

地质与测量

黔西松河矿区煤中元素地球化学特征及成煤环境意义

金 军^{1,2},高 为^{1,2},孙 键³,韩忠勤¹,郑德志⁴,韩明辉¹

(1. 贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心,贵州 贵阳 550008;2. 贵州省煤田地质局,贵州 贵阳 550008;
3. 中国石油化工工程技术研究院,北京 100101;4. 煤炭科学研究总院,北京 100013)

摘要:为查明黔西松河矿区煤中元素的富集程度及富集成因,以松河矿区龙潭组上、中、下煤组9层主采煤层为研究对象,利用煤炭勘查报告中煤质化学成分及煤中Cu、Co、Ni、Sr、Be、Ba、V等7种微量元素质量分数等参数,对主要煤层的元素地球化学特征进行了研究,并依常量元素和微量元素的含量及比值探讨了龙潭组不同含煤层段成煤环境差异。结果表明:该区煤层常量元素氧化物以SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃为主,CaO次之,各常量元素丰度总体与中国煤均值相似;煤中微量元素Cu、Co、Ni、Sr、Be、Ba和V的质量分数,不但高于黔西煤均值,而且显著高于中国煤均值和世界煤均值,其中V尤为富集。灰成分指数(Fe₂O₃+CaO+MgO)/(SiO₂+Al₂O₃)、Sr/Ba、Ni/Co及S的质量分数在龙潭组上、中、下煤组煤层中呈现高-低-高的变化规律,反映龙潭组上、下煤组煤层成煤时受海水影响较大,而中煤组煤层成煤时受海水影响较小。

关键词:常量元素;微量元素;成煤环境;松河矿区

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)12-0166-08

Geochemistry characteristics and coal formation environmental significances of elements in coal from Songhe Mining Area in western Guizhou

JIN Jun^{1,2}, GAO Wei^{1,2}, SUN Jian³, HAN Zhongqin¹, ZHENG Dezhī⁴, HAN Minghui¹

(1. Guizhou Provincial Engineering Technology Research Center of Coalbed Methane and Shale Gas, Guiyang 550008, China; 2. Guizhou Provincial Coalfield Geology Bureau, Guiyang 550008, China; 3. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China; 4. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract:In order to investigate the enrichment degree and enrichment causes of elements in coal from Songhe Mining Area in western Guizhou, with nine major mining seams from top seam, middle seam and low seam of Longtan Formation in Songhe Mining Area as the study objects, in application of the chemical contents from the coal exploration report and the mass fractions of the seven trace elements in the coal, such as Cu, Co, Ni, Sr, Be, Ba and V, a study was conducted on element geochemical features of the major seams. According to the contents and ratio of the macroelement and trace elements, the paper had a discussion on the differences between coal formation environments for different seam in Longtan Formation. The results showed that the oxides of coal macroelement mainly with SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ and secondly with CaO, and each macroelement abundance generally would be similar to the average value of China coal. The quality fractions of microelements, as Cu, Co, Ni, Sr, Be, Ba and V in coal would not only higher than average value of western Guizhou and would obviously higher than average value of China coal and the world coal. Among them, the V element would be enrichment. In the top, middle and low seams of Longtan Formation, the ash content index (Fe₂O₃+CaO+MgO)/(SiO₂+Al₂O₃), Sr/Ba, Ni/Co and the quality fractures of S would have a high - low - high variation law. In coal formation period, the seam in low coal formation was highly affected by sea water. In the coal formation period, the seam in the middle coal formation was lowly affected by sea water.

Key words: macroelement; microelement; coal formation environment; Songhe Mining Area

收稿日期:2017-07-10;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.12.029

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05034004—007,2016ZX05044001-005)

作者简介:金 军(1983—),男,湖北荆门人,高级工程师,硕士。通讯作者:高 为,工程师,硕士,Tel:15902606523,E-mail:404929883@qq.com

引用格式:金 军,高 为,孙 键,等. 黔西松河矿区煤中元素地球化学特征及成煤环境意义[J]. 煤炭科学技术,2017,45(12):166-173,204.

JIN Jun, GAO Wei, SUN Jian, et al. Geochemistry characteristics and coal formation environmental significances of elements in coal from Songhe Mining Area in western Guizhou [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 166-173, 204.

0 引言

黔西地区是我国南方最为重要的煤炭工业基地,晚二叠世煤层分布广泛,煤种齐全,储量巨大^[1]。煤是一种含有多种常量和微量元素的固体可燃有机岩,煤中元素地球化学研究对煤炭资源清洁利用^[2-4]、聚煤环境判断^[5-7]以及有益伴生矿产综合开发^[8-10]等均具有重要意义。已有研究表明,黔西地区煤中常量元素以氧化物 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主体,不同矿区煤中常量元素丰度存在较大差异^[11]。文献[12-15]对黔西地区诸多煤矿区煤中微量元素丰度、赋存状态以及元素异常的成因机制做了详细的研究工作,认为不同煤矿区煤中微量元素丰度差异很大,如 V、Cu、Mo、Sb、Ta、U、As 和 Hg 等微量元素在部分矿区异常富集,煤中 Cu、Zn、V 等微量元素的富集主要受峨眉山玄武岩陆源碎屑供给的影响,Ge、Ga、Th 等元素的富集与海水作用强弱有着密切的联系,而 As、F、Pb 等元素的富集则主要受控于后期热液流体的控制。松河矿区位于贵州西部盘县地区,上二叠统龙潭组煤与煤层气资源较丰富、开发利用条件较好,是贵州少有的几个大型煤炭生产矿区之一^[16]。近 2 年,在松河矿区开展的煤层气地面抽采示范工程中获得工业气流,引起国内较大关注,针对该区煤层气成藏地质条件^[17-19]、瓦斯防治^[20-21]等方面开展了较多的研究工作,但缺乏煤中元素地球化学特征方面的报道,对该区煤的煤质资源特性研究不够。笔者以松河矿区煤田地质勘查时期取得的大量煤质及微量元素测试数据为依据,研究了该区晚二叠世龙潭组 9 个主采煤层中常量元素和微量元素的质量分数及其成煤环境意义。

1 区域地质背景

松河矿区位于黔西地区六盘水煤田盘县地区土城向斜北翼(图 1),总体构造形式为一倾向 SW、倾角 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的单斜构造。含煤岩系为上二叠统龙潭组,煤系柱状如图 2 所示,地层厚 322~384 m,煤系地层的上覆地层为三叠系下统飞仙关组,下伏地层为二叠系上统峨眉山玄武岩组。

龙潭组含煤 47~66 层,平均 50 层,煤种以焦煤为主,含少量瘦煤与肥煤,含煤总厚 37~47 m,平均 41 m,含主要可采煤层 17 层,单煤层厚度一般为 0.7~2.5 m,煤层围岩岩性主要为灰及深灰色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩,夹少量细砂岩,表现为

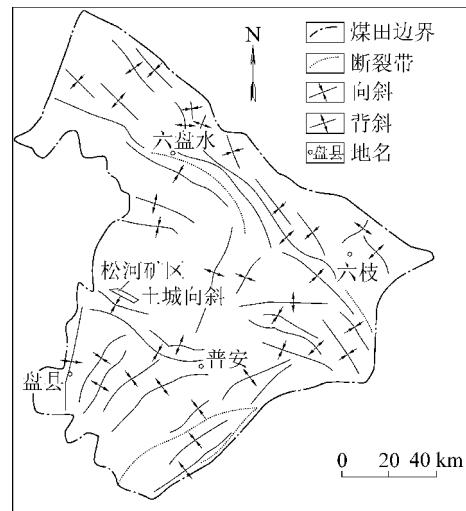


图 1 松河矿区位置

Fig. 1 Location of Songhe Mining Area

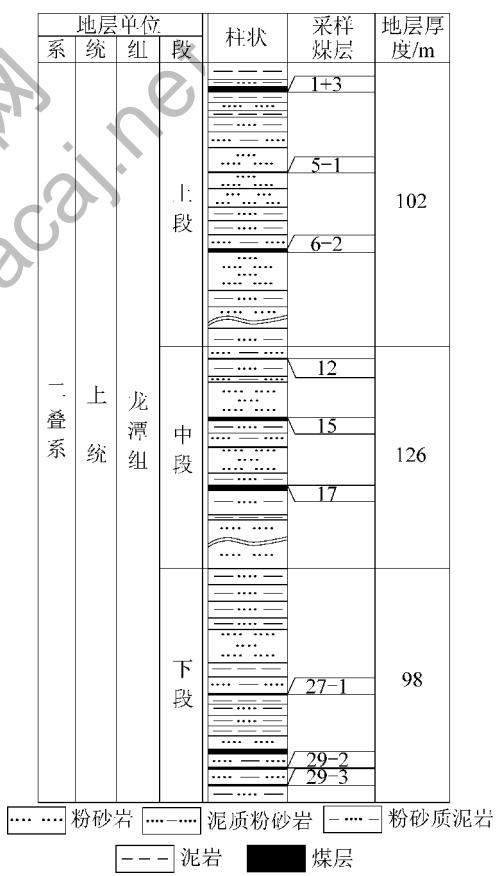


图 2 松河矿区含煤岩系地层综合柱状

Fig. 2 Stratigraphic column of Songhe Mining Area

砂泥韵律互层,沉积构造主要为波状、脉状及透镜状层理,极少出现灰岩、泥质灰岩等海相沉积物,含煤岩系岩相总体表现为潮坪-三角洲沉积^[22]。

2 试验测试及统计方法

主要对松河矿区地质勘查时期取得的大量煤

质、灰成分及微量元素质量分数等基础数据进行整理和分析,鉴于原始数据量较大,且存在未完全开展平行样品测试等问题,如在某一钻孔中对某一煤层开展了工业分析和灰成分测试,却未能获取到微量元素指标,在另一钻孔中对该煤层补测了微量元素,却未对其灰成分进行测试,因此,未能一一列出每一样品的测试数据,仅对统计的有效数据进行总体分析评价,以期揭示该区煤质资源总体特征。

1) 试验样品来源。试验样品均来自松河矿区煤田勘查地质钻孔煤样,采样煤层为晚二叠世龙潭煤系上、中、下煤组中全区沉积较稳定、厚度基本可采、对比可靠的 9 层代表性煤层,上煤组煤层以 1+3 号、5-1 号、6-2 号煤为代表,中煤组煤层以 12 号、15 号、17 号煤为代表,下煤组煤层以 27-1 号、29-2 号和 29-3 号煤为代表。

2) 样品采集数量及测试方法。针对 9 层代表性煤层,考虑测试数据的系统性和完整性,共收集整理了 93 个煤样的工业分析指标(水分、灰分、挥发分、全硫、灰成分及部分煤样 Cu、Co、Ni、Sr、Be、Ba、V 等 7 种主要微量元素测试数据。水分、灰分和挥发分依据《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008) 测定;全硫分依据《煤中全硫测定方法》(GB/T 214—2007) 测定;常量元素及微量元素测定均采用

电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES, 型号 Optima 7000DV), 仪器检验精度一般可达(0.1~1)×10⁻⁹, 具有较高的检测精度, 其中煤灰中主要成分依据《煤灰中主要成分的测定电感耦合等离子体原子》(SN/T 1599—2005) 测定, 微量元素依据《煤中微量元素的测定电感耦合等离子体原子发射光谱法》(SN/T 1600—2005) 测定。

3) 数据统计方法。有学者研究指出, 当不同煤层间储量差别较大、各元素质量分数变化范围较广时, 应计算储量加权值以客观反映煤中元素质量分数的整体水平, 即用不同煤层的储量作为“权重因子”进行加权求和, 得出各元素的储量加权值^[15]。考虑到矿区内地质条件、煤层厚度、含煤面积差别不大, 不同煤层储量没有显著差别, 因而各元素的算术平均值与储量加权值极为接近, 故本次统计了煤中常量元素及微量元素的最小值、最大值及算术平均值, 以算术平均值与国内煤中相应元素质量分数平均水平进行比较和分析。

3 结果与分析

3.1 煤的工业分析及硫分总体评价

松河矿区龙潭煤系 9 个主要煤层的工业分析和硫分结果见表 1。

表 1 煤样工业分析和硫分测定结果

Table 1 Proximate analysis and sulfur contents in coals

煤组	煤层号	$M_{ad}/\%$	$A_d/\%$	$V_{daf}/\%$	$S_{t,d}/\%$
上煤组	1+3	0.67~2.34	16.80~38.22	24.46~30.28	0.19~7.07
		1.13(15)	25.31(15)	26.67(15)	2.46(15)
	5-1	0.72~1.69	22.28~33.91	25.97~28.46	0.28~6.59
		1.05(8)	28.06(8)	26.79(8)	3.38(8)
	6-2	0.82~2.44	19.64~37.72	21.20~27.53	0.26~9.62
		1.39(11)	29.38(11)	28.95(11)	1.90(11)
	12	0.80~1.37	22.34~36.06	22.72~25.13	0.73~2.66
		1.09(7)	27.12(7)	28.78(7)	1.27(7)
	15	0.95~3.22	11.89~38.11	21.37~25.55	0.16~0.40
		1.66(15)	22.17(15)	22.84(15)	0.22(15)
中煤组	17	0.85~2.30	12.70~26.27	18.93~28.44	0.16~2.88
		1.33(14)	18.60(14)	21.02(14)	0.67(14)
	27-1	1.01~2.68	21.32~33.69	17.46~21.71	1.06~5.76
		1.42(8)	26.63(8)	19.51(8)	3.31(8)
	29-2	0.69~1.49	14.88~38.26	17.21~22.96	1.95~9.96
		1.02(7)	31.21(7)	20.30(7)	5.06(7)
	29-3	0.99~1.71	17.11~42.59	17.33~25.31	1.22~6.85
		1.47(8)	27.83(8)	19.48(8)	3.42(8)
	全区	0.67~3.22	11.89~42.59	17.21~30.23	0.16~9.96
		1.31(93)	25.42(93)	22.96(93)	2.10(93)

注: 数据格式: 最小值~最大值/平均值(测点数); M_{ad} 为水分(空气干燥基); A_d 为灰分(干燥基); V_{daf} 为挥发分(干燥无灰基); $S_{t,d}$ 为全硫分(干燥基)。

全区煤样的空气干燥基水分位于 0.67%~3.22%, 平均 1.31%, 干燥基灰分位于 17.21%~30.23%, 平均 22.96%, 干燥无灰基挥发分位于 11.89%~42.59%, 平均 25.42%, 总体属于低水分、低灰~中灰、低~中等挥发分煤, 煤类为肥煤~瘦煤; 全区煤样的硫分质量分数变化较大, 干燥基全硫硫分位于 0.16%~9.96%, 从低硫分煤至高硫分煤均有分布。从不同煤层工业分析和硫分的平均值结果来看, 不同煤层的平均水分、平均灰分及平均挥发分较为接近, 推测各煤层的变质程度、物理性质可能较为接近; 但不同煤层间的平均硫分具有较大差异, 平均硫分在含煤岩系垂向上呈现上、下煤组煤层高而中煤组煤层低的规律, 上煤组煤层总体表现为中~中高硫煤, 中煤组煤层总体表现为特低~低硫煤, 下煤组煤层总体属于中高~高硫煤。一般认为, 成煤过程中海水的影响是煤中硫分较高的主要原因^[23], 亦有学者研究发现, 岩浆热液作用对高硫煤的形成

也具有一定的影响^[24]。研究区含煤岩系垂向上煤层硫分差异巨大, 尤其是下煤组煤层硫分显著高于中、上煤组煤层, 表明上、中、下煤组煤层沉积期受海水的影响程度不同, 而下煤组煤层硫分显著较高的原因, 可能源于下煤组煤层距离含煤岩系下伏的峨眉山玄武岩组垂向距离较近, 其明显受到了岩浆热液作用影响。

3.2 煤中常量元素分析

3.2.1 煤中常量元素质量分数特征

松河矿区 9 个煤层煤样中的 Si、Al、Fe、Ca、Mg 等常量元素氧化物质量分数测试结果见表 2, 同时计算了每种元素在整个矿区内的算术平均值, 元素富集系数 ($C = \text{煤}/\text{中国煤或世界煤}$) 被广泛运用于元素富集程度的评价, 富集程度可分为 6 级: $C < 0.5$ 为亏损, $0.5 \leq C \leq 2$ 表示相似, $2 < C \leq 5$ 表示轻度富集, $5 < C \leq 10$ 表示富集, $10 < C \leq 100$ 表示高度富集^[25]。

表 2 煤中常量元素氧化物质量分数测试结果

Table 2 Mass fraction of major elements (in form of oxide) in coals

煤层号	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(S_{t,d})$	灰成分指数
1+3	6.88~18.06 12.08(15)	2.89~6.98 4.90(15)	1.18~6.33 3.58(15)	0.94~4.63 2.15(15)	0.04~0.37 0.19(15)	0.04~0.89 0.41(15)	0.19~7.07 2.46(15)	0.13~0.50 0.35(15)
5-1	10.35~15.12 12.73(8)	4.35~6.73 5.40(8)	2.57~4.94 3.90(8)	1.79~3.81 2.78(8)	0.17~0.41 0.26(8)	0.07~0.88 0.55(8)	0.28~6.59 3.38(8)	0.24~0.44 0.39(8)
6-2	9.15~20.46 16.17(11)	3.68~10.31 6.95(11)	1.18~7.30 3.96(11)	0.19~3.48 1.73(11)	0.08~0.71 0.45(11)	0.04~0.80 0.39(11)	0.26~9.62 1.90(11)	0.11~0.38 0.26(11)
12	12.11~21.88 16.69(7)	2.87~6.95 4.80(7)	1.42~4.41 2.82(7)	0.75~2.02 1.40(7)	0.15~0.38 0.28(7)	0.12~0.39 0.22(7)	0.73~2.66 1.27(7)	0.13~0.27 0.21(7)
15	7.29~24.52 13.90(15)	2.13~8.84 4.89(15)	0.72~2.37 1.35(15)	0.33~1.74 0.61(15)	0.05~0.44 0.25(15)	0.02~0.23 0.14(15)	0.16~0.40 0.22(15)	0.09~0.25 0.12(15)
17	7.86~14.81 11.33(14)	3.08~9.13 4.50(14)	0.99~2.50 1.69(14)	0.08~0.89 0.43(14)	0.04~0.32 0.18(14)	0.03~0.54 0.20(14)	0.16~2.88 0.67(14)	0.10~0.17 0.14(14)
27-1	9.97~15.92 12.11(8)	3.75~6.25 4.85(8)	2.68~5.40 3.79(8)	2.28~3.60 2.86(8)	0.17~0.28 0.23(8)	0.32~0.77 0.54(8)	1.06~5.76 3.31(8)	0.37~0.44 0.41(8)
29-2	5.84~16.92 13.18(7)	2.91~9.83 6.79(7)	2.53~6.71 5.00(7)	2.17~4.84 3.76(7)	0.59~1.66 0.99(7)	0.23~0.64 0.51(7)	1.95~9.96 5.06(7)	0.44~0.60 0.50(7)
29-3	7.87~20.31 12.72(8)	3.67~7.91 5.42(8)	2.46~6.67 4.43(8)	1.22~4.37 2.58(8)	0.10~0.36 0.24(8)	0.34~1.38 0.66(8)	1.22~6.85 3.42(8)	0.31~0.46 0.40(8)
算术平均值	13.29	5.30	3.15	1.81	0.31	0.37	2.10	0.28
黔西地区 煤均值 ^[11]	9.9	3.8	3.5	1.0	0.16	—	—	—
中国煤均值 ^[13]	8.5	6.0	4.9	1.2	0.22	—	—	—
富集系数 R	1.56	0.88	0.64	1.51	1.41	—	—	—

注:富集系数 $R = \text{研究区煤中元素算术平均值}/\text{中国煤平均值}; \text{灰成分指数} = w(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})/w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 。

通过对松河矿区上二叠统龙潭组煤中常量元素数据的统计分析(表2),松河矿煤的常量元素氧化物以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主体, CaO 次之, MgO 和 SO_3 的质量分数低于1.0%,与黔西地区煤均值具有相似的质量分数特征。对比于中国煤均值^[13],松河矿区9个主要煤层的 SiO_2 和 Al_2O_3 具有与中国煤相似的元素丰度,富集系数均位于0.5~2.0。 Fe_2O_3 质量分数与中国煤均值相似或亏损,亏损的煤层为15号和17号; CaO 质量分数在不同煤层中元素丰度存在较大差异,5-1号、27-1号、29-2号和29-3号均轻度富集 CaO ,17号亏损 CaO ,其他煤层 CaO 质量分数与中国煤相似; MgO 质量分数除在6-2号和29-2号表现为轻度富集外,在其他煤层中均与中国煤相似(图3)。

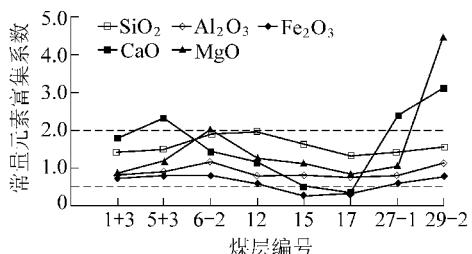


图3 松河矿区各煤层常量元素富集程度

Fig. 3 Enrichment degree of major elements between coal seams in Songhe Mine

3.2.2 煤中常量元素的成煤环境意义

煤中如 Si 、 Al 、 Fe 、 Ca 、 Mg 等常量元素在沉淀或迁移过程会受到水动力条件、水体氧化还原条件、古气候与古盐度等因素的影响,因此灰成分中某些参数比值可在一定程度反映聚煤环境的特征^[5]。将灰成分中的 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO})/w(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ 称为灰成分指数通常作为划分煤相的地球化学指标之一^[24]。赵师庆等^[26]认为,灰成分指数变化于0.03~0.22时,煤层形成于未受海水影响的较弱还原条件下的陆相沼泽环境;灰成分指数变化于0.23~1.23时,煤层形成于受海水影响的较强还原条件下的障壁岛-潮坪-潟湖沼泽环境。

从含煤岩系不同煤层硫分均值及灰成分指数均值的垂向变化来看(图4),灰成分指数均值的变化与硫分均值的变化基本趋于一致,总体表现为含煤岩系上、下煤组煤层的硫分及灰成分指数较高,而中煤组煤层的硫分及灰成分指数较低,反映了龙潭组上、下煤组煤层总体形成于受海水影响较大的泥炭沼泽,而中煤组煤层成煤时受海水影响较小,即龙潭

组上、中、下部煤层成煤的水动力条件具有差异,成煤环境在垂向上具有较大变化。成煤环境的垂向变化对“多层叠置独立含煤层气系统”的发育具有显著的控制作用^[27~28],文献[29]对松河矿区上二叠统龙潭组含气系统的研究表明,该区龙潭组上、中、下煤组煤层分属不同的含煤层气系统,说明了该区龙潭组上、中、下煤组煤层成煤环境具有差异,与本研究的结论相吻合。

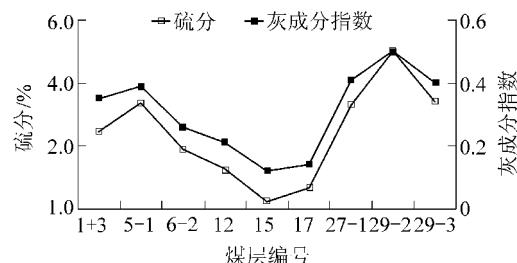


图4 松河矿区不同煤层中硫分均值及灰成分指数均值的变化趋势

Fig. 4 Average sulfur and coal ash composition parameter's change between coal seams in Songhe Mine

3.3 煤中微量元素分析

3.3.1 煤中微量元素质量分数特征

表4列出了松河矿区9个煤层煤样中 Cu 、 Co 、 Ni 、 Sr 、 Be 、 Ba 、 V 等7种微量元素的质量分数变化及算术平均值,同时给出了各元素的黔西地区煤平均值、中国煤平均值和世界煤平均值,以研究区煤中微量元素的算术平均值与中国煤均值和世界煤均值的比值作为衡量煤中微量元素整体富集水平的指标,其值小于0.5指示亏损,0.5~2.0指示相似,2~5为轻度富集,5~10为富集,10~100为高度富集^[25]。

由表3看出,松河矿区煤中 Cu 、 Co 、 Ni 、 Sr 、 Be 、 Ba 、 V 等7种微量元素的算术平均值均显著大于相应元素的黔西地区煤平均值;对比中国煤均值^[13],该区煤中 Co 和 Be 表现为相似, Cu 、 Ni 、 Sr 和 Ba 表现为轻度富集, V 表现为高度富集;对比世界煤均值^[30],该区煤中 Cu 、 Co 、 Ni 、 Sr 、 Be 和 Ba 均表现为轻度富集, V 亦表现为高度富集。由此可见,该区煤中各微量元素质量分数不但高于黔西地区煤,而且显著高于中国煤和世界煤,主要微量元素表现为轻度富集,个别微量元素 V 表现为高度富集。

从不同微量元素在各煤层中的富集程度来看(图5), V 元素富集程度最高,且在不同煤层中的富集程度不一,1+3号、5-1号、17号和29-2号煤中 V 元素均表现为富集,其富集系数 $C=5.75 \sim 9.83$,其

他煤层中V元素富集系数位于 $10.14\sim15.15$,属高度富集,其中以15号煤的V元素富集程度最高,5-1号煤的V元素富集程度最低;Cu元素在不同煤层中的富集程度具有一定的变化,Cu元素的富集系数

$R=2.86\sim6.06$,属于轻度富集~富集,中、下煤组煤层中Cu元素的富集程度总体高于上煤组煤层;Ba、Co、Ni、Sr、Be在各煤层中的富集程度总体相近,均属轻度富集。

表3 煤中微量元素的质量分数

Table 3 Mass fraction of trace elements in coals

煤层号	w(Cu)	w(Co)	w(Ni)	w(Sr)	w(Be)	w(Ba)	w(V)
1+3	50.00~50.00	10.00~20.00	30.00~60.00	300.00~500.00	3.00~5.00	300.00~500.00	200.00~450.00
	50.00(8)	11.25(8)	36.25(8)	387.50(8)	3.75(8)	325.00(8)	302.50(8)
5-1	50.00~50.00	10.00~30.00	70.00~120.00	400.00~800.00	3.00~5.00	300.00~700.00	60.00~540.00
	50.00(5)	18.00(5)	88.00(5)	560.00(5)	3.80(5)	420.00(5)	202.00(5)
6-2	50.00~100.00	10.00~20.00	30.00~40.00	300.00~700.00	3.00~5.00	300.00~700.00	240.00~560.00
	71.43(7)	13.57(7)	35.71(7)	485.71(7)	3.29(7)	442.86(7)	422.86(7)
12	50.00~100.00	10.00~20.00	20.00~50.00	500.00~800.00	3.00~5.00	500.00~1 000.00	320.00~530.00
	75.00(4)	12.50(4)	32.50(4)	600.00(4)	3.50(4)	675.00(4)	420.00(4)
15	30.00~200.00	10.00~20.00	20.00~40.00	100.00~300.00	3.00~5.00	300.00~1 000.00	320.00~700.00
	89.09(11)	13.64(11)	26.36(11)	181.82(11)	3.36(11)	527.27(11)	531.82(11)
17	50.00~300.00	10.00~50.00	20.00~50.00	100.00~500.00	1.00~5.00	300.00~700.00	120.00~600.00
	106.00(10)	16.00(10)	31.00(10)	250.00(10)	3.70(10)	420.00(10)	313.00(10)
27-1	50.00~150.00	10.00~20.00	30.00~80.00	500.00~800.00	3.00~5.00	300.00~600.00	250.00~500.00
	100.00(4)	15.00(4)	52.50(4)	650.00(4)	4.25(4)	500.00(4)	382.50(4)
29-2	50.00~100.00	10.00~20.00	50.00~120.00	600.00~900.00	5.00~10.00	300.00~700.00	80.00~580.00
	75.00(4)	16.25(4)	90.00(4)	725.00(4)	6.25(4)	450.00(4)	345.00(4)
29-3	50.00~150.00	10.00~20.00	20.00~50.00	600.00~900.00	5.00~7.00	500.00~700.00	100.00~560.00
	90.00(5)	14.00(5)	36.00(5)	760.00(5)	5.80(5)	580.00(5)	356.00(5)
算术平均值	78.64	14.07	41.69	432.20	3.92	461.02	368.47
黔西地区 煤均值 ^[11]	49	9.0	24	116	1.6	104	81
中国煤均值 ^[13]	18	7.1	14	140	2.1	159	35
世界煤均值 ^[30]	16	5.1	13	110	1.6	150	25
富集系数R	4.37	1.98	2.98	3.09	1.87	2.90	10.53
富集系数C	4.92	2.76	3.21	3.93	2.45	3.07	14.74

注:富集系数 R =研究区煤中元素算术平均值/中国煤平均值;富集系数 C =研究区煤中元素算术平均值/世界煤平均值。

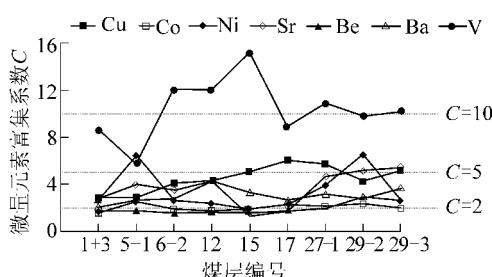


图5 松河矿区各煤层微量元素富集程度

Fig. 5 Enrichment degree of trace elements between coal seams in Songhe Mine

李宝庆^[11]的研究表明,贵州黔西地区上二叠统含煤区的母岩是分布在其西侧的康滇古陆上的峨眉山玄武岩,峨眉山玄武岩是一种富V、Cr、Co、Ni、Cu等微量元素的源岩,源岩性质和物源供给强度是微

量元素富集的主控因素。松河矿区位于贵州黔西地区西部,相对靠近康滇古陆,具备优越的物源供给条件,在特殊构造、沉积等条件的共同影响下,极可能造成Cu、Co、Ni、V等微量元素在该区的富集;V是一种迁移性较强的金属元素,可由基性玄武岩风化分解后搬运至泥炭沼泽中^[15],研究区V元素的高度富集可能与母岩中V元素含量较高且迁移性较强有关。

3.3.2 煤中微量元素的成煤环境意义

煤中部分微量元素对环境变化的敏感性较强,常常被用作地球化学的指示剂,用来判别沉积环境和沉积物来源,其中Sr、Ba与古盐度关系密切,Ni、Co与氧化还原环境有关,均具有较强的环境指示意义^[31]。

Ba 和 Sr 两元素易与 SO_4^{2-} 结合形成 BaSO_4 和 SrSO_4 , BaSO_4 基本不溶于水, 容易在离搬运区不远的地方沉淀下来, 搬运距离短; 而 SrSO_4 极易溶于水, 可随水流搬运至较远的地方沉淀下来, 故同一地区海相沉积物的 Sr/Ba 值一般高于陆相沉积物的 Sr/Ba 值^[31]。另外, Ni/Co 也通常作为恢复水体氧化条件的地球化学指标, 还原强度越强, Ni/Co 比值也较高^[31~32]。松河矿区不同煤层硫分、 Sr/Ba 值及 Ni/Co 值具有较为一致的变化性(图 6), 总体表现为上、下煤组煤层的硫分、 Sr/Ba 值及 Ni/Co 值均较高, 而中煤组的硫分、 Sr/Ba 值及 Ni/Co 值均较低, 反映了中煤组煤层成煤环境显著区别于上、下煤组煤层, 这与灰成分指数反映的该区龙潭组成煤环境差异变化具有较好的一致性。

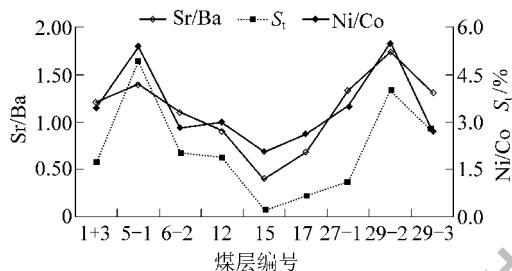


图 6 松河矿区不同煤层中硫分均值、 Sr/Ba 及 Ni/Co 均值的变化趋势

Fig. 6 Average sulfur, ratio of Sr/Ba and ratio of Ni/Co change between coal seams in Songhe Mining Area

4 结 论

1) 松河矿区主要煤层总体属于低水分、低灰~中灰、低~中等挥发分煤, 硫分在不同煤层中变化较大, 平均硫分在龙潭组含煤岩系垂向上具有上、下煤组煤层高而中煤组煤层低的变化规律。

2) 松河矿区煤的常量元素氧化物以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主体, CaO 次之, MgO 和 SO_3 的质量分数低于 1.0%, 与黔西地区煤均值具有相似的质量分数特征。

3) 与中国煤均值相比, 松河矿区龙潭组 9 个主要煤层中常量元素 SiO_2 和 Al_2O_3 表现为相似, Fe_2O_3 相似或亏损, CaO 在 5-1、27-1、29-2 和 29-3 号煤层中轻度富集, 在其他煤层中相似或亏损, MgO 在 6-2 号和 29-2 号中煤表现为轻度富集, 在其他煤层中表现为相似。

4) 松河矿区煤中 Cu、Co、Ni、Sr、Be、Ba、V 七种微量元素质量分数不但高于黔西地区煤, 而且显著

高于中国煤和世界煤, 除 V 表现为高度富集外, 其他微量元素表现为轻度富集, 且在不同煤层中, V、Cu 等微量元素具有较大的变化。

5) 灰成分指数 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$, Sr/Ba , Ni/Co 及 S 的质量分数在龙潭组上、中、下煤组煤层中具有高~低~高的变化规律, 反映该区龙潭组上、中、下煤组煤层的成煤环境不同, 上、下煤组煤层成煤时受海水影响较大, 而中煤组煤层成煤时受海水影响较小。

参考文献(References) :

- [1] 窦新钊, 姜波, 秦勇, 等. 黔西地区地质构造演化及其对晚二叠世煤层的控制[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(3): 109~114.
DOU Xinzha, JIANG Bo, QIN Yong, et al. Structure evolution in West of Guizhou Area and control to seam in Late Permian [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(3): 109~114.
- [2] 朱振武, 祚玉群. 煤炭洗选中有害痕量元素的迁移与脱除[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2434~2440.
ZHU Zhenwu, ZHUO Yuqun. Migration and removal of toxic trace elements during coal washing [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2434~2440.
- [3] 王文峰, 秦勇, 宋党育. 煤中有害元素的洗选洁净潜势[J]. 燃料化学学报, 2003, 32(4): 295~299.
WANG Wenfeng, QIN Yong, SONG Dangyu. Cleaning potential of hazardous elements during coal washing [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2003, 32(4): 295~299.
- [4] 邹雨, 刘东娜, 刘燕海. 大同煤田太原组 5 号煤层化学元素赋存特征[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(S1): 167~172.
ZOU Yu, LIU Dongna, LIU Yanhai. Occurrence characteristics of chemical elements of No. 5 coal in Taiyuan Formation of Datong Coal Field [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(S1): 167~172.
- [5] 程伟, 杨瑞东, 崔玉朝, 等. 贵州毕节地区晚二叠世煤质特征及其成煤环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(11): 1763~1777.
CHENG Wei, YANG Ruidong, CUI Yuchao, et al. Characteristic of late Permian coal quality from Bijie, Guizhou Province and its significance for Paleoenvironment [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(11): 1763~1777.
- [6] 代世峰, 任德贻, 唐跃刚. 煤中常量元素的赋存特征与研究意义[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(2): 1~5.
DAI Shifeng, REN Deyi, TANG Yuegang. Modes of occurrence of major elements in coal and their study significance [J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(2): 1~5.
- [7] 张建强, 张恒利, 杜金龙, 等. 内蒙古白音华煤田煤中微量元素分布特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 310~315.
ZHANG Jianqiang, ZHANG Hengli, DU Jinlong, et al. Distribution characteristics of trace elements in coal at Baiyinhu Coalfield Inner Mongolia [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 310~315.

- [8] 孙玉壮,赵存良,李彦恒,等.煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨[J].煤炭学报,2014,39(4):744-748.
SUN Yuzhuang,ZHAO Cunliang,LI Yanheng,*et al.* Minimum mining grade of the selected trace elements in Chinese coal[J].Journal of China Coal Society,2014,39(4):744-748.
- [9] 李 洋,陈 萍,陈 健,等.云南临沧富锗煤及煤渣中稀土元素地球化学特征[J].煤炭科学技术,2016,44(S1):193-196.
LI Yang,CHEN Ping,CHEN Jian,*et al.* Geochemical characteristics of rare earth elements in cinder and Ge rich coal from Lincang Coalfield in Yunnan Province[J].Coal Science and Technology,2016,44(S1):193-196.
- [10] 朱华雄,陈寒勇,章 伟,等.华北煤中金属矿产的种类和分布特征[J].煤炭学报,2016,41(2):303-309.
ZHU Huaxiong,CHEN Hanyong,ZHANG Wei,*et al.* Metal mineral types and distribution characteristics in coal in Northern China[J].Journal of China Coal Society,2016,41(2):303-309.
- [11] 李宝庆.黔西地区上二叠统龙潭组煤的矿物学及地球化学特征研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2015.
- [12] DAI S,REN D,TANG Y,*et al.* Concentration and distribution of elements in Late Permian coals from western Guizhou Province, China[J].International Journal of Coal Geology,2005,61(1):119-137.
- [13] DAI S,REN D,CHOU C L,*et al.* 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,2012,94(1):3-21.
- [14] ZHANG J,REN D,ZHU Y,*et al.* Mineral matter and potentially hazardous trace elements in coals from Qianxi Fault Depression Area in southwestern Guizhou[J].International Journal of Coal Geology,2004,57(1):49-61.
- [15] 程 伟,杨瑞东,张 翠,等.毕节地区晚二叠世煤中微量元素的分布赋存规律及控因分析[J].煤炭学报,2013,38(1):103-113.
CHENG Wei,YANG Ruidong,ZHANG Qin,*et al.* Distribution characteristics, occurrence modes and controlling factors of trace elements in Late Permian coal from Bijie City, Guizhou Province[J].Journal of China Coal Society,2013,38(1):103-113.
- [16] 高 为,易同生,金 军,等.贵州松河井田煤层气地面抽采潜力分析[J].煤矿安全,2016,47(8):190-193,197.
GAO Wei,YI Tongsheng,JIN Jun,*et al.* Potential analysis of coalbed methane drainage in Songhe Coal Mine of Guizhou[J].Safety in Coal Mines,2016,47(8):190-193,197.
- [17] 高 为,易同生,金 军,等.黔西地区煤样孔隙综合分形特征及对孔渗性的影响[J].煤炭学报,2017,42(5):1258-1265.
GAO Wei,YI Tongsheng,JIN Jun,*et al.* Pore integrated fractal characteristics of coal sample in western Guizhou and its impact to porosity and permeability[J].Journal of China Coal Society,2017,42(5):1258-1265.
- [18] 高 为,易同生.黔西地区松河井田煤储层孔隙特征及对渗透性的影响[J].煤炭科学技术,2016,44(2):55-61.
GAO Wei,YI Tongsheng.Pore features of coal reservoir in Songhe
- Minefield of west Guizhou and its impact to permeability[J].Coal Science and Technology,2016,44(2):55-61.
- [19] 易同生,周效志,金 军.黔西地区松河井田龙潭煤系煤层气-致密气成藏特征及其共探共采技术[J].煤炭学报,2016,41(1):212-220.
YI Tongsheng,ZHOU Xiaozhi,JIN Jun.Reservoir forming characteristics and co-exploration and concurrent production technology of Longtan coal measure coalbed methane & tight gas in Songhe field,western Guizhou[J].Journal of China Coal Society,2016,41(1):212-220.
- [20] 徐宏杰,金 军,刘会虎,等.松河矿井瓦斯资源赋存特征与抽采技术分析[J].煤矿开采,2014,19(2):117-120.
XU Hongjie,JIN Jun,LIU Huihu,*et al.* Analysis of methane resource occurrence characteristic and drainage technology in Songhe Mine[J].Coal Mining Technology,2014,19(2):117-120.
- [21] 韩真理,李晓华,李臣武.松河矿 3 号煤层回采工作面瓦斯综合治理技术研究[J].煤炭工程,2013(9):61-63.
HAN Zhenli,LI Xiaohua,LI Chenwu.Study on comprehensive gas prevention and control technology of coal mining face in No.3 Seam of Songhe Mine[J].Coal Engineering,2013(9):61-63.
- [22] 邵龙义,高彩霞,张 超,等.西南地区晚二叠世层序:古地理及聚煤特征[J].沉积学报,2013,31(5):856-866.
SHAO Longyi,GAO Caixia,ZHANG Chao,*et al.* Sequence-Palaeogeography and coal accumulation of Late Permian in southwestern China[J].Acta Sedimentologica Sinica,2013,31(5):856-866.
- [23] 刘 贝,黄文辉,敖卫华,等.沁水盆地晚古生代煤中硫的地球化学特征及其对有害微量元素富集的影响[J].地学前缘,2016,23(3):59-67.
LIU Bei,HUANG Wenhui,AO Weihua,*et al.* Geochemistry characteristics of sulfur and its effect on hazardous elements in the Late Paleozoic coal from the Qinshui Basin[J].Earth Science Frontiers,2016,23(3):59-67.
- [24] 张杰芳,桑树勋,王文峰,等.黔西地区南糯东勘探区煤中硫赋存特征及成因机理[J].煤炭科学技术,2014,42(2):101-105.
ZHANG Jiefang,SANG Shuxun,WANG Wenfeng,*et al.* Occurrence characteristics and genetic mechanism of sulfur in coal in Nuodong exploration area of southwestern Guizhou Province[J].Coal Science and Technology,2014,42(2):101-105.
- [25] DAI S,LI T,JIANG Y,*et al.* Mineralogical and geochemical compositions of the Pennsylvanian coal in the Hailiushu Mine, Daqingshan Coalfield, Inner Mongolia, China: implications of sediment-source region and acid hydrothermal solutions[J].International Journal of Coal Geology,2015,137:92-110.
- [26] 赵师庆,王飞宇,董名山.论沉煤环境—成煤类型—煤质特征概略成因模型 I:环境与煤相[J].沉积学报,1994,12(1):32-39.
ZHAO Shiqing,WANG Feiyu,DONG Mingshan.Discussion on the

(下转第 204 页)

- [J].岩石力学与工程学报,2003,22(7):1083-1087.
- DAI Huayang, CAI Meifeng, WANG Jinzhuang. Calculation for maximum subsidence induced by coal seam mining with different dip angle [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1083-1087.
- [9] 郭文兵.煤矿开采损害与保护[M].北京:煤炭工业出版社,2013.
- [10] 杨逾,杨伦,刘文生,等.大倾角煤层开采最大下沉角的二次插值分析[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(5):632-635.
- YANG Yu, YANG Lun, LIU Wensheng, et al. Quadratic function analysis of greatest subsidence angle during mining pitching or steer pitching coal seam [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(5): 632-635.
- [11] 袁亮,吴侃.淮河堤下采煤的理论研究与技术实践[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [12] 彭文彬.FLAC^{3D}实用教程[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [13] 陈育民.FLAC/FLAC^{3D}基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [14] 刘春玲,祁生文,童立强,等.利用 FLAC^{3D}分析某边坡地震稳定性[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2730-2733.
- LIU Chunling, QI Wensheng, TONG Liqiang ,et al. Stability analysis of slope under earthquake with FLAC^{3D} [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2730-2733.
- [15] 于秋鸽.芦沟煤矿水库下采煤安全性与地表移动破坏特征研究[D].焦作:河南理工大学,2016.
- [16] 于秋鸽,郭文兵.地下非充分采动对地表沉降的影响范围研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):191-195.
- YU Qiuge, GUO Wenbing. Study on influence scope of underground subcritical extraction to civil buildings on surface ground [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 191-195.
- [17] 王永秀,毛德兵,齐庆新.数值模拟中煤岩层物理力学参数确定的研究[J].煤炭学报,2003,28(6):593-597.
- WANG Yongxiu, MAO Debing, QI Qinxin. The research of physical and mechanics parameters in numerical simulation [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 593-597.
- [18] 刘吉波,廉旭刚,戴华阳,等.基于 UDEC 的岩层与地表移动动态模拟研究[J].煤矿开采,2014,19(3):104-107.
- LIU Jibo, LIAN Xugang, DAI Huayang, et al. The dynamic research of earth surface movement based on UDEC [J]. Coal Mining, 2014, 19(3): 104-107.
- [19] 蓝航,姚建国,张华兴,等.基于 FLAC^{3D}的节理岩体采动损伤本构模型的开发及应用[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):572-579.
- LAN Hang, YAO Jianguo, ZHANG Huaxing, et al. Development and application of constitutive model of jointed rock mass damage due to mining based on FLAC^{3D} [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 572-579.
- [20] 刘文生.辽宁省南票矿区采煤沉陷情况报告[R].阜新:辽宁工程技术大学,2003.

(上接第173页)

- sedimentary environment-type of coal-forming characteristic of coal quality; rough genetic model[J].Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1):32-39.
- [27] 郭晨,卢玲玲.含煤地层流体能量分布与煤层气开发关系研究[J].煤炭科学技术,2016,44(2):45-49.
- GUO Chen, LU Lingling. Study on relationship of liquid energy distribution and coalbed methane development in coal bearing strata [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2): 45-49.
- [28] 沈玉林,秦勇,郭英海,等.黔西地区上二叠统含煤层气系统特征及其沉积控制[J].高校地质学报,2012,18(3):427-432.
- SHEN Yulin, QIN Yong, GUO Yinghai, et al. The Upper Permian coalbed methane bearing system and its sedimentary control in Western Guizhou, China [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 427-432.
- [29] 金军.黔西地区松河井田松参1井煤储层物性垂向分布特征[J].煤炭科学技术,2016,44(2):27-32,16.
- JIN Jun. Vertical distribution features of coal reservoir physical property in Songcan No.1 well of Songhe Minefield, West Guizhou

- [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2):27-32,16.
- [30] 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.
- [31] 邹建华,刘东,田和明,等.内蒙古阿刀亥矿晚古生代煤的微量元素和稀土元素地球化学特征[J].煤炭学报,2013,38(6):1012-1018.
- ZOU Jianhua, LIU Dong, TIAN Heming, et al. Geochemistry of trace and rare earth elements in the Late Paleozoic Coal from Adohai Mine, Inner Mongolia [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1012-1018.
- [32] 王剑,陈立江,武卫东,等.太原西山煤田微量元素地球化学特征及其地质意义[J].科学技术与工程,2016,16(15):15-21.
- WANG Jian, CHEN Lijiang, WU Weidong, et al. Geochemical characteristics and geological significance of trace elements in Xishan Coalfield, Taiyuan [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(15): 15-21.