

# 东濮凹陷北部古近系 沙三段地球化学特征及地质意义

程岳宏<sup>1</sup> 于兴河<sup>1</sup> 韩宝清<sup>2</sup> 杜海峰<sup>3</sup> 白振华<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份公司中原油田分公司, 河南 濮阳 457001;  
3. 陕西省西安市延长集团研究院, 陕西 西安 710075; 4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:** 沉积岩的微量元素和稀土元素蕴含了大量的地质信息, 对研究物源区性质与沉积环境的重塑具有重要的指导意义。本文研究了渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组沙三段泥岩和盐岩的微量元素及稀土元素的地球化学特征。结果表明, 微量元素 Sr、Ba 丰度高, 其他 Rb、V、Ni、Mn、Fe、Cr、Br 等元素含量较低, 多数微量元素含量比同类岩石克拉克值偏高;  $\sum \text{REE}$  为  $47.1 \times 10^{-6} \sim 268.02 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $181.55 \times 10^{-6}$ , 接近于后太古宙页岩(PAAS)的平均值, 高于大陆上地壳(UCC)平均值。轻稀土与重稀土总量的比值为 7.96~11.46, 平均值为 9.71, 其分配模式表现为轻稀土富集, 重稀土相对亏损, 整体特征为“右倾斜型”, 但重稀土元素为较平坦。铕(Eu)具有明显的亏损(0.48~0.70), 铈(Ce)轻微亏损(0.89~0.97)。而盐岩样品中所含微量元素和稀土元素含量普遍很少。通过对样品中 Sr/Cu、V/(V+Ni)、(La/Yb)<sub>N</sub>、Sr/Ba、 $\delta \text{Ce}$  和 Ceanom 等特征参数的分析, 总结出沙三段属于陆相沉积, 处于还原、厌氧、咸水沉积环境; 根据 La/Th-Hf 和 Co/Th-La/Sc 源岩判别图解, Eu、 $\delta \text{Eu}$  以及 REE—La/Yb 等组合特点, 显示源岩主要为中酸性长英质岩石(花岗岩)和混合长英质岩/基性岩, 古老沉积岩对其贡献不大, 主要来自内黄隆起和鲁西隆起的碎屑物质。

**关键词:** 东濮凹陷; 微量元素; 稀土元素; 物源属性

**中图分类号:** P588.21      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2010)02-0357-10

沉积岩中微量元素和稀土元素已被地质界广泛关注和深入研究, 由于某些微量元素及其比值受风化、搬运、沉积和成岩以及变质作用的影响甚少, 因此, 这对识别盆地演化史、沉积古气候、古环境及沉积物的物质来源和构造背景均具有十分重要意义<sup>[1-9]</sup>。近年来的研究表明, 沉积物的陆源成分中某些元素, 如 Th、Sc、Co、Zr、Hf、Nb 和稀土元素(REE)在水体中停留的时间比较短, 可以快速、等量地转移到细粒沉积物中, 可作为沉积岩物源的有效示踪剂, 其地质意义更加突出<sup>[7-11]</sup>。

东濮凹陷古近纪沙三段是油气的有利储集层位,

厚度大, 油气资源丰富, 前人从岩心、钻井、测井和地震资料入手, 对其构造、沉积相类型、盐岩成因、成藏机理和勘探开发等方面进行了较为深入的研究<sup>[12-16]</sup>, 而对本区的地球化学特征方面的研究甚少, 文献资料也较少。可是, 目前中国仍处于油气资源紧张的局势, 进一步加大勘探开发的力度也是势在必行。因此, 从地球化学角度研究该区的沉积环境、物源属性也具有重要意义。本文主要通过分析东濮凹陷沙三段泥岩和盐岩中的微量元素和稀土元素丰度、组合特征等, 研究该区的物源区性质, 并对古沉积环境进行重建, 进而对下一步勘探开发奠定基础。

**收稿日期:** 2009-08-12; **改回日期:** 2010-02-01

**基金项目:** 科技重大专项东濮凹陷精细勘探关键技术(2008ZX05000-006)资助。

**作者简介:** 程岳宏, 男, 1985 年生, 硕士生, 从事油气储层沉积学与层序地层学研究; E-mail: cyhdd6204106@126.com。

**通讯作者:** 于兴河, 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学和油气地质学研究; E-mail: billyu@cugb.edu.cn。



子体质谱仪(ICP-MS)测试微量元素和稀土元素含量。样品烘干、粗碎后,在刚玉和玛瑙机械碎样机上研磨,使其粒度小于 200 目,并准确称取 40 mg 样品于 Teflon 容样灌中,加入(1+1)HNO<sub>3</sub>和 HF 进行溶解,最后转入 50 mL PE 瓶中,加入 1 mL 50010-9 In 内标,用 1% HNO<sub>3</sub> 稀至 50 g 进行测定。本文稀土元素进行球粒陨石标准化,其标准值采用 Boynton(1984)<sup>[18]</sup> 推荐的球粒陨石 REE 数据<sup>[19]</sup>,其中铈(Ce)和铕(Eu)异常分别采用下面公式完成。

$$\delta(\text{Ce}) = \frac{[\omega(\text{Ce})]_N}{\{[\omega(\text{La})]_N \cdot [\omega(\text{Pr})]_N\}^{\frac{1}{2}}};$$

$$\delta(\text{Eu}) = \frac{[\omega(\text{Eu})]_N}{\{[\omega(\text{Sm})]_N \cdot [\omega(\text{Gd})]_N\}^{\frac{1}{2}}};$$

其中:δ(Ce)——Ce 异常;ω(Ce)——Ce 的质量分数;ω(La)——La 的质量分数;ω(Pr)——Pr 的质量分数;δ(Eu)——Eu 异常;ω(Eu)——Eu 的质量分数;ω(Sm)——Sm 的质量分数;ω(Gd)——Gd 的质量分数;N——球粒陨石标准化值。

### 3 地球化学分析结果

#### 3.1 稀土元素特征

东濮凹陷古近系沙三段泥岩和盐岩样品分析结果(表 1)以及经球粒陨石标准化后的稀土元素有关地球化学参数(表 2),通过分析计算可得,稀土总量(∑REE)为 47.1×10<sup>-6</sup>~268.02×10<sup>-6</sup>,∑REE 平均值为 181.55×10<sup>-6</sup>,接近于澳大利亚后太古宙页岩(PAAS)<sup>[20]</sup>的平均值(184.77×10<sup>-6</sup>),高于大陆上地壳(UCC)<sup>[21]</sup>平均值 148.14×10<sup>-6</sup>。∑LREE 为:42.77×10<sup>-6</sup>~245.91×10<sup>-6</sup>,平均值为 164.59×10<sup>-6</sup>,∑HREE 为:4.33×10<sup>-6</sup>~23.22×10<sup>-6</sup>,平均值为 16.96×10<sup>-6</sup>,∑LREE 与∑HREE 的比值为 7.96~11.46,平均值为 9.71。经球粒陨石标准化后,做出样品的 REE 分配模式图(图 2),显示轻稀土元素(LREE)富集,重稀

土元素(HREE)相对亏损,整体表现为“右倾斜型”,但重稀土元素为相对平坦,含量较为稳定。总体上,分配模式图基本一致,呈现小的“V”形,各井稀土元素含量差异不大,可是,盐岩的稀土元素含量明显减少(图 2-d)。

经球粒陨石标准化后,δEu 范围为 0.48~0.70,平均为 0.63,铕(Eu)具有明显的亏损;δCe 范围为 0.89~0.97,δCe 平均为 0.91,铈(Ce)轻微亏损。(La/Yb)<sub>N</sub>、(Ce/Yb)<sub>N</sub> 是稀土元素球粒陨石标准化图解中分布曲线的斜率,它们可反映曲线的倾斜程度,样品的(La/Yb)<sub>N</sub> 为 8.53~12.18,平均值为 11.04,(Ce/Yb)<sub>N</sub> 为 6.75~9.14,平均值为 8.15,表明轻、重稀土元素分异明显。(La/Sm)<sub>N</sub> 反映轻稀土之间的分馏程度,样品的(La/Sm)<sub>N</sub> 为 3.55~5.84,平均值为 4.27,表明轻稀土元素之间分异中等;(Gd/Yb)<sub>N</sub> 反映重稀土之间的分馏程度,样品的(Gd/Yb)<sub>N</sub> 为 1.31~1.94,平均值为 1.70,表明重稀土元素的分异不太明显;同时,由于随着地质时间演变和元素的分馏作用,Gd 的含量会逐渐减少,(Gd/Yb)<sub>N</sub> 的比值也会逐渐变小,并且太古宇(Gd/Yb)<sub>N</sub> 的比值一般大于 2.0,后太古代年轻地层比值小于 2.0<sup>[22]</sup>,而研究区(Gd/Yb)<sub>N</sub> 比值均小于 2,由此也可以表明源区母岩主要来自后太古代年轻地层。

Shiekds 等<sup>[23]</sup>研究认为成岩作用可以影响 Ce 的异常值,通常会导致 δCe 和 δEu 具有良好的相关性,δCe 与 (Dy/Sm)<sub>N</sub> 具有负相关性,δCe 与 ∑HREE 具有较好的正相关性<sup>[11]</sup>。研究区样品的 δCe 和 δEu、δCe 与 (Dy/Sm)<sub>N</sub> 以及 δCe 与 ∑HREE 图解(图 3),它们均无相关性,反映了成岩作用对该区稀土元素的影响不明显。

#### 3.2 微量元素特征

从东濮凹陷沙三段泥岩及盐岩样品的微量元素分析结果(表 3)可知:微量元素中 Sr、Ba 丰度较高,其他 Rb、V、Ni、Mn、Fe、Cr、Br 等元素含量较低。大

表 1 东濮凹陷古近系沙三段泥岩稀土元素地球化学分析数据(10<sup>-6</sup>)

Table 1 REE data of mudstones in 3rd Member of Paleocene Shahejie Formation in Dongpu depression (10<sup>-6</sup>)

参数	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
最小值	10.41	20.3	2.28	7.96	1.58	0.24	1.39	0.21	1.15	0.23	0.6	0.09	0.58	0.09
最大值	59.55	116.21	13.6	47.41	8.18	1.63	6.88	1.06	6.33	1.24	3.51	0.52	3.36	0.51
平均值	39.71	76.33	8.98	32.51	5.88	1.17	5.11	0.78	4.51	0.90	2.49	0.38	2.43	0.37

表 2 东濮凹陷古近系沙三段泥岩稀土元素地球化学参数  
Table 2 REE parameters of mudstones in 3rd Member of Paleocene Shahejie Formation, Dongpu depression

井名	$\Sigma$ REE	$\Sigma$ LREE	$\Sigma$ HREE	$\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Ce/Yb)_N$	$(Gd/Yb)_N$	$\delta$ Eu	$\delta$ Ce
	/10 <sup>-6</sup>									
白 16	196.09	178.36	17.74	10.06	10.56	4.84	7.49	1.38	0.65	0.89
白 7	197.39	179.00	18.39	9.73	11.06	4.37	8.12	1.67	0.65	0.91
白 9	268.02	245.91	22.12	11.12	11.95	4.84	8.95	1.50	0.59	0.93
观 2	181.70	163.56	18.14	9.02	9.80	3.74	7.22	1.62	0.58	0.91
观 3	160.16	145.05	15.11	9.60	10.53	4.24	7.64	1.58	0.58	0.91
胡 66	174.75	157.88	16.87	9.36	11.11	4.11	8.18	1.84	0.65	0.91
胡 7	195.33	176.59	18.74	9.42	11.15	4.05	8.12	1.83	0.65	0.90
胡 83	218.29	199.15	19.14	10.41	11.82	4.59	8.73	1.65	0.64	0.92
刘 2	192.26	174.80	17.46	10.01	11.68	4.45	8.56	1.76	0.64	0.91
刘 6	214.62	195.76	18.86	10.38	12.02	4.72	8.72	1.68	0.67	0.91
明 48	161.95	146.50	15.45	9.48	11.02	3.93	8.15	1.78	0.62	0.91
濮 115	171.28	155.37	15.91	9.76	11.37	4.16	8.54	1.79	0.64	0.93
濮 76	117.71	106.08	11.63	9.12	10.59	3.96	7.92	1.78	0.64	0.92
濮深 7	199.13	180.68	18.44	9.80	11.25	4.20	8.24	1.76	0.65	0.91
前 1	236.38	216.19	20.19	10.71	11.24	4.84	8.17	1.44	0.56	0.91
前 11	217.23	197.15	20.08	9.82	11.73	4.11	8.63	1.92	0.64	0.91
桥 20	215.26	194.80	20.45	9.53	10.95	4.12	7.94	1.75	0.65	0.90
桥 36	192.80	174.99	17.81	9.83	11.14	4.29	8.33	1.70	0.66	0.93
桥 50	203.32	183.97	19.34	9.51	10.72	4.19	7.89	1.72	0.65	0.91
桥 86	132.98	121.17	11.80	10.27	10.93	4.73	7.90	1.48	0.66	0.91
庆 12	197.02	178.03	18.99	9.38	10.50	4.30	7.55	1.60	0.63	0.89
庆 5	134.64	121.25	13.39	9.05	10.11	4.02	7.90	1.75	0.66	0.97
庆 65	202.94	183.87	19.07	9.64	11.18	4.37	8.01	1.68	0.66	0.89
卫 2-3	169.56	153.86	15.70	9.80	11.63	4.06	8.62	1.89	0.61	0.91
卫 305-5	200.51	181.61	18.90	9.61	11.23	4.12	8.32	1.82	0.64	0.91
卫 42	140.33	126.80	13.53	9.37	10.21	4.02	7.69	1.58	0.64	0.93
卫 95	203.15	184.64	18.51	9.98	12.18	4.30	9.14	1.94	0.70	0.93
文 19-5	245.79	222.56	23.22	9.58	11.14	4.06	8.22	1.74	0.65	0.90
文 207	47.10	42.77	4.33	9.87	12.01	4.14	8.99	1.92	0.48	0.94
文 223	166.26	150.17	16.09	9.33	10.75	4.13	7.92	1.73	0.62	0.91
文 255	204.63	184.78	19.85	9.31	11.05	3.73	8.39	1.88	0.62	0.93
文 266-6	212.49	191.99	20.49	9.37	11.22	4.04	8.27	1.87	0.65	0.91
文 75	106.89	98.31	8.58	11.46	11.99	5.84	8.45	1.31	0.63	0.90
文 90-3	158.63	140.92	17.71	7.96	8.53	3.55	6.75	1.64	0.69	0.96
云 3	117.54	105.95	11.58	9.15	10.03	4.22	7.49	1.64	0.64	0.93
平均值	181.55	164.59	16.96	9.71	11.04	4.27	8.15	1.70	0.63	0.91

注: N 代表球粒陨石标准化值, 采用 Boynton(1984)数据<sup>[18]</sup>; 测试单位为中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室。

部分元素 Li、Be、Sc、V、Cr、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Y、Zr、Ba、Bi 的平均值比同类岩石的克拉克值含量高, Sr、Nb、Cs、Ta、Th、U 的平均值比同类岩石的克拉克值含量低。其中 Sr 含量为  $167.08 \times 10^{-6} \sim 4508.84 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $778.69 \times 10^{-6}$ ; Ba 含量为  $192.31 \times 10^{-6} \sim 1648.80 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $453.70 \times 10^{-6}$ 。这些特征与岩石的吸附能力以及沉积环境有关。

## 4 沉积环境分析

### 4.1 古气候分析

沉积岩中的微量元素对古气候、古环境的恢复有一定的指示意义。莱辑曼(1989)认为湖盆中微量

元素 Sr/Cu 的比值可以指示古气候, 即 Sr/Cu 的比值为 1.3~5.0 时指示温暖潮湿的气候, 大于 5.0 指示干旱炎热的气候<sup>[24]</sup>。对东濮凹陷沙三段 23 个泥岩样品进行分析, 其 Sr/Cu 比值变化很大, 介于 6.23~562.48, 平均值为 35.41(表 3), 指示了沙三段沉积期总体为干旱炎热气候。值得注意的是, 含有盐岩的井(如文 207 井、文 75 井、文 42 井等) Sr/Cu 比值很大, 平均值为 209.39, 与其他井相差悬殊, 可说明该盐湖盆地盐岩是在干旱炎热的气候下蒸发还原形成的, 并结合沙三段泥岩的沉积特征, 其颜色较深, 当时的水体较深。这也进一步证实了渤海湾盆地群形成时, 大陆边缘弧形山系阻止了古太平洋潮湿气流

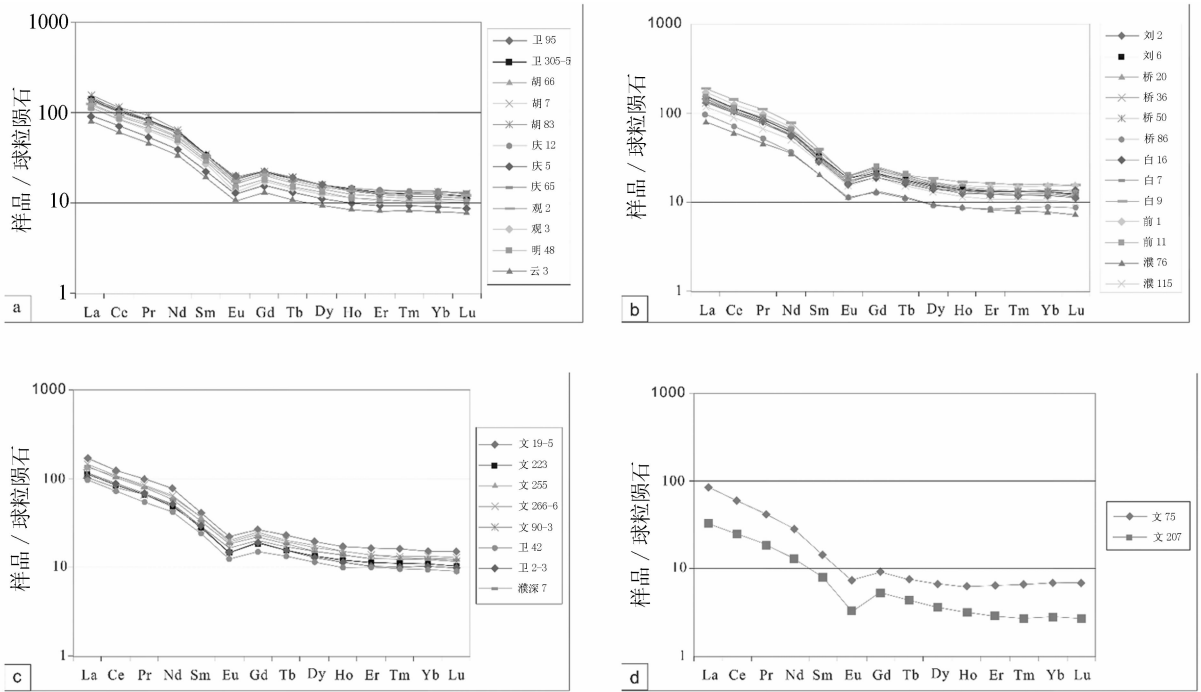


图 2 东濮凹陷沙三段样品 REE 分配模式

Fig.2 Chondrite-normalized REE patterns of the samples from 3rd Member of Shahejie Formation, Dongpu depression

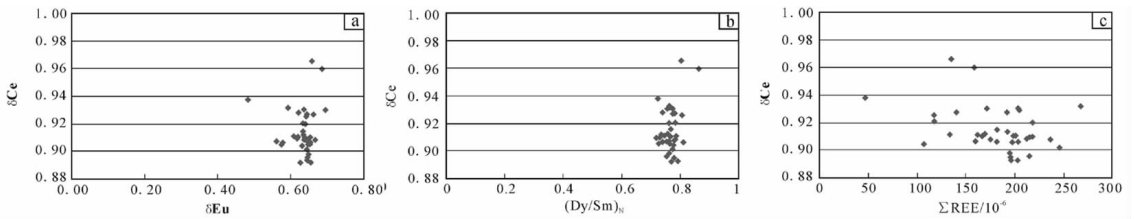


图 3 东濮凹陷沙三段泥岩的  $\delta Ce - \delta Eu$ ,  $\delta Ce - (Dy/Sm)_N$  和  $\delta Ce - \sum HREE$  图解  
Fig.3  $\delta Ce$  versus  $\delta Eu$ ,  $\delta Ce$  versus  $(Dy/Sm)_N$  and  $\delta Ce$  versus  $\sum HREE$  diagrams of the samples from 3rd Member of Shahejie Formation, Dongpu depression

表 3 东濮凹陷古近系沙三段微量元素地球化学参数  
Table 3 Trace element data of mudstones in 3rd Member of Paleocene Shahejie Formation, Dongpu depression

	Li	Be	Sc	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y
最小值	32.95	0.64	3.9	22.86	22.65	9.1	8.02	22.72	5.18	35.39	167.08	6.66
最大值	89.41	3.32	18.25	121.07	93.24	44.98	38.24	105.99	25.31	182.08	4508.84	30.7
平均值	56.46	2.22	13.11	86.69	59.19	25.89	23.22	56.38	18.77	113.31	822.15	22.73
	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Bi	Th	U	Sr/Ba	Sr/Cu	V/(V + Ni)
最小值	28.47	3.34	2.45	192.31	0.91	0.22	0.05	3.11	1.98	0.41	6.23	0.68
最大值	348.27	16.71	12.53	1648.8	9.32	1.22	0.62	18.5	8.43	6.76	562.48	0.85
平均值	136.23	11.86	7.8	429.85	3.91	0.9	0.35	13.78	4.04	1.91	35.41	0.77

注:测试单位为中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室,元素含量单位为  $10^{-6}$ 。



的侵入内陆,使中国东部形成了干旱的气候<sup>[25-27]</sup>。

#### 4.2 氧化还原性分析

沉积岩的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质的氧化-还原条件。通常用微量元素  $V/(V+Ni)$  的比值反映其特征,比值 $>0.84$ 反映水体分层及底层水体中出现  $H_2S$  的厌氧环境;比值为  $0.54\sim 0.72$  为水体分层不强的厌氧环境;比值为  $0.46\sim 0.60$  为水体分层弱的贫氧环境<sup>[28]</sup>。本区泥岩中  $V/(V+Ni)$  的比值范围在  $0.68\sim 0.85$ , 平均值为  $0.77$ ,说明该区分层较弱的厌氧环境。

陈衍景<sup>[9]</sup>认为沉积物的 $\sum REE$ 含量低和 $(La/Yb)_N$ 的比值越高可以指示沉积环境为还原性,而本研究区 $\sum REE$ 含量较低, $(La/Yb)_N$ 的范围为  $8.53\sim 12.18$ ,平均值为  $11.04$ ,反映了沙三中为还原环境。同时, $Ce^{3+}$ 的异常可以反映水体的氧化-还原条件的变化<sup>[11,29,30]</sup>,因为铈元素具有最不稳定的  $4f$  亚层结构,在一定的  $pH$  值条件下,若水体为氧化条件下, $Ce^{3+}$ 易失去一个  $4f$  电子而形成  $Ce^{4+}$ (常被氧化成  $CeO_2$ )并变成惰性气体氙的结构,与其他三价稀土元素分离, $Ce^{3+}$ 浓度降低;反之,若当时水体缺氧, $Ce^{3+}$ 的浓度就会增大<sup>[30]</sup>。即沉积环境的氧化程度越强,铈为正异常;反之表现铈负异常。Elderfield 等(1986)曾定义  $Ce$  异常的计算公式:  $Ce_{anom} = \lg [3Ce_N / (2La_N + Nd_N)]$ ,并且当  $Ce_{anom} > 0$  时,表现为  $Ce$  的富集,反映水体为氧化环境;当  $Ce_{anom} < 0$  时,表现为  $Ce$  的亏损,反映还原环境<sup>[29]</sup>。即当  $\delta Ce > 1$  时,表现为  $Ce$  的富集,反映水体为氧化环境;当  $\delta Ce < 1$  时,表现

为  $Ce$  的亏损,反映还原环境。研究区样品  $\delta Ce$  变化范围为  $0.89\sim 0.97$ ,平均值为  $0.91$ (表 2),表明沙三段沉积期水体整体为还原环境。

#### 4.3 古盐度分析

微量元素的地球化学特征推断古盐度是最常用的、也是效果较为理想的一种方法。其中, $Sr$  与  $Ba$  的化学性质相似,它们均以重碳酸盐、氯化物和硫酸盐的形式保留在湖水中。与  $Sr$  相比, $Ba$  的化合物溶解度低,多数  $Ba$  在近岸以  $BaSO_4$  的形式在沉积物中富集,在深水湖盆中央含量很少。而  $SrSO_4$  的溶解度高, $Sr$  的迁移能力高于  $Ba$ ,可迁移到湖盆或大洋深处。即随着远离海岸或湖岸其比值越大,因此, $Sr/Ba$  比值可作为判断古盐度以及区分淡水和咸水沉积的标志<sup>[7,31-33]</sup>。通常认为淡水沉积物中  $Sr/Ba < 1$ ,海相(盐湖)沉积物中  $Sr/Ba > 1$ 。而东濮凹陷沙三段泥岩  $Sr/Ba$  变化范围为  $0.41\sim 4.76$ ,平均值为  $1.91$ ,并且这 23 口井中只有 5 口井的数据小于 1,这说明研究区沙三段沉积期为咸水环境。而这些取样井在盆地边缘和中央均有分布,可见该盐湖盆地的盐岩可能是陆源供给,非深部卤水成因。

### 5 物源属性分析

Bhatia and Grook (1986), X.X.Gu 等(2002),李佑国(2006)认为沉积岩中的一些微量元素具有非迁移性的特征,如  $Zr$ 、 $Y$ 、 $Th$ 、 $Sc$ 、 $Hf$ 、 $La$  等,可用来判断物源区源岩性质<sup>[34-36]</sup>。Floyd and Leveridge (1987)用  $Hf-La/Th$  图解来区分源岩的成分<sup>[37]</sup>,从  $Hf-La/Th$

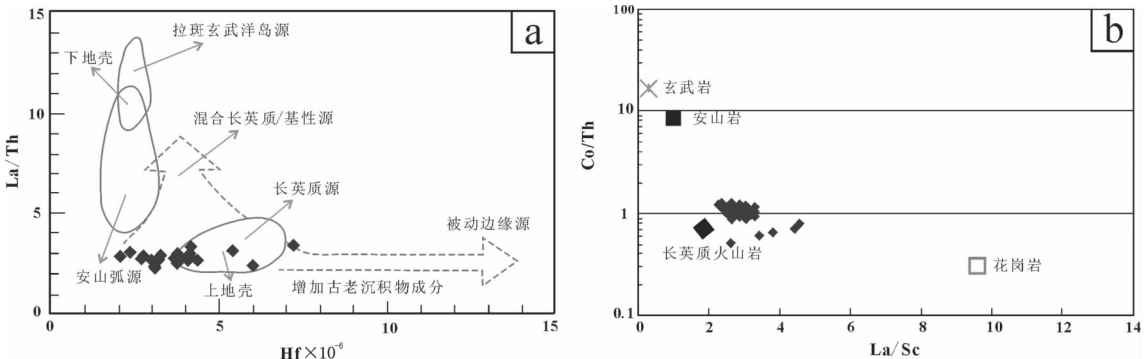


图 4 东濮凹陷沙三段泥岩  $Hf-La/Th$  和  $La/Sc-Co/Th$  源岩判别图解

图 a 中不同源区据 Floyd and Leveridge(1987),图 b 不同源区据 Condie(1993) 转引 X.X.GU(2002)<sup>[35]</sup>

Fig.4 Source rock discrimination diagrams of  $La/Th$  versus  $Hf$  and  $Co/Th$  versus  $La/Sc$  for mudstone from 3rd Member of Shahejie Formation, Dongpu depression. a based on Floyd and Leveridge (1987), b based on Condie (1993), after X.X.GU(2002)<sup>[35]</sup>

源岩属性判别图解(图 4-a)可以看到研究区沙三段的样品大部分落在混合长英质/基性源和长英质源区;在 La/Sc-Co/Th 源岩判别图解(图 4-b)中,研究区泥岩具有低而相对稳定的 Co/Th 的值,变化范围为 0.47~1.43,平均值为 0.94;而 La/Sc 的值较高,变化范围为 2.38~4.87,平均值为 3.05,样品落在长英质火山岩与安山岩之间,反映源岩以长英质岩为主,有少量安山岩混入。

由于稀土元素的特性,其特征参数和配分曲线模式已成为分析沉积物源区非常可靠的方法,并被广泛的应用<sup>[1,4,5,9,11]</sup>。通常 Eu 的异常程度( $\delta\text{Eu}$ ),可作为判别源岩的重要参数。若源岩为中酸性长英质岩石(如花岗岩、流纹岩),则其稀土元素含量相对较高,LREE 相对富集, $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$  比值高,通常具有明显的 Eu 负异常;若源岩为基性玄武质岩石,则其稀土元素含量较低,HREE 含量较高, $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$  比值较低,无 Eu 异常<sup>[9]</sup>。另外,对于来自上地壳的稀土元素具有轻稀土(LREE)富集,重稀土(HREE)含量稳定和 Eu 的负异常等特征。将研究区泥岩样品的稀土元素经球粒陨石标准化后(表 1),铕(Eu)具有明显的亏损, $\delta\text{Eu}$  为 0.48~0.70,平均为 0.63,配分曲线模式图(图 2)表现为轻稀土元素富集,重稀土元素相对亏损及明显的 Eu 负异常的特点,与上地壳中稀土元素的分布形态几乎完全一致,以及在 REE—La/Yb 图解(图 5)中可见研究区样品均落在花岗岩区以及花岗岩与沉积岩交汇区域,同样指示了研究区沉积岩的源岩为中酸性长英质岩石。

总之,通过对东濮凹陷沙三段泥岩微量元素和稀土元素特征参数进行分析,其地球化学特征指示沙三段源岩较复杂,主要来自上地壳的中酸性长英质岩石(花岗岩)和混合长英质/基性岩为主,古老沉积岩贡献不明显,可能是来自内黄隆起和鲁西隆起的碎屑物质。

## 6 结论

(1)东濮凹陷沙三段泥岩的稀土元素总量较高,其平均值接近于澳大利亚后太古宙页岩(PAAS)的平均值。轻稀土富集程度高,重稀土富集程度相对较低,分布模式表现为轻稀土富集、重稀土相对亏损及明显的 Eu 负异常,Ce 轻微亏损。 $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  和  $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值较高,表明研究区

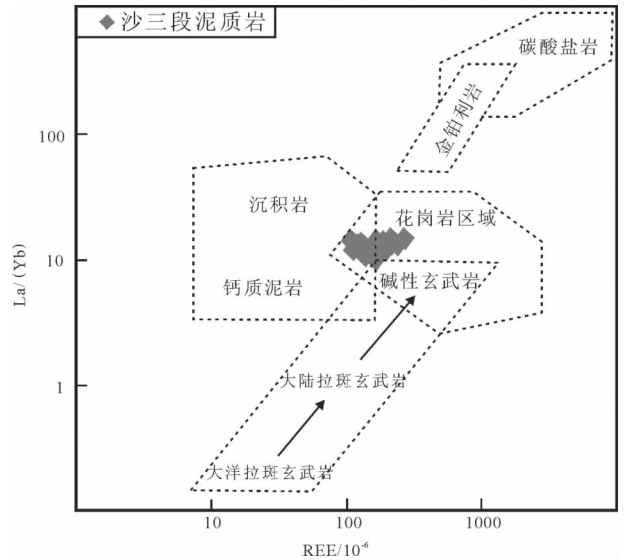


图 5 东濮凹陷沙三段泥岩 REE—La/Yb 图解  
Fig.5 REE versus La/Yb diagram of mudstones in 3rd Member of Shahejie Formation, Dongpu depression

轻重稀土分异程度高;而  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  平均值为 4.27,表明轻稀土元素之间分异中等; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  平均值为 1.70,表明重稀土元素间的分异不很明显,以及源区母岩主要来自后太古宙年轻地层。微量元素分析可知,Sr、Ba 丰度较高,其他微量元素含量较低,多数微量元素含量比同类岩石克拉克值偏高。

(2)从微量元素和稀土元素的特征参数分析可知,东濮凹陷沙三期处于干旱炎热的气候,沉积水体盐度较高( $\text{Sr}/\text{Ba}$  平均值为 1.91),整体为还原、厌氧的咸水环境。

(3)根据微量元素和稀土元素组合以及其比值特征,表明东濮凹陷沙三段源岩较复杂,主要来自鲁西隆起和内黄隆起的中酸性长英质岩(花岗岩)和混合长英质岩/基性岩,古老沉积岩对其贡献不明显。

## 参考文献(References):

- [1] Bhatia M R. Rare earth elements geochemistry of Australian Paleozoic graywacks and mudstones: provenance and tectonic control [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45: 97-113.
- [2] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data [J]. *Chemical Geology*, 1988, 67: 119-139.
- [3] 陈衍景, 杨忠芳, 赵太平, 等. 沉积物微量元素示踪物源区和地球成分的方法和现状 [J]. *地质地球化学*, 1996, 18(3): 7-11.

- Chen Yanjing, Yang Zhongfang, Zhao Taiping, et al. The approach and present situation of sedimentary trace elements labeling provenance area and earth component [J]. *Geology-Geochemistry*, 1996, 18(3):7-11(in Chinese with English abstract).
- [4] 于炳松, 乐昌硕. 沉积岩物质成分所蕴含的地球深部信息[J]. *地质前缘*, 1998, 5(3):105-112.
- Yu Bingsong, Yue Changshuo. Some information about the inner earth contained in composition of sedimentary rocks [J]. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences, Beijing), 1998, 5(3):105-112(in Chinese with English abstract).
- [5] 汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 物源分析的研究与展望[J]. *沉积与特提斯地质*, 2000, 20(4):104-110.
- Wang Zhengjiang, Chen Hongde, Zhang Jinquan. Study and prospects of sediment provenance analysis [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2000, 20 (4):104-110 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李双应, 岳书仓, 杨建, 等. 皖北新元古代刘老牌组页岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *地质科学*, 2003, 38(2):241-253.
- Li Shuangying, Yue Shucang, Yang Jian, et al. Geochemical characteristics and implications of Neoproterozoic shales from the Liulaobei Formation in North Anhui [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(2):241-253(in Chinese with English abstract).
- [7] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判断沉积环境中的应用——以江汉盆地潜江组为例[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(3):307-314.
- Liu Gang, Zhou Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment——Taking Qianjiang Formation in the Jiangnan basin an example [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(3):307-314(in Chinese with English abstract).
- [8] Ricardo Prego, Migue Caetano, Carlos Vale, et al. Rare earth elements in sediments of the Vigo Ria, NW Iberian Peninsula [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29:895-902.
- [9] 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.
- Cai Guanqiang, Guo Feng, Liu Xiantai, et al. Geochemical characteristics of Neogene sedimentary rocks from Zhanhua sag and its implication for provenance [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26 (6):17-24 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨守业, 李从先. REE 失踪沉积物物源研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2):164-167.
- Yang Shouye, Li Congxian. Research process in REE tracer for sediment source [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(2):164-167 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘士林, 刘蕴华, 林舸, 等. 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 Shilin, Liu Yunhua, Lin Ge, et al. 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).
- [12] 陈书平, 漆家福, 王德仁, 等. 东濮凹陷断裂系统及变换构造[J]. *石油学报*, 2007, 28(1):43-49.
- Chen Shuping, Qi Jiafu, Wang Deren, et al. Fault systems and transfer structures in Dongpu sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28 (1):43-49(in Chinese with English abstract).
- [13] 屈红军, 李文厚, 苗建宇, 等. 东濮凹陷濮卫洼陷盐岩发育规律及成因探讨[J]. *中国地质*, 2003, 30(3):309-314.
- Qu Hongjun, Li Wenhou, Miao Jianyu, et al. Development pattern of salt rocks in the Puwei subdepression of the Dongpu depression and their genesis [J]. *Geology in China*, 2003, 30 (3):309-314(in Chinese with English abstract).
- [14] 谷维成, 赵其磊, 吕迎红, 等. 河南濮阳地区古近系沙河街组盐岩层与油气藏的关系[J]. *古地理学报*, 2005, 7(4):529-534.
- Gu Weicheng, Zhao Qilei, Lv Yinghong, et al. Relationship between salt Beds and oil and gas reservoir of the Shahejie Formation of Paleogene in Puyang Area, Henan Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(4):529-534(in Chinese with English abstract).
- [15] 杜海峰, 于兴河, 陈发亮. 河南省东濮凹陷古近系沙河街组沙三段盐岩沉积特征及其石油地质意义 [J]. *古地理学报*, 2008, 10(1):53-62.
- Du Haifeng, Yu Xinghe, Chen Faliang. Sedimentary characteristics of salt -rocks and their petroleum geologic significance of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongpu Sag, Henan Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1):53-62 (in Chinese with English abstract).
- [16] 杜海峰, 于兴河, 陈发亮. 东濮凹陷古近系沙三段盐岩成因探讨及层序地层学意义[J]. *西北地质*, 2007, 40(4):67-74.
- Du Haifeng, Yu Xinghe, Chen Faliang. Origin of salt -rock in Paleogene Shahejie Formation and its significance for sequence stratigraph in Dongpu Depression [J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(4):67-74(in Chinese with English abstract).
- [17] 孙思敏. 东濮凹陷调节构造特征 [J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(2):38-46.
- Sun Simin. Characteristics of accommodation structures in Dongpu Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(2):38-46(in Chinese with English abstract).
- [18] Boynton W V. Cosmo chemistry of the rare earth elements: meteorite studies [C] //Henderson P. *Rare Earth Elements Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984:63-114.
- [19] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992:179-182.
- Li Changnian. *Trace Elements Petrology in Igneous Rocks* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992:179-182(in Chinese with English abstract).
- [20] Taylor S R, Mclennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford:Blackwell, 1985.
- [21] Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust: Treatise on Geochemistry [M]. Oxford Press, 2003.
- [22] 赵俊英, 罗静兰, 雷晓岚, 等. 鄂尔多斯盆地子长油田杨家园则



- 探区长 6 物源分析[J]. 中国地质, 2007, 34(3):422-429.
- Zhao Junying, Luo Jinglan, Lei Xiaolan, et al. Provenance analysis of the Sixth Member of the Yanchang Formation in the Yangjiayuan oil prospect area, Zichang oilfield, Ordos basin [J]. *Geology in China*, 2007, 34(3):422-429(in Chinese with English abstract).
- [23] 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]. *Chemical Geology*, 2001, 175: 29-48.
- [24] 莱辑曼主编, 王苏民等译. 湖泊的化学地质学和物理学 [M]. 北京:地质出版社, 1989.
- Lai Er Man, Wang Suming. *Chemical Geology and Physics in the Lake* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989 (in Chinese with English abstract).
- [25] 金强, 黄醒汉. 东濮凹陷早第三纪盐湖成因的探讨——一种深水成因模式[J]. 华东石油学院学报, 1985, 9(1):1-14.
- Jin Qiang, Huang Xinghan. The genetic research of salt lake of Paleogene in Dongpu sag—a deep water genetic mode [J]. *Journal of China University of Petroleum (Huadong)*, 1985, 9(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- [26] 钱焕菊, 陆瑰彩, 张雪芬, 等. 东营凹陷沙四段上部泥质烃源岩元素地球化学及其古盐度的空间差异性 [J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(2):161-168.
- Qian Huanju, Lu Xiancai, Zhang Xuefen, et al. Spatial paleoslinity distribution and element geochemistry of argillaceous source rocks in the Upper Part of 4th Member of Tertiary Shahejie Formation in Dongying Sag[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2009, 28(2): 161-168(in Chinese with English abstract).
- [27] 袁静, 赵澄林, 张善文. 东营凹陷沙四段盐湖的深水成因模式[J]. 沉积学报, 2000, 18(1):114-118.
- Yuan Jing, Zhao Chenglin, Zhang Shanwen. Genetic model of the deep water salt lake of the Paleogene Sha-4 Member in Dongying Sag [J]. *Acta Sediment ologica Sinica*, 2000, 18 (1):114-118 (in Chinese with English abstract).
- [28] 苗建宇, 赵建设, 刘池洋, 等. 鄂尔多斯盆地二叠系烃源岩地球化学特征与沉积环境的关系[J]. 中国地质, 2007, 34(3):430-435.
- Miao Jianyu, Zhaojianshe, Liuchiyang, et al. Relationship between the geochemical characteristics and sedimentary environment of Permian hydrocarbon source rocks in the Ordos basin [J]. *Geology in China*, 2007, 34(3):430-435(in Chinese with English abstract).
- [29] Elderfield H, Pagett M. REE in ichthyoliths: variations with redox conditions and depositional environment [J]. *The Science of the Total Environment*, 1986, 49:175-197.
- [30] 鲁洪波, 姜在兴. 稀土元素地球化学分析在岩相古地理研究中的应用[J]. 石油大学学报, 1999, 23(1):6-8.
- Lu Hongbo, Jiang Zaixing. Application of geochemical analysis of rare earth elements in the study of lithofacies paleogeography [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1999, 23 (1):6-8(in Chinese with English abstract).
- [31] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 甘肃:甘肃科学技术出版社, 1993.
- Deng Hongwen, Qian Kai. *Sedimentary Geochemistry and Environment Analysis* [M]. Gansu: Gansu Science and Technology Press, 1993(in Chinese with English abstract).
- [32] 王敏芳, 焦养全, 王正海, 等. 沉积环境中古盐度的恢复——以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(6): 719-722.
- Wang Minfang, Jiao Yangquan, Wang Zhenghai, et al. Recovery paleosalinity in sedimentary environment——an example of mudstone in Shuixigou Group, Southwestern margin of Turpan-Hami basin [J]. *Xin Jiang Petroleum Geology*, 2005, 26(6):719-722 (in Chinese with English abstract).
- [33] 薛传东, 刘星, 亓春英, 等. 滇池近代沉积物的元素地球化学特征及其环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6):582-59.
- Xue Chuandong, Liu Xing, Qi Chunying, et al. Element geochemical characteristics of modern sediments in the Dianchi Lake, Kunming, and their environmental significance [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2007, 26(6):582-590(in Chinese with English abstract).
- [34] Bhatia M R and Crook KW. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin [J]. *Contrib. Mineral Petrol*. 1986, 92: 181-193.
- [35] GU X X, LIU J M. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China geochemical evidence [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(3):393-407.
- [36] 李佑国, 侯中健, 王安建, 等. 兰坪盆地新生代碎屑岩地球化学特征及其对物源制约[J]. 岩石学报, 2006, 22(3):751-760.
- Li Youguo, Hou Zhongjian, Wang Anjian, et al. Geochemistry of Cenozoic detrital rocks and its constraints on provenance in Lanping Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3):751-760(in Chinese with English abstract).

## Geochemical characteristics of the 3rd Member of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Depression and their geological implications

CHENG Yue-hong<sup>1</sup>, YU Xing-he<sup>1</sup>, HAN Bao-qing<sup>2</sup>, DU Hai-feng<sup>3</sup>, BAI Zhen-hua<sup>4</sup>

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Zhongyuan Oilfield Company, China Petroleum & Chemical Corporation, Puyang 457001, Henan, China; 3. Research Institute of Yanchang Petroleum Group Co. Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Abundant geological information can be obtained from trace elements and REE in sedimentary rocks, which may reveal the provenance attribute and tectonic setting and help to reconstruct the paleo-sedimentary environment. Geochemical characteristics of mudstones and rock salt from the 3rd Member of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu depression of Bohai Basin were studied in detail in this paper. The results show that the samples have relatively high Sr and Ba and low Rb, V, Ni, Mn, Fe, Cr and Br. Concentrations of most of the trace elements are higher than their Clark values in the same sorts of rocks. The total content ranges from  $47.1 \times 10^{-6}$  to  $268.02 \times 10^{-6}$ , and the average content is  $181.55 \times 10^{-6}$ , which is similar to the average value of PAAS. The ratios of LREE/HREE range from 7.96 to 11.46, and the average content is 9.71. These data show that LREE are obviously richer than HREE, and the distribution patterns of the samples are characterized by "V"-shaped curve with obvious negative Eu (from 0.48 to 0.70) anomaly and indistinct negative Ce anomaly (from 0.89 to 0.97). In addition, the content of rock salts is much lower than their content in other samples. According to an analysis of the characteristic parameters ( $\text{Sr}/\text{Cu}$ ,  $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ ,  $\text{Sr}/\text{Ba}$ ,  $\delta \text{Ce}$  and  $\text{Ce}_{\text{anom}}$ ), it is revealed that the study area belonged to continental sedimentation, and its paleo-environment was under the oxygen-free, anaerobic and saltwater condition. The characteristic parameters such as Eu,  $\delta \text{Eu}$ ,  $\omega_{\text{REE}} - \omega(\text{La})/\omega(\text{Yb})$ ,  $\text{La}/\text{Th} - \text{Hf}$  and  $\text{Co}/\text{Th} - \text{La}/\text{Sc}$  in the discrimination diagram can indicate that the source rocks were mainly intermediate-acidic felsic and mixed felsic/basic rocks as well as very insignificant sedimentary rocks, derived from detrital materials of Neihuang uplift and Luxi uplift.

**Key words:** Dongpu depression; trace elements; REE; provenance

---

**About the first author:** CHENG Yue-hong, male, born in 1985, master candidate, engages in the study of sedimentology and oil-gas geology; E-mail: cyhdd6204106@126.com.

**About the corresponding author:** YU Xing-he, male, born in 1958, professor, doctor supervisor, mainly engages in the study of sedimentology and oil and gas geology; E-mail: billyu@cugb.edu.cn.