

巴格毛德油页岩中稀土元素特征研究 及其地质意义

柳 蓉^{1,2*}, 刘招君^{1,2}, 郭 巍^{1,2}, 陈会军¹, 胡晓峰¹, 周人杰¹

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 吉林大学 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130061)

摘 要: 油页岩中的稀土元素(REE)研究不仅可以用于解决岩石地质成因, 提供物质来源信息, 而且可以对 REE 含量进行资源评价, 有利于油页岩的综合开发利用, 具有重要的理论和现实意义。本研究测试并分析了银额盆地巴格毛德凹陷中生界白垩系下统巴音戈壁组(K₁b)巴格毛德油页岩 REE 地球化学特征, 分析结果表明, 油页岩中的 REE 总量(Σ REE)为 $94.8 \times 10^{-6} \sim 178 \times 10^{-6}$, 平均值为 126×10^{-6} , 低于其围岩的 Σ REE; 轻、重稀土元素含量比值(Σ LREE/ Σ HREE)为 2.60 ~ 3.45, 平均值为 3.10。 $(La/Yb)_N$ 为 0.57 ~ 1.02, 平均值为 0.89, 表明油页岩中 LREE、HREE 分异不明显, LREE 相对 HREE 富集, 属于 LREE 低度富集型。Eu 表现为明显负异常, Ce 表现为微弱的正异常, 表明了油页岩形成于还原的古湖泊环境。油页岩样品 Σ REE 与其微量元素的聚类分析结果表明, 油页岩中的 REE 主要来自陆源碎屑沉积。油页岩样品 δCe 与 δEu 、 δCe 与 Σ REE 均无明显的相关关系, 表明成岩作用对 REE 的影响十分有限, 研究区油页岩的成岩阶段处于未成熟阶段。

关键词: 油页岩; REE; 古湖泊环境; 成岩阶段; 巴格毛德

中图分类号: P595; P618.112

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2010)04-0364-07

Rare earth element characteristics of Bagemaode oil shale, Inner Mongolia, China

LIU Rong^{1,2,*}, LIU Zhao-jun^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, CHEN Hui-jun¹, HU Xiao-feng¹ and ZHOU Ren-jie¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Key-Lab for Evolution of Past Life and Environment in Northeast Asia, Ministry of Education, China, Changchun 130026, China

Abstract: Study on REE of oil shale may give source information, which is important for understanding the formation of oil shales. Meanwhile, it is also useful for the evaluation of REE resources, which contributes to comprehensive utilizations of oil shale. In this study, we analyze the REE concentrations of Bagemaode oil shale in the Bayingebi Formation (K₁b), Bagemaode Depression in the Inner Mongolia, China. The total REE content ranges from 94.8×10^{-6} to 178×10^{-6} , with an average of 126×10^{-6} , which is lower than that of the country rocks. Σ LREE/ Σ HREE varies between 2.60 and 3.45, 3.10 in average, $(La/Yb)_N$, 0.57 and 1.02, 0.89 in average. The data shows slight LREE enrichment. The REE patterns are characterized by markedly negative anomalies of Eu and slight positive anomalies of Ce, which suggest the Bagemaode oil shale was formed in anoxic paleolake environment. Based on the clustering analysis of total and individual REE concentrations, we conclude that the REE in the Bagemaode oil shale generated from territorial clastic deposits. In addition, there is no evident correlation among δCe , δEu , and Σ REE, suggesting that diagenesis had limited influence on REE concentrations. Thus, we interpret that the diagenesis phase of the Bagemaode oil shale is unmaturing period.

Key words: oil shale; REE; paleolake environment; diagenesis phase; Bagemaode

收稿日期(Received): 2009-05-22; 改回日期(Revised): 2009-09-23; 接受日期(Accepted): 2009-12-21

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师基金课题)(200801831098); 国土资源部公益性行业科研专项(200811013); 国土资源部“十一五”重大科技创新项目(20080106-1); 吉林省科技发展计划(青年科研基金)(20090167)

作者简介: 柳蓉(1976-), 女, 博士、副教授, 主要从事含油气盆地分析和油页岩成矿理论与资源评价研究。

* 通讯作者(Corresponding author): LIU Rong, E-mail: liurong@jlu.edu.cn, Tel: +86-431-88502603

0 引言

目前, 许多的学者已经利用稀土元素 (REE) 特殊的物理化学性质对各种金属矿产^[1-4]、煤^[5-11]、泥岩^[12-15]、黑色页岩^[16-18]等开展了成因、物质来源、构造背景等方面的研究, 并且取得了丰硕的成果, 但应用在油页岩方面的研究却很少^[19]。

REE 具有稳定的地球化学性质, 均一化程度高, 不易受各种地质作用的干扰。REE 一旦被记录在岩石体系中, 容易被保存下来, 成为研究岩石地质成因的地球化学指示剂, 并且其分布模式可以提供物质来源信息。此外, 油页岩中的 REE 还可以进行稀有元素提取, 开展综合利用研究^[20]。因此, 通过油页岩中的 REE 的研究, 不仅能解决岩石地质成因, 提供物质来源信息, 而且可以对 REE 含量进行资源评价, 有利于油页岩的综合利用。

巴格毛德位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特后旗北部, 银额盆地东北角的楚鲁隆起中的一个小凹陷。楚鲁隆起呈北东向展布, 其北西翼为苏红图坳陷, 南东翼为查干德勒苏坳陷, 楚鲁隆起的北东端就是该区所处的位置, 面积约 600 km²。巴格毛德凹陷呈北东向展布, 构造都较简单。凹陷基底为中元古界、古生界变质岩、千枚岩、石英片岩和花岗岩等, 盖层为中生界砂岩、泥岩和页岩等。出露的主要地层有: 中元古界 (Pt₂)、古生界上石炭统 (C₃)、中生界白垩系 (K) 及新生界古近系始新统 (E)、新近系上新统 (N) 和第四系 (Q)。油页岩发育于中生界下白垩系统巴音戈壁组 (K_{1b}), 矿层主要赋存在巴音戈壁组二段 (K_{1b}²)、三段 (K_{1b}³) 和四段 (K_{1b}⁴) 中。巴音戈壁组二段油页岩形成于浅湖 - 半深湖环境, 巴音戈壁组三段油页岩形成于半深湖 - 深湖环境, 前者的含油率明显低于后者。

本文拟通过对巴格毛德油页岩中 REE 和微量元素含量的测定, 对 REE 特征及分布模式进行讨论, 并进行沉积环境及其成因讨论。

1 样品采集与测试

样品采自银额盆地巴格毛德凹陷巴格毛德油页岩矿区, 其形成时代为中生界白垩系下统巴音戈壁组 (K_{1b})。该组岩性主要为灰、灰褐色砾岩夹灰色砂砾岩、砂岩、泥质砂岩及棕色、深灰色泥岩和油页岩, 厚度 550 m, 与下伏地层呈不整合接触。油页岩围岩主要为粉砂岩和泥岩。油页岩颜色主要为深灰色、

黑灰色、灰褐色, 含油率越高, 颜色及色调越深; 参差状或贝壳状断口; 指甲刻划有油腻感, 用小刀削之, 油页岩起卷; 遇明火可点燃, 冒白烟并有浓烈的沥青味; 密度较小 (1.62 ~ 2.07 g/cm³, 平均值为 1.85 g/cm³); 水平层理及纹层发育, 呈薄层页片状, 还见有中厚层状和块状构造。含丰富的叶肢介、藻类化石及碳化植物碎屑。

REE 含量用电感耦合等离子体质谱分析法 (ICP-MS) 测试; Ba、Cr 和 Mn 微量元素含量用压片法 X 射线荧光光谱 (XRF) 测定; Cd、Co、Cs、Cu、Ga、Hf、Li、Nb 和 Ni 微量元素含量用 ICP-MS 测试。

为了检测测试结果的准确性, 进行了重复样和标样分析, 重复样合格率 100%。分析结果表明元素的相对偏差小于 2%, 表明总体分析结果可靠。本次测试分析实验在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所完成。

2 油页岩中 REE 地球化学特征

2.1 REE 总量 (ΣREE)

此次共测试了油页岩样品 12 个、油页岩围岩样品 10 个, 结果见表 1。

巴格毛德油页岩中 ΣREE 在 94.8×10^{-6} ~ 178×10^{-6} 之间, 平均值为 126×10^{-6} , 约是北美页岩的 0.73 倍, ΣLREE 为 70.2×10^{-6} ~ 129×10^{-6} , 平均值为 95.2×10^{-6} , 约是北美页岩的 0.60 倍, ΣHREE 为 24.6×10^{-6} ~ 49.6×10^{-6} , 平均值为 31.0×10^{-6} , 约是北美页岩中的 2.04 倍。

巴格毛德油页岩围岩中 ΣREE 在 119×10^{-6} ~ 180×10^{-6} 之间, 平均值为 143×10^{-6} , 约是北美页岩的 0.82 倍, ΣLREE 为 91.1×10^{-6} ~ 132×10^{-6} , 平均值为 108×10^{-6} , 约是北美页岩的 0.69 倍, ΣHREE 为 25.7×10^{-6} ~ 47.9×10^{-6} , 平均值为 34.4×10^{-6} , 约是北美页岩的 2.27 倍。

分析结果表明, 油页岩中 ΣREE 低于其围岩, 但油页岩和围岩中的 HREE 都相对北美页岩富集。

2.2 REE 地球化学参数

根据表 1 的测试结果, 可以计算得到巴格毛德油页岩样品中 REE 地球化学参数, 结果见表 2。

2.2.1 ΣLREE / ΣHREE、(La/Yb)_N、(La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 比值特征

ΣLREE / ΣHREE 和 (La/Yb)_N 比值在一定程

表 1 油页岩及其围岩样品中 REE 含量(×10⁻⁶)
Table 1 REE concentrations (×10⁻⁶) of oil shale and surrounding rock

样号	岩性	含油率	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
11-54	围岩	0.70	21.1	44.8	5.00	19.7	3.93	0.83	3.57	0.61	3.57	0.73	2.07	0.34	2.16	0.37	20.09
11-86		1.00	20.0	43.3	5.22	20.8	4.41	0.85	3.50	0.61	3.38	0.65	1.83	0.29	1.85	0.29	16.83
11-102		1.10	25.5	50.2	5.92	23.8	4.94	1.05	4.61	0.83	4.87	1.00	2.82	0.47	2.96	0.49	28.87
11-106		1.40	23.7	46.1	5.67	22.0	4.54	0.91	3.84	0.68	3.91	0.78	2.14	0.35	2.18	0.34	20.50
11-96		1.40	28.5	55.5	7.00	28.0	6.01	1.26	5.52	0.98	5.78	1.16	3.21	0.51	3.19	0.49	32.54
11-82		2.00	20.7	43.1	5.07	20.2	4.12	0.88	3.82	0.68	3.91	0.79	2.19	0.35	2.31	0.37	21.11
11-18		2.60	20.8	51.7	6.26	25.7	5.35	1.12	4.81	0.85	4.79	0.95	2.55	0.40	2.56	0.39	25.19
11-15		2.70	22.8	46.0	5.55	21.9	4.51	0.98	4.14	0.73	4.28	0.86	2.46	0.40	2.54	0.40	24.28
11-37		3.00	26.2	54.2	6.27	24.7	4.96	0.99	4.31	0.74	4.30	0.83	2.34	0.38	2.30	0.38	22.75
11-49		3.20	19.2	40.4	4.72	18.7	3.78	0.80	3.47	0.62	3.50	0.69	1.88	0.30	1.86	0.30	18.87
11-50	油页岩	3.60	18.7	37.9	4.42	17.4	3.55	0.75	3.14	0.56	3.20	0.64	1.75	0.29	1.80	0.29	17.34
11-46		3.70	18.6	36.9	4.31	17.2	3.48	0.76	3.13	0.53	3.25	0.67	1.87	0.31	2.03	0.34	18.67
11-44		3.80	15.5	30.3	3.61	14.4	3.01	0.64	2.69	0.46	2.75	0.58	1.71	0.29	1.91	0.32	16.63
11-80		4.40	21.1	42.3	5.14	20.3	4.06	0.82	3.49	0.61	3.47	0.71	1.91	0.31	2.01	0.32	19.18
11-93		4.50	23.1	46.8	5.75	22.6	4.73	0.96	4.13	0.73	3.97	0.79	2.17	0.36	2.23	0.35	20.71
11-13		4.90	29.9	56.3	6.30	24.9	5.09	1.12	4.98	0.91	5.61	1.16	3.29	0.52	3.29	0.50	34.27
11-16		4.90	11.5	32.5	4.31	17.8	3.73	0.82	3.22	0.57	3.25	0.65	1.82	0.29	1.94	0.30	17.65
11-100		5.10	23.6	49.0	5.98	23.7	4.93	1.06	4.40	0.78	4.37	0.85	2.36	0.38	2.43	0.38	22.24
11-33		6.00	20.9	43.5	5.08	19.8	4.03	0.86	3.65	0.63	3.71	0.73	2.04	0.33	2.09	0.32	19.28
11-98		6.30	20.8	42.9	5.07	19.8	4.11	0.86	3.77	0.66	3.78	0.76	2.04	0.34	2.15	0.34	20.60
11-56		7.70	19.6	39.1	4.59	18.4	3.80	0.83	3.55	0.63	3.78	0.79	2.29	0.38	2.56	0.43	22.75
11-24		8.80	20.6	42.8	4.96	19.7	4.10	0.88	3.70	0.65	3.73	0.77	2.11	0.34	2.15	0.34	20.20
NASC			32.0	73.0	7.90	33.0	5.70	1.24	5.21	0.85	5.80	1.04	3.40	0.50	3.10	0.48	-
陨石			0.24	0.61	0.10	0.47	0.15	0.06	0.21	0.04	0.25	0.06	0.17	0.03	0.17	0.03	-

注：围岩和油页岩以含油率 3.5% 为界限，小于 3.5% 者为围岩，大于或等于 3.5% 者为油页岩。

表 2 油页岩样品中 REE 地球化学参数
Table 2 Geochemical parameters of REE in oil shale samples

样号	ΣLREE (×10 ⁻⁶)	ΣHREE (×10 ⁻⁶)	ΣLREE/ ΣHREE	ΣREE (×10 ⁻⁶)	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	C _{εmm}	δEu	δCe
11-50	85.9	25.9	3.32	112	5.53	2.52	1.45	0.08	0.75	1.19
11-46	84.4	27.7	3.05	112	4.87	2.56	1.28	0.07	0.77	1.17
11-44	70.2	24.6	2.85	94.8	4.32	2.46	1.17	0.07	0.76	1.15
11-80	97.2	28.5	3.41	126	5.58	2.48	1.44	0.07	0.75	1.16
11-93	108	31.3	3.45	139	5.49	2.34	1.53	0.08	0.75	1.16
11-13	129	49.6	2.60	178	4.82	2.81	1.25	0.06	0.71	1.17
11-16	73.9	26.5	2.79	100	3.15	1.47	1.37	0.16	0.81	1.32
11-100	113	33.8	3.34	146	5.16	2.29	1.50	0.08	0.77	1.18
11-33	97.8	29.1	3.36	127	5.31	2.48	1.44	0.09	0.76	1.20
11-98	97.3	30.7	3.17	128	5.13	2.42	1.45	0.09	0.74	1.19
11-56	89.9	33.6	2.67	123	4.07	2.46	1.15	0.07	0.75	1.17
11-24	96.8	30.3	3.20	127	5.08	2.40	1.42	0.09	0.77	1.21

注：ΣLREE 为轻稀土元素含量；ΣHREE 为重稀土元素含量；ΣREE 为稀土元素总量；ΣLREE/ΣHREE 为轻、重稀土元素含量的比值；N 代表球粒陨石标准化值，(La/Yb)_N 为 La 和 Yb 球粒陨石标准化值的比值；δEu、δCe 为 Eu、Ce 异常的程度，δEu = E_{UN} / (S_{UN} × G_{UN})^{1/2}，E_{UN}、S_{UN}、G_{UN} 分别为该元素实测值的球粒陨石标准化值；δCe = C_{EN} / (L_{AN} × Pr_N)^{1/2}，C_{EN}、L_{AN}、Pr_N 分别为该元素实测值的球粒陨石标准化值；C_{εmm} = lg(3C_{EN} / (2L_{AN} + Nd_N))。

度上反映所分析样品的 REE 分异程度,并间接反映物质来源。这两个比值越大, LREE 越富集,而 HREE 则越亏损。油页岩样品中 $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$ 比值介于 2.60 ~ 3.45 之间,平均值为 3.10;油页岩样品的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值介于 3.15 ~ 5.58 之间,平均值为 4.88,表明 LREE、HREE 分异不明显。

$(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值反映 LREE 之间的分异程度,比值越大, LREE 越富集。而 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值反映 HREE 之间的分馏程度,比值越小, HREE 越富集。油页岩样品中的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值介于 1.47 ~ 2.81 之间, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值介于 1.15 ~ 1.53 之间,表明 LREE、HREE 之间分异都不太明显。

2.2.2 Ce_{anom} 指数

国外一些学者^[21-22]定义 Ce 异常的计算公式为 $\text{Ce}_{\text{anom}} = \lg(3\text{Ce}_N / (2\text{La}_N + \text{Nd}_N))$,并且指出: $\text{Ce}_{\text{anom}} > 0$ 表示 Ce 富集,反映水体缺氧; $\text{Ce}_{\text{anom}} < 0$ 则表示 Ce 亏损,反映水体呈氧化环境。油页岩样品的 Ce_{anom} 值介于 0.06 ~ 0.16 之间,均大于 0,表明水体处于缺氧环境。

2.2.3 Ce 异常 (δCe)

油页岩样品的 δCe 值介于 1.15 ~ 1.32 之间,平均 1.19,显示微弱的正异常(表 2)。

2.2.4 δEu 异常

油页岩样品的 Eu 表现为微弱的负异常, δEu 值介于 0.71 ~ 0.81 之间,平均为 0.76,高于大陆地壳(UCC)(0.65)和北美页岩(NASC)(0.66)。

2.3 REE 分布模式

巴格毛德油页岩样品 REE 球粒陨石标准化分布模式表现为 LREE 富集、HREE 亏损,分布曲线在 LREE 处具有较大的斜率,而在 HREE 处较为平坦(图 1)。同时, Eu 显示出负异常、Ce 显示出微弱的正异常特征。

3 油页岩中 REE 的地质意义

3.1 REE 的来源

采用分层聚类的重心法,对巴格毛德油页岩中的 REE 含量和部分微量元素进行聚类分析。分析结果表明,REE 与 Ti、Cu、Li、Rb、Pb、Ga、Cr、Zn 等外源元素聚类在一起,相关性很好,而与 Sr、Mn 等反映当时湖泊沉积环境的内源元素的相关性次之(图 2)。这在一定程度上揭示了油页岩中 REE 主要

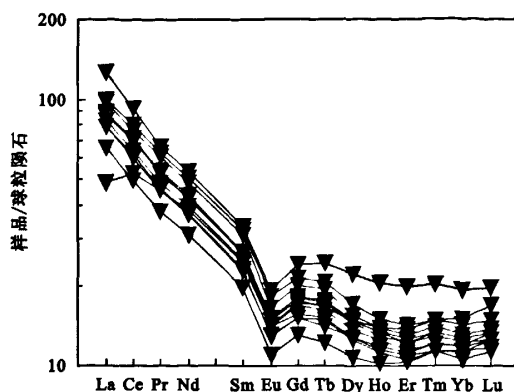


图 1 油页岩 REE 分布模式

Fig. 1 REE distribution patterns of oil shale

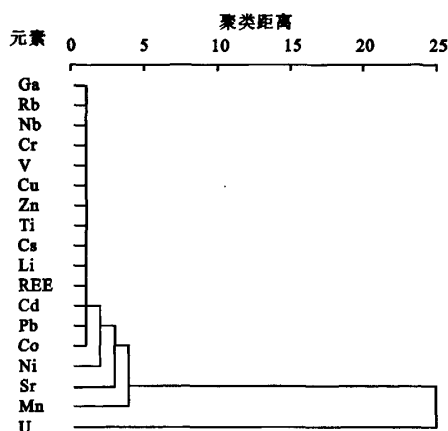


图 2 油页岩中的稀土元素含量和部分微量元素聚类分析

Fig. 2 Hierarchical cluster of rare-earth and other trace elements

来自陆源碎屑的供给。

同时,根据油页岩及其围岩的 ΣREE 对比分析,前者的 ΣREE 明显低于后者。国内对煤中微量元素的研究已做了许多工作,油页岩和煤都为可燃有机矿产,两者最大的区别是油页岩的灰分大于煤。陈冰如等^[23]和孙景信等^[24]曾对国内外的煤中微量元素进行了对比,其中包括 REE。王中刚等认为,随着灰分的增高,REE 丰度也增加,REE 的分布模式越接近页岩,低灰分的煤相对富集 HREE^[25]。油页岩中的灰分与含油率呈反比关系^[26],即油页岩中的灰分含量小于围岩的含量,因此,油页岩中的 REE 含量低于围岩的特征与以上显示的聚类特征吻合。

3.2 REE 与古湖泊条件

沉积岩的 REE 分布特征可以反映沉积时古水

体的古湖泊条件,特别是 δCe 能灵敏地反映沉积环境的氧化还原条件。在一定的 pH 值条件下,若水体为氧化环境, Ce^{3+} 会被氧化成 Ce^{4+} , Ce^{3+} 浓度就降低;反之,若水体缺氧, Ce^{3+} 的浓度就会增大。因此,沉积体系中的 Ce 异常可以用来反映水体的氧化-还原条件的变化^[21,22,27,28]。通常, $\delta\text{Ce} > 1$ 显示富集,为正异常,反映还原环境; $\delta\text{Ce} < 0.95$ 显示亏损,为负异常,反映氧化环境^[25]。研究区油页岩中的 δCe 值变化介于 1.15~1.32 之间,显示 Ce 富集(表 2),表明了其形成环境的还原性。

油页岩(又称油母页岩)是一种高灰分的固体可燃有机沉积岩,低温干馏可获得页岩油,含油率大于 3.5%,有机质含量较高,主要为腐泥型和混合型(腐殖-腐泥型和腐泥-腐殖型),其发热量一般大于或等于 4.18 MJ/kg^[29]。如果用有机碳含量来表示有机质,沉积岩中有机碳含量大多在 0.5%~1.5% 之间,而油页岩中的有机碳含量一般为 6%~15%,最高可达 40%。因此,油页岩中有机质的含量是普通沉积岩的几十倍,甚至百倍。这么多的有机质能得到保存,可见还原环境是油页岩形成的一个重要条件。REE 表现出的还原特征与油页岩形成的古湖泊条件吻合。

3.3 REE 与古气候条件

通常,若 $\delta\text{Eu} > 1.05$,称正异常,若 $\delta\text{Eu} < 0.95$,称负异常^[25]。油页岩中的 δEu 平均值为 0.75,显示较好的 Eu 负异常。而一些学者通过对黄土、古土壤、现代湖泊等的研究表明,明显的 Eu 负异常通常表明沉积岩形成时期为湿润气候条件^[30-31]。因此,依据 δEu 异常与古气候的相关性分析,巴格毛德油页岩形成时期为湿润的古气候条件。

3.4 REE 与油页岩的成岩作用阶段

Shields *et al.* 通过对 REE 的研究指出,成岩作

用可以改变 Ce 异常值,通常会导致 δCe 与 δEu 具有较好的相关关系、 δCe 与 $(\text{Dy}/\text{Sm})_N$ 具较好的负相关关系、 δCe 与 $\sum\text{REE}$ 具较好的正相关关系^[27]。巴格毛德油页岩样品的 δCe 与 δEu 、 δCe 与 $\sum\text{REE}$ 均无明显的相关关系,表明成岩作用对 REE 的影响十分有限(图 3)。

稀土元素表现出的特征与油页岩的镜质组反射率分析结果吻合,共计测试研究区 7 块油页岩样品,镜质组反射率的变化范围 $R^o = 0.47\% \sim 0.51\%$ 。根据有机质演化模式和油气生成阶段,大部分油页岩相当于早成岩阶段,相当于黄第藩等^[32]的未成熟阶段(表 3)。研究表明,巴格毛德油页岩处于未成熟阶段。

4 结 论

(1) 巴格毛德油页岩中的 $\sum\text{REE}$ 不高,低于北美页岩,但 HREE 却相对富集,是北美页岩的 2.04 倍; $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$ 及 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 等比值表明, LREE、HREE 分异不明显,分布模式为明显的 LREE 富集、HREE 平坦, Eu 表现为微弱的负异常, δCe 表现为微弱的正异常。

(2) 油页岩样品 REE 含量与其微量元素的聚类分析结果表明,油页岩中的 REE 主要来自陆源碎

表 3 油页岩中的镜质组反射率(R^o)分析
Table 3 Vitrinite reflectance (R^o) of oil shale

样号	R^o (%)	测定点数	标准偏差
11-108	0.47	16	0.04
11-29	0.47	15	0.04
11-31	0.47	16	0.05
11-33	0.51	15	0.05
11-41	0.50	15	0.04
11-85	0.50	16	0.05
11-94	0.50	15	0.05

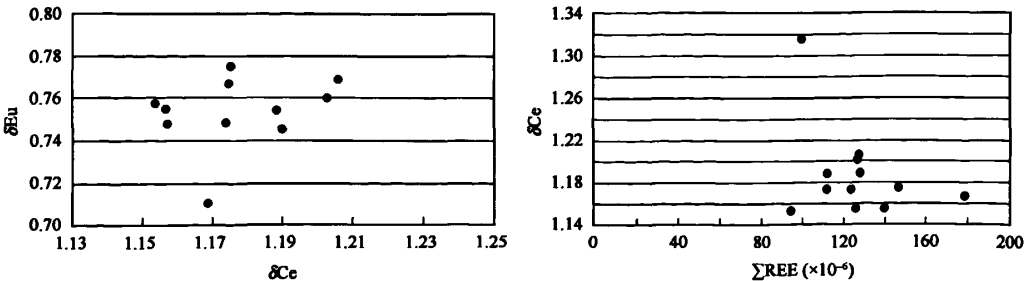


图 3 油页岩的 δEu - δCe 和 δCe - $\sum\text{REE}$ 图解
Fig. 3 Diagrams of δEu vs. δCe and δCe vs. $\sum\text{REE}$ of oil shale

屑沉积。该特征也与油页岩中的 REE 含量低于围岩的特征相吻合。

(3) 通过对油页岩样品 REE 的分布特征分析, 油页岩中 REE 的 Ce 正异常表明了油页岩形成于还原的古湖泊环境, 这与油页岩有机碳含量高需要的还原条件吻合。

(4) 油页岩样品的 δCe 与 δEu 、 δCe 与 ΣREE 均无明显的相关关系, 表明成岩作用对 REE 的影响十分有限, 该认识与测试的油页岩的镜质组反射率结果吻合, 表明巴格毛德油页岩处于成岩的未成熟阶段。

(5) 以上分析结果表明, REE 特征可以作为分析油页岩形成条件的一种有效的手段, 并且揭示了油页岩是一种未成熟的细粒沉积岩, 形成于还原的古湖泊及湿润的古气候条件。


参考文献 (References):

- [1] 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 储国正, 熊亚平. 铜陵狮子山矿田岩漿岩及金矿床的稀土元素地球化学[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(5): 615-622.
Xu Xiao-chun, Lu San-ming, Xie Qiao-qin, Chu Guo-zheng, Xiong Ya-ping. Rare earth element in magmatic rocks and gold deposits in Shizishan ore-field of Tongling, China [J]. J Chinese Rare Earth Soc, 2006, 24(5): 615-622 (in Chinese with English abstract).
- [2] 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 符亚洲, 袁顺达. 湘西沃溪金锑钨矿床中白钨矿的稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 115-122.
Peng Jian-tang, Hu Rui-zhong, Zhao Jun-hong, Fu Ya-zhou, Yuan Shun-da. Rare earth element (REE) geochemistry for scheelite from the Woxi Au-Sb-W deposit, western Hunan [J]. Geochimica, 2005, 34(2): 115-122 (in Chinese with English abstract).
- [3] 于学元, 郑作平, 牛贺才, 郭健. 八卦庙大型金矿床稀土元素地球化学研究[J]. 地球化学, 1996, 25(2): 140-149.
Yu Xue-yuan, Zheng Zuo-ping, Niu He-cai, Guo Jian. REE geochemistry of Baguamiao gold deposit [J]. Geochimica, 1996, 25(2): 140-149 (in Chinese with English abstract).
- [4] 毕献武, 胡瑞忠. 哀牢山金矿带成矿流体稀土元素地球化学[J]. 地质评论, 1998, 44(3): 264-269.
Bi Xian-wu, Hu Rui-zhong. REE geochemistry of ore-forming fluids of the Ailaoshan gold metallogenic belt [J]. Geol Rev, 1998, 44(3): 264-269 (in Chinese with English abstract).
- [5] 赵志根, 唐修义, 李宝芳. 淮北煤田煤的稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 2000, 29(6): 578-583.
Zhao Zhi-gen, Tang Xiu-yi, Li Bao-fang. Geochemistry of rare earth elements of coal in Huaibei Coalfield [J]. Geochimica, 2000, 29(6): 578-583 (in Chinese with English abstract).
- [6] 唐修义, 黄文辉. 中国煤中微量元素 [M]. 北京: 商务印书馆, 2004: 1-368.
Tang Xiu-yi, Huang Wen-hui. Trace Elements in Chinese Coal [M]. Beijing: Commercial Press, 2004: 1-368 (in Chinese).
- [7] 孔洪亮, 曾荣树, 庄新国, 徐文东. 辽宁省北票煤田煤中稀土元素地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2002, 21(2): 75-79.
Kong Hong-liang, Zeng Rong-shu, Zhuang Xin-guo, Xu Wen-dong. Geochemistry of rare earth elements of coal in Beipiao coalfield [J]. Geol Sci Technol Inf, 2002, 21(2): 75-79 (in Chinese with English abstract).
- [8] 赵志根, 唐修义, 李宝芳. 淮南矿区煤的稀土元素地球化学[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 453-459.
Zhao Zhi-gen, Tang Xiu-yi, Li Bao-fang. Geochemistry of rare-earth elements of coal in Huainan Mining Area [J]. Acta Sedimentol Sinica, 2000, 18(3): 453-459 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王运泉, 任德勋, 雷加锦, 唐跃刚, 杨绍晋, 杨亦男. 煤中微量元素分布特征初步研究[J]. 地质科学, 1997, 32(1): 65-73.
Wang Yun-quan, Ren De-xun, Lei Jia-jin, Tang Yue-gang, Yang Shao-jin, Yang Yi-nan. Distribution of minor elements in Chinese coals [J]. Sci Geol Sinica, 1997, 32(1): 65-73 (in Chinese with English abstract).
- [10] 邵靖邦, 曾凡桂, 王宇林, 高常青. 平庄煤田煤中稀土元素地球化学特征[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(4): 13-16.
Shao Jing-bang, Zeng Fan-gui, Wang Yu-lin, Gao Chang-qing. The geochemistry of rare earth element in brown coal of Pingzhuang coalfield, Inner Mongolia [J]. Coal Geol Explor, 1997, 25(4): 13-16 (in Chinese with English abstract).
- [11] 许琪. 中国煤中伴生元素的聚集与扩散[J]. 煤炭学报, 1991, 16(1): 64-72.
Xu Qi. Accumulation and diffusion of associated elements in Chinese coals [J]. J China Coal Soc, 1991, 16(1): 64-72 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘士林, 刘蕴华, 林柯, 周叶, 龚发雄, 张德圣. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2006, 20(3): 449-456.
Liu Shi-lin, Liu Yun-hua, Lin Ge, Zhou Ye, Gong Fa-xiong, Zhang De-sheng. REE geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Neogene, Nanpu sag, Bohai Basin [J]. Geoscience, 2006, 20(3): 449-456 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘俊海, 杨香华, 于水, 吴志轩, 加东辉. 东海盆地丽水凹陷古新统沉积岩的稀土元素地球化学特征[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 421-427.
Liu Jun-hai, Yang Xiang-hua, Yu Shui, Wu Zhi-xuan, Jia Dong-hui. The REE geochemical characteristics of Paleocene-Eocene in the Lishui sag of the Donghai basin [J]. Geoscience, 2003, 17(4): 421-427 (in Chinese with English abstract).
- [14] 朱如凯, 郭宏莉, 何东博, 罗忠, 邵龙义. 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.
Zhu Ru-kai, Guo Hong-li, He Dong-bo, Luo Zhong, Shao Long-yi. The REE geochemical characteristics of Carboniferous mudstone in northwest area [J]. Geoscience, 2002, 16(2): 130-136.

- 130-136 (in Chinese with English abstract).
- [15] 于炳松, 袁愉卓. 贵州地区新元古代—三叠纪沉积岩中稀土元素地球化学特征与地壳演化[J]. 现代地质, 1998, 12(2): 173-179.
- Yu Bing-song, Qiu Yu-zhuo. REE characteristics in Neoproterozoic to Triassic sedimentary rocks and its relation to crustal evolution in Guizhou Province [J]. Geoscience, 1998, 12(2): 173-179 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张杰, 孙传敏, 杨国峰, 谢飞. 贵州下寒武统黑色页岩稀土元素地球化学特征[J]. 稀土, 2008, 29(2): 72-75.
- Zhang Jie, Sun Chuan-min, Yang Guo-feng, Xie Fei. Geochemical characteristics of REE in black shale of Lower Cambrian Series of Guizhou [J]. Chinese Rare Earths, 2008, 29(2): 72-75 (in Chinese with English abstract).
- [17] 杨剑, 易发成, 刘涛, 李虎杰. 黔北黑色岩系稀土元素地球化学特征及成因意义[J]. 地质科学, 2005, 40(1): 84-94.
- Yang Jian, Yi Fa-cheng, Liu Tao, Li Hu-jie. REE geochemical characters of the Lower Cambrian black shale series in northern Guizhou and their original significance [J]. Chinese J Geol, 2005, 40(1): 84-94 (in Chinese with English abstract).
- [18] 于炳松, 陈建强, 李兴武, 林杨松. 塔里木盆地寒武统底部黑色页岩地球化学及其岩石圈演化意义[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(5): 374-382.
- Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Li Xingwu, Lin Changsong. Geochemistry of black shale at the bottom of the Lower Cambrian in Tarim Basin and its significance for lithosphere evolution [J]. Sci China (D), 2003, 46(5): 498-507.
- [19] 高桂梅, 苏克, 王文颖, 甘树才, 刘招君. 吉林省桦甸油页岩中稀土元素和微量元素的研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 974-979.
- Gao Gui-mei, Su Ke, Wang Wen-ying, Gan Shu-cai, Liu Zhao-jun. Study on rare earth and trace elements in oil shale samples, Huadian, Jilin Province [J]. J Jilin Univ (Earth Sci ed), 2006, 36(6): 974-979 (in Chinese with English abstract).
- [20] 柳蓉, 刘招君. 国内外油页岩资源现状及综合开发潜力分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 892-898.
- Liu Rong, Liu Zhao-jun. Oil shale resource situation and multi-purpose development potential in China and abroad [J]. J Jilin Univ (Earth Sci ed), 2006, 36(6): 892-898 (in Chinese with English abstract).
- [21] Elderfield H, Greaves M J. The rare earth elements in seawater [J]. Nature, 1982, 296(5854): 214-219.
- [22] Elderfield H, Pagett M. Rare earth elements in ichthyoliths: Variations with redox conditions and depositional environment [J]. Sci Total Environ, 1986, 49: 175-197.
- [23] 陈冰如, 钱琴芳, 杨亦男, 杨绍晋. 我国一〇七个煤矿中微量元素的浓度分布[J]. 科学通报, 1985, 30(1): 27-29.
- Chen Bingru, Qian Qinfang, Yang Yinan, Yang Shaojin. Distribution of 107 trace elements in Chinese Coal [J]. Chinese Sci Bull, 1985, 30(1): 27-29 (in Chinese).
- [24] 孙景信, Jervis R E. 煤中微量元素及其在燃烧过程中的分布特征[J]. 中国科学(A辑), 1986, 29(12): 1287-1294.
- Sun Jingxin, Jervis R E. Trace elements in coal and their distribution characteristics during coal combustion [J]. Chinese Sci (A), 1987, 30(3): 288-297.
- [25] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 310-313.
- Wang Zhong-gang, Yu Xue-yuan, Zhao Zhen-hua. Rare Earth Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989: 310-313 (in Chinese).
- [26] 孟庆涛, 刘招君, 柳蓉, 王永莉. 松辽盆地农安地区上白垩统油页岩含油率影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 963-968.
- Meng Qing-tao, Liu Zhao-jun, Liu Rong, Wang Yong-li. Controlling factors on the oil yield of the Upper Cretaceous oil shale in the Nongan area, Songliao Basin [J]. J Jilin Univ (Earth Sci ed), 2006, 36(6): 963-968 (in Chinese with English abstract).
- [27] Shields G, Stille P. Diagenetic constrains on the use of cerium anomalies as paleoseawater redox proxies: An isotopic and REE study of Cambrian phosphorites [J]. Chem Geol, 2001, 175(1/2): 29-48.
- [28] Yang Jiedong, Sun Weiguo, Wang Zongzhe, Xue Yaosong, Tao Xiancong. Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in successions from China: Evidence for the oxygenation of Neoproterozoic seawater? [J]. Precamb Res, 1999, 93(2/3): 215-233.
- [29] 刘招君, 柳蓉. 中国油页岩特征及开发利用前景分析[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 315-323.
- Liu Zhao-jun, Liu Rong. Oil shale resource state and evaluating system [J]. Earth Sci Front, 2005, 12(3): 315-323 (in Chinese with English abstract).
- [30] 彭淑贞, 郭正堂. 西峰地区晚第三纪红土稀土元素的初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 39-43.
- Peng Shu-zhen, Guo Zheng-tang. A preliminary study on REE of the late Tertiary laterite in Xifeng area [J]. Mar Geol Quatern Geol, 2000, 20(2): 39-43 (in Chinese with English abstract).
- [31] 史基安, 郭雪莲, 王琪, 严宁珍, 王鑫霞. 青海湖QH1孔晚全新世沉积物稀土元素地球化学与气候环境关系探讨[J]. 湖泊科学, 2003, 15(1): 28-34.
- Shi Ji-an, Guo Xue-lian, Wang Qi, Yan Ning-zhen, Wang Jiang-xia. Geochemistry of REE in QH1 sediments of Qinghai Lake since Late Holocene and its paleoclimatic significance [J]. J Lake Sci, 2003, 15(1): 28-34 (in Chinese with English abstract).
- [32] 黄第藩, 李晋超, 周嘉虹, 顾信章, 张大江. 陆相有机质演化与成烃机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984: 228p.
- Huang Di-fan, Li Jin-chao, Zhou Zhu-hong, Gu Xin-zhang, Zhang Da-jiang. Evolution and Hydrocarbon Generation Mechanism of Terrestrial Organic Matter [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984: 228p (in Chinese).

作者: 柳蓉, 刘招君, 郭巍, 陈会军, 胡晓峰, 周人杰, [LIU Rong](#), [LIU Zhao-jun](#), [GUO Wei](#), [CHEN Hui-jun](#), [HU Xiao-feng](#), [ZHOU Ren-jie](#)

作者单位: 柳蓉, 刘招君, 郭巍, [LIU Rong](#), [LIU Zhao-jun](#), [GUO Wei](#) (吉林大学地球科学学院, 吉林长春, 130061; 吉林大学东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 吉林长春, 130061), 陈会军, 胡晓峰, 周人杰, [CHEN Hui-jun](#), [HU Xiao-feng](#), [ZHOU Ren-jie](#) (吉林大学地球科学学院, 吉林长春, 130061)

刊名: 地球化学 

英文刊名: [GEOCHIMICA](#)

年, 卷(期): 2010, 39(4)

参考文献(32条)

1. 黄第藩;李晋超;周翥虹;顾信章 张大江 陆相有机质演化与成烃机理 1984
2. 史基安;郭雪莲;王琪;严宁珍 王疆霞 青海湖QH1孔晚全新世沉积物稀土元素地球化学与气候环境关系探讨[期刊论文]-[湖泊科学](#) 2003(01)
3. 于炳松;陈建强;李兴武;林畅松 塔里木盆地寒武统底部黑色页岩地球化学及其岩石圈演化意义[期刊论文]-[中国科学d辑](#) 2002(05)
4. 于学元;郑作平;牛贺才;郭健 八卦庙大型金矿床稀土元素地球化学研究[期刊论文]-[地球化学](#) 1996(02)
5. 彭建堂;胡瑞忠;赵军红;符亚洲 袁顺达 湘西沃溪金锑钨矿床中白钨矿的稀土元素地球化学[期刊论文]-[地球化学](#) 2005(02)
6. 王运泉;任德贻;雷加锦;唐跃刚 杨绍晋 杨亦男 煤中微量元素分布特征初步研究 1997(01)
7. 赵志根;唐修义;李宝芳 淮南矿区煤的稀土元素地球化学[期刊论文]-[沉积学报](#) 2000(03)
8. 孔洪亮;曾荣树;庄新国;徐文东 辽宁省北票煤田煤中稀土元素地球化学特征[期刊论文]-[地质科技情报](#) 2002(02)
9. 唐修义;黄文辉 中国煤中微量元素 2004
10. 赵志根;唐修义;李宝芳 淮北煤田煤的稀土元素地球化学[期刊论文]-[地球化学](#) 2000(06)
11. 毕献武;胡瑞忠 袁牢山金矿带成矿流体稀土元素地球化学[期刊论文]-[地质论评](#) 1998(03)
12. 彭淑贞;郭正堂 西峰地区晚第三纪红土稀土元素的初步研究[期刊论文]-[海洋地质与第四纪地质](#) 2000(02)
13. 刘招君;柳蓉 中国油页岩特征及开发利用前景分析[期刊论文]-[地学前缘](#) 2005(03)
14. [Yang Jiedong](#); [Sun Weiguo](#); [Wang Zongzhe](#); [Xue Yaosong](#) [Tao Xiancong](#) Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in successions from China: Evidence for the oxygenation of Neoproterozoic seawater[外文期刊] 1999(2/3)
15. [Shields G](#); [Stille P](#) Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as paleoseawater redox proxies: An isotopic and REE study of Cambrian phosphorites[外文期刊] 2001(1/2)
16. 孟庆涛;刘招君;柳蓉;王永莉 松辽盆地农安地区上白垩统油页岩含油率影响因素[期刊论文]-[吉林大学学报\(地球科学版\)](#) 2006(06)
17. 王中刚;于学元;赵振华 稀土元素地球化学 1989
18. 孙景信; [Jervis R E](#) 煤中微量元素及其在燃烧过程中的分布特征 1986(12)
19. 陈冰如;钱琴芳;杨亦男;杨绍晋 我国一〇七个煤矿中微量元素的浓度分布 1985(01)
20. [Elderfield H](#); [Pagett M](#) Rare earth elements in ichthyoliths: Variations with redox conditions and depositional environment[外文期刊] 1986
21. [Elderfield H](#); [Greaves M J](#) The rare earth elements in seawater[外文期刊] 1982(5854)

22. [柳蓉;刘招君](#) [国内外油页岩资源现状及综合开发潜力分析](#)[期刊论文]-[吉林大学学报（地球科学版）](#) 2006(06)
23. [高桂梅;苏克;王文颖;甘树才 刘招君](#) [吉林省桦甸油页岩中稀土元素和微量元素的研究](#)[期刊论文]-[吉林大学学报（地球科学版）](#) 2006(06)
24. [徐晓春;陆三明;谢巧勤;储国正 熊亚平](#) [铜陵狮子山矿田岩浆岩及金矿床的稀土元素地球化学](#)[期刊论文]-[中国稀土学报](#) 2006(05)
25. [杨剑;易发成;刘涛;李虎杰](#) [黔北黑色岩系稀土元素地球化学特征及成因意义](#)[期刊论文]-[地质科学](#) 2005(01)
26. [张杰;孙传敏;杨国峰;谢飞](#) [贵州下寒武统黑色页岩稀土元素地球化学特征](#)[期刊论文]-[稀土](#) 2008(02)
27. [于炳松;裘愉卓](#) [贵州地区新元古代-三叠纪沉积岩中稀土元素地球化学特征与地壳演化](#) 1998(02)
28. [朱如凯;郭宏莉;何东博;罗忠 邵龙义](#) [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](#)[期刊论文]-[现代地质](#) 2002(02)
29. [刘俊海;杨香华;于水;吴志轩 加东辉](#) [东海盆地丽水凹陷古新统沉积岩的稀土元素地球化学特征](#)[期刊论文]-[现代地质](#) 2003(04)
30. [刘士林;刘蕴华;林舸;周叶 龚发雄 张德圣](#) [渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义](#)[期刊论文]-[现代地质](#) 2006(03)
31. [许琪](#) [中国煤中伴生元素的聚集与扩散](#) 1991(01)
32. [邵靖邦;曾凡桂;王宇林;高常青](#) [平庄煤田煤中稀土元素地球化学特征](#)[期刊论文]-[煤田地质与勘探](#) 1997(04)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dqhx201004008.aspx