

# 淮南大通煤矿废弃地土壤重金属 空间分布及变异特征

孙贤斌<sup>1</sup>, 李玉成<sup>2,3</sup>

(1.皖西学院资源环境与旅游管理学院, 安徽 六安 237012; 2.安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601;  
3.煤矿生态环境保护国家工程实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**通过对淮南大通煤矿废弃地土壤重金属元素含量采样分析, 利用GIS技术分析其空间分布与变异特征, 结果显示: 从平均值来看, 大通煤矿废弃地5种重金属超出背景值2.000~36.300倍, 以Cd污染最为严重, 其次是Hg、Cr、Pb、Cu, 相对较小。化工厂及周围区域重金属严重污染, 煤矸石堆及周围区域为重污染。Hg和Cd来源于化工厂废水和煤矸石, 且均在底层土富集; Cr主要来源是化工厂废水, 在表层土含量高; Pb和Cu来源于煤矸石和化工厂废水, 分别在底层土和表层土富集。煤矸石释放的重金属在土壤底层富集, 化工厂废水使表层土含量较高。多数重金属元素之间正相关关系显著, 具有同源性; Hg和Cd与营养物质呈显著正相关关系, Cr和Pb与营养物质呈显著负相关关系。重金属污染存在受自然因素影响存在显著的较大结构性变异, 空间变异均是微小尺度, 空间变异特征与复杂的地物和人为干扰有关。

**关键词:** 土壤重金属; 空间分布; 变异特征; 大通煤矿废弃地

**中图分类号:** X53      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2013)10-1238-07

近年来, 中国土地资源日益紧缺, 煤矿废弃地的治理与生态修复得到人们的普遍重视<sup>[1]</sup>。与发达国家相比, 中国煤矿废弃地研究较晚, 自20世纪90年代以后生态修复研究逐渐深入, 现已经取得了一定的成就<sup>[2,3]</sup>。目前, 废弃地生态修复研究主要集中在土壤改良和土地综合治理方面<sup>[2]</sup>。与国外相比, 有关煤矿废弃地“3S”等新技术、新理念应用方面存在很大差距<sup>[4]</sup>, 如美国目前推广应用“师法自然生态修复法”, 利用“3S”等技术模拟和构建自然生态演替进行修复的过程<sup>[5]</sup>。淮南煤矿废弃地土壤存在一定程度的重金属污染, 分析其污染状况和空间分布是土壤改良和综合治理的前提<sup>[4,6]</sup>。国内外学者应用主成分、多元统计、空间自相关分析、GIS空间插值、地统计等方法对农田、林地、湖泊底泥、工业区等土壤重金属空间分布和特征变异开展研究<sup>[7-13]</sup>, 但对煤矿废弃地研究很少<sup>[2,5]</sup>。前人已有从植物配置和群落演替的角度对

淮南大通煤矿废弃地提出生态修复方法<sup>[14]</sup>, 但缺少对土壤环境问题的具体诊断, 尤其是没有对土壤重金属污染产生的原因、空间分布和变异特征进行深入探讨, 生态修复与环境治理缺少针对性。本研究在区域土壤环境调查的基础上, 利用GIS等技术, 分析土层重金属污染及空间分布特征, 揭示废弃矿区生态环境问题产生的原因, 为促进矿区废弃地的有效修复提供科学依据。

## 1 研究区概况

大通煤矿废弃地位于淮南市大通区南部, 洞山以北和城区以南之间的区域(图1), 其中包括废弃的采煤煤矸石堆(斜坡)、废机井、废弃的化工厂滤池、废水井, 面积约4.38 km<sup>2</sup>。原大通煤矿建于1903年, 1911年投产, 于1978年与2007年主井和小煤井相继闭坑。闭坑后对其煤矿塌陷区和机井利用煤矸石回填整治。2003年开始, 淮南矿业集

收稿日期: 2013-04-26; 修订日期: 2013-06-22

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41172121)、淮南矿业集团项目(HKKY-STHJYJS-JS-(2012)-001)、安徽省人文地理学重点学科建设项目(皖西学院)资助。

**作者简介:** 孙贤斌(1970-), 男, 安徽含山人, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境生态与GIS应用。E-mail: sunxb98@126.com

**通讯作者:** 李玉成, 教授。E-mail: liyucheng@163.com



表1 大通煤矿废弃地土壤重金属含量

Table 1 Heavy metal content in soils in Datong abandoned coal mine area

土层(cm)	Hg(mg/kg)		Cd(mg/kg)		Cr(g/kg)		Pb(g/kg)		Cu(g/kg)	
	0~10	20~30	0~10	20~30	0~10	20~30	0~10	20~30	0~10	20~30
最大值	0.850	0.309	3.240	3.581	0.554	0.605	0.218	0.215	0.795	0.123
最小值	0.581	0.497	0.712	0.770	0.166	0.183	0.825	0.635	0.165	0.970
平均值	0.253	0.327	1.971	2.178	0.340	0.394	0.150	0.141	0.048	0.067
背景值	0.023	0.010	0.060	0.060	0.065	0.083	0.030	0.030	0.024	0.030
平均污染指数 $P_i$	11.000	32.700	32.850	36.300	5.231	4.747	5.000	4.700	2.000	2.233

2): 土壤中 Hg 含量以原煤矸石堆场斜坡以及化工厂滤池之间区域分布最高, 含量在 0.299~0.487 mg/kg, 为背景值的 13.04~21.12 倍<sup>[16]</sup>, 且以之为中心向周围区域逐渐降低, 说明地表土 Hg 污染与以前的煤矸石堆放和化工厂废水排放有关。土壤中 Cd 含量分布以原煤矿废机井和化工厂的废水井区域含量分布最高, 含量在 1.756~2.245 mg/kg, 为背景值的 28.9~36.7 倍。Cr 含量分布以化工厂及周围区域为污染最为严重, 含量在 0.366~0.456 g/kg, 带状分布与废弃煤矸石堆场斜坡方向较一致, 说明其来源与化工废水和煤矸石淋滤液渗入土壤扩散有关。Pb 含量变化以煤矸石堆场斜坡为中心, 向两侧呈逐渐降低趋势。Cu 含量在 0.063~0.149 g/kg 的分布带范围面积较小, 主要受原化工厂影响。

### 3.3 重金属元素含量深层土分布

在深层土中重金属元素含量插值分析显示(图3): Hg 以废机井和矸石堆放处含量最高, 原因是废机井回填的煤矸石以及煤矸石堆经过雨水淋溶使 Hg 富集。Cd 含量以塌陷沉降剖面处为中心向周围呈降低趋势, Cr 以原化工厂废水井和滤池

区为最高, 超出土壤背景值的 5.51~6.81 倍<sup>[16]</sup>, Cd 和 Cr 高值区是煤矿塌陷地区或地势低洼区, 地表化工废水和煤矸石淋溶水流聚集到此使 Cd 和 Cr 元素富集。Pb 在深层土中分布状况与表层土极为相似, 废机井和废矸石堆为主要的富集区。Cu 高值区是在废机井和矸石堆斜坡处。Pb 和 Cu 污染受煤矸石堆影响显著。

### 3.4 土壤重金属污染分布聚集性

将重金属在深层土图层与表层土图层进行差值运算, 显示重金属元素含量分布聚集状况(图4): 正值说明深层含量高于表层, 负值说明表层高于底层。Hg 在废机井、矸石堆、化工厂废水井和滤池区域的深层土聚集, 说明 Hg 污染来源是煤矸石淋溶和化工厂废水; 煤矸石经风化、降水淋溶使 Hg 释放到底层土富集; 化工厂废水(Hg 含量很高)渗透, 加上 Hg 密度大, 也使 Hg 在底层土不断富集, 但 Hg 表层含量低可能与其易挥发性也有关。Cd 含量是底层土大于表层土, 其来源与煤矸石和化工厂排放废水有关, 均在底层土中富集, 污染严重。Cr 在废水井和滤池区是表层土含量高, 来源

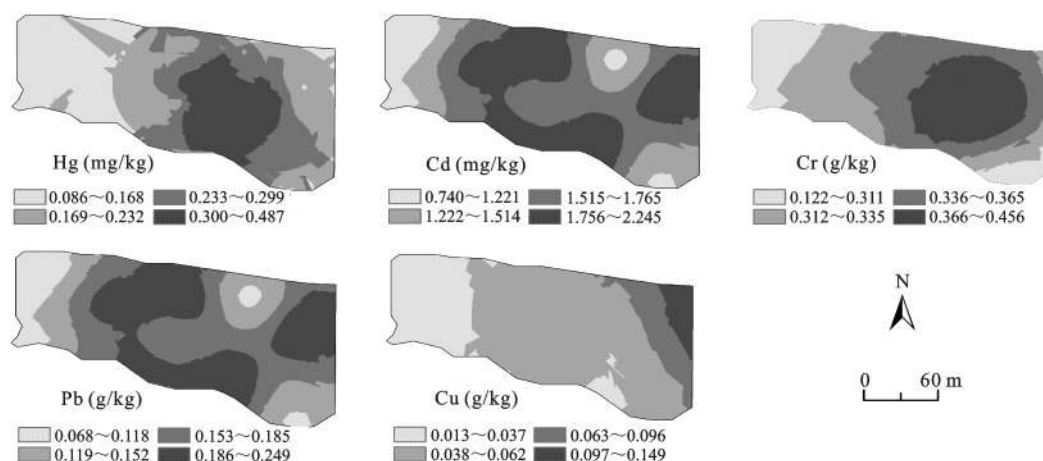


图2 大通煤矿废弃地表层土壤重金属元素含量

Fig.2 The spatial distribution of heavy metals in the soil with the depth of 0-10 cm in Datong area



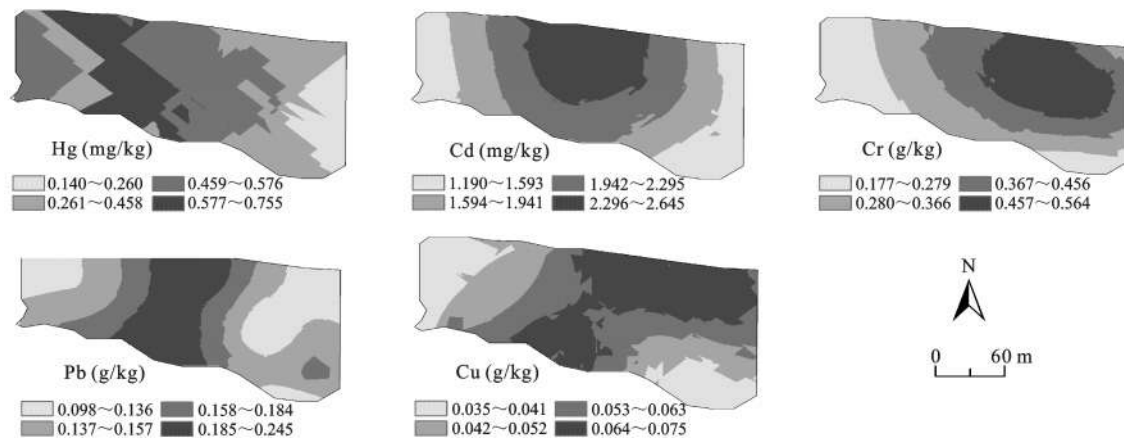


图3 大通煤矿废弃地底层土壤重金属元素含量分布

Fig. 3 The spatial distribution of heavy metals in the soil with the depth of 20-30 cm in Datong area

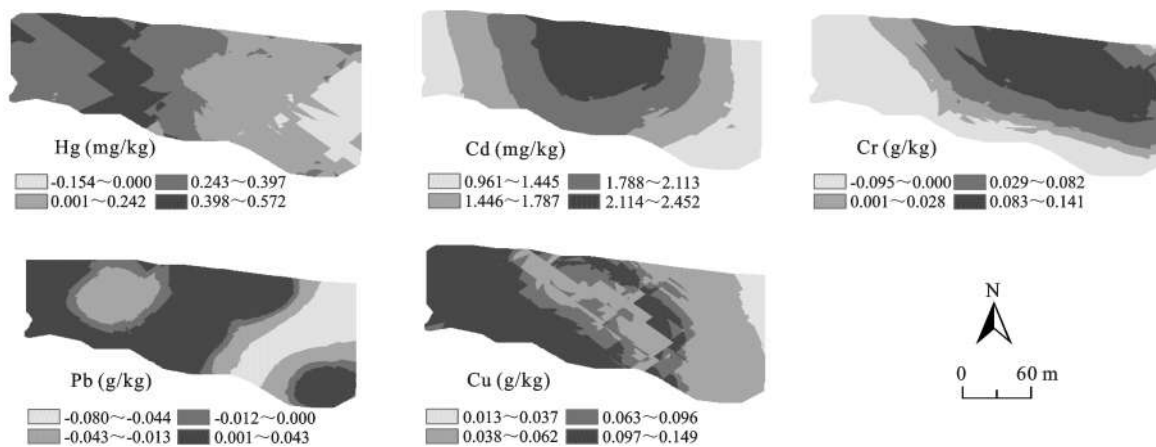


图4 大通煤矿废弃地重金属元素含量分布聚集

Fig. 4 The accumulation of heavy metals in the soil in Datong area

主要是化工厂废水。Pb和Cu在废机井、矸石堆区域底层含量高,来源是煤矸石,废水井区域的表层土含量高,主要来源化工厂废水。

### 3.5 土壤重金属和有机质含量的相关性

大通煤矿废弃地土壤中重金属元素之间除Cr与Hg的负相关关系显著外,其它均表现出较大的正相关关系(表2),如Cd与Pb、Cu之间,Cu与Pb、Cr之间,Hg与Pb的正相关关系显著,这些元素相关性指示大通煤矿废弃地土壤中存在多种元素复合污染的危害,同时也显示重金属污染来源于煤矸石、化工厂废水,具有同源性。土壤重金属元素与营养物质多数呈负相关关系,如Cu与氨氮、有机质之间,Pb与氨氮、Cr与氨氮、有机质之间,Cd与氨氮、有机质之间,均呈现显著负相关关系(表2),其原因是元素含量受化工厂废水污染影响较

显著,重金属污染使土壤微生物活性和多样性明显降低,进而使土壤中物质循环和转化过程受阻,营养物质含量偏低,故负相关关系显著。而Cu与速效磷、Cd与速效磷、Hg与氨氮、速效磷之间均呈显著正相关关系;对Hg和Cd而言,主要来源于煤矸石淋溶过程与富集,同时土壤成土时间长,土壤发育和植物生长也使营养物质含量增加,所以呈显著正相关关系。

### 3.6 土壤重金属污染空间变异特征

拟合Hg、Cd、Cr、Pb、Cu的单因子污染指数值及综合污染指数值(P)的半方差函数,获得最优理论模型和参数(表3)。块金常数 $C_0$ 表示测量误差及采样尺度的非连续性而产生的随机变异, $C_0+C_1$ 表示随机性变异与结构性变异之和,块金常数与基台值的比值是随机因素产生的空间变异占总体

表2 土壤重金属元素间及与土壤理化指标皮尔逊相关系数

Table 2 Correlation among the heave metals and withe the elements and nutritive materials in soil (n=42)

因子	Cu	Pb	Cr	Cd	Hg	氨氮	速效磷	有机质
Cu	1							
Pb	0.474**	1						
Cr	0.402**	0.046	1					
Cd	0.510**	0.772**	0.477**	1				
Hg	0.127	0.250**	-0.268**	0.132	1			
氨氮	-0.246**	-0.281**	-0.455**	-0.535**	0.376**	1		
速效磷	0.263**	0.100	-0.044	0.281**	0.252**	-0.043	1	
有机质	-0.498**	-0.124	-0.338**	-0.201**	0.137	0.112	-0.341**	1

注: \* 0.05 水平显著相关(双尾), \*\*0.01 水平显著相关(双尾)。

表3 大通煤矿废弃地土壤重金属污染空间变异参数

Table 3 Spatial variation parameters of heavy metals in soils of abandoned coal mine in Datong area

因子	理论模型	块金常数 $C_0$	基台值 $C_0+C_1$	块金常数/基台值 $C_0/C_0+C_1$	变程(m)	决定系数 $R^2$	残差 RSS
Hg	指数模型	1520	9040	0.168	24.810	0.936	$7.6 \times 10^{-3}$
Cd	高斯模型	0.010	3.874	0.003	11.112	0.856	$4.56 \times 10^{-2}$
Cr	高斯模型	0.001	0.105	0.010	10.502	0.860	$4.69 \times 10^{-3}$
Pb	高斯模型	0.000	0.023	0.004	11.203	0.913	$1.64 \times 10^{-4}$
Cu	指数模型	0.000	0.008	0.035	64.110	0.879	$9.85 \times 10^{-3}$
P 指数	高斯模型	0.240	3.459	0.069	22.504	0.951	$7.3 \times 10^{-3}$

变异的比列,比列小于 0.25 说明重金属污染的空间相关性显著,主要由结构性变异产生的。块金常数与基台值比值均小于 0.168,表明废弃地土壤重金属污染的结构性变异较大,即受植被、地形和土壤母质等自然条件影响显著,废弃地植被多样、煤矸石堆与塌陷引起地形复杂等是影响空间变异的主要原因。Hg 的块金常数与基台值比值为 0.168,相对其它元素较大,变异受随机因素(如化工厂污水、煤矸石)影响相对较大。变程是空间变异尺度的大小,土壤重金属污染空间变异尺度范围为 10.502~64.110 m,只有 Cu 的变异尺度相对较大(64.110 m),空间变异均在微小尺度内,这与研究区有废弃矿井、沉降剖面、煤矸石堆、化工厂废水井、滤池等微地貌,及土地利用干扰的复杂性密切相关,从而影响重金属元素空间分布。

土壤重金属污染指数值的变异函数曲线如图 5。Hg 和 Cu 污染指数值变异函数采用指数模型较理想,而 Cd、Cr、Pb 污染指数值和综合污染指数值的变异函数采用高斯模型较理想,决定系数( $R^2$ )表示拟合精度, $R^2$ 越大表示模拟效果越好,决定系数

均在 0.856 以上,各方差函数模型选取符合拟合要求,拟合效果好。在变程范围内,块金常数与基台值比值均小于 25%,土壤重金属污染表现出明显的空间自相关性(与煤矸石和化工厂废水有关),土壤单元之间影响范围和采样间距较小。

4 结 论

1) 淮南大通煤矿废弃地土壤中 Cd、Hg、Cr 和 Pb 为主要污染元素,化工厂和煤矸石堆区域重金属复合污染严重,Hg、Cd、Pb 和 Cu 主要来源是化工厂废水和煤矸石,Cr 主要来源是化工厂废水;Hg 和 Cd 均在底层土富集,Cr 主要在表层土含量高,Pb 和 Cu 分别在底层土和表层土富集。

2) 煤矸石释放的重金属在土壤底层富集,化工厂废水使表层土重金属含量高。多数重金属元素之间正相关关系显著,具有同源性,土壤重金属元素之间关系研究进一步揭示了大通煤矿废弃地土壤重金属污染来源与其在土层中分布的内在联系。煤矿废弃地生态修复应该根据土壤重金属污染来源和地形分布等影响因素,采取有效措施加

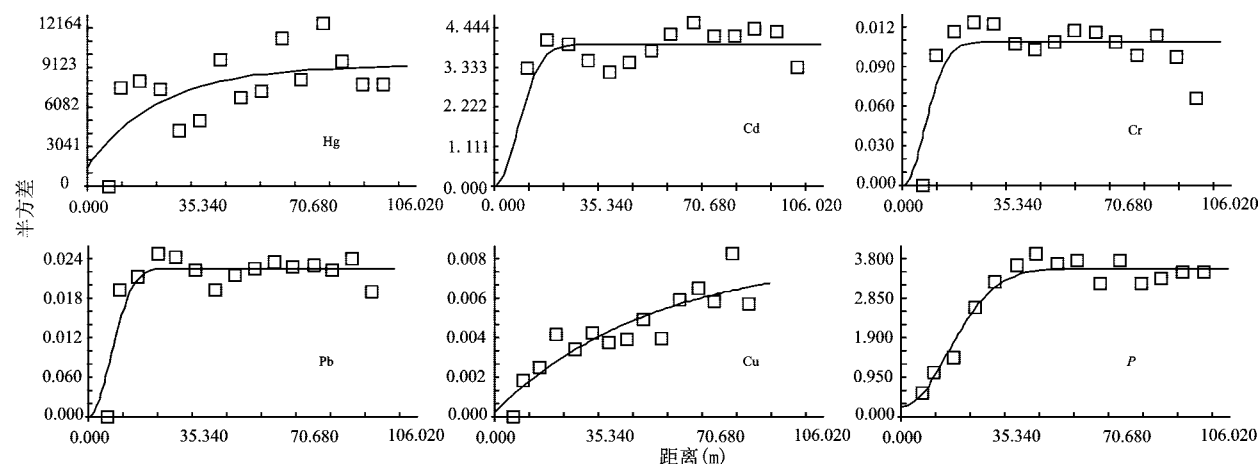


图5 大通煤矿废弃地土壤重金属污染指数半方差模型

Fig. 5 Fitted semi-variance model of heavy metals pollution in soils in Datong area

强重金属复合污染治理。Hg和Cd与营养物质正相关关系显著,由于煤矸石淋溶引起的Hg和Cd等土壤重金属污染的同时,也使K、Mg等营养元素增加,促进土壤物质循环和土壤发育,土壤生物数量会相对有所增加,使营养物质积累,有利于废弃地土壤生态修复。Cr和Pb与营养物质负相关关系显著,原因是化工厂废水引起的Cr、Pb等土壤重金属污染使土壤生物数量减少,生物活动及成土过程受阻,从而使营养物质积累减少。土壤重金属元素与有机物质之间的相关关系研究有助于理解不同来源土壤重金属污染对土壤生物、土壤成土过程的影响,对废弃地土壤环境治理和生态修复具有重要指导意义。

3) 大通煤矿废弃地土壤重金属综合污染空间变化受区域的地形和植被等自然因素影响显著,但空间变异均是微小尺度,其变化特征与废弃地复杂的地物和强烈的人为干扰有关,这与实际情况也是非常一致的。

## 参考文献:

- [1] 王卓理,马建华,耿鹏旭,等.平顶山市煤矿塌陷区复垦土壤重金属分布及污染分析[J].农业环境科学学报,2009,28(4):668~672.
- [2] 王雷,宋效刚,徐燕英,等.煤矿废弃地生态修复研究[J].安徽农学通报,2012,18(5):110~112.
- [3] Suding K N, Hobbs R J. Threshold models in restoration and conservation a developing Framework[J].Trends in Ecology and Evolution, 2009, 24(5):271-279.
- [4] 牛海亮,王强,姜艳丰.国内外采矿废弃地生态恢复研究进展[J].生态环境,2007,19(3):62~64.
- [5] 张成梁, Li B L.美国煤矿废弃地的生态修复[J].生态学报,2011,31(1):276~285.
- [6] 崔龙鹏.对淮南矿区采煤沉陷地生态环境修复的思考[J].中国矿业,2007,6:46~52.
- [7] 赵彦锋,郭恒亮,孙志英,等.基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源[J].地理科学,2007,28(1):45~50.
- [8] Amini M, Khademi H, Afyuni M, et al. Variability of available cadmium in relation to soil properties and landuse in an arid region in central Iran [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005,162 (1-4):205-218.
- [9] 胡克宽,王英俊,张玉岱,等.渭北黄土高原苹果园土壤重金属空间分布及其累积性评价[J].农业环境科学学报,2012,31(5):934~941.
- [10] 于万辉,王俊杰,臧淑英.松嫩平原湖泊底泥重金属空间变异特征及其风险评价[J].地理科学,2012,32(8):1000~1005.
- [11] 曹伟,周生路,王国梁,等.长江三角洲典型区工业发展影响下土壤重金属空间变异特征[J].地理科学,2010,30(2):283~289.
- [12] 石宁宁,丁艳锋,赵秀峰,等.某农药工业园区周边土壤重金属含量与风险评价[J].应用生态学报,2010,21(7):1835~1843.
- [13] 吴绍华,周生路,张红富,等.经济发展梯度影响下的江苏农用地土壤重金属含量分布格局[J].地理科学,2008,28(3):412~418.
- [14] 张雨曲.安徽淮南大通煤矿废弃矿区生态修复研究[D].北京:首都师范大学,2009.
- [15] 陈惠芳,李艳,吴豪翔,等.富阳市不同类型农田土壤重金属变异特征及风险评价[J].生态与农村环境学报,2013,29(2):164~169.
- [16] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值——安徽省土壤背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990:329~497.

## The Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Variation Characteristics of Datong Abandoned Coal Mine Area in Huainan City

SUN Xian-bin<sup>1</sup>, LI Yu-cheng<sup>2,3</sup>

(1.College of Resource Environment and Tourism Management, West Anhui University, Lu 'an, Anhui 237012,China; 2.College of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601,China; 3.National Engineering Laboratory of Ecological Environment Protection in Coal Mine,Huainan, Anhui 232001,China)

**Abstract:** The ecological restoration of abandoned coal area in Huainan, Anhui has great significance. This article describes the analysis of heavy metals in soil sampled from Datong abandoned mining area in Huainan City. Spatial interpolation in GIS is applied to the revelation of spatial distribution of heavy metals. Results show that: 1) In average, concentration of 5 heavy metal elements exceed the background values by 2.000~36.300 times, in which Cd is the most significant, followed by Hg, Cr and Pb, and the concentration of Cu is relatively smaller. Soils of chemical plant and surrounding area were severely contaminated, and the soils of coal gangue pile and surrounding area were heavily polluted. 2) Wastewater of the former chemical plant and coal gangue were the main pollution sources of Hg and Cd, and they were both accumulated in soil depth of 20-30 cm. Wastewater of the former chemical plant was the pollution sources of Cr, and Cr was accumulated in soil depth of 0-10 cm. Wastewater of the former chemical plant and coal gangue were the pollution sources of Pb and Cu, and they were accumulated in soil depth of 20-30 cm and 0-10 cm respectively. 3) The heavy metals from coal gangue were accumulated in soil depth of 20-30 cm, and the heavy metals from wastewater of the former chemical plant were accumulated in soil depth of 0-10 cm. 4) Positive correlation between concentrations of most heavy metals was significant, it was speculated that most heavy metals were mainly from the same materials. There was a significant positive correlation between Hg, Cd and organic matter, nitrogen, available phosphorus, and a significant negative correlation between Cr, Pb and organic matter, nitrogen, available phosphorus. 5) Distribution of these heavy metals presented a stronger spatial relevance because their spatial pattern were mainly influenced by natural factors such as the soil parent material, climate, topography and other structural factors. All of spatial variability was small scale. Characteristic of spatial variation was relation with the complex distribution object.

**Key words:** soil heavy metal; spatial distribution; variation characteristics; abandoned coal mine in Datong area