

# 铜陵矿区土壤重金属元素的空间变异及污染分析

白晓宇<sup>1</sup>, 袁峰<sup>1</sup>, 李湘凌<sup>1</sup>, 周涛发<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>, 陈兴仁<sup>2</sup>, 陈永宁<sup>2</sup>,  
陈富荣<sup>2</sup>, 贾十军<sup>2</sup>

1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009
2. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230009

Bai Xiaoyu<sup>1</sup>, Yuan Feng<sup>1</sup>, Li Xiangling<sup>1</sup>, Zhou Taofa<sup>1</sup>, Zhang Xin<sup>1</sup>, Chen Xingren<sup>2</sup>,  
Chen Yongning<sup>2</sup>, Chen Furong<sup>2</sup>, Jia Shijun<sup>2</sup>

1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China
2. Anhui Institute of Geological Survey, Hefei 230009, China

**Bai Xiaoyu, Yuan Feng, Li Xiangling, et al. Spatial variance and pollution analysis of soil heavy metals in Tongling mining area, South China. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5):256-263**

**Abstract:** The paper interprets the spatial variance structure of As, Cd, Hg, Pb and Zn in soil in the Tongling mining area of China, makes spatial interpolation, and analyzes the pollution by using geostatistical method, expecting to provide insight into risk assessment of environmental pollution, soil remedy and decision making. The dataset of soil element contents is derived from project of "Multi-target Regional Geochemical Survey in Jianghuai Drainage Area in Anhui Province" by Anhui Institute of Geological Survey, China. With normalized datasets that are transformed by Johnson transformation, the variogram models are fitted, in which the As and Cd are spherical, Pb and Zn are pentaspherical, and Hg is exponential. The results show that the variograms of As, Cd, Pb and Zn exhibit anisotropy, which possibly is controlled by the distribution of ore deposits; Hg behaves strong nugget effect, which is influenced by small-scale factors, and the further study should increase the sample density. The As, Cd, Pb and Zn in soil in the Tongling mining area have high pollution hazard, especially the Cd; the Hg has low hazard. The pollution of As results from the copper deposits, the lead-zinc deposits and limonite, and from their exploitation; the pollution of Cd is related to lead-zinc deposits, the exploitation, and agricultural irrigation with waste water; the pollution of Pb and Zn are mostly ascribed to the lead-zinc deposits and related exploitation.

**Key words:** soil; heavy metal; geostatistics; spatial variance; Tongling

**摘要:**运用地统计学分析手段对铜陵矿区土壤中的 As、Cd、Hg、Pb 和 Zn 5 种重金属元素进行空间变异分析及空间插值, 并进行污染分析, 以期为铜陵矿区土壤环境评价、土壤污染修复及环境决策提供科学依据。数据来源于“安徽省江淮流域多目标区域地球化学调查”结果, 采用 Johnson 变换进行正态转换, 地统计拟合变异函数中, As、Cd 元素为球状模型, Pb、Zn 元素为五球形模型, Hg 元素为指数模型。结果表明, As、Cd、Pb、Zn 元素的变异函数表现为各向异性, 其方向性可能主要受矿床分布控制; Hg 元素块金效应较大, 表明其受小

收稿日期: 2008-04-10; 修回日期: 2008-09-02

基金项目: 安徽省科技攻关计划项目(08010302200); 安徽省优秀青年科技基金项目(08040106907, 04045063); 中国地质调查局项目(2004-012)

作者简介: 白晓宇(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为资源与环境的综合评价及信息技术。E-mail: baidayuvictor@163.com

尺度因子影响较大,其进一步分析须增加采样密度。铜陵矿区土壤中的 As、Cd、Pb 和 Zn 元素均有较高的污染风险,尤其 Cd 元素污染风险最大,而 Hg 元素的污染风险较低。As 元素污染的主要原因是铜矿、铅锌矿、褐铁矿矿床及其开发;Cd 元素的污染与铅锌矿床及其开发,以及农业污灌有关;Pb、Zn 元素的污染与铅锌矿床及其开发密不可分。

**关键词:**土壤;重金属;地统计学;空间变异;铜陵

**中图分类号:**X53;P595 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2008)05-0256-08

## 0 引言

铜陵地区是我国重要的矿业经济区,位于中国长江中下游铁-铜-金(多金属)大型成矿带内,是中国夕卡岩铜矿较集中发育的地区,铜矿床的分布主要受一条近 E-W 向构造-岩浆岩带的控制,构成一条大致呈 E-W 向的铜矿带<sup>[1]</sup>。区内矿产资源丰富,矿床的开采、勘探、开发程度较高<sup>[1-2]</sup>;与此同时,矿产资源开发利用导致的土壤重金属元素污染问题也日益严重<sup>[3-6]</sup>。近年来该地区的土壤金属污染及相应的环境问题已经受到广泛关注。但目前的研究普遍关注于特定矿点和矿区周围的土壤重金属调查和污染评价,对整个矿区的土壤重金属空间结构、迁移变化等方面研究较少<sup>[7]</sup>。

地统计学方法为土壤空间信息的研究提供了有力的分析工具。通过分析变异函数能够对重金属空间分布的结构特征(一般特征、方向性特征等)进行定量描述<sup>[8]</sup>,在此基础上,根据空间结构模型的特征,进行最优的空间插值,可进一步探索空间变量的分布规律<sup>[9-10]</sup>。地理信息系统(GIS)的发展为地统计学分析提供了强大的平台。国外已有研究者开始将基于 GIS 技术的地统计学方法运用到矿区土壤重金属污染评价研究中<sup>[11-13]</sup>,取得一定成果。

本文运用地统计学分析手段对铜陵矿区土壤中的 As、Cd、Hg、Pb 和 Zn 5 种重金属元素进行空间变异分析及空间插值,并进行污染分析,以期对铜陵矿区土壤环境评价、土壤污染修复及环境决策提供科学依据。

## 1 数据及方法

### 1.1 采样点分布

本文的土壤元素含量数据来源于安徽省地质调查院“安徽省江淮流域多目标区域地球化学调查”资料,土壤样品为较稳定地块的表层土壤,按间距为

2 km 网格采样所得,覆盖铜陵矿区主要矿田(图 1)。

### 1.2 数据处理及分析方法

地统计学方法作为研究空间变异的有效工具在土壤元素空间分布的研究中已经得到了广泛的使

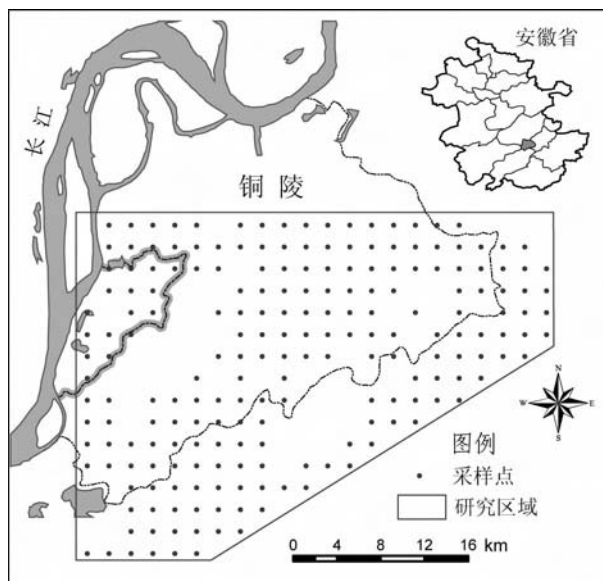


图 1 研究区域及土壤采样点分布图  
Fig. 1 Study area and soil sample locations

用。其基本原理和方法在许多文献中都有较为详尽的阐述<sup>[14-16]</sup>。变异函数的计算和拟合是空间结构分析的基础,当区域化变量满足二阶平稳性假设和本征假设时,(半)变异函数可用下式计算:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

其中, $\gamma(h)$ 为变异函数; $h$ 为滞后距离或步长; $N(h)$ 为距离等于 $h$ 的样点对数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在位置 $x_i$ 和 $x_i+h$ 处的实测值。

在地统计分析中,样品数据的异常值常会使变异函数产生漂移作用<sup>[17]</sup>,因此通常在使用之前先对原数据进行变换或异常值剔除,使其服从正态分布。常用的对数变换通常可将正偏度的数据正态化。但环境科学中,并非所有数据都服从对数正态分

布<sup>[18-19]</sup>。这种情况下,通常需要进行幂变换,如最常用的 Box-Cox 变换<sup>[18-21]</sup>。而本次研究数据经 Box-Cox 变换后仍不满足正态分布,因此考虑使用 Johnson 变换。Johnson 变换是从 Johnson 系统中  $S_B, S_L$  和  $S_U$  三种变换函数中选择最优的函数对数据进行变换,从而使其服从正态分布。三种变换表达式见表 1。Johnson 变换因包含了更为复杂的数学函数,且通过变换参数可涵盖大量分布,故适用性更强<sup>[22]</sup>。经 Kolmogorov-Smirnov 检验,表明变换后数据全部符合正态分布(表 2)。使用变换后的数据进行变异函数拟合及克里格插值,再将插值结果进行逆变换,绘制浓度等值线图。

表 1 Johnson 变换系统中的变换函数

函数名	变换函数表达式	定义域
$S_B$	$\gamma + \eta \ln[(x - \epsilon) / (\lambda + \epsilon - x)]$	$\eta, \lambda > 0, -\infty < \gamma < +\infty,$ $-\infty < \epsilon < +\infty, \epsilon < x < \epsilon + \lambda$
$S_L$	$\gamma + \eta \ln(x - \epsilon)$	$\eta > 0, -\infty < \gamma < +\infty,$ $-\infty < \epsilon < +\infty, \epsilon < x$
$S_U$	$\gamma + \eta \sinh^{-1}[(x - \epsilon) / \lambda]$ $\sinh^{-1}(x) = \ln[x + \sqrt{1 + x^2}]$	$\eta, \lambda > 0, -\infty < \gamma < +\infty,$ $-\infty < \epsilon < +\infty, -\infty < x < +\infty$

表 2 原数据的 Johnson 变换及正态分布检验结果

元素	原始数据			Johnson 变换后数据		
	偏度	峰度	$P^{1)}$	偏度	峰度	$P$
As	5.79	38.32	<0.010	0.04	-0.34	>0.15
Cd	2.35	6.42	<0.010	-0.1	-1.11	0.098
Hg	4.72	29.47	<0.010	0.35	0.41	>0.15
Zn	3.57	17.09	<0.010	-0.35	0.05	>0.15
Pb	4.19	23.72	<0.010	-0.46	-0.63	>0.15

注: <sup>1)</sup> 单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验,  $P < 0.05$  可认为不符合正态分布。

本次研究采用 Minitab 15 进行正态分布检验、Johnson 变换及其他统计学分析,地统计学分析及

浓度等值线图的绘制使用 Arcgis 9.0 完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 基本统计分析

对样品数据进行基本统计分析,分析结果见表 3。样品中 Hg 元素的变异系数达到 75.62%,而其他 4 个元素均超过 100%,这表明各元素变异性较强、离散性显著。As、Cd 和 Pb 3 元素均有 50% 以上的点超过了背景值,其中 As 与 Cd 元素超出《国家土壤环境评价标准》(GB 15618—1995) 三级标准(以下简称三级标准)的百分比比较高,分别为 13.73% 和 24.02%。且这三种元素最大值均远超出三级标准,这表明这三种重金属元素污染风险较高,尤其在局部地区存在极高污染可能。Zn 元素超出背景值和三级标准的百分比相对较低,分别为 36.27% 和 1.47%,但最大值仍远高于三级标准。Hg 元素样品超出背景值的百分率仅为 6.37%,且样点无超出三级标准。可见 Zn 元素在局部区域存在一定污染风险,而 Hg 元素的重金属污染风险较低。

样品中 As、Cd、Pb、Zn 元素之间相关系数都比较高,尤其 Cd、Pb、Zn 元素三者间相关关系更为密切,相关系数在 0.756 以上(表 4)。而这 4 种元素与 Hg 元素的相关系数则较低。这些元素的高度相关性分布一方面反映了元素地球化学性质不同程度的相似,另一方面又间接地表现出决定和影响元素含量的环境因素的分布特征的某种相似性。

### 2.2 地统计学分析

计算 5 种元素的实验变异函数,并拟合变异函数理论模型(图 2),拟合参数见表 5。变异函数 As 和 Cd 元素用球状模型拟合较好, Pb 和 Zn 元素用五球模型拟合为佳,而 Hg 元素则用指数模型拟合。

表 3 铜陵矿区土壤重金属元素含量的基本统计

元素	含量/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )			标准方差	变异系数/%	偏度	峰度	背景值 <sup>a)</sup>	超出背景值百分比/%	标准值 <sup>b)</sup>	超标百分比/%
	平均值	最小值	最大值								
As	28.8	5.8	419.1	47.88	166.48	5.79	38.32	12.44	68.14	40.00	13.73
Cd	0.932	0.085	7.821	1.25	134.12	2.35	6.42	0.086	99.51	1.0	24.02
Hg	0.124	0.040	0.840	0.09	75.62	4.72	29.47	0.25	6.37	1.0	0.00
Zn	161.4	22	1340	166.60	103.20	3.57	17.09	47.79	36.27	500	1.47
Pb	82.26	13	1090	125.79	152.92	4.19	23.72	85.5	61.27	500	4.90

注: <sup>a)</sup> 铜陵矿区背景值,引自《安徽省土壤环境背景值调查研究报告》(安徽省环境监测中心,内部资料); <sup>b)</sup> 标准值引自《国家土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 三级标准。

表4 铜陵矿区土壤各重金属元素间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between heavy metals in raw dataset

	As	Cd	Hg	Pb	Zn
As	1				
Cd	0.460**	1			
Hg	0.180**	0.216**	1		
Pb	0.558**	0.812**	0.215**	1	
Zn	0.525**	0.756**	0.186**	0.778**	1

注:\*\*  $P < 0.01$  (双尾)。

表5 铜陵矿区土壤中 As, Cd, Hg, Pb 和 Zn 的变异函数参数

Table 5 Parameters of variograms of As, Cd, Hg, Pb and Zn in soil

参数	As	Cd	Hg	Pb	Zn
模型	球形	球形	指数	五球形	五球形
各向异性方向	30.2	30.9		23.3	25.2
各向异性比率	2.977	1.288	1	1.356	1.706
主变程	19.637	21.89	11.132	23.707	27.893
次变程	6.596	17		17.478	16.352
块金值	0.465 0	0.427 1	0.781 9	0.209 1	0.289 3
拱高	0.566 9	0.536 1	0.260 4	0.922 4	0.871 7
基台值	1.031 9	0.963 2	1.042 3	1.131 5	1.161 0
块金值/基台值	0.450 7	0.443 4	0.750 2	0.184 8	0.249 2

5种元素的变异函数模型均表现出不同程度的块金效应,其中Hg元素块金值较高为0.8109,超过其拱高0.2432,As、Cd元素块金值与拱高相近,Pb和Zn元素块金值小于拱高。小尺度范围内人类活动如矿石堆放、农业灌溉等在变异函数中常表现为随机因素,块金效应可能与这些因素有关。块金值和基台值之比(Nugget/Sill)可用于衡量区域化变量的空间相关程度,其比值小于0.25表明空间相关性强,大于0.75表明空间相关性较弱<sup>[23]</sup>。可见,本研究区域内As、Cd元素的Nugget/Sill在0.25和0.75之间,空间相关程度中等,反映出小尺度空间结构在一定程度上受到了矿业开采等人为因素的影响。Pb和Zn元素的Nugget/Sill小于0.25,空间相关性较强,这可能主要受土壤母质、原始含矿层位等自然因素影响。该地区土壤母质含Pb和Zn元素量较高,且在部分区域富集成矿,而这类土壤母质的元素含量分布通常具有较强的结构性。Hg元素的Nugget/Sill大于0.75,空间相关性较弱,可能在小尺度上受到矿业开采、农业活动等人为因素的影响较大。

5种元素变异函数变程在6.596~27.893 km,大于采样间距2 km,它反映了在采样尺度下的元素

区域性变化。铜陵矿区的土壤母质呈现出一定的多样性,且母质更替多体现在中、大尺度上。而燃料的燃烧、金属冶炼、矿产开采等来源的重金属空间相关尺度较大,通常从几km到上百km不等<sup>[12,24-25]</sup>,它们可能在一定程度上影响了该地区土壤重金属空间相关尺度。

除Hg元素外,另外4种元素变异函数均存在明显的几何各向异性,即各方向基台值基本相等,但变程不同。由图2可以看出,这4种元素在45°(NE-SW)方向的变程大于0°(E-W)、90°(N-S)和135°(NW-SE),其各向异性角即主变程方向不尽相同但基本与该地区赋矿地层走向一致。而该地区矿床主要为层控夕卡岩型矿床,其分布与地层密切相关。各向异性角与地层走向的一致性揭示出,区域矿床的展布可能是控制这4种元素变异函数空间结构的方向性的主要因素。另一方面,重金属通过采矿粉尘、采矿废水、矿石运输等途径向土壤迁移的过程受风向、河流走向、运矿公路走向等因子控制也可能在一定程度上影响到空间分布的方向性。Cd、Pb和Zn元素三者化学性质较为相似,在自然矿石中常结伴而存,但拟合的Cd元素变异函数却表现出与Pb和Zn元素不同的方向性。这反映出Cd元素的分布受人为影响相对较大。As与Cd元素的化学性质有一定差别,两者各向异性角相近可能是各种复杂因素作用的偶然结果。

上述变异函数计算结果对滞后距离间隔取值十分敏感,说明拟合模型具有较大的噪音,这在较小幅度增加样本密度的情况下是不可避免的<sup>[25]</sup>。尤其对于Hg元素而言,小尺度的人类活动在变异函数中表现为极大的随机因素,这对空间结构的分析及克里格插值均会带来不利的影响。

### 2.3 污染分析

利用拟合的变异函数进行克里格插值,并将结果逆变换绘制成土壤元素浓度空间分布图(图3)。可以看出,大部分区域的As、Pb、Zn元素含量高于该地区背景值含量,其中少部分区域含量高于三级标准,存在较高的重金属污染风险。Cd元素在研究区域范围内全部超出背景值,且有大片区域高于三级标准污染,程度严重。Hg元素在绝大部分区域都高于背景值,但在研究区域内全部未超过三级标准,污染可能较低。

为分析铜陵矿区土壤重金属污染的原因,在图3中同时标出了铜陵矿区的各类金属矿床的位

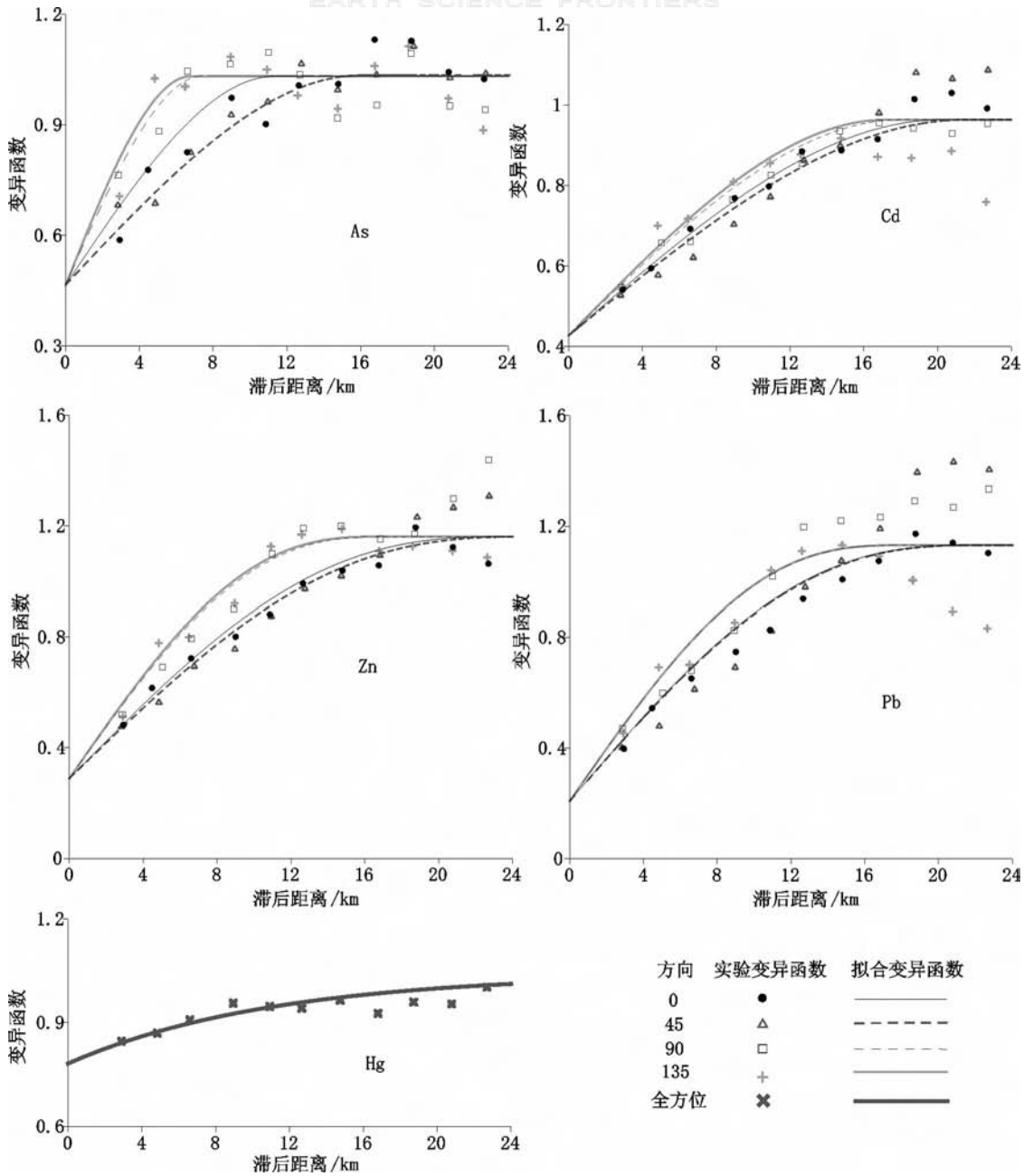


图2 铜陵矿区土壤重金属元素的实验变异函数及拟合模型

Fig.2 Experimental variograms of soil heavy metals with fitted anisotropic variogram models

置。从图3中可看出,As、Cd、Pb和Zn元素的高浓度区域常伴随于特定矿床而出现。As元素的超标区域大多围绕在铜矿、铅锌矿、褐铁矿矿床的周边;As元素常伴生于这3种矿床中,可见这些矿床及其开发活动很可能是造成As元素污染的主要原因。多数铅锌矿床周边均伴有较高浓度的Cd元素,这与铅锌矿床中伴生Cd元素吻合;同时,Cd元素超标区域较大,呈连续分布,且为农业灌溉区,显示农

业活动如污水灌溉可能加剧了该地区Cd元素在土壤中的扩散和累积。Pb和Zn元素的污染区域与铅锌矿床存在较强的空间相关关系,而铅锌矿床是Pb和Zn元素的主要载体,其开发不可避免地会导致Pb和Zn元素向土壤中的迁移,因此,铅锌矿床及其开发是这两种元素污染的主要原因。Hg元素的分布规律不明显,且污染风险较低。

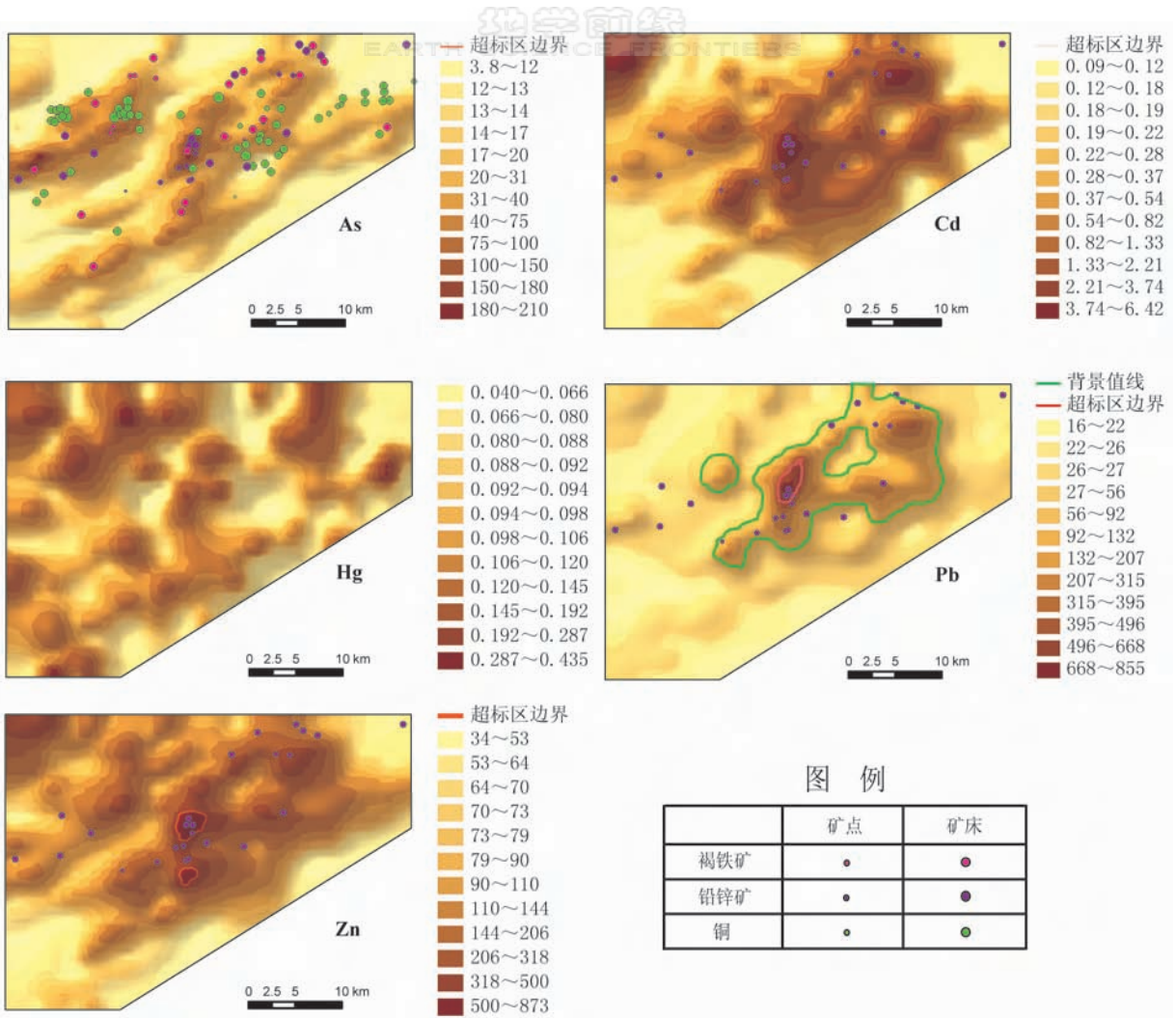


图3 铜陵矿区土壤中 As、Cd、Hg、Pb 和 Zn 元素浓度等值线图

Fig.3 Contour of soil As, Cd, Hg, Pb and Zn concentration produced by ordinary Kriging

### 3 结论

(1) 本文使用 Johnson 变换对土壤样品重金属元素数据进行正态转换, 变换后数据完全符合正态分布, 表明 Johnson 变换方法可用于地统计分析前的数据预处理。

(2) 对铜陵矿区土壤 As、Cd、Hg、Pb 和 Zn 元素进行了地统计分析。拟合变异函数效果较好, 其中 As、Cd 元素为球状模型, Pb、Zn 元素为五球形模型, Hg 元素为指数模型; As、Cd、Pb、Zn 元素的变异函数表现为各向异性, 其方向性可能主要受矿床分布控制。Hg 元素块金效应较大, 表明其受小尺度因子影响较大, 其进一步分析须增加采样密度。

(3) 铜陵矿区土壤中的 As、Cd、Pb 和 Zn 元素

均有较高的污染风险, 尤其 Cd 元素污染风险最大, Hg 元素的污染风险较低。引起 As 元素污染的主要原因是铜矿、铅锌矿、褐铁矿矿床及其开发。Cd 元素的污染与铅锌矿床及其开发以及农业污灌有关。Pb 和 Zn 元素的污染与铅锌矿床及其开发密不可分。

本文的研究得到了安徽省地质矿产勘查局徐小磊教授级高级工程师、安徽省地质调查院赵和苍高级工程师的大力支持, 在此表示衷心的感谢。

### References:

[1] Tang Y C, Wu Y C, Chu G Z, et al. Geology of copper-gold polymetallic ore deposits in the along-Changjiang area of Anhui Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998 (in Chinese).

- [2] Chang Y F, Liu X P, Wu Y C. The copper-iron belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991(in Chinese).
- [3] Zhou T F, Zhang X, Yuan F, et al. Negative effects of exploiting mineral resources in mining cities in Anhui Province and the prevention tactics[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2004, 27(3): 225-228 (in Chinese).
- [4] Zhang X, Zhou T F, Yuan F. Pollution and potential ecological hazard assessment of heavy metals in stream sediments in Tongling mining area[J]. Environmental Chemistry, 2005, 24(1): 107-108(in Chinese).
- [5] Zhou T F, Yin H Q, Zhang X, et al. Speciation and bioavailability of lead in Tongling mining soil[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 28(9): 1146-1150(in Chinese).
- [6] Zhang X, Zhou T F, Yuan F, et al. Speciation and bioavailability of cadmium in Tongling mining soils[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(4): 572-574(in Chinese).
- [7] Qi Y H. The study on the spatial distribution and pollution assessment of heavy metal elements in soil of Tongling area based on GIS[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006(in Chinese).
- [8] Zhang C S, Zhang S, He J B. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang river system—geostatistics method [J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(2): 184-192(in Chinese).
- [9] Zheng Y M, Chen T B, Chen H, et al. The spatial structure and distribution of Ni contents in soils of suburbs of Beijing [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(3): 470-476(in Chinese).
- [10] Hu K L, Zhang F R, Lu Y Z, et al. Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Daxing county, Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(3): 463-468 (in Chinese).
- [11] Ersoy A, Yunsel T Y, Cetin M. Characterization of land contaminated by past heavy metal mining using geostatistical methods[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 46(2): 162-175.
- [12] McGratha D, Zhang C S, Cartona O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland [J]. Environmental Pollution, 2004, 127(2): 239-248.
- [13] Reis A P, Sousa A J, Da Silva E F, et al. Application of geostatistical methods to arsenic data from soil samples of the Cova dos Mouras mine (Vila Verde-Portugal)[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2005, 27(3): 259-270.
- [14] Wang Z Q. Geostatistics and its application in ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999(in Chinese).
- [15] Zhang R D. Theory and application of spatial variation[M]. Beijing: Science Press, 2005(in Chinese).
- [16] Webster R, Oliver M. Geostatistics for environmental scientists[M]. New York: Wiley, 2001.
- [17] Gringarten E, Deutsch C V. Teacher's aide: variogram interpretation and modeling[J]. Mathematical Geology, 2001, 33(4): 507-534.
- [18] Zhang C S, Zhang S. A robust-symmetric mean: a new way of mean calculation for environmental data[J]. GeoJournal, 1996, 40(1-2): 209-212.
- [19] Zhang C S, Selinus O, Schedin J. Statistical analyses on heavy metal contents in soil and root samples in an area of southeastern Sweden[J]. The Science of the Total Environment, 1998, 212: 217-232.
- [20] Box G E P, Cox D R. An analysis of transformations[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 1962, 26(2): 211-252.
- [21] Jobson J D. Applied multivariate data analysis. Vol. 1: Regression and experimental design[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [22] Chou Y, Polansky A M, Mason R L. Transforming nonnormal data to normality in statistical process control[J]. Journal of Quality Technology, 1998, 30: 133-141.
- [23] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [24] Inacio M M, Pereira V, Pinto M S. Mercury contamination in sandy soils surrounding an industrial emission source (Estarreja, Portugal)[J]. Geoderma, 1998, 85(4): 325-339.
- [25] Wang X J, Li B G, Tao S, et al. Spatial analysis of content of metal microelements in soil[M]. Beijing: Science Press, 2005(in Chinese).
- [26] Shi J C, Wang H Z, Xu J M, et al. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China[J]. Environmental Geology, 2007, 52(1): 1-10.
- [27] Liu X M, Wu J J, Xu J M. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2): 257-264.

## 参考文献:

- [1] 唐永成,吴言昌,储国正,等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [2] 常印佛,刘湘培,吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京:地质出版社,1991.
- [3] 周涛发,张鑫,袁峰,等. 矿山城市矿产资源利用的环境负效应及其防治[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2004, 27(3):225-228.
- [4] 张鑫,周涛发,袁峰. 铜陵矿区水系沉积物中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境化学,2005,24(1):107-108.
- [5] 周涛发,殷汉琴,张鑫,等. 铜陵矿区土壤中铅的存在形态及生物有效性[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2007, 28

(9): 1146-1150.

[6] 张鑫,周涛发,袁峰,等. 铜陵矿区土壤中镉存在形态及生物有效性[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 572-574.

[7] 祁轶宏. 基于 GIS 的铜陵地区土壤重金属元素的空间分布及污染评价[D]. 合肥:合肥工业大学, 2006.

[8] 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[J]. 地理学报, 1997, 52(2): 184-192.

[9] 郑袁明,陈同斌,陈煌,等. 北京市近郊区土壤镍的空间结构

及分布特征[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 470-476.

[10] 胡克林,张凤荣,吕贻忠,等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 463-468.

[14] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[15] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[25] 王学军,李本纲,陶澍,等. 土壤微量金属含量的空间分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

## 致《地学前缘》爱思唯尔(Elsevier)英文版作者

尊敬的作者:您好!

《地学前缘》被世界最大的科技出版公司 Elsevier 选入中国合作期刊,并获得了国际标准刊号(ISSN 1872-5791)。从 2007 年起入选的《地学前缘》文章英文版将在 ScienceDirect 在线全文平台上发表,Elsevier 的近 2 000 万用户,包括全球著名的大学、图书馆、科研机构等都可以进行在线阅读。

中国期刊在全球科技网 ScienceDirect 上发表,将会扩大中国期刊的读者范围,提高中国期刊论文的国际引用率,促进中、外科技界间的学术交流。

送交 Elsevier 发表的稿件是从被《地学前缘》录用的中文稿件中选出并同步译成的英文稿件。英文稿件要求:

(1)译文的标题、姓名、单位、关键词、公式、插图、表格、引文、编号及参考文献等应与《地学前缘》中文原文保持一致,译文内容应与中文主要内容相同,但参考文献的著录格式要遵从下面(6)之规定。

(2)摘要一般为 50~200 个英文词,应能概括全文内容(研究目的、过程、方法、结论);不能含有方程、图表、参考文献等;如用缩略语,应有说明;第一句话不应与题名重复;尽量使用简单句和主动语态,并使动词靠近主语。英文版文章摘要可以与中文原文的英文摘要不同。

(3)关键词一般为 3~8 个;除专有名词大写外,全部小写;缩略语应先写全称再写简称;关键词之间用“;”分隔。具体要求与中文文章的关键词一致。

(4)图中文字的正斜体要与正文统一,图中文字用 7.5 磅 Times New Roman 字体;坐标轴标题和图中每段注释文字的首字母大写;图中字体:江河湖海左斜,山脉右斜;在坐标系中,坐标原点用 O,坐标名称用物理量与其单位之比,量符号用斜体,单位用正体,如“ $p/\text{MPa}$ ”,标线刻度统一朝内侧。

(5)图件要求提供 CorelDRAW 或 Illustrator 软件制图格式,或上述软件可处理的矢量图,灰度图存为 600 dpi,彩图存为 300 dpi。半栏图图不宽于 8 cm;通栏图图不宽于 16.5 cm,整版图请控制在 16.5 cm×22.5 cm 内。表名在表的上方居中对,表头表述方式一般用物理量与其单位之比,如“ $p/\text{MPa}$ ”。

(6)参考文献。英文版文章的文后参考文献姓全写,名缩写。参考文献采用阿拉伯数字依其在文中第一次出现的先后顺序编号;参考文献中的期刊名用全称或标准缩略形式表示;对于已经同意发表或出版的文章、图书但尚未正式出版的,参考文献列表中应该标明“in press”以说明。参考文献的基本格式示例如下:

**For a book:** Wang N L, Yang J C, Xia Z K, et al. The Cenozoic Sediments and Tectonic Geomorphology of the Graben System in Shanxi Province. Beijing, China: Science Press, 1996.

**For a paper in a journal:** Zadeh L A. Towards a generalized theory of uncertainty (GTU)—an outline. Information Sciences, 2005, 172: 1-40.

**For a paper in a contributed volume:** Keene A J. A brief comparison of some evolutionary optimization methods. In: Rayward-Smith V, Osman I, Reeves C, et al. (eds.), Modern Heuristic Search Methods. New York: Wiley, 1996: 255-272.

**For a paper in a conference proceedings:** Ishibuchi H, Nozaki K, Tanaka H. Fuzzy data mining: effect of fuzzy discretization. In: Proc. 1st IEEE International Conference on Data Mining, San Jose, CA, 2001: 241-248.

**For an unpublished paper:** Kryszkiewicz M. Knowledge reduction in information systems. Acta Mathematica Scientia, in press.

《地学前缘》Elsevier 英文版编辑部

联系人:尹牡丹

电话:82321855

电子邮箱:dxqy3@cugb.edu.cn