

茂名油柑窝组油页岩元素地球化学特征及其地质意义

周圆圆^{1,2}, 邱楠生^{1,2*}, 腾格尔³, 王杰³, 曹涛涛³, 罗厚勇³

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 盆地与油藏研究中心, 北京 102249; 3. 中石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151

摘要: 结合茂名盆地茂页1井油柑窝组24个油页岩样品的主量元素、微量元素和稀土元素进行测试分析, 在综合研究油柑窝组油页岩元素地球化学特征的基础上, 探讨了茂名盆地油柑窝组油页岩沉积时期物源属性、源区沉积环境等。结果表明: 油页岩样品 Th、U 和 Pb 元素富集, Zr、Cr、Hf 等元素亏损, 具有明显的轻稀土富集、Eu 负异常以及 Ce 负异常等壳源物质的特征。化学蚀变指数(CIA)和 Zr/Sc-Th/Sc 图解表明物源区经历了强烈的风化作用以及明显的沉积再循环过程。在 La/Th-Hf 和 La/Yb- Σ REE 源岩判别图解分析的基础上, 结合 Eu 负异常所指示的源岩长英质特性, 认为茂名盆地油柑窝组油页岩物源具有多样性, 主要来源于上地壳的长英质岩, 推测可能为长英质火山岩、花岗岩和沉积岩的混合物。通过分析 Sr/Cu、MgO/CaO 等参数, 认为油页岩形成时水体为淡水介质, 沉积早期水体较浅, 中晚期水体逐渐加深, 属于温暖潮湿的气候背景, 综合判断其沉积环境由早期弱还原湖沼相逐渐向半深湖—深湖相过渡。

关键词: 油页岩; 元素地球化学; 物源区; 沉积环境; 茂名盆地; 油柑窝组

中图分类号: P618.12 文章编号: 1007-2802(2016)06-1270-10 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.06.017

Geochemical Characteristics and the Geological Significance of Oil Shales from the Youganwo Formation, Maoming Basin, China

ZHOU Yuan-yuan^{1,2}, QIU Nan-sheng^{1,2*}, Tenger³, WANG Jie³, CAO Tao-tao³, LUO Hou-yong³

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Basin and Reservoir Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi 214151, China

Abstract: Geochemical elements of oil shale in the Maoming Basin were analyzed to discuss provenance attribute and depositional environment of the Youganwo formation. Experimental date of the major elements, trace elements and rare earth elements of 24 samples from the Maoye 1 well were examined. The analyzed oil shale samples were characterized by enrichment of Th, U, Rb and LREE, depleted of Zr, Cr and Hf, negative Eu and Ce anomalies, indicating that these samples were originated from continental crust. The chemical index of alteration(CIA) values and the Zr/Sc-Th/Sc diagrams indicate that source rocks had undergone intense chemical weathering and deposition recirculation. Based on the La/Th-Hf and La/Yb- Σ REE diagrams and the negative anomaly of Eu element, the oil shale in the Maoming Basin has diverse sources, which mainly came from felsic source region of the upper crust or the mixture of felsic volcanic rocks, granite and sedimentary rocks. Ratios of the Sr/Cu, MgO/CaO suggest that oil shale was formed in fresh water under warm and humid climate, shallow water column became deeper during the middle and late sedimentary period. The depositional environment is interpreted to be limnetic with weak reduction at the early stage and gradually turned into semi-deep to deep lacustrine.

Key words: oil shale; geochemistry; provenance; sedimentary setting; Maoming Basin; Youganwo formation

随着全球石油资源需求量的不断增加, 油页岩因其资源量丰富且开发利用可行, 引起国内外众多学者的关注 (Brendow, 2003; Dyni, 2003; 张显良,

2005; 李丹梅等, 2006; 柳蓉和刘招君, 2006)。茂名盆地油页岩资源丰富, 潜力巨大, 已探明的油页岩资源储量位列全国第二 (刘招君和柳蓉, 2005),

收稿日期: 2015-12-31 收到, 2016-05-18 改回

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41503033)

第一作者简介: 周圆圆(1992-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 油气地质和地球化学. E-mail: zhouyrita@163.com.

* 通讯作者简介: 邱楠生(1968-), 男, 教授, 研究方向: 沉积盆地温压场、热体质与热历史. E-mail: qiunsh@cup.edu.cn.

是中国开展油页岩研究的重要地区。前人对茂名盆地油页岩已进行大量研究,但多限于油页岩有机质分析(秦匡宗,1982;秦匡宗和劳永新,1985;傅家谟等,1985;于志强等,2000)及其生产开发(王国金等,1996;柏静儒等,2006),对沉积环境的分析也是基于传统的钻孔资料(李殿超等,2006),成岩因素分析则是建立在干酪根显微组分鉴定和孢粉分析的基础上(郭敏等,2009),而在元素地球化学方面的研究工作开展较少,目前尚未系统地进行沉积源岩、古地理环境等方面的研究。元素地球化学特征可以提供物源区信息(李胜荣和高振敏,2000;罗泰义等,2005;罗情勇等,2013),恢复沉积盆地构造演化(李双应等,2003;孙平昌等,2012)以及揭示古沉积环境(于炳松等,2003;刘洋等,2007;刘招君等,2009)等。通过对茂名盆地茂页1井油柑窝组油页岩主量、微量和稀土元素地球化学特征进行系统的研究,探讨了茂名盆地油柑窝组油页岩的沉积物源、源区风化程度及古地理环境等,对茂名盆地油页岩的勘探以及油气资源前景的分析具有重要意义,也为油页岩的成岩机制及油页岩形成和保存条件提供可参考的依据。

1 区域地质背景

茂名盆地位于广东省西南部,北东以高棚岭大断裂为界,西南以古近系露头线为界(周国强等,1996)。晚白垩世早期形成的中生代盆地因燕山晚期的伸展拉张作用而沉积了一套铜鼓岭组(K₂t)红色陆源碎屑岩和火山岩。随后的喜马拉雅运动使

得伸展作用进一步加强,导致吴川-四会断裂和继承性复活的高棚岭断裂组合形成一“X”型大断裂,这直接控制了茂名半地堑式断陷盆地的形成(张显球,1999)以及盆地内油页岩的分布(郭敏等,2009)。盆内自下而上沉积了始新统上桐组、始新统-渐新统油柑窝组、中新统黄牛岭组和尚村组以及上新统老虎岭组和高棚岭组(图1),其中尚村组和油柑窝组是油页岩的主要层位。油柑窝组油页岩在全区均有发育,主要呈黑色或黑褐色,局部可见煤、粉砂岩、细砂岩、泥岩和碳质页岩夹层(严焕榕等,2006)。

2 样品采集与分析方法

本次研究选用的24件样品均采自于茂页1井(图1)新近系油柑窝组黑褐色页岩。样品粉碎至粒径小于100 μm,烘干冷却至室温后称取0.500 g样品置于聚四氟乙烯烧杯中,加入1 mL去离子水湿润,用HNO₃+HF混合酸分解后通过VISTA MPX型号电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定金属元素(主量和微量元素)。稀土元素测试则采用过氧化钠熔融法分解样品,分析前样品用HNO₃溶解沉淀,后使用X SERIES 2型号电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测定,元素分析数据相对误差小于5%。所有测试均在中石化石油勘探开发研究院无锡石油地质所完成。

3 分析结果

3.1 主量元素地球化学特征

油页岩主量元素含量变化较大,Al₂O₃为

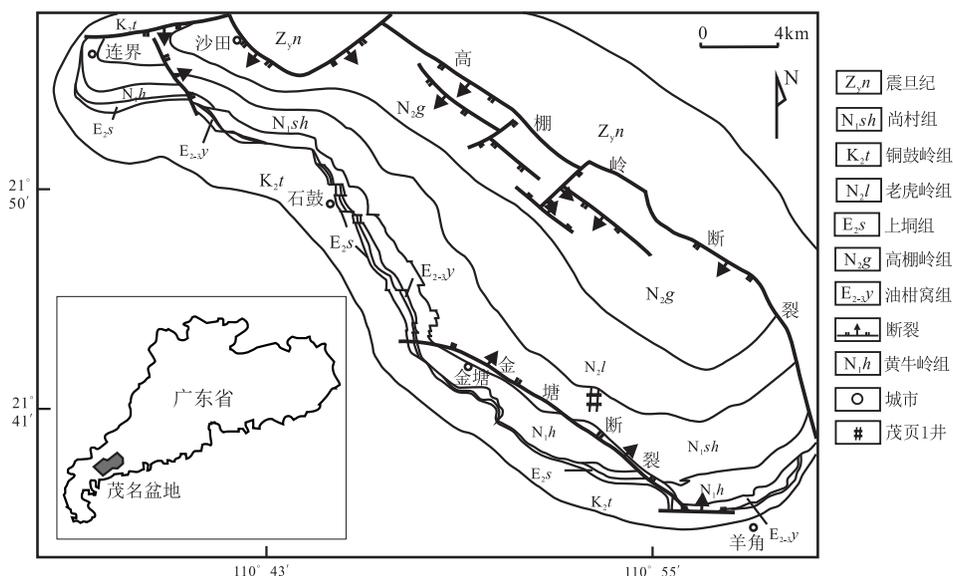


图1 茂名盆地地质图(据严焕榕等,2006,有修改)

Fig.1 Geological map of Maoming Basin, Guangdong Province(modified by Yan et al.,2006)

12.39%~21.77%, TiO_2 为 0.37%~0.65%, CaO 为 0.26%~0.89%, MnO 为 0.014%~0.209%, Na_2O 为 0.03%~0.16%, MgO 为 0.60%~1.36%, Fe_2O_3 为 3.19%~10.568%, K_2O 为 1.43%~3.06%, 多数主要元素的含量较澳大利亚后太古代页岩 (PAAS) 主要元素低 (Taylor and McLennan, 1985)。该套油页岩 $w(\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为 4.01%~11.49%, 平均为 5.99%, 表示样品中含有一定量的铁镁成分。沉积岩中 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值可反映主要由常量元素控制的矿物状况, 通常黏土矿物中的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值一般小于 0.3 (Cox *et al.*, 1995)。茂名盆地油页岩样品的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值波动范围为 0.08~0.15, 平均为 0.1, 明显小于 0.3, 表明该套油页岩中的常量元素主要由黏土矿物控制。

3.2 微量元素地球化学特征

对 24 个油页岩样品进行了 Co、Cr、Ni 等 15 个微量金属元素测试 (表 1)。由澳大利亚后太古代页岩 (PAAS) 标准化蛛网图 (图 2) 明显可以看出不同深度的样品分布模式相似, 揭示其具同源性。所有

样品的微量元素的变化趋势较为一致, 表明茂名油页岩具有稳定的沉积环境, 且物质来源稳定。Th、U、Pb 元素富集程度较高, 而外源元素 Co、Cr、Ni、V 则略有亏损。

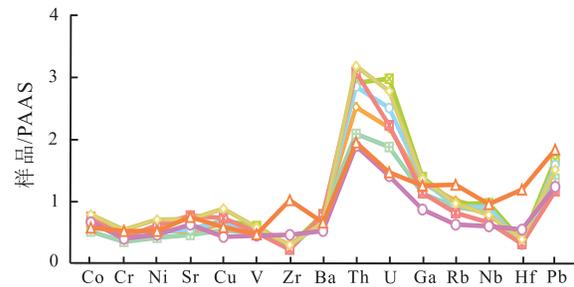


图 2 茂名盆地油柑窝组油页岩微量元素 PAAS 标准化蛛网图
Fig.2 PAAS-normalized spider diagram oil shale samples of Youganwo Formation in Maoming Basin

3.3 稀土元素地球化学特征

样品稀土元素分析结果及相关参数列于表 2。样品稀土总量 ($\sum\text{REE}$) 为 $233.66 \times 10^{-6} \sim 689.26 \times 10^{-6}$, 平均为 338.31×10^{-6} , 变化幅度较大。通常认

表 1 茂名盆地油柑窝组油页岩微量元素分析结果

Table 1 Trace element contents of oil shale samples of Youganwo Formation in Maoming Basin ($\times 10^{-6}$)

样品编号	深度/m	Co	Cr	Ni	Sr	Cu	V	Zr	Ba	Th	U	Ga	Rb	Nb	Hf	Pb
MY1-1	815	19.69	43.66	36.44	100.41	37.73	82.44	53.15	520.53	33.37	6.89	25.54	141.80	16.88	1.80	28.47
MY1-2	816	16.22	52.26	30.67	101.39	32.58	85.67	51.77	510.40	36.91	6.80	26.06	163.04	16.75	1.68	33.59
MY1-3	818.4	12.43	40.75	23.98	83.81	28.25	74.43	38.45	496.14	29.23	6.13	20.35	134.40	13.10	1.24	27.56
MY1-4	819.6	12.00	39.08	23.22	93.59	27.01	75.14	51.90	511.98	30.61	5.84	22.73	146.63	15.89	1.61	27.45
MY1-5	821	15.90	52.30	31.93	118.47	37.90	91.00	56.03	534.93	45.31	8.37	30.90	165.96	20.62	1.87	35.65
MY1-6	823	14.20	48.32	28.59	101.87	36.00	88.26	58.36	506.94	40.70	8.95	27.95	156.64	19.05	1.79	34.49
MY1-7	824.6	15.15	48.45	28.78	110.87	34.89	91.47	59.41	521.94	42.60	9.26	27.99	154.51	18.58	1.85	33.50
MY1-8	826.8	17.13	45.71	32.56	115.12	30.93	77.60	76.90	538.31	40.38	7.70	24.12	154.93	16.89	2.16	30.69
MY1-9	827.5	16.36	50.25	28.11	110.81	33.90	77.99	48.62	486.35	41.72	7.79	27.06	147.81	17.39	1.53	31.91
MY1-10	830.8	12.76	47.19	26.55	145.42	27.23	82.77	95.76	603.06	32.19	4.76	26.20	193.33	19.46	2.77	32.24
MY1-11	833.1	16.47	49.66	29.75	143.21	34.97	88.99	56.00	552.02	41.95	7.88	27.21	150.69	16.86	1.72	31.95
MY1-12	833.7	15.86	50.83	26.75	143.92	31.68	95.53	62.20	588.30	38.95	7.12	28.22	159.49	17.91	1.88	35.21
MY1-13	834.5	13.38	43.44	31.11	155.66	32.99	77.82	68.96	590.23	33.12	7.11	22.91	137.17	14.47	2.11	27.17
MY1-14	836.5	17.24	51.46	33.78	160.48	38.67	89.07	60.43	582.35	46.42	8.78	27.88	171.05	18.07	1.83	29.57
MY1-15	839.1	16.34	42.78	33.42	142.74	33.06	71.62	68.84	542.02	34.41	7.17	20.54	134.03	12.75	2.06	25.35
MY1-16	840.7	14.66	47.26	31.96	154.87	44.01	100.04	55.52	552.32	39.30	10.49	27.49	154.67	16.51	1.73	35.29
MY1-17	842.1	13.88	44.47	34.00	157.58	38.36	76.32	70.34	529.55	30.08	6.68	20.23	136.61	12.63	2.09	18.64
MY1-18	844.2	17.40	46.86	34.15	155.62	36.88	75.64	48.53	514.67	45.08	6.93	22.85	131.22	12.65	1.60	23.43
MY1-19	846.5	18.28	60.57	39.19	143.64	44.46	87.58	63.72	431.02	46.55	8.63	27.37	155.64	14.99	1.98	30.31
MY1-20	849.6	21.32	63.20	45.21	147.56	54.73	91.44	79.63	467.40	40.75	7.44	28.93	173.30	16.29	2.46	33.58
MY1-21	851.9	15.43	44.70	25.85	126.82	21.75	68.17	98.09	344.22	27.75	4.39	17.54	101.47	11.54	2.76	24.86
MY1-22	853.1	18.83	64.39	40.69	159.45	39.61	83.94	129.86	456.29	35.87	5.74	27.69	202.48	17.33	3.65	37.50
MY1-23	854.5	12.17	57.11	28.11	169.61	33.39	80.69	133.45	482.80	29.01	6.28	27.63	205.37	18.54	3.78	41.24
MY1-24	856.8	13.40	58.21	29.11	150.89	29.55	71.11	215.59	432.05	28.58	4.57	25.25	203.96	18.30	5.98	36.87
PAAS		23	110	55	200	50	150	210	650	14.6	3.1	20	160	19	5	20

表 2 茂名盆地油柑窝组油页岩稀土元素分析结果及相关参数
Table 2 Geochemical parameters of the REE and relevant parameters in oil shale samples of Youganwo Formation in Maoming

样品 编号	深度 /m	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	$\sum\text{REE} / \times 10^{-6}$	$\sum\text{HREE} / \times 10^{-6}$	$\frac{\sum\text{REE}}{\sum\text{HREE}}$	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	δEu	δCe	
MY1-1	815.0	153.78	246.91	26.29	97.45	18.88	3.67	22.59	3.08	15.57	2.97	9.02	1.16	7.64	1.09	79.16	689.26	546.98	142.28	3.84	13.58	5.12	2.39	0.54	0.86
MY1-2	816.0	66.25	128.18	14.18	51.83	9.92	1.93	10.98	1.43	7.09	1.35	4.11	0.55	3.72	0.53	35.98	338.06	272.30	65.76	4.14	12.00	4.20	2.38	0.56	0.96
MY1-3	818.4	52.30	103.98	11.34	42.08	8.15	1.62	9.18	1.20	5.91	1.13	3.45	0.45	3.03	0.43	30.07	274.30	219.46	54.84	4.00	11.64	4.04	2.45	0.57	0.98
MY1-4	819.6	51.80	101.93	10.90	39.70	7.38	1.42	8.42	1.05	5.15	0.98	2.98	0.39	2.64	0.37	26.78	261.89	213.13	48.76	4.37	13.22	4.42	2.57	0.55	0.98
MY1-5	821.0	78.03	152.89	17.16	65.30	13.52	2.67	15.33	2.17	11.43	2.24	6.75	0.89	5.91	0.84	59.81	434.95	329.57	105.38	3.13	8.90	3.63	2.09	0.57	0.96
MY1-6	823.0	61.23	119.59	12.92	47.10	9.02	1.78	10.24	1.34	6.77	1.29	3.99	0.54	3.70	0.55	36.09	316.15	251.65	64.50	3.90	11.17	4.27	2.24	0.57	0.98
MY1-7	824.6	61.21	121.80	12.85	47.14	9.15	1.78	10.25	1.36	6.85	1.31	4.01	0.54	3.71	0.52	35.18	317.68	253.95	63.72	3.99	11.14	4.21	2.23	0.56	1.00
MY1-8	826.8	61.81	120.32	13.19	47.85	8.94	1.65	9.68	1.28	6.37	1.21	3.76	0.52	3.49	0.51	33.16	313.74	253.76	59.98	4.23	11.93	4.35	2.24	0.54	0.97
MY1-9	827.5	65.49	130.37	14.19	51.73	9.88	1.93	10.73	1.44	7.13	1.37	4.15	0.55	3.77	0.54	36.56	339.84	273.59	66.25	4.13	11.70	4.17	2.30	0.57	0.99
MY1-10	830.8	57.86	110.62	11.55	41.63	7.59	1.45	8.52	1.10	5.40	1.04	3.15	0.42	2.75	0.40	30.39	283.87	230.70	53.16	4.34	14.19	4.80	2.50	0.55	0.97
MY1-11	833.1	71.04	142.37	15.30	56.12	10.65	2.05	11.56	1.53	7.62	1.49	4.56	0.62	4.11	0.61	41.22	370.85	297.53	73.31	4.06	11.64	4.19	2.27	0.56	0.99
MY1-12	833.7	75.22	150.36	16.17	59.50	11.36	2.22	12.52	1.67	8.42	1.69	5.32	0.73	5.08	0.80	47.16	398.22	314.83	83.38	3.78	9.99	4.17	1.99	0.57	0.99
MY1-13	834.5	69.61	144.19	14.96	57.57	11.54	2.36	13.12	1.87	9.86	2.01	6.09	0.81	5.30	0.79	57.16	397.23	300.23	97.00	3.09	8.85	3.80	2.00	0.58	1.03
MY1-14	836.5	76.16	142.21	16.41	59.57	11.13	2.10	11.96	1.56	7.65	1.46	4.39	0.58	3.91	0.56	40.34	379.97	307.57	72.41	4.25	13.13	4.30	2.47	0.55	0.93
MY1-15	839.1	51.27	103.14	11.03	40.71	7.78	1.57	8.65	1.17	5.96	1.17	3.59	0.48	3.36	0.48	33.41	273.77	215.49	58.28	3.70	10.29	4.15	2.08	0.58	1.00
MY1-16	840.7	63.65	125.64	13.33	48.72	9.31	1.87	10.32	1.42	7.21	1.38	4.18	0.55	3.65	0.53	39.08	330.86	262.52	68.34	3.84	11.74	4.30	2.28	0.58	0.99
MY1-17	842.1	43.95	89.66	9.46	35.02	6.57	1.36	7.32	0.97	4.85	0.95	2.89	0.39	2.62	0.38	27.27	233.66	186.02	47.64	3.90	11.30	4.21	2.25	0.60	1.01
MY1-18	844.2	72.14	152.57	16.03	59.33	11.42	2.14	12.44	1.72	8.85	1.80	5.68	0.78	5.40	0.82	51.47	402.60	313.62	88.98	3.52	9.00	3.97	1.86	0.55	1.04
MY1-19	846.5	73.32	152.58	16.47	60.82	11.53	2.17	12.28	1.63	7.98	1.51	4.60	0.61	4.15	0.60	40.96	391.22	316.89	74.33	4.26	11.91	4.00	2.39	0.55	1.02
MY1-20	849.6	64.13	134.82	14.48	53.76	10.20	2.02	10.87	1.47	7.18	1.39	4.27	0.57	3.87	0.57	37.84	347.42	279.40	68.03	4.11	11.16	3.96	2.26	0.58	1.03
MY1-21	851.9	45.41	95.37	9.72	36.25	6.71	1.24	7.12	0.95	4.82	0.92	2.91	0.40	2.66	0.41	27.31	242.20	194.70	47.50	4.10	11.49	4.26	2.16	0.55	1.04
MY1-22	853.1	51.61	104.01	11.25	42.14	7.99	1.62	7.87	1.10	5.50	1.04	3.18	0.43	2.96	0.42	27.30	268.43	218.63	49.80	4.39	11.77	4.06	2.15	0.62	1.00
MY1-23	854.5	55.60	111.76	11.76	42.56	7.61	1.51	7.64	0.99	4.62	0.88	2.72	0.37	2.47	0.35	23.11	273.95	230.80	43.15	5.35	15.18	4.59	2.50	0.60	1.00
MM1-24	856.8	45.82	93.08	9.90	35.99	6.55	1.25	6.62	0.92	4.81	0.98	3.13	0.44	2.95	0.45	26.52	239.41	192.60	46.81	4.11	10.46	4.40	1.81	0.58	1.01

注： $\delta\text{Eu} = 2\text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N) - \delta\text{Ce} = 2\text{Ce}_N / (\text{La}_N + \text{Pr}_N)$ 。

为油页岩的 ΣREE 值与陆源碎屑注入量呈正相关 (王中刚等, 1989), 样品较高的 ΣREE 值可能与陆源碎屑的大量注入相关, 而不同深度样品 ΣREE 值的差异可能是受不同时期陆源碎屑注入量的影响。经球粒陨石标准化 (Boynnton, 1984) 计算得到的 δEu 值为 0.54~0.62, 平均为 0.57, 表现为负异常; δCe 值为 0.86~1.04, 平均为 0.99, 除少数样品外, 均表现为负异常。

$(\text{La}/\text{Yb})_N$ 指数和轻重稀土比 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$) 均可反映样品轻重稀土分馏度, 当 $(\text{La}/\text{Yb})_N > 1$ 时, 为轻稀土富集; $(\text{La}/\text{Yb})_N < 1$ 时, 轻稀土亏损, 为 HREE 富集型; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 约等于 1 时, 属球粒陨石型。油柑窝组油页岩样品 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 8.85~15.18, 平均 11.56, 明显大于 1, 表明轻稀土明显富集, 且 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 3.90~5.35, 平均 4.02, 也同样证明了轻稀土富集的特征。

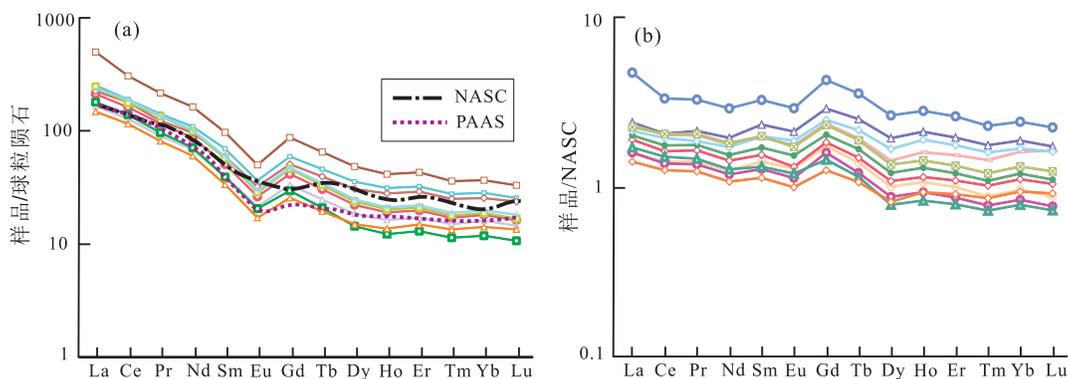
球粒陨石是由地球原始物质组成, 以此为标准可反映样品对地球原始物质组成的分异程度, 进一步可表征沉积物源属性。从球粒陨石标准化 REE 配分模式 (图 3a) 可以看出, 各深度样品曲线均呈较为宽缓的右倾“V”型, 在 La~Sm 段形态较陡, Dy~Lu 段则较为平坦, 呈波动状延伸, Eu 元素处明显的“波谷”则代表 Eu 负异常。北美页岩 (Haskin and Haskin, 1966) 标准化后的 REE 配分模式 (图 3b) 从左至右整体呈略微下倾趋势, Gd 元素处呈明显“波峰”, 表明茂名油页岩样品 Gd 元素相对于北美页岩组合明显富集。稀土元素常以离子化合物形态赋存于矿物晶格中, 或呈离子状态被黏土吸附 (石学法等, 1996), Gd 元素的富集可能是其在矿物晶格中含量较高, 也有可能是黏土矿物对 Gd 的吸附作用较强, 具体主导影响因素还需进一步分析。

4 地质意义

4.1 风化程度与沉积分选

不稳定阳离子 (如 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 等) 的丢失和稳定阳离子 (如 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 等) 的富集程度可以衡量化学风化作用强度 (Condie *et al.*, 1992; Fedo *et al.*, 1995; 刘锐娥等, 2005)。Nesbitt 和 Young (1982) 根据化学蚀变指数 (CIA) 来判断源区的风化作用程度, $\text{CIA} = 100 \times [n(\text{Al}_2\text{O}_3) / (n(\text{Al}_2\text{O}_3) + n(\text{CaO}^*) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O}))]$, 式中的各成分均为摩尔分数 (n) 表示。其中的 CaO^* 指岩石硅酸盐中的 CaO , 当 $\text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$ 时, $\text{CaO}^* = \text{Na}_2\text{O}$; 当 $\text{CaO} \leq \text{Na}_2\text{O}$ 时, $\text{CaO}^* = \text{CaO}$ (Bock *et al.*, 1998)。曾有学者对其他盆地油页岩的 CIA 值进行过计算, 西藏伦坡拉盆地油页岩 CIA 值为 63~73 (谢尚克等, 2014), 表明源岩经历了中等化学风化作用; 梅河盆地油页岩 CIA 值为 70~80 (李宝毅等, 2014), 源岩经历中等偏高化学风化作用; 桦甸盆地油页岩 CIA 值为 74~82 (孙平昌等, 2011), 源岩经历了中等偏高化学风化作用。利用上述公式计算得到的茂名盆地油页岩 CIA 值为 87.36~91.40, 平均为 90.96, 较伦坡拉盆地、梅河盆地和桦甸盆地油页岩 CIA 值高, 表明茂名盆地油页岩源区物质应该经历了相对强烈且程度较高的化学风化作用。

Th 易赋存于酸性岩中, Sc 则更易在基性岩中赋存。初始沉积物的 Th/Sc 值与 Zr/Sc 值呈正相关, Th/Sc 值通常不随沉积分选作用而发生改变, 但再循环过程中锆石的逐渐富集会引起 Zr/Sc 值的增大, 故可利用 Th/Sc 与 Zr/Sc 衡量沉积分选作用强度以及重矿物富集程度 (Taylor and McLennan, 1985; McLennan *et al.*, 1993; 孙平昌等, 2012)。由



(a) 球粒陨石标准化; (b) 北美页岩组合 (NASC) 标准化

图 3 茂名盆地油柑窝组油页岩 REE 标准化配分模式

Fig. 3 Chondrite-normalized and NASC-normalized REE distribution patterns for the oil shale samples of Youganwo Formation in Maoming Basin

茂名盆地油柑窝组油页岩 Zr/Sc-Th/Sc 图解(图 4)可以看出样品点均分布在成分演化线(BFG)左侧,较桦甸盆地油页岩样品偏离 BFG(孙平昌等,2011),样品 Th/Sc 值分布较为集中,高 Th/Sc 值(2.22~3.55,平均 2.79)代表的不相容元素(Th)对相容元素(Sc)的相对富集则表明源区经历相对较强的风化作用,这与 CIA 判断结果一致。Zr/Sc 值较大的波动范围(3.26~19.80)则代表物源经历了明显的沉积再循环过程,与桦甸盆地油页岩未经历沉积再循环作用有所差异。

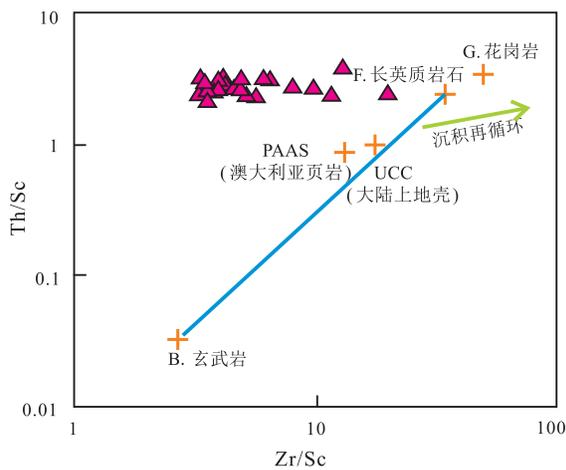


图 4 茂名盆地油柑窝组油页岩 Zr/Sc-Th/Sc 图解 (底图据 McLennan *et al.*,1993)

Fig.4 Zr/Sc-Th/Sc diagram for the oil shale samples of Youganwo Formation in Maoming Basin (modified after McLennan *et al.*,1993)

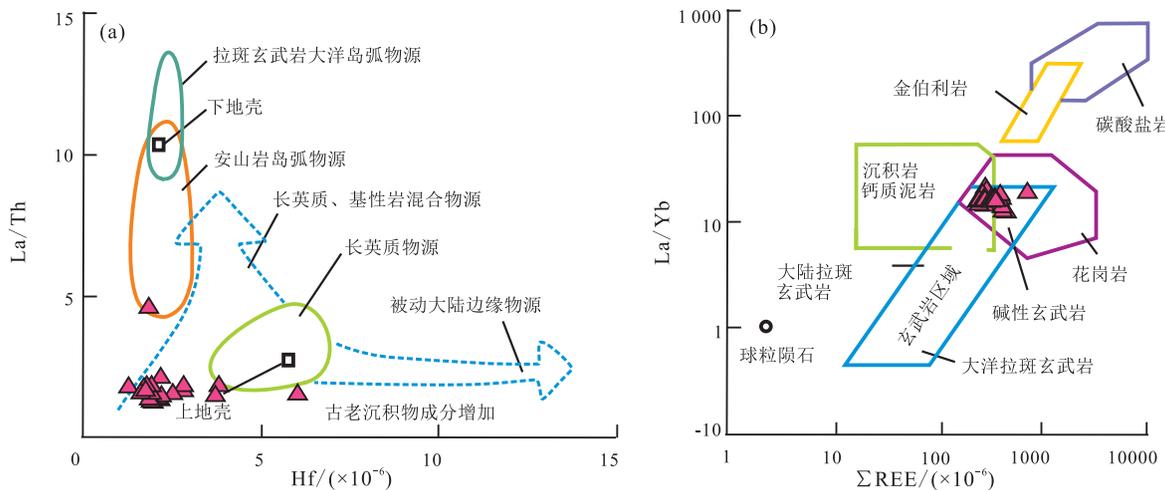
4.2 陆源碎屑的物源分析

REE 配分模式是判定盆地沉积源区性质的重要手段之一 (McLennan, 1989; 刘士林等,2006; 谢

国梁等,2013; 张瑜等,2014)。Taylor 和 McLennan (1985) 和 McLennan(1989) 先后对澳大利亚后太古代页岩(PAAS)及北美页岩组合(NASC)的 REE 特征进行了系统的研究,两类典型页岩样品的 REE 分布模式均表现为轻稀土富集,重稀土亏损但含量稳定以及 Eu 负异常,并认为这种 REE 配分模式可以代表上地壳。茂名盆地油页岩球粒陨石标准化 REE 配分模式与 PAAS 以及 NASC 球粒陨石标准化 REE 配分模式(图 3a)基本一致,表明茂名油页岩物源主要来自于上地壳(刘清俊等,2014)。变价元素 Eu 在沉积岩形成过程中,Eu³⁺ 不易被还原成 Eu²⁺,故 Eu 异常可灵敏地指示物质来源。样品 Eu 负异常(δEu 值为 0.54~0.62)表示其母岩为花岗岩、长英质变质岩(刘英俊和曹励明,1987),也指示了其物源主要来自于上地壳(McLennan,1989)。图 4 显示油页岩样品 Th/Sc 值与长英质岩石和花岗岩 Th/Sc 值接近,表明源岩为相对长英质的岩石组分。茂名盆地西北端信宜-廉江断裂带曾侵入过一套加里东期花岗岩,该套花岗岩的侵入可能导致样品出现较高的 Th/Sc 值,使得源岩主体接近长英质岩石。

Floyd 和 Leveridge(1987) 利用 La/Th-Hf 判别图解对沉积物物源区进行判别(图 5a),油页岩样品在图解中分布相对集中,绝大部分样品具有相对一致的 La/Th 值,主要是长英质和基性岩混合物源,仅有 1 个样品显示安山岩岛弧物源,无被动大陆边缘物源组分。而 La/Yb- ΣREE 源岩属性判别图解(Taylor and McLennan,1985)(图 5b)则显示样品落在沉积岩、玄武岩和花岗岩的交汇区域,反映了样品的源岩为碱性玄武岩、沉积岩和花岗岩的混合物。

总体分析认为,茂名盆地油柑窝组油页岩源岩



(a) La/Th-Hf 图解(底图据 Floyd and Leveridge,1987); (b) La/Yb- ΣREE 图解(底图据 Allègre and Minster,1978)

图 5 茂名盆地油柑窝组油页岩源岩判别图解

Fig.5 Discrimination diagrams illustrating sedimentary provenance of the oil shale samples of Youganwo Formation in Maoming Basin

主要来自上地壳长英质源区,可能是长英质火山岩、花岗岩和沉积岩的混合物。郭敏等(2009)在对茂名盆地控矿因素进行研究时认为火山活动在晚白垩世进入高峰期,推测长英质火山岩源于这期火山活动喷发的中性火山岩,而花岗岩成分很可能源于盆地西北端信宜-廉江断裂带内侵入的加里东期花岗岩。

4.3 古环境分析

Sr、Ba 在淡水湖泊环境均以重碳酸盐的形式保存(刘洋等,2007),当水体咸化时,Ba 首先形成 $BaSO_4$ 沉淀(赵振华,1997),而湖水的咸化达到一定程度时 Sr 才沉淀,故可利用 Sr/Ba 值判别海相陆相沉积环境并衡量水体盐度(Hatch and Leventhal, 1992; 刘春莲等,2005; 刘洋等,2007; 郑玉龙等,2015)。海相、陆相环境均可以形成油页岩,巴西巴拉那盆地、南非卡罗盆地及美国阿巴拉契亚盆地油页岩均形成于海相沉积环境,而美国怀俄明州绿河盆地油页岩属于咸水湖泊相(柳蓉和刘招君,2006),抚顺盆地油页岩则属于淡水湖泊相(张显良,2005)。茂名盆地油页岩 Sr/Ba 值总体偏小,为 0.17~0.37,平均为 0.26,均小于 1.0,反映了当时为陆相淡水湖泊沉积环境(王益友等,1979; 邓宏文

和钱凯,1993; 吴少波,2001),且垂向上随深度加深逐渐增大(图 6)。由中国主要油页岩元素地球化学特征(表 3)可以发现茂名盆地油页岩与淡水湖泊环境下形成的抚顺油页岩 Sr/Ba 值较为接近,而与在过渡相咸水湖泊沉积环境中形成的柳树河油页岩(郑玉龙等,2015)相比则明显较低。V/Cr 值可判断沉积环境水体的深浅(余焯等,2014),样品的 V/Cr 值为 1.22~2.12,平均值为 1.68,随深度增加而减小(图 6),表明油柑窝组沉积早期水体相对较浅,到了中晚期水体逐渐加深。岩性的变化也间接反映了水体的不断加深,油柑窝组底部沉积灰色页岩夹褐煤、碳质泥岩,中上部则发育一套巨厚的褐色油页岩(郭敏等,2009)。一直处于活动状态的高棚岭断裂可能是导致水深变化的重要因素,断裂南西盘的下陷速度大于另一盘,使得湖盆水深不断增加。

古气候条件是高丰度油页岩形成的控制因素之一,郭敏等(2009)利用孢粉组合判断油柑窝组在沉积时处于温暖潮湿的亚热带-温带环境中,但并未进行详尽的地球化学指标及气候条件垂向变化特征分析。Sr/Cu 值对气候变化比较敏感,是古气候判断的重要指示剂(熊小辉和肖加飞,2011)。温暖潮

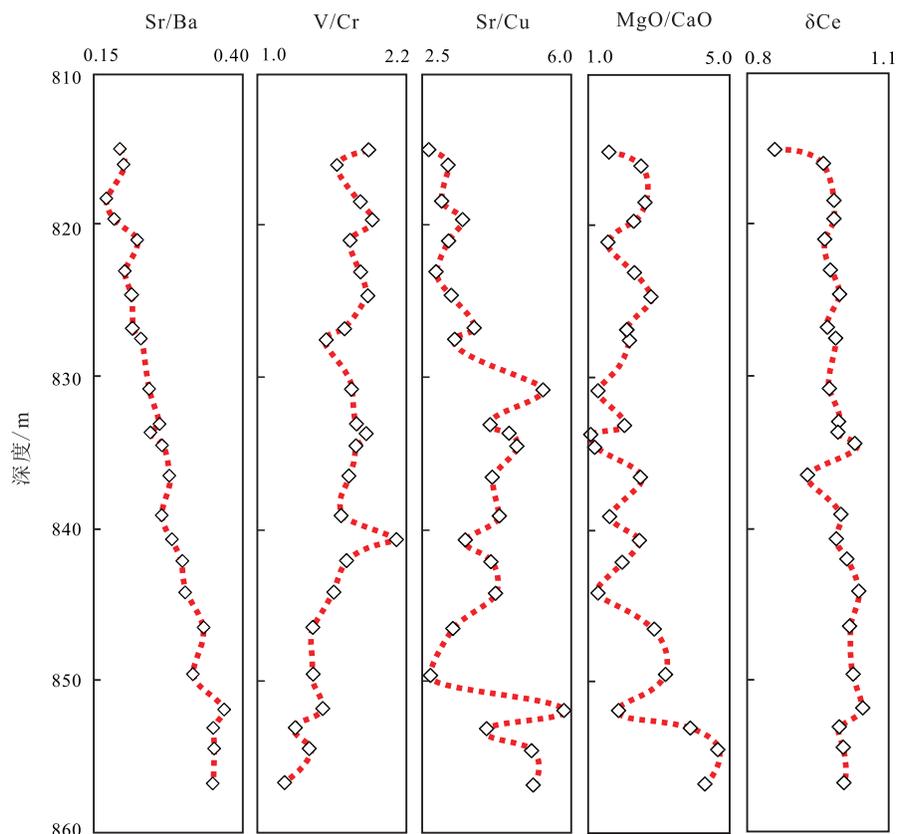


图 6 元素地球化学参数垂向变化特征

Fig.6 Depth profiles of geochemical characteristics of elements

表 3 中国主要油页岩元素地球化学特征

Table 3 Geochemical characteristics of oil shale in China

油页岩分布	Sr/Ba	Sr/Cu	δCe	ΣREE	数据来源
茂名盆地	$\frac{0.17 \sim 0.37}{24}$	$\frac{2.66 \sim 5.83}{24}$	$\frac{0.86 \sim 1.04}{24}$	$\frac{233.66 \times 10^{-6} \sim 689.26 \times 10^{-6}}{24}$	刘招君等, 2010; 胡晓峰等, 2012; 孙平昌等, 2011
桦甸盆地	$\frac{0.22 \sim 1.29}{96}$	$\frac{3.3 \sim 40.8}{96}$	$\frac{0.87 \sim 1.06}{14}$	$\frac{106.4 \times 10^{-6} \sim 436.4 \times 10^{-6}}{14}$	
柳树河盆地	$\frac{0.44 \sim 1.20}{20}$	$\frac{2.38 \sim 16.73}{20}$	$\frac{0.56 \sim 1.09}{20}$	$\frac{74.9 \times 10^{-6} \sim 283 \times 10^{-6}}{20}$	郑玉龙等, 2015

湿时, Sr/Cu 值呈现出低值 (1.3 ~ 5.0); 干燥炎热时, Sr/Cu 值呈现出高值 (>5.0) (刘招君等, 2009; 彭雪峰等, 2012)。茂名油页岩 Sr/Cu 值为 2.66 ~ 5.83, 平均值为 3.89, 整体趋势低于桦甸盆地和柳树河盆地油页岩 Sr/Cu 值 (表 3), 表明该套油页岩沉积时为更加温暖潮湿的气候背景。MgO/CaO 值也能较好地指示气候变化, 在非碱性层位, 高值代表干热气候, 低值则指示潮湿气候。研究区相对较低的 MgO/CaO 值 (1.03 ~ 4.69, 平均 2.31) 同样证实了温暖潮湿的古气候条件。Sr/Cu 值和 MgO/CaO 值随着深度的增加而增大 (图 6), 表明茂名盆地油页岩组在沉积晚期气候更为潮湿。温暖潮湿的古环境有利于鱼类及浮游生物等的大量发育, 是茂名盆地油页岩组发育优质油页岩的重要原因。

δCe 作为良好的示踪剂, 可以判断氧化-还原环境 (吴明清和欧阳自远, 1992; 刘士林等, 2006)。Ce 有 Ce^{3+} 和 Ce^{4+} 等 2 种价态, 在氧化条件下, Ce^{3+} 常被氧化成难溶的 CeO_2 , 故沉积物中呈现 Ce 正异常或无明显负异常。当沉积环境由氧化逐渐向缺氧环境转换时, 水体中大量开始赋存 Ce^{3+} , 导致沉积物中 Ce 亏损而呈现负异常。故 Ce 正异常表明环境具氧化性, Ce 负异常则代表还原环境, 负异常程度越大, 环境的还原性则越强。茂名盆地油页岩样品经球粒陨石标准化后的 δCe 值为 0.86 ~ 1.04, 平均为 0.99, 基本表现为负异常, 与多数油页岩 Ce 负异常结果 (朱光有等, 2005; 刘招君等, 2009; 孟庆涛等, 2013; 谢尚克等, 2014) 一致 (表 3), 负异常代表的缺氧还原湖泊环境有利于有机质的堆积和保存以及油页岩的形成。随着深度的增加, 负异常程度呈缓慢减弱的趋势 (图 6), 反映了古环境在总体缺氧还原的背景下, 经历了还原性逐渐增强的演化过程。结合古水深及古气候, 认为油页岩组早期主要处于相对停滞的弱还原湖沼相环境, 到了油页岩组中晚期, 沉积环境逐渐向还原性较强的半深湖-深湖相过渡。

5 结论

(1) 茂名油页岩组油页岩具有 ΣREE 含量高、轻稀土富集、 δEu 负异常和 δCe 负异常特征。经球粒陨石标准化后的 REE 配分模式图呈左高右低较为宽缓的“V”型; 经北美页岩组合标准化后的 REE 配分模式图则在 Gd 处呈明显“波峰”, Gd 元素相对于北美页岩组合明显富集。

(2) 油页岩样品较高的化学蚀变指数 (CIA) 表明物源区遭受了强烈的风化作用, Zr/Sc-Th/Sc 图解分布特征则显示物源经历了明显的沉积再循环过程。

(3) 根据 La/Th-Hf 和 La/Yb - ΣREE 图版分析结果以及 Eu 负异常特征, 判断茂名盆地油页岩组油页岩源岩主要来自上地壳长英质源区, 可能是长英质火山岩、花岗岩和沉积岩的混合物。

(4) 利用 Sr/Cu、V/Cr、MgO/CaO、 δCe 等参数判断油页岩组早期主要处于相对停滞的弱还原性湖沼相环境, 到了油页岩组中晚期, 沉积环境逐渐向还原性半深湖-深湖相过渡。

参考文献 (References):

Allègre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1-25

Bock B, McLennan S M, Hanson G N. 1998. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England. *Sedimentology*, 45(4): 635-655

Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P, ed. *Rare earth element geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63-114

Brendow K. 2003. Global oil shale issues and perspectives. *Oil Shale*, 20(1): 81-92

Condie K C, Noll Jr P D, Conway C M. 1992. Geochemical and detrital mode evidence for two sources of Early Proterozoic sedimentary rocks from the Tonto Basin supergroup, central Arizona. *Sedimentary Geology*, 77(1-2): 51-76

- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern united states. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919-2940
- Dyni J R. 2003. Geology and resources of some world oil-shale deposits. *Oil Shale*, 20(3): 193-252
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of Potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosoles, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921-924
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from Turbiditic sandstones. *Journal of Geology Society London*, 144(4): 531-542
- Haskin M A, Haskin L A. 1966. Rare earths in European shales: A re-determination. *Science*, 154(3748): 507-509
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian(Missourian) stark shale member of the dennis limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA. *Chemical Geology*, 99(1-3): 65-82
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin B R, McKay G A, eds. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. Washington: Mineralogical Society of America, 21(1): 169-200
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *GSA Special Publication*, 284: 21-40
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885): 715-717
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Oxford London: Blackwell Scientific Publication, 1-301
- 柏静儒, 王擎, 胡爱娟, 孙佰仲, 李少华. 2006. 茂名油页岩的热解特性. *东北电力大学学报(自然科学版)*, 26(2): 73-78
- 邓宏文, 钱凯. 1993. *沉积地球化学与环境分析*. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 4-97
- 傅家谟, 徐芬芳, 陈德玉, 刘德汉, 胡成一, 贾蓉芬, 徐世平, Brassell A S, Eglinton G. 1985. 茂名油页岩中生物输入的标志化合物. *地球化学*, (2): 99-114
- 郭敏, 周明文, 李瑞, 余德延. 2009. 广东茂名盆地油页岩成矿因素分析. *华南地质与矿产*, (2): 47-51
- 胡晓峰, 刘招君, 柳蓉, 孙平昌, 许圣传, 孟庆涛, 柳世友. 2012. 桦甸盆地始新统桦甸组黏土矿物和无机地球化学特征及其古环境意义. *煤炭学报*, 37(3): 416-423
- 李宝毅, 姚树青, 孙平昌, 徐银波, 柳蓉, 白悦悦. 2014. 梅河盆地油页岩特征及成因. *世界地质*, 33(2): 457-464
- 李胜荣, 高振敏. 2000. 湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪. *中国科学 D 辑*, 30(2): 169-174
- 李双应, 岳书仓, 杨建, 贾志海. 2003. 皖北新元古代刘老碑组页岩的地球化学特征及其地质意义. *地质科学*, 38(2): 241-253
- 李丹梅, 汤达祯, 杨玉凤. 2006. 油页岩资源的研究、开发与利用进展. *石油勘探与开发*, 33(6): 657-661
- 李殿超, 朱建伟, 严焕榕, 郭敏, 郑志文. 2006. 广东省茂名盆地油页岩的沉积特征及分布规律. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(6): 938-943
- 刘英俊, 曹励明. 1987. *元素地球化学导论*. 北京: 地质出版社, 57-80
- 刘春莲, 秦红, 车平, 翟伟, 石贵勇, 周永章, 谢叶彩, 董艺辛. 2005. 广东三水盆地始新统心组生油岩元素地球化学特征及沉积环境. *古地理学报*, 7(1): 125-136
- 刘锐娥, 王孝峰, 王亚丽, 孙粉锦, 肖红平, 张春林. 2005. 泥质岩稀土元素地球化学特征在物源分析中的意义: 以鄂尔多斯盆地上古生界为例. *天然气地球科学*, 16(6): 788-791
- 刘士林, 刘蕴华, 林舸, 周叶, 龚发雄, 张德圣. 2006. 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. *现代地质*, 20(3): 449-456
- 刘洋, 刘招君, 柳蓉, 孟庆涛, 张健, 史冀忠, 杜江峰. 2007. 抚顺盆地始新统计军屯组油页岩地球化学特征及其沉积环境. *世界地质*, 26(4): 441-446
- 刘招君, 柳蓉. 2005. 中国油页岩特征及开发利用前景分析. *地学前缘*, 12(3): 315-323
- 刘招君, 孟庆涛, 柳蓉, 董清水. 2009. 抚顺盆地始新统计军屯组油页岩地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 25(10): 2340-2350
- 刘招君, 孟庆涛, 柳蓉, 胡菲, 周人杰. 2010. 古湖泊学研究: 以桦甸断陷盆地为例. *沉积学报*, 28(5): 917-925
- 刘清俊, 石岩, 邢盟, 林海亮, 杨全合, 戴金明. 2014. 塔北地区下志留统砂岩稀土元素特征及源区构造背景分析. *大庆石油地质与开发*, 33(1): 48-53
- 柳蓉, 刘招君. 2006. 国内外油页岩资源现状及综合开发潜力分析. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(6): 892-898
- 罗泰义, 宁兴贤, 罗远良, 李晓彪, 凌荣祥, 姚林波. 2005. 贵州遵义早寒武黑色岩系底部 Se 的超常富集. *矿物学报*, 25(3): 275-282
- 罗情勇, 钟宁宁, 王延年, 张彦起, 秦婧, 齐琳, 马勇, 张毅, 朱顺玲, 黄小艳. 2013. 华北北部中元古界洪水庄组页岩地球化学特征: 物源及其风化作用. *地质学报*, 87(12): 1913-1921
- 孟庆涛, 刘招君, 胡菲, 孙平昌, 柳蓉, 周人杰, 甄甄. 2013. 桦甸盆地始新统油页岩稀土元素地球化学特征及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(2): 390-399
- 彭雪峰, 汪立今, 姜丽萍. 2012. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义. *矿物岩石地球化学通报*, 31(2): 121-127
- 秦匡宗. 1982. 抚顺和茂名油页岩的有机质含量及其元素组成. *华东石油学院学报*, (2): 71-79
- 秦匡宗, 劳永新. 1985. 茂名和抚顺油页岩组成结构的研究 I. 有机质的芳碳结构. *燃料化学学报*, 13(2): 133-140
- 石学法, 陈丽蓉, 马建国, 柴之芳. 1996. 西菲律宾海沉积物稀土元素地球化学. *矿物学报*, 16(3): 260-267
- 孙平昌, 刘招君, 孟庆涛, 柳蓉, 贾建亮, 胡晓峰. 2011. 桦甸盆地古近纪充填特征及对油页岩成矿的影响. *煤炭学报*, 36(7): 1110-1116

- 孙平昌, 刘招君, 李宝毅, 柳蓉, 孟庆涛, 周人杰, 姚树青, 徐银波. 2012. 桦甸盆地桦甸组油页岩段地球化学特征及地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 42(4): 948-960
- 王益友, 郭文莹, 张国栋. 1979. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用. 同济大学学报, (2): 51-60
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 310-313
- 王国金, 王剑秋, 李术元, 钱家麟, 朱亚杰. 1996. 茂名油页岩流化床燃烧排放 SO₂ 的实验研究. 燃料化学学报, 24(4): 315-322
- 吴明清, 欧阳自远. 1992. 铈异常: 一个寻迹古海洋氧化还原条件变化的化学示踪剂. 科学通报, (3): 242-244
- 吴少波. 2001. 博格达山前凹陷上二叠统乌拉泊组沉积相及沉积模式. 沉积学报, 19(3): 333-339
- 谢国梁, 沈玉林, 魏展航, 张虎, 袁学旭. 2013. 鄂尔多斯盆地延川南地区下二叠统山西组泥岩稀土元素特征及地质意义. 天然气地球科学, 24(5): 991-998
- 谢尚克, 杜佰伟, 王剑, 董宇. 2014. 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. 岩石矿物学杂志, 33(3): 503-510
- 熊小辉, 肖加飞. 2011. 沉积环境的地球化学示踪. 地球与环境, 39(3): 405-414
- 严焕榕, 朱建伟, 李殿超, 郭敏. 2006. 茂名盆地金塘矿区油页岩特征及形成条件. 世界地质, 25(4): 407-410
- 于志强, 彭平安, 盛国英, 傅家谟. 2000. 茂名与江汉第三系油页岩中生物标志物碳同位素研究. 科学通报, 45(Z1): 2783-2789
- 于炳松, 王黎栋, 陈建强, 陈晓林, 梁世友, 刘忠宝, 林畅松. 2003. 塔里木盆地北部下寒武统底部黑色页岩形成的次氧化条件. 地质前缘, 10(4): 545-550
- 余焯, 张昌民, 李少华, 朱锐, 杜家元, 王莉. 2014. 惠州凹陷珠江组泥岩地球化学特征及其地质意义. 中国石油大学学报(自然科学版), 38(1): 40-49
- 张显球. 1999. 广东省白垩-第三纪盆地地质概况. 广东地质, 14(3): 53-59
- 张显良. 2005. 辽宁油页岩资源及潜力分析. 地质与资源, 14(2): 143-145
- 张瑜, 杨华, 王多云, 付金华, 姚泾利, 辛补社. 2014. 鄂尔多斯盆地南部铜川组碎屑岩地球化学特征及其对物源的制约. 天然气地球科学, 25(8): 1233-1241
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社, 199-206
- 郑玉龙, 马志强, 王佰长, 袁国礼, 覃建勋. 2015. 黑龙江省柳树河盆地始新统八虎力组油页岩元素地球化学特征及沉积环境. 古地理学报, 17(5): 689-698
- 周国强, 郑有明, 吴安生. 1996. 两广云开地区前震旦纪地层. 中国区域地质, (4): 295-303
- 朱光有, 金强, 张水昌, 戴金星, 王冠民, 张林晔, 李剑. 2005. 济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组深湖相油面岩的特征及成因. 古地理学报, 7(1): 59-69

(本文责任编辑:郑秀娟 龚超颖;英文审校:张兴春)

·亮点速读·

埋藏氧的上升和地球早期大气形成

埋藏在地下深部岩石中的氧或许在几十亿年前促进了地球岩石地幔的搅动,并改变了早期行星的大气成分。耶鲁大学,亚利桑那州立大学,和德国的巴伐利亚地质研究所的研究表明,地表下地热引起岩石缓慢的运动,即地幔对流是由矿物中氧的分布不均引起的。该成果发表在8月1日在《Nature Geoscience》期刊上。

耶鲁大学地质学和地球物理学副教授 Lee 提出,假设其他元素都相同,氧元素增多,岩石的密度就会降低,因此氧化

程度高的岩石就会优先上升。这是首次提出地球深部氧含量影响了组成岩石的矿物,并且如何改变它们的密度。

前耶鲁大学博士后 Gu 补充道,“地幔并非完全孤立于地表。例如,火山喷发气体连接地幔与大气。我们的模型预测在地球历史早期,浅地幔氧化不高,释放 CH₄ 气体,会消耗光合作用产生的氧,但是随着时间的发展和氧化程度较低的岩石逐渐上升,生物氧被保存下来,并停留在大气中。”

(刘莹 编译,周新华 校)