

阳泉矿区泥岩地球化学特征及地质意义

涂春霖^{1,2}, 郭英海^{1,2}, 胡敏³, 薛园园^{1,2}, 张 扬^{1,2}

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008; 3. 湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410116)

摘 要:为研究阳泉矿区太原组、山西组的沉积环境、物源及源区构造背景,对该区泥岩微量及稀土元素进行分析,结果表明:该区亲石元素较为富集,高场强元素 Ti、Zr、Hf、Th 丰度高于上地壳, Rb、Sr、Nb、Ta 等元素有所亏损;稀土元素总量较高,轻重稀土元素比值及 $(La/Yb)_N$ 比值显示轻、重稀土分异明显,表现为轻稀土富集、重稀土相对亏损、Eu 明显负异常、Ce 微弱负异常的分布模式。对 Sr/Cu、 $V/(V + Ni)$ 、Sr/Ba、 δCe 和 Ce_{anom} 等特征参数的分析,显示该矿区泥岩属于过渡相-陆相沉积,处于还原、厌氧、半咸水沉积环境。据泥岩微量、稀土元素组合及其判别图解,该矿区源岩以长英质岩石为主,与太原组相比,山西组物源明显受花岗岩的影响,物源区构造背景为大陆岛弧和活动大陆边缘。

关键词:微量元素;稀土元素;地质意义;太原组;山西组;阳泉矿区

中图分类号:P595

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2015)03-0115-06

Geochemical features of mudstone and geological significance in Yangquan Mining Area

TU Chun-lin^{1,2}, GUO Ying-hai^{1,2}, HU Min³, XUE Yuan-yuan^{1,2}, ZHANG Yang^{1,2}

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. MOE Key Lab of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Xuzhou 221008, China; 3. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, China)

Abstract: In order to study a sedimentary environment of Taiyuan Formation and Shanxi Formation in Yangquan Mining Area, provenance and source region structure background, an analysis was conducted on the trace element and rare earth element of the mudstone in the area. The results showed that the lithophile elements in the area were quite enrichment, the Ti, Zr, Hf and Th abundances of the high field strength elements were higher than the upper crust and the Rb, Sr, Nb, Ta and other element were loss in some case. The rare earth element total was high, the ratio of light and heavy rare earth elements and $(La/Yb)_N$ ratio showed that the difference of the light and heavy rare earth was obvious and that the light rare earth was enrichment and heavy rare earth was loss relatively. Eu was obvious negative anomaly and Ce was in a weak negative anomaly distribution mode. The analysis on Sr/Cu, $V/(V + Ni)$, Sr/Ba, δCe , Ce_{anom} and other feature parameters showed that the mudstone in the study area was a transition phase-continental facies sedimentation and in a reduction, anaerobic and brackish water sedimentary environment. Based on the combination of the mudstone trace elements and rare earth element and the discriminant illustrations, the source rocks in the study area were felsic rocks mainly. In comparison with Taiyuan Formation, the provenance of Shanxi Formation was obviously affected by the granite. The structure background of the provenance area could possibly be the island arc of the mainland and the edge of the active mainland.

Key words: trace elements; rare earth element; geological significance; Taiyuan Formation; Shanxi Formation; Yangquan Mining Area

0 引 言

阳泉矿区位于山西省阳泉市西部,下辖新景矿

和五矿在内的5个矿区。在区域大地构造上,阳泉矿区处于华北晚古生代聚煤盆地中带与北带的过渡部位,沁水盆地的东北缘,其东部是新华夏系太行山

收稿日期:2014-10-10;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2015.03.027

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2007CB209406);山西省科技创新资助项目(7F060523)

作者简介:涂春霖(1989—),男,云南昆明人,硕士研究生。通信作者:郭英海, E-mail: guoyh@cumt.edu.cn

引用格式:涂春霖,郭英海,胡敏,等.阳泉矿区泥岩地球化学特征及地质意义[J].煤炭科学技术,2015,43(3):115-120.

TU Chun-lin, GUO Ying-hai, HU Min, et al. Geochemical features of mudstone and geological significance in Yangquan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 115-120.

隆起带,西部及西北部是新华夏系太原盆地,北部是北纬 38° 东西向构造亚带,面积约 $1\,400\text{ km}^2$ 。阳泉矿区煤炭资源丰富,是我国最大的无烟煤生产基地之一,含煤地层为石炭-二叠系的太原组和山西组,含煤共 13 层,是本文的重点研究层段。晚奥陶世中期,兴蒙和祁连海槽向华北板块聚敛,使华北板块整体上升,经历了漫长的剥蚀阶段,直到晚石炭世,才开始重新沉降,沉积了本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组等地层^[1-2]。研究区太原组整合于本溪组之上,岩性以灰岩和碎屑岩为主,发育有数层煤层,属于陆表海背景下泻湖-潮坪、碳酸盐台地的交互沉积。山西组以碎屑岩为主,夹有数层煤层,为一套浅水三角洲沉积。在垂向上,研究区整体表现出岸进海退的特征,碎屑粒度向上变粗,砂质含量向上增加,逐渐过渡为河流相沉积。

前人对阳泉矿区太原组、山西组沉积特征的研究主要集中在沉积环境、聚煤作用及规律等方面,取得了许多有益的认识^[3-6],但是,关于矿区物源的研究,却没有得到足够的重视。笔者收集了研究区 2 口钻井太原组和山西组共 35 块泥岩样品,分别进行了稀土元素和微量元素的测试分析,并在此基础上,探讨了其泥岩地球化学特征及分布规律,对矿区的物源特征、古气候和古盐度等地质意义进行了分析讨论,为进一步的工作打下了基础。

1 样品采集与测试

所有样品均采自阳泉矿区太原组和山西组的钻井岩心,样品岩性主要为灰色、灰黑色泥岩以及炭质泥岩。A 井取自矿区西北部,共 14 块样品,从上到下编号 $A_1 \sim A_{14}$,其中山西组 9 样,太原组 5 样;B 井取自矿区南部,共 21 块样品,编号 $B_1 \sim B_{21}$,其中山西组 10 样,太原组 11 样。采样位置如图 1 所示。各样品稀土元素和微量元素均采用美国热电公司的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),在中国矿业大学分析测试中心测定完成(误差小于 10%)。

2 结果

2.1 微量元素

阳泉矿区 2 口井 35 块泥岩微量元素的测试结果见表 1。与 Taylor 等发表的大陆上地壳微量元素值(表 1)相比,阳泉矿区亲石元素 Ti、V、Cr、Ga、Zr、Ba、Cs、Hf、Th、U 相对富集,其中高场强元素 Ti、Zr、Hf、Th 丰度远远大于上地壳。亲铜元素 Cu、Zn、Pb

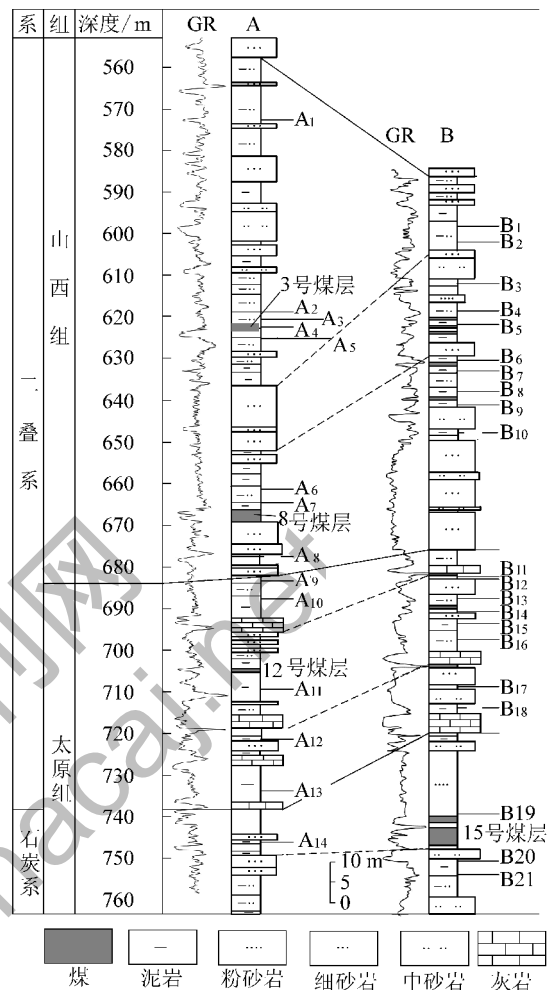


图1 阳泉矿区 A、B 井地质柱状图及采样地质层位

略高于上地壳。亲铁元素 Co 和 Ni 的变化比较大为 $1.139 \sim 82.87\text{ }\mu\text{g/g}$,但其均值略高于上地壳,而 Mo、W 元素有所亏损。另外,研究区 Rb、Sr、Nb、Ta 元素出现严重亏损,丰度低于上地壳,这可能与物源区和沉积环境的影响有关。

2.2 稀土元素

研究区泥岩稀土元素测试结果见表 2。通过分析计算,研究区稀土总量(ΣREE)为 $148.43 \sim 573.48\text{ }\mu\text{g/g}$,平均 $271.02\text{ }\mu\text{g/g}$ (不含 Y),其中太原组 ΣREE 平均值为 $242.23\text{ }\mu\text{g/g}$,山西组平均值为 $308.105\text{ }\mu\text{g/g}$,均远远高于上地壳($146.4\text{ }\mu\text{g/g}$)和北美页岩^[8]($173.21\text{ }\mu\text{g/g}$),表明 ΣREE 较为富集。 ΣLREE 值为 $136.78 \sim 539.00\text{ }\mu\text{g/g}$,平均为 $256.13\text{ }\mu\text{g/g}$,远高于北美页岩($152.84\text{ }\mu\text{g/g}$); ΣHREE 为 $8.93 \sim 35.40\text{ }\mu\text{g/g}$,平均为 $21.87\text{ }\mu\text{g/g}$,接近北美页岩($20.37\text{ }\mu\text{g/g}$)。轻重稀土元素比值(LREE/HREE)能反映样品轻、重稀土的分异程度,在同一类岩石中该值越大,分异越明显。研究

表 1 泥岩部分微量元素测试结果

参数	元素含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)										
	P	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga
最小值	103.1	7.6	2 486	10.71	25.84	6.273	1.139	4.12	6.38	14.09	15.6
最大值	891.6	30.75	12 860	179.4	159.1	8881	63.7	82.87	72.58	123.8	38.68
平均值	408.7	14.97	5 198	113.2	68.22	920.7	13.82	23.53	32.17	73.65	26.69
UC	/	11	3 000	60	35.85	600	10	20	25	71	17

参数	元素含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)								V/(V+Ni)	Sr/Ba	Sr/Cu
	Rb	Sr	Y	Ba	Hf	Ta	Th	U			
最小值	21.91	106.4	11.6	248.3	2.49	0.46	7.659	1.19	0.339	0.196	1.651
最大值	207.6	483.7	64.33	1 346	29.61	3.353	73.13	6.629	0.961	0.944	46.87
平均值	95.58	256.7	29.76	691.9	9.135	1.398	20.17	3.697	0.817	0.409	11.62
UC	112	350	22	550	5.8	2.2	10.7	2.8	—	—	—

注: UC 数据来自于文献[7]。UC 为大陆上地壳。

表 2 泥岩稀土元素测试结果及有关参数

参数	元素含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)										
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
最小值	33.74	62.13	7.40	25.50	3.23	0.41	3.09	0.43	2.12	0.42	1.21
最大值	127.3	263.10	30.98	103.4	12.58	2.34	9.84	1.6	9.49	1.9	5.59
平均值	62.06	120.85	13.91	49.51	8.34	1.46	6.64	0.99	5.52	1.1	3.28
太原组平均值	53.37	106.44	12.06	43.36	7.39	1.44	5.86	0.84	4.51	0.89	2.63
山西组平均值	69.37	132.99	15.47	54.68	9.13	1.48	7.29	1.12	6.38	1.28	3.82

参数	元素含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)										
	Tm	Yb	Lu	REE	LREE	HREE	L/H	δEu	δCe	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	Ce_{anom}
最小值	0.2	1.26	0.2	148.43	136.78	8.93	8.45	0.34	0.74	6.07	-0.107
最大值	0.97	6.06	1.03	573.48	539	35.4	16.27	0.93	1.02	21.54	0.042
平均值	0.53	3.28	0.53	277.99	256.13	21.87	11.86	0.61	0.9	13.37	-0.032
太原组平均值	0.41	2.62	0.42	242.23	224.07	18.16	12.44	0.68	0.93	14.26	-0.027
山西组平均值	0.62	3.85	0.62	308.11	283.12	24.98	11.37	0.54	0.88	12.61	-0.037

注: $\sum \text{REE} = \text{LREE} + \text{HREE}$; $\text{L}/\text{H} = \text{LREE}/\text{HREE}$, $\text{LREE} = \text{La} + \text{Ce} + \text{Pr} + \text{Nd} + \text{Sm} + \text{Eu}$; $\text{HREE} = \text{Gd} + \text{Tb} + \text{Dy} + \text{Ho} + \text{Er} + \text{Tm} + \text{Yb} + \text{Lu}$; $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_{\text{N}}/(\text{Sm} \times \text{Gd})_{\text{N}} \times 0.5$; $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_{\text{N}}/(\text{La} \times \text{Pr})_{\text{N}} \times 0.5$; $\text{Ce}_{\text{anom}} = \lg[3\text{Ce}_{\text{N}}/(2\text{La} + \text{Nd})_{\text{N}}]$; 下角 N 为球粒陨石标准化值。

区 LREE/HREE 为 7.5 ~ 16.27, 平均 11.72, 明显高于北美页岩(7.5), 表明轻稀土元素相对富集。其中, 太原组平均值为 12.44, 山西组为 11.37, 说明太原组轻稀土元素更为集中。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 反映稀土元素球粒陨石标准化图解中分布曲线的倾斜程度, 研究区 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 6.06 ~ 21.54, 平均 13.36, 表明样品中轻重稀土元素分异程度较大; 而太原组 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 均值 14.26, 山西组 12.61, 同样说明太原组的分异程度更高, 轻稀土元素更为富集。研究区 δEu 值为 0.33 ~ 0.93, 平均 0.61, 低于北美页岩(0.69), 为明显的负异常; δCe 值为 0.74 ~ 1.02, 平均 0.90, 显示为微弱负异常。太原组 δEu 值平均为 0.68, 接近北美页岩; 山西组 δEu 值平均为 0.54, 低于北美

页岩。

采用 Boynton W V (1984) 推荐的球粒陨石^[9] 对研究区泥岩样品进行标准化, 令 φ 为样品含量与球粒陨石含量比值, 得到 A、B 两井太原组和山西组的稀土元素分布模式图(图 2)。从图 2 中可以看出, 各样品的稀土分布模式整体特征基本类似, 为轻稀土富集、重稀土亏损型, Eu 元素负异常, Ce 元素微弱负异常或无异常。其中 La ~ Eu 段元素表现为明显的“右倾”, 斜率较高, Gd ~ Lu 段元素则较为平坦, 斜率较低, 说明轻稀土元素之间的分馏程度较高, 重稀土元素之间的分馏程度较低。与太原组相比, 山西组的 Eu 元素具有更为明显的“V”形, 说明山西组 Eu 元素亏损更为严重。

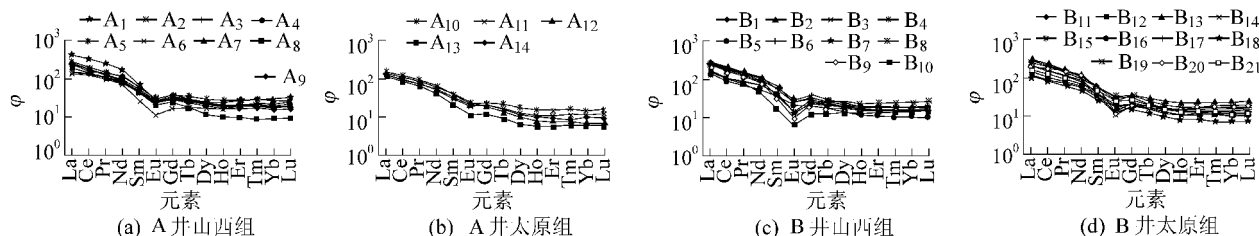


图2 阳泉矿区太原组-山西组泥岩稀土元素分布模式

3 地质意义

3.1 沉积环境分析

3.1.1 古气候

沉积岩微量元素对古气候的恢复具有一定的指示意义。通常 Sr/Cu 比可以作为古气候的指标, Sr/Cu 为 1~5 时表示温湿气候, $\text{Sr}/\text{Cu} > 5$ 表示干热气候^[10-11]。研究区 Sr/Cu 比平均值为 10.51, 其中, 太原组 Sr/Cu 值为 1.65~46.85, 平均 16.99; 山西组 Sr/Cu 值为 2.67~12.88, 平均 7.62, 说明太原组到山西组沉积期, 气候有明显的变化, 太原组以干热气候为主, 山西组则有所缓和, 气候偏于温湿。在主要煤层形成时期, 研究区 Sr/Cu 值呈明显的低值, 为典型的温湿气候, 为煤层的形成提供了有利条件。

3.1.2 氧化还原环境

沉积岩微量元素和稀土元素分布特征在一定程度上可以反映古水体的氧化-还原条件。通常 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值可以反映沉积水体的氧化还原环境。 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) > 0.84$, 反映水体分层及底层水体中出现 H_2S 的厌氧环境; $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 为 0.6~0.84 为水体分层不强的厌氧环境; $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 为 0.4~0.6, 说明水体为分层弱的贫氧环境^[12-13]。研究区 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 0.339~1.647, 平均为 0.80, 反映研究区泥岩沉积为水体分层不强的还原环境。另外, Ce 元素的异常也可以反映水体氧化-还原条件的变化。Elderfield 等^[14] 定义 Ce_{anom} 来表示 Ce 异常, 并用来判别古缺氧环境, 其中 $\text{Ce}_{\text{anom}} = \lg [3\text{Ce}_\text{N}/(2\text{La}_\text{N}+\text{Nd}_\text{N})]$, 当 $\text{Ce}_{\text{anom}} > 0$ 时, 表现为 Ce 的富集, 说明水体为氧化环境; 当 $\text{Ce}_{\text{anom}} < 0$ 时, 表现为 Ce 的亏损, 水体为还原环境。研究区 Ce_{anom} 值为 -0.107~-0.042, 平均为 -0.03, 也反映了研究区泥岩沉积环境主要为还原环境。

3.1.3 古盐度

Sr/Ba 比值是推断水体古盐度的有效方法之一^[15-16]。通常认为淡水沉积物中 $\text{Sr}/\text{Ba} < 1$, 海相沉积物中 $\text{Sr}/\text{Ba} > 1$ 。研究区泥岩中 Sr 含量为 106.4~

483.7 $\mu\text{g/g}$, 平均 254.52 $\mu\text{g/g}$, 低于上地壳的平均含量(350 $\mu\text{g/g}$), 表现为严重亏损; Ba 含量 248.3~1346 $\mu\text{g/g}$, 平均 685.85 $\mu\text{g/g}$, 高于上地壳平均含量(550 $\mu\text{g/g}$), 较为富集。 Sr/Ba 比值为 0.19~0.94, 平均 0.42, 这反映了研究区陆表海沉积的特点, 说明当时海水较浅, 并且可能有淡水河流的注入。研究区太原组 Sr/Ba 比变化较大, 介于 0.27~0.94, 平均为 0.51, 说明其泥岩沉积受到海水的影响, 但整体上为过渡相的三角洲或泻湖沉积; 山西组 Sr/Ba 比变化较小, 为 0.19~0.71, 平均为 0.36, 说明山西组泥岩沉积受海水的影响较小, 主要为过渡相-陆相的沉积。

3.2 物源分析

3.2.1 源区物质组成

稀土元素的特征参数及其配分曲线模式是分析沉积物源区的可靠方法^[17-21]。一般来说, 源自上地壳的稀土元素具有轻稀土富集、重稀土亏损和明显负 Eu 异常的特征。研究区样品经球粒陨石标准化后, 与上地壳中稀土元素的分布模式基本一致, 说明研究区太原组和山西组物源均来自上地壳。山西组在 Eu 处存在明显的“V”形, 与太原组有明显的差异。太原组 δEu 值为 0.37~0.92, 平均 0.68, 与上地壳相近(0.69), 山西组 δEu 值为 0.34~0.77, 平均为 0.54, 相对上地壳亏损, 说明太原组和山西组物源有所差别。前人研究认为, 若母岩为花岗岩, 沉积岩多具负 Eu 异常, 若母岩为玄武岩, 沉积岩多为无 Eu 异常^[22], 说明太原组和山西组物源以陆源碎屑岩和花岗岩为主, 而山西组物源中可能有更多花岗岩的混入。

据泥岩 $\text{La}/\text{Yb}-\sum \text{REE}$ 图解^[23](图3), 研究区样品主要落在花岗岩与沉积岩交汇区域和花岗岩区域, 其中太原组泥岩样品大部分落在花岗岩与沉积岩的交汇区域, 山西组泥岩样品大部分落在花岗岩区域; 在 $\text{Hf}-\text{La}/\text{Th}$ 源岩判别图解^[24]上(图4), 研究区样品大部分落在长英质物源区内, 其中太原组大部分落在基性岩、长英质混合物源区, 山西组大部分

落在长英质物源区,总体上反映了研究区以长英质物源为主,也有基性岩和古老沉积岩的贡献,并且山西组物源可能受火山作用的影响,有花岗岩的混入,这与前人研究认为晚石炭纪华北地台火山作用活跃是一致的^[25]。

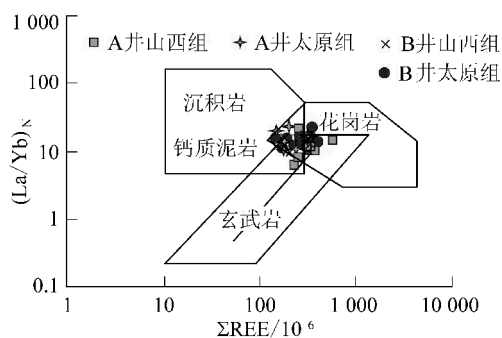


图3 研究区泥岩 $\text{La/Yb}-\Sigma\text{REE}$ 图解
(底图据朱如凯等^[23])

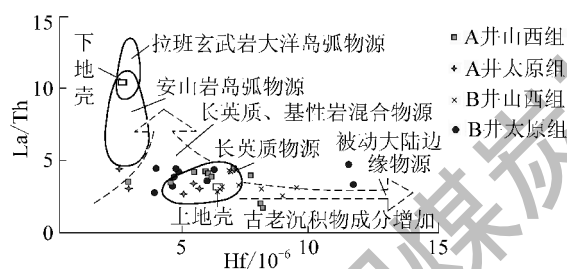


图4 研究区泥岩 Hf-La/Th 源岩判别图解

3.2.2 物源区构造背景

根据沉积物的地球化学特征,可以大致判断其物源区的构造背景。前人研究认为, La 、 Ce 、 Nd 、 Y 、 Th 、 Zr 、 Hf 、 Nb 、 Ti 和 Sc 元素在沉积过程中具有较低的活动性,在海水中停留时间也较短,因此可以用来确定源区和构造位置^[26]。Bhatia(1985)等根据澳大利亚东部古生代浊积砂岩的微量元素研究,总结了不同构造位置杂砂岩的微量元素丰度和比值,并建立了一系列构造环境的判别图解^[27-29]。笔者将研究区泥岩样品投点到 La-Th-Sc 判别图上(图5),发现样品集中在大陆岛弧和大陆边缘的接触部位;而在 Th-Sc-Zr/10 图解上,样品大部分投点在大陆岛弧区内,少部分投点在活动大陆边缘区内。其中,太原组样品主要投点在活动大陆边缘及其与大陆岛弧的接触部位,而山西组样品大部分投点在大陆岛弧区,反映了研究区物源主要来自大陆岛弧和活动大陆边缘,这可能是由于晚石炭-早二叠世源区构造活动逐渐增强而导致的。

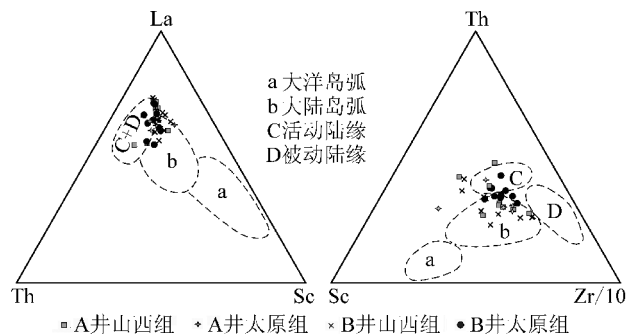


图5 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 物源区判别图解

4 结 论

1) 阳泉矿区泥岩的微量元素含量基本上高于上地壳,亲石元素较为富集,高场强元素 Ti 、 Zr 、 Hf 、 Th 丰度远大于上地壳,仅 Rb 、 Sr 、 Nb 、 Ta 等元素有所亏损。稀土元素总量较高, ΣREE 平均为 $271.02\text{ }\mu\text{g/g}$,明显高于北美页岩。轻重稀土元素比值(LREE/HREE)及 $(\text{La/Yb})_N$ 比值较大,显示轻、重稀土分异较明显;分布模式显示轻稀土富集、重稀土相对亏损, Eu 元素较明显的负异常($0.33\sim0.93$,平均 0.61), Ce 元素微弱负异常或无异常($0.74\sim1.02$,平均 0.90),其中,山西组($0.34\sim0.77$,平均 0.54) Eu 的负异常程度明显大于太原组($0.37\sim0.92$,平均 0.68)。

2) 根据泥岩微量元素和稀土元素的特征参数分析, Sr/Cu 比值反映了太原组沉积期以干热气候为主,山西组沉积期偏于温湿; $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 和 Ce_{anom} 比值表明研究区泥岩样品处于缺氧还原介质条件下; Sr/Ba 比值显示研究区泥岩沉积水体盐度不高,主要为过渡相-陆相沉积。

3) 根据泥岩微量元素和稀土元素组合及其比值特征,结合判别图解,表明阳泉矿区物源较为多样,总体上以长英质物源为主,也有基性岩和古老沉积岩的贡献。与太原组相比,山西组物源明显受到花岗岩的影响。物源区构造背景可能为大陆岛弧和活动大陆边缘。

参考文献:

- [1] 尚冠雄. 华北晚古生代聚煤盆地造盆构造述略[J]. 中国煤田地质, 1995, 7(2): 1-6, 17.
- [2] 吕大伟, 李增学, 刘海燕, 等. 华北晚古生代海平面变化及其层序地层响应[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 1079-1086.
- [3] 葛宝勋, 尹国勋, 李春生. 山西阳泉矿区含煤岩系沉积环境及聚煤规律探讨[J]. 沉积学报, 1985, 3(3): 33-44.

- [4] 程保洲. 山西晚古生代沉积环境与聚煤规律[C]. 太原: 山西科学技术出版社, 1992: 1-253.
- [5] 焦希颖, 王 一. 阳泉矿区含煤地层沉积环境及其对煤层厚度分布控制[J]. 岩相古地理, 1999, 19(3): 30-39.
- [6] 焦希颖, 王 一. 阳泉矿区聚煤作用分析[J]. 河北煤炭, 2000(1): 7-10.
- [7] 迟清华, 鄯明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 103-104.
- [8] Haskin L A, Haskin M A, Frey F A, *et al.* Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths [C]//Ahrens, L. H. (Ed.), *Origin and distribution of the elements*. Oxford: Pergamon, 1968: 889-912.
- [9] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P. (Ed.), *Rare earth element geochemistry* [M]. Amsterdam: Elsevier Sci. Publ. Co., 1984: 63-114.
- [10] 程岳宏, 于兴河, 韩宝清, 等. 东濮凹陷北部古近系沙三段地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 357-366.
- [11] 王随继, 黄杏珍. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 65-70.
- [12] 朱志军, 陈洪德, 林良彪, 等. 川东南-湘西地区志留系小河坝组砂岩微量元素地球化学特征及意义[J]. 地质科技情报, 2010, 29(2): 24-30.
- [13] 王鹏万, 陈子焘, 李娴静, 等. 黔南坳陷上震旦统灯影组地球化学特征及沉积环境意义[J]. 现代地质, 2011, 25(6): 1059-1065.
- [14] Elderfield H, Greaves M J. The rare earth elements in seawater [J]. *Nature*, 1982, 296(18): 214-219.
- [15] 陶 树, 汤达祯, 周传祯, 等. 川东南-黔中及其周边地区下组合烃源岩元素地球化学特征及沉积环境意义[J]. 中国地质, 2009, 36(2): 397-403.
- [16] 刘 刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307-314.
- [17] 张 沛, 郑建平, 张瑞生, 等. 塔里木盆地塔北隆起奥陶系-侏罗系泥岩稀土元素地球化学特征[J]. 沉积学报, 2005, 23(4): 740-746.
- [18] 张 妮, 林春明, 周 健, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组一段元素地球化学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 269-279.
- [19] 杨兴莲, 朱茂炎, 赵元龙, 等. 黔东震旦系-下寒武统黑色岩系稀土元素地球化学特征[J]. 地质论评, 2008, 54(1): 3-15.
- [20] 李双建, 肖开华, 沃玉进, 等. 湘西、黔北地区志留系稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 273-280.
- [21] Shao Yu-bao, Guo Ying-hai, Qin Yong, *et al.* Distribution characteristic and significance of rare earth elements in Lopingian mudstone of Permian, Panxian Country, Guizhou Province [J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2011, 21(4): 469-476.
- [22] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[C]. 北京: 地质出版社, 1984: 24-343.
- [23] 朱如凯, 郭宏莉, 何东博, 等. 中国西北地区石炭系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2002, 16(2): 130-136.
- [24] 侯 伟, 刘招君, 何玉平, 等. 砂岩稀土元素地球化学特征在沉积物源区分析中的应用: 以中国东北漠河盆地中侏罗统为例[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 285-293.
- [25] 张拴宏, 赵 越, 刘建民, 等. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 824-842.
- [26] 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 92-103.
- [27] 毛光周, 刘池洋. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 337-348.
- [28] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1-2): 97-113.
- [29] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.

欢迎订阅《煤炭行业科技论文撰写与投稿指南》

科技论文写作是科技人员一项必备的专业技能,是考核科研人员业绩、学术和技术水平的重要依据。为促进我国高质量、高影响力科技论文的发表,进一步提高我国煤炭科技期刊的国际影响力,加强科技期刊作为学术交流的窗口和平台作用,针对目前煤炭行业论文普遍存在的创新点不明显、逻辑结构混乱,科技术语及单位不规范,论文修改次数多,发表周期长等问题,《煤炭科学技术》编辑部组织编写了《煤炭行业科技论文撰写与投稿指南》,将科技论文写作与编辑加工中存在的一些共性的、常见的和重要的问题进行了分析归纳和整理。从实用的角度出发,采用讲解与实例相结合的方式,阐述了科技论文的特点与作用,科技论文撰写要求,科技

论文录用原则与编辑加工流程,科技论文写作中常见错误剖析,行业期刊介绍及投稿注意事项等,以期为广大煤炭科技工作者的论文写作与发表提供助力。

本书为国际标准大 32 开本,正文 162 页,每本 55.00 元(免邮费),一次订购 10 本以上,9 折优惠。欢迎广大科技工作者订阅,订购方式如下:

地 址:北京市和平里青年沟路 5 号煤炭科学研究总院内(100013)

收款人:《煤炭科学技术》编辑部

电话/传真:(010)84262114(解老师)

E-mail:mtkjdaianling@126.com