

# 内蒙古乌达矿区煤中硫的同位素组成及演化特征<sup>\*</sup>

代世峰<sup>1</sup> 艾天杰<sup>1</sup> 焦方立<sup>1</sup> 马凤学<sup>2</sup> 李宝春<sup>2</sup>

1. 中国矿业大学, 北京 100083; 2. 内蒙古乌达矿务局, 乌海 016040

1. *China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;*

2. *Inner Mongolia Wuda Coal Bureau, Wuhai 016040, China.*

1999-09-17 收稿, 2000-02-21 改回

Dai Shifeng, Ai Tianjie, Jiao Fangli, Ma Fengxue and Li Baochun. 2000. Components of sulfur isotopes and characteristics of sulfur evolution in Wuda Coalfield, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2):269~274

**Abstract** According to the synthetic analysis of coal petrology and the isotopic determinations of the organic sulfur and pyrite in the column sections of No. 9 coal seam (the high sulfur coal whose  $\delta^{34}\text{S}$  of organic sulfur is from  $-12.3\%$  to  $5.8\%$  and  $\delta^{34}\text{S}$  of pyritic sulfur is from  $-18.7\%$  to  $1.1\%$ ) and No. 13 coal seam (the low sulfur coal whose  $\delta^{34}\text{S}$  of organic sulfur is from  $9.6\%$  to  $11.5\%$  and  $\delta^{34}\text{S}$  of pyritic sulfur is from  $8.6\%$  to  $9.7\%$ ) in Wuda coalfield, the characteristics and the genesis of sulfur isotopes in coals were discussed, and then the relationships between the organic sulfur isotope and the pyritic sulfur isotope, and  $\delta^{34}\text{S}$  values of organic sulfur and pyrite and total sulfur were analyzed. The study results show that there are administrative levels in the column section of the coal seam and anti-directions in the geological history in the sulfur isotope formation of the high sulfur coal. The administrative levels reflect the open degree of  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{H}_2\text{S}$  in a system and filtration of  $^{32}\text{SO}_4^{2-}$  because of the pyrite formation. The anti-direction reflects not only the contributions of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  to the high sulfur formation in the initial stage of peat swamp accumulating, but also the major factors of the seawater influence and the  $\text{Fe}^{2+}$  supplying in the later period of peat swamp accumulation.

**Key words** Organic sulfur, Pyrite, Sulfur isotope, Wuda coalfield

**摘要** 通过对内蒙古乌达矿区高硫煤 9 煤层和低硫煤 13 煤层剖面上有机硫和黄铁矿硫同位素的测定, 结合煤岩学综合分析, 着重论述了煤中硫同位素的分布特点及成因, 分析了有机硫同位素和黄铁矿硫同位素之间及其和全硫的关系, 提出高硫煤硫同位素形成过程中在剖面上具有层次性和时间上具有的相向性, 层次性表现为随泥炭沼泽深度的增加, 体系对  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的开放程度及黄铁矿的形成对  $^{32}\text{SO}_4^{2-}$  的过滤性; 相向性不仅表现为泥炭聚积初期,  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  对高硫煤形成的贡献, 更重要的是泥炭沼泽形成后期, 海水的影响及  $\text{Fe}^{2+}$  供给是乌达矿区高硫煤形成的主要因素。

**关键词** 有机硫; 黄铁矿; 硫同位素; 乌达矿区

中图法分类号 P618.11; P597.2

## 1 引言

高硫煤中硫稳定同位素的研究, 一直是煤岩学家和地球化学家所关注的问题。在高硫煤(全硫含量  $>3\%$ )中, 无论是硫的物理、化学性质, 还是煤中硫的大分子流动相的构成, 都与低硫煤迥异(雷加锦等, 1994)。自 1974 年 Smith and Batts 发表了澳大利亚二叠纪和三叠纪煤中硫同位素的报导以来,

许多学者相继开展了煤中硫同位素和地质成因的研究 (Casagrande, 1979; Given, 1985; Lyons, 1989; Wieder, 1990; Querol, 1993; 雷家锦等, 1994; Hou and Ren, 1995; Nowak, 1996; Kostova *et al.*, 1996; Chou, 1997; Dai and Tang, 1999), 这无疑对煤中硫的成因以至合理利用煤炭资源起了重要作用。一般认为, 低硫煤中硫的来源主要是成煤植物本身, 植物同化作用造成  $\delta^{34}\text{S}$  相对于溶解硫酸盐源的  $\delta^{34}\text{S}$  (20%) 稍有减少, 其变化幅度不大; 而高硫煤中硫的来源主

<sup>\*</sup> 煤炭科学基金资助项目(编号: 97 地 10205)。

第一作者简介: 代世峰, 男, 1970 年出生, 博士, 讲师, 煤和油气地质、地球化学专业。

要是海水中的硫酸盐,其硫同位素值一般偏于负值,硫酸盐的异化细菌还原作用导致硫同位素大规模分离。但是由于地质现象的多变性和复杂性,现有硫的演化模式和形成机理的研究缺少可对比性,而且趋于简单,难以准确地阐明煤中硫的演化过程及其形成机理。

乌达矿区是内蒙古主要炼焦煤产区,但9煤层硫分含量很高,洗精煤中可达2.5%以上,严重影响了煤的销售及经济效益。本文根据煤中硫同位素值的分布特征,结合带能谱仪的扫描电镜和偏光显微镜所观察的煤岩学特点,分析并对比了不同类型硫在泥炭化阶段的形成与变化,阐述了煤中硫特别是高硫煤中硫的形成和演化特点,提出了高硫煤硫同位素形成过程中在剖面上具有层次性和时间上具有相向性的特征。

## 2 样品的选择与实验

样品取自内蒙古乌达矿区9煤层剖面。9煤层是在无障

壁或障壁砂坝不发育的陆棚或分流间湾环境下形成的的煤层,煤级

$$R_{o,max} = 1.22\%, \quad R_{o,min} = 0.81\%;$$

全硫平均含量为3.25%。为了便于对比,亦采取了13煤层的煤样,13煤层是在河控三角洲平原基础上形成的煤层,煤级

$$R_{o,max} = 1.26\%, \quad R_{o,min} = 0.94\%,$$

属于低硫煤,全硫平均含量为0.68%。

煤样的煤岩学分析首先是把分层块样制成光片,在Leits-MPVIII偏光显微镜下观察,内容包括有机显微组分和矿物的含量(表1)、种类以及反映煤成因的结构构造标志。然后在带能谱仪的扫描电镜下,对煤样中最能反映煤层成因的有机显微组分-基质镜质体中的有机硫含量进行了测定。煤中硫稳定同位素的测定,首先用手选的方法,把煤样中基本上属于后生成因的大块及充填于裂隙中的黄铁矿选出,不予测定,然后采用逐级化学提取的方法分离了煤中有机硫和黄铁矿硫进行硫的同位素分析,采用的标准为V-CDT(Canyon Diablo Troilite),分析精度为 $\pm 0.2\%$ 。

表1 9煤层和13煤层煤岩分析及硫同位素分析结果

Table 1 Analysis of coal petrology and sulfur isotopes of No. 9 and No. 13 coal seams

编号	煤岩定量(%)				基质镜质体中 有机硫含量(%)	黄铁矿 含量(%)	$\delta^{34}\text{S} (\text{‰})$	
	V	I	E	M			$\delta^{34}\text{S}_{\text{py}}$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{org}}$
9-13	71.37	16.05	0.39	12.19	3.45	7.95	-18.7	-12.3
9-12	62.11	29.87	0.00	9.02	2.76	8.11	-15.6	-
9-11	53.78	36.73	0.20	9.29	3.21	3.52	-17.5	-
9-10	59.96	29.32	0.18	10.54	2.34	2.35	-12.3	-8.2
9-9	66.24	29.43	0.20	4.13	2.45	1.08	-9.6	-
9-8	63.37	29.65	0.00	6.98	2.11	0.82	-8.4	2.5
9-7	33.48	54.42	0.00	12.10	1.98	1.25	0.9	-
9-6	47.60	46.00	0.30	6.10	2.02	0.58	1.1	5.8
9-5	63.97	29.66	0.20	6.17	2.56	0.68	-2.4	-
9-4	63.71	29.64	0.18	6.46	2.23	0.58	-5.6	-2.4
9-3	65.63	28.80	0.40	5.17	2.78	1.12	-8.9	-
9-2	79.66	15.18	0.00	4.52	2.68	1.32	-7.8	-
9-1	72.28	20.85	0.40	6.47	3.02	2.26	-12.4	-6.4
13-6	64.10	24.60	0.80	10.50	0.45	0.11	-	11.5
13-5	55.80	19.50	1.40	22.80	0.51	0.24	8.6	9.8
13-4	46.70	18.10	1.60	33.60	0.36	0.00	-	9.6
13-3	47.80	17.20	2.00	21.80	0.24	0.14	-	10.4
13-2	55.20	18.60	1.20	25.10	0.33	0.35	8.3	8.9
13-1	67.10	17.20	0.00	15.70	0.43	0.47	9.7	11.2

注:9-1~9-13为9煤层剖面;13-1~13-6为13煤层剖面;V-镜质组;I-惰性组;E-壳质组;M-矿物;

$\delta^{34}\text{S}_{\text{py}}$ -黄铁矿硫同位素;  $\delta^{34}\text{S}_{\text{org}}$ -有机硫同位素

### 3 分析结果与讨论

#### 3.1 煤岩分析

表1为9煤层和13煤层的煤岩分析和硫同位素的测试结果。9煤层的显微组分主要是镜质组,并且以基质镜质体为主,其含量可达整个有机显微组分的64.7%,说明该煤层形成时的凝胶化程度很高。惰性组以膨化程度较高的丝质体、半丝质体及粗粒体为主;惰屑体亦常见,其含量为0~10.26%,这些特点表明,9煤层的聚积环境不仅具有较强的还原性,使有机质遭受较强烈的腐解,而且还不时伴有动荡的水体活动,使有机质遭受氧化,也为微生物活动提供了所需要的氧。9煤层的矿物组成以粘土矿物和黄铁矿为主,此外还有少量的石英和方解石,黄铁矿化菌落的发现,表明9煤层在聚积过程中有大量的菌落参与了成煤作用。在同生作用时期形成的晶粒状黄铁矿除部分呈浸染状分布于基质镜质体外,大部分在基质镜质体中和粘土矿物共生,呈平行层理方向延伸的线理状集合体出现,这种沿层理分布的黄铁矿集合体是泥炭沼泽中特定的化学界面产物,在此界面上硫离子和铁离子皆较易获取。

13煤层的显微煤岩组成和特征与9煤层差异较大,由于受淡水的影响,其镜质组含量比9煤层低10%左右,以基质镜质体和均质镜质体为主,其次是膨化程度不高的丝质体和半丝质体。在泥炭堆积过程中,由淡水带来的陆源物质特别是粘土矿物得以沉淀,矿物含量明显高于9煤层,含量为10.50%~33.60%。黄铁矿和基质镜质体中有机硫含量都不高,分别为0~0.47%和0.24%~0.51%(表1)。

#### 3.2 不同成因煤中硫同位素组成及特征

从表1中可以看出,高硫煤9煤层中无论是 $\delta^{34}\text{S}_{\text{org}}$ 还是 $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}}$ 变化幅度比较大,离差

$$\Delta_{\text{org}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{org最大}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{org最小}} = 18.1\%,$$

$$\Delta_{\text{py}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{py最大}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{py最小}} = 19.8\%,$$

并且

$$\Delta_{\text{org}} < \Delta_{\text{py}};$$

而低硫煤中 $\delta^{34}\text{S}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}}$ 变化幅度很小,其中

$$\Delta_{\text{org}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{org最大}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{org最小}} = 2.6\%,$$

$$\Delta_{\text{py}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{py最大}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{py最小}} = 1.1\%,$$

并且

$$\Delta_{\text{py}} < \Delta_{\text{org}}。$$

这种关系表明,均一化作用在低硫煤中较为明显,而在高硫煤中则无表现,高硫煤中黄铁矿的同位素的显著变化说明可能有几个世代的黄铁矿;在泥炭和成煤前物质中,亦可能存在孤立的微环境,使硫酸盐还原菌分布不均匀,并导致了黄铁矿生成的复杂性。各种形态分布的黄铁矿及黄铁矿化杆状菌落和黄铁矿化的微型叠层石的发现亦是此证据之一。

煤中硫的两种主要来源的同位素组成不同。一是由原始

植物保存下来的硫,硫的植物同化作用造成 $\delta^{34}\text{S}$ 相对于溶解硫酸盐源的 $\delta^{34}\text{S}(20\%)$ 稍有减少,13煤层

$$\delta^{34}\text{S}_{\text{org}} = 9.6 \sim 11.5\% > 0,$$

$$\delta^{34}\text{S}_{\text{py}} = 8.6 \sim 9.7\% > 0;$$

二是硫酸盐的异化细菌还原作用导致硫同位素大规模分离,硫化物中重硫同位素能减少60%左右(Chou, 1997),使之趋于负值,9煤层

$$\delta^{34}\text{S}_{\text{org}} = -12.3 \sim 5.8\%,$$

$$\delta^{34}\text{S}_{\text{py}} = -18.7 \sim 1.1\%,$$

一般小于零。乌达矿区煤中硫同位素的分布特征同Smith研究澳大利亚二叠纪和三叠纪煤中硫同位素及Price研究伊利诺伊盆地硫同位素的组成所得出的结论相似,表明大部分低硫煤中硫的来源主要是原始植物,高硫煤中硫大部分来源于细菌成因的硫化物。

#### 3.3 高硫煤中硫同位素的形成及演化特征

在高硫煤各种形态硫的形成过程中,黄铁矿和有机硫表现出形成初期 $\text{Fe}^{2+}$ 和有机质对硫离子的争夺性、形成过程中在剖面上的层次性和时间上的相向性。乌达矿区高硫煤中硫同位素比较轻(一般 $\delta^{34}\text{S} < 0$ )和高含量黄铁矿的事实说明,泥炭沼泽早期具有强烈、持续的微生物活动。硫酸盐的细菌还原作用在黄铁矿和有机硫形成过程中起了重要作用。硫酸盐的无机还原作用需要较高的活化能,泥炭中的 $\text{FeS}_2$ 只能通过细菌的活动而形成,因为根据反应动力学,对于硫酸盐由纯化学的还原作用转变为非硫化物来说,能量是不足的。硫酸盐还原菌把海水带来的 $\text{SO}_4^{2-}$ 不断还原成 $\text{H}_2\text{S}$ ,剖面上 $\delta^{34}\text{S}_{\text{org}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{py}}$ (图1)表明活性铁离子与有机质相比,对还原硫有更大的竞争能力,当存在活性铁离子的情况下,硫离子会优先与其结合成硫化物矿物,只有在受限的情况下,多余的 $\text{H}_2\text{S}$ 才结合进入有机分子。

无论是 $\delta^{34}\text{S}_{\text{org}}$ 值还是 $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}}$ 值在剖面上由低变高再变低的变化趋势表明,在泥炭堆积的早期和晚期,泥炭沼泽受淡水和海水的双重影响非常明显,一方面,由于受淡水的影响,由陆源物质带来的铁离子为黄铁矿的生成准备了必要的物质基础,另一方面,由于受海水的影响,为高硫煤的形成提供了丰富的硫离子来源。

硫酸盐细菌的还原作用有很强的分馏效应,据Gold和Kaplan(1975)的结论,脱硫弧菌在还原硫酸盐时,如果以 $\text{SO}_4^{2-}$ 为底介质,产物 $\text{H}_2\text{S}$ 的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-46.00\%$ ,而以 $\text{SO}_3^{2-}$ 为底介质时,所得的 $\text{H}_2\text{S}$ 的 $\delta^{34}\text{S}$ 则为 $-14.3\%$ 。但这种分馏效应还要看研究体系对 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 是开放的还是封闭的。在泥炭沼泽的表层,体系的开放性好,还原作用过程中 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 浓度基本上保持稳定,随着 $\text{SO}_4^{2-}$ 不断输入体系, $\text{SO}_4^{2-}$ 不随还原作用的进行而下降(图2),其分馏系数保持在一定的范围内,因而 $\text{H}_2\text{S}$ 的 $^{32}\text{S}$ 富集程度高;随着深度的增加,体系的开放程度受到限制, $\text{SO}_4^{2-}$ 的供给得到了约束,并且靠渗透作用往下的 $\text{SO}_4^{2-}$ 经黄铁矿的生成的过滤作用,消

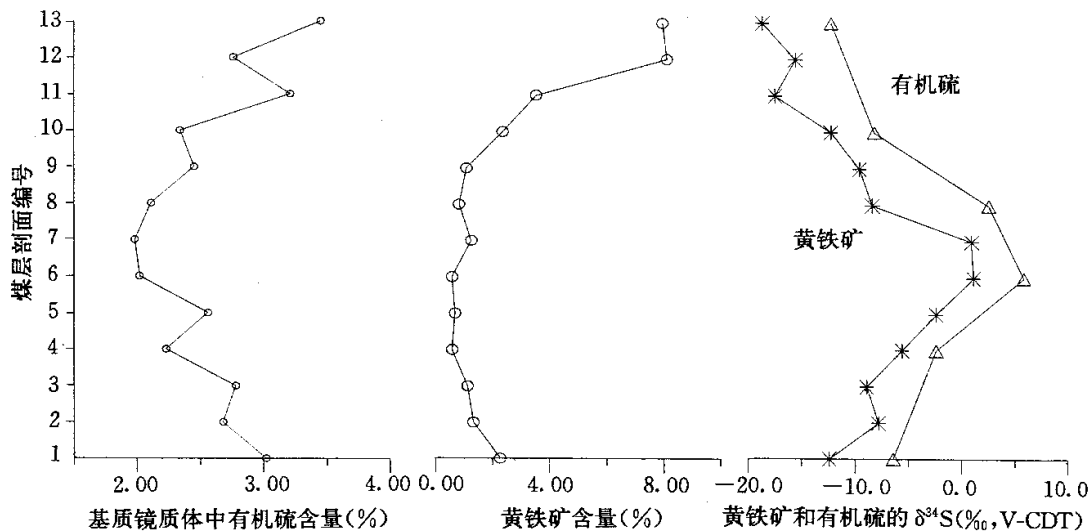


图 1 9 煤层中黄铁矿、有机硫和黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值、基质镜质体中有机硫在煤层剖面上的变化

Fig. 1 Changes of pyrite, values of  $\delta^{34}\text{S}$ , and organic sulfur in desmocollinite in the column section of No. 9 coal seam

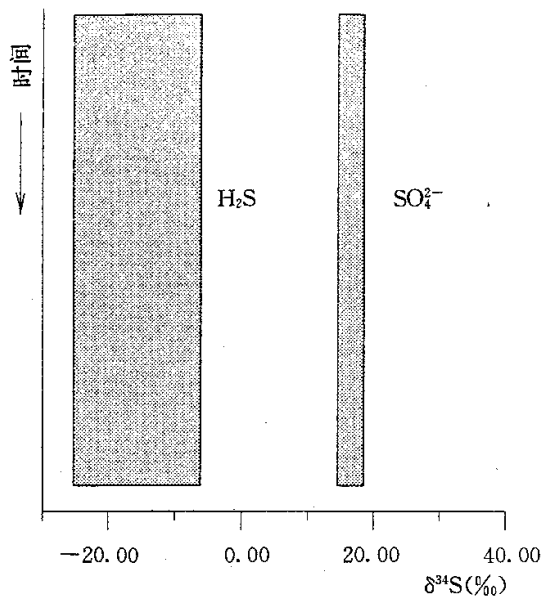


图 2 开放体系中  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的  $\delta^{34}\text{S}$  随时间的变化

Fig. 2  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfate and sulfide versus time in a system with an unlimited amount of sulfate

消耗了  $^{32}\text{SO}_4^{2-}$ , 导致  $^{34}\text{SO}_4^{2-}$  相对浓度的增加,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度总体上减少, 此时还原菌的还原作用选择余地小, 生成的  $\text{H}_2\text{S}$  也因此相对富含  $^{34}\text{S}$  (图 3), 由此形成黄铁矿和有机硫的同位素组成在剖面上自上而下的层次性。

在泥炭聚积初期, 由于受海水的影响,  $\text{SO}_4^{2-}$  供给充足, 弱还原的环境有利于细菌的活动, 生成富  $^{32}\text{S}$  的黄铁矿和有机硫, 随着泥炭的堆积, 海水的影响逐渐减弱,  $\text{SO}_4^{2-}$  供给受到限制, 被细菌还原作用生成的  $\text{H}_2\text{S}$  的  $^{34}\text{S}$  相对富集 (图 3), 形成黄铁矿和有机硫在剖面上自下而上的层次性, 结合泥炭堆积后期受海水的影响, 煤中硫同位素的形成具有地质历史时期的相向性 (图 4)。这种时间上的相向性并不是等同的, 煤层顶部  $\delta^{34}\text{S}$  值比煤层底部  $\delta^{34}\text{S}$  值小说明泥炭沼泽形成后期 (煤化作用以前) 海水的影响、陆源物质铁离子的供给及细菌的活动对煤中硫的形成起着主导作用。

有机硫  $\delta^{34}\text{S}$  值和黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值呈明显的线形关系 (图 5), 其关系式为:

$$Y = 0.92X - 6.18,$$

其中

$$Y = \delta^{34}\text{S}_{\text{py}}, X = \delta^{34}\text{S}_{\text{org}}.$$

此关系表明, 虽然有机质和铁离子表现出对硫离子具有争夺性, 但这种争夺性并不是绝对的, 在  $^{32}\text{SO}_4^{2-}$  充分供给并有细菌持续活动的情况下, 部分有机质亦可与硫离子结合形成有机硫。在  $^{32}\text{SO}_4^{2-}$  受限,  $^{34}\text{SO}_4^{2-}$  相对富集的情况下, 有机质和铁离子可与富  $^{34}\text{S}$  的  $\text{H}_2\text{S}$  结合形成  $\delta^{34}\text{S}$  较重的黄铁矿和有机硫。全硫和黄铁矿及有机硫的  $\delta^{34}\text{S}$  值呈负相关 (图 6), 说明在封闭体系中,  $\delta^{34}\text{S}$  值愈大, 其数量越少, 有机质和铁离子优先与富  $^{32}\text{S}$  的  $\text{H}_2\text{S}$  结合形成同位素较轻的黄铁矿和有机硫, 剖面上黄铁矿和基质镜质体中有机硫由高变低再变高的特点以及硫同位素由轻变重再变轻的趋势亦是此证据之一 (图 1)。

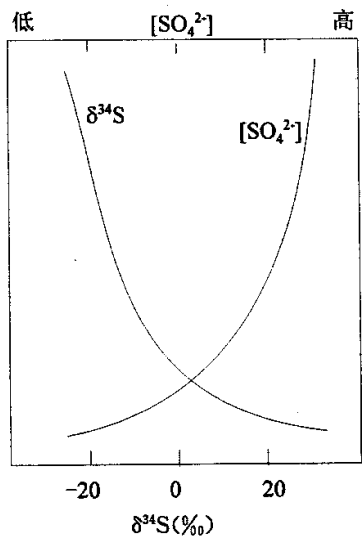


图3 细菌还原硫酸盐过程中  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度和  $\delta^{34}\text{S}$  值关系  
Fig. 3 Relationship between  $\delta^{34}\text{S}$  values and concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  during bacterial reduction of sulfate

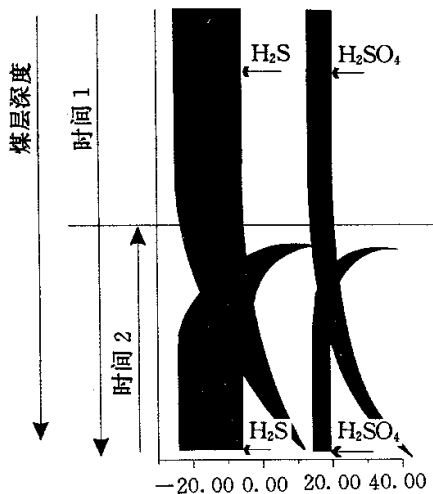


图4 煤中硫形成过程中时间上的相向性  
时间1:泥炭沼泽形成后期;时间2:泥炭沼泽形成初期  
Fig. 4 The time anti-direction characteristic of sulfur formation in coal

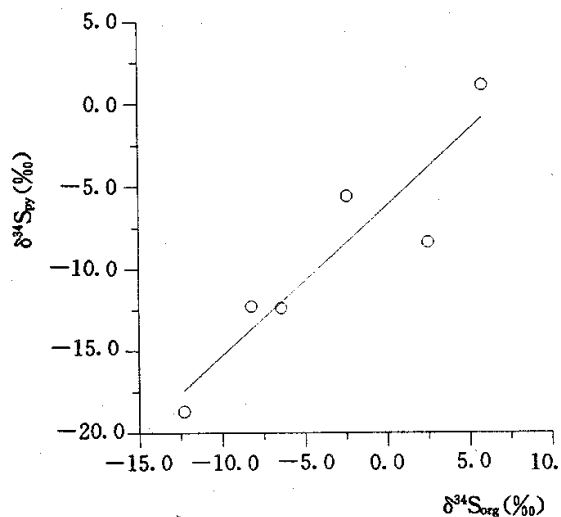


图5 有机硫  $\delta^{34}\text{S}$  值和黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值的关系  
Fig. 5 Relationship of  $\delta^{34}\text{S}$  values between organic sulfur and pyrite

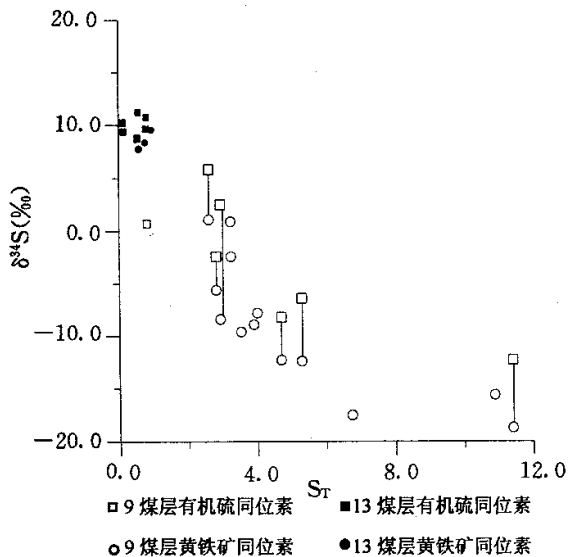


图6 煤中硫  $\delta^{34}\text{S}$  值和全硫关系  
Fig. 6 Relationship between  $\delta^{34}\text{S}$  value and total sulfur

相对于溶解硫酸盐源的  $\delta^{34}\text{S}$  稍有减少,硫酸盐的异化细菌还原作用导致硫同位素大规模分离,使之趋于负值。

(2)在高硫煤形成过程中,黄铁矿和有机硫表现出形成初期  $\text{Fe}^{2+}$  和有机质对硫离子的争夺性、形成过程中在剖面上的层次性和时间上的相向性。争夺性虽然是客观存在,但并

#### 4 结论

(1)乌达矿区煤中硫的两种主要来源的同位素组成不同,由原始植物物质保存下来的硫,硫的植物同化作用造成  $\delta^{34}\text{S}$

非是绝对的;层次性表现为随泥炭沼泽深度的增加,体系对 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 的开放程度及黄铁矿的形成对 $^{32}\text{SO}_4^{2-}$ 的过滤性;相向性不仅表现为在泥炭聚积初期, $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 对高硫煤形成的贡献,更重要的是泥炭沼泽形成后期,海水的影响及 $\text{Fe}^{2+}$ 供给是乌达矿区高硫煤形成的主要因素。

致谢 感谢任德贻教授和唐跃刚教授的热情指导。

## References

- Casagrande D J and Lily N. 1979. Incorporation of elemental sulphur in coal as organic sulphur. *Nature*, 282 (6): 598~599
- Chou C L. 1997. Geologic factors affecting the abundance, distribution, and speciation of sulfur in coals. In: Yang Qi (ed), *Proceedings of the 30th International Geological Congress, Vol. 18, Part B, Geology of Fossil Fuels-Coal*. VSP, Utretht. The Netherlands: 47~57
- Dai Shifeng, Tang Yuegang. 1999. Abundance, distribution, and origin of sulfur in coals in Wuda Coalfield, Inner Mongolia, Northern China. In: *The 16th Annual of TSOP, Salt Lake City, Utah, USA*
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Tang Yuegang, Ai Tianjie, Zhou Qiang, Ma Fengxue and Li Baochun. 1999. Findings and significance of algae and bacteria in high-sulfur coal seams in Wuda Coalfield, Inner Mongolia. *Journal of China University of Mining and Technology*, 28(1): 57~60 (in Chinese with English abstract)
- Given P H and Miller R N. 1985. Distribution of forms of sulfur in peats from saline environments in the Florida Everglades. *International Journal of Coal Geology*, 5: 397~409
- Hou Xiaoqiang, Ren Deyi and Mao Heling. 1995. Application of imaging TOF-SIMS to the study of some coal Macerals. *International Journal of Coal Geology*, 27: 23~32
- Kostova I, Petrov O and Kortenski J. 1996. Mineralogy, geochemistry and pyrite content of Bulgarian subbituminous coals, Pernik Basin. In: Gayer R and Harris I (eds.). *Coalbed*

- Methane and Coal Geology*, Geological Society Special Publication. London: The Geological Society, No. 109: 301~314
- Lei Jiajin, Ren Deyi, Tang Yuegang, Chu Xuelian and Zhao Rui. 1994. The accumulating model of the sulfur in the super-high organic sulfur coal in Guiding. *Chinese Science Bulletin*, 39 (15): 1405~1408 (in Chinese)
- Lyons P C, Whelan J and Dulong F T. 1989. Marine origin of pyritic sulfur in the Lower Bakerstown coal bed, Castleman coal field, Maryland (U. S. A. ). *International Journal of Coal Geology*, 12: 329~348
- Nowak J. 1996. Petrological coal seam accumulation model for the Zacler Formation of the Lower Siesian coal basin, Southwestern Poland. In: Gayer R and Harris I (eds.). *Coalbed methane and coal geology*, Geological Society Special Publication. London: The Geological Society, No. 109: 261~286
- Querol X, Alastney A, Chinchon J S, Fernandez-Turiel J L and Lopez-Soler A. 1993. Determination of pyritic sulfur and organic matter contents in Spanish subbituminous coals by X-ray powder diffraction. *International Journal of Coal Geology*, 22: 279~293
- Tang Yuegang, Dai Shifeng, Tang Zhen. 1999. The characteristics and dynamic evaluation of coal quantity in Wuda Coalfield. Xuzhou: Press of China University of Mining and Technology, 40~58 (in Chinese)
- Wieder R K. 1990. Methane production and sulfate reduction in two Appalachian peatlands. *Biogeochemistry*, 10: 81~104

## 附中文参考文献

- 代世峰,任德贻,唐跃刚,艾天杰,周强,马凤学,李宝春. 乌达矿区高硫煤中菌藻类体的发现及意义. *中国矿业大学学报*, 1999, 28 (1): 57~60
- 雷加锦,任德贻,唐跃刚等. 贵定超高有机硫煤硫的聚积模式. *科学通报*, 1994, 39, (15): 1405~1408
- 唐跃刚,代世峰,唐真. 乌达矿区煤质特性及动态评价研究. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999, 40~58