

徐力峰, 吴学万, 王先庆, 等. 南海西北部陆缘茂名盆地油页岩沉积地球化学特征及古环境探讨[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(9): 1-13.

XU Lifeng, WU Xuewan, WANG Xianqing, et al. Sedimentary geochemistry and paleoenvironment of oil shales in the Maoming Basin in the northwestern continental margin of the South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(9): 1-13.

南海西北部陆缘茂名盆地油页岩沉积地球化学特征及古环境探讨

徐力峰¹, 吴学万^{2*}, 王先庆³, 何春民²

(1 广东省水文环境地质调查中心(广东有色工程勘察设计院), 广州 510080; 2 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082;

3 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 571127)

摘要:世界页岩油气资源量远超常规油气, 页岩(含油页岩)资源的开发利用将会改变全球能源格局。南海西北部陆缘茂名盆地油页岩资源储量占到中国的 16.72%, 有着巨大的资源潜力。本文重点对茂名始新统油柑窝组油页岩地球化学特征开展分析研究。通过对样品系统采集分析, 测定其主微量元素含量, 深入剖析其岩石地球化学特征及其沉积环境, 取得以下成果及认识: ①油柑窝组油页岩相对于大陆上地壳(UCC)平均值呈现出 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 富集, 而贫 MgO 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 MnO_2 的特点。②茂名油页岩沉积时母岩遭受强烈化学风化作用, 导致样品中黏土矿物发生钾交代, 但是一些高场强元素和稀土元素受化学风化作用的影响较小。同时, 沉积物再循环作用对油页岩沉积地球化学性质影响较小。③油页岩母岩为酸性火成岩, 化学成分介于花岗岩与花岗闪长岩之间, 接近太古宇英云闪长岩组合(TTG)。茂名油页岩沉积时期气候温暖湿润, 湖水盐度低, 分层较强, 底层水处于还原环境, 有利于有机质富集保存。④表层与底层水的温度差异导致了湖水分层, 同时, 湖侵作用导致水深增加, 削弱了风与河流对底层水的影响, 导致底层水处于缺氧状态, 为有机质富集保存及油页岩形成提供了有利条件。

关键词: 茂名油页岩; 始新统油柑窝组; 地球化学特征; 物源; 古环境

中图分类号: P736; P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2025.064

0 引言

油页岩是一种具无机矿物质骨架, 包含大量油母质和少量沥青质的固体有机质的沉积岩^[1-3]。作为一种固体有机化石燃料, 油页岩可热解产生页岩油, 也可以直接燃烧用于发电、取暖, 其残渣可用于生产水泥、砌砖等建筑材料或进行稀有、稀土、稀

散金属的提取^[4], 是一种综合利用价值极高的固体化石燃料资源。

南海西北部陆缘茂名盆地是中国最著名的油页岩产地之一, 资源探明储量占中国油页岩探明资源储量的 16.72%, 有着巨大的资源潜力^[5-6]。油页岩中丰富的有机质主要为富含有机质的干酪根和可溶沥青^[7]。茂名油页岩主要集中分布于古近系始新统油柑窝组和新近系尚村组地层层系中, 其中, 油柑窝组油页岩与煤层伴生, 是最主要的油页岩富集之含矿层位, NW 向断裂控制着油柑窝组油页岩矿层的展布^[8]。茂名油页岩含油率高(油柑窝组平均为 5.71%~8.39%)、矿层巨厚(最厚为 46 m), 可揭示海陆过渡带尤其是陆缘区断陷盆地中深湖相偏腐泥混合型有机质的高效富集保存机制。这一成矿模式为近海盆地(如南海北部陆缘海域盆地)

收稿日期: 2025-03-16

资助项目: 国家自然科学基金(42076054); 茂名市公共服务项目“茂名市多要素三维城市地质调查项目”(0835-220ZA9303471); 第二十七届中国科协年会学术论文(2025XSJL022)

第一作者: 徐力峰(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事基础地质、水文地质与环境地质调查方面的工作。E-mail: 121466702@qq.com

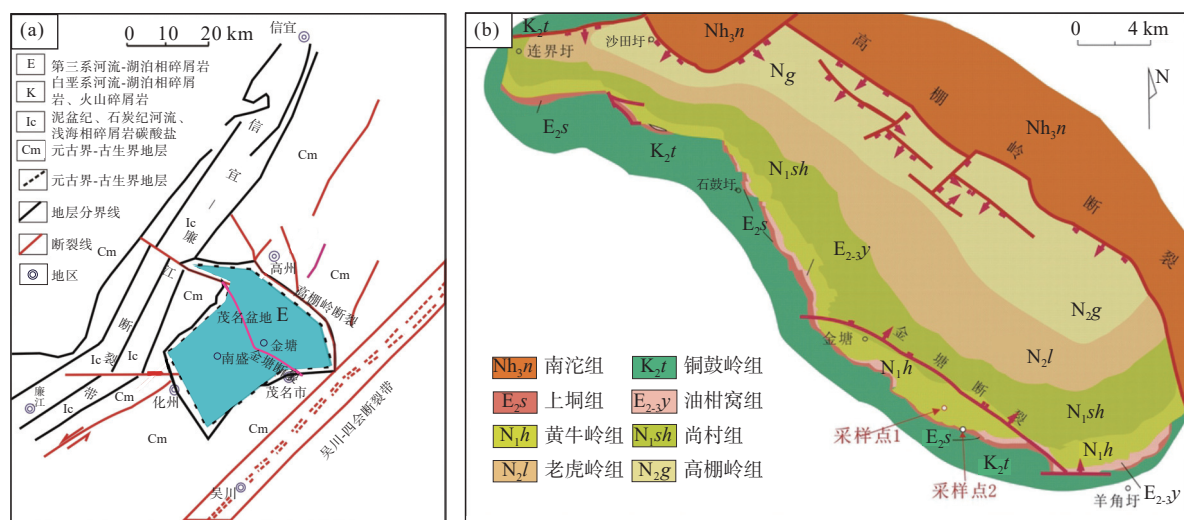
* 通讯作者: 吴学万(1998—), 男, 在读博士, 主要从事海洋沉积地球化学方面的工作。E-mail: wuxw25@mail2.sysu.edu.cn

的页岩油勘探提供了类比依据,尤其是盐度分层、缺氧环境等关键控矿因素的识别与应用,能够为海域盆地油页岩勘探评价提供参考借鉴。必须强调指出,前人诸多有关油页岩的研究,均主要集中于炼制和开发应用以及油页岩有机地球化学特征等方面^[9-13],对于其岩石/沉积地球化学特征以及油页岩形成机制等方面的研究较少。鉴此,本文拟通过茂名盆地油柑窝组油页岩沉积地球化学特征的研究,紧密结合古生物学、地层学以及区域构造地质等信息,深入分析研究油页岩的物源供给特点与沉积充填时的古环境特征。

1 区域地质背景

南海西北部陆缘茂名盆地位于广东省西南部,北起高州城,南至茂名公馆,西至化州连界圩、东至电白羊角圩,面积约为 400 km²^[8,14-17]。茂名盆地属于华南造山带粤西隆起区云开隆起东南缘,即

南海西北部陆缘区,与海域的北部湾盆地相邻。茂名盆地北西端受信宜-廉江断裂带控制,南东端受吴川-四会断裂带控制(图 1a),茂名盆地地层总体走向 NW—SE,基本为向斜构造特征。其中,断裂为盆地的主要构造形迹,NW 和 NE 向断裂属于主要断裂,其次是 SN 和 EW 向断裂。NE 向断裂多为隐伏断裂,重磁等物探异常明显,NW 向断裂是控制油页岩的主要断裂构造。盆地在喜山期高棚岭断裂与其他 NW 向断裂的共同作用下,形成了目前的半地堑断陷构造类型(图 1b),且走向与地层走向平行,其往往造成油页岩地层产生较大落差和缺失^[6,18]。茂名盆地内自下而上沉积了始新统上垌组、始新统一渐新统油柑窝组、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,其中,上垌组和油柑窝组是油页岩的主要层位。油柑窝组油页岩在研究区普遍发育,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^[19]。



(a) 茂名盆地区域地质略图^[18]; (b) 茂名盆地半地堑构造特征^[6]

图 1 南海西北部陆缘茂名盆地区域地质及构造单元分布特征

Fig.1 The tectonic framework (a) and half-graben structure (b) of the Maoming Basin in northwestern continental margin of the South China Sea

2 油页岩样品采集与分析方法

2.1 油页岩样品采集

本研究重点对茂名盆地 2 处典型的油页岩样品进行采样,具体采样点见图 1b; 采样点 1 为茂南区金塘镇牙象村采坑处位置(21°42′56.59″N, 110°52′26.92″E),共采集样品 6 件(J-Y-1—J-Y-6);

采样点 2 为茂南区油页岩露天采矿场(21°42′13.23″N, 110°53′23.56″E),共采集 12 件油页岩样品(J-L-1—J-L-12)。样品均为始新统油柑窝组油页岩,岩性特征主要为褐黑色油页岩,夹少量黏土岩、细粒砂岩、粉砂岩、褐煤和泥质灰岩,富含爬行类、鱼类、孢粉和植物化石。

2.2 油页岩分析实验方法

将油页岩样品表层剥离,以降低风化作用对

地球化学结果的潜在影响,然后粗碎,再用刚玉和玛瑙机械碎样机将样品研磨成粒径<200 目的粉末。

油页岩主量元素分析测试在澳实分析检测(广州)有限公司完成,首先称取样品粉末 0.5 g,加入助熔剂充分混合后将混合物倒入铂金坩埚,然后将盛有样品的坩埚送入制玻璃片机上,1200 ℃ 熔融,制成扁平玻璃片,称量玻璃片质量,用于数据校正,最后用 X 射线荧光光谱仪测定^[20]。

油页岩微量元素分析测试在广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室使用 ICP-MS Thermo X2 型电感耦合等离子质谱仪进行。首先称取约 1 g 200 目样品粉末,送入马弗炉中在 700 ℃ 下加热 2 h,除去有机质,然后准确称取 50 mg 样品,装入特氟龙消解罐中,并加入浓硝酸和氢氟酸各 1 mL,190 ℃ 下反应 48 h,冷却后蒸干。蒸干后向消解罐

中再次加入 1 mL 浓硝酸,再次蒸干。之后向消解罐中加入纯水、浓硝酸和 1×10^{-6} 的 In 内标各 1 mL,在 190 ℃ 烘箱中放置 12 h。待样品冷却后,将样品移至塑料瓶中用 2% 硝酸定容至 10 mL,摇匀后置于 ICP-MS 进行测量^[21]。

3 油页岩分析测试结果

3.1 油页岩主量元素地球化学特征

南海西北部陆缘油页岩 SiO₂ 含量介于 37.4%~60.6%,平均值为 46.6%。Al₂O₃ 含量介于 16.3%~23.2%,平均值为 19.6%。SiO₂/Al₂O₃ 介于 1.78~3.56,平均值为 2.42(表 1)。SO₃ 含量较高,含量介于 0.39%~1.42%,平均值为 0.84%,说明油页岩中硫化物含量较高。

表 1 茂名始新统油柑窝组油页岩主量元素含量

Table 1 Major element content of the Maoming oil shale in the Eocene Youganwo Formation

样品号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ T	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	BaO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO ₂	LOI	Total
J-L-1	45.60	17.80	2.40	0.99	0.09	2.35	0.04	0.50	0.04	0.06	0.39	0.01	28.95	99.22
J-L-2	45.20	16.30	2.83	0.85	0.09	2.19	0.03	0.50	0.04	0.04	0.68	<0.01	30.66	99.41
J-L-3	45.80	17.30	2.36	0.92	0.06	2.30	0.03	0.50	0.04	0.05	0.41	<0.01	29.48	99.25
J-L-4	46.50	17.45	2.18	0.94	0.06	2.31	0.04	0.52	0.05	0.05	0.47	0.01	29.30	99.88
J-L-5	37.40	21.00	4.84	0.98	0.06	1.93	0.01	0.44	0.02	0.03	1.10	0.01	31.42	99.24
J-L-6	38.60	21.30	5.53	1.00	0.06	2.12	0.02	0.43	0.02	0.03	1.16	<0.01	29.78	100.05
J-L-7	43.60	21.50	2.55	0.75	0.04	1.88	0.02	0.56	0.03	0.03	0.58	<0.01	27.62	99.16
J-L-8	47.70	23.20	2.44	0.76	0.03	2.04	0.03	0.61	0.03	0.04	0.65	<0.01	21.53	99.06
J-L-9	41.30	23.20	2.99	0.71	0.05	1.60	0.02	0.54	0.02	0.03	0.74	0.01	28.21	99.42
J-L-10	38.90	21.20	5.41	1.06	0.05	2.18	0.03	0.42	0.04	0.08	1.39	0.01	29.23	100.00
J-L-11	44.40	21.90	2.70	0.76	0.03	1.94	0.03	0.55	0.03	0.03	0.61	<0.01	26.19	99.17
J-L-12	38.80	21.30	4.75	1.04	0.05	2.19	0.02	0.42	0.04	0.08	1.11	0.01	30.21	100.02
J-Y-1	47.40	18.30	10.74	0.78	0.58	2.18	0.06	0.54	0.05	0.70	0.40	0.08	17.74	99.55
J-Y-2	60.60	17.00	6.22	0.59	0.14	1.65	0.05	0.50	0.04	0.10	1.28	0.03	11.96	100.16
J-Y-3	57.90	18.20	5.99	0.66	0.12	1.76	0.05	0.53	0.04	0.09	0.97	0.02	13.83	100.16
J-Y-4	55.10	18.50	9.75	0.59	0.12	1.66	0.06	0.58	0.04	0.08	1.25	0.04	12.65	100.42
J-Y-5	56.00	18.80	7.48	0.59	0.12	1.71	0.05	0.57	0.04	0.08	1.42	0.03	13.70	100.59
J-Y-6	49.00	18.85	7.52	0.63	0.09	1.76	0.05	0.57	0.04	0.09	0.44	0.02	20.68	99.74

注:Fe₂O₃T表示全铁含量,<0.01表示低于检测限。

采用平均大陆上地壳(UCC)对油页岩主量元素进行标准化^[22-23]发现主量元素含量与 UCC 差别很大:Al₂O₃ 含量明显富集,富集系数全部超过 1.5,最高为 2.15;露天矿油页岩全铁含量有 4 个样品明显富集,8 个样品明显亏损,而牙象村整体都呈现出全铁富集;MgO 含量亏损严重,约为平均

上地壳含量的一半;CaO、Na₂O 和 MnO₂ 含量极度亏损,比例系数约为 0.1;K₂O 和 TiO₂ 含量与平均大陆上地壳接近;除了样品 J-Y-I 外,P₂O₅ 明显亏损,且含量分布较为分散。2 组样品主量元素标准化后(图 2)相似:露天矿样品 Al₂O₃ 和 K₂O 含量更高,牙象村全铁含量更高。

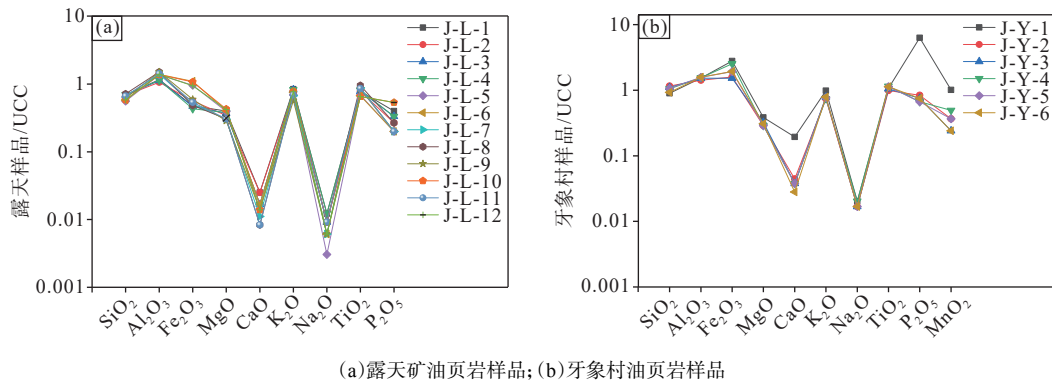


图 2 茂名油页岩主量元素 UCC 标准化

Fig.2 The UCC (Upper Continental Crust) normalization of major elements in the Maoming oil shales

3.2 油页岩微量元素地球化学特征

油页岩中微量元素及稀土元素含量见表 2、3。由微量元素 UCC 标准化结果(图 3)可知,与平均大陆上地壳相比,茂名油柑窝组油页岩中微量元素 Rb、Cs、Th、U、Nb、Ta、Pb、Y 均富集;Sr、Ba、Zr、Sr、Hf 和 Cr 基本亏损;Sc、Co、Ni 部分亏损,部分富集;V 的含量与平均上大陆地壳接近。

3.3 油页岩稀土元素地球化学特征

露天矿油页岩 REE 含量介于(190.84~723.55)

$\times 10^{-6}$, 平均值为 382.43×10^{-6} 。(La/Lu)_N(N 是球粒陨石的归一化值)介于 9.42~15.74, 平均值为 12.81(表 3)。 δCe 介于 0.87~1.01, 平均值为 0.95, 与平均大陆上地壳和北美页岩的 0.99 接近, Ce 异常不明显(表 3)。 δEu 介于 0.52~0.59, 平均值为 0.56, 低于北美页岩的 0.65 和平均大陆上地壳的 0.71, Eu 负异常明显(表 3)。稀土元素配分曲线可判别沉积物物源和环境^[24-26], 在北美页岩^[27]标准化曲线中,露天矿和牙象村油页岩(图 4)有着相似的稀土元素分配曲线,均表现出 Eu 负异常明显。

表 2 茂名始新统油柑窝组油页岩微量元素含量

Table 2 Trace element content of the Maoming oil shales in the Eocene Youganwo Formation

样品号	Sc	Rb	Cs	Ba	Th	U	Nb	Ta	Pb	Sr	Zr	Hf	Y	V	Cr	Co	Ni
J-L-1	13.3	248.5	53.61	624.4	35.84	14.33	16.04	1.731	55.27	123	170	5.238	42.37	102.9	70.92	11.48	25.71
J-L-2	12.9	236.2	52.49	571.6	34.24	12.25	15.49	1.684	46.33	98.44	178.2	5.424	33.94	94.27	74.34	9.338	24.76
J-L-3	12.49	248	52.73	631.2	33.58	11.4	15.79	1.718	51.1	123.3	178.2	5.409	39.13	86.57	70.6	7.84	22.92
J-L-4	12.4	245.5	52.92	622.3	32.36	11.16	16.15	1.718	34.73	116.7	184.6	5.603	39.71	85.98	69.73	8.449	24.21
J-L-5	21.22	232.6	43.46	373.5	43.12	8.916	16.52	1.503	44.8	51.85	110	3.471	54.99	114.2	89.35	42.71	76.15
J-L-6	11.87	246.1	48.34	394.1	42.55	9.109	15.77	1.418	44.28	50.32	114.6	3.57	46.42	104.8	84.1	35.64	68.74
J-L-7	10.75	216.4	36.04	374.1	29.37	7.16	21.74	1.937	40.23	52.73	131.2	3.92	38.87	90.19	69.84	8.664	32.25
J-L-8	10.69	212.6	35.54	412.1	31.73	7.076	22.47	2.01	34.62	51.19	125.6	3.758	34.04	88.24	63.62	7.465	27.09
J-L-9	11.98	180.8	38.57	256.8	40.47	10.49	20.71	1.882	39.08	62.99	113.2	3.405	39.5	99.94	75.01	19.46	48.52
J-L-10	15.66	247	53.03	609	41.74	10.98	15.18	1.366	42.68	123.5	125.5	3.812	120	103.9	85.1	35.73	64.45
J-L-11	9.538	221.1	37.68	391.5	17.56	5.341	20.59	1.834	55.12	51.19	126.4	3.764	31.81	88.68	69.91	7.127	29.61
J-L-12	12.06	260.2	53.77	568.8	39.19	8.929	15.21	1.361	40.99	116.2	127.2	3.875	142.9	103.3	89.4	25.92	55.2
J-Y-1	15.79	215.1	25.19	609	41.5	7.541	19.79	1.767	44.89	107.5	91.69	2.634	62.32	92.18	49.68	12.82	30.18
J-Y-2	12.18	143.3	20.65	409.7	33.46	7.569	16.86	1.565	39.24	86.12	130.1	3.753	33.99	82.47	92.55	13.09	27.06
J-Y-3	13.84	163.6	23.29	439.8	35.27	8.245	17.8	1.634	41.55	85.8	140.4	4.055	36.01	90.56	83.55	11.58	26.09
J-Y-4	15.77	157.1	23.32	472.3	38.25	8.873	18.87	1.704	45.35	80.34	96.35	2.844	48.25	98.04	74.26	12.5	29.57
J-Y-5	15.9	162.5	24.18	491.6	39.2	9.202	19.46	1.771	46.99	83.74	102.4	3.042	49.75	101.6	76.68	13.04	30.6
J-Y-6	16.01	159.5	23.71	480.1	37.58	8.945	19.01	1.691	49.67	83.31	97.85	2.804	52.75	100.5	72.24	13.3	31.49

表 3 茂名始新统油柑窝组油页岩稀土元素含量及特征

Table 3 Rare earth element content and characteristics of the Maoming oil shales in the Eocene Youganwo Formation

样品号	元素含量/ 10^{-6}															δCe	δEu	$(\text{La/Lu})_N$
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE			
J-L-1	83.35	166.5	19.85	74.91	13.96	2.557	12.92	1.719	8.972	1.635	4.668	0.655	4.263	0.625	396.584	0.95	0.58	14.28
J-L-2	66.09	130	15.32	56.44	10.11	1.862	9.504	1.248	6.731	1.277	3.797	0.561	3.71	0.557	307.207	0.95	0.58	12.71
J-L-3	80.43	156	18.33	68.78	12.64	2.35	11.8	1.553	8.099	1.471	4.262	0.599	3.892	0.58	370.786	0.94	0.59	14.85
J-L-4	84.36	158.3	18.3	68.56	12.71	2.349	11.96	1.572	8.242	1.484	4.28	0.604	3.928	0.577	377.226	0.93	0.58	15.66
J-L-5	76.52	159	19.3	73.38	14.28	2.659	13.73	1.952	10.81	2.03	5.869	0.843	5.469	0.803	386.645	0.97	0.58	10.21
J-L-6	71.96	146.6	17.67	66.63	12.7	2.293	11.84	1.647	9.023	1.69	4.978	0.714	4.665	0.684	353.094	0.96	0.57	11.27
J-L-7	60.96	110.5	13.03	47.75	8.802	1.582	9.076	1.263	7.307	1.424	4.191	0.596	3.87	0.573	270.924	0.9	0.54	11.39
J-L-8	59.33	108.7	12.7	45.77	8.08	1.45	8.15	1.106	6.288	1.23	3.654	0.527	3.437	0.516	260.938	0.91	0.55	12.31
J-L-9	74.23	142.6	16.54	60.43	11.14	1.952	10.8	1.422	7.687	1.444	4.193	0.596	3.841	0.56	337.435	0.94	0.54	14.2
J-L-10	118.6	270	34.57	145.8	27.64	5.288	28.43	3.963	20.57	3.697	10.04	1.321	8.004	1.143	679.066	1	0.58	11.11
J-L-11	44.53	76.52	8.96	32.17	5.856	1.108	6.25	0.911	5.548	1.126	3.467	0.504	3.381	0.506	190.837	0.87	0.56	9.42
J-L-12	121.5	284.7	37.1	158.3	30.06	5.733	31.29	4.373	23.06	4.23	11.53	1.501	8.911	1.264	723.552	1.01	0.57	10.29
J-Y-1	104.5	196.7	20.78	76.41	13.82	2.393	14.37	1.905	10.51	1.977	5.644	0.766	4.843	0.711	455.329	0.96	0.52	15.74
J-Y-2	60.72	117.4	13.43	49.17	8.95	1.524	8.775	1.163	6.399	1.202	3.577	0.517	3.446	0.503	276.776	0.95	0.53	12.93
J-Y-3	66.56	129.7	14.82	54.37	9.756	1.698	9.734	1.258	6.875	1.289	3.79	0.544	3.621	0.524	304.539	0.95	0.53	13.6
J-Y-4	79.12	162.7	18.87	70.53	12.97	2.405	12.7	1.713	9.305	1.704	4.882	0.692	4.431	0.64	382.662	0.98	0.57	13.24
J-Y-5	80.83	163.8	19.49	72.75	13.39	2.506	13.26	1.776	9.516	1.756	5.052	0.713	4.66	0.664	407.18	1	0.58	13.28
J-Y-6	82.82	174.1	20.09	75.18	13.78	2.599	13.74	1.845	9.898	1.829	5.248	0.733	4.65	0.668	402.949	0.99	0.53	14.07

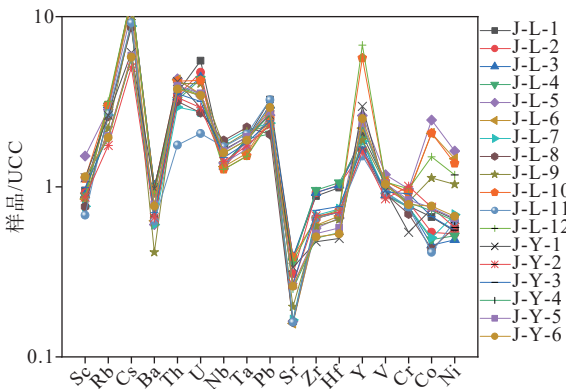
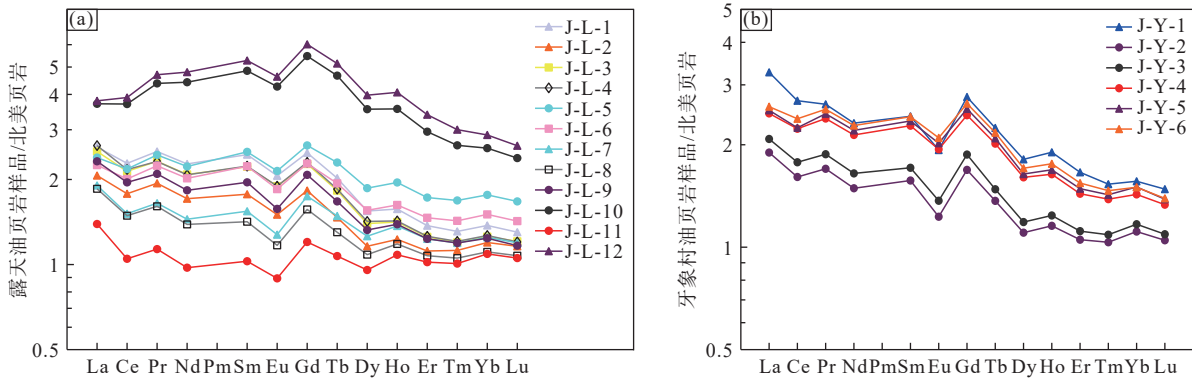


图 3 茂名油页岩微量元素 UCC 标准化

Fig.3 The UCC normalization curves of trace elements in the Maoming oil shales



(a) 茂名露天矿油页岩样品; (b) 茂名牙象村油页岩样品

图 4 茂名油页岩稀土元素北美页岩标准化

Fig.4 The NASC (North American Shale Composite) normalization curves of rare earth elements in the Maoming oil shales

4 讨论

4.1 茂名油页岩地球化学特征之主控因素

4.1.1 化学风化作用的影响

元素的丢失程度取决于风化强度^[28-29], NES-BITT 和 YOUNG 提出利用化学蚀变指数(CIA)来定量评价岩石遭受风化作用的强度^[30], $CIA=100\times [Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)]$, 式中各元素含量采用摩尔百分比, 其中, CaO^* 表示硅酸盐中 CaO 的摩尔百分比。本次计算中采用 BOCK 等^[31] 的 CaO^* 计算方法: 当 $CaO>Na_2O$ 含量时, $CaO^*=Na_2O$;

当 $\text{CaO} \leq \text{Na}_2\text{O}$ 时, $\text{CaO}^* = \text{CaO}$ 。2组样品 CIA 指数如表 4 所示, 茂名油页岩样品 CIA 指数介于 88.68~93.91(平均值为 90.00), 化学风化作用强。在 A-CN-K 图中(图 5)2组样品投点几乎与 A-K 边重合, 表明样品中黏土矿物曾发生过钾交代作用, 计算发现钾交代作用导致样品加入的 K_2O 均低于总 K_2O 的 3%, 样品真实的 CIA 指数更高。

表 4 茂名始新统油页岩 CIA 指数

Table 4 The CIA index of the Eocene Maoming oil shales

样品号	CIA	样品号	CIA
J-L-1	88.75	J-L-10	91.26
J-L-2	88.75	J-L-11	91.26
J-L-3	88.75	J-L-12	91.26
J-L-4	88.75	J-Y-1	91.26
J-L-5	88.75	J-Y-2	91.26
J-L-6	88.75	J-Y-3	91.26
J-L-7	88.75	J-Y-4	91.26
J-L-8	88.75	J-Y-5	91.26
J-L-9	88.75	J-Y-6	91.26

一些高场强元素 Th/Co、La/Co、Zr/Y 等, 记录了母岩的化学组成, 能用于沉积岩物源判别^[30-32]。在回归分析中, 露天矿样品 La/Co 比值与 Al_2O_3 含量的相关系数 R^2 值为 0.3022, 而牙象村样品的相关系数 R^2 为 0.3030, 2处样品 La/Co 比值与 Al_2O_3 含量的相关关系不明显。露天矿样品 Th/Co 比值与 Al_2O_3 含量的相关系数 R^2 为 0.2076, 牙象村样品的相关系数 R^2 为 0.3704, 2处样品 Th/Co 比值

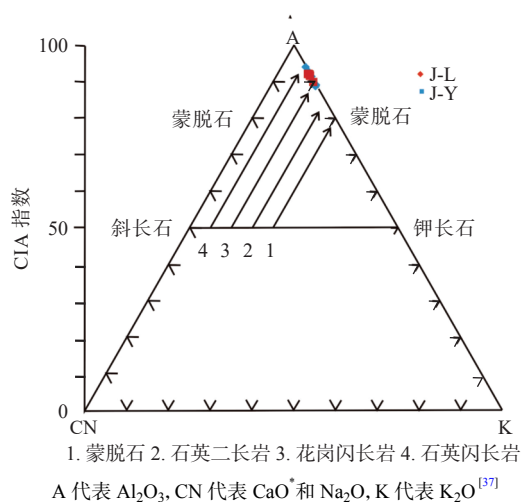


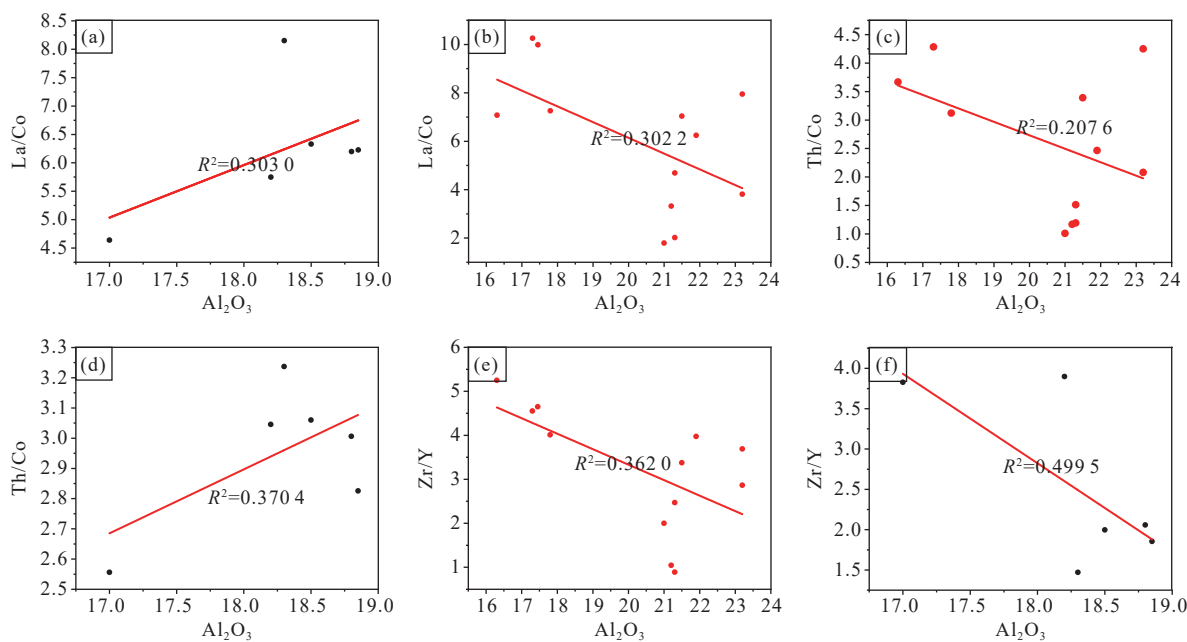
图 5 茂名油页岩 A-CN-K 图

Fig.5 The A-CN-K triangle of the Maoming oil shales

与 Al_2O_3 含量的相关关系不明显。露天矿样品 Zr/Y 比值与 Al_2O_3 含量的相关系数 R^2 为 0.3620, 说明露天矿样品 Zr/Y 比值与 Al_2O_3 含量相关关系不显著; 牙象村样品 Zr/Y 比值与 Al_2O_3 含量的相关系数 R^2 为 0.4995, 牙象村样品 Zr/Y 比值与 Al_2O_3 含量相关关系显著(图 6)。其他元素比值与 Al_2O_3 含量相关关系不明显。

4.1.2 沉积分选与再循环作用

沉积分选与再循环往往会使得重矿物富集, 部分元素富集^[33]。牙象村样品 $(\text{Gd/Yb})_N$ 比值均 >2.0 , 露天矿样品除 3 个样品比值 <2.0 外, 其余 9 个样



(a)(d)(f)为牙象村样品; (b)(c)(e)为露天矿场样品

图 6 油页岩样品微量元素与 Al_2O_3 相关性分析

Fig.6 Analysis in correlation between trace elements and Al_2O_3 of the Maoming oil shales

品比值均 >2.0 (表 5),表明发生了轻稀土元素的富集。Zr 元素主要集中在锆石中,锆石稳定性很强,会随着沉积再循环作用富集在矿物中。而 Th 和 Sc 难溶于水,且沉积循环过程中不会发生分馏^[34],因此,随着沉积再循环过程中锆石的富集,Zr/Sc 将增大而 Th/Sc 比值不变^[35]。露天矿样品和牙象村样品中 Th/Sc 比值基本不变,Zr/Sc 比值变化较大,2 组样品投影点与沉积再循环趋势线近似平行(图 7a),样品受到了沉积再循环作用的影响。但是从 Zr 含量来看,2 组样品相对于 UCC 均表现为 Zr 亏损;露天矿样品中除 2 个样品 Zr/Sc 高于 UCC,其余均比 UCC 低,而牙象村样品 Zr/Sc 比值皆低于 UCC,沉积再循环的影响不大。化学风化作用对主量元素影响较大,对高场强元素及稀土元素影响较小;沉积分选和再循环作用除使轻稀土富集外,对微量元素的影响较小。因此,茂名油页岩化学组成仍然保留源区特征。

表 5 茂名油页岩样品元素比值

Table 5 The element ratio of Maoming oil shales

样品号	(Gd/Yb) _N	Cr/Zr	La/Co	Th/Cr	Sr/Cu	Rb/Sr	Sr/Ba	V/(V+Ni)
J-L-1	2.45	0.42	7.26	0.51	2.12	2.02	0.2	0.8
J-L-2	2.07	0.42	7.08	0.46	1.45	2.4	0.17	0.79
J-L-3	2.45	0.4	10.26	0.48	2.66	2.01	0.2	0.79
J-L-4	2.46	0.38	9.98	0.46	2.55	2.1	0.19	0.78
J-L-5	2.03	0.81	1.79	0.48	0.89	4.49	0.14	0.6
J-L-6	2.05	0.73	2.02	0.51	0.62	4.89	0.13	0.6
J-L-7	1.89	0.53	7.04	0.42	1.93	4.1	0.14	0.74
J-L-8	1.91	0.51	7.95	0.5	2.04	4.15	0.12	0.77
J-L-9	2.27	0.66	3.81	0.54	1	2.87	0.25	0.67
J-L-10	2.87	0.68	3.32	0.49	1.33	2	0.2	0.62
J-L-11	1.49	0.55	6.25	0.25	1.93	4.32	0.13	0.75
J-L-12	2.83	0.7	4.69	0.44	2.01	2.24	0.2	0.65
J-Y-1	2.39	0.54	8.15	0.84	3.67	2	0.18	0.75
J-Y-2	2.05	0.71	4.64	0.36	3.02	1.66	0.21	0.75
J-Y-3	2.17	0.6	5.75	0.42	2.75	1.91	0.2	0.78
J-Y-4	2.31	0.77	6.33	0.52	2.42	1.96	0.17	0.77
J-Y-5	2.38	0.74	6.23	0.54	2.3	1.91	0.17	0.76
J-Y-6	2.34	0.57	5.15	0.56	1.86	2.97	0.12	0.75

4.2 茂名油页岩物源分析判别

研究表明,碎屑沉积岩中 K 和 Rb 的含量可以反映沉积物源区的特征^[36-37]。茂名盆地油页岩中 Rb 和 K₂O 含量较高(Rb 含量均高于 UCC, K₂O $>1\%$),计算得出钾交代作用导致样品加入的 K₂O 均低于总 K₂O 的 3%,因此,我们仍然使用 Rb-K₂O 来进行物源识别样品,结合 A-CN-K 图分析表明,油

页岩物源介于花岗闪长岩和石英闪长岩之间,为中酸性火成物源区(图 5)。

由于稀土元素(REE)、高场强元素和某些过渡元素在水中溶解度极低,在沉积搬运过程中基本保持不变,利用这些元素能有效地判别物源组成^[22]。Zr 主要赋存在锆石中,Cr 主要赋存在铬铁矿中,分别代表长英质组分和镁铁质组分,Cr/Zr 能够反映物源区镁铁质组分和长英质组分的相对含量^[38]。露天矿样品 Cr/Zr 比值介于 0.38~0.81,平均值为 0.57,显示长英质组分与镁铁质组分含量相当,为中酸性火成物源(表 5);牙象村样品 Cr/Zr 比值介于 0.54~0.77,平均值为 0.68,显示镁铁质组分稍微占优势(表 5)。从 Cr/Zr 比值可以看出,2 组样品物源均为中酸性火成来源,露天矿样品酸性组分含量更高。在 La/Th-Hf 图(图 7b)中,除 4 个露天矿样品落入酸性岛弧物源区外,其他样品都落在长英质、基性岩混合物源区。

与基性岩相比,酸性岩明显富集 La 和 Th,贫 Cr、Sc 和 Co,因此,La/Cr、La/Co、Th/Sc 和 Th/Cr 这些微量元素比值可以用于研究物源^[39]。露天矿油页岩 La/Co 比值介于 1.79~10.26(UCC 为 1.79),Th/Cr 比值介于 0.25~0.54(UCC 为 0.11)(表 5);牙象村油页岩 La/Co 比值介于 4.67~8.15(UCC 为 1.79),Th/Cr 比值介于 0.36~0.84(UCC 为 0.11)(表 5),La/Co 和 Th/Cr 比值显示 2 组样品物源为硅质岩石(如花岗闪长岩至花岗岩)。

在 La-Th-Sc 三角图(图 7c)中,所有样品投点介于花岗岩与花岗闪长岩之间;在 Co/Y-Ti/Zr 物源判别图(图 7d)中,茂名油页岩样品投点接近 TTG(太古宇英云闪长岩组合)。

由各种物源判别方法可以看出,2 组样品物源均为中酸性火成岩,其平均化学组成介于花岗岩与花岗闪长岩之间,比较接近 TTG。

4.3 茂名油页岩沉积环境探讨

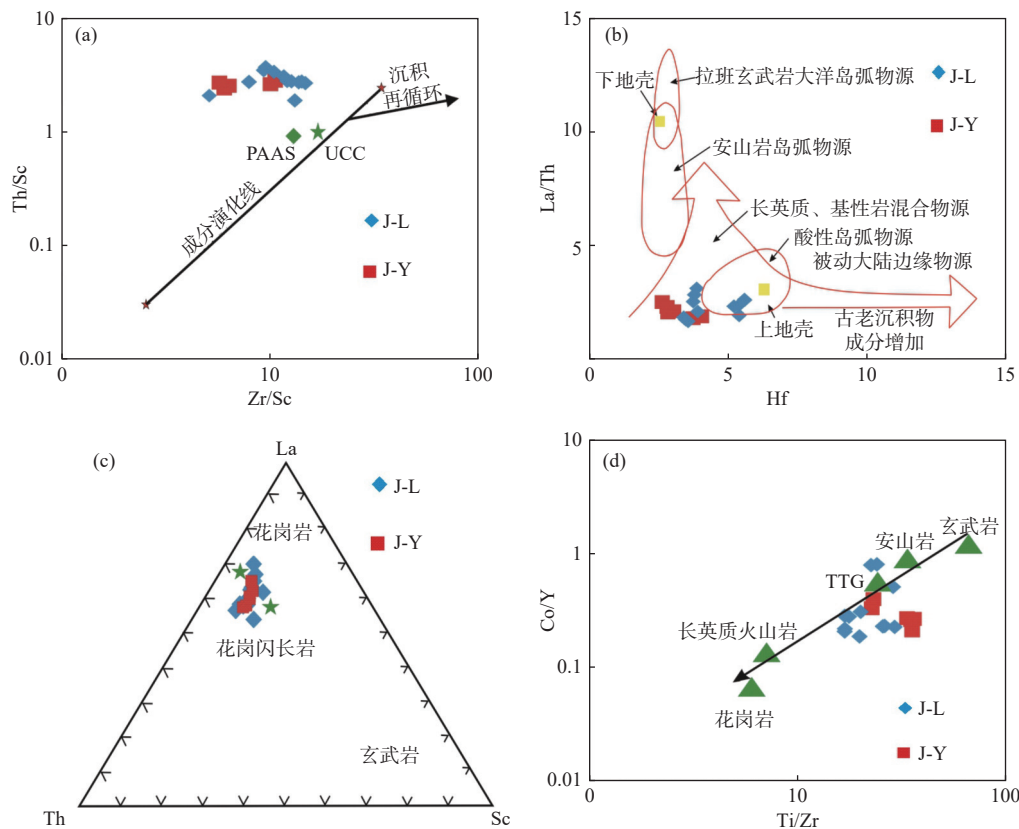
古气候能影响碎屑沉积岩的地球化学特征,而碎屑沉积岩的地球化学特征也能用于反演古气候。茂名盆地油页岩样品 CIA 指数约为 90,反映出炎热、潮湿的气候条件^[28,40]。潮湿气候条件下沉积物 Sr/Cu 比值低(<5.0),寒冷条件下 Sr/Cu 比值高(>5.0)^[41-42]。茂名油页岩 Sr/Cu 比值介于 0.62~3.67(表 5),反映出油页岩形成时气候潮湿。油页岩 Rb/Sr 比值介于 1.66~4.89,均高于 UCC 的 0.26。因此,Rb/Sr 比值也显示油页岩沉积时期气候温

暖潮湿^[43]。珠三坳陷恩平组和文昌组的 Sr/Cu 比值均 <10 , 沉积时温暖湿润的古气候和茂名油柑窝组相似^[44], 为优质烃源岩的形成提供了有利条件。

油柑窝组油页岩沉积时主要为湖沼相以及半深湖相, 湖水盐度对于生物类型以及湖水的化学性质有着重要影响。当湖水不断咸化、矿化度增高时, 由于 Ba 盐溶解度低, Ba 先以硫酸钡的形式沉淀, 而 Sr 只有当湖水或海水浓缩到一定程度后才会以硫酸锶的形式沉淀下来, 因此, 在湖水盐度升高的同时, Sr/Ba 比值也会增大, 故 Sr/Ba 比值可作为古盐度的标志^[45-47]。在湖相沉积中, Sr/Ba >1 指示咸水介质, Sr/Ba <1 指示淡水沉积环境^[45]。露天矿油页岩 Sr/Ba 比值介于 0.12~0.25, 平均值为 0.17; 牙象村油页岩样品 Sr/Ba 比值介于 0.17~0.21, 平均有值为 0.18(表 5); 2 组样品 Sr/Ba 比值均 <0.6 , 油柑窝组为淡水湖相沉积。研究表明, 茂名盆地邻近的北部湾盆地沉积物由浅到深逐渐呈现出 Sr/Ba 比值从小于 1 逐渐增大到 8 的变化, 表明了陆相沉积到咸水沉积转变, 与茂名盆地有差别^[48]。

在自然状态下, 氧化还原反应对一些变价元素

(如 V、U、Mo 等) 的迁移、共生、沉淀有着重要的控制作用^[49]。且成岩作用对 REE、Th、U、Ni、Co、Zn、Cd 等大部分过渡元素的影响较小^[50-51]。因此, 这些微量元素、稀土元素在不同沉积环境中表现出的行为差异以及成岩演化过程中的相对稳定性可以反演原始的沉积环境信息^[49]。温度的变化能够引起湖泊产生季节性的回水活动, 这会破坏湖泊垂向分层体系, 温暖湿润的气候会带来大量的降水, 导致湖泊水体变深。表层水体很难达到湖底, 所以湖底就变为缺氧环境, 有利于有机质的保存。在还原条件下, V 和 Sc 具有相似的不溶性, 沉积物中 V 与 Sc 的含量成比例变化^[49]。此外, V/(V+Ni) 不仅能指示氧化还原条件外, 还能指示水体分层情况^[52]: 当 V/(V+Ni) 比值介于 0.46~0.60 时, 水体弱分层, 为贫氧环境; 当比值介于 0.54~0.82 时, 水体分层较强, 为厌氧环境; 当比值介于 0.84~0.89 时, 水体分层稳定, 为底水出现 H₂S 的还原环境^[52]。茂名矿油页岩 V 与 Sc 含量的相关系数分别为 0.72 和 0.91, 样品中 V 与 Sc 含量的相关关系显著(图 8)。此外, 露天矿油页岩 V/(V+Ni) 比值介于 0.60~0.80(表 5),



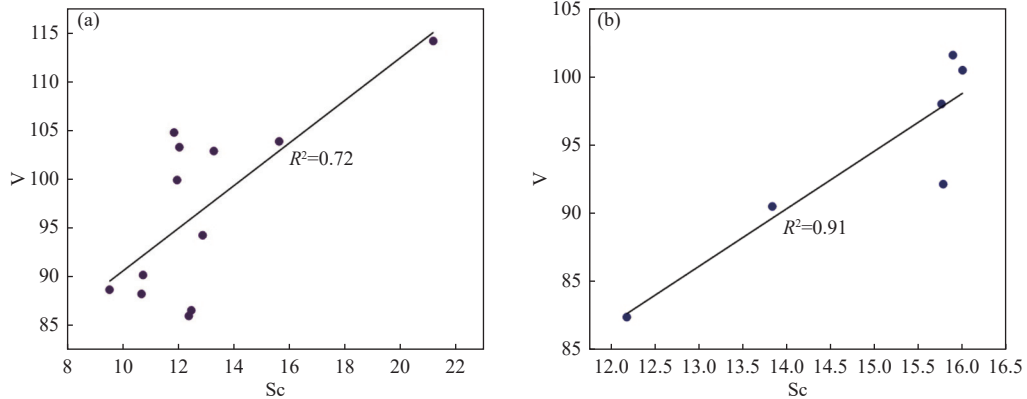
(a) 茂名油页岩 Th/Sc-Zr/Sc 图^[40]; (b) 茂名油页岩样品 La/Th-Hf 图^[46]; (c) 茂名油页岩 La-Th-Sc 物源分析三角图^[51]; (d) 茂名油页岩 Co/Y-Ti/Zr 物源判别图^[53]

图 7 茂名油页岩元素判别图

Fig.7 Element discrimination of the Maoming oil shales

平均值为 0.71; 牙象村样品 $V/(V+Ni)$ 比值介于 0.75~0.78, 平均值为 0.76。从 V 与 Sc 含量的相关

关系, 以及 $V/(V+Ni)$ 比值来看, 油柑窝组油页岩沉积时水体分层较强, 为缺氧还原环境。



(a)露天油页岩; (b)牙象村油页岩

图 8 茂名油页岩 V-Sc 相关图

Fig.8 V vs. Sc correlation diagram of the Maoming oil shales

喜山期高棚岭断裂及其他 NW 向断裂等区域构造地质背景的控制影响形成了断陷型半地堑式构造盆地, 湖盆水体加深, 水域变宽, 水流变得稳定等因素, 亦为油页岩层的形成创造了足够的空间, 有利于有机质大量富集。CIA 指数较高和 Sr/Cu 和 Rb/Sr 比值较低, 表明盆地具有炎热、潮湿的气候条件。此外, 湖水分层形成时的缺氧环境则有利于有机质富集保存和最终油页岩形成。茂名盆地、北部湾盆地、珠三坳陷均发育于新生代断陷和裂陷环境, 烃源岩以陆相或海陆过渡相为主, 受构造活动强烈影响^[54-55], 珠江口盆地文昌组烃源岩厚度变化大, 深水区白云凹陷烃源岩潜力大, 北部湾盆地流沙港组烃源岩厚度稳定, 但凹陷中心埋深大, 勘探程度较低, 因此, 茂名油页岩的研究开发可推动南海西北陆缘其他盆地油气资源的进一步开发。

5 结论

(1) 茂名盆地始新统油页岩母岩的化学风化作用强烈, 导致样品中黏土矿物发生钾交代。但一些高场强元素与稀土元素受到化学风化作用的影响较小, 故中轻稀土富集。此外, 沉积物再循环作用对油页岩地球化学组成影响较弱。

(2) 始新统油柑窝组油页岩无机碎屑来源于中酸性火成岩, 母岩平均化学成分介于花岗岩与花岗闪长岩之间, 与 TTG 接近。油柑窝组油页岩沉积时期气候温暖潮湿, 且湖水盐度低, 分层较强, 处于缺氧状态, 有利于有机质富集保存, 这与以往的有

机地球化学分析结果基本吻合。

(3) 茂名盆地独特的构造活动及沉积环境, 为油柑窝组油页岩形成提供了有利地质条件, 其中, 炎热潮湿的环境有利于大量生物繁殖和有机质富集, 而湖水分层等其他因素形成的还原环境, 则有利于有机质保存, 进而为茂名油柑窝组油页岩形成提供了极好的地质条件和沉积环境。

参考文献:

- [1] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
JIA C Z, ZHENG M, ZHANG Y F, et al. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 刘招君, 董清水, 叶松青, 等. 中国油页岩资源现状 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2006, 36(6): 869-876.
LIU Z J, DONG Q S, YE S Q, et al. The situation of oil shale resources in China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(6): 869-876.
- [3] HAN X, KULAOTS I, JIANG X, et al. Review of oil shale semicoke and its combustion utilization [J]. FUEL, 2014, 126: 143-161.
- [4] 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 Z J, LIU R. Oil shale resource state and evaluating system [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 315-323.
- [5] 郭敏, 周明文, 李瑞, 等. 广东茂名盆地油页岩成矿因素分析 [J]. 华南地质与矿产, 2009, 25(2): 47-51.
GUO M, ZHOU M W, LI R, et al. Analysis on oil shale forming conditions in Maoming Basin of Guangdong Province [J]. South China Geology, 2009, 25(2): 47-51.

- [6] 李殿超, 朱建伟, 严焕榕, 等. 广东省茂名盆地油页岩的沉积特征及分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 938-943.
- LI D C, ZHU J W, YAN H R, et al. Sedimentary characteristics and distribution rule of oil shale in Maoming Basin in Guangdong Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(6): 938-943.
- [7] 肖贤明, 金奎励. 应用光学方法恢复过成熟干酪根原始母质类型[J]. 现代地质, 1990, 4(4): 89-95.
- XIAO X M, JIN K L. The recovery of primary of post-mature kerogen on the base of optical method[J]. Geoscience, 1990, 4(4): 89-95.
- [8] 傅家谟, 徐芬芳, 陈德玉, 等. 茂名油页岩中生物输入的标志化合物[J]. 地球化学, 1985(2): 99-114.
- FU J M, XU F F, CHEN D Y, et al. Biomarker compounds of biological inputs in Maoming oil shales[J]. Geochimica, 1985(2): 99-114.
- [9] 曹涛涛, 刘虎, 肖娟宜, 等. 茂名盆地油柑窝组油页岩古环境恢复与有机质聚集机制[J]. 地球科学, 2024, 49(4): 1367-1384.
- CAO T T, LIU H, XIAO J Y, et al. Paleoenvironmental reconstruction and organic matter accumulation mechanism for Youganwo Formation oil shale in Maoming Basin[J]. Earth Science, 2024, 49(4): 1367-1384.
- [10] 孟庆涛, 李金国, 刘招君, 等. 茂名盆地羊角含矿区始新统油柑窝组油页岩有机地球化学特征及沉积环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 356-367.
- MENG Q T, LI J G, LIU Z J, et al. Organic geochemical characteristics and depositional environment of oil shale of Eocene of Paleocene Youganwo Formation in Yangjiao Mining area of Maoming Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 356-367.
- [11] BRASSELL S C, EGLINTON G, MO F J. Biological marker compounds as indicators of the depositions history of the Maoming oil shale[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(4/6): 927-941.
- [12] LIU Z, MENG Q, DONG Q, et al. Characteristics and resource potential of oil shale in China[J]. Oil Shale, 2017, 34(1): 15-41.
- [13] LI S, QIAN J. Study of the pyrolysis of Maoming oil shale lumps[J]. Fuel, 1991, 70(12): 1371-1375.
- [14] 陈会军, 刘招君, 朱建伟, 等. 相似类比面积丰度法估算油页岩资源潜力: 以茂名盆地为例[J]. 中国地质, 2012, 39(5): 1427-1435.
- CHEN H J, LIU Z J, ZHU J W, et al. The application of the acreage bearing likelihood ratio method to assessing oil shale resources: a case study of Maoming Basin[J]. Geology in China, 2012, 39(5): 1427-1435.
- [15] LI K, WANG Q, MA H, et al. Effect of clay minerals and rock fabric on hydrocarbon generation and retention by thermal pyrolysis of Maoming oil shale[J]. Processes, 2023, 11(3): 894.
- [16] GUO S, RUAN Z. The composition of Fushun and Maoming shale oils[J]. Fuel, 1995, 74(11): 1719-1721.
- [17] ZHANG Z, VOLKMAN J K, LU H, et al. Sources of organic matter in the Eocene Maoming oil shale in SE China as shown by stepwise pyrolysis of asphaltene[J]. Organic Geochemistry, 2017, 112: 119-126.
- [18] 叶国杨. 广东省茂名盆地形成机制探讨[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(7): 141-144.
- YE G Y. Discussion on the formation mechanism of Maoming Basin, Guangdong Province[J]. West-China Exploration Engineering, 2008, 20(7): 141-144.
- [19] LIU Y, XIONG Y, LI Y, et al. Effects of oil expulsion and pressure on nanopore development in highly mature shale : evidence from a pyrolysis study of the Eocene Maoming oil shale , South China[J]. Marine And Petroleum Geology, 2017, 86: 526-536.
- [20] 杨小莉, 邵鑫, 魏立, 等. 熔融制样-X射线荧光光谱法测定钨钼矿石中主量元素及矿化元素钨钼[J]. 华南地质, 2020, 36(3): 284-289.
- YANG X L, SHAO X, WEI L, et al. Determination of major elements and trace elements (tungsten and molybdenum) in tungsten and molybdenum ores by X-ray fluorescence spectrometry with fusion sample preparation[J]. South China Geology, 2020, 36(3): 284-289.
- [21] 李冰, 周剑雄, 詹秀春. 无机多元素现代仪器分析技术[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1878-1916.
- LI B, ZHOU J X, ZHAN X C. Modern instrumental analysis of inorganic multi-elements[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1878-1916.
- [22] COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(14): 2919-2940.
- [23] RUDNICK R, GAO S. Composition of the Continental Crust[M]. Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2014: 1-51.
- [24] 李辉, 韩宗珠, 闫天浩, 等. 稀土元素配分曲线的相似性度量算法及其在黄海沉积物物源判别中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(12): 88-97.
- LI H, HAN Z Z, YAN T H, et al. Similarity measurement algorithm of REE distribution curve and its application for provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(12): 88-97.
- [25] 张晓波, 张勇, 孔祥淮, 等. 山东半岛南部近岸海域表层沉积物稀土元素的物源指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(3): 57-66.
- ZHANG X B, ZHANG Y, KONG X H, et al. Rare earth elements analysis for provenance study of surface sediments off south Shandong Peninsula[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(3): 57-66.
- [26] 宁泽, 韩宗珠, 毕世普, 等. 浙闽近岸海域表层沉积物稀土元素的物源指示[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(8): 34-44.
- NING Z, HAN Z Z, BI S P, et al. Rare earth geochemistry of coastal surficial sediments off Zhejiang and Fujian Provinces and its implications for provenance[J]. Marine Geology Frontiers

- ers, 2018, 34(8): 34-44.
- [27] HASKIN L A, HASKIN M A, FREY F A, et al. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths[J]. *Origin & Distribution of the Elements*, 1968: 889-912.
- [28] NESBITT H W. Diagenesis and metasomatism of weathering profiles, with emphasis on Precambrian paleosols[J]. *Developments in Earth Surface Processes*, 1992, 2: 127-152.
- [29] 远继东, 褚宏宪, 冯永财, 等. 渤海曹妃甸海域表层沉积物常量元素特征及其对源区风化特征的指示意义[J]. *海洋地质前沿*, 2024, 40(11): 80-90.
- YUAN J D, CHU H X, FENG Y C, et al. Geochemical characteristics of major elements in surface sediments of Caofeidian offshore area in the Bohai Sea: implications for the weathering characteristics of the source area[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(11): 80-90.
- [30] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [31] BOCK B, MCLENNAN S M, HANSON G N. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England[J]. *Sedimentology*, 2010, 45(4): 635-655.
- [32] CONWAY C M, CONDIE K C, NOLLJR P. Geochemical and detrital mode evidence for two sources of Early Proterozoic sedimentary rocks from the Tonto Basin Supergroup, central Arizona[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 87(3/4): 241-244.
- [33] WRONKIEWICZ D J, CONDIE K C. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(9): 2401-2416.
- [34] MCLENNAN S M, TAYLOR S R, MCCULLOCH M T, et al. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(7): 2015-2050.
- [35] MCLENNAN S M, MCCULLOCH M T, TAYLOR S R, et al. Effects of sedimentary sorting on neodymium isotopes in deep-sea turbidites[J]. *Nature*, 1989, 337(6207): 547-549.
- [36] SHAW D M. A review of K-Rb fractionation trends by covariance analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1968, 32(6): 573-601.
- [37] FLOYD P A, WINCHESTER J A, PARK R G. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland[J]. *Precambrian Research*, 1989, 45(1/3): 203-214.
- [38] WRONKIEWICZ D J, CONDIE K C. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: evidence for a 3.0-Ga-old continental craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(7): 1537-1549.
- [39] CULLERS R L, PODKOVRTOV V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling[J]. *Precambrian Research*, 2000, 104(1/2): 77-93.
- [40] 夏邦栋, 钟立荣, 方中, 等. 下扬子区早三叠世孤峰组层状硅质岩成因[J]. *地质学报*, 1995, 69(2): 125-137.
- XIA B D, ZHONG L R, FANG Z, et al. The origin of cherts of the Early Permian Gufeng Formation in the lower Yangtze area, eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1995, 69(2): 125-137.
- [41] 邓宏文, 钱凯. 试论湖相泥质岩的地球化学二分性[J]. *石油与天然气地质*, 1993, 14(2): 85-97.
- DENG H W, QIAN K. Geochemical binary division character of lacustrine argillite[J]. *Oil & Gas Geology*, 1993, 14(2): 85-97.
- [42] 李超, 廖新武, 郭诚, 等. 渤海湾盆地莱北低凸起明化镇组明下段古环境[J]. *海洋地质前沿*, 2025, 41(2): 43-52.
- LI C, LIAO X W, GUO C, et al. Paleoenvironment of Lower Member of Minghuazhen Formation in Laibei low uplift, Bohai Bay Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2025, 41(2): 43-52.
- [43] 曾艳, 陈敬安, 朱正杰, 等. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候/古环境研究中的应用与展望[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 805-810.
- ZENG Y, CHEN J A, ZHU Z J, et al. Advance and perspective of Rb/Sr ratios in lake sediments as an index of paleoclimate/paleoenvironment[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(8): 805-810.
- [44] 马大钧, 程斌, 付大巍, 等. 珠三拗陷文昌 B 凹陷古近系文昌组: 恩平组古气候特征[J]. *矿产勘查*, 2024, 15(6): 946-955.
- MA D J, CHENG B, FU D W, et al. Paleoclimate characteristics of the Paleogene Wenchang-Enping Formation in Wenchang B Sag, Zhushan Depression[J]. *Mineral Exploration*, 2024, 15(6): 946-955.
- [45] 马素萍, 夏燕青, 田春桃, 等. 南襄盆地泌阳凹陷湖相碳酸盐岩烃源岩沉积环境的元素地球化学标志[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(4): 456-462.
- MA S P, XIA Y Q, TIAN C T, et al. Elemental geochemical indicators for sedimentary environment in lacustrine carbonate source rocks of the Biyang Depression, Nanxiang Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(4): 456-462.
- [46] 刘菲菲, 周瑶琪, 许汉华, 等. 山东东部日青威盆地晚中生代沉积岩元素地球化学特征及沉积环境[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(10): 22-33.
- LIU F F, ZHOU Y Q, XU H H, et al. Geochemical constraints on depositional environment of Late Mesozoic sedimentary rocks from the Ri-Qing-Wei Basin in the east Shandong[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(10): 22-33.
- [47] 罗顺社, 吕奇奇, 李琳静, 等. 燕山地区宣龙拗陷洪水庄组和铁岭组沉积环境[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(2): 10-16.
- LUO S S, LYU Q Q, LI L J, et al. Depositional environment of Hongshuizhuang and Tieling Formations in the Xuanlong Depression, Yanshan region[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(2): 10-16.
- [48] 李钰淳. 末次冰盛期以来北部湾沉积物记录的沉积环境演化 and 气候响应[D]. 南宁: 广西大学, 2024.
- LI Y C. Sedimentary paleoenvironment evolution and paleoclimate response of sedimentary records in the Beibu Gulf since

- the Last Glacial Maximum[D]. Nanning: Guangxi University, 2024.
- [49] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用 [J]. 同济大学学报, 1979(2): 51-60.
WANG Y Y, GUO W Y, ZHANG G D. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jinhu Depression [J]. Journal of Tongji University, 1979(2): 51-60.
- [50] 陈国达. 中国油页岩概论 [J]. 地质论评, 1951, 16(2): 109-136.
CHEN G D. An introduction to oil shale in China[J]. Geological Review, 1951, 16(2): 109-136.
- [51] 汪正江, 王剑, 卓皆文, 等. 扬子陆块震旦纪—寒武纪之交的地壳伸展作用: 来自沉积序列与沉积地球化学证据 [J]. 地质论评, 2011, 57(5): 731-742.
WANG Z J, WANG J, ZHUO J W, et al. Crust extensional activity during the transition from Sinian (Ediacaran) to Cambrian in Yangtze Block: evidences from the depositional sequence and its geochemical data[J]. Geological Review, 2011, 57(5): 731-742.
- [52] 刘伟, 王振奇, 叶琳, 等. 渤海湾盆地渤中坳陷沙一段与沙三段古湖泊水体分层新证据 [J]. 天然气地球科学, 2020, 31(10): 1428-1436.
- LIU W, WANG Z Q, YE L, et al. New evidence of water stratification in the paleolakes of the First and Third Members of Shahejie Formation in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(10): 1428-1436.
- [53] MONGENOT T, TRIBOVILLARD N P, DESPRAIRIES A, et al. Trace elements as palaeoenvironmental markers in strongly mature hydrocarbon source rocks: the Cretaceous La Luna Formation of Venezuela[J]. Sedimentary Geology, 1996, 103 (1/2): 23-37.
- [54] 杨计海, 杨希冰, 游君君, 等. 珠江口盆地珠三坳陷油气成藏规律及勘探方向 [J]. 石油学报, 2019, 40(1): 11-25.
YANG J H, YANG X B, YOU J J, et al. Hydrocarbon accumulation law and exploration direction in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(1): 11-25.
- [55] 邓勇, 胡德胜, 张建新, 等. 北部湾盆地致密油气勘探新领域及资源潜力 [J]. 石油学报, 2025, 46(1): 205-219.
DENG Y, HU D S, ZHANG J X, et al. New exploration fields and resource potential of tight oil and gas in Beibu Gulf Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(1): 205-219.

Sedimentary geochemistry and paleoenvironment of oil shales in the Maoming Basin in the northwestern continental margin of the South China Sea

XU Lifeng¹, WU Xuewan^{2*}, WANG Xianqing³, HE Chunmin²

(1 Guangdong Hydrological and Environmental Geological Survey Center (Guangdong Nonferrous Engineering Survey and Design Institute), Guangzhou 510080, China; 2 School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China; 3 Haikou Marine Geological Survey Center of China Geological Survey, Haikou 571127, China)

Abstract: The global shale oil resources are far more than conventional ones, and the development and utilization of shale (oil-bearing shale) resources will change the global energy landscape. The oil shale resource reserves in the Maoming Basin, Guangdong, South China, account for 16.72% of the national total, possessing tremendous resource potential. Focusing on the analysis and research of the geochemical characteristics of oil shales in the Eocene Youganwo Formation in Maoming Basin, systematic sample collection and analysis on the contents of major and trace elements were conducted, and the sedimentary geochemical characteristics and sedimentary environment were deeply analyzed. Results are: ① The oil shales of the Youganwo Formation showed enrichment in Al_2O_3 and Fe_2O_3 relative to the average value of the upper continental crust (UCC) but deficient in MgO , Na_2O , P_2O_5 , MnO_2 ; ② During the sedimentation, the parent rock of the oil shales was subjected to strong chemical weathering, which caused exchange of potassium in clay minerals. However, some high field strength elements and rare earth elements were less affected by chemical weathering. The effect of sediment recycling on the geochemical properties of oil shale sedimentation was relatively small; ③ The provenance was consisted of intermediate acidic igneous rocks between granite and granodiorite in lithology similar to the Precambrian tonalite assemblage (TTG) in chemical composition. The Maoming oil shales were deposited in a warm and humid climate in lake water with low salinity and strong stratification. The bottom water was in a reducing environment, which was conducive to the enrichment and preservation of organic matter; ④ The water temperature difference between surface and bottom layers caused lake water stratification, while lake transgression deepened the water, which weakened the influence of wind and rivers on the bottom layer of water and resulted in oxygen deficiency in the bottom layer, providing favorable conditions for the enrichment and preservation of organic matter and the formation of the oil shales.

Key words: Maoming oil shales; Eocene Youganwo Formation; geochemical characteristics; provenance; paleoenvironment.