

伦坡拉盆地丁青湖组油页岩稀土元素特征及其地质意义

谢尚克^{1,2}, 杜佰伟^{1,2}, 王 剑^{1,2}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081; 2. 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 成都 610081)

摘 要:野外地质调查与研究发现伦坡拉盆地有大规模的油页岩出露,通过伦坡拉盆地丁青湖组油页岩的稀土元素地球化学分析,结果表明油页岩中稀土元素总量较高, $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ 及 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值等显示了轻稀土元素与重稀土元素分异明显,REE分布模式为明显的轻稀土元素富集、重稀土元素亏损,轻稀土元素段呈显著的右倾,重稀土元素段呈平坦状,Eu负异常很明显。 Ce_{anom} 值反映了水体介质的还原性,表明油页岩形成于还原的古湖泊环境; δEu 值与古气候特征分析表明,油页岩形成于湿润的古气候环境。 ΣREE 质量分数与 Al_2O_3 、 SiO_2 及 TiO_2 质量分数呈正相关关系,与 CaO 质量分数呈负相关关系,结合微量元素的聚类分析,表明油页岩稀土元素主要来源于陆源碎屑,而非水体自身沉积。

关键词:伦坡拉盆地;丁青湖组;油页岩;稀土元素;古环境;古气候

中图分类号:P595;P588.22

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2015)02-0057-06

目前,中国非常规油气资源主要有油页岩、页岩气、重油沥青、煤层气、致密砂岩气、天然气水合物、生物气等。油页岩是一种重要的油气替代资源,以其巨大的储量和较成熟的开采工艺,在我国非常规能源中占据着非常重要的地位^[1-2]。近年来随着研究程度的不断深入,西藏地区发现了多处油页岩^[3-10],其中,胜利河—长蛇山油页岩带是目前我国发现的最大规模的海相油页岩带^[7,11]。伦坡拉盆地的油页岩研究一直较为薄弱,2009年以来,笔者通过实测剖面、探槽工程和资料点的收集,证实伦坡拉盆地存在大规模的油页岩带,该区油页岩具有层数多、厚度大及横向延伸较为稳定的特征,其中蒋日阿错—伦坡日—爬爬地区一带的油页岩为该区规模最大的油页岩矿床,初步估算其资源量达 $105.1 \times 10^9 \text{ t}$ 以上,是西藏地区发现的最大规模的油页岩矿床^[12-14]。

稀土元素(REE)是研究岩石地质成因的重要地球化学指标,因为在风化、搬运、沉积及成岩过程中其组成变化较小,所携带的物源区的源岩信息一般不丢失^[15-22],油页岩中的稀土元素可以进行综合开发利用,稀土元素REE的分布模式还能提供物质来源等信息^[23]。笔者将通过测定伦坡拉盆地丁青湖组油页岩中稀土元素和微量元素的含量,对稀土元素特征及其REE分布模式进行探讨,旨在解决油页岩矿区的沉积环境特征及物质来源信息,同时对REE含量做进一步的资源评价,以提高研究区油页岩的综合开发利用效率。

1 地质背景

伦坡拉盆地位于西藏自治区班戈县境内,面积约 $3\,600 \text{ km}^2$,海拔 $4\,600$ 余米,是世界上海拔最高的油气勘探区,也是西藏地区发育为数众多的古近纪陆相盆地中,已知油气地质条件最好、勘探程度最高的一个盆地,并且最早获得了工业性油气流^[24-25]。伦坡拉盆地是在燕山期褶皱基底上发育的拉张型古近纪陆相盆地,从盆地的发展史来看,伦坡拉盆地经历了拉张、断陷、抬升、拉张、挤压、隆起等多次构造演化,其构造演化过程主要是始新世的断陷期及渐新世的拗陷期。伦坡拉盆地是一个具有走滑特征的断拗盆地,中间低而南北两侧较高,北部沉降幅度大,沉积厚度大,向南呈斜坡状,呈不对称的箕状盆地,具有南北分带、东西分块的构造格局^[26-27]。

伦坡拉盆地主要发育牛堡组(E_2n)和丁青湖组(E_3d)两套沉积。牛堡组为一套棕红色碎屑岩夹灰绿色泥页岩、灰白色泥灰岩,最大沉积厚度约 $3\,800 \text{ m}$,牛堡组分为3个岩性段,分别为牛一段(E_2n_1)、牛二段(E_2n_2)、牛三段(E_2n_3),形成粗—细—稍粗,红—黑—稍红的沉积旋回;丁青湖组沉积较牛堡组沉积局限,北厚南薄,由北向南超覆,主要为一套灰色、深灰色泥页岩、油页岩、泥灰岩夹细砂岩的岩石组合,最大沉积厚度约 $1\,150 \text{ m}$,丁青湖组可分为3个岩性段,分别为丁一段(E_3d_1)、丁二段(E_3d_2)和丁三段(E_3d_3),形成粗—细—稍粗,红—黑—稍红

收稿日期:2014-05-22

编辑:刘江霞

基金项目:国家油气专项“青藏高原重点盆地油气资源战略调查与选区”(XQ-2009-1);“青藏高原非常规油气调查”(1212011221106);国家自然科学基金项目(40972087;41072088)

作者简介:谢尚克(1986—),男,工程师,主要从事油气地质工作。E-mail:shangk86@163.com

的沉积旋回。牛堡组与丁青湖组在区域上呈整合或不整合接触。

2 样品采集与测试

样品采自于伦坡拉盆地伦坡日地区,该油页岩剖面 GPS 座标为: $N31^{\circ}56'35.97''$, $E89^{\circ}47'49.02''$, 高度为 $(4\,641 \pm 5)\text{m}$, 取样位置见图 1。该剖面岩性组合较为简单,主要发育油页岩、泥岩、粉砂岩及细砂岩,其形成时代为古近系丁青湖组沉积时期。新鲜油页岩为灰色、深灰色和灰黑色,风化后略显出浅灰色,弱油脂光泽,岩石质地较轻,具有一定的韧性,

小刀能刻划,并能剥离出毫米级页片,常以书页状产出,油页岩表面常见各种生物化石,以鱼骨类化石居多,呈层状分布于油页岩内。

为了减少地表现代有机物污染、降低生物降解对油页岩的影响,在采样过程中,采集尽可能新鲜的油页岩样品,用刀子刮去了油页岩表面的松散物质,此次共采集了 16 件具有代表性的油页岩样品进行实验测试。样品在微量元素分析之前,先经 $\text{HF-HClO}_4\text{-HNO}_3$ 消解处理,经离子水定容之后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定元素含量(以干重计),测试工作由国家地质实验测试中心完成,分析精度优于 95%。

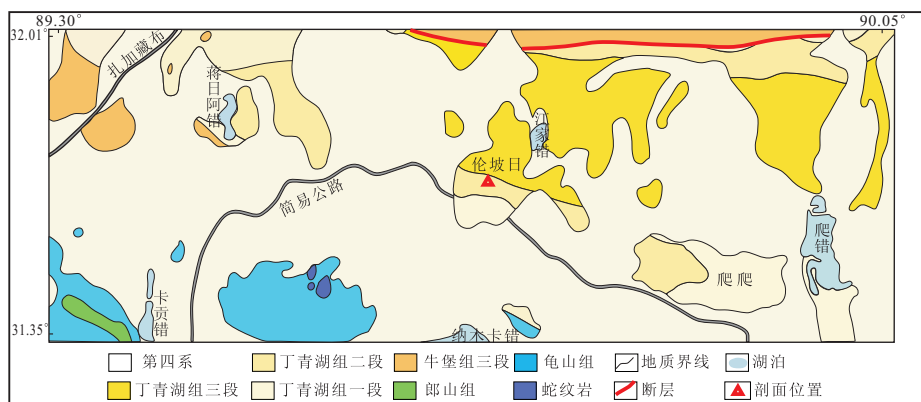


图 1 伦坡拉盆地地质简图及取样位置

Fig. 1 Geological sketch and samples location of Lunpola Basin

3 稀土元素地球化学特征

3.1 稀土元素总量(ΣREE)

伦坡拉盆地丁青湖组油页岩样品的 REE 分析结果见表 1,稀土元素总量 ΣREE (不包括 Y) 在 $109.4 \times 10^{-6} \sim 155.8 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 134.5×10^{-6} ;轻稀土元素质量分数(ΣLREE)介于 $98.7 \times 10^{-6} \sim 141.4 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 121.3×10^{-6} ;重稀土元素质量分数(ΣHREE)在 $10.7 \times 10^{-6} \sim 15.2 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 13.2×10^{-6} 。结果表明,研究区油页岩的稀土元素质量分数与大陆上地壳(平均值为 146.4×10^{-6})相近,大多数样品的稀土元素总量低于北美页岩(平均值为 173.2×10^{-6}),而其重稀土元素质量分数高于北美页岩。

3.2 稀土元素地球化学参数

轻、重稀土元素质量分数比($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)在一定程度上反映了样品轻稀土元素与重稀土元素的分异程度。在同一类的岩石中,比值越大,表明轻稀土元素与重稀土元素分异就越明显,轻稀土元素富集,重稀土元素相对亏损。伦坡拉盆地油页岩样品 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值介于 8.7~

9.9 之间,平均值为 9.2,比北美页岩的比值高,说明研究区样品轻稀土元素相对富集,重稀土元素则相对亏损。

$(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 为稀土元素球粒陨石标准化图解中的曲线斜率,可以反映曲线的倾斜程度。样品的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 9.3~11.6,平均值为 10.5,表明轻稀土元素与重稀土元素分异较为明显;样品的 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 为 7.3~9.0,平均值为 8.1,也反映了相似情况。样品的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 能反映轻稀土元素之间的分异程度,该比值越大,轻稀土元素越富集,样品的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 反映了重稀土元素之间的分馏程度,该比值越小,重稀土元素越富集。伦坡拉盆地油页岩样品的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 在 3.7~4.1 之间,平均值为 3.91,表明轻稀土元素分异中等;样品的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 在 1.4~1.8 之间,平均值为 1.64,表明重稀土元素之间没有明显分异。

经球粒陨石标准化后,研究区样品的 δEu 介于 0.59~0.65 之间,平均值为 0.62,研究区的 δEu 与北美页岩标准值($\delta\text{Eu}=0.65$)较为接近; δCe 在 1.05~1.08 之间,平均值为 1.07,该区 δCe 值的基本正常。

表 1 伦坡拉盆地丁青湖组油页岩稀土元素地球化学分析数据

Table 1 REE data of oil shale samples of Dingqinghu Formation in Lunpola Basin

元素	No39-3	No39-4	No39-5	No39-6	No39-7	No39-10	No39-11	No39-12	No39-15	No39-16	No39-17	No39-18	No39-19	No39-20	No39-21	No39-22
La	29.80	30.60	29.50	30.20	27.80	29.80	33.60	30.20	32.50	23.70	27.30	24.50	24.90	28.80	28.00	29.60
Ce	57.80	60.50	57.50	59.50	54.10	58.70	66.30	59.30	63.40	46.10	53.70	48.40	49.60	56.70	56.30	58.90
Pr	6.51	6.67	6.33	6.50	5.98	6.56	7.34	6.73	7.04	5.15	5.98	5.41	5.51	6.31	6.23	6.57
Nd	24.60	26.50	24.00	24.90	22.90	25.20	28.00	25.30	27.10	19.30	22.80	20.20	20.60	24.30	23.80	24.80
Sm	4.79	5.11	4.76	4.64	4.30	4.72	5.23	4.94	5.36	3.77	4.47	3.99	4.00	4.53	4.43	4.73
Eu	0.91	0.98	0.90	0.94	0.83	0.89	0.97	0.95	1.04	0.68	0.88	0.74	0.79	0.90	0.82	0.92
Gd $w_B/10^{-6}$	4.18	4.42	4.00	3.98	3.84	3.96	4.33	4.34	4.53	3.10	4.02	3.27	3.34	4.04	3.92	3.88
Tb	0.58	0.64	0.58	0.58	0.55	0.56	0.62	0.64	0.67	0.45	0.55	0.49	0.49	0.61	0.55	0.57
Dy	3.58	3.90	3.48	3.51	3.12	3.44	3.73	3.63	3.98	2.77	3.31	3.02	3.05	3.52	3.37	3.40
Ho	0.70	0.77	0.68	0.73	0.62	0.68	0.75	0.72	0.80	0.57	0.66	0.61	0.62	0.69	0.67	0.69
Er	2.06	2.37	2.00	2.21	1.85	2.11	2.22	2.18	2.37	1.73	1.96	1.86	1.85	2.03	1.95	2.11
Tm	0.28	0.33	0.29	0.30	0.27	0.28	0.31	0.31	0.33	0.24	0.30	0.26	0.27	0.29	0.28	0.29
Yb	2.00	2.22	2.03	2.04	1.77	1.97	2.06	1.95	2.20	1.55	1.88	1.86	1.82	1.95	1.93	1.98
Lu	0.28	0.33	0.28	0.31	0.27	0.29	0.32	0.30	0.33	0.24	0.29	0.27	0.27	0.31	0.28	0.31
Σ LREE	124.4	130.4	123.0	126.7	115.9	125.9	141.4	127.4	136.4	98.7	115.1	103.2	105.4	121.5	119.6	125.5
Σ HREE	13.7	15.0	13.3	13.7	12.3	13.3	14.3	14.1	15.2	10.7	13.0	11.6	11.7	13.4	13.0	13.2
Σ REE	138.1	145.3	136.3	140.3	128.2	139.2	155.8	141.5	151.7	109.4	128.1	114.9	117.1	135.0	132.5	138.8
Σ LREE/ Σ HREE	9.1	8.7	9.2	9.3	9.4	9.5	9.9	9.1	9.0	9.3	8.9	8.9	9.0	9.0	9.2	9.5
(La/Yb) _N	10.6	9.8	10.3	10.5	11.1	10.7	11.6	11.0	10.5	10.8	10.3	9.3	9.7	10.5	10.3	10.6
(Ce/Yb) _N	8.1	7.6	7.9	8.1	8.5	8.3	9.0	8.5	8.0	8.3	8.0	7.3	7.6	8.1	8.1	8.3
(La/Sm) _N	3.9	3.7	3.9	4.1	4.0	3.9	4.0	3.8	3.8	3.9	3.8	3.8	3.9	4.0	4.0	3.9
(Gd/Yb) _N	1.7	1.6	1.6	1.6	1.8	1.6	1.7	1.8	1.7	1.6	1.7	1.4	1.5	1.7	1.6	1.6
δ Ce	1.05	1.08	1.07	1.08	1.07	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08	1.07	1.08	1.07
δ Eu	0.60	0.61	0.61	0.65	0.60	0.61	0.60	0.61	0.62	0.59	0.61	0.61	0.64	0.62	0.58	0.64
Ce _{anom}	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.04	-0.04	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.04	-0.03	-0.03

注: 国家地质实验测试中心, 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS); 标准化值采用 Taylor 等^[28]; McLennan^[29]; 其中 δ Ce = $Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{0.5}$; δ Eu = $Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{0.5}$; $Ce_{anom} = \lg[3Ce_N / (2La_N + Nd_N)]$, 下标 n 表示北美页岩标准化值; 下标 N 表示球粒陨石标准化值

3.3 稀土元素的分布模式

伦坡拉盆地油页岩样品球粒陨石与北美页岩的标准化, 其分布模式如图 2 所示。经球粒陨石标准化之后, 为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的分布模式, 轻稀土元素在分布曲线上具较大的斜率, 而重

稀土元素在分布曲线上较为平坦, 同时, 显示为明显的 Eu 负异常(图 2-A)。从研究区样品在北美页岩标准化图上(图 2-B)来看, 油页岩样品均显示了轻微的 Ce 负异常, 北美页岩组合样的标准化曲线几乎水平。

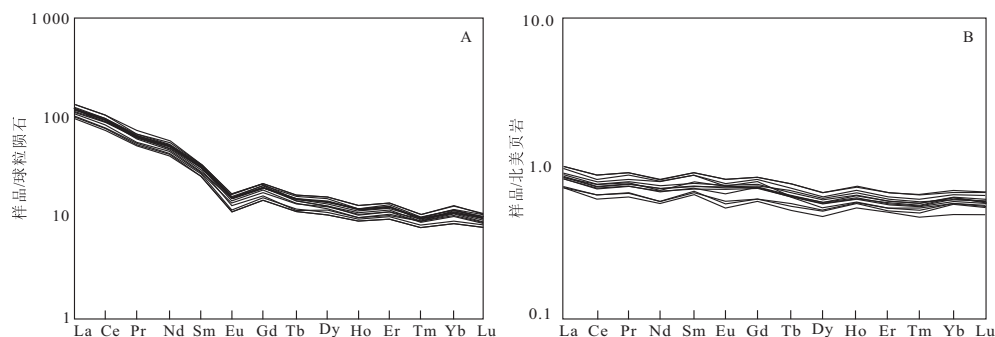


图 2 研究区样品的球粒陨石标准化分布模式(A)和北美页岩标准化分布模式(B)图

Fig. 2 Chondrite-normlized REE patterns (A) and NASC-normlized REE patterns(B) of oil shale

4 油页岩中稀土元素的地质意义

4.1 稀土元素 REE 与古湖泊、古气候条件

Shields 等^[30]指出成岩作用能够改变稀土元素中的 Ce 特征, 并且通常会使 δ Ce 与 δ Eu 具有良好

的相关性, δ Ce 与 $(Dy/Sm)_N$ 具有良好的负相关性, 及 δ Ce 与 Σ REE 具有较好的正相关性。油页岩样品的 δ Ce 与 δ Eu、 δ Ce 与 $(Dy/Sm)_N$ 及 δ Ce 与 Σ REE 均没有显著的相关性(图 3), 这说明成岩作用对样品 REE 的影响是非常有限的, 因此, Ce 异常值能够

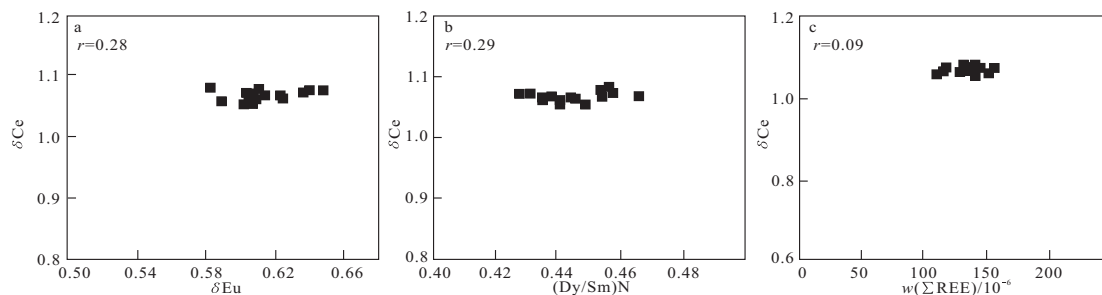


图3 研究区油页岩 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ (a)、 $\delta\text{Ce}-(\text{Dy}/\text{Sm})_{\text{N}}$ (b) 及 $\delta\text{Ce}-w(\Sigma\text{REE})$ (c) 图解

Fig. 3 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ (a), $\delta\text{Ce}-(\text{Dy}/\text{Sm})_{\text{N}}$ (b) and $\delta\text{Ce}-\Sigma\text{REE}$ (c) diagrams of the samples from the study area

代表原始的古湖泊环境。

通过研究沉积岩稀土元素分布特征,能够提取古水体的氧化—还原信息。在一定的 pH 值条件下,若水体为氧化沉积环境, Ce^{3+} 被氧化为 Ce^{4+} , Ce^{3+} 的浓度降低;反之,若水体为缺氧沉积环境, Ce^{3+} 的浓度增大。因此, Ce 异常可以反映沉积水体的氧化—还原条件。Elderfield 等^[31-32]把稀土元素中的 Ce 与邻近 La 和 Nd 元素的相关变化称为铈异常(Ce_{anom}),计算公式为: $\text{Ce}_{\text{anom}} = \lg[3\text{Ce}_n / (2\text{La}_n + \text{Nd}_n)]$ (n 表示北美页岩标准化), Ce_{anom} 值能够作为古水体氧化—还原条件的标志之一,若 $\text{Ce}_{\text{anom}} > -0.1$,表示水体 Ce 富集,为缺氧环境;若 $\text{Ce}_{\text{anom}} < -0.1$,表示水体 Ce 亏损,为氧化环境。伦坡拉油页岩样品的 Ce_{anom} 值在 $-0.04 \sim -0.03$ 之间,平均值为 -0.04 ,表明沉积时的水体介质为缺氧环境,这

有利于有机质的保存,能形成较为优质的烃源岩,一些学者发现伦坡拉盆地具有较高的含油率及有机碳含量^[14,33],一般认为油页岩具有较高的有机质含量,其有机碳含量是沉积岩中的几十倍、甚至百倍之多,能保存如此高的有机碳含量,还原环境是最重要的条件之一。因此, REE 表现出的还原性特征与油页岩形成的古湖泊条件吻合。

前人研究表明,湿润气候条件下,沉积岩通常具有明显的 Eu 负异常^[34-35]。伦坡拉盆地丁青湖组油页岩中的 δEu 平均值为 0.62,显示出较好的 Eu 负异常,这表明研究区油页岩形成时期,古气候条件较为湿润,而一些学者通过对伦坡日地区的相关研究,表明丁青湖组油页岩沉积时为温暖湿润的气候环境^[13]。由此推断,伦坡拉盆地丁青湖组油页岩形成于较为温暖湿润的古气候环境。

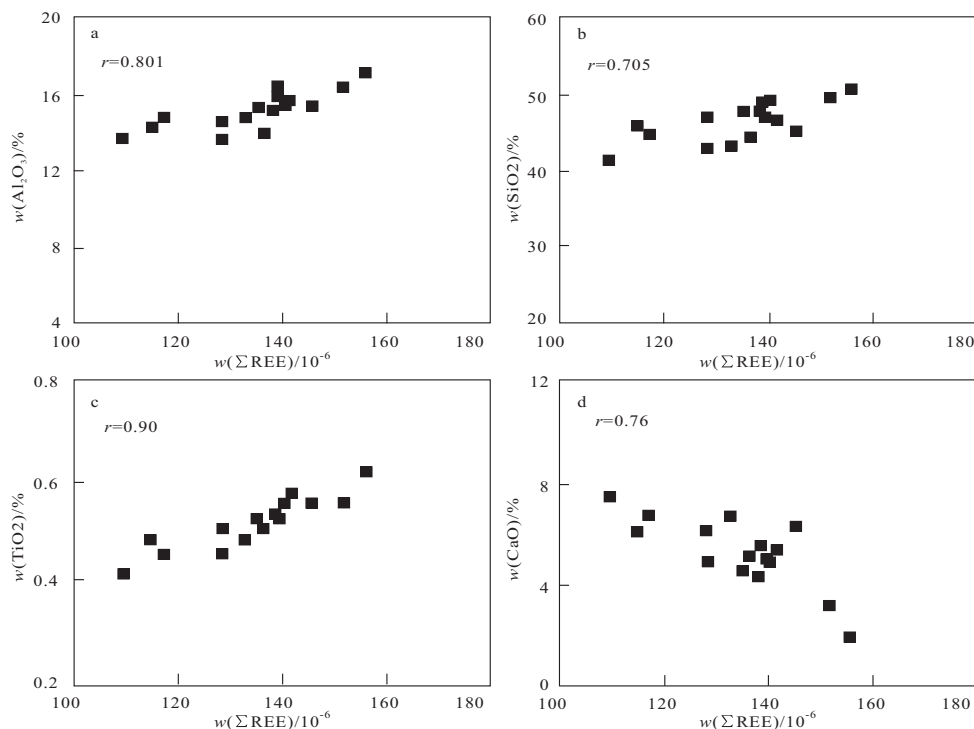


图4 $w(\Sigma\text{REE})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (a)、 $w(\text{SiO}_2)$ (b)、 $w(\text{TiO}_2)$ (c) 和 $w(\text{CaO})$ (d) 相关关系图

Fig. 4 Relationship between ΣREE and Al_2O_3 (a), SiO_2 (b), TiO_2 (c) and CaO (d) in the study area

4.2 稀土元素的来源

前人认为轻稀土元素富集、重稀土元素含量稳定及具有明显的 Eu 负异常特征的稀土元素一般来源于上地壳^[29,36]。伦坡拉盆地丁青湖组油页岩样品经球粒陨石标准化后,其显示的分布模式与上地壳基本一致,且样品的 δEu 与大陆上地壳标准值(0.65)接近,这说明研究区沉积岩的原始物质来自上地壳。

从相关性分析可看出, $w(\sum \text{REE})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 及 $w(\text{TiO}_2)$ 呈正相关关系(图 4-a, b, c), 相关系数 r 分别达到 0.801, 0.705 和 0.90, 说明研究区油页岩稀土元素主要物源为陆源碎屑, $w(\sum \text{REE})$ 与 $w(\text{CaO})$ 呈明显的负相关关系(图 4-d), 表明稀土元素的来源基本与生物作用无关, 说明研究区油页岩稀土元素含量的主要物源为陆源碎屑, 而非水体自身元素分异沉积。丁青湖组沉积时期, 气候条件较为温暖湿润^[13], 陆源碎屑注入河流, 带来了大量粒度极细、品质纯的黏土岩。相对于重稀土元素, 轻稀土元素的离子半径更小, 由于黏土岩的吸附分异作用, 轻稀土元素被吸附的能力强, 故更易聚集, 这与前文论述的该地区轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的分析结论一致。

对油页岩中的 REE 含量与微量元素进行分层聚类分析, 选取的微量元素为 Ga、Li、Sc、V、Zn、Rb、Cr、Mn、Sr、Ni、Co 和 U, 其中以 Li、Ga 等为代表的外源元素, 是陆源风化产物伴随着河流进入湖盆沉积的, 而以 Mn、Sr 等为代表的元素则是内源元素。分析结果可分为两类, REE 与 Ga、Li、Sc、V、Zn 等外源元素为一类, 相关性很好, 显示 REE 主要来源于陆源碎屑; 另一类元素为 Mn、Sr、Ni、Co、U(图 5), 表明 REE 与内源元素的相关性不好, REE 并非来源于水体的自身沉积。

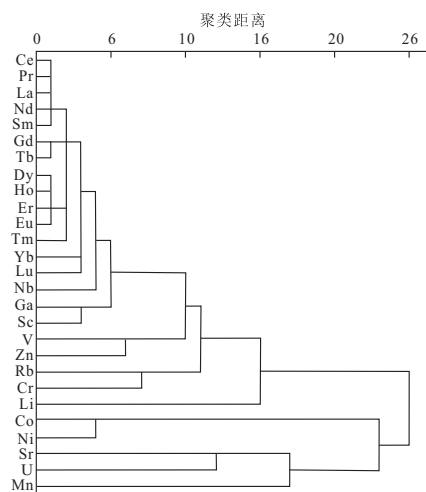


图5 研究区油页岩中的稀土元素含量与部分微量元素的聚类分析结果
Fig. 5 Result of hierarchical cluster of rare-earth with other trace elements of oil shale

5 结 论

(1) 伦坡拉盆地丁青湖组油页岩的稀土元素总量较高, $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}$ 及 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 等比值显示轻稀土元素与重稀土元素分异明显, REE 分布模式为明显的轻稀土元素富集、重稀土元素亏损, 轻稀土元素段呈明显的右倾, 重稀土元素段呈平坦状及显著的 Eu 负异常。

(2) 样品 Ce_{anom} 值反映了油页岩沉积时水体介质的还原性, 这表明油页岩沉积时为还原的古湖泊环境; 古气候与 δEu 负异常的相关性研究表明研究区油页岩形成时为湿润的古气候条件。

(3) 研究区油页岩样品 $w(\sum \text{REE})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 及 $w(\text{TiO}_2)$ 呈正相关关系, 与 $w(\text{CaO})$ 呈负相关关系, 表明沉积期有大量的陆源物质注入, 结合微量元素的聚类分析, 表明油页岩中的 REE 主要来源于陆源碎屑, 而非水体自身沉积。

参考文献:

- [1] 李景明, 王红岩, 赵群. 中国新能源资源潜力及前景展望[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 149-153.
- [2] 汤桦, 白云来, 吴武军. 中国西部新能源: 油页岩典型特征及开发利用中的几个问题[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 731-741.
- [3] 王成善, 伊海生, 刘池阳, 等. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 139-143.
- [4] 林金辉, 伊海生, 邹艳荣. 藏北高原海陆相油页岩生物标志化合物对比研究[J]. 地球化学, 2004, 33(1): 57-63.
- [5] 李亚林, 王成善, 伍新和, 等. 藏北托纳木地区发现上侏罗统海相油页岩[J]. 地质通报, 2005, 24(8): 783-784.
- [6] 李亚林, 王成善, 朱利东, 等. 西藏尼玛盆地油页岩的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2010, 19(12): 1872-1874.
- [7] 王剑, 付修根, 杜安道, 等. 羌塘盆地胜利河海相油页岩地球化学特征及 Re-Os 定年[J]. 海相油气地质, 2007, 12(3): 21-26.
- [8] 付修根, 王剑, 汪正江, 等. 藏北羌塘盆地晚侏罗世海相油页岩生物标志物特征、沉积环境分析及意义[J]. 地球化学, 2007, 36(5): 486-496.
- [9] 付修根, 王剑, 汪正江, 等. 藏北羌塘盆地海相油页岩沉积环境[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(5): 529-533.
- [10] 汪正江, 王剑, 陈文西, 等. 青藏高原北羌塘盆地胜利河上侏罗统海相油页岩的发现[J]. 地质通报, 2007, 26(6): 764-768.
- [11] 曾胜强, 王剑, 付修根, 等. 北羌塘盆地长蛇山油页岩剖面烃源岩生烃潜力及沉积环境[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1861-1871.
- [12] 杜佰伟, 彭清华, 谢尚克, 等. 青藏地区非常规油气地质调查成果报告[R]. 成都: 成都地质调查中心, 2013.
- [13] 谢尚克, 杜佰伟, 王剑, 等. 西藏伦坡拉盆地丁青湖组油页岩地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(3): 503-510.
- [14] 谢尚克, 杜佰伟, 王剑, 等. 西藏伦坡拉盆地油页岩特征及分布规律[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(6): 1760-1767.
- [15] 于炳松, 乐昌硕. 沉积岩物质成分所蕴含的地球深部信息[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 105-112.
- [16] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analy-

- sis of major-element data[J]. *Chemical Geology*, 1988, 67: 119-139.
- [17] Murray R W, Buchholtz ten Brink M R J, Jones D L, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. *Geology*, 1990, 18: 268-271.
- [18] Cullers R L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian and metamorphic studies[J]. *Lithos*, 2000, 51: 181-200.
- [19] Bauluz L, Mayayo M J, Fernandez-Nieto C, et al. Geochemistry of Precambrian and Paleozoic siliciclastic rocks from the Iberian Range (N E Spain): Implications for source-area weathering, sorting, provenance, and tectonics setting[J]. *Chemical Geology*, 2000, 168: 135-150.
- [20] 施春华, 胡瑞忠, 颜佳新. 华南地区栖霞组沉积地球化学特征研究[J]. *地质科技情报*, 2004, 23(1): 33-41.
- [21] 杨江海, 杜远生, 朱杰. 甘肃省景泰正路下志留统复理石杂砂岩沉积地球化学特征[J]. *地质科技情报*, 2006, 25(5): 27-31.
- [22] 蔡观强, 郭峰, 刘显太, 等. 沾化凹陷新近系沉积岩地球化学特征及其物源指示意义[J]. *地质科技情报*, 2007, 26(6): 17-24.
- [23] 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.
- [24] 杜佰伟, 谭富文, 陈明. 西藏伦坡拉盆地沉积特征分析及油气地质分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2004, 24(4): 46-54.
- [25] 王剑, 谭富文, 李亚林, 等. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 283-298.
- [26] 雷清亮, 付孝悦, 卢亚平. 伦坡拉第三纪陆相盆地油气地质特征分析[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 1996, 21(2): 168-173.
- [27] 艾华国, 兰林英, 朱宏权, 等. 伦坡拉第三纪盆地的形成机理和石油地质特征[J]. *石油学报*, 1998, 19(2): 21-27.
- [28] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [29] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1989, 21(1): 169-200.
- [30] Shields G, Stille P. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: An isotopic and REE study of Cambrian phosphorites[J]. *Chemical Geology*, 2001, 175: 29-48.
- [31] Elderfeld H, Greaves M J. The rare earth elements in seawater[J]. *Nature*, 1982, 296: 214-219.
- [32] Elderfeld H, Pagett M. Rare earth elements in ichthyoliths: Variations with redox conditions and depositional environment[J]. *Science Total Environment*, 1986, 49: 175-197.
- [33] Fu Xiugen, Wang Jian, Tan Fuwen, et al. Geochemistry of terrestrial oil shale from the Lunpola area, northern Tibet, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 102: 1-11.
- [34] 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.
- [35] 史基安, 郭雪莲, 王琪, 等. 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.
- [36] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic of sedimentary basins[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1986, 92: 181-193.

Characteristics and Geological Implications of Rare Earth Element of Oil Shale in Lunpola Basin, Tibet

Xie Shangke^{1,2}, Du Baiwei^{1,2}, Wang Jian^{1,2}

- (1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China;
2. Key Laboratory for Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610081, China)

Abstract: There are large-scale outcrops of oil shale in Dingqinghu Formation, Lunpola Basin according to field geological surveys and research. In this study, we analyzed the REE concentrations of Lunpola oil shale, the results indicate that total rare earth elements are higher, LREE/HREE and La_N/Yb_N show that differentiations between LREE and HREE are obvious; REE distribution patterns of apparent LREE is abundant, while HREE is defective, show that LREE is obviously rightward heeling, while HREE is even with significant negative Eu anomaly. According to characteristics of Ce_{anom} , the Lunpola oil shale was formed in anoxic paleolake environment, based on δEu negative anomaly and its correlation with the paleoclimate, indicating that the oil shale formation in the study area was humid paleoclimate. The correlation of ΣREE with Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 is positive, which is obvious negative correlated with CaO , indicating that numerous terrigenous sediments was brought into the deposition environment, in addition with cluster analysis of trace elements and their REE sample, we conclude that the REE of oil shale in the study area mainly from territorial clastic deposits, rather than the water itself deposition.

Key words: Lunpola Basin; Dingqinghu Formation; oil shale; REE; paleoenvironment; paleoclimate