

doi:10.3799/dqkx.2017.503

# 琼东南盆地西区梅山组海底扇岩相— 地球化学特征及源区意义

尤丽<sup>1,2</sup>, 刘才<sup>2</sup>, 钟佳<sup>2</sup>, 李才<sup>2</sup>, 吴仕玖<sup>2</sup>, 代龙<sup>2</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 中海石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

**摘要:**南海北部琼东南盆地西区乐东—陵水凹陷梅山组海底扇是当前天然气勘探重点领域, 通过研究其岩石类型、轻/重矿物与地球化学特征, 判断沉积源区性质, 为储层评价及预测提供地质基础。结果表明: 岩性以细砂岩为主, 发育粉、中粗砂岩, 岩石类型为石英砂岩、岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩, 重矿物组合表现为磁铁矿+锆石+电气石+白钛矿; 由于发育高铁镁质矿物及粘土矿物, 泥岩较砂岩  $\text{SiO}_2$  含量明显低,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量与稀土总量偏高, 说明源区富石英、贫钾长石且含有大量粘土矿物, 主要为石英质沉积源区, 局部为中性火成岩源区, 且经历了低—中等程度的风化作用, 是再循环沉积而成。

**关键词:**琼东南盆地西区; 乐东—陵水凹陷; 梅山组; 海底扇; 岩石学; 地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2017)09-1531-10

收稿日期: 2016-12-03

## Petrography-Geochemistry and Source Significance of Submarine Fan from West Area of Qiongdongnan Basin

You Li<sup>1,2</sup>, Liu Cai<sup>2</sup>, Zhong Jia<sup>2</sup>, Li Cai<sup>2</sup>, Wu Shijiu<sup>2</sup>, Dai Long<sup>2</sup>

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

2. Zhanjiang Branch of, CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China

**Abstract:** The submarine fans, which exist in the west area of Qiongdongnan basin of continental shelf in northern of the South China Sea, are the main area of gas exploration. Based on the analyses of the rock types, light and heavy mineral characteristics and geochemical characteristics, the research on estimating those fans provenances is more practical to the reservoir evaluation and prediction of the petroleum exploration. The study shows that the lithology is composed mainly of fine sandstones with minor amounts of siltstone, medium and coarse sandstones; the rock types are quartz sandstone, debris-quartz sandstone and feldspar-debris sandstone; the heavy mineral assemblages are magnetite, zircon, tourmaline and leucoxene. Compared with sandstone, the content of  $\text{SiO}_2$  in the mudstone is lower, while the total content of the rare earth elements is obviously higher because of the high ferromagnesian and clay mineral in mudstone samples. It is implied that the source material were rich in quartz, poor in feldspar and containing a large number of clay minerals, mainly quartz sediment and partial intermediate igneous rocks, mainly recycled sediments, whose source regions have experienced low to moderate weathering.

**Key words:** west area of Qiongdongnan basin; Ledong-Lingshui sag; Meishan Formation; submarine fan; petrology; geochemistry.

海底扇作为深水沉积重要储集体, 无论从深水沉积学研究前沿还是油气勘探巨大油气资源潜力角度,备受国内外学者关注(王颖和吕明, 2009; 王英民

等, 2011)。西非尼日尔大型海底扇、北美墨西哥湾及中国南海珠江口盆地、莺歌海盆地等大型海底扇重大勘探突破(林煜等, 2014; 刘峰等, 2015), 促进了海

基金项目:“十三五”国家重大专项(No.2016ZX05026-002); 中海石油有限公司湛江分公司自有科研项目(No.ZYKY-2016-ZJ-02)。

作者简介: 尤丽(1983—), 女, 高级工程师, 主要从事沉积学与储层地质学研究。ORCID: 0000-0003-0912-9815. E-mail: youli1@cnooc.com.cn

引用格式: 尤丽, 刘才, 钟佳, 等, 2017. 琼东南盆地西区梅山组海底扇岩相—地球化学特征及源区意义. 地球科学, 42(9): 1531—1540.

底扇沉积体系格架、成因、模式等宏观沉积特征研究,研究表明海底扇发育受控于沉积物源、古地貌、古气候环境与古海平面变化等(王颖和吕明,2009;王英民等,2011;林煜等,2014;刘峰等,2015).近年来,有学者相继在南海北部大陆架边缘珠江口盆地及莺歌海盆地中新统海底扇发现 LW3-1、DF13 等大中型油气田(王英民等,2011;李云等,2011;于俊峰等,2014),证实了海底扇是当前南海地区重要的油气勘探领域.琼东南盆地西区乐东—陵水凹陷作为南海北部重要油气勘探区,主要勘探目的层中新统发育重力流沉积储层,其中梅山组以海底扇沉积为主(谢玉洪等,2016;范彩伟等,2016).李云等(2011)和范彩伟等(2016)主要集中于对沉积单元、沉积演化规律等进行刻画,认为坡折带类型和分布、区域海平面下降及沉积物源等共同控制海底扇分布,且仅从重矿物组合角度对沉积物源有一定分析,但是沉积源区的母岩类型、古风化程度等性质研究甚少.通过碎屑岩岩相特征、地球化学组成评价物源区特征、古沉积环境等(包括源岩类型、古气候环境等),进而判断源区性质效果明显(毛光周和刘池洋,2011;Yang *et al.*, 2012; Özkan and Elmas, 2012; Jian *et al.*, 2013;廖婉琳等,2015;Guo *et al.*, 2016;高丹等,2016;宋立军等,2016).本文重点以琼东南盆地西区乐东—陵水凹陷梅山组海底扇为研究对象,通过岩石薄片与重矿物成分统计等,明确梅山组海底扇沉积岩石类型及组分特征;应用岩石主量、微量元素/稀土元素分析方法,确定海底扇岩石地球化学特征;综合岩相与地球化学特征研究海底扇沉积源区性质,为研究区优质储层评价与预测提供地质基础,以期指导下步勘探部署.

## 1 地质概况

琼东南盆地位于中国南海北部大陆边缘,是大陆边缘新生代断坳盆地,平面上分为北部坳陷、中部隆起、中央坳陷和南部隆起(王子嵩等,2014;谢玉洪等,2016;范彩伟等,2016),呈“三坳两隆”的构造格局,乐东—陵水凹陷位于中央坳陷带西区(雷超等,2011a,2011b)(图 1).盆地构造演化经历了古近纪裂陷阶段、新近纪早期的裂后早期热沉降阶段和中晚期裂后晚期加速沉降阶段.古近纪裂陷阶段,沉积了始新统陆相岭头组、下渐新统海陆过渡相崖城组、上渐新统滨—浅海相陵水组;新近纪拗陷阶段,沉积了从滨海相到深海相的连续沉积,包括下中新统三亚

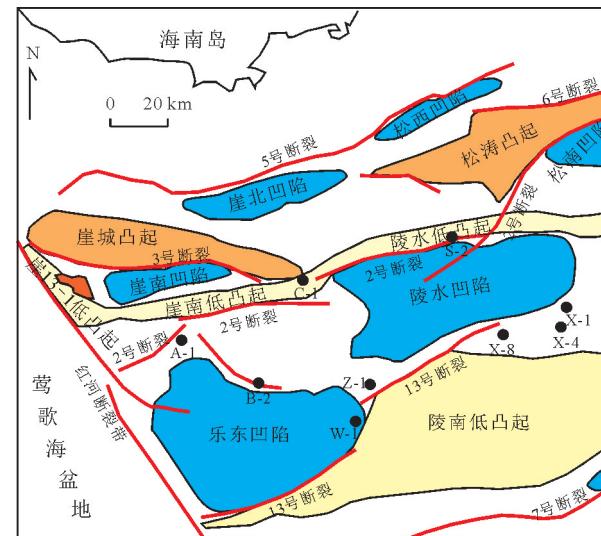


图 1 研究区构造位置与井点示意

Fig.1 Location of studied area and wells

组、中新统梅山组、上中新统黄流组、上新统莺歌海组.中新统重力流水道—海底扇沉积储层是当前琼东南盆地重要天然气勘探地区(王亚辉等,2014;谢玉洪等,2016;范彩伟等,2016).其中,前人在中新统梅山组沉积的多期海底扇相继钻探了陵水 S、崖城 B、崖城 C、陵水 W 等扇体,并在陵水 S 海底扇勘探获得突破.受区域海平面下降、供源三角洲等影响,在乐东—陵水凹陷斜坡较陡区域发育较早期的斜坡型海底扇,以陵水 S 区为代表,储集岩以极细砂岩为主;位于坡脚和凹陷沉降中心发育盆地型海底扇,以崖城 B、C 区代表,储集岩粒度粗,以中—粗砂岩储集为主;在凹陷中心低洼区发育底流改造型海底扇,呈长条形分布,如陵水 W 区,储集岩性以粉、细砂岩为主(范彩伟等,2016).

## 2 样品与分析方法

本次针对乐东—陵水凹陷梅山组海底扇沉积体,研究其岩相—地球化学特征,选取 120 件岩石样品进行岩石薄片观察与鉴定;选取 16 件岩石样品(包括砂岩、钙质砂岩和泥岩)进行元素地球化学分析,包括北部斜坡陵水 S 区 S-2 井岩心样品 3 个(1 个泥岩、1 个砂岩、1 个钙质砂岩),崖城 C 区 C-1 井 3 个壁心样品(2 个泥岩、1 个砂岩),陵水 W 区 W-1 井 6 个岩屑样品(3 个砂岩、3 个泥岩),凹陷中心崖城 B 区 B-2 井 4 个岩屑样品(1 个泥岩、3 个砂岩)(表 1).

表1 琼东南盆地乐东—陵水凹陷梅山组海底扇砂、泥岩样品主量(%)、微量/稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 1 Major (%), trace/rare ( $10^{-6}$ ) element analysis of sandstone and mudstone samples of submarine fans from Meishan Formation in Ledong-Lingshui sag of Qiongdongnan basin

样号	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5	MS6	MS7	SS1	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SS9	SS2
SiO <sub>2</sub>	63.90	58.44	67.32	51.13	47.76	45.01	45.91	80.47	88.40	57.05	65.64	69.59	76.21	76.34	76.54	54.08
TiO <sub>2</sub>	0.93	0.59	0.66	0.62	0.60	0.55	0.58	0.39	0.14	0.60	0.41	0.39	0.39	0.37	0.37	0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.02	7.61	10.53	11.69	13.71	12.37	10.86	6.95	5.90	10.74	7.36	6.32	6.49	6.07	6.15	5.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.75	4.24	6.73	5.09	4.16	4.00	4.40	3.80	0.86	5.33	3.80	4.03	3.24	2.99	3.48	4.00
MnO	0.024	0.030	0.080	0.102	0.074	0.043	0.120	0.023	0.001	0.087	0.087	0.076	0.075	0.061	0.061	0.063
MgO	1.78	0.50	1.58	1.84	1.61	1.78	3.96	0.89	0.06	1.58	1.13	0.10	1.04	1.00	0.98	0.81
CaO	1.56	14.70	1.93	4.36	9.08	10.92	9.66	0.85	0.10	4.45	3.34	1.78	1.71	2.28	1.55	17.02
Na <sub>2</sub> O	0.94	0.16	0.97	0.90	1.72	1.91	1.34	1.09	0.19	1.03	1.21	1.04	0.92	0.91	0.92	0.76
K <sub>2</sub> O	3.51	2.38	2.46	3.38	3.11	3.46	3.38	1.98	2.3	3.06	2.32	1.79	2.04	1.98	2.07	1.56
LOI	6.26	11.00	7.36	12.20	16.94	18.64	18.48	3.25	1.68	11.56	9.43	6.99	6.64	6.84	6.42	16.01
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.3	7.7	6.4	4.4	3.5	3.6	4.2	11.6	15.0	5.3	8.9	11.0	11.7	12.6	12.4	10.4
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	3.7	14.9	2.5	3.8	1.8	1.8	2.5	1.8	12.1	3.0	1.9	1.7	2.2	2.2	2.3	2.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	16.2	12.9	16.0	19.0	22.9	22.5	18.7	17.8	42.1	17.9	17.9	16.2	16.6	16.4	16.6	20.0
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
CIA	71.4	30.6	66.3	57.5	49.6	43.2	43.0	63.9	69.5	55.7	51.7	57.8	58.2	54.0	57.5	21.2
CIW	85.7	33.9	78.4	69.0	55.9	49.1	49.7	78.2	95.3	66.2	61.8	69.2	71.2	65.6	71.3	22.6
ICV	1.0	3.0	1.4	1.4	1.5	1.8	2.2	1.3	0.6	1.5	1.7	1.6	1.5	1.6	1.5	4.7
微量/稀土元素																
Sc	12.90	5.76	8.94	11.97	12.80	11.80	10.50	5.77	1.29	10.29	6.45	5.95	5.29	4.89	4.59	5.68
V	121.0	40.2	89.4	83.5	96.3	86.3	75.7	64.2	15.7	72.3	48.9	49.5	44.6	41.6	41.6	46.3
Cr	91.4	41.0	71.4	80.1	64.7	62.1	54.8	60.7	13.2	160.4	85.2	47.3	37.9	38.9	38.3	43.9
Co	15.00	5.56	6.26	11.39	10.90	10.10	9.66	6.39	1.49	11.07	7.01	7.76	6.25	6.58	5.58	4.91
Ni	34.0	11.0	14.8	30.4	34.6	36.5	31.1	12.4	4.8	29.5	14.9	14.2	16.3	14.6	15.2	8.5
Cu	17.30	8.65	9.83	36.40	38.60	34.20	27.70	7.25	10.40	23.03	12.39	17.77	7.53	6.00	6.07	3.80
Zn	114.0	56.2	74.8	205.4	118.0	79.0	97.5	62.1	19.2	125.9	88.0	188.4	54.9	52.6	48.6	47.4
Sr	140	332	222	1 213	454	537	363	69	143	586	427	440	217	238	314	161
Y	20.4	18.4	18.4	16.9	19.6	19.0	18.3	18.3	6.1	16.5	12.3	18.3	13.1	13.4	12.3	26.6
Zr	370	128	154	146	153	132	133	181	16	125	94	994	884	79	77	85
Nb	22.6	11.4	16.4	15.2	12.6	10.5	9.6	9.7	1.8	18.5	12.6	13.5	10.7	9.6	6.6	3.4
Ba	514	338	659	53 013	8 408	8 715	9 111	421	1 182	18 630	14 526	24 760	8 132	7 480	9 671	228
Th	20.80	13.90	14.20	13.79	13.30	11.60	11.00	12.60	3.44	13.65	11.52	10.94	9.00	8.58	8.07	8.44
U	4.96	2.54	1.95	2.11	2.63	2.47	2.00	1.66	0.63	2.02	1.37	1.31	1.16	1.24	1.08	1.09
Pb	32.5	26.5	24.3	195.7	34.9	36.1	30.0	17.2	37.0	121.2	103.4	138.8	22.6	20.4	20.6	9.1
Sr/Ba	0.27	0.98	0.34	0.02	0.05	0.06	0.04	0.16	0.12	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.71
Th/U	4.19	5.47	7.28	6.53	5.06	4.70	5.50	7.59	5.46	6.74	8.39	8.33	7.76	6.92	7.47	7.74
Th/Sc	1.61	2.41	1.59	1.15	1.04	0.98	1.05	2.18	2.67	1.33	1.79	1.84	1.70	1.75	1.76	1.49
La/V	0.53	0.89	0.41	0.39	0.36	0.35	0.41	0.44	0.71	0.45	0.57	0.57	0.63	0.68	0.67	0.58
La	64.2	35.8	36.4	32.5	34.9	30.5	30.8	28.2	11.2	32.6	28.0	28.0	28.2	28.4	27.8	27.0
Ce	120.0	70.8	74.2	62.6	65.4	57.2	57.4	57.6	20.3	65.0	58.2	59.5	56.2	57.0	54.5	55.1
Pr	13.50	8.24	8.00	7.26	7.69	6.85	6.63	6.58	2.39	7.53	6.71	6.73	6.27	6.34	6.09	6.23
Nd	47.4	30.8	30.4	25.5	28.6	25.4	24.7	25.1	8.6	28.6	25.1	23.4	23.8	24.0	23.1	24.2
Sm	7.58	5.51	6.05	5.02	5.32	4.72	4.61	5.03	1.54	5.43	4.70	4.75	4.50	4.58	4.43	5.12
Eu	1.17	0.90	1.19	13.26	2.06	2.00	1.97	0.97	0.52	4.76	4.07	6.53	1.76	1.70	1.93	1.08
Gd	4.93	4.47	5.30	3.99	5.22	4.72	4.90	4.49	1.22	4.24	3.87	3.92	4.31	4.38	4.13	5.26
Tb	0.77	0.70	0.78	0.63	0.70	0.61	0.64	0.69	0.20	0.66	0.68	0.79	0.54	0.58	0.55	0.84
Dy	4.14	3.66	3.94	3.27	3.84	3.47	3.54	3.71	1.09	4.15	2.94	3.09	2.79	2.86	2.67	4.78
Ho	0.80	0.69	0.72	0.68	0.74	0.70	0.69	0.70	0.21	0.69	0.55	0.62	0.51	0.52	0.48	0.90
Er	2.34	1.87	1.90	1.91	2.05	1.92	1.90	1.85	0.54	1.84	1.36	1.54	1.33	1.38	1.26	2.41
Tm	0.43	0.31	0.32	0.31	0.36	0.34	0.34	0.32	0.05	0.28	0.19	0.23	0.22	0.22	0.21	0.38
Yb	2.65	1.86	1.91	2.29	2.40	2.25	2.20	1.83	0.54	2.03	1.56	1.75	1.56	1.60	1.54	2.12
Lu	0.48	0.30	0.31	0.52	0.48	0.46	0.46	0.30	0.06	0.36	0.24	0.33	0.32	0.31	0.33	0.33
$\Sigma$ REE	270.4	165.9	171.4	159.8	159.8	141.1	140.8	137.4	48.4	158.2	138.3	141.1	132.3	133.9	129.0	135.8
LREE/HREE	15.3	11.0	10.3	10.8	9.1	8.8	8.6	8.9	11.4	10.1	11.1	10.5	10.4	10.3	10.6	7.0
$\delta$ Eu	0.19	0.18	0.21	2.94	0.39	0.42	0.41	0.20	0.38	0.98	0.95	1.51	0.40	0.38	0.45	0.21
(La/Yb) <sub>N</sub>	24.23	19.25	19.06	14.18	14.54	13.56	14.00	15.41	20.74	16.12	17.97	16.03	18.08	17.75	18.05	12.74

注: CIW = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO + Na<sub>2</sub>O), CIA = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O), ICV = (CaO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + K<sub>2</sub>O + MgO + MnO + Na<sub>2</sub>O + TiO<sub>2</sub>)/SiO<sub>2</sub>,  $\delta$ Eu = 2Eu<sub>N</sub> × Gd<sub>N</sub>, 下标 N 为球粒陨石标准化值(Wakita et al., 1971). MS1.泥岩, S-2 井 3 802.06 m 深度处的岩心; MS2.泥岩, C-1 井 3 947.00 m 深度处的壁心; MS3.泥岩, C-1 井深度 4 045.00 m 深度处的壁心; MS4.泥岩, B-2 井 4 840.22 m 深度处的岩屑; MS5.泥岩, W-1 井 4 358.00 m 深度处的岩屑; MS6.泥岩, W-1 井 4 370.00 m 深度处的岩屑; MS7.泥岩, W-1 井 4 392.00 m 深度处的岩屑; SS1.极细砂岩, S-2 井 3 796.68 m 深度处的岩心; SS3.中一粗砂岩, C-1 井 3 965.00 m 深度处的壁心; SS4.砂砾岩, B-2 井 4 846.32 m 深度处的岩屑; SS5.细砂岩, B-2 井 4 904.23 m 深度处的岩屑; SS6.细砂岩, B-2 井 5 047.49 m 深度处的岩屑; SS7.细砂岩, W-1 井 4 400.00 m 深度处的岩屑; SS8.细砂岩, W-1 井 4 412.00 m 深度处的岩屑; SS9.细砂岩, W-1 井 4 430.00 m 深度处的岩屑; SS2.钙质砂岩, S-2 井 3 800.13 m 深度处的岩心。

砂岩的岩石组成、结构特征是通过岩石铸体薄片与扫描电镜观察与鉴定进行的,每个岩石薄片采用面积估算法进行成分等统计定名,即将岩样分成若干个视域,对每个视域进行成分统计,然后对所有视域各成分进行平均计算,进而得出整个岩样中各成分相对含量,并根据成分组合进行岩石类型等划分。主量、微量元素测试是在国土资源部南京矿产资源监督检测中心(S-2、C-1、W-1 井样品)与成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室(B-2 井样品)进行。其中,国土资源部南京矿产资源监督检测中心主量元素分析采用 X 射线荧光光谱仪(X Axios advanced)进行测试,检测依据为 GB/T 14506-2010,微量元素测试采用等离子体质谱仪(X2ICP-MS)进行,检测依据为 SY/T6404-1999;成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室主量元素检测依据电感耦合等离子体发射光谱法通则,检测仪器与编号为电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES、美国 PE 5300V),微量元素检测依据是 ICP-MS 方法通则测定多元素,检测仪器与编号为 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪,美国 PE ELAN DRC-E)。

### 3 结果

#### 3.1 岩石类型与轻矿物特征

通过砂岩薄片观察与鉴定,乐东—陵水凹陷梅山组储层岩石类型以石英砂岩、岩屑石英砂岩、岩屑砂岩和长石岩屑砂岩为主,不同构造带、不同类型海底扇的岩石类型不同(图 2)。北部斜坡陵水 S 区与南部斜坡陵水 W 区粉、细砂岩以石英砂岩和岩屑石英砂岩为主(图 3a~3d);西北部斜坡崖城 C 区中一粗砂岩与凹陷中心崖城 B 区粗砂岩或含砾砂岩不稳定组分含量较高,岩石类型以岩屑砂岩和长石岩屑砂岩为主,局部发育岩屑石英砂岩(图 3e~3f)。碎屑岩组分以石英为主,长石与岩屑次之,少量重矿物,且多以单晶石英为主,凹陷中心崖城 B 区以多晶石英为主。说明不同构造位置由于沉积体母岩类型与水动力条件等差异,海底扇沉积粒度与岩石组分显著差异。

单晶石英在陵水 S 区含量高于 50%,平均为 62%,为远源沉积特征;崖城 C 区含量较低,平均 54%,多晶石英含量约 20%;崖城 B 区含量低于 50%,平均为 26%,多晶石英平均含量 30%;陵水 W 区含量最高,为 74%。长石在陵水 S 区含量低于

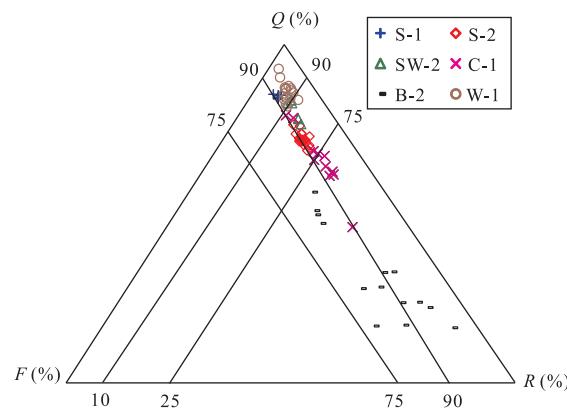


图 2 琼东南盆地乐东—陵水凹陷梅山组海底扇砂岩岩石类型

Fig. 2 Sandstone composition classification of submarine fans in Meishan Formation, Ledong-Lingshui sag, Qiongdongnan basin

10%,以钾长石为主;崖城 C 区含量低于 10%,以钾长石含量为主,部分长石遭受风化剥蚀,形成粘土化颗粒;崖城 B 区含量高于 25%,钾长石以正长石和条纹长石为主,可见微斜长石;陵水 W 区含量低于 10%,同样以钾长石为主。陵水 S 区岩屑以少量多晶石英和变质岩岩屑为主,凹陷中心崖城 B、C 区岩屑以多晶石英为主,少量变质岩岩屑,可见喷出岩与岩浆岩岩屑;陵水 W 区含变质岩岩屑,平均含量 7%,含极少量多晶石英岩屑。凹陷中心的崖城 B、C 区岩相特征较其他地区不同,说明为多物源影响。

#### 3.2 重矿物特征

研究区重矿物种类、相对百分含量、母岩类型统计结果表明,重矿物组合在平面上规律分布且呈三大分区特点(图 4):(1)陵水 S 区及以北区域,重矿组合为磁铁矿、锆石、电气石、白钛矿,母岩为岩浆岩为主,部分变质岩、沉积岩,与海南岛宁远河沉积物重矿特征(王策等,2014)表现一致,呈现较高含量岩浆岩母岩特点,说明该区受海南岛物源供给控制明显;(2)崖城 C 区,重矿物以白钛矿+锆石+电气石+磁铁重矿物组合,母岩类型表现为岩浆岩与沉积岩含量相当、少量变质岩的特点,反映了该区受西区物源注入的影响;(3)陵水 W 区,重矿物组合为白钛矿+锆石+电气石,母岩类型是以沉积岩为主,部分岩浆岩、变质岩的特点,显示该区物源供给明显不同于以上两个区域,可能受南部物源或其他物源影响较大。根据以上重矿母岩分区特征,反映梅山组沉积时期不同构造带的物源供给差异。北部斜坡陵水 S 区海底扇主要受北部海南岛物源供给;崖城 C 区

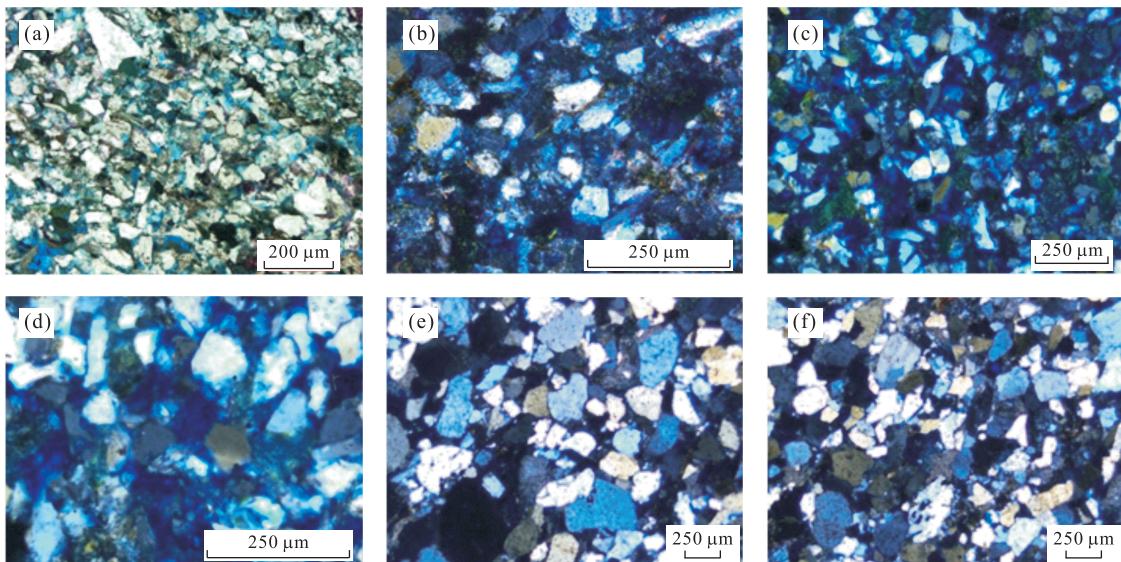


图3 琼东南盆地乐东—陵水凹陷梅山组储集岩岩石类型显微照片

Fig.3 Micro-images of reservoir rocks in Meishan Formation, Ledong-Lingshui sag, Qiongdongnan basin  
a.S-1,3 628 m,石英极细砂岩,壁心(—);b.SW-2,3 837 m,岩屑石英细砂岩,壁心(+);c.S-2,3 795.14 m,岩屑石英细砂岩,岩心(+);d.S-2,3 796.58 m,长石岩屑细砂岩,岩心(+);e.C-1,3 976 m,岩屑中砂岩,壁心(+);f.C-1,4 002 m,岩屑石英细砂岩,壁心(+)

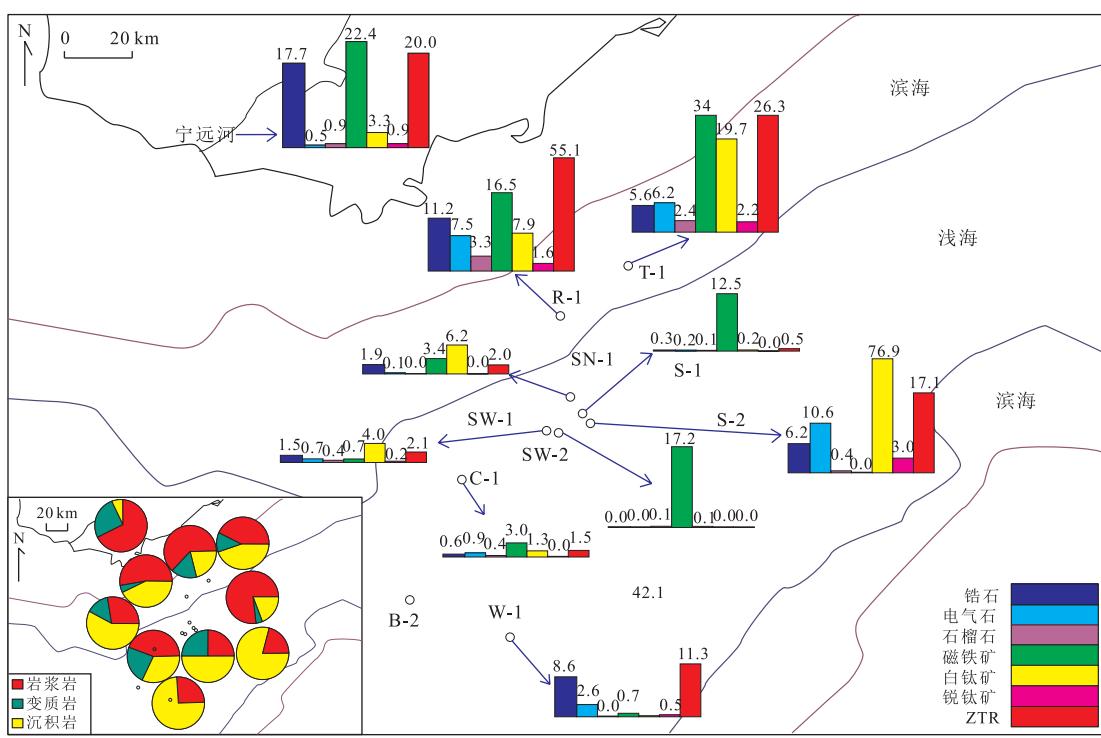


图4 琼东南盆地乐东—陵水凹陷梅山组储层重矿物及母岩类型分布

Fig.4 Mother rock type and heavy mineral resultant of Meishan Formation, Ledong-Lingshui sag

图中数字标注代表各重矿物相对百分含量,单位为%;ZTR 代表重矿物成分成熟度指数,是钻石、电气石及金红石的和

海底扇受西区物源注入的影响;陵水 W 区海底扇可能受南部物源供或其他物源影响。

### 3.3 地球化学特征

研究区梅山组海底扇沉积区 9 个砂岩样品和 7

个泥岩样品的主、微量元素、稀土元素分析结果见表 1.

**3.3.1 主量元素** 砂岩样品中除钙质砂岩  $\text{SiO}_2$  含量小于 55% 外(表 1), 总体含量在 57.05% ~ 88.40%, 平均 73.8%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  在 0.86% ~ 5.33%, 基

本在3%~4%,C-1井SS3样品其含量仅为0.86%,B-2井SS4样品较高5.33%;MgO含量在1%左右,在C-1井SS3样品含量最低为0.06%,B-2井SS4样品较高,为1.58%;CaO为0.10%~4.45%(钙质砂岩CaO含量高达约17.02%)、K<sub>2</sub>O为1.79%~3.06%、Na<sub>2</sub>O为0.19%~1.21%、LOT为1.68%~16.01%.其中,B-2井SiO<sub>2</sub>较低,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O与LOI较高,其次为W-1井,S-2井SiO<sub>2</sub>较高,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O与LOI较低,各井主量元素差异与其碎屑组分石英、长石、粘土矿物等含量差异有关,其中陵水S、W井区由于较高石英含量,SiO<sub>2</sub>显著偏高.

泥岩样品由于石英含量较低,SiO<sub>2</sub>含量总体明显低于砂岩样品(表1),其变化于45.01%~67.32%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(4.00%~6.73%),MgO(0.50%~3.96%),CaO(1.56%~14.70%),Na<sub>2</sub>O(0.16%~1.91%),K<sub>2</sub>O(2.38%~3.51%),LOI(6.26%~18.64%)较砂岩样品明显偏高,表明泥岩中镁铁质组分高于砂岩,这主要与泥岩粒级较小、粘土矿物含量较高有关,且由于泥岩较高粘土矿物含量,K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O含量明显偏高.

**3.3.2 微量元素** 砂岩样品中亲石元素Sr、Ba含量范围变化大(表1),分别为 $69 \times 10^{-6}$ ~ $586 \times 10^{-6}$ 、 $228 \times 10^{-6}$ ~ $24\ 760 \times 10^{-6}$ ,泥岩中对应含量分别为 $140 \times 10^{-6}$ ~ $1\ 213 \times 10^{-6}$ 、 $338 \times 10^{-6}$ ~ $53\ 013 \times 10^{-6}$ ,其中B-2井的Sr含量明显偏高,高于上地壳值( $350 \times 10^{-6}$ ),可能与较高碳酸盐矿物胶结有关,其次为W-1井,其泥岩Sr含量高于上地壳,砂岩Sr较上地壳偏低,但高于后太古澳大利亚砂岩值( $200 \times 10^{-6}$ ),S-2与C-1井Sr含量明显偏低;砂、泥岩中Ba含量除在S-2井低于后太古澳大

利亚砂岩值外,其余井均较高.过渡族元素Cr、Ni、V、Co在泥岩中含量总体高于在砂岩中含量,且在崖城B区总体含量较高,其次为陵水S区,陵水W区居中,崖城C区较低,这与砂、泥岩粒级及各构造带岩性粒级、长英质组分等差异分布有关,随着粒度变小、长英质组分变少,其含量呈增大趋势.Y、Zr、Nb等高场强元素在泥岩样品中的含量高于砂岩样品中,较上地壳偏低.砂岩样品中Th/U、Th/Sc比值分别在5.46~8.39(平均7.38)、1.33~2.67(平均1.83),较泥岩样品中高(平均比值分别为5.53、1.41),高于上地壳(分别为2.73、0.97).

**3.3.3 稀土元素** 对研究区梅山组海底扇4口井16个样品稀土元素进行球粒陨石标准化,其配分模式显示(图5a),各井曲线呈斜率负值的右倾型,在轻稀土部位斜率较重稀土部位大,判断研究区海底扇沉积区轻稀土元素相对富集,Eu元素在不同构造带特征不同,在陵水S与崖城C区呈“下凹性”,在陵水W区呈弱“上凸型”,在崖城B区呈显著“上凸”特点;陵水S、W与崖城C区δEu值小于0.45(图5b),Eu负异常特征,崖城B区δEu值大于0.94,个别样品高达约2.9,Eu正异常特征.砂岩样品的ΣREE含量较泥岩含量较低,砂岩样品中ΣREE含量在 $48.4 \times 10^{-6}$ ~ $158.2 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $128.3 \times 10^{-6}$ ;泥岩样品中其含量在 $140.8 \times 10^{-6}$ ~ $270.4 \times 10^{-6}$ ,平均为 $172.7 \times 10^{-6}$ ,反映泥岩中高含量的粘土矿物对稀土元素具有较强的吸附作用.砂岩样品中轻稀土元素与重稀土元素比值在7.0~11.4,以陵水S区砂岩最低,且在陵水W区与崖城B、C区砂岩中轻重稀土比值高于泥岩样品,说明砂岩较泥岩轻稀土富集且相对平坦的重稀土程度较大.

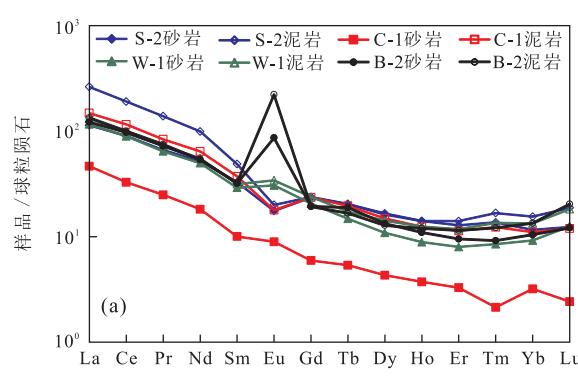


图5 琼东南盆地乐东—陵水凹陷海底扇稀土元素分布

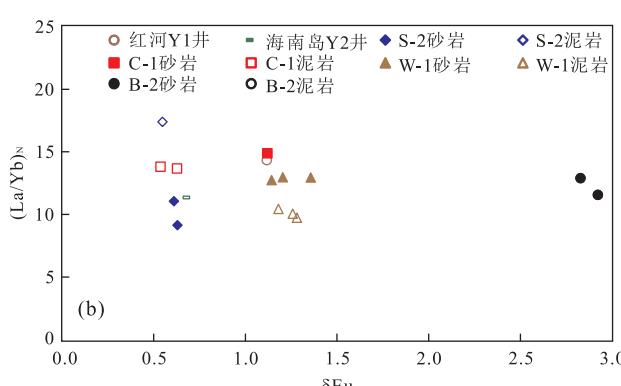


Fig.5 The REE distribution of submarine fans in Meishan Formation, Ledong-Lingshui sag, Qiongdongnan basin

a.砂、泥岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式;b.砂、泥岩(La/Yb)<sub>N</sub>与δEu关系

## 4 讨论

物源性质是决定碎屑岩化学组成的主要因素,因此碎屑岩主量元素特征,包括元素比值(毛光周和刘池洋,2011;肖斌,2014;Saminpanya *et al.*,2014)与元素组合的判别图等(Petri,2014;Saminpanya *et al.*,2014;Tao *et al.*,2014),可以判别源区性质。

### 4.1 物源性质

Saminpanya *et al.*(2014)根据  $TiO_2$ 、 $Al_2O_3$  与  $K_2O/Al_2O_3$ 、 $K_2O/Na_2O$  比值关系来判断物源区物质组成。碎屑岩中  $Al_2O_3$  多赋存在长石中,  $TiO_2$  赋存在铁镁质矿物中(肖斌,2014),  $K_2O/Al_2O_3$  比值大于0.5,显示相对于斜长石和粘土矿物等铝硅酸盐矿物,钾长石相对富集的特征,其比值小于0.4,显示钾长石匮乏的特点。研究区  $Al_2O_3$  含量明显高于  $TiO_2$ ,二者比值在 12.9~42.1,平均 16.0,说明源区长英质组分含量高; $K_2O/Al_2O_3$  比值为 0.2~0.4(图 6a),显示钾长石匮乏特点,同时  $K_2O/Na_2O$  比值为 1.7~14.9,进一步证实了物源区为富石英、贫钾长石特点。

Roser and Korsch 在 1988 年提出根据碎屑岩主量元素判别函数  $F_1$ - $F_2$ ,将物源区主要划分为 4 个区域(Srivastava *et al.*,2013;Petri,2014),分别是长英质火成岩物源区、中性岩火成岩物源区、石英质沉积岩物源区和镁铁质火成岩物源区。将研究区样品落在  $F_1$ 、 $F_2$  函数判别图中(图 6b),主体落在石英质沉积岩物源区,少部分落在中性岩火成岩物源区,说明研究区沉积物为古老的石英质沉积物源区的强烈风化、搬运再沉淀。

沉积岩中的稀土元素和一些微量元素相对稳

定,受成岩作用和变质作用影响小(胡国辉等,2012;Tao *et al.*,2014),可以很好地反映沉积岩母岩性质及源区地球化学特征。Allegre 和 Minster 早在 1978 年提出  $\Sigma REE$  和  $La/Yb$  判别图解来判断源区性质。研究区梅山组海底扇样品主体落在沉积岩和花岗岩的交汇区,少许落在沉积岩区,说明梅山组海底扇源岩来自沉积岩和花岗岩。稀土元素配分模式图上显示,研究区各构造带配分特点差异,陵水 S 和崖城 C 区呈 Eu 负异常,与海南岛物源沉积物有一定相似性(王永凤等,2011);陵水 W 区呈弱 Eu 负异常,崖城 B 区呈强烈 Eu 正异常,说明二者与陵水 S 和崖城 C 区沉积物源存在显著差异,可能与周边隆起或红河物源供给有关(赵梦等,2013)。此外,各构造带区稀土元素的差异配分及判别图的差异分布,与各构造带不同物源、沉积水动力造成岩石粒级、组分差异有关,由于较细粒级、较高含量粘土矿物,稀土总量明显较高,  $Na_2O$  含量较低。

### 4.2 源区古风化作用

岩石的风化作用引起碱性  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  等离子的亏损流失,  $Al_2O_3$  富集,形成粘土矿物(胡国辉等,2012;肖斌,2014)。据此,提出一系列化学指数如化学蚀变作用指标  $CIA = Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$ 、化学风化作用指标  $CIW = Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)$  及相关图解评价源区的古风化程度,判断古气候环境(胡国辉等,2012;肖斌,2014;Petri,2014;Saminpanya *et al.*,2014;Tao *et al.*,2014;李乐等,2015)。CIA 和 CIW 指数越高,反映在岩石风化过程中,活泼的阳离子( $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ )相对于稳定的残留组分(如  $Al^{3+}$ )更容易迁移(胡国辉等,2012),CIA 小于 65 为低化学风化,CIA

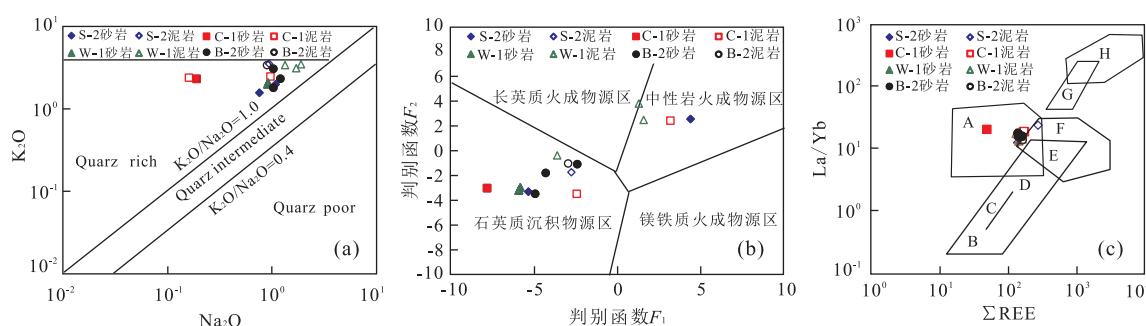


图 6 琼东南盆地乐东—陵水凹陷梅山组海底扇沉积母岩性质判别

Fig.6 Discrimination for provenance of submarine fans in Meishan Formation, Ledong-Lingshui sag, Qiongdongnan basin  
a. 主量元素石英富集程度判别图(Crook 在 1974 年提出(肖斌,2014));b. $F_1$ 、 $F_2$  函数判别图(Roser and Korsch 在 1988 年提出(Srivastava *et al.*,2013;Petri,2014));c. $La/Yb$  与  $\Sigma REE$  判别图.A.沉积岩;B.大洋拉斑玄武岩;C.玄武岩区域;D.大陆拉斑玄武岩;E.碱性玄武岩;F.花岗岩;G.金伯利岩;H.碳酸盐岩区

在 65~85 代表中等化学风化,CIA 为 85~100 表示强化学风化程度(Srivastava *et al.*, 2013; 肖斌, 2014)。

对梅山组海底扇沉积的砂、泥岩样品化学蚀变指数 CIA 和化学风化指数 CIW 进行计算,结果显示砂、泥岩在各构造带 CIA、CIW 值变化较大,泥岩的 CIA 值在 30.6~71.4,平均 51.7,CIW 值变化于 33.9~85.7,平均 60.2;砂岩 CIA 值、CIW 值分别在 21.2~69.5、22.6~95.3,且崖城 C 区 CIA、CIW 值较大,其次为陵水 S 区,崖城 B 区与陵水 W 区较低。表明源区经历了低—中等程度的风化作用,且崖城 C 区与陵水 S 区源区遭受的化学风化作用较强,崖城 B 区和陵水 W 区相比较较弱,这可能与各源区岩石类型与古暴露风化时间等因素有关,崖城 C 区与陵水 S 区以海南岛花岗岩物源供给,易风化,崖城 B 区和陵水 W 区可能为周边隆起或红河沉积岩物源供给,风化能力次之。

#### 4.3 沉积物的成熟度

随着石英含量的增加,长石和基性矿物减少,成分成熟度高,对应  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值也越大(Tao *et al.*, 2014),进而提出应用  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值判别沉积物的成熟度,其比值越大,说明成熟度越高。研究区砂岩  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值在 5.3~15.0,平均 10.8,在陵水 S、W 区与崖城 C 区比值较高(大于 11),说明上述地区沉积物的成熟度高,崖城 B 区  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值小于 11,显示其沉积物的成熟度较低。

Cox 早在 1995 年提出成分变异指数 ICV ( $(\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{TiO}_2)/\text{SiO}_2$ ) 用于判断碎屑物是第一次沉积还是再循环的沉积物,低 ICV 值认为来自较高成熟且含有大量粘土矿物区,指示为沉积物的再循环沉积特点,ICV 值高的碎屑岩指示为初次沉积特点(胡国辉等, 2012; Srivastava *et al.*, 2013)。研究区砂、泥岩样品除局部高钙质砂岩外,ICV 值小于或等于 2.2,说明源区为较高成熟度且发育大量的粘土矿物,是经历了一定的再循环沉积而成,对比泥岩与砂岩的 ICV 值在不同构造带显示不同关系,在陵水 S 区与崖城 B 区泥岩源区成熟度较砂岩偏小,在崖城 C 区与陵水 W 区则相反,显示不同构造带由于差异物源影响导致砂、泥岩源区成熟度有一定差异。

## 5 结论

(1) 梅山组海底扇沉积砂、泥岩  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、

$\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值分别为 12.9~42.1、0.2~0.4, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值大于 1,说明物源区富石英、贫钾长石,样品在  $F_1$ 、 $F_2$  函数母岩区性质图解主体落于石英质沉积物源区,少部分落在中性火成岩物源区。

(2) 梅山组海底扇砂、泥岩 CIA 值、CIW 值变化较大,分别为 21.2~71.4、22.6~95.3,且在崖城 C 区 CIA、CIW 值较大,其次为陵水 S 区,崖城 B 区与陵水 W 区较低,表明源区经历了低—中等程度的风化作用,且崖城 C 区与陵水 S 区源区遭受的化学风化作用较强,崖城 B 区和陵水 W 区相比较弱。

(3) 梅山组海底扇砂、泥岩  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值在陵水 S、W 与崖城 C 区高于崖城 B 区,说明其成分成熟度较高,各构造带 ICV 值小于或等于 2.2,说明源区为较高成熟度且发育大量的粘土矿物,且在陵水 S 区与崖城 B 区泥岩源区成熟度较砂岩偏小,在崖城 C 区与陵水 W 区则相反。

致谢:感谢吉林大学地球科学学院刘立教授在岩相—地球化学研究应用的指导及对文章的指点!感谢国土资源部南京矿产资源监督检测中心蔡玉曼高级工程师与成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室副主任孟祥豪、胡子文副教授对元素地球化学分析实验分析流程及规范标准要求的介绍!感谢匿名审稿专家提出的宝贵意见!

## References

- Fan, C.W., Li, X.S., Liu, K., et al., 2016. Hydrocarbon Accumulation Condition of Miocene Litho-Stratigraphic Trap in Ledong & Lingshui Sags, Qiongdongnan Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 28(2): 53~59 (in Chinese with English abstract).
- Gao, D., Cheng, R.H., Shen, Y.J., et al., 2016. Southwestern Provenance-Sedimentary System and Provenance Tectonic Setting of Eastern Sag in the North Yellow Sea Basin. *Earth Science*, 41(7): 1171~1187 (in Chinese with English abstract).
- Guo, L., Jia, C.C., Du, W., 2016. Geochemistry of Lower Silurian Shale of Longmaxi Formation, Southeastern Sichuan Basin, China: Implications for Provenance and Source Weathering. *Journal of Central South University*, 23(3): 669~676. doi:10.1007/s11771-016-3112-2
- Hu, G. H., Zhou, Y. Y., Zhao, T. P., 2012. Geochemistry of Proterozoic Wufoshan Group Sedimentary Rocks in the Songshan Area, Henan Province: Implications for Provenance and Tectonic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3692~3704 (in Chinese with English abstract).
- Jian, X., Guan, P., Zhang, W., et al., 2013. Geochemistry of

- Mesozoic and Cenozoic Sediments in the Northern Qaidam Basin, Northeastern Tibetan Plateau: Implications for Provenance and Weathering. *Chemical Geology*, 360–361: 74–88.doi:10.1016/j.chemgeo.2013.10.011
- Lei, C., Ren, J.Y., Li, X.S., et al., 2011a. Structural Characteristics and Petroleum Exploration Potential in the Deep-Water Area of the Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 38(5): 560–569(in Chinese with English abstract).
- Lei, C., Ren, J.Y., Pei, J.X., et al., 2011b. Tectonic Framework and Multiple Episode Tectonic Evolution in Deep-water Area of Qiongdongnan Basin, Northern Continental Margin of South China Sea. *Earth Science*, 36(1): 151–162(in Chinese with English abstract).
- Li, L., Yao, G.Q., Liu, Y.H., et al., 2015. Major and Trace Elements Geochemistry and Geological Implications of Dolomite-Bearing Mudstones in Lower Part of Shahejie Formation in Tanggu Area, Eastern China. *Earth Science*, 40(9): 1480–1496(in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Zheng, R.C., Zhu, G.J., et al., 2011. Facies and Depositional Model of a Deepwater Fan in the Zhujiang Formation, Liwan 3-1 Gasfield, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(4): 665–676 (in Chinese with English abstract).
- Liao, W.L., Xiao, L., Zhang, L., et al., 2015. Provenance and Tectonic Settings of Early Carboniferous Sedimentary Strata in Western Junggar, Xinjiang. *Earth Science*, 40(3): 485–503(in Chinese with English abstract).
- Lin, Y., Wu, S.H., Wang, X., et al., 2014. Reservoir Quality Differences of Submarine Fans in Deep-Water Oilfield a in Niger Delta Basin, West Africa. *Oil & Gas Geology*, 35(4): 494–502(in Chinese with English abstract).
- Liu, F., Pei, J.X., Wang, Y., et al., 2015. Palaeogeomorphologic Control on Sedimentary Process of Submarine Fans and Hydrocarbon Accumulation: A Case Study of Member 1 of Huangliu Formation in DF Area, Yinggehai Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 27(4): 37–46(in Chinese with English abstract).
- Mao, G.Z., Liu, C.Y., 2011. Application of Geochemistry in Provenance and Depositional Setting Analysis. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(4): 337–348 (in Chinese with English abstract).
- Özkan, A.M., Elmas, A., 2012. Petrographic and Geochemical Characteristics of the Klzloren Formation (Upper Triassic-Lower Jurassic) in the Akplnar (Konya, Turkey) Area. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86(6): 1455–1470.doi:10.1111/1755–6724.12014
- Perri, F., 2014. Composition, Provenance and Source Weathering of Mesozoic Sandstones from Western-Central Mediterranean Alpine Chains. *Journal of African Earth Sciences*, 91: 32–43.doi:10.1016/j.jafrearsci.2013.12.002
- Saminpanya, S., Duangkayom, J., Jintasakul, P., et al., 2014. Petrography, Mineralogy and Geochemistry of Cretaceous Sediment Samples from Western Khorat Plateau, Thailand, and Considerations on Their Provenance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 83: 13–34.doi:10.1016/j.jseas.2014.01.007
- Song, L.J., Liu, C.Y., Zhao, H.G., et al., 2016. Geochemical Characteristics, Sedimentary Environment and Tectonic Setting of Huangqikou Formation, Ordos Basin. *Earth Science*, 41(8): 1295–1308, 1321(in Chinese with English abstract).
- Srivastava, A.K., Randive, K.R., Khare, N., 2013. Mineralogical and Geochemical Studies of Glacial Sediments from Schirmacher Oasis, East Antarctica. *Quaternary International*, 292: 205–216.doi:10.1016/j.quaint.2012.07.028
- Tao, H.F., Sun, S., Wang, Q.C., et al., 2014. Petrography and Geochemistry of Lower Carboniferous Greywacke and Mudstones in Northeast Junggar, China: Implications for Provenance, Source Weathering, and Tectonic Setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 87: 11–25.doi:10.1016/j.jseas.2014.02.007
- Wakita, H., Hey, P., Schmitt, R.A., 1971. Abundances of the 14 Rareearth Elements and 12 Other Trace Elements in Apollo 12 Samples: Five Igneous and One Breccia Rocks and Four Soils. In: Vobecky, M., Frána, J., Bauer, J., Proceedings of the Second Lunar Science Conference. The MIT Press, Cambridge, 2: 1319–1329.
- Wang, C., Liang, X.Q., Tong, C.X., et al., 2014. Characteristics and Geological Implications of Heavy Minerals from Seven Rivers in Adjacent Areas of Northeastern Yinggehai Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(2): 228–237(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Lü, M., 2009. Reservoir Characteristics Sediment in Nigeria Deep-Water Area. *Natural Gas Geoscience*, 20(2): 228–236(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.F., Wang, Y.M., Li, D., et al., 2011. Features and Source Analysis on Early Pliocene Sedimentary Rare Earth Element (REE) in Central Canyon of Qiongdongnan Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 33(6): 50–52, 68 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.H., Zhang, D.J., Chen, Y., et al., 2014. Characteristics and Controlling Factors of Meishan Deep-Water Fans in Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 35(6): 664–667 (in Chinese with English abstract).

- Wang, Y. M., Xu, Q., Li, D., et al., 2011. Late Miocene Red River Submarine Fan, Northwestern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 56(10): 781–788 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.S., Liu, Z., Sun, Z.P., et al., 2014. Preliminary Prediction and Evaluation of Oligocene Source Rocks in Ledong-Lingshui Sag in Deep-Water Area of Qiongdongnan Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 45(3): 876–888 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, B., 2014. Geochemistry of Sandstones from Bayin Gebi Formation and Suhongtu Formation of Lower Cretaceous in Chagan Sag of Yin-E Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(4): 517–525 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. H., Fan, C. W., Zhou, J. X., et al., 2016. Sedimentary Features and Controlling Factors of the Gravity Flows in Submarine Fan of Middle Miocene in the Qiongdongnan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 27(2): 220–228 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Du, Y. S., Cawood, P. A., et al., 2012. Modal and Geochemical Compositions of the Lower Silurian Clastic Rocks in North Qilian, NW China: Implications for Provenance, Chemical Weathering, and Tectonic Setting. *Journal of Sedimentary Research*, 82(2): 92–103. doi: 10.2110/jsr.2012.6
- Yu, J. F., Pei, J. X., Wang, L. F., et al., 2014. Gas Pool Properties and Its Exploration Implications of the Dongfang13-2 Gravity Reservoir-Overpressure Gas Field in Yinggehai Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 35(5): 829–838 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M., Shao, L., Liang, J. S., et al., 2013. REE Character of Sediment from the Paleo-Red River and Its Implication of Preovenance. *Earth Science*, 38(Suppl.1): 61–69 (in Chinese with English abstract).
- 雷超,任建业,李绪深,刘昆,等,2011a.琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力.石油勘探与开发,38(5): 560–569.
- 雷超,任建业,裴健翔,等,2011b.琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程.地球科学,36(1): 151–162.
- 李乐,姚光庆,刘永河,等,2015.塘沽地区沙河街组下部含云质泥岩主微量元素地球化学特征及地质意义.地球科学,40(9): 1480–1496.
- 李云,郑荣才,朱国金,等,2011.珠江口盆地荔湾3-1气田珠江组深水扇沉积相分析.沉积学报,29(4): 665–676.
- 廖婉琳,肖龙,张雷,等,2015.新疆西准噶尔早石炭世沉积地层的物源及构造环境.地球科学,40(3): 485–502.
- 林煜,吴胜和,王星,等,2014.尼日尔三角洲盆地深水油田A海底扇储层质量差异.石油与天然气地质,35(4): 494–502.
- 刘峰,裴健翔,汪洋,等,2015.古地貌对海底扇沉积过程的控制及与油气富集的关系——以莺歌海盆地东方区黄流组一段为例.中国海上油气,27(4): 37–46.
- 毛光周,刘池洋,2011.地球化学在物源及沉积背景分析中的应用.地球科学与环境学报,33(4): 337–348.
- 宋立军,刘池阳,赵红格,等,2016.鄂尔多斯地区黄旗口组地球化学特征及其沉积环境与构造背景.地球科学,41(8): 1295–1308, 1321.
- 王策,梁新权,童传新,等,2014.莺歌海盆地东北部邻区7条主要入海河流重砂矿物特征及其地质意义.沉积学报,32(2): 228–237.
- 王颖,吕明,2009.深水沉积储层特征——以尼日利亚OML130区块为例.天然气地球科学,20(2): 228–236.
- 王永凤,王英民,李冬,等,2011.琼东南盆地中央峡谷早上新世沉积物稀土元素特征及物源分析.石油天然气学报,33(6): 50–52, 68.
- 王亚辉,张道军,陈杨,等,2014.琼东南盆地陵水凹陷梅山组深水扇特征及控制因素.新疆石油地质,35(6): 664–667.
- 王英民,徐强,李冬,等,2011.南海西北部晚中新世的红河海底扇.科学通报,56(10): 781–787.
- 王子嵩,刘震,孙志鹏,等,2014.琼东南深水区乐东—陵水凹陷渐新统烃源岩早期预测及评价.中南大学学报(自然科学版),45(3): 876–888.
- 肖斌,2014.银额盆地查干凹陷下白垩统巴音戈壁组—苏红图组砂岩地球化学.矿物岩石地球化学通报,33(4): 517–525.
- 谢玉洪,范彩伟,周家雄,等,2016.琼东南盆地中新世重力流海底扇沉积特征及控制因素.天然气地球科学,27(2): 220–228.
- 于俊峰,裴健翔,王立锋,等,2014.莺歌海盆地东方13-2重力流储层超压气田气藏性质及勘探启示.石油学报,35(5): 829–838.
- 赵梦,邵磊,梁建设,等,2013.古红河沉积物稀土元素特征及其物源指示意义.地球科学,38(增刊1): 61–69.

## 附中文参考文献

- 范彩伟,李绪深,刘昆,等,2016.琼东南盆地乐东、陵水凹陷中新统岩性地层圈闭成藏条件.中国海上油气,28(2): 53–59.
- 高丹,程日辉,沈艳杰,等,2016.北黄海盆地东部坳陷侏罗纪西南物源—沉积体系与源区构造背景.地球科学,41(7): 1171–1187.
- 胡国辉,周艳艳,赵太平,2012.河南嵩山地区元古宙五佛山群沉积岩的地球化学特征及其对物源区和构造环境的制约.岩石学报,28(11): 3692–3704.
- 雷超,任建业,李绪深,等,2011a.琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力.石油勘探与开发,38(5):