

# 新疆煤中钴的分布、赋存特征及成因分析

李宝庆 庄新国 赵仕华

(中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)检测了新疆306个煤样中钴含量,结果表明新疆煤中钴含量均值高于世界煤和中国煤均值,新疆早侏罗世煤中钴含量远高于中侏罗世。统计分析揭示,准东和淮南煤田煤中钴主要以无机结合态存在,库拜和伊犁木斯乡煤中钴主要以有机结合态存在,其他新疆煤中钴为有机和无机结合态共存。综合分析认为,新疆煤中钴的分布主要受控于沼泽中地下水位和源区母岩性质的影响。

**关键词:** 新疆煤; 钴; 分布; 赋存

中图分类号: P618.11; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0574-07

## The distribution, modes of occurrence and genesis of cobalt in coals of Xinjiang

LI Bao-qing, ZHUANG Xin-guo and ZHAO Shi-hua

(Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Cobalt in 306 coal samples from Xinjiang was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The Co concentrations of coal in Xinjiang are obviously higher than Co concentrations both in China and abroad, and the cobalt content of the early-Jurassic coal is much higher than that of the middle-Jurassic coal in Xinjiang. Statistics show that Co is existent predominantly in the organic binding state in coals of Kubai and Musixiang within Yili, associated mainly with inorganic matter in coals of eastern and southern Junggar, and related to organic and inorganic matters in coals of other places in Xinjiang. The concentrations of cobalt in these coals are controlled by the groundwater table in swamp and the properties of parent rocks in the source area.

**Key words:** Xinjiang coal; cobalt; distribution; mode of occurrence

煤中元素地球化学特征的研究不仅能为成煤条件、成煤过程和区域构造史研究提供重要地质信息(Yudovich and Ketris, 2002),而且可为燃煤过程中有害元素的污染控制提供有用环境信息(Finkelman *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2012)。

许多学者已经报道了煤中元素的分布及赋存特征(Swaine, 1990; Swaine and Goodarzi, 1995; 赵峰华, 1997; 张军营, 1999; 白向飞, 2003; 唐修义等,

2004; 任德贻等, 2006; Ketris and Yodovich, 2009; Arbuzov *et al.*, 2011; Dai *et al.*, 2012),认为其主要受控于源区母岩性质、沉积环境、成岩和煤化过程、同期和后期矿化作用和地下水动力条件等(Swaine, 1990; Clarke and Sloss, 1992; Goodarzi and Swaine, 1994; Yodovich and Ketris, 2002; 任德贻等, 2006; Arbuzov *et al.*, 2011; Dai *et al.*, 2012)。

收稿日期: 2013-10-17; 修订日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972104)

作者简介: 李宝庆(1986-)男,博士,矿产普查与勘探专业, E-mail: bqli1986@126.com。

煤中钴的分布特征及赋存状态,多数学者已做过研究(Swaine, 1990; Swaine and Goodarzi, 1995; 张军营, 1999; 唐修义等, 2004; 任德贻等, 2006), 普遍认为烟煤和无烟煤中钴主要以硫化物和砷化物形式存在, 其次为铝硅酸盐和有机态(唐修义等, 2004; 任德贻等, 2006), 低煤阶褐煤中可与有机质结合(Finkelman, 1981)。

本文对新疆 306 件煤样中钴含量进行测试, 旨在探讨新疆煤中钴的分布特征、赋存状态及其受控因素, 为新疆煤中钴的成因、分布规律及燃煤过程中钴的迁移特征等的研究提供重要信息。

### 1 采样及实验方法

研究所采煤样共 306 件。其中库拜煤田阿艾矿区采样 11 件, 属于早侏罗世塔里奇克组( $J_1t$ )煤层; 伊犁盆地采样 48 件, 其中包括木斯乡 8 件和清水河 8 件, 均属于八道湾组( $J_1b$ )煤层, 皮里青 24 件和昭苏 8 件, 均属于西山窑组( $J_2x$ )煤层; 和什托洛盖盆地采样 32 件, 其中包括 ZK4004 孔 25 件和 ZK8603 孔 7 件, 均属于西山窑组煤层; 准东、淮南煤田采样 215 件, 均为西山窑组煤层。各煤样采集位置见图 1。

煤中钴含量的测定采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)检测, 矿物分析采用粉末 X 射线衍射(XRD)测定, 工业分析按照国家标准 GB212-77 和 GB212-91 进行。文中只列出钴含量的测试数据, 其他常量、微量元素测试、矿物含量、煤岩鉴定和工业分析等数据因篇幅所限, 不在列出。

### 2 新疆煤中钴的分布特征

煤中钴含量表现出地区差异性和成煤时代差异性共存的分布特征。

#### 2.1 不同区域煤中钴含量分布特征

对比世界( $5.10 \mu\text{g/g}$ ; Ketris and Yudovich, 2009) 美国( $6.10 \mu\text{g/g}$ ; Finkelman, 1993) 英国( $6.05 \mu\text{g/g}$ ; Spears and Zheng, 1999) 澳大利亚( $4.00 \mu\text{g/g}$ ; Raask, 1985) 等国煤中钴含量分布, 中国煤( $7.08 \mu\text{g/g}$ ; Dai et al., 2012) 中钴含量明显富集, 但仍处于世界范围( $1\sim 30 \mu\text{g/g}$ ; Swaine, 1990) 相对地壳丰度( $24.7 \mu\text{g/g}$ ; 黎彤, 1992) 而言, 煤中钴含量明显亏损。

对比世界煤( $5.10 \mu\text{g/g}$ ; Ketris and Yudovich, 2009) 和中国煤( $7.08 \mu\text{g/g}$ ; Dai et al., 2012) 中钴含量, 新疆煤( $7.91 \mu\text{g/g}$ ) 中钴含量高于世界煤和中

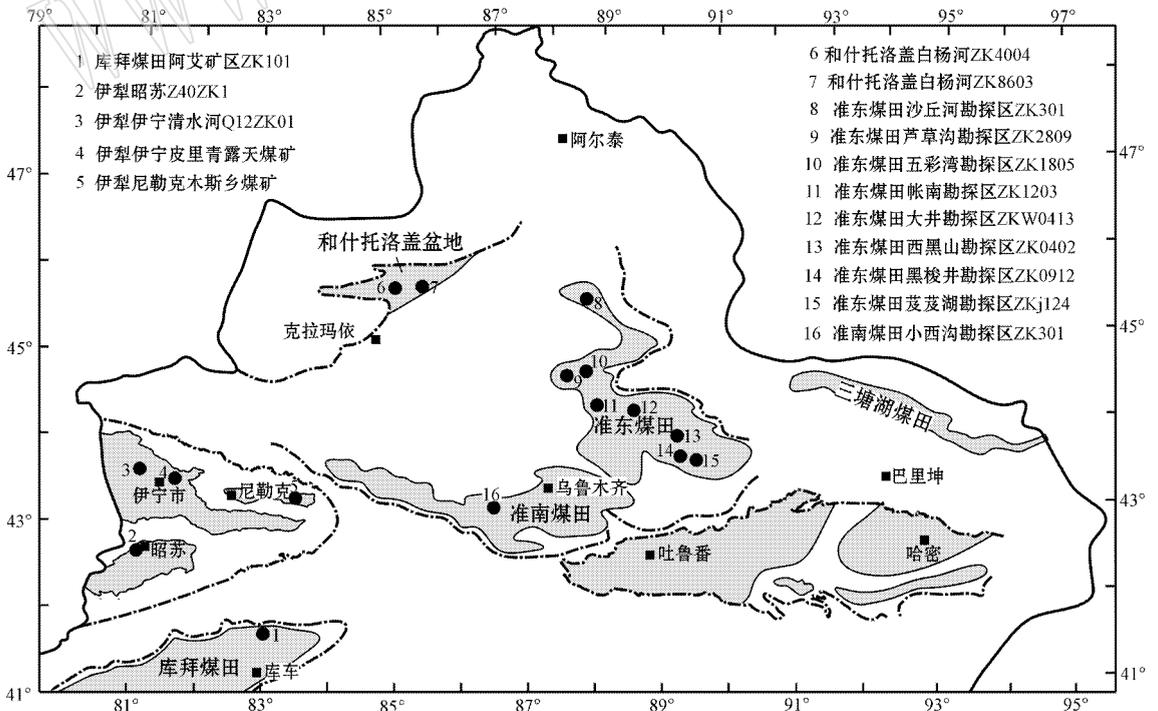


图 1 研究煤样采样位置

Fig. 1 Location of coal samples in Xinjiang

国煤平均值,也高于中国华北(6.00  $\mu\text{g/g}$ ;唐修义等 2004) 华南聚煤区(7.00  $\mu\text{g/g}$ ;唐修义等 2004) 煤中钴含量均值。

对比中国不同煤田煤中钴含量分布,库拜煤(16.55  $\mu\text{g/g}$ ) 伊犁煤(7.70  $\mu\text{g/g}$ ) 和什托洛盖煤(7.53  $\mu\text{g/g}$ ) 淮南煤(10.02  $\mu\text{g/g}$ ;任德贻等,2006) 贵州水枝煤(9.38  $\mu\text{g/g}$ ;任德贻等,2006) 等煤中钴含量高于中国煤均值,其他煤田如准东煤田(5.47  $\mu\text{g/g}$ ) 淮南煤田(2.30  $\mu\text{g/g}$ ) 河东煤田(3.75  $\mu\text{g/g}$ ;任德贻等 2006) 西山煤田(2.07  $\mu\text{g/g}$ ;任德贻等,2006) 等煤中钴含量低于中国煤均值。

新疆不同煤田或矿区煤中钴含量分布差异很大。库拜煤、伊犁清水河煤、伊犁木斯乡煤、和什托洛盖 ZK4004 煤、准东沙丘河煤、准东炭炭湖煤、准东西黑山煤和准东黑梭井煤中钴含量均值高于中国煤均值,其他煤中钴含量均值低于中国煤均值(表 1、图 2)。自库拜煤至淮南小西沟煤,新疆煤中钴含量总体呈现逐渐减小趋势;自伊犁清水河煤至伊犁昭苏煤,煤中钴含量呈减小趋势;自准东沙丘河煤至准东黑梭井煤,煤中钴含量呈小幅度波状变化;自准东黑梭井煤至准东大井煤,煤中钴含量逐渐减小(图 2)。

## 2.2 不同成煤时代钴含量分布特征

任德贻等(2006)总结了不同成煤时代煤中钴含量分布特征(表 2),认为中国除石炭—二叠纪煤中钴含量低于中国煤均值外,其他聚煤期煤中钴含

表 1 新疆不同含煤盆地不同勘探区煤中钴含量分布特征(算术平均值)  $\mu\text{g/g}$   
Table 1 The distribution of cobalt in different mines within different coal-bearing basins in Xinjiang( arithmetic mean)

勘探区	钴含量(最小~最大/平均值)	标准偏差
库拜阿艾矿区 ZK101	5.0~31.0/16.5	8.99
伊犁清水河 Q12ZK01	1.7~35.9/13.9	11.94
伊犁木斯乡煤矿	3.2~16.2/8.1	5.10
伊犁皮里青露天煤矿	0~16.9/5.5	5.23
伊犁昭苏 Z40ZK1	1.4~7.9/3.3	2.09
和什托洛盖 ZK4004	6.0~20.0/9.6	3.46
和什托洛盖 ZK8603	3.0~8.0/5.4	2.07
准东沙丘河 ZK301	5.3~20.0/10.8	8.01
准东炭炭湖 ZKj124	0.0~29.0/9.1	6.91
准东西黑山 ZK0402	1.0~19.0/8.8	4.70
准东黑梭井 ZK0912	0.0~26.5/8.0	6.53
准东芦草沟 ZK2809	0.0~12.0/4.4	4.55
准东五彩湾 ZK1805	0.0~8.0/1.0	1.79
准东帐南 ZK1203	0.0~3.8/1.0	1.57
准东大井 ZKW0413	0.0~10.0/0.8	2.14
淮南小西沟 ZK301	0.0~5.0/2.3	1.53

量均高于中国煤均值。另外,其他学者也做过相同研究(赵峰华,1997;白向飞,2003),但结果相差较大(表 2)。

对比新疆早侏罗世(八道湾组、塔里奇克组)和中侏罗世(西山窑组)煤中钴含量分布,得知早侏罗世煤中钴含量(11.39  $\mu\text{g/g}$ )明显高于中侏罗世煤中钴含量(4.24  $\mu\text{g/g}$ )。

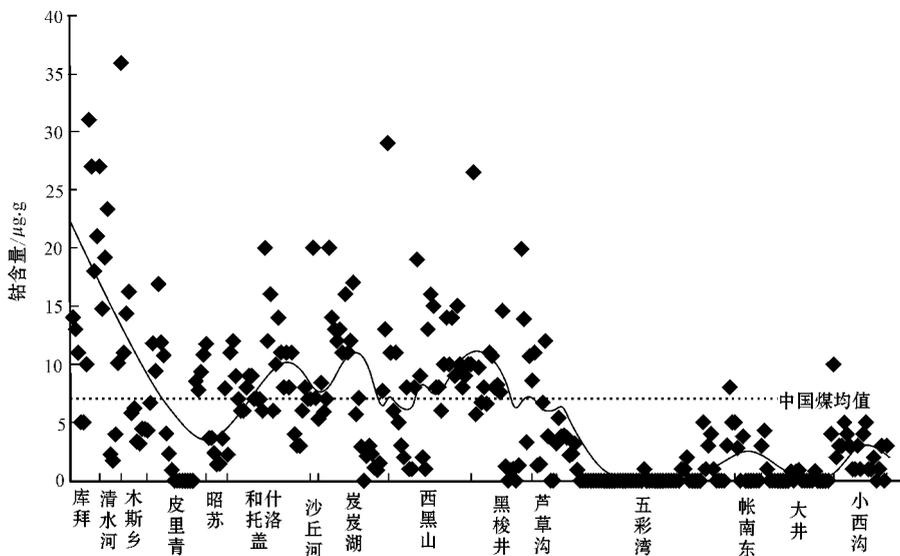


图 2 新疆煤中钴含量变化分布趋势图

Fig. 2 The distribution tendency of cobalt content in coals of Xinjiang

表 2 中国不同成煤时代钴含量分布特征(算术平均值)

μg/g

Table 2 The distribution of cobalt in China in different coal-accumulating epochs( arithmetic mean)

元素	N	E	J <sub>3</sub> -K <sub>1</sub>	J <sub>1,2</sub>	T <sub>3</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>
钴 <sup>a</sup>	3.80	13.77	4.78	5.37	9.83	6.61	2.83	2.80	
钴 <sup>b</sup>		14.18	11.92	8.78	14.76	14.55	12.14	12.83	13.97
钴 <sup>c</sup>	11.75(E-N)		8.09	8.59	7.72	10.07		4.24(C-P)	

备注：钴(赵峰华,1997)钴(白向飞,2003)钴(任德贻等,2006)。

### 3 新疆煤中钴的赋存状态

多元统计分析是一种间接研究煤中元素赋存状态的统计方法,在近年研究中得到广泛采用(Dai *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2008; Sia and Abdullah, 2011; Riley *et al.*, 2012)。该方法依据煤中各元素与煤灰分(判断元素有机或无机结合态)Al(代表铝硅酸盐)、Fe(代表硫化物)和 Ca(代表碳酸盐岩)等的相关系数判断元素在煤中的赋存状态。

Finkelmar(1995)认为煤中钴的赋存状态的置信水平为 4,即煤中钴的赋存状态的研究还没有定论,仍需大量探索。多年研究成果揭示,烟煤和无烟煤中钴具多种赋存状态,其中硫化物较多,铝硅酸盐和有机质次之(唐修义等,2004;任德贻等,2006);低煤阶煤中钴可与有机质结合(Finkelmar, 1981)。

统计分析揭示新疆煤中钴的赋存状态可分为 3 类(表 3)。类 A 中钴主要以无机结合态存在,类 B 中钴以有机+无机结合态存在,类 C 中钴主要以有机结合态存在。需做说明的是,准东五彩湾

ZK1805、帐南 ZK1203 和大井 ZKW0413 勘探区绝大多数煤样中钴含量低于检测值,未对其进行统计分析。

#### 3.1 钴的无机结合态

准东煤田和淮南煤田勘探区煤中钴与灰分( $r = 0.30 \sim 0.79$ )Al( $r = 0.37 \sim 0.82$ )Fe( $r = -0.06 \sim 0.46$ )和 Ca( $r = 0.18 \sim 0.58$ )的相关系数揭示该区煤中钴主要以铝硅酸盐结合态存在,可能部分以碳酸盐岩、硫化物结合态存在。

#### 3.2 钴的有机结合态

库拜阿艾矿区和伊犁木斯乡煤中钴与灰分( $r = -0.47$ ,  $r = -0.38$ )Al( $r = -0.12$ ,  $r = -0.15$ )Fe( $r = -0.45$ ,  $r = -0.35$ )和 Ca( $r = -0.69$ ,  $r = -0.65$ )的相关系数揭示该区煤中钴主要以有机结合态为主,尽管可能部分钴以矿物质结合。

#### 3.3 钴的无机+有机结合态

其他新疆煤中钴与灰分( $r = -0.23 \sim 0.29$ )Al( $r = -0.23 \sim 0.34$ )Fe( $r = -0.55 \sim 0.35$ )和 Ca( $r = -0.65 \sim 0.30$ )具不显著负相关或正相关关系,揭示该区煤中钴以有机和无机结合态共存,有机和无机所占比例随矿区不同而不同。

表 3 新疆煤中钴与各指标的相关系数及赋存状态

Table 3 The correlation coefficients and modes of occurrence of cobalt in coals of Xinjiang

采样位置	元素	灰分	Al	Fe	Ca	赋存状态	分类
准东沙丘河 ZK301	Co	+0.79	+0.82	+0.46	+0.51	无机结合态	类 A
准东芦草沟 ZK2809	Co	+0.60	+0.63	+0.45	+0.43	无机结合态	
准东黑梭井 ZK0912	Co	+0.60	+0.68	+0.35	+0.18	无机结合态	
准东炭炭湖 ZKj124	Co	+0.41	+0.46	+0.35	+0.32	无机结合态	
淮南小西沟 ZK301	Co	+0.39	+0.45	+0.01	+0.25	无机结合态	
准东西黑山 ZK0402	Co	+0.30	+0.37	-0.06	+0.58	有机+无机	
和什托洛盖 ZK4004	Co	+0.29	+0.34	-0.52	-0.05	无机+有机	类 B
伊犁清水河 Q12ZK01	Co	+0.18	+0.20	-0.34	+0.22	有机+无机	
伊犁伊宁皮里青煤矿	Co	+0.03	-0.13	-0.55	+0.30	无机+有机	
和什托洛盖 ZK8603	Co	+0.03	-0.23	-0.25	-0.65	有机+无机	
伊犁昭苏 Z40ZK1	Co	-0.23	+0.10	+0.35	+0.04	有机+无机	类 C
伊犁尼勒克木斯乡煤矿	Co	-0.38	-0.15	-0.35	-0.65	有机结合态	
库拜阿艾矿区 ZK101	Co	-0.47	-0.12	-0.45	-0.69	有机态为主	

## 4 新疆煤中钴含量分布的受控地质因素

煤中微量元素的聚集和分布受控于泥炭化作用阶段、煤化作用阶段和成煤后风氧化作用阶段中的多种地质因素的共同控制(Swaine, 1990; 唐修义等, 2004; 任德贻等, 2006), 这些因素主要包括源岩性质、沼泽类型、煤化程度和水文条件等。任德贻等(2006)依据微量元素富集主控因素将煤中微量元素富集类型划分为 6 种类型, 即陆源富集型、岩浆热液作用富集型、火山作用富集型、大断裂-热液作用富集型、地下水作用富集型和沉积环境-生物作用富集型。新疆煤中钴的分布可能主要受控于地下水位和源区母岩性质的影响。

### 4.1 地下水位对煤中钴分布的影响

以镜质组含量为横坐标、钴含量为纵坐标的两者分布关系揭示镜质组含量与煤中钴含量具较显著的正相关关系( $r = 0.56$ ) (图 3)。以镜质组含量 50%、钴含量  $5.1 \mu\text{g/g}$  (世界煤平均值) 将图 3 分割为 I、II、III 和 IV 这 4 个分区。其中钴含量高于世界煤均值的样品点大多数位于镜质组含量  $> 50\%$  分区 (II 区), 此区镜质组含量与钴含量的相关系数  $r = 0.43$ , 钴含量低于世界煤均值的样品点大多数位于镜质组含量  $< 50\%$  分区 (III 区), 此区镜质组含量与钴含量的相关系数  $r = 0.47$ 。因此认为新疆煤中钴含量受镜质组含量影响, 即受沼泽中地下水位变化影响, 具体可归因于沼泽水体的氧化还原条件和沼泽水体中地下水搬运矿物的能力。

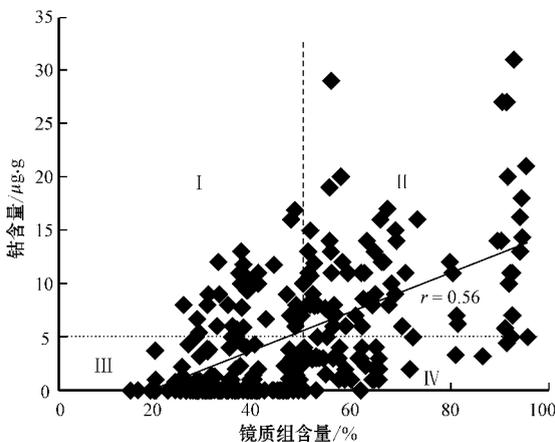


图 3 新疆煤中镜质组含量与钴含量关系分布图

Fig. 3 The relationship between vitrinite and Co content

### (1) 沼泽水体的氧化还原条件

高的镜质组含量表明沼泽具高的地下水位且呈还原环境。此条件有利于黄铁矿的保存(不易被氧化), 增加了钴元素载体(黄铁矿常为钴的载体)保存的可能性。

### (2) 沼泽水体中地下水搬运矿物的能力

沼泽中地下水位的变化影响地下水体搬运矿物的能力, 高的地下水位易于矿物质的聚集, 故煤中矿物含量常作为判断水体变化的指标(Diessel *et al.*, 2000; Davies *et al.*, 2006; Diessel, 2007)。矿物质作为钴元素赋存的主要载体, 其含量的增加意味钴元素载体的增加。如新疆煤中矿物质含量与钴含量具较显著的正相关关系( $r = 0.41$ ) (图 4), 移除钴的有机结合态和有机+无机结合态煤样, 其正相关关系更为显著( $r = 0.67$ )。

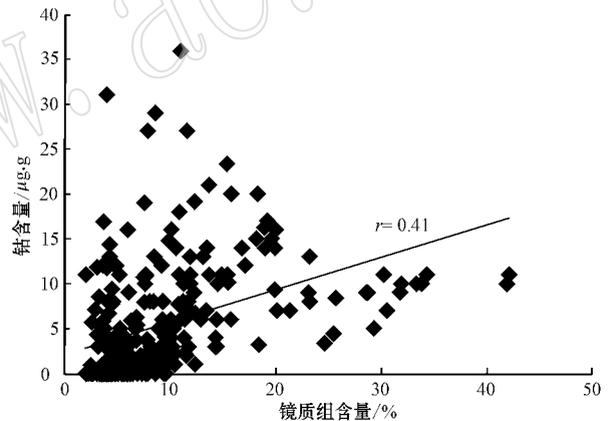


图 4 新疆煤中矿物质含量与钴含量关系分布图

Fig. 4 The relationship between mineral content and cobalt content of coals in Xinjiang

新疆早侏罗世(八道湾组、塔里奇克组)煤中镜质组含量(81.1%~95.8%, 平均值 91.4%) 远高于中侏罗世(西山窑组)煤中镜质组含量(14.7%~92.7%, 平均值 45.2%), 或许此为新疆早侏罗世煤中钴含量高于中侏罗世煤中钴含量的原因所在。

### 4.2 源区母岩性质对煤中钴分布的影响

聚煤盆地源区母岩性质决定着泥炭沼泽发育的地球化学背景(任德贻等, 2006; Dai *et al.*, 2012)。新疆早中侏罗世含煤岩系的陆源区主要为天山山系和博格达山, 其主要由石炭纪中性喷发岩和富含 Cu、V、Ni、Co 和 Cr 等元素的海西期辉长岩组成(任德贻等, 2006), 故新疆煤中 Co 含量相对较高。

古泥炭沼泽距离源区母岩的远近影响着煤中同生微量元素的分布。新疆准东煤田沙丘河、西黑山、黑梭井和炭炭湖煤中钴含量高于准东煤田芦草沟、五彩湾、帐南和大井煤中钴含量,其原因与距离源区远近相关(图1)。后者距离源区较远,碎屑物质在长距离的搬运过程中会经受风化而减少微量元素的含量,造成盆缘元素相对富集且呈带状分布而盆内元素相对亏损。

## 5 结论

(1)新疆煤中钴含量均值高于世界煤和中国煤钴含量均值,其分布特征表现为区域差异性和成煤时代差异性共存。区域上,库拜阿艾、伊犁清水河、伊犁木斯乡煤矿、和什托洛盖 ZK4404、准东沙丘河、准东西黑山、准东黑梭井和准东炭炭湖煤中钴含量高于中国煤均值;其他勘探区煤中钴含量低于中国煤均值。成煤时代上,早侏罗世煤中钴含量远高于中侏罗世煤中钴含量。

(2)新疆煤中钴的赋存状态可分为3类,即无机结合态、无机+有机结合态和有机结合态。准东煤田和淮南煤田煤中钴主要以无机结合态存在;伊犁木斯乡煤和库拜煤中钴主要以有机结合态存在;其他煤中钴以无机+有机结合态存在,无机和有机态所占比例随矿区不同而不同。

(3)新疆煤中钴含量分布主要受控于沼泽中地下水位和源区母岩性质的影响。地下水位一方面决定着钴的载体(黄铁矿)的保存潜力(氧化或还原条件),另一方面影响地下水体搬运矿物的能力。富钴源岩决定了新疆早、中侏罗世泥炭沼泽发育的地球化学背景。准东煤田钴含量的高低与距离源区远近密切相关。

(4)今后研究需进一步深化各矿区内微量元素的分布、赋存特征研究,为各矿区煤中元素的成因、分布规律及燃煤过程中元素的迁移特征等的研究提供重要信息。

致谢 感谢新疆地矿局地科处和地质九队在野外工作和资料方面给予的帮助。

## References

Arbuzov S I, Volostnov A V, Rikhvanov L P, *et al.* 2011. Geochem-

- istry of radioactive elements(U, Th) in coal and peat of northern Asia[J]. *International Journal of Coal Geology*, 86: 318~328.
- Bai Xiangfei. 2003. The Distribution, Mode of Occurrence and Volatility of Trace Elements in Coals of China[D]. Xi'an: China Coal Research Institute, 18~116(in Chinese).
- Clarke L B and Sloss L L. 1992. Trace Elements-Emissions from the Coal Combustion and Gasification[M]. London: IEA Publication, 1~111.
- Dai S, Ren D, Chou C L, *et al.* 2012. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. *International Journal of Coal Geology*, 94: 3~21.
- Dai S, Ren D, Tang Y, *et al.* 2005. Concentration and distribution of elements in Late Permian coals from western Guizhou Province, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 61: 119~137.
- Davies R, Howell J, Boyd R, *et al.* 2006. High-resolution sequence-stratigraphic correlation between shallow marine and terrestrial strata: Examples from the Sunnyside Member of the Cretaceous Blackhawk Formation, Book Cliffs, eastern Utah[J]. *AAPG Bulletin*, 90: 1121~1140.
- Diessel C. 2007. Utility of coal petrology for sequence stratigraphic analysis[J]. *International Journal of Coal Geology*, 70: 3~34.
- Diessel C, Boyd J, Wadsworth D, *et al.* 2000. On balanced and unbalanced accommodation/peat accumulation ratios in the Cretaceous coals from Gates Formation, western Canada, and their sequence-stratigraphic significance[J]. *International Journal of Coal Geology*, 43: 143~186.
- Finkelman R B. 1981. Modes of Occurrence of Trace Elements in Coal[M]. US Geological Survey Open-File Report, 81~99.
- Finkelman R B. 1993. Trace Elements and Minor Elements in Coal[M]. New York: Plenum Press, 593~607.
- Finkelman R B. 1995. Modes of occurrence of environmentally sensitive trace elements in coal[A]. Swaine D W and Goodarzi F. Environmental Aspects of Trace Elements in Coal[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 24~50.
- Finkelman R B, Orem W, Castranova V, *et al.* 2002. Health impacts of coal and coal use: possible solutions[J]. *International Journal of Coal Geology*, 50: 425~443.
- Goodarzi F and Swaine D J. 1994. The influence of geological factors on the concentration of boron in Australian and Canadian coals[J]. *Chemical Geology*, 118: 301~318.
- Ketris M P and Yudovich Y E. 2009. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes. world average for trace element contents in black shales and coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 78: 135~148.
- Li Tong. 1992. The statistical characteristics of the abundance of chemi-

- cal elements in the earth's crust[J]. *Geology and Prospecting*, 28(10):1~7 (in Chinese).
- Raask E. 1985. The mode of occurrence and concentration of trace elements in coal[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 11: 97~118.
- Ren Deyi, Zhao Fenghua, Dai Shifeng, *et al.* 2006. *Geochemistry of Trace Elements in Coal*[M]. Beijing: Science Press, 61~335 (in Chinese).
- Riley K W, French D H, Farrell O P, *et al.* 2012. Modes of occurrence of trace and minor elements in some Australian coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 94:214~224.
- Sia S G and Abdullah W H. 2011. Concentration and association of minor and trace elements in Mukah coal from Sarawak, Malaysia, with emphasis on the potentially hazardous trace elements[J]. *International Journal of Coal Geology*, 88:179~193.
- Silva L F O, Jasper A, Andrade M L, *et al.* 2012. Applied investigation on the interaction of hazardous elements binding on ultrafine and nanoparticles in Chinese anthracite-derived fly ash[J]. *Science of the Total Environment*, 419:250~264.
- Spears D A and Zheng Y. 1999. Geochemistry and origin of elements in some UK coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 38:161~179.
- Swaine D J. 1990. *Trace Elements in Coal*[M]. London: Butterworths, 312~368.
- Swaine D J and Goodarzi F. 1995. *Environmental Aspects of Trace Elements in Coal*[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 20~300.
- Tang Xiuyi, Huang Wenhui. 2004. Trace elements in coal of China[M]. Beijing: The Commercial Press, 1~390 (in Chinese).
- Wang J, Yamada O, Nakazato T, *et al.* 2008. Statistical analysis of the concentrations of trace elements in a wide diversity of coals and its implications for understanding elemental modes of occurrence[J]. *Fuel*, 87:2211~2222.
- Yudovich Y E and Ketris M P. 2002. *Inorganic Matter of Coal*[M]. Ekaterinburg: Urals Branch of RAS, 1~422.
- Zhang Junying. 1999. *Enrichment Mechanism and Pollution Restraining of Potentially Hazardous Trace Elements in Coal*[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 10~85 (in Chinese).
- Zhao Fenghua. 1997. *Study on the Mechanism of Distribution and Occurrences of Hazardous Minor and Trace Elements in Coal and Leaching Experiments of Coal Combustion Residues*[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 20~150 (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 白向飞. 2003. 中国煤中微量元素赋存特征及其迁移规律试验研究[D]. 西安: 煤炭科学研究院, 18~116.
- 黎彤. 1992. 地壳元素丰度的若干统计特征[J]. *地质与勘探*, 28(10):1~7.
- 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 2006. *煤的微量元素地球化学*[M]. 北京: 科学出版社, 61~335.
- 唐修义, 黄文辉. 2004. *中国煤中微量元素*[M]. 北京: 商务印书馆, 1~390.
- 张军营. 1999. *煤中潜在毒害微量元素富集规律及其污染性抑制研究*[D]. 北京: 中国矿业大学, 10~85.
- 赵峰华. 1997. *煤中有害微量元素赋存机制及燃煤产物淋滤实验研究*[D]. 北京: 中国矿业大学, 20~150.