

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.02.009

# 五家沟矿区 5 号煤中伴生元素地球化学特征

李进孝<sup>1</sup>, 张珂<sup>1</sup>, 王珍珍<sup>1</sup>, 高鹏鹏<sup>1</sup>, 张绍韡<sup>2</sup>, 赵存良<sup>1,\*</sup>

(1. 河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 山西省地质矿产研究院, 山西 太原 030000)

**摘要:**为了研究大同煤田南部煤中伴生元素的地球化学特征,运用矿物学、煤地球化学以及岩石学等学科的理论和研究方法,利用 X 射线荧光光谱分析(XRF)、电感耦合等离子质谱分析(ICP-MS)、X 射线衍射分析(XRD)、扫描电镜+能谱分析(SEM-EDS),对五家沟矿区 5 号煤中伴生元素的含量及赋存特征进行研究。结果表明,五家沟 5 号煤中常量元素 Al、Si、Ca、Fe 含量较高,占到灰分总量的 95% 以上。Al 主要以高岭石的形式存在, Si 以黏土矿物和石英的形式赋存于煤中,煤中 Ca 的主要载体是方解石, Fe 在煤中主要以黄铁矿的形式存在。煤中微量元素 Li 富集, Ga、Sr、Zr、Nb、Hf、Ta 轻度富集。锂和镓主要赋存于高岭石中; 铌和钽赋存于黏土矿物中, 部分可能赋存于伊利石中; 锆和铪赋存于黏土矿物中, 还有部分赋存于金红石内。

**关键词:**五家沟; 伴生元素; 赋存特征; 地球化学

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)02-0163-09

## Geochemical Characteristics of Associated Elements in No. 5 Coal of Wujiagou Coalfield

LI Jinxiao<sup>1</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>, WANG Zhenzhen<sup>1</sup>, GAO Pengpeng<sup>1</sup>,  
ZHANG Shaowei<sup>2</sup>, ZHAO Cunliang<sup>1,\*</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;

2. Institute of Geology and Mineral Resources of Shanxi Province, Taiyuan 030000, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the geochemical characteristics of the associated elements in the Southern Datong Coalfield, this paper analyzed the content and occurrence characteristics of associated elements in No. 5 coal in Wujiagou Coalfield by using of X-ray fluorescence spectrometry (XRF), inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), X-ray diffraction analysis (XRD), scanning electron microscopy and energy spectrum analysis (SEM-EDS). The results show that the contents of Al, Si, Ca and Fe were enriched in Wujiagou No. 5 coal, accounting for more than 95% of the total ash content. The Al mainly exists in kaolinite. Si is mainly deposited in clay minerals and quartz. The main carrier of Ca in coal is calcite. Fe exists mainly as pyrite in coal. Li is enriched, and Ga, Sr, Zr, Nb, Hf, and Ta are slightly enriched. Li and Ga mainly occur in kaolinite. Nb and Ta occur in clay minerals, some of which may in illite. Zirconium and hafnium also occur in clay minerals, and some in rutile.

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2019-11-11

基金项目: 河北省自然科学基金项目“煤系伴生‘三稀’金属元素富集机理”(D2016402104)

作者简介: 李进孝(1995-), 男, 青海门源人, 硕士研究生, 主要从事煤系伴生元素研究。E-mail: lijinxiao1010@163.com

\* 通讯作者: 赵存良(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 成矿规律与成矿预测。E-mail: zhaocunliang@hebeu.edu.cn



### 3.2 煤中常量元素

#### 3.2.1 常量元素的含量特征

煤中常量元素含量是通过测定煤灰中的常量元素氧化物含量并计算得到(表 1)。实验结果显示五

家沟 5 号煤中  $\text{SiO}_2$  (8.50%) 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8.07%) 平均含量最高,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量最低。 $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  平均值占到灰分总量的 88% 以上, 而且每个样品中  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量相差不大。

表 1 五家沟煤中常量元素含量表(全煤基, %)

Tab. 1 Major elements in the coal of wujiagou coal mine(On whole coal basis, %)

样品编号	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{S}_{t,d}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	灰分
WJG-1	0.01	0.05	8.08	8.03	0.49	0.20	0.01	0.54	0.13	0.002	0.13	17.85
WJG-2(夹矸)	0.03	0.14	34.93	37.80	0.03	0.01	0.10	0.06	0.67	—	0.32	74.78
WJG-3	0.01	0.11	9.20	9.68	0.03	0.60	0.04	2.02	0.13	0.011	0.27	22.15
WJG-4	0.04	0.13	13.70	14.79	0.04	0.29	0.07	0.82	0.44	0.005	0.27	31.15
WJG-5(夹矸)	0.05	0.15	31.20	34.69	0.02	—	0.25	0.09	0.39	—	0.18	72.33
WJG-6	0.01	0.05	5.65	5.84	0.01	0.40	0.01	1.09	0.10	0.007	0.96	13.60
WJG-7(夹矸)	0.03	0.12	24.75	27.37	0.04	0.01	0.10	0.10	0.89	—	0.17	65.00
WJG-8	0.01	0.05	6.05	6.47	0.01	0.32	0.01	0.88	0.13	0.004	0.20	14.15
WJG-9(夹矸)	0.02	0.15	29.82	33.14	0.01	0.01	0.11	0.14	0.32	—	0.18	69.34
WJG-10	0.01	0.06	5.75	6.21	0.01	0.05	0.01	0.16	0.18	0.066	0.62	13.40
WJG-11(底板)	0.05	0.36	31.90	40.50	0.05	0.06	0.85	0.21	0.93	0.002	0.91	76.25
WJG-HH	0.03	0.12	32.76	35.47	0.02	0.01	0.07	0.08	1.13	—	0.21	64.90
AVERAGE(C)	0.01	0.07	7.41	7.85	0.05	0.30	0.02	0.87	0.17	0.043	0.44	17.29
AVERAGE(P)	0.03	0.14	31.61	34.73	0.02	0.01	0.14	0.09	0.52	—	0.23	70.15
中国煤	0.16	0.22	5.98	8.47	0.092	—	0.19	1.23	0.33	0.015	4.85	

注:表中—表示为低于检测下限或没有相关数据。检测单位:中国冶金地质总局山东局测试中心,2018。

五家沟 5 号煤中的常量元素含量平均值与中国煤中的含量相比,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量偏高, 为中国值的 1.24 倍, 其他常量元素含量均低于中国煤。

#### 3.2.2 常量元素的赋存特征

五家沟矿区 5 号煤煤灰中的  $\text{SiO}_2$  含量的平均值为 47.5%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的平均值为 43.6%。XRD 分析表明五家沟矿区 5 号煤中的矿物主要为高岭石、方解石和黄铁矿(图 2), 含有少量的石英、伊利石、金红石。由相关性分析显示, Si 与灰分呈显著相关(图 3b), 所以 Si 可能以黏土矿物和石英的形式赋存于煤中。Al 与灰分相关性也比较大(图 3a), 并且 XRD 结果显示研究区内主要含铝的黏土矿物为高岭石。因此, 高岭石可能是 Al 的主要载体。

煤灰中  $\text{CaO}$  含量的平均值为 2.60%, 从 XRD 图谱中发现有大量方解石存在, 并且在偏光显微镜

下也可以观察到方解石(图 4a)填充在裂隙中, 所以推测在煤中 Ca 的主要载体是方解石。

煤灰中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量的平均值为 1.55%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与全硫含量的相关性较高( $R^2=0.918$ ), 表明 Fe 在煤中主要以黄铁矿(图 4b)的形式存在, 同时黄铁矿也是煤中 S 的主要载体。

### 3.3 煤中微量元素

#### 3.3.1 煤中微量元素含量特征

关于煤中微量元素富集程度的判断依据, 不同的学者有不同的认识。GOLDSCHMIDT V. M 提出用富集系数 EF(EF=煤中元素含量算术平均值/地壳克拉克)表示煤中元素的分散和富集程度(GOLDSCHMIDT V. M., 1944)。KETRIS M. P. 和 YUDOVICH Y. E. 统计了世界无烟煤中微量元素的含量, 提出了用研究区煤中微量元素与世界煤相比得出富集浓度来反映研究区煤中微量元素的富

集程度,即富集系数=煤中微量元素/世界煤均值 (KETRIS M. P. 等,2009)。代世峰等 2013 年提出

了富集系数 CC 值(DAI Shifeng, 2013),并将其划分为 6 个不同的等级(表 2)。

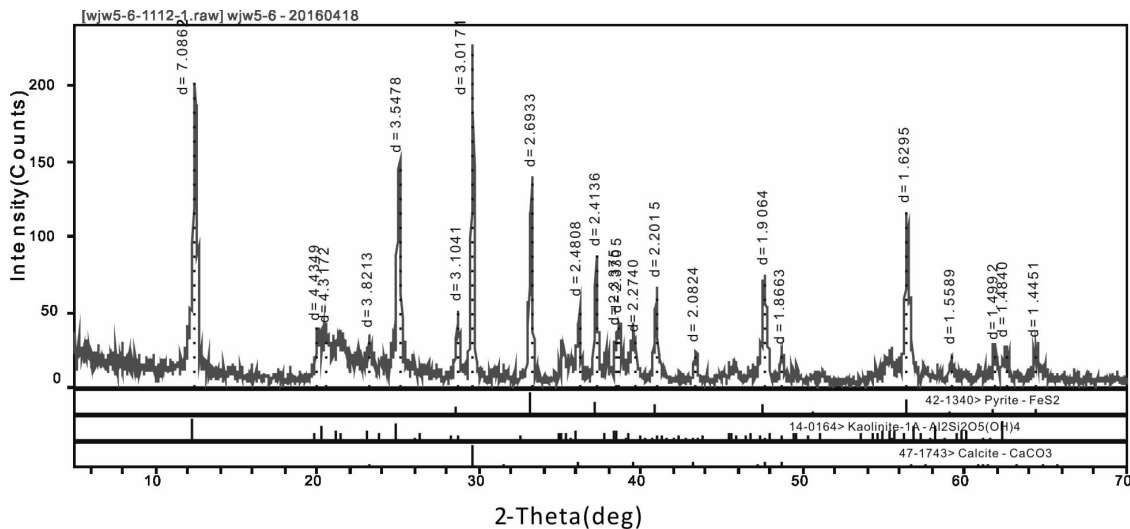


图 2 煤中矿物组分 XRD 图谱

Fig. 2 X - ray powder diffraction patterns of the coal

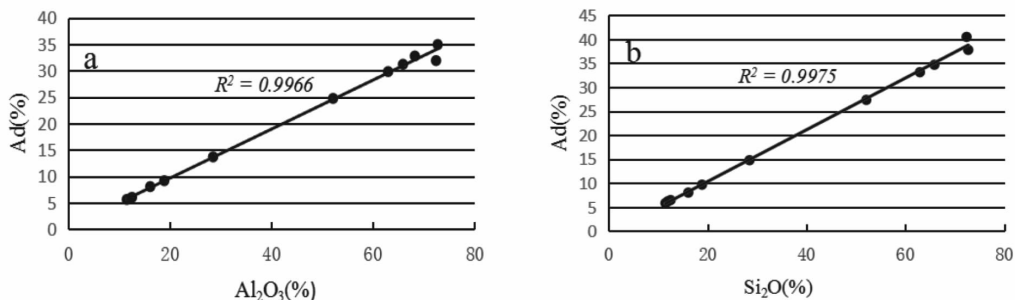
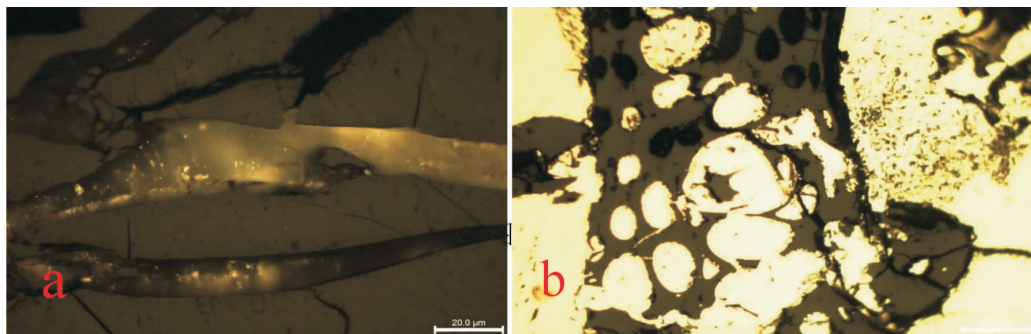


图 3 灰分与铝、硅的相关性

Fig. 3 Relation of ad to Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>



a. 方解石; b. 黄铁矿

图 4 研究区煤中的矿物

Fig. 4 Mineral in the coal

笔者将按照代世峰等人提出的微量元素富集程度判定标准 CC 值,对本研究区中的微量元素进行

讨论。根据划分的分类标准,分别对煤和夹矸的富集系数 CC 值进行计算。结果显示:Li 富集, Ga、

Zr、Nb、Hf、Ta 这 5 种元素轻度富集。Cr、Cu、Zn、均在正常值范围内(表 3)。Rb、Mo、Cs、Ba、这 7 种元素亏损,Pb、U 等其余元素

表 2 煤中元素含量富集程度分类表  
Tab. 2 Classification of elements concentration in coal

亏损	正常	轻度富集	富集	高度富集	异常高度富集
$CC < 0.5$	$0.5 \leq CC \leq 2$	$2 < CC \leq 5$	$5 < CC \leq 10$	$10 < CC \leq 100$	$100 < CC$

注:CC=煤中微量元素含量/世界煤中微量元素含量。

表 3 五家沟煤中微量元素含量表( $10^{-6}$ )  
Tab. 3 The concentration of trace element of coal from Wujiagou ( $10^{-6}$ )

样品	Li	Cr	Cu	Zn	Ga	Rb	Zr	Nb	Mo	Hf	Ta	Pb	U
WJG5-1	97.40	4.64	10.68	6.58	16.62	0.40	140.15	7.06	0.57	3.71	0.36	15.62	2.90
WJG5-2(夹矸)	411.58	7.29	14.24	10.98	32.71	3.59	333.03	33.71	1.08	10.10	2.57	14.01	4.38
WJG5-3	77.53	5.11	3.46	8.75	27.41	1.74	108.05	12.50	0.97	3.81	0.63	12.74	4.03
WJG5-4	132.95	8.14	10.61	9.42	18.96	2.30	163.40	15.46	0.89	5.62	1.15	27.47	3.42
WJG5-5(夹矸)	143.12	4.34	6.92	6.00	28.51	9.88	123.92	19.44	1.33	4.41	1.68	6.49	2.02
WJG5-6	31.28	2.51	3.48	7.15	8.75	0.33	71.11	3.56	0.72	2.37	0.31	10.47	2.14
WJG5-7(夹矸)	181.30	3.44	11.85	13.23	24.72	3.45	188.60	24.98	1.85	5.81	2.57	9.72	4.36
WJG5-8	44.09	1.70	3.80	5.52	16.40	0.31	112.49	8.73	1.27	3.54	0.58	9.33	2.84
WJG5-9(夹矸)	132.00	1.63	3.15	6.98	29.34	3.79	143.14	16.37	0.94	4.68	1.27	10.74	1.07
WJG5-10	22.70	3.65	2.59	4.25	18.18	0.19	123.51	10.01	1.73	3.70	0.36	11.54	3.29
WJG5-11(底板)	195.41	115.51	22.70	41.41	34.80	34.72	205.37	18.72	0.86	6.07	1.07	21.65	4.41
WJG5-混合	345.91	8.85	19.29	21.66	32.53	1.97	472.87	39.70	4.32	10.59	2.82	14.33	5.44
世界值	12	16	16	23	5.8	8.3	36.00	3.70	2.20	1.20	0.28	7.8	2.4
五家沟煤	67.66	4.29	5.77	6.95	17.72	0.88	119.79	9.55	1.03	3.79	0.57	14.53	3.10
CC 值	5.64	0.27	0.36	0.30	3.06	0.11	3.33	2.58	0.47	3.16	2.02	1.86	1.29

注:表中-表示为低于检测下限或没有相关数据。检测单位:中国冶金地质总局山东局测试中心,2018。

### 3.3.2 煤中伴生微量元素各述

(1)煤中的锂。DAI 等认为准格尔煤田哈尔乌素煤矿 6 号煤的锂主要来自于阴山古陆的钾长花岗岩(DAI Shifeng et al.,2008)。SUN 等认为平朔矿区 9 号煤中的锂赋存在黏土矿物中,煤中锂的来源包括阴山古陆和本溪组的铝土矿(SUN Yunzhuang et al.,2013)。孙富民认为西山煤田古交矿区 8 号煤中锂主要赋存于无机组分中,黏土矿物最有可能是吸附锂的载体(孙富民,2018)。

五家沟矿区 5 号煤中锂的含量(表 3)在  $22.7 \times 10^{-6} \sim 132.95 \times 10^{-6}$ ,平均含量为  $67.66 \times 10^{-6}$ ,是中国煤中锂平均值( $31.8 \times 10^{-6}$ )的 2.1 倍,是世界煤中锂平均值( $12 \times 10^{-6}$ )的 5.6 倍。锂与灰分呈正

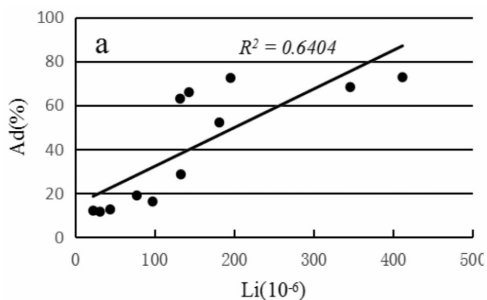
相关(图 5a),由此推断,锂主要存在于无机矿物中。2011 年孙玉壮等提出使用六步连续的化学萃取过程,证实了这个观点,其结果显示仅有 4%的锂与有机物有关。

锂与氧化铝是正相关(图 5b),但锂与 Si/Al 几乎没有相关性( $R^2=0.0675$ ),这表明锂可能与一个或多个含铝矿物具有相关性。基于上述分析,推断五家沟 5 号煤锂主要赋存于高岭石中。

(2)煤中的镓。代世峰等发现准格尔煤田 6 号煤中镓超常富集的载体为勃姆石(代世峰等,2006)。吴国代等认为黏土矿物高岭石和勃姆石等均可能是镓的载体(吴国代等,2009)。黄文辉提出煤中镓受无机组分的影响更大,可能置换黏土矿物中的部分

铝元素,造成黏土矿物中镓的含量增加,并随着沉积作用进入煤层中(黄文辉等,2002)。

五家沟矿区5号煤中镓的含量(表3)在 $8.75 \times 10^{-6} \sim 27.41 \times 10^{-6}$ ,平均含量为 $17.72 \times 10^{-6}$ ,是世界煤中镓平均值( $5.8 \times 10^{-6}$ )的3.1倍。镓与灰分呈正相关,相关系数为0.778(图6a),镓含量随着



灰分的增大而增大。灰分中主要的成分为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ ,两者与灰分均呈显著的正相关(图3),而镓又和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 正相关,相关系数为0.763(图6b)。可以推断,煤中的镓主要赋存在无机矿物中,主要以含铝矿物为主,而煤中的含铝矿物主要是高岭石。因此,五家沟矿区5号煤中的镓主要赋存于高岭石中。

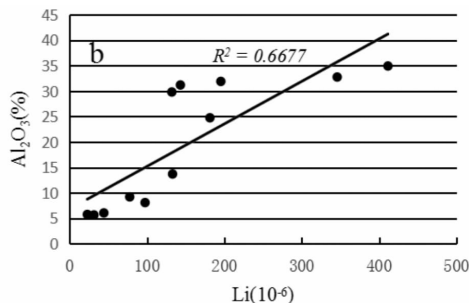


图5 锂与灰分、氧化铝的相关性图

Fig. 5 Relation of Li to Ad and  $\text{Al}_2\text{O}_3$

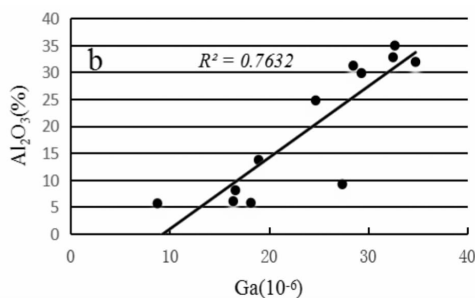
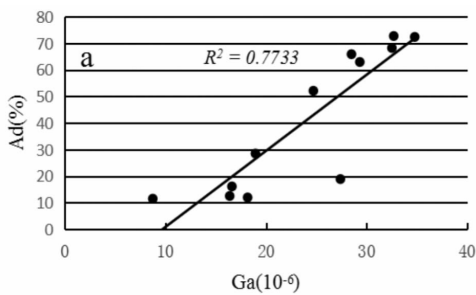


图6 镓与灰分、氧化铝的相关性图

Fig. 6 Relation of Ga to Ad and  $\text{Al}_2\text{O}_3$

(3)煤中的铌、钽。由于铌和钽的地球化学性质十分接近,因而在地球化学作用过程中,铌和钽常伴生在一起,两者常在同一矿物中出现。

XAVIER QUEROL对土耳其含硫褐煤进行研究,发现铌(Nb)主要以有机态赋存于煤中(XAVIER QUEROL,1995)。SPEARS D. A. 经过对英国主要煤田的煤进行分析,发现伊利石是煤中铌的主要载体(SPEARS D. A. et al.,1999)。LIU等对山西安太堡矿进行分析研究,得出了相同的结果(LIU Dameng et al.,2001)。

五家沟5号煤中铌的含量( $9.55 \times 10^{-6}$ )是世界煤中铌的3.7倍,煤中钽的含量( $0.57 \times 10^{-6}$ )是世界煤中钽的2倍。铌和钽与灰分呈正相关(图7a、图7b),表明铌和钽具有无机亲和性,而赋存形式与矿物有联系。铌和钽与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ 均呈正相关(图7c、图7d、图7e、图7f),说明铌和钽与硅铝酸盐的亲和性较强。本研究区内也发现了少量的伊

利石(图8)。铌和钽与 $\text{SiO}_2$ 的相关性系数均在0.5以上,呈正相关,而伊利石也是Si的载体之一。

基于上述分析,五家沟5号煤中的铌和钽赋存于黏土矿物中,部分可能赋存于伊利石中。

(4)煤中的锆、铪。DAI等在云南东部煤系地层发现了富集Zr(Hf)、Nb(Ta)、REE、Ga的多金属矿化层,研究表明其属于火山碎屑成因,主要是以离子吸附态赋存的(DAI Shifeng et al.,2010)。

五家沟矿区5号煤中锆的含量( $119.79 \times 10^{-6}$ )是世界煤中锆的3.3倍,煤中铪的含量( $3.79 \times 10^{-6}$ )是世界煤中铪的3.1倍。锆和铪与灰分呈正相关(图9a、图9b),表明锆和铪具有无机亲和性,而赋存形式与矿物有联系。锆和铪与 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ 呈正相关(图9c、图9d),说明锆和铪与硅铝酸盐的亲和性较强。锆和铪与钛呈正相关(图9e、图9f),在研究区内钛主要存在于金红石(图10)内。基于上述分析,推断五家沟矿区5号煤中锆和铪赋存于黏

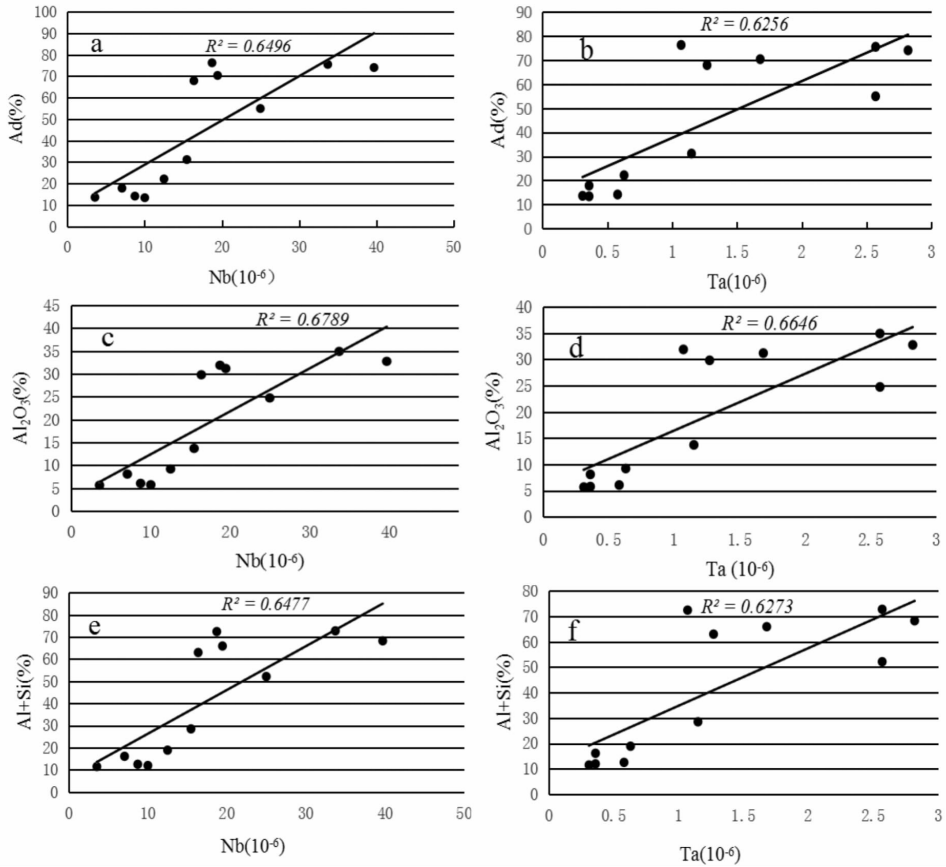


图 7 铌和钽与灰分、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>2</sub> 的相关性图

Fig. 7 Relation of Nb and Ta to Ad, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>2</sub>

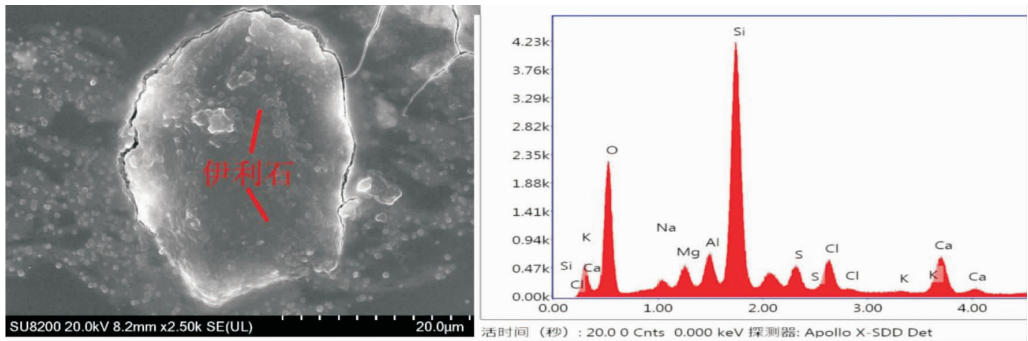


图 8 扫描电子显微镜及能谱下的伊利石图

Fig. 8 Illite under the EDS and SEM

土矿物中,还有部分赋存于金红石内。

### 4 结论

(1)五家沟 5 号煤属于中灰分、低含水量、中等挥发分、低硫煤。煤中矿物主要为高岭石、方解石和黄铁矿,含有少量的石英、伊利石、金红石。

(2)五家沟 5 号煤中的常量元素含量平均值与中国煤中的含量相比,Al、Si、Ca、Fe 的含量较高。Al 主要以高岭石的形式赋存于煤中;Si 以黏土矿物(高岭石为主)和石英的形式赋存于煤中;Fe 在煤中主要以黄铁矿的形式赋存于煤中;Ca 主要以碳酸盐态(方解石为主)形式赋存于煤中。

(3)五家沟 5 号煤中的微量元素 Li 富集,锂的

含量达到了  $17.72 \times 10^{-6}$ , 是中国煤中锂平均值的 2.1 倍, 是世界煤中锂平均值的 5.6 倍。锂主要赋存于高岭石中。

(4) 五家沟 5 号煤中的微量元素 Ga、Zr、Nb、

Hf、Ta 轻度富集, 镓主要赋存于高岭石中; 铌、钽、锆、铪赋存于黏土矿物中, 但有部分铌和钽可能赋存于伊利石中; 有少量锆和铪部分赋存于金红石内。

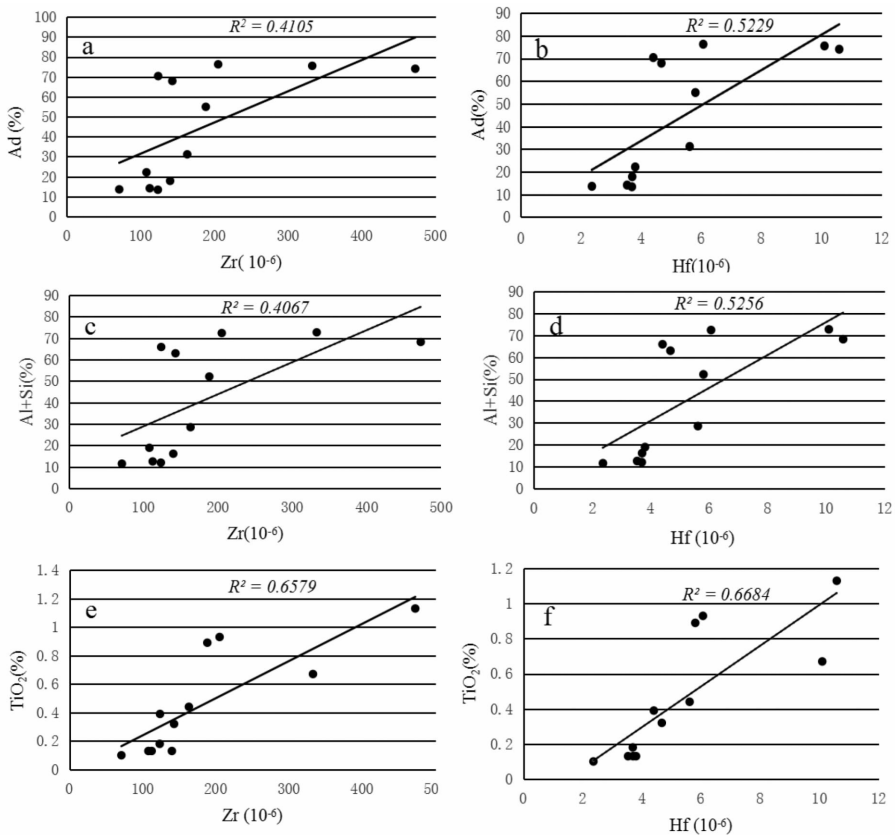


图 9 锆和铪与灰分、 $Al_2O_3 + SiO_2$ 、Ti 的相关性图

Fig. 9 Relation of Zr and Hf to Ad,  $Al_2O_3 + SiO_2$ , Ti

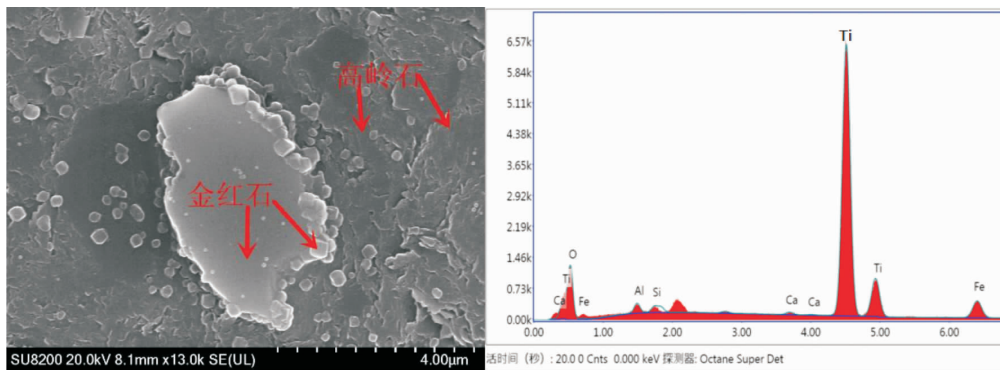


图 10 扫描电子显微镜及能谱下的金红石图

Fig. 10 Rutile under the SEM and EDS

### 参考文献(References):

秦身钧, 高康, 王金喜, 等. 黔西南盘县火烧铺和金佳矿区晚二叠世煤中伴生元素的地球化学特征[J]. 煤炭学报,

2016, 41(6): 1507-1516.

QIN Shenjun, GAO Kang, WANG Jinxi, et al. Geochemistry of the associated elements in the Late Permian Coal from the Huoshaopu and Jinjia Mines [J]. Journal of



- China Coal Society, 2016, 41(06): 1507-1516.
- 任德贻, 许德伟, 张军营, 等. 沈北煤田煤中伴生元素分布特征[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(1): 5-8.
- REN Deyi, XU Dewei, ZHANG Junying, et al. Distribution of Associated Elements in Coals from Shenbei Coalfield [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(1): 5-8.
- 代世峰, 任德贻, 李生盛. 华北若干晚古生代煤中稀土元素的赋存特征[J]. 地球学报, 2003, 24(3): 273-278.
- DAI Shifeng, REN Deyi, LI Shengsheng. Modes of Occurrence of Rare Earth Elements in Some Late Paleozoic Coals of North China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(3): 273-278.
- 代世峰, 任德贻, 李生盛. 煤及顶板中稀土元素赋存状态及逐级化学提取[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 349-353.
- DAI Shifeng, REN Deyi, LI Shengsheng. Occurrence and Sequential Chemical Extraction of Rare Earth Element in Coals and Seam Roofs[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(5): 349-353.
- 代世峰, 任德贻, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1707-1715.
- DAI Shifeng, REN Deyi, ZHOU Yiping, et al. Coal-hosted rare metal deposits Genetic type and modes of occurrence and utilization evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1707-1715.
- 王鐘堂. 山西大同煤田地层及构造[J]. 地质论评, 1957, 17(1): 64-77.
- WANG Zhongtang. Strata and structure of Datong coalfield in Shanxi Province [J]. Geological Review, 1957, 17(1): 64-77.
- 刘东娜. 大同煤田石炭二叠纪煤的煤岩学和煤地球化学研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- LIU Dongna. Study on coal petrology and coal geochemistry of Permian carboniferous coal in datong coalfield [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.
- 孙富民. 西山煤田古交矿区8号煤层煤中锂的赋存规律[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(08): 196-201.
- SUN Fumin. Occurrence regularity of lithium in No. 8 coal seam of Gujiao Mining Area in Xishan coalfield [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(08): 196-201.
- 代世峰, 任德贻, 李生盛. 内蒙古准格尔超大型镓矿床的发现[J]. 科学通报, 2006, 51(2): 177-185.
- DAI Shifeng, REN Deyi, LI Shengsheng. Discovery of the superlarge gallium deposit in junger, Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(02): 177-185.
- 吴国代, 王文峰, 秦勇, 等. 准格尔煤中镓的分布特征和富集机理分析 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(4): 117-120.
- WU Guodai, WANG Wenfeng, QIN Yong, et al. Analysis on Distribution Characteristic and Enrichment Mechanism of Elements Ga in Junger Coalfield [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(04): 117-120.
- 黄文辉, 赵继尧. 中国煤中的锗和镓[J]. 中国煤田地质, 2002, (S1): 65-70.
- HUANG Wenhui, ZHAO Jiyao. Germanium and Gallium in Coal of China [J]. Coal Geology of China, 2002, (S1): 65-70.
- XAVIER QUEROL. Trace elements in coal and their behaviour during combustion in a large power station [J]. Fuel, 1995, 74(3): 331-343.
- SPEARS D A, ZHENG Y. Geochemistry and origin of elements in some UK coals [J]. International Journal of Coal Geology, 1999, 38: 161-179.
- LIU Dameng, YANG Qi, TANG Dazhen, et al. Geochemistry of sulfur and elements in coals from the Antaibao surface mine, Pingshuo, Shanxi Province, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 46: 51-64.
- DAI Shifeng, ZHOU Yiping, ZHANG Minquan, et al. A new type of Nb (Ta)-Zr (Hf)-REE-Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 83: 55-63.
- GOODARIZE F. Mineralogy elemental composition and modes of occurrence of elements in Canada feed-coals [J]. Fuel, 2002, 81(9): 1199-1213.
- WAGNER N. J., HLATSHWAYO B. The occurrence of potentially hazardous trace elements in five Highveld Coals, South Africa [J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 63(3-4): 228-246.
- GOLDSCHMIDT V M. The Occurrence of Rare Elements in Coal Ashes [R]. Coal Research Scientific and Technol Reports of BCURA, 1944.
- KETRIS M. P., YUDOVICH Y. E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes; world average for trace element contents in black shales and coals [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78, 135-148.
- DAI Shifeng, ZHANG Weiguo, COLIN R WARD, et al. Mineralogical and geochemical anomalies of Late Permian Coals from the Fusui Coalfield, Guangxi Province, Southern China; Influences of terrigenous materials and hydrothermal fluids [J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 105: 60-84.
- DAI Shifeng, LI Dan, CHOU Chenlin, et al. Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals; New insights from the Haerwusu Surface Mine, Jungar Coalfield, Inner Mongolia, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 74: 185-202.
- SUN Yuzhuang, ZHAO Cunliang, LI Yanheng, et al. Li distribution and mode of occurrences in Li-bearing coal seam 9 from Pingshuo Mining District, Ningwu Coalfield, northern China [J]. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, 2013, 31(1): 47-58.