

郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 等. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1875–1883.

GUO Xiao-dong, SUN Qi-fa, ZHAO Yong-sheng, et al. Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1875–1883.

珲春盆地农田重金属分布特征及源解析

郭晓东^{1,2}, 孙岐发¹, 赵勇胜², 蔡 贺¹

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 沈阳 110024; 2. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026)

摘 要:为分析珲春盆地农田重金属污染状况及其来源, 采集土壤样品分析其砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、铬(Cr)、镍(Ni)和镉(Cd)含量, 开展相关分析、主成分分析等多元统计分析和富集指数分析。结果表明, 珲春盆地农田中As、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd的平均含量分别为9.09、0.06、20.17、23.34、68.25、65.02、22.91、0.12 mg·kg⁻¹。按照中国土壤环境质量标准(GB 15618—1995), 珲春盆地土壤重金属污染不明显, 所有数值都小于Ⅱ级质量标准。按照吉林省土壤背景值评价, 除Pb和Zn外, 其余重金属的平均值都超过当地背景值, 其中Hg较为严重, 区域平均值为背景值的1.56倍。按富集指数评价, 超过20%的样品Hg元素为重度污染, 其他元素重度污染样品数都小于10%。研究表明: Hg具有明显的人为源特征, 主要来源于电厂、居民煤炭燃烧、煤炭开采运输扬尘、农药化肥等。其他元素在区域上为自然源属性, Cu、Zn、Cd高富集区可能受工农业生产以及交通运输的影响, As受污水灌溉和农药化肥影响, Pb受交通运输车辆尾气等的影响, Cr受煤矿开采与运输以及煤炭燃烧等的影响。

关键词:珲春盆地; 重金属; 富集指数; 源解析

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)09-1875-09 doi:10.11654/jaes.2017-1718

Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China

GUO Xiao-dong^{1,2}, SUN Qi-fa¹, ZHAO Yong-sheng², CAI He¹

(1. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110024, China; 2. Environment and Resource College, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: In order to understand the characteristics of the pollutants and the sources of heavy metals in the Hunchun basin farmland soil, soil samples were collected and the contents of As, Hg, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, and Cd were measured. The enrichment factor (EF) was calculated. Multiple statistical analyses including correlation analysis and principal component analysis was executed. The results showed that the mean contents of As, Hg, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, and Cd were 9.09, 0.06, 20.17, 23.34, 68.25, 65.02, 22.91 mg·kg⁻¹, and 0.12 mg·kg⁻¹ respectively in the Hunchun basin. The values of the mean content were not above the criterion by the China Soil Environmental Quality Standard (GB15618—1995, CSEQS). The contents of all the heavy metals were lower than the limit by CSEQS. The contents of Pb and Zn were lower than the background values of Jilin Province. However, the contents of the other heavy metals exceeded the background values, particularly for Hg. More than 20% of the samples were significantly polluted by Hg, according to the EF, and less than 10% by other elements. The main sources of Hg in the Hunchun basin were artificial activity such as the lighting of coal fires by power stations and loose residents, dusts arising from coal transport, pesticides, and fertilizers. The other heavy metals reach along with the parent material in the whole area. However, in the high enrichment area, the sources of Cu, Zn, and Cd were farming, communications, and transportation; the sources of As were sewage irrigation, pesticides, and fertilizers; the sources of Pb were communication and transportation; the sources of Cr were dusts from the mining, transport, and burning of coal.

Keywords: Hunchun basin; heavy metals; enrichment factor; resource

收稿日期: 2017-12-15 录用日期: 2018-03-12

作者简介: 郭晓东(1981—), 男, 河南襄县人, 高级工程师, 长期从事水土环境调查评价研究。E-mail: 287684839@qq.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160265)

Project supported: China Geological Survey Project(DD20160265)

农田土壤重金属污染已经成为重要的环境问题,近年来受到国内外学者的广泛关注。重金属在土壤中的富集,不仅破坏土壤生态环境,而且通过食物链对人体健康造成危害^[1-2]。重金属污染源解析可以帮助人们更好地认识土壤重金属的富集机制,制定防治策略。重金属来源包括自然来源和人为来源,自然来源即土壤成土母质、土壤结构等^[3-4];人为来源主要为工业活动、机动车排放、农业生产等^[5-6]。多元统计分析和富集指数法常被用来进行污染源解析。多元统计分析方法主要有聚类分析和主成分分析等方法^[7-8]。

近年来国内外学者开展了大量关于土壤重金属累积特征、重金属污染评价以及源解析等方面的研究^[9-12]。Yang等^[13]在武汉市青山区、Neda等^[14]在伊朗砖厂、Hu等^[15]在黄海沿岸的蔬菜大棚种植区,采用主成分分析、聚类分析等方法结合空间分布特征等开展了土壤重金属污染评价和源解析。这些研究区多集中于重要城市和工矿企业集中区域。珲春市是我国图们江国际合作示范区,珲春盆地是吉林东部山区重要的盆地,该地区社会经济快速发展,查明区域土壤重金属分布特征并进行源解析对于开展特色农业和保护耕地具有重要意义,但该地区只做过少量土壤重金属含量分析,未深入进行源解析。本文以珲春盆地这一完整的小型平原盆地作为研究区,通过采集区内表层土壤样品,分析砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、铬(Cr)、镍(Ni)和镉(Cd)等元素在土壤中的含量,开展多元统计分析和富集指数分析,结合盆地微地貌、风向、城市布局以及交通等因素,综合分析区域重金属来源。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

珲春盆地位于吉林省东部珲春市中部区域,邻近朝鲜和俄罗斯。属中温带近海洋性季风气候区,多年平均降水量618 mm,蒸发量1300 mm。盆地内珲春河自NE-SW穿流而过,河流两侧一级阶地和二级阶地近似平行河道呈条带状分布,二级阶地外缘接古近系波状台地。研究区西北和东南部地势逐渐升高,多为低山丘陵^[16]。

珲春市是我国图们江国际合作示范区,经济发展迅速,主要工农业及人口都集中在珲春盆地。区内煤炭开采时间长,且具较大规模,年产400~500万t原煤。燃煤电厂位于研究区西北部,装机容量66 kW,

于上世纪90年代并网发电。农业种植玉米和水稻。近年来旅游商贸快速发展,人类活动不断加剧。土壤重金属污染风险加大,但是该地区尚未进行过相关的评价,土壤重金属污染来源不清^[17-18]。

1.2 样品采集与检测

采样点主要布置在农田,少量点在果园和荒地,共采集310组(图1)。采样前先撇去地表各类杂物,采集0~15 cm土层的混合土样装入布袋,记录坐标和周围环境情况,样品在阴凉处风干,并用木槌打碎,过80目尼龙筛,称取200 g装入纸样袋送交吉林省地质科学研究所检测。实验室内将样品混匀取100 g采用玛瑙无污染样品加工机研磨至200目,分别装入样品袋测试。As和Hg采用原子荧光法(AFS),Ni、Cd和Pb采用等离子质谱法(ICP-MS),Cr、Cu和Zn等采用荧光光谱法(XRF-X)。质量控制按照多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)要求执行^[19],分析过程中,每批次样品中随机插入土壤一级标准物质(GBW07424)与样品一起分析,计算每个测定值与标准值之间的对数差,要求准确度小于0.10,按照样品总数随机取5%密码测试,计算原始值与重复值之间相对双差,小于40%为合格。

1.3 数据处理

为研究区域土壤重金属分布特征,开展重金属含量空间分布特征分析,以MapGis6.7软件作为平台,采

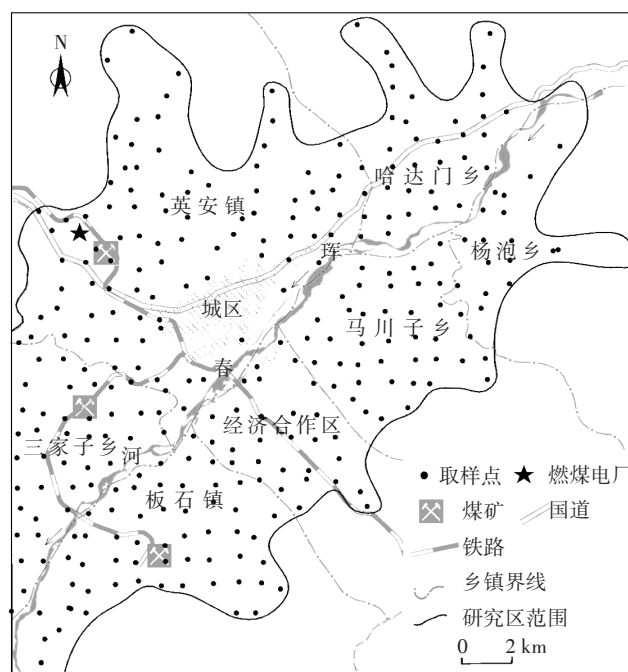


图1 取样点分布图

Figure 1 Location of the samples

用Kriging插值方法进行空间分析。主成分分析则将较多的数据减少为少数主要因子,且不丢失有用信息,根据重金属的排放特点分析重金属来源^[20]。相关性分析和主成分分析采用SPSS 22.0软件。

富集指数法常用来研究土壤重金属来源,人类活动造成各类土壤重金属含量的增加,需要含量丰富、化学性质稳定,受人为因素影响小,与污染元素具有较好相关性的元素做参比元素。Mn元素化学性质比较稳定且含量丰富,较少受人为因素的影响,多为自然来源^[9,21],与污染元素具有较好相关性,而且本地区除采煤活动较多外,其他工业活动较少,可以作为参比元素。富集指数法公式如下:

$$EF = \frac{(\frac{C}{Mn})_{\text{sample}}}{(\frac{C}{Mn})_{\text{background}}}$$

式中:C表示变量的含量;Mn表示Mn的含量; $(\frac{C}{Mn})_{\text{sample}}$ 表示样品中重金属含量; $(\frac{C}{Mn})_{\text{background}}$ 表示地球化学背景值中重金属含量,本研究背景值采用中国土壤环境背景值中吉林省土壤背景值^[22],其中Mn是 $636 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其他重金属见表1。 $EF < 1$,为无污染; $1 < EF < 2$,为轻微污染; $2 < EF < 5$,为中度污染; $5 < EF < 20$,为重度污染; $20 < EF < 40$,为严重污染; $EF > 40$ 为极度污染^[23]。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量特征

从表1看出,8种重金属元素平均值大于背景值的元素有6种,只有Pb和Zn小于背景值,6种重金属中超过背景值程度最大为Hg(1.56倍)、其次为Cr(1.39倍),其余为0.81~1.18倍。As在经济合作区含量最高,达到 $10.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是背景值1.29倍;Hg在马川子乡含量最高是背景值的2.27倍;Cu、Pb、Zn含量最高乡镇都为英安镇,其平均值分别为吉林省背景值的1.37、0.91倍和0.92倍;Cr、Ni含量最高的乡镇为哈达门乡,分别为背景值的1.72倍和1.22倍。变异系数(CV)反映了各项指标的离散程度,全区中Hg离散情况剧烈,CV值最大为60%,其余重金属CV在23%~43%之间。推断Hg存在明显的富集,Hg在英安镇的CV达到76%,离散情况与其他地区相比最为突出,表现在英安镇的变异情况比较明显。但是所有元素含量与国家土壤环境质量标准相比^[24],远低于其Ⅱ级标准。研究区主要为工农业区,土壤pH在4.33~7.76

之间,按照国家标准,依照保守性原则,选择Ⅱ级标准中不同pH条件和农田类型中最严苛的标准进行评价。

2.2 土壤重金属空间分布特征

从图2可以看出,As、Cu、Pb元素高值区分布较为广泛,占研究区大部分面积,其余元素高值区面积较小。As和Hg在城区、各乡镇的人口聚居区以及煤矿开采区含量较高。Pb在邻近珲春河两岸含量较低,外侧含量较高,而Ni元素在邻近河流两侧含量则明显较高,说明二者受到河流或者地貌的影响。所有元素在城区含量都较高,说明城区人类活动剧烈,各类重金属元素都存在富集的情况。

2.3 富集指数法评价结果

从图3可以看出,各重金属元素大部分样点 $EF < 2$,只有Hg中度污染级别($EF > 2$)的样点数大于20%,并有个别点达到重度污染。Pb和Zn的没有 $EF > 2$ 的样点,处于无污染状态的样点占比接近80%,其余为轻微污染。As、Cu、Cr和Cd大部分样点为无污染或轻微污染,只有不到10%的样点为重度污染。

由图4可知Hg中度和重度污染区具有较大面积,主要分布在城区、马川子以及三家子和板石等矿区。Cu和Cd的中度污染区分布较一致,主要分布在城区和英安电厂以东地区。As和Cr中度污染区分布面积较小,零星分布。

3 讨论

元素间的相关性能够反映它们是否具有同源性,高相关性元素可能具有相同来源^[25]。从Pearson相关性分析结果(表2)可以看出,Ni和Zn、Cr、Cu和Zn、Cr、Ni、Cd相关系数 > 0.5 ,且相关性极显著。有较明显的相关性,其他元素间相关系数较小。

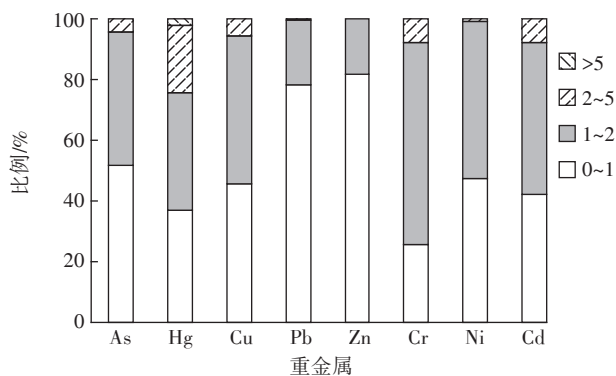


图3 土壤重金属富集指数结果分级图

Figure 3 The results of enrichment factor classes of heavy metals

表1 研究区土壤重金属含量统计结果($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 Heavy metals content of soil in Hunchun basin($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

行政区		As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd
板石镇	最大值	17.69	0.17	48.61	41.72	100.28	155.98	42.24	0.23
	最小值	1.44	0.02	4.47	10.27	20.59	16.72	6.90	0.04
	平均值	9.07	0.07	17.47	21.23	64.03	56.40	20.90	0.10
	标准差	3.52	0.03	7.47	5.33	14.30	20.25	6.81	0.04
	CV/%	39	48	43	25	22	36	33	36
哈达门乡	最大值	17.48	0.07	34.39	37.32	97.33	149.04	40.69	0.35
	最小值	4.33	0.01	10.34	12.06	45.16	33.70	11.43	0.06
	平均值	9.08	0.04	20.32	21.77	67.56	80.32	26.12	0.13
	标准差	3.46	0.01	6.06	6.14	13.41	23.43	7.12	0.05
	CV/%	38	40	30	28	20	29	27	40
经济合作区	最大值	15.34	0.16	29.71	32.06	85.49	105.28	53.84	0.20
	最小值	5.75	0.03	11.48	14.69	49.48	41.94	15.25	0.03
	平均值	10.36	0.07	19.19	24.18	64.50	64.42	23.61	0.10
	标准差	2.42	0.03	3.96	4.35	10.44	13.15	7.34	0.04
	CV/%	23	39	21	18	16	20	31	36
马川子乡	最大值	16.11	0.16	41.68	32.02	137.20	91.43	37.71	0.27
	最小值	5.20	0.03	10.81	17.22	45.47	26.16	13.74	0.05
	平均值	10.34	0.08	21.96	24.89	70.46	63.50	24.43	0.12
	标准差	2.52	0.03	5.48	4.01	17.87	13.32	6.24	0.05
	CV/%	24	41	25	16	25	21	26	42
三家子乡	最大值	14.52	0.13	36.86	29.28	99.36	101.04	42.70	0.20
	最小值	2.78	0.01	6.07	12.98	34.60	24.52	9.51	0.05
	平均值	7.93	0.05	16.57	20.33	64.79	57.13	20.90	0.12
	标准差	2.85	0.03	6.67	3.86	16.44	19.94	7.85	0.04
	CV/%	36	63	40	19	25	35	38	32
杨泡乡	最大值	16.18	0.10	31.48	29.82	111.75	96.55	38.21	0.23
	最小值	7.26	0.02	12.73	14.23	47.61	28.13	9.86	0.05
	平均值	9.55	0.05	19.45	22.60	67.62	62.64	22.77	0.11
	标准差	1.93	0.02	5.07	4.83	14.28	19.11	8.26	0.04
	CV/%	20	47	26	21	21	31	36	40
英安镇	最大值	16.73	0.24	49.97	45.67	146.98	134.68	38.80	0.32
	最小值	3.20	0.02	12.53	14.65	45.10	38.80	13.64	0.04
	平均值	8.56	0.06	23.48	26.07	73.69	70.04	23.10	0.13
	标准差	2.56	0.04	7.97	5.03	19.08	19.55	5.55	0.06
	CV/%	30	76	34	19	26	28	24	46
全区	最大值	17.69	0.24	49.97	45.67	146.98	155.98	53.84	0.35
	最小值	1.44	0.01	4.47	10.27	20.59	16.72	6.90	0.03
	平均值	9.09	0.06	20.17	23.34	68.25	65.02	22.91	0.12
	标准差	2.96	0.04	7.19	5.35	16.56	20.39	6.98	0.05
	CV/%	33	60	36	23	24	31	30	43
吉林省背景值		8	0.037	17.1	28.8	80.4	46.7	21.4	0.099
国家标准Ⅱ级		20	0.3	50	250	200	150	40	0.3

主成分分析能够从众多因子中提出重要的信息,本项目提取出的3个主成分特征值占总方差的累积

贡献值达到80.2%(表3),反映了土壤重金属包含的主要信息。从因子荷载图(图5)看出第一主成分中

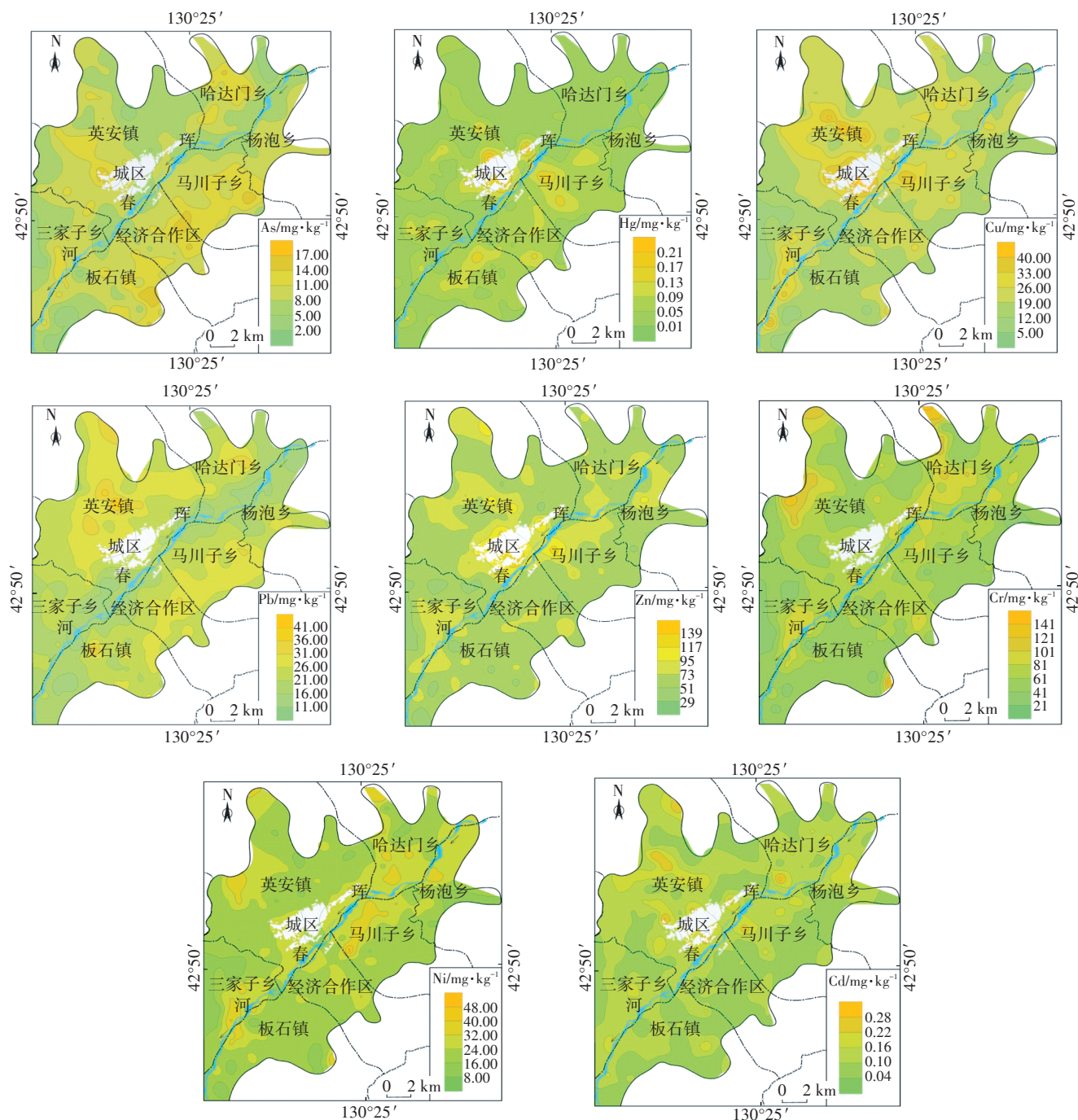


图2 研究区土壤重金属空间分布图

Figure 2 Spatial distribution maps of heavy metals content in soils

Zn、Cd、Cu 和 Hg 具有较高的荷载,第二主成分中 Ni 和 Cr 为主要荷载,第三主成分主要反映了 As 和 Pb 的荷载。

从富集指数分布情况看,Cu、Zn 和 Cd 具有相同的分布特征,相关性较高,Cu 与 Zn 具有同源性,3 种元素可能具有相同的来源。Zn 元素富集指数总体较小,80% 的样点为无污染区域,而且变异系数较小,各

乡镇变异系数为 16% ~ 25%,说明空间变异性不很明显,说明 Zn 在区域上具有自然源属性。但是 Cu、Zn 和 Cd 富集指数存在一些高值区,这些区域可能受人为活动影响,主要分布珲春市城区以及城区以北人类活动比较剧烈的地区,表现为比较强烈的人为源属性,可能受到工农业生产以及交通运输等影响。As 元素强富集区远离城市区域,且分布比较分散,主要

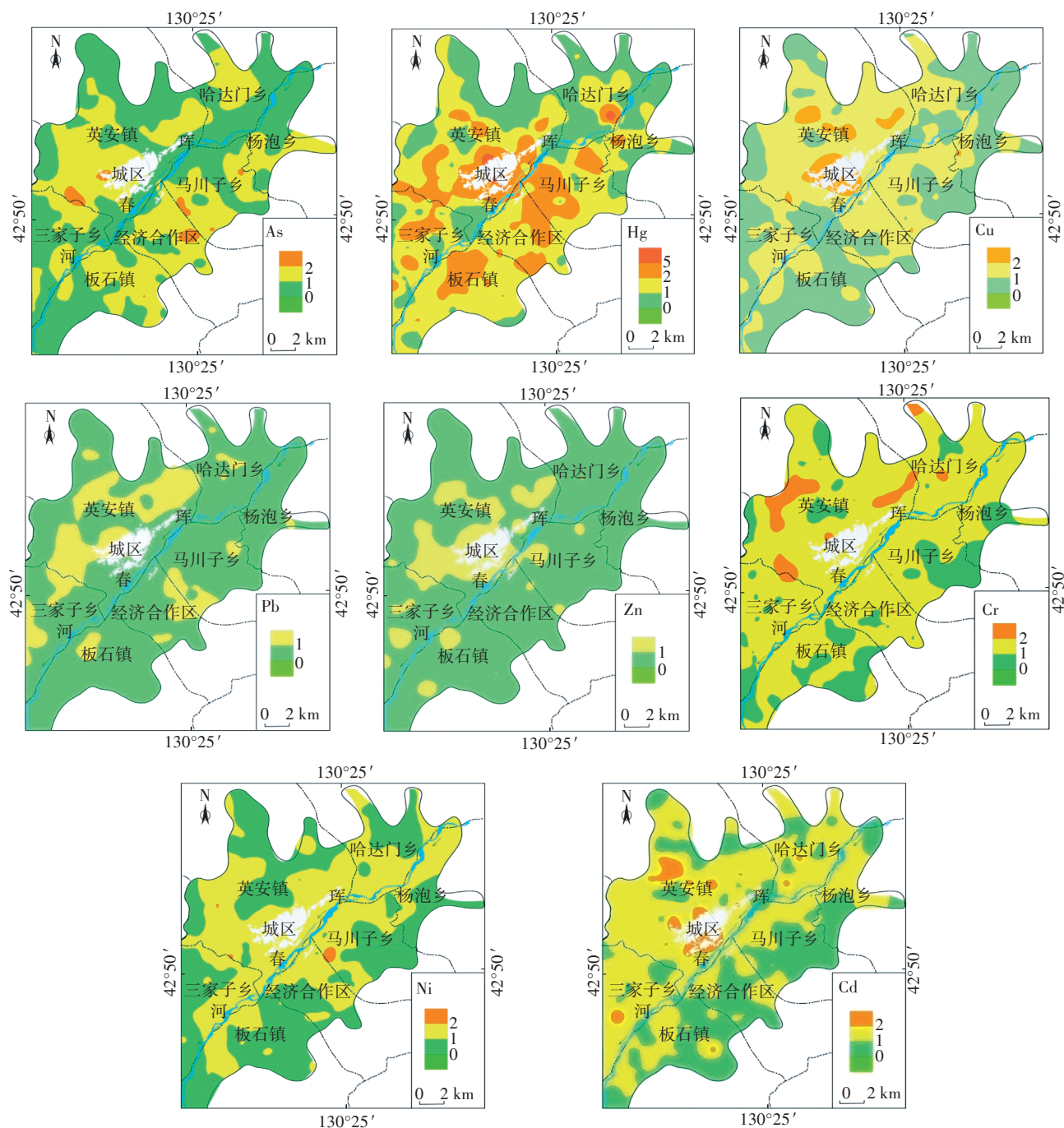


图4 研究区重金属富集指数结果分布图

Figure 4 The distribution of enrichment factor results of heavy metals

位于农业区域,可能是受农业活动中污水灌溉和农药化肥影响。Pb元素CV值较小,空间变异不很明显,整体富集指数水平较低,表现出自然源属性,但是在城市区以及北部国道线附近等部分地区,仍然超过吉林省背景值,这些区域Pb可能受交通运输以及汽车尾气排放等的影响。Cr和Ni元素研究区整体含量较高,大部分乡镇平均值都超过吉林省背景值,但各地

区CV都较小且较平均,分别为21%~36%和26%~38%,区域性变异不明显,具有较为明显的自然源属性。但Cr在英安煤矿、大唐电厂以及八连城煤矿附近都有高富集区,说明这些地区受到煤矿开采与运输以及煤炭燃烧等的影响。

研究区样点中Hg元素平均含量超过吉林省背景值达到1.56倍,变异系数达到60%,空间变异强烈,特

表2 土壤重金属各元素含量间的相关系数矩阵

Table 2 Matrix of correlation coefficient among heavy metals contents

	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd
As	1							
Hg	0.177**	1						
Cu	0.395**	0.303**	1					
Pb	0.357**	0.173**	0.429**	1				
Zn	0.169**	0.460**	0.778**	0.213**	1			
Cr	0.153**	0.067	0.550**	-0.022	0.470**	1		
Ni	0.187**	0.150**	0.585**	-0.067	0.548**	0.883**	1	
Cd	0.075	0.338**	0.584**	0.146**	0.733**	0.344**	0.367**	1

注:**. 在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的。

表3 珲春盆地农田土壤重金属最大方差法旋转成分矩阵

Table 3 Rotated component matrix according to varimax normalized for soils

重金属	旋转变换前因子			旋转变换后因子		
	1	2	3	1	2	3
As	0.53	0.44	0.62	-0.04	0.36	0.85
Hg	0.52	0.51	-0.26	0.59	-0.13	0.48
Cu	0.92	0.08	-0.04	0.67	0.50	0.41
Pb	0.38	0.76	0.20	0.20	-0.13	0.84
Zn	0.86	-0.04	-0.37	0.85	0.37	0.13
Cr	0.71	-0.54	0.34	0.18	0.94	0.02
Ni	0.75	-0.51	0.30	0.25	0.93	0.04
Cd	0.69	-0.08	-0.56	0.86	0.20	-0.06
累积负荷/%	47.82	67.89	82.20	30.04	59.13	82.20

别是在英安镇达到76%,富集指数比其他元素明显较高,大于2的样点超过20%,具有明显的人为源性。富集指数较高的区域多位于城区,以及人口密集区。研究表明Hg多随空气在风力的作用下迁移,并以干湿沉降的方式进入土壤^[26]。Hg是燃煤排放的标志物,中国煤炭平均Hg含量0.22 mg·kg⁻¹,煤炭燃烧造成大量Hg进入空气,大部分以气态Hg²⁺的形态存在^[27]。其他形态主要是颗粒态Hg。空气中的Hg随大气迁移并以降尘的方式进入土壤^[28]。Hg的富集受风向的影响较大,研究区内优势风向为西北风,区内燃煤电厂位于研究区西北部(图1),Hg随着大气迁移进入区内中部、南部地区,随着地势的升高,以干湿沉降的方式在地表富集。另外由于电厂烟囱高度的影响,邻近电厂周边并没有明显的Hg的富集,而是在风力的影响下,沿风向在下风向3 km以外出现明显的富集现象,与本研究出现的情况相同^[29-30]。另外居民区内散煤燃烧也是Hg的重要来源,从图4可以看出,

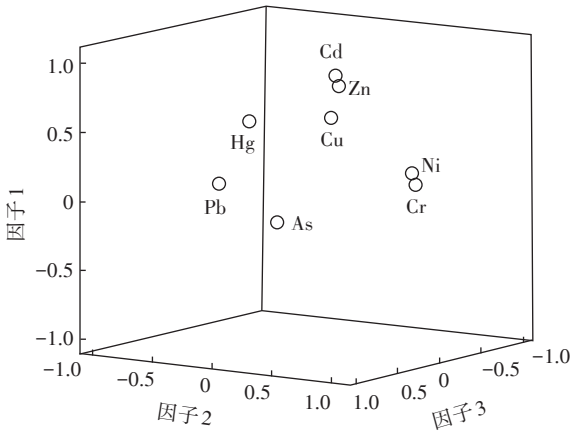


图5 重金属因子荷载图

Figure 5 Loading plots of the heavy metals contents

富集较高的区域都位于村镇等居民区,居民冬季取暖和日常用火常采用传统燃煤方式,没有除尘技术,且烟囱较矮,Hg基本以颗粒态存在,在大气中迁移距离近,通过沉降方式进入土壤^[31]。煤矿开采及运输过程中产生的扬尘也是土壤Hg富集的重要来源。另外Hg富集指数高值区还出现在广大的农业地区,可能受到农业活动中农药化肥等的影响。该地区其他工业活动不发达,Hg的富集受其他工业生产的影响应该较少。

4 结论

- (1)研究区重金属污染程度普遍较轻,未超过国家土壤环境质量Ⅱ级标准。但除Pb和Zn外,As、Hg、Cu、Cr、Ni和Cd的平均值超过了吉林省环境背景值,其中Hg为吉林省背景值的1.56倍,需要高度关注。
- (2)研究区重金属富集指数除Hg外,大部分为无污染或者轻微污染,As、Cu、Cr和Cd接近10%的样点

为重度污染, Pb 和 Zn 无重度污染样点, Hg 重度污染点超过 20%, 重污染区主要位于城区及矿区等地。

(3) 研究区重金属除 Hg 外, 区域上表现为自然源属性, 但是富集指数高值区具有人为源特征, 可能受工农业生产、交通运输以及煤炭燃烧等的影响。而 Hg 具有明显的人为源特征, 主要来源于电厂、居民煤炭燃烧、煤炭开采运输扬尘、农药化肥等。

参考文献:

- [1] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. *Nature*, 1988, 333 (6169): 134-139.
- [2] Arora M, Kiran B, Rani S, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111(4): 811-815.
- [3] Ding Q, Cheng G, Wang Y, et al. Effects of natural factors on the spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 578(6): 577-585.
- [4] Mazured R, Kowalska J, Gasiorek M, et al. Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (SE Poland) by indices of pollution[J]. *Chemosphere*, 2017, 168(6): 839-850.
- [5] 张云, 张宇峰, 胡忻, 等. 南京不同功能区街道路面积尘重金属污染评价与源分析[J]. 环境科学研究, 2010, 23(11): 1376-1381.
ZHANG Yun, ZHANG Yu-feng, HU Xin, et al. Assessment of heavy metal contamination and source identification of dust deposited on roads collected from different land-use zones in Nanjing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(11): 1376-1381.
- [6] 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 等. 基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2756-2762.
SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, et al. Applications of geostatistical analyses and stochastic models to identify sources of soil heavy metals in Wuqing district, Tianjin, China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7): 2756-2762.
- [7] 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2304-2312.
SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, et al. Tracing sources of heavy metals in the soil profiles of drylands by multivariate statistical analysis and lead isotope[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6): 2304-2312.
- [8] Lazhar B, Lotfi M, Tahoora S N, et al. Evaluation of potential health risk of heavy metals in groundwater using the integration of indicator Kriging and multivariate statistical methods[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2017, 4(9): 12-22.
- [9] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属元素的富集特征与来源识别[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 84-88.
WANG Xue-song, QIN Yong. Accumulation and identification of heavy metals in Xuzhou urban topsoil[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(1): 84-88.
- [10] 雷凌明, 喻大松, 陈玉鹏, 等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 88-96.
LEI Ling-ming, YU Da-song, CHEN Yu-peng, et al. Spatial distribution and sources of heavy metals in soils of Jinghui irrigated area of Shaanxi, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 88-96.
- [11] 李娇, 陈海洋, 滕彦国, 等. 拉林河流域土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 226-233.
LI Jiao, CHEN Hai-yang, TENG Yan-guo, et al. Contamination characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Lalin River basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(19): 226-233.
- [12] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 768-774.
XIE Xiao-jin, KANG Jian-cheng, LI Wei-jiang, et al. Analysis on heavy metal concentrations in agricultural soils of Baoshan, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 768-774.
- [13] Yang Yong, Christakos G, Guo Ming-wu, et al. Space-time quantitative source apportionment of soil heavy metal concentration increments[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223(4): 560-566.
- [14] Neda R, Mirzaei R, Saeed M. Determination of heavy metals in surface soils around the brick kilns in an arid region, Iran[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 176(3): 91-99.
- [15] Hu W Y, Huang B, Tian K, et al. Heavy metals in intensive greenhouse vegetable production systems along Yellow Sea of China: Levels, transfer and health risk[J]. *Chemosphere*, 2017, 167(5): 82-90.
- [16] 郭晓东, 赵海卿. 珲春盆地地下水固有脆弱性评价[J]. 节水灌溉, 2014(10): 33-35.
GUO Xiao-dong, ZHAO Hai-qing. Groundwater intrinsic vulnerability assessment in Hunchun basin[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(10): 33-35.
- [17] 郭晓东, 赵海卿. 珲春盆地地下水水化学特征分析[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 1010-1017.
GUO Xiao-dong, ZHAO Hai-qing. Hydrochemical characteristics and correlation analysis of groundwater in Hunchun Basin[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 1010-1017.
- [18] 李月芬, 王冬艳, 刘爽, 等. 珲春中部土壤常量元素地球化学特征[J]. 世界地质, 2008, 27(2): 178-182.
LI Yue-fen, WANG Dong-yan, LIU Shuang, et al. Geochemistry of major elements in soil in central Hunchun of Jilin[J]. *World Geology*, 2008, 27(2): 178-182.
- [19] 多目标区域地球化学调查规范(1:250000)DZ/T 0258—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Multi-purpose regional geochemical survey standard(1:250000)DZ/T 0258—2014[S]. Beijing: China Criterion Press, 2014.
- [20] 林燕萍, 赵阳, 胡恭任, 等. 多元统计在土壤重金属污染源解析中的应用[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 536-542.
LIN Yan-ping, ZHAO Yang, HU Gong-ren, et al. The application of multivariate statistical analysis in the pollution source recognition and analysis of heavy metals in soils[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(4): 536-542.
- [21] 韩培培, 谢俭, 王剑, 等. 丹江口水库新增淹没区农田土壤重

- 金属源解析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8):2437-2443.
- HAN Pei-pei, XIE Jian, WANG Jian, et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soil from new submerged area in Danjiang-kou Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(8):2437-2443.
- [22] 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.
- Environmental Monitoring Institution of China. Background value of soil elements of China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [23] Liu Y, Wang H F, Li X T, et al. Heavy metal contamination of agricultural soils in Taiyuan, China[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(6):901-909.
- [24] 土壤环境质量标准, GB 15618—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- Standard of soil environment quality, GB 15618—1995[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.
- [25] Guo G H, Wu F C, Xie F Z, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(3):410-418.
- [26] 司徒高华, 王飞儿, 何云峰, 等. 燃煤电厂周边土壤中汞的分布和累积研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(3):419-428.
- SITU Gao-hua, WANG Fei-er, HE Yun-feng, et al. Distribution and accumulation of Hg in soil around coal-fired power plants: A review [J]. *Soil*, 2016, 48(3):419-428.
- [27] 冯新斌, 陈玖斌, 付学吾, 等. 汞的环境地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5):105-108.
- FENG Xin-bin, CHEN Jiu-bin, FU Xue-wu, et al. Progresses on environmental geochemistry of mercury[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(5):105-108.
- [28] 蒋靖坤, 郝吉明, 吴 焱, 等. 中国燃煤汞排放清单的初步建立[J]. 环境科学, 2005, 26(2):34-39.
- JIANG Jing-kun, HAO Ji-ming, WU Ye, et al. Development of mercury emission inventory from coal combustion in China[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(2):34-39.
- [29] Schroeder W H, Munthe J. Atmospheric mercury: An overview[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(5):809-822.
- [30] Wu Y, Wang S, Streets D G, et al. Trends in anthropogenic mercury emissions in China from 1995 to 2003[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(17):5312-5318.
- [31] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 等. 大气汞的自然来源研究进展[J]. 地球与环境, 2006, 34(2):1-11.
- WANG Shao-feng, FENG Xin-bin, QIU Guang-le, et al. Progress in research on natural sources of atmospheric Hg[J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(2):1-11.