 何金富, 黄碧燕, 等. 刁江流域土壤铅对水稻和小白菜的污染影响研究. 广西农业科学, 2008, 39(4): 507—510
- (36) 宋书巧, 吴浩东, 蓝唯源. 刁江沿岸土壤重金属污染状况及土地的合理利用模式. 环境与健康杂志, 2008, 25(4): 317—319
- (37) 胡清菁. 铅锌尾矿砂污染对不同土地利用类型土壤性质的影响. 南宁: 广西大学, 2014
- (38) 项萌, 张国平, 李玲, 等. 广西铅锡矿冶炼区表层土壤重金属污染的分布规律. 矿物学报, 2011, 31(2): 250—255
- (39) 袁永强, 刘丛强. 广西某地金属冶炼废水外溢对农田土壤的污染特征. 环境科学, 2011, 32(11): 3312—3317
- (40) 胡忠俊. 大环江沿岸土壤重金属污染对当地植被及植物多样性的影响研究. 南宁: 广西师范学院, 2010
- (41) 宋宁宁, 王芳丽, 唐世荣, 等. 基于梯度薄膜扩散技术的广西环江流域桑田土壤中铅的生物有效性研究. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1317—1323
- (42) 王德光, 宋书巧, 蓝唯源. 环江县大环江沿岸土壤重金属污染与蔬菜安全评价. 农业环境与发展, 2008(2): 8—11
- (43) 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. 南宁: 广西大学, 2013
- (44) 金枚. 大厂矿区农产品安全性分析. 南宁: 广西师范学院, 2013
- (45) 刘勇. 广西某矿区农用地土壤重金属含量分析与污染评价. 南宁: 广西师范学院, 2012
- (46) 张丽娥, 莫招育, 覃健, 等. 广西大厂矿区下游农村土壤重金属污染及儿童健康风险评估. 环境与健康杂志, 2014, 31(6): 512—516
- (47) 李艺, 李明顺, 赖燕平, 等. 广西思荣锰矿复垦区的重金属污染影响与生态恢复探讨. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2172—2177

Characterization of Pb Contents in Typical Soils of Guangxi and Risk Assessment Based on Literature Data

SONG Bo TIAN Meiling CHEN Tongbin[†] LU Sufen YU Yuanyuan

(College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract 【Objective】 This paper is to illustrate the status quo of soil lead contents and potential risk of soil lead in Guangxi. 【Method】 By searching various important databases (China National Knowledge Infrastructure, Wanfang Data, Vip, Science Direct, Web of Science, Springer, etc.) for papers on soil lead contents in Guangxi published at home and abroad since the 1990s. A total of 57 papers were retrieved involving 5 807 soil samples from 20 areas in Guangxi. As the areas covered varied in background and function, the soil samples were sorted into five groups (clean soil, soil from urban zone, soil from industrial and mining zone, soil from farmland in non-industrial and mining zone, and soil from farmland in industrial and mining zone). To make the data comparable with the prevailing criteria of the Standard for Soil Environment Quality (GB15618-1995), means in the target papers tallying with normal distribution or data acquired from the tables and/or figures in the papers were collated. 【Result】 Results show that lead concentration in the soil of Guangxi varied in the range of 18.80 ~ 6 350 mg kg⁻¹, with geometric mean being 147.9 mg kg⁻¹ or 7.86 times as high as the background value. Obviously it was lower than Grade II Criterion of the Standard for Soil Environment Quality (GB15618-1995). The soil in the Siding lead-zinc mining area was 6 350 mg kg⁻¹ or the highest in lead content, with pollution accumulation index reaching up to 278.5. Soils in different function zones varied sharply in soil lead content distribution. The lead content in clean soil, soil in urban area, soil in industrial and mining zone, soil in farmland of non-industrial and mining zone and soil in farmland of industrial and mining zones was 26.17, 32.88, 244.5, 42.93 and 347.6 mg kg⁻¹,

respectively, or 1.391, 1.747, 12.99, 2.281 and 18.47 times, respectively, the background value in Guangxi. Soil lead content in clean soil, soil in urban area, and soil in farmland of non-industrial and mining zone was moderate in spatial variability, but in the other two groups, it was high in spatial variability. The coefficient of variation (CV) of the soil in Guangxi as a whole was 220.8%. Of the total soil samples, 23% were > 1 in lead pollution index and about 7% fell into the category of “heavily polluted” . The heavily polluted soil samples were collected mainly from Nandan, Rongan, etc., where the mining activities were very intensive. 【Conclusion】 Based on the distribution of lead mines and areas not covered by the survey, it is suggested that positive management measures be adopted in those highly polluted areas, such as Nandan, Jinchengjiang, Huanjiang, Rongan, Yangshuo, Chongzuo, etc., and further in-depth investigations be made of the areas relatively rich in lead and zinc resources, such as Daxin, Wuxuan, Cenxi and Hezhou.

Key words Soil; Lead; Risk assessment; Guangxi

(责任编辑：檀满枝)