

doi:10.3799/dqkx.2016.511

莺歌海盆地黄流组浅海重力流砂体 物源分析及油气地质意义

黄银涛^{1,2}, 姚光庆^{1,2*}, 周锋德^{1,2}

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要:莺歌海盆地中央带上中新统黄流组一段近年新发现一套浅海重力流沉积体系, 夹持于海南古隆起和越南昆嵩古隆起之间, 探讨其物源供给对掌握砂体展布规律以及“源—汇复合体系”的研究具有重要意义。结合东方气田新钻井资料和岩石测试资料, 如砂岩碎屑组分、重矿物组合特征及元素地球化学特征对研究区黄流组物源进行了分析, 结果表明: (1) 西部昆嵩隆起物源是本区浅海重力流沉积体系的主要物源区, 浅海重力流砂岩长石、岩屑含量较高, 结构成熟度高, 泥质含量低(平均3.8%), 以岩屑石英细—极细砂岩为主; 源自东部物源浅海砂坝砂岩的长石、岩屑含量较低, 成分成熟度高, 但泥质含量高(平均18.6%), 以岩屑石英粉砂岩—石英粉砂岩为主; (2) 源于西部物源的浅海重力流砂岩锆石、电气石含量低, 磁铁矿、石榴石含量高, 源于东部物源的浅海砂坝锆石、电气石、白钛矿含量高, 磁铁矿、石榴石含量低。此外, 区域古水流方向主要为南东—东西向, 反映其可能受到西部越南水系的影响; (3) 岩心样品相似的稀土元素配分模式表明浅海重力流砂岩具有一致的物质来源, 稀土元素含量及比值、Th-Sc及Co/Th-La/Sc图解均显示中性—长英质源岩特征, La-Th-Sc三角图、Th-Sc-Zr/10三角图以及主量元素判别图解均显示样品落在主动大陆边缘或大陆岛弧区域, 说明浅海重力流砂岩源区为挤压构造背景, 与昆嵩隆起相符合; (4) 中央底辟带西侧的浅海重力流砂体规模大, 物性好, 含气丰富, 为下一步向西部勘探的主力砂体, 而中央底辟带东侧的浅海砂坝储层规模较小, 储层质量较差。

关键词:物源分析; 浅海重力流; 黄流组; 莺歌海盆地; 地球化学; 油气。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2016)09-1526-13

收稿日期: 2016-01-16

Provenance Analysis and Petroleum Geological Significance of Shallow-Marine Gravity Flow Sandstone for Huangliu Formation of Dongfang Area in Yinggehai Basin, the South China Sea

Huang Yintao^{1,2}, Yao Guangqing^{1,2*}, Zhou Fengde^{1,2}

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The reservoir in Upper Miocene Huangliu Formation of Yinggehai basin, which is located between Kuntum paleo-uplift and Hainan paleo-uplift, is shallow-marine gravity flow deposits with burial depth ranging from 2 600 to 3 500 m. Analyzing the provenance of the sandbody is significant in understanding its distribution and “source to sink system”, hence for the oil-gas exploration and development in this area. The provenance of sediments in Upper Miocene Huangliu Formation was analyzed by integrating the components of the sandstones, assemblage styles of the heavy mineral, paleo-current direction and geochemistry characteristics of the sandstones. Results show follows. (1) There are two provenances, one from west and the other from east, in the study area. Western sourced sandstones form the shallow-marine gravity flow which are mainly sublitharenite with high feldspar (average is 6.1%) and lithic (average is 11.7%) contents, low shale content (average is 3.8%). However,

基金项目:中海石油有限公司湛江分公司资助项目(No.CCL-2013-ZJFN1012)。

作者简介:黄银涛(1989—),男,博士研究生,主要从事油气储层地质研究工作。E-mail: huangyintao@hotmail.com

* **通讯作者:**姚光庆, E-mail: gqyao@cug.edu.cn

引用格式:黄银涛,姚光庆,周锋德,2016.莺歌海盆地黄流组浅海重力流砂体物源分析及油气地质意义.地球科学,41(9):1526—1538.

eastern sourced sandstones, which are mainly subarkose-quartz siltstone with low feldspar and lithic contents with averages of 4.6% and 2.7%, respectively, high compositional maturity, high shale contents (average is 18.6%), form the neritic sand bar. (2) The shallow-marine gravity flow sandstones exhibit low zircon, tourmaline contents, and high magnetite, garnet contents, while the neritic sand bar sandstones exhibit high zircon, tourmaline and leucosphenite contents, and low magnetite, garnet contents. The direction of paleo-current in study area is from southeastward to eastward. (3) The similar rare earth element (REE) patterns of 28 sandstones from three western wells indicate that they were sourced from the same provenance. The diagrams of Th-Sc and Co/Th-La/Sc and elemental ratios of these sandstone samples show that they were derived from intermediate to felsic source rocks. The measured geochemistry data of these core samples fall into the fields of active continental margin or continental island arc in the diagrams of La-Th-Sc, Th-Sc-Zr/10, Ti/Zr-La/Sc and major element discrimination, indicating that the source rocks of the shallow-marine gravity flow sandstones were formed under the tectonic setting of an convergent environment. (4) The integrated method for provenance analysis indicates that the shallow-marine gravity flow sandstones were derived from the western Kuntum uplift. The shallow-marine gravity flow sandstones in western mud diapir belts are large in scale, rich in gas, better in reservoir properties and the main favorable exploration target towards the west, whereas the neritic sand bar sandstones in eastern mud diapir belts are small in scale, poor in reservoir quality.

Key words: provenance; shallow-marine gravity flow; Huangliu Formation; geochemistry; hydrocarbon.

0 引言

莺歌海盆地中央带上中新统黄流组一段近年新发现一套浅海重力流沉积体系,前人在本区 1-1-11 井古生物分析的基础上,认为其形成于浅海环境,沉积时期的古水深在 40~110 m 之间(何卫军等, 2011;王华等,2015),探讨浅海重力流砂体的物源对掌握砂体展布规律以及“源—汇复合体系”的研究具有重要意义(庞雄等,2007;Carvajal *et al.*,2009;谢玉洪等,2012).传统的沉积区物源分析主要利用的方法包括重矿物分析(Morton,1987;Morton *et al.*, 2005;付玲等,2013)、碎屑岩及岩屑分类分析(Dickinson,1985;Pettijohn *et al.*,1987)、砂岩百分含量法、地球化学方法等(Bhatia *et al.*,1983;Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch,1986).但这些研究往往局限于单方面,而沉积岩的化学组分受到源岩性质、源区风化条件、气候、搬运作用、埋藏以及成岩作用等多种因素的影响(McLennan *et al.*,1993;Moosavirad *et al.*, 2012),且沉积后作用会在一定程度上改造源岩组分,所以传统的岩相学方法在研究构造背景、物源属性等方面受到较大限制(McLennan,1989;Nesbitt and Young,1996),在岩石地球化学分析的基础上,综合地质、岩石学、古水流等方法,重塑物源区及其组分成为研究的新热点(El-Bialy,2013;Zaid,2013;Saminpanya *et al.*,2014).虽然有不少学者对莺歌海盆地东方区黄流组浅海重力流储层特征、成岩作用、超压成因和成藏模式等方面做了分析(谢玉洪等, 2012;张伙兰等,2013;王华等,2015),且前人在本区

识别出浅海重力流沉积体系和浅海砂坝体系(谢玉洪等,2012;张伙兰等,2013;王华等,2015)(图 1c),但研究区位于中央凹陷中部的泥底辟构造带附近(图 1d),可能的物源供给主要包括东部海南岛隆起、西部昆嵩隆起以及西北部的红河水系(Morley, 2002;钟泽红等,2013).由于研究人员对其物源存在争议(谢玉洪和范彩伟,2010;张伙兰等,2013),导致在具体的勘探方向上存在一定争议.因此本文从储层岩石学、重矿物特征、古水流以及砂岩元素地球化学等方面综合分析其物源.

1 区域地质概况

莺歌海盆地位于海南岛古隆起和印支半岛的昆嵩古隆起之间,总体为北西—南东向,其面积为 $12.17 \times 10^4 \text{ km}^2$.据构造区划分研究,莺歌海盆地由 3 个一级构造单元组成,即莺东斜坡、中央坳陷和莺西斜坡(图 1a).研究表明,中新世—上新世的右旋走滑拉张作用在该盆地中央产生了一系列泥流体底辟构造(张启明,1999;郝芳等,2003;裴健翔等,2011;童传新等,2012),泥底辟构造带位于中央坳陷,属二级构造单元.20 世纪 90 年代在东方区上新统常压地层中发现了东方 1-1 底辟背斜浅层气田,近期在东方区中深层高温超压地层的勘探中于东方 13 区上新统黄流组一段相继发现了 DF13-1、DF13-2 等大型岩性—构造复合型气田(谢玉洪等,2012;张伙兰等,2013),勘探上把乐东组—莺歌海组二段上部组合称为浅层,把莺歌海组二段下部组合—梅山组称为中深层(图 1b).

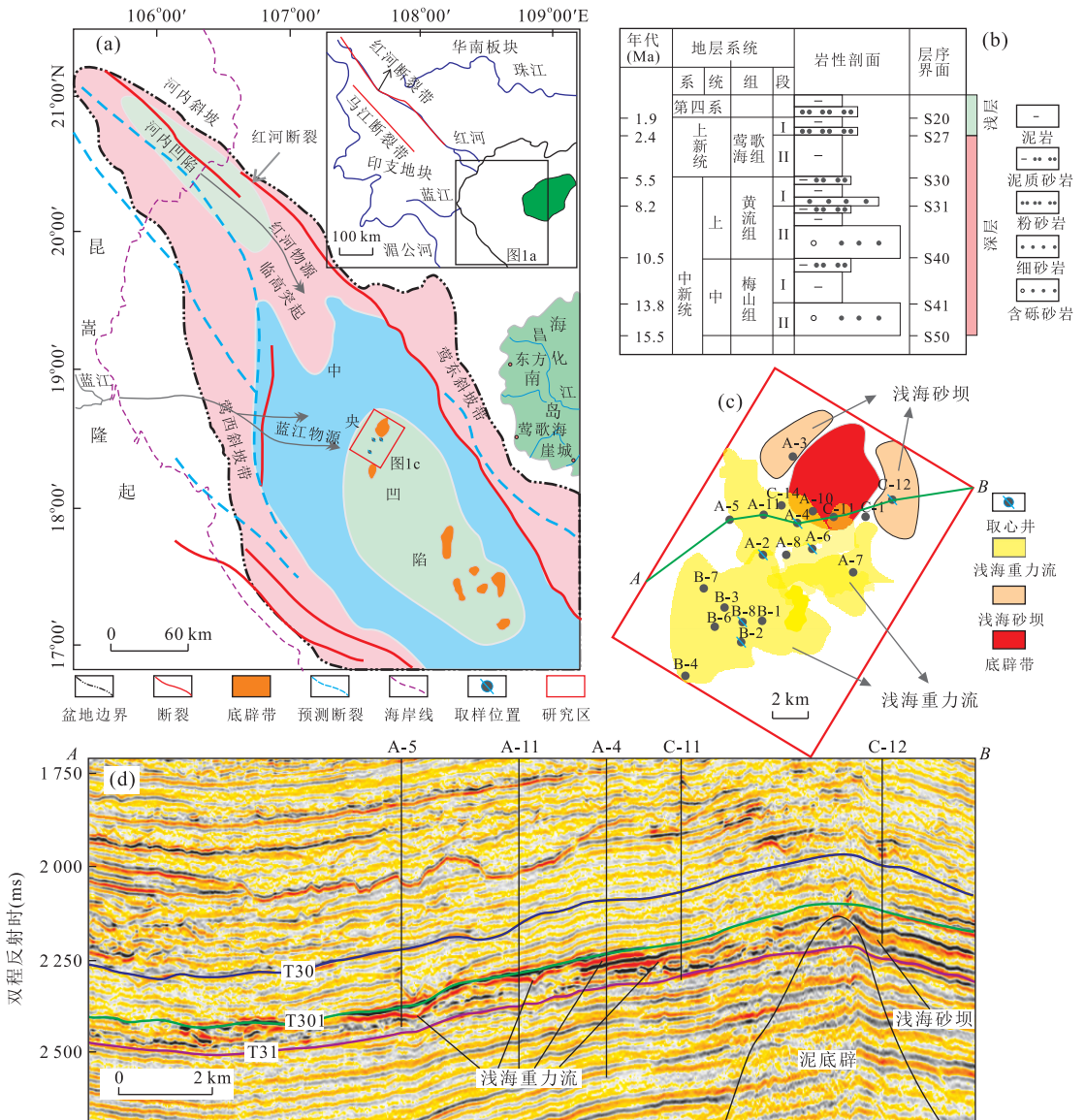


图 1 莺歌海盆地研究区位置(a)、地层系统(b)、井位及沉积体系分布(c)及过研究区地震剖面(d)

Fig.1 Location of the study area (a), stratum system (b), location of wells and distribution of sedimentary systems (c), and one seismic section from the study area (d) in Yingehai basin

图 1a~1c 据张伙兰(2013)修改

本次研究区东方气田位于中央泥底辟构造带附近(图 1a).目的层为黄流组一段(H₁)I、II 气组,涉及 20 口钻井,I 气组井点钻遇砂体厚度为 10~76 m,II 气组钻遇砂体厚度为 34~105 m.

2 样品分布及分析方法

本次研究涉及到储层岩石学和地球化学研究的样品,480 块铸体薄片来源于取心段或壁心,28 块元素地球化学样品来自于浅海重力流体系的 3 口取心井(A-2、A-6 和 B-8d)(图 2),取样岩性主要为细砂岩、

粉细砂岩和粉砂岩,按照《中国地质矿产实验室测试质量管理规范:岩石矿物分析试样制备》(DZ/T0136.2-2006)的要求,对样品进行编号后,经破碎、粉碎、磨细等步骤,每步骤均过筛、缩分,直至达到分析测试所要求的细度,整个样品制备过程严格遵守规范中规定的流程要求,主量元素测试由岛津 XRF-1800X 射线荧光光谱仪(Shimadzu Sequential X-ray Fluorecence Spectrometer Lab Centre XRF-1800)完成,微量元素及稀土元素的测量分析则由 Thermo Scientific X7 型电感耦合等离子质谱仪(Thermo Elemental-X7 Quadrupole ICP-MS)完成.烧失量测试方法为:称取

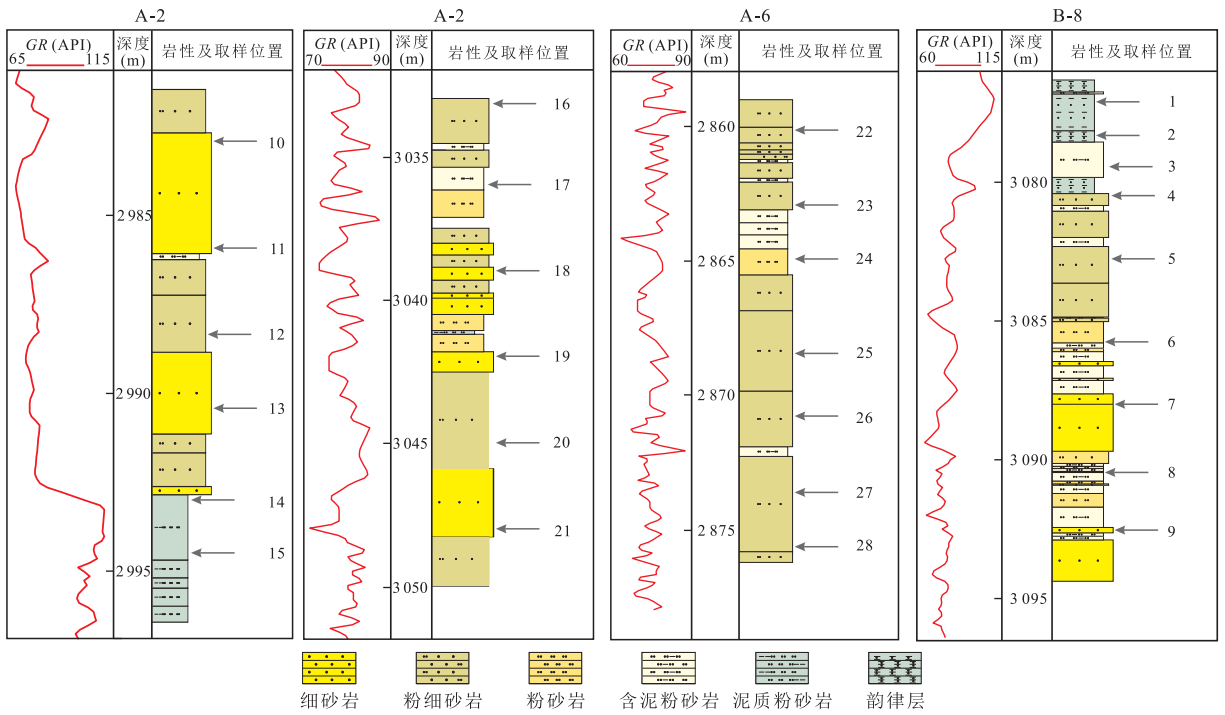


图 2 砂岩元素地化样品分布

Fig.2 The locations of sandstone samples which were collected for geochemistry analysis

1.000 0 g 已在 105 °C 烘箱中干燥 2 h 的样品,置于瓷坩埚中,置于马弗炉中,低温升至 1 000 °C,保持 1 h,取出冷却 30 min 后称重。

3 储层岩石学及古水流分析

3.1 砂岩组分特征

研究区砂岩以细砂岩—粉砂岩为主(表 1),磨圆为次棱—次圆。480 块铸体薄片分析结果表明,碎屑颗粒包括石英、长石、岩屑,石英以单晶石英为主(平均 50.63%),少量多晶石英(平均 5.66%),长石包括钾长石(平均 5.68%)和斜长石(平均 0.56%),岩屑包括岩浆岩、变质岩和沉积岩岩屑,平均岩屑含量 9.80%。本次研究采用 Folk(1968)砂岩分类方案,将 480 块铸体薄片分析结果投影在三角图中(图 3)。研究区总体上以岩屑石英砂岩(占 43.12%)和长石岩屑砂岩(占 40.21%)为主,少量薄片为长石石英砂岩和石英砂岩。此外,不同沉积体系在岩石成分上表现出一定的差异性,浅海重力流水道砂岩的长石、岩屑含量较高,长石含量为 3.0%~8.8%,平均 6.1%,岩屑含量为 5.0%~16.6%,平均 11.7%,结构成熟度高,泥质含量低(平均 3.8%),平均面孔率 20.46%,以岩屑石英细砂岩为主,浅海砂坝砂岩长

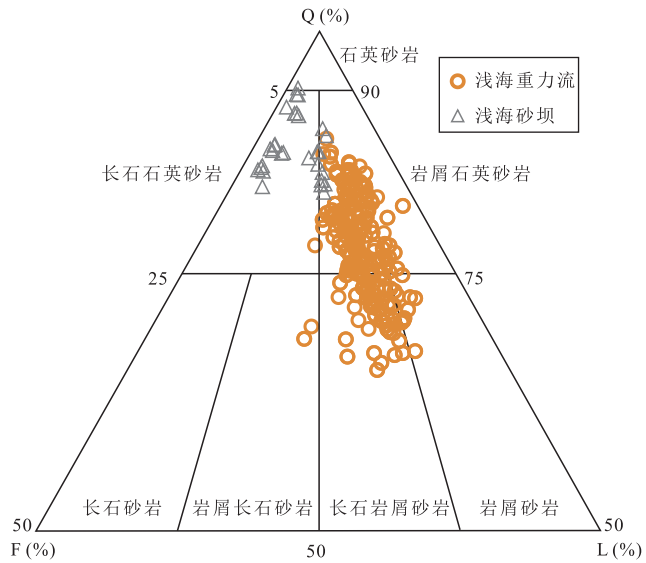


图 3 黄流组一段砂岩组分三角图

Fig.3 The QFL triangle diagram of sandstones from member #1 of Huangliu Formation

石、岩屑含量较低,长石含量为 4.2%~5.1%,平均 4.6%,岩屑含量为 1.6%~3.8%,平均 2.7%,成分成熟度高,但泥质含量高(平均 18.6%),平均面孔率 10.08%,以岩屑石英粉砂岩—石英粉砂岩为主(表 1)。同时浅海重力流沉积体系位于底辟带西侧,浅海沉积体系偏底辟带东侧(如 C-12)(图 1c),这些结果

表 1 莺歌海盆地东方区岩石成分

Table 1 The proportion of sandstone components of study area

微相	井号	气组	厚度 (m)	面孔率 (%)	粒度中值 (μm)	胶结物含量 (%)	碎屑组分(%)			结构成熟度	成分成熟度	排替压力 (MPa)	中值压力 (MPa)	平均孔隙半径 (μm)	岩石类型		
							石英	长石	岩屑							泥质含量(%)	成熟度
浅海砂坝	C-12	II	10	8.2	62	8.0	52.5	5.2	6.3	17.6	低	7.3	极高	/	长石石英粉砂岩—石英粉砂岩		
	A-3	I	18	2.9	48	4.8	58.0	4.2	3.8	19.6	低	7.3	极高	3.60	22.59	0.07	长石石英粉砂岩
浅海重力流	A-2	I	15	16.4	88	10.5	57.7	4.0	7.5	2.9	高	5.1	高	0.42	2.05	0.57	岩屑石英极细砂岩
	A-2	II	38	19.3	65	5.4	62.9	4.1	8.5	0.5	高	5.1	高	0.41	1.15	0.73	岩屑石英极细砂岩
	A-4	I	23	18.7	165	7.7	58.1	3.9	11.4	0.7	高	4.1	高	0.19	0.74	1.44	岩屑石英细砂岩
	A-5	I	28	14.2	231	3.2	58.0	7.5	11.9	0.9	高	3.1	中	0.36	2.25	0.66	岩屑石英细砂岩
	A-6	II	44	19.6	71	6.0	61.5	3.0	0.8	1.2	高	5.0	高	0.37	1.33	0.74	岩屑石英极细砂岩
	A-7	I	20	20.0	79	3.8	57.3	5.4	3.2	0.5	高	3.1	中	0.17	3.18	1.41	岩屑石英细—极细砂岩
	A-7	II	37	19.0	123	4.7	57.2	5.3	13.5	1.1	高	3.1	中	0.17	0.99	1.54	岩屑石英细—极细砂岩
	A-8	I	8	15.5	188	5.6	54.3	4.3	14.3	8.0	中	2.6	中	/	/	/	岩屑石英极细—细砂岩
	A-8	II	18	17.5	90	4.5	54.3	6.1	15.1	3.1	高	2.6	中	/	/	/	岩屑石英细—极细砂岩
	B-1	II	20	12.1	99	2.1	62.9	8.5	13.3	1.2	高	2.9	中	/	/	/	长石岩屑石英极细砂岩
	B-2	II	10	10.7	125	3.1	61.1	5.7	8.9	10.5	低	4.4	高	0.17	5.72	1.39	石英细—极细砂岩
	B-4	I	20	15.9	135	8.9	45.6	6.6	13.9	3.3	中	2.3	中	0.11	1.64	2.35	长石岩屑石英细砂岩
	B-6	I	10	15.8	193	5.2	42.5	5.4	13.8	3.3	高	2.2	中	0.71	0.19	4.48	岩屑石英中—细砂岩
	B-6	II	8	15.1	146	5.0	49.9	6.3	12.9	6.4	高	2.6	中	0.29	2.00	1.43	岩屑石英细—极细砂岩
	B-8	I	29	18.7	154	4.9	52.9	6.9	12.1	2.1	高	2.8	中	0.10	0.58	3.31	长石岩屑石英细砂岩

表明,浅海重力流沉积体系和浅海砂坝的物源存在一定差异性。

3.2 重矿物组合特征

尽管重矿物会受到成岩过程中蚀变的影响,但重矿物分布组合在区分大区物源方面仍十分有效 (Morton,1987;Morton *et al.*,2005;付玲等,2013)。研究区内共 8 口取心井,此外,研究区外 8 口取心井的重矿物组合也被用于本次研究,共鉴定出重矿物 20 余种,其中锆石、电气石、石榴石、磁铁矿、赤褐铁矿和白钛石 6 种重矿物几乎出现在所有的样品中,平均含量为 84.67%。本次研究统计了上述 6 种主要重矿物的分布(图 4)。其中锆石为 1.00%~18.25%,平均 9.27%;电气石为 0.76%~10.58%,平均 5.89%;石榴石为 0.10%~12.43%,平均 4.29%;磁铁矿为 0.26%~6.42%,平均 1.89%;赤褐铁矿为 0.43%~92.57%,平均 26.68%;白钛石为 2.19%~63.95%,平均 37.01%,其他次要重矿物含量普遍小于 2%。

现今越南及海南岛出露的岩石有比较明显的差

异,因此其风化产物中会形成不同的重矿物组合。海南岛出露的岩石主要以岩浆岩为主,越南中部及北部岩石类型多样,包括各时代的岩浆岩、沉积岩和变质岩。图 4 的重矿物分布表明研究区主要包括两大物源区。莺东斜坡带附近的钻井以锆石、电气石、白钛矿含量高,而来自变质岩的磁铁矿和石榴石含量低为特征,在周缘物源对比和前人研究的基础上,认为其属海南岛方向的物源(张伙兰等,2013;钟泽红等,2013);而临高凸起带,白钛矿、锆石含量降低,而石榴子石含量增加,磁铁矿含量增加不明显;东方区钻井(除 A-3 井和 C-12 井外),锆石、电气石含量低(如 C-1 井,锆石及电气石含量均不到 10%),而来自变质岩磁铁矿、石榴石含量相对较高。此外东方区还具有一定含量的来自变质岩的帘石类重矿物(约 1%~4%),这些特征与海南岛物源明显不同,而 A-3 井和 C-12 井更加符合海南岛物源特征。张伙兰等(2013)和钟泽红等(2013)曾报道,海南岛物源具有锆石、电气石、白钛矿含量相对高,而磁铁矿和石榴

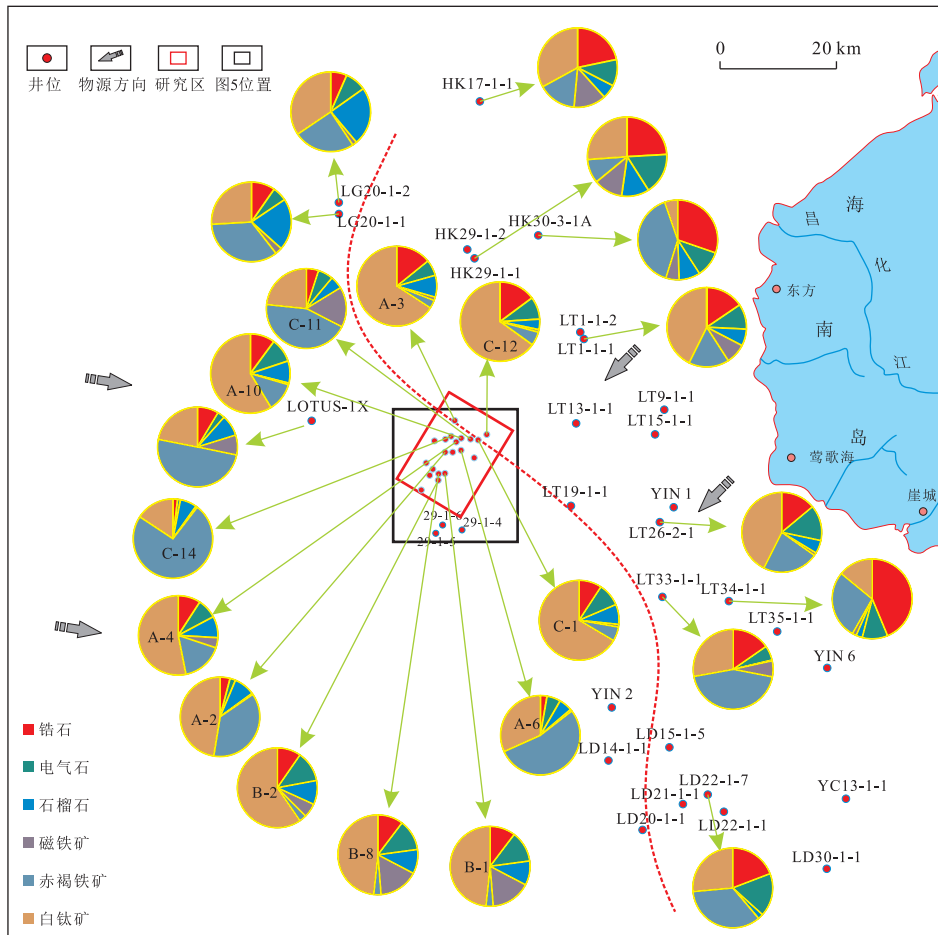


图 4 黄流组一段重矿物组合平面分布

Fig.4 The distribution of heavy mineral assemblages from member #1 of Huangliu Formation

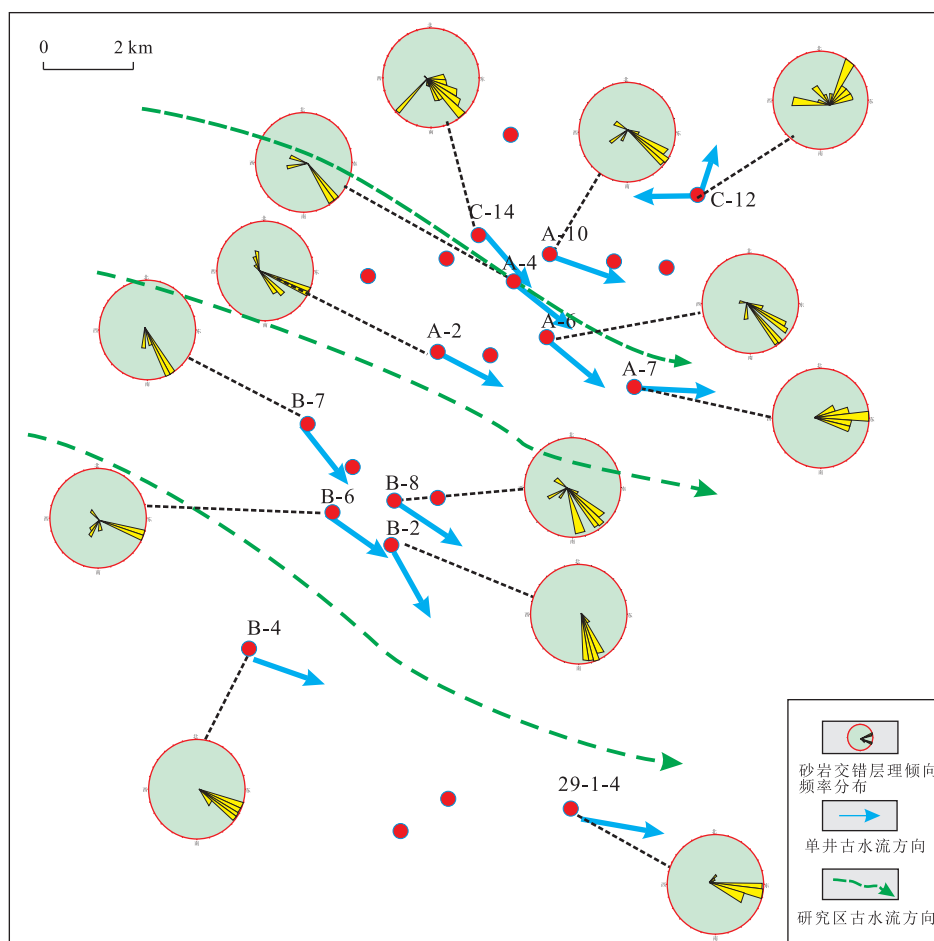


图 5 黄流组一段古水流平面分布

Fig.5 The distribution of paleo-current from member #1 of Huangliu Formation

石含量相对低的特征;越南昆嵩隆起物源具有锆石、电气石含量相对低,磁铁矿、石榴石、帘石类含量相对高的特征.综上可知,浅海砂坝和浅海重力流砂体可能分别来自海南岛物源和越南昆嵩隆起物源.

3.3 古水流分析

古水流分析能给物源的判断提供有利的依据 (Wang *et al.*, 2009),本次古水流的方向利用成像测井中砂岩交错层理倾向来判断,当交错层理倾向比较杂乱时,主要通过统计其分布频率并制作玫瑰花图来确定.Wang *et al.*(2009)指出当构造倾角小于 5° 时,可不做倾角校正,而研究区黄流组的构造倾角为 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$,因此本次研究未对构造倾角造成的细微差别做校正.图 5 区域古水流方向主要为南东向一东西向,再结合研究区的沉积背景和重矿物分析可知,研究区可能受到西部越南水系的影响.但最东部浅海砂坝的 C-12 井显示多个方向的古水流,表明浅海砂坝和浅海重力流砂岩在物源上存在一定差异性.另一方面,由于搬运路径或者局部地形差异的

变化,局部的物源方向可与区域物源方向有较大的差别,同时研究区还可能受到洋流作用的影响(何小胡等,2015),这都使得物源判断更加复杂,因此仅通过东方区古水流方向还不能确定具体的区域物源,图 5 揭示东方区可能主要受到西部越南蓝江物源或西北部红河物源体系的影响.因此还需借助其他方法综合判断具体区域物源方向.

4 砂岩元素地球化学特征及物源分析

物源分析包括源岩组分、沉积距离、搬运路径以及古沉积环境等方面,单一的岩相学在物源分析方面受到较大限制,而本次研究中砂岩元素地化分析主要解决源岩组分和源区构造背景,结合岩石学、重矿物特征、古水流等方面综合限定物源.

4.1 源岩组分及物源分析

4.1.1 主量元素证据 研究区的主量元素主要包括 SiO_2 ($62.80\% \sim 82.79\%$)、 Al_2O_3 ($6.69\% \sim$

13.05%)、CaO (0.99% ~ 5.96%)、MgO (1.03% ~ 2.17%)、K₂O (1.72% ~ 2.69%)、Na₂O (0.82% ~ 1.42%)、FeO (2.05% ~ 4.15%)、Fe₂O₃ (0.30% ~ 1.73%)、TiO₂、P₂O₅、MnO 等主量元素含量则普遍低于1% (附表1, www.earth-science.net/index.aspx)。其中 SiO₂ 含量较高,平均74.1%, Al₂O₃ 含量变化较大,为6.69%~13.05%,平均8.85%, Al₂O₃ 含量主要与长石、粘土矿物、云母等富铝矿物有关。主量元素中, SiO₂ 与其他氧化物多呈现明显负相关性 (附表2, www.earth-science.net/index.aspx),这也表明,随着砂岩成熟度的增加,其他不稳定矿物含量(长石、赤铁矿、磁铁矿)会相应消耗。Al₂O₃ 与 K₂O ($r=0.73$)、TiO₂ ($r=0.88$)、MgO ($r=0.84$)呈正相关性,表明富钾矿物与 Al 元素的分布密切相关,也说明这几种元素的分布主要受粘土矿物的控制 (Taylor and McLennan, 1985; El-Bialy, 2013)。SiO₂ 与 Al₂O₃ 呈现高度负相关性 ($r=-0.91$),表明 SiO₂ 主要赋存在石英中 (Akarish *et al.*, 2004; Zaid, 2013)。

Al₂O₃/TiO₂ 比值被许多学者用作沉积岩物源指示的最有效指标之一 (Hayashi *et al.*, 1997; El-Bialy, 2013), Al 和 Ti 的活动性较差,大多数情况下 Al 和 Ti 的分异作用不明显,母岩风化后, Al 主要赋存在粘土矿物和长石中,而 Ti 则可以粘土矿物形式赋存(如伊利石)或以铁镁质矿物产出 (Hayashi *et al.*, 1997; El-Bialy, 2013), Al₂O₃ 和 TiO₂ 高度相关性 ($r=0.88$) 也可证明这点。本区样品 Al₂O₃/TiO₂ 比值为 11.03~17.02,平均值为 14.48,表明源岩为中性—长英质源岩 (Hayashi *et al.*, 1997; El-Bialy, 2013)。

4.1.2 微量元素证据 稀土元素 (附表3, www.earth-science.net/index.aspx) 和一些微量元素 (附表4, www.earth-science.net/index.aspx) (Sc、Cr、Th、V、Ti、Hf、Zr) 的活动性低,对物源分析非常敏感,已经被广泛应用于源岩判别 (Bhatia, 1983; Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; McLennan *et al.*, 1993)。以 Henderson (1984) 球粒陨石为标准,对 28 块样品做标准化处理 (图 6)。

研究区 28 块样品稀土元素配分模式呈现“左高右低,重稀土平坦”特征,表明所有样品具有相似的物源。稀土元素总量 ΣREE 为 $128.3 \times 10^{-6} \sim 381.2 \times 10^{-6}$,平均 175.5×10^{-6} ,高于上地壳 (UCC) 稀土元素总量 (146.37×10^{-6}),略低于澳大利亚后太古代平均页岩 (PAAS) 稀土元素总量 (184.77×10^{-6}) (附表3)。以二分法划分轻重稀土元素时,本区浅海重力流体 28 块砂岩样品轻重稀土元素比值

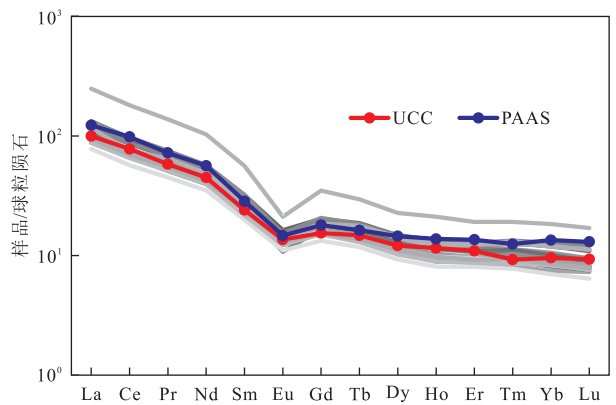


图6 黄流组砂岩稀土元素配分模式

Fig.6 The REE pattern of the sandstone samples from Huangliu Formation

球粒陨石、UCC 及 PAAS 数据来自于 Henderson (1984)、Taylor and McLennan (1985) 及 Rudnick and Gao (2003)

LREE/HREE = 7.58~11.12, 平均 9.28, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 7.15 \sim 13.55$, 平均 11.04, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.34 \sim 2.07$, 平均 1.81, 表明轻稀土元素富集,重稀土亏损,所有样品均显示 Eu 负异常, $\delta\text{Eu} = 0.48 \sim 0.70$, 平均 0.64, 低于 PAAS (0.65) 和 UCC (0.70), 且样品的配分模式与 UCC 及 PASS 相似 (图 6), 所有这些信息均表明源岩可能为中性—长英质源岩 (Rahman and Suzuki, 2007)。

微量元素的比值 (如 Th/Sc 和 Cr/Th) 也可对沉积岩物源分析提供重要信息 (Feng and Kerrich, 1990; Cullers and Berendsen, 1998; Cullers, 2000)。本区浅海重力流体 28 块砂岩样品 Th/Sc = 0.90~2.25, 平均 1.28, Th-Sc 图解和 Co/Th-La/Sc 图解 (图 7) 也显示绝大部分样品超过 UCC, 综上所述可知,源岩主要为长英质—中性源岩。本区浅海重力流体 28 块砂岩样品的 La/Sc、Th/Sc、Cr/Th、Eu/Eu* 比值均显示长英质源岩来源 (表 2), 来源于铁镁质源岩的可能性较小。

Cr、V、Ni 为岩浆熔融过程中的相容元素,但在风化过程中可表现出分异特征 (Feng and Kerrich, 1990; Cullers and Berendsen, 1998; Cullers, 2000)。一般来讲,来源于铁镁质火山岩碎屑的泥质岩中 $\text{Cr} > 150 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ni} > 100 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Cr}/\text{Ni} = 1.3 \sim 1.5$, 砂岩中 $\text{Cr}/\text{Ni} > 3$ 指示显著的沉积分异作用 (El-Bialy, 2013)。本区浅海重力流体 28 块砂岩样品 $\text{Cr} = 48.27 \sim 83.09$, 平均 56.52, $\text{Ni} = 15.18 \sim 28.67$, 平均 21.42, $\text{Cr}/\text{Ni} = 2.15 \sim 3.91$, 平均 2.68 (附表4), 表明源岩不太可能为铁镁质火山岩或超基性源岩 (Zimmermann and Bahlburg, 2003; Rahman and Suzuki, 2007), 而是经历了中等程度的沉积分异作用。

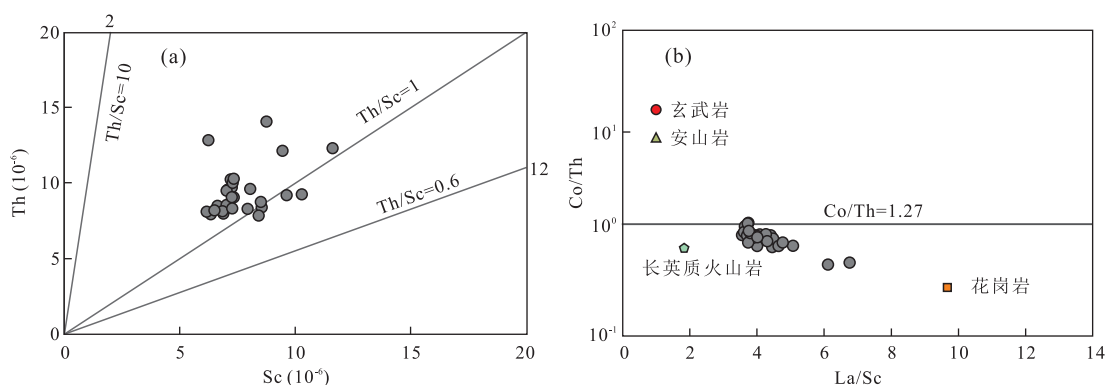


图 7 黄流组砂岩 Th-Sc(a)及 Co/Th-La/Sc(b)图解

Fig.7 Th-Sc (a) and Co/Th-La/Sc (b) diagram of sandstones from Huangliu Formation

Th/Sc=1 代表平均大陆上地壳,据 Taylor and McLennan(1985)

表 2 黄流组浅海重力流砂岩微量元素与长英质源岩、铁镁质源岩以及上地壳对比

Table 2 Comparison of elemental ratio of sediments from Huangliu Formation, felsic sources, mafic sources and upper continental crust

元素比值	黄流组	长英质源岩 (据 Armstrong-Altrin,2004)	铁镁质源岩 (据 Armstrong-Altrin,2004)	上地壳 (据 Rudnick and Gao,2003)
La/Sc	3.56~6.76(4.25*)	2.50~16.30	0.43~0.86	2.21
Th/Sc	0.90~2.25(1.28*)	0.84~20.50	0.05~0.22	0.75
Cr/Th	3.23~7.03(5.84*)	4.00~15.00	25.00~500.00	8.76
δ Eu	0.48~0.70(0.64*)	0.40~0.94	0.71~0.95	0.72

注:上标注*的为平均值.

4.2 构造背景及物源意义

许多学者采用了不同的方法来判别构造背景 (Taylor and McLennan,1985;Bhatia and Crook,1986; Roser and Korsch,1986).微量元素(如 La、Th、Sc、Zr)由于其活动性低,在沉积物风化和搬运过程中可保存源岩特征,因此常被用于识别构造背景(Bhatia and Crook,1986;李乐等,2015;廖婉琳等,2015).La-Th-Sc三角图中除一个点在边界处,几乎所有样品点都落在大陆岛弧区域(图 8a),Th-Sc-Zr/10三角图也呈现类似的特征,绝大部分样品点落在大陆岛弧区域(图 8b).微量元素和稀土元素含量及比值均接近大陆岛弧或主动大陆边缘环境(表 3).主量元素判别图解(DF1-DF2)显示大部分样品落在主动大陆边缘区域(图 8c).

南海位于欧亚板块、印-澳板块及太平洋板块的交接部位,其构造演化受到三大板块相对运动的制约,构造演化十分复杂,一直是国内外关注的热点之一.中生代时期,印支地块与华南板块相碰撞,导致越南昆崙隆起附近长山山脉的形成以及红河-马江断裂带之间的残留海关闭;到古新世末,在印度-欧亚板块碰撞的构造背景之中,印支地块被挤出,向南偏东方向运动,地块内部和边界的北西向断裂表现为左

旋滑动,如红河断裂、马江断裂等(郭令智等,2001;孙珍等,2006),考虑到判别图解中大陆岛弧区域和主动大陆边缘区域均代表挤压环境,故浅海重力流砂岩元素地化所揭示的构造背景与越南昆崙隆起相吻合.但需要注意的是,印支地块的母岩风化产物通过蓝江长距离搬运至莺西斜坡带,砂岩元素地化仅反映的是物源区的构造背景,并不代表新生代以来南海北部的构造背景.另一方面,中中新世后由于红河在源头区被长江袭夺,使向莺歌海盆地的沉积物输入量减少,而在盆地中发育了泥质较多的河口湾或海湾沉积(Clark *et al.*,2004),且现代海底表层沉积物调查的资料显示,在红河口附近主要以泥为主,并未见明显的大型高位三角洲发育,难以提供莺歌海盆地的巨厚沉积体(汪品先,1995).赵梦等(2013)指出晚渐新世至更新世红河水系的沉积物显示 Eu 正异常特征.与本次研究不符,沉积物仅影响到南海西北部的莺歌海盆地(Clark *et al.*,2004).Clift *et al.*(2008)也指出古红河沉积物显示 Ce 负异常特征.而本区砂岩样品未显示 Ce 负异常(平均 δ Ce=0.97),越南昆崙隆起可提供大量的长英质源岩(Clift *et al.*,2008;张伙兰等,2013;赵梦等,2013).

综合砂岩碎屑组分、重矿物、古水流以及砂岩元

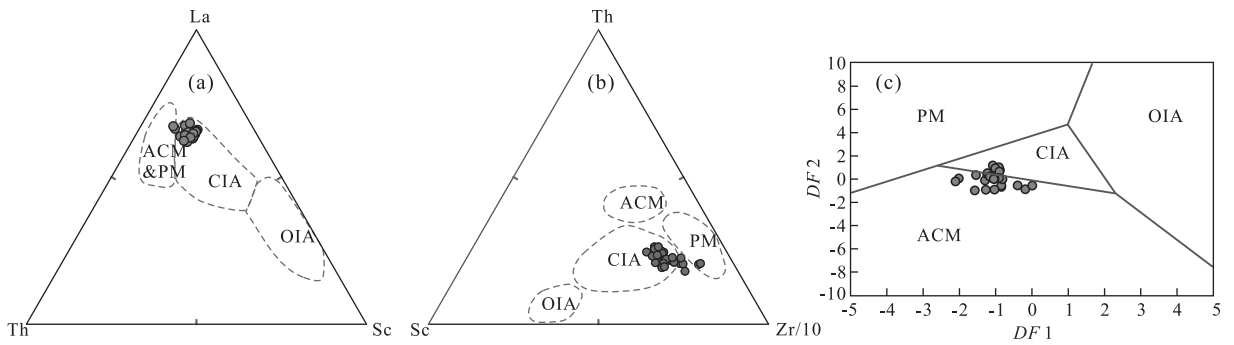


图 8 黄流组砂岩 La-Th-Sc(a)、Th-Sc-Zr/10(b)和黄流组砂岩主量元素(DF1-DF2)判别图解(c)

Fig.8 La-Th-Sc (a), Th-Sc-Zr/10 (b) and discriminant function diagram for the tectonic setting using major elements (c) of Huangliusha Formation

OIA.大洋岛弧;CIA.大陆岛弧;ACM.主动大陆边缘;PM.被动大陆边缘

表 3 黄流组浅海重力流砂岩微量元素与不同构造环境对比

Table 3 Comparison of trace and rare earth elements of sediments from different tectonic settings

	大洋岛弧	大陆岛弧	主动大陆边缘	被动大陆边缘	黄流组(平均值)
微量元素(Bhatia,1985)					
Th(10^{-6})	5.5	16.2	28.0	22.0	10.1
U(10^{-6})	2.4	3.2	6.0	3.6	1.5
La/Sc	1.0	1.8	2.5	1.9	4.3
Ni(10^{-6})	15.0	18.0	26.0	36.0	21.4
Sc/Ni	1.70	0.96	0.75	0.45	0.37
稀土元素(Bhatia,1985)					
La(10^{-6})	8.0	27.0	37.0	39.0	33.4
Ce(10^{-6})	19.0	59.0	78.0	85.0	63.9
Σ REE	58.0	146.0	186.0	210.0	175.5
(La/Yb) _N	2.8	7.5	8.5	10.8	11.0
Eu/Eu*	1.04	0.78	0.60	0.56	0.64

素地球化学分析可知,西部昆嵩隆起提供了本区浅海重力流沉积体系的物质来源,中央底辟带西部的浅海重力流砂体规模大,物性好(表 1),含气丰富。

关于该套浅海重力流砂体的下一步勘探方向问题,仅基于东方区目前古水流方向,其可能的堆积部位可能为东方区西部、西北部以及东南部方向。目前地震及钻井显示东方区东部及东南部主要为浅海砂坝沉积,未见大型重力流沉积(钟泽红等,2013)。西北部红河物源自中中新世被红河袭夺,临高凸起在一定程度上也可起到阻挡作用,且元素地球化学指标与红河物源明显不同(Cliff *et al.*, 2008; 赵梦等, 2013),难以提供东方区厚层重力流物质来源。因此,仅基于目前研究区的资料,下一步的勘探目标应为中央底辟带西部的主力砂体,而中央底辟带东部的浅海砂坝储层规模较小,储层质量较差(谢玉洪和范彩伟,2010),但东方区的西南部也可能具有其他期次的重力流沉积(王华等,2015)。

5 结论

(1)源于西部物源的浅海重力流砂岩长石、岩屑含量较高,结构成熟度高,泥质含量低,以岩屑石英细砂岩为主;源于东部物源的浅海砂坝砂岩长石、岩屑含量较低,成分成熟度高,但泥质含量高,以岩屑石英粉砂岩—石英粉砂岩为主;浅海重力流砂岩锆石、电气石含量低,磁铁矿、石榴石含量高,浅海砂坝砂岩锆石、电气石、白钛矿含量高,磁铁矿、石榴石含量低;且区域古水流方向主要为南东向—东西向,主要受到西部越南水系的影响;

(2)岩心样品相似的稀土元素配分模式表明浅海重力流砂岩具有一致物质来源,稀土元素含量及比值、判别图解均显示中性—长英质源岩特征,La-Th-Sc 三角图、Th-Sc-Zr/10 三角图以及主量元素判别图解均显示样品落在主动大陆边缘或大陆岛弧区域,说明浅海重力流砂岩源区为挤压环境,上述特征

与昆嵩隆起的母岩性质和构造背景相符合;

(3)综合砂岩碎屑组分、重矿物、古水流以及岩石元素地球化学分析可知,西部昆嵩隆起提供了本区浅海重力流沉积体系的物质来源.中央底辟带西侧的浅海重力流砂体规模大,物性好,含气丰富,为下一步向西部勘探的主力砂体,而中央底辟带东侧的浅海砂坝储层规模较小,储层质量较差.

References

- Akarish, A. I. M., El-Gohary, A. M., 2008. Petrography and Geochemistry of Lower Paleozoic Sandstones, East Sinai, Egypt; Implications for Provenance and Tectonic Setting. *Journal of African Earth Sciences*, 52(1-2): 43-54. doi:10.1016/j.jafrearsci.2008.04.002
- Armstrong-Altrin, J. S., Lee, Y. I., Verma, S. P., et al., 2004. Geochemistry of Sandstones from the Upper Miocene Kudankulam Formation, Southern India; Implications for Provenance, Weathering, and Tectonic Setting. *Journal of Sedimentary Research*, 74(2): 285-297. doi:10.1306/082803740285
- Bhatia, M. R., 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627. doi:10.1086/628815
- Bhatia, M. R., 1985. Rare-Earth Element Geochemistry of Australian Paleozoic Greywackes and Mudrocks; Provenance and Tectonic Control. *Sediment Geology*, 45(1): 97-113. doi:10.1016/0037-0738(85)90025-9
- Bhatia, M. R., Crook, K. A. W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181-193. doi:10.1007/bf00375292
- Carvajal, C., Steel, R., Petter, A., 2009. Sediment Supply: The Main Driver of Shelf-Margin Growth. *Earth-Science Reviews*, 96(4): 221-248. doi:10.1016/j.earscirev.2009.06.008
- Clark, M. K., Schoenbohm, L. M., Royden, L. H., et al., 2004. Surface Uplift, Tectonics, and Erosion of Eastern Tibet from Large-Scale Drainage Patterns. *Tectonics*, 23(1): 1-20. doi:10.1029/2002tc001402
- Clift, P. D., van Long, H. V., Hinton, R., et al., 2008. Evolving East Asian River Systems Reconstructed by Trace Element and Pb and Nd Isotope Variations in Modern and Ancient Red River-Song Hong Sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4): 1-29. doi:10.1029/2007gc001867
- Cullers, R. L., 2000. The Geochemistry of Shales, Siltstones and Sandstones of Pennsylvanian-Permian Age, Colorado, USA: Implications for Provenance and Metamorphic Studies. *Lithos*, 51(3): 181-203. doi:10.1016/s0024-4937(99)00063-8
- Cullers, R. L., Berendsen, P., 1998. The Provenance and Chemical Variation of Sandstones Associated with the Mid-Continent Rift System, U.S.A.. *European Journal of Mineralogy*, 10(5): 987-1002. doi:10.1127/ejm/10/5/0987
- Dickinson, W. R., 1985. Interpreting Provenance Relations from Detrital Modes of Sandstones. *Provenance of Arenites*, 325: 333-361. doi:10.1007/978-94-017-2809-6_15
- El-Bialy, M. Z., 2013. Geochemistry of the Neoproterozoic Metasediments of Malhaq and Um Zariq Formations, Kid Metamorphic Complex, Sinai, Egypt; Implications for Source-Area Weathering, Provenance, Recycling, and Depositional Tectonic Setting. *Lithos*, 175-176: 68-85. doi:10.1016/j.lithos.2013.05.002
- Feng, R., Kerrich, R., 1990. Geochemistry of Fine-Grained Clastic Sediments in the Archean Abitibi Greenstone Belt, Canada; Implications for Provenance and Tectonic Setting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(4): 1061-1081. doi:10.1016/0016-7037(90)90439-r
- Folk, R. L., 1968. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill, Austin, TX, 107.
- Fu, L., Guan, P., Zhao, W. Y., et al., 2013. Heavy Mineral Feature and Provenance Analysis of Paleogene Lulehe Formation in Qaidam Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2867-2875 (in Chinese with English abstract).
- Guo, L. Z., Zhong, Z. H., Wang, L. S., et al., 2001. Regional Tectonic Evolution around Yinggehai Basin of South China Sea. *Geological Journal of China Universities*, 7(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Dong, W. L., Zou, H. Y., et al., 2003. Overpressure Fluid Flow and Rapid Accumulation of Natural Gas in Yinggehai Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 7-12 (in Chinese with English abstract).
- Hayashi, K. I., Fujisawa, H., Holland, H. D., et al., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga Sedimentary Rocks from Northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115-4137. doi:10.1016/s0016-7037(97)00214-7
- He, W. J., Xie, J. Y., Liu, X. Y., et al., 2011. Foraminiferal Biostratigraphy and Sedimentary Environment Reconstruction Based on Paleontological Data from Bore Hole DF1-1-11, Yinggehai Basin. *Journal of Stratigraphy*, 35(1): 81-87 (in Chinese with English abstract).
- He, X. H., Zhong Z. H., Dong G. N., et al., 2015. Neogene

- Ocean Current in Yingqiong Basin; Implication of Deep-Water Oil and Gas Exploration. *Natural Gas Exploration and Development*, 38(1): 4–11 (in Chinese with English abstract).
- Henderson, P., 1984. Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 52–71.
- 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 Tangu Area, Eastern China. *Earth Science*, 40(9): 1480–1496 (in Chinese with English abstract).
- Liao, W. L., Xiao, L., Zhang, L., et al., 2015. Provenance and Tectonic Setting of Early Carboniferous Sedimentary Strata in Western Junggar, Xinjiang. *Earth Science*, 40(3): 485–503 (in Chinese with English abstract).
- McLennan, S. M., 1989. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Processes. *Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy*, 21: 169–200.
- McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D. K., et al., 1993. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance and Tectonics. In: Johnson, M. J., Basu, A., eds., Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. *The Geological Society of America*, (Special Paper 284): 21–40.
- Moosavirad, S. M., Janardhana, M. R., Sethumadhav, M. S., et al., 2012. Geochemistry of Lower Jurassic Sandstones of Shemshak Formation, Kerman Basin, Central Iran: Provenance, Source Weathering and Tectonic Setting. *Journal of the Geological Society of India*, 79(5): 483–496. doi: 10.1007/s12594-012-0073-4
- Morley, C. K., 2002. A Tectonic Model for the Tertiary Evolution of Strike-Slip Faults and Rift Basins in SE Asia. *Tectonophysics*, 347(4): 189–215. doi: 10.1016/s0040-1951(02)00061-6
- Morton, A. C., 1987. Influences of Provenance and Diagenesis on Detrital Garnet Suites in the Paleocene Forties Sandstone, Central North Sea. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 57(6): 1027–1032. doi: 10.1306/212f8cd8-2b24-11d7-8648000102c1865d
- Morton, A. C., Whitham, A. G., Fanning, C. M., 2005. Provenance of Late Cretaceous to Paleocene Submarine Fan Sandstones in the Norwegian Sea: Integration of Heavy Mineral, Mineral Chemical and Zircon Age Data. *Sedimentary Geology*, 182(1–4): 3–28. doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.08.007
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1996. Petrogenesis of Sediments in the Absence of Chemical Weathering: Effects of Abrasion and Sorting on Bulk Composition and Mineralogy. *Sedimentology*, 43(2): 341–358. doi: 10.1046/j.1365-3091.1996.d01-12.x
- Pang, X., Peng, D. J., Chen, C. M., et al., 2007. Three Hierarchies “Source-Conduit-Sink” Coupling Analysis of the Pearl River Deep-Water Fan System. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 857–864 (in Chinese with English abstract).
- Pei, J. X., Yu, J. F., Wang, L. F., et al., 2011. Key Challenges and Strategies for the Success of Natural Gas Exploration in Mid-Deep Strata of the Yinggehai Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 32(4): 573–579 (in Chinese with English abstract).
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R., 1987. Sand and Sandstone. 2nd ed., Springer, New York, 553.
- Rahman, M. J. J., Suzuki, S., 2007. Geochemistry of Sandstones from the Miocene Surma Group, Bengal Basin, Bangladesh: Implications for Provenance, Tectonic Setting and Weathering. *Geochemical Journal*, 41(6): 415–428. doi: 10.2343/geochemj.41.415
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1986. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635–650. doi: 10.1086/629071
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., Treatise on Geochemistry. Pergamon, Oxford, 1–64.
- Saminpanya, S., Duangkrayom, 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.jseaes.2014.01.007
- Sun, Z., Zhong, Z. H., Zhou, D., et al., 2006. The Development Mechanism of the South China Sea. *Science China (Series D)*, 36(9): 797–810 (in Chinese).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. *The Journal of Geology*, 94(4): 57–72.
- Tong, C. X., Wang, Z. F., Li, X. S., 2012. Pooling Conditions of Gas Reservoirs in the Dongfang 1-1 Gas Field, Yinggehai Basin. *Natural Gas Industry*, 32(8): 11–15. 26 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. L., Al-Busaidi, S., Lee, D. N. H., 2009. Prediction of Sand Body Trend Based on Stratigraphic Dip Pattern from Microresistivity Images in Permian Sandstone Reservoir, Oman. SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium, Saudi Arabia, 1–12. doi: 10.2118/126084-ms

- Wang, H., Chen, S., Gan, H.J., et al., 2015. Accumulation Mechanism of Large Shallow Marine Turbidite Deposits: A Case Study of Gravity Flow Deposits of the Huangliu Formation in Yinggehai Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 21–34 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P.X., 1995. ODP and Qinghai/Xizang (Tibetan) Plateau. *Advance in Earth Sciences*, 10(3): 254–257 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y.H., Fan, C.W., 2010. Some New Knowledge about the Origin of Huangliu Formation Reservoirs in Dongfang Area, Yinggehai Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 22(6): 355–359, 386 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y.H., Zhang, Y.Z., Li, X.S., et al., 2012. Main Controlling Factors and Formation Models of Natural Gas Reservoirs with High-Temperature and Overpressure in Yinggehai Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 33(4): 601–609 (in Chinese with English abstract).
- Zaid, S. M., 2013. Provenance, Diagenesis, Tectonic Setting and Reservoir Quality of the Sandstones of the Kareem Formation, Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 85: 31–52. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2013.04.010
- Zhang, H.L., Pei, J.X., Zhang, Y.Z., et al., 2013. Overpressure Reservoirs of the Huangliu Formation of the Dongfang Area, Yinggehai Basin, South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 102–112 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. M., 1999. Evolution of Ying-Qiong Basin and Its Tectonic-Thermal System. *Natural Gas Industry*, 19(1): 12–18 (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 Provenance. *Earth Science*, 38(1): 61–69 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Z. H., Liu, J. H., Zhang, D. J., et al., 2013. Origin and Sedimentary Reservoir Characteristics of a Large Submarine Fan in Dongfang Area, Yinggehai Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 34 (Suppl. 2): 284–293 (in Chinese with English abstract).
- Zimmermann, U., Bahlburg, H., 2003. Provenance Analysis and Tectonic Setting of the Ordovician Clastic Deposits in the Southern Puna Basin, NW Argentina. *Sedimentology*, 50(6): 1079–1104. doi:10.1046/j.1365–3091.2003.00595.x
- ### 附中文参考文献
- 付玲, 关平, 赵为永, 等, 2013. 柴达木盆地古近系路乐河组重矿物特征与物源分析. *岩石学报*, 29(8): 2867–2875.
- 郭令智, 钟志洪, 王良书, 等, 2001. 莺歌海盆地周边区域构造演化. *高校地质学报*, 7(1): 1–12.
- 郝芳, 董伟良, 邹华耀, 等, 2003. 莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏. *石油学报*, 24(6): 7–12.
- 何卫军, 谢金有, 刘新宇, 等, 2011. 莺歌海盆地 DF1-1-11 井有孔虫生物地层与沉积环境研究. *地层学杂志*, 35(1): 81–87.
- 何小胡, 钟泽红, 董贵能, 等, 2015. 莺琼盆地新近纪海流的研究新进展及深水油气勘探的启示. *天然气勘探与开发*, 38(1): 4–11.
- 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.
- 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): 485–503.
- 庞雄, 彭大钧, 陈长民, 等, 2007. 三级“源—渠—汇”耦合研究珠江深水扇系统. *地质学报*, 81(6): 857–864.
- 裴健翔, 于俊峰, 王立锋, 等, 2011. 莺歌海盆地中深层天然气勘探的关键问题及对策. *石油学报*, 32(4): 573–579.
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等, 2006. 南海的发育机制研究: 相似模拟证据. *中国科学(D辑)*, 36(9): 797–810.
- 童传新, 王振峰, 李绪深, 2012. 莺歌海盆地东方 1-1 气田成藏条件及其启示. *天然气工业*, 32(8): 11–15, 26.
- 王华, 陈思, 甘华军, 等, 2015. 浅海背景下大型浊积扇研究进展及堆积机制探讨: 以莺歌海盆地黄流组为例. *地学前缘*, 22(1): 21–34.
- 汪品先, 1995. 大洋钻探与青藏高原. *地球科学进展*, 10(3): 254–257.
- 谢玉洪, 范彩伟, 2010. 莺歌海盆地东方区黄流组储层成因新认识. *中国海上油气*, 22(6): 355–359, 386.
- 谢玉洪, 张迎朝, 李绪深, 等, 2012. 莺歌海盆地高温超压气藏控藏要素与成藏模式. *石油学报*, 33(4): 601–609.
- 张伙兰, 裴健翔, 张迎朝, 等, 2013. 莺歌海盆地东方区黄流组超压储集层特征. *石油勘探与开发*, 40(3): 102–112.
- 张启明, 1999. 莺琼盆地的演化与构造—热体制. *天然气工业*, 19(1): 12–18.
- 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(1): 61–69.
- 钟泽红, 刘景环, 张道军, 等, 2013. 莺歌海盆地东方区大型海底扇成因及沉积储层特征. *石油学报*, 34(增刊 2): 284–293.

附表 1 黄流组砂岩主量元素含量 (%)
Appendix Table 1 The concentrations of major element for the sandstones from Huangliu Formation (%)

样号	N ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ /Total	LOI	SUM	Al ₂ O ₃ /TiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
1	1.24	2.17	12.20	65.72	0.15	2.69	3.51	0.74	0.06	1.54	3.60	5.54	5.76	99.38	16.49	5.39
2	1.09	1.90	10.57	71.15	0.12	2.25	2.78	0.69	0.05	1.34	3.25	4.96	4.62	99.82	15.38	6.73
3	0.98	1.23	7.93	77.40	0.12	1.78	2.74	0.53	0.04	0.98	2.20	3.43	3.86	99.80	15.00	9.76
4	0.97	1.08	6.69	75.37	0.10	1.72	5.08	0.45	0.08	0.53	2.15	2.92	5.31	99.55	14.73	11.27
5	1.10	1.56	8.81	75.08	0.11	2.11	2.31	0.58	0.04	0.95	3.10	4.39	3.74	99.49	15.25	8.52
6	1.04	1.34	7.74	77.63	0.10	2.01	2.47	0.52	0.04	0.71	2.65	3.65	3.59	99.84	14.88	10.03
7	0.90	1.11	6.84	82.42	0.10	1.77	0.99	0.62	0.02	0.64	2.20	3.08	2.31	99.92	11.03	12.05
8	0.93	1.16	7.32	80.55	0.10	1.90	1.72	0.43	0.04	0.60	2.45	3.32	2.73	99.93	17.02	11.00
9	0.82	1.03	6.70	82.79	0.09	1.77	1.07	0.50	0.03	0.65	2.05	2.93	2.14	99.64	13.40	12.36
10	1.25	1.46	7.76	75.72	0.10	1.72	2.20	0.56	0.05	0.44	2.87	3.63	5.66	99.79	13.86	9.76
11	1.28	1.59	8.08	73.33	0.10	1.78	2.86	0.58	0.07	0.70	2.90	3.92	6.20	99.47	13.93	9.08
12	1.19	1.76	11.65	70.67	0.12	1.80	2.13	0.72	0.07	1.16	2.77	4.23	5.50	99.52	16.07	6.07
13	1.42	1.57	10.43	73.05	0.12	1.80	2.12	0.71	0.03	0.99	2.50	3.77	4.92	99.66	14.69	7.00
14	1.10	1.97	13.05	62.87	0.13	2.65	3.36	1.00	0.04	1.39	4.15	6.00	7.73	99.44	13.05	4.82
15	0.97	1.74	12.35	62.80	0.13	2.18	5.96	0.78	0.05	1.26	3.15	4.76	8.49	99.86	15.83	5.09
16	1.08	1.32	7.57	78.18	0.10	1.87	1.47	0.60	0.04	0.68	2.60	3.57	4.49	100.00	12.62	10.33
17	1.32	1.68	8.86	73.13	0.10	2.10	2.23	0.60	0.04	0.67	3.20	4.23	5.93	99.86	14.77	8.25
18	1.28	1.57	8.40	74.37	0.10	2.01	1.91	0.60	0.04	0.71	2.87	3.90	5.45	99.31	14.00	8.85
19	1.30	1.61	8.51	74.15	0.10	2.02	1.99	0.60	0.03	0.68	2.90	3.90	5.62	99.52	14.17	8.72
20	1.19	1.59	8.39	74.71	0.10	2.05	1.81	0.60	0.04	0.75	3.10	4.19	5.44	99.77	13.98	8.90
21	1.18	1.51	8.19	75.76	0.10	1.98	1.65	0.59	0.04	0.67	2.83	3.81	5.05	99.55	13.88	9.25
22	1.28	1.93	9.71	70.15	0.12	2.26	2.19	0.73	0.05	1.73	3.00	5.06	6.60	99.75	13.30	7.22
23	1.29	1.76	8.73	72.30	0.10	1.99	2.40	0.63	0.05	0.92	3.10	4.36	6.26	99.53	13.86	8.28
24	1.24	1.50	8.24	75.17	0.09	1.91	2.37	0.52	0.04	0.30	2.85	3.46	5.48	99.71	15.84	9.13
25	1.10	1.43	7.86	76.30	0.11	1.87	2.07	0.60	0.04	0.69	2.65	3.63	5.17	99.89	13.10	9.71
26	1.18	1.53	8.53	74.58	0.10	2.04	2.14	0.55	0.04	0.66	2.90	3.88	5.47	99.72	15.51	8.74
27	1.21	1.49	8.45	74.98	0.10	2.04	1.80	0.57	0.04	0.78	2.85	3.95	5.27	99.58	14.82	8.87
28	1.03	1.54	8.24	74.58	0.10	2.00	2.39	0.55	0.04	0.58	2.97	3.88	5.71	99.73	14.98	9.05

附表 2 黄流组砂岩主量、微量元素相关系数矩阵

Appendix Table 2 Correlation coefficient matrix of chemical elements in the samples

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	CO ₂	Lost	Sc	Cu	Rb	Zr	Hf	Th	U	Ba	Cr	Ni	Sr	V	B	
Na ₂ O	1.00																										
MgO	0.59	1.00																									
Al ₂ O ₃	0.29	0.84	1.00																								
SiO ₂	-0.37	-0.86	-0.91	1.00																							
P ₂ O ₅	0.10	0.69	0.84	-0.76	1.00																						
K ₂ O	0.18	0.79	0.73	-0.73	0.69	1.00																					
CaO	-0.11	0.29	0.47	-0.67	0.53	0.30	1.00																				
TiO ₂	0.26	0.75	0.88	-0.81	0.72	0.68	0.30	1.00																			
MnO	0.11	0.26	0.22	-0.40	0.26	0.03	0.61	0.03	1.00																		
Fe ₂ O ₃	0.13	0.73	0.79	-0.71	0.86	0.70	0.33	0.76	0.21	1.00																	
FeO	0.43	0.88	0.75	-0.81	0.53	0.86	0.29	0.72	0.14	0.52	1.00																
CO ₂	0.53	0.56	0.46	-0.69	0.16	0.31	0.40	0.51	0.27	0.20	0.58	1.00															
Lost	0.49	0.71	0.64	-0.87	0.41	0.47	0.61	0.62	0.40	0.39	0.69	0.93	1.00														
Sc	0.29	0.81	0.71	-0.75	0.73	0.84	0.30	0.75	0.12	0.75	0.76	0.44	0.58	1.00													
Cu	0.32	0.88	0.84	-0.87	0.74	0.88	0.44	0.75	0.17	0.67	0.88	0.49	0.67	0.81	1.00												
Rb	0.02	0.60	0.68	-0.64	0.50	0.76	0.23	0.65	-0.24	0.52	0.74	0.40	0.49	0.60	0.75	1.00											
Zr	-0.07	0.34	0.58	-0.51	0.45	0.48	0.19	0.83	-0.15	0.44	0.52	0.34	0.37	0.50	0.48	0.56	1.00										
Hf	-0.08	0.33	0.57	-0.49	0.44	0.46	0.18	0.83	-0.15	0.43	0.50	0.32	0.36	0.48	0.47	0.55	1.00	1.00									
Th	-0.13	0.44	0.67	-0.61	0.58	0.63	0.33	0.82	-0.08	0.51	0.62	0.30	0.40	0.58	0.64	0.68	0.95	0.94	1.00								
U	-0.06	0.55	0.77	-0.72	0.69	0.71	0.41	0.87	0.02	0.63	0.68	0.35	0.48	0.66	0.74	0.72	0.90	0.90	0.98	1.00							
Ba	0.42	0.18	0.03	-0.15	-0.13	-0.15	0.01	0.09	0.30	-0.14	0.20	0.42	0.33	0.01	0.09	-0.10	0.06	0.07	-0.00	0.02	1.00						
Cr	-0.03	0.64	0.74	-0.66	0.73	0.77	0.28	0.85	-0.01	0.74	0.70	0.20	0.36	0.74	0.77	0.66	0.80	0.80	0.89	0.91	-0.02	1.00					
Ni	0.34	0.87	0.71	-0.74	0.65	0.86	0.25	0.66	0.10	0.75	0.83	0.41	0.57	0.85	0.86	0.70	0.35	0.33	0.48	0.59	-0.02	0.72	1.00				
Sr	-0.06	0.31	0.50	-0.68	0.52	0.31	0.93	0.38	0.56	0.39	0.30	0.46	0.63	0.29	0.42	0.25	0.26	0.25	0.35	0.44	0.09	0.32	0.30	1.00			
V	0.21	0.85	0.86	-0.86	0.80	0.90	0.42	0.85	0.14	0.79	0.87	0.42	0.61	0.88	0.93	0.76	0.64	0.63	0.77	0.85	0.05	0.91	0.89	0.45	1.00		
B	0.57	0.73	0.54	-0.63	0.38	0.63	0.09	0.62	-0.08	0.48	0.70	0.66	0.67	0.63	0.69	0.60	0.35	0.34	0.37	0.43	0.07	0.44	0.69	0.16	0.64	1.00	

附表 3 黄流组砂岩稀土元素含量(10⁻⁶)
Appendix Table 3 The concentrations of rare earth element for the sandstones from Huangliu Formation (10⁻⁶)

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	SUM	LREE	HREE	LREE/HREE	Eu/Eu*	(La/Yb) _N	(Gd/Yb) _N
1	41.35	77.82	9.11	33.99	6.26	1.20	5.25	0.89	4.76	0.94	2.69	0.41	2.50	0.36	25.19	212.71	169.72	17.80	9.53	0.64	11.15	1.69
2	36.98	71.17	8.37	31.33	5.74	1.10	4.96	0.81	4.43	0.89	2.46	0.37	2.21	0.32	22.66	193.78	154.69	16.43	9.42	0.63	11.29	1.81
3	29.84	58.47	6.78	25.69	4.76	0.98	4.18	0.69	3.71	0.72	2.02	0.30	1.78	0.26	18.74	158.91	126.52	13.65	9.27	0.67	11.29	1.89
4	28.31	56.14	6.60	25.88	4.87	1.02	4.36	0.74	3.93	0.77	2.13	0.31	1.89	0.27	20.04	157.26	122.82	14.40	8.53	0.68	10.08	1.86
5	28.90	56.11	6.62	25.21	4.45	0.92	4.00	0.66	3.52	0.69	1.92	0.29	1.73	0.26	17.91	153.18	122.21	13.06	9.36	0.67	11.24	1.86
6	27.30	53.90	6.37	24.15	4.48	0.90	3.98	0.66	3.54	0.69	1.93	0.30	1.69	0.27	17.62	147.76	117.09	13.05	8.97	0.65	10.89	1.90
7	38.18	74.92	8.66	32.32	5.90	1.02	4.97	0.78	4.12	0.80	2.29	0.36	2.11	0.30	20.96	197.69	161.00	15.73	10.23	0.57	12.19	1.90
8	27.17	54.06	6.23	23.90	4.51	0.95	3.99	0.65	3.35	0.64	1.85	0.26	1.56	0.24	16.53	145.89	116.82	12.54	9.32	0.68	11.76	2.07
9	27.59	58.86	6.27	23.93	4.61	0.79	4.32	0.72	4.04	0.83	2.45	0.41	2.60	0.41	25.17	163.00	122.05	15.78	7.73	0.54	7.15	1.34
10	28.70	56.96	6.91	26.25	4.78	0.91	4.26	0.68	3.67	0.76	2.03	0.30	1.83	0.27	18.62	156.93	124.51	13.80	9.02	0.62	10.58	1.88
11	29.53	58.02	6.96	26.54	4.92	0.95	4.13	0.67	3.65	0.72	2.00	0.30	1.69	0.26	18.16	158.50	126.92	13.42	9.46	0.65	11.79	1.97
12	31.51	59.88	7.19	26.96	4.94	0.98	4.30	0.70	3.64	0.75	2.04	0.32	1.87	0.29	18.68	164.04	131.46	13.89	9.46	0.65	11.38	1.86
13	36.58	69.38	8.25	31.09	5.51	1.06	4.67	0.74	4.05	0.80	2.26	0.34	2.00	0.29	20.44	187.44	151.87	15.13	10.03	0.64	12.36	1.89
14	77.28	146.47	16.81	61.99	10.99	1.56	9.05	1.40	7.31	1.52	4.02	0.62	3.85	0.57	37.73	381.16	315.09	28.34	11.12	0.48	13.55	1.90
15	40.67	78.87	9.19	34.45	6.29	1.12	5.36	0.87	4.66	0.97	2.69	0.41	2.51	0.38	24.66	213.10	170.59	17.85	9.56	0.59	10.94	1.73
16	32.67	62.62	7.38	27.96	5.07	1.00	4.29	0.69	3.63	0.71	2.03	0.29	1.72	0.25	17.99	168.28	136.69	13.60	10.05	0.66	12.78	2.01
17	31.15	58.76	7.17	27.18	4.84	0.99	4.20	0.69	3.63	0.73	2.04	0.30	1.97	0.27	19.21	163.14	130.10	13.83	9.41	0.67	10.64	1.72
18	31.12	58.50	7.14	27.00	4.90	0.98	4.28	0.70	3.79	0.75	2.08	0.31	1.81	0.28	19.58	163.22	129.64	14.00	9.26	0.66	11.62	1.91
19	30.81	59.03	7.10	27.15	4.92	0.99	4.17	0.70	3.76	0.74	2.02	0.33	1.96	0.27	19.09	163.05	130.00	13.95	9.32	0.67	10.60	1.72
20	30.99	60.50	7.18	27.32	4.97	0.98	4.25	0.68	3.62	0.71	1.99	0.30	1.73	0.26	17.79	163.24	131.93	13.52	9.75	0.65	12.11	1.99
21	31.40	60.56	7.26	27.22	5.08	1.01	4.24	0.71	3.79	0.72	2.06	0.31	1.86	0.28	19.06	165.55	132.53	13.96	9.50	0.67	11.36	1.83
22	38.51	69.70	8.48	31.83	5.74	1.13	5.14	0.86	4.78	0.96	2.69	0.43	2.67	0.41	26.15	199.49	155.40	17.94	8.66	0.64	9.72	1.55
23	31.41	57.19	7.15	27.25	5.30	1.02	4.81	0.84	4.59	0.91	2.60	0.40	2.53	0.37	23.24	169.62	129.32	17.05	7.58	0.62	8.36	1.53
24	24.15	46.12	5.50	21.04	3.89	0.81	3.45	0.56	2.98	0.58	1.69	0.25	1.46	0.21	15.64	128.35	101.52	11.19	9.08	0.68	11.15	1.91
25	36.05	61.28	7.89	29.54	5.46	1.04	4.68	0.84	4.51	0.87	2.58	0.43	2.47	0.38	23.11	181.12	141.27	16.74	8.44	0.63	9.85	1.53
26	30.22	56.66	6.83	25.82	4.67	1.00	4.10	0.68	3.62	0.71	2.00	0.29	1.76	0.26	18.01	156.63	125.20	13.42	9.33	0.70	11.55	1.88
27	27.38	52.71	6.28	23.84	4.24	0.91	3.89	0.61	3.28	0.64	1.83	0.28	1.75	0.25	16.83	144.72	115.36	12.53	9.21	0.69	10.54	1.79
28	29.46	56.54	6.73	25.44	4.67	0.96	3.97	0.65	3.61	0.70	1.94	0.30	1.79	0.26	18.11	155.13	123.79	13.23	9.36	0.68	11.12	1.79

附表 4 黄流组砂岩微量元素含量 (10^{-6})
 Appendix Table 4 The concentrations of trace element for the sandstones from Huangliu Formation (10^{-6})

样号	Sc	Co	Cu	Rb	Zr	Hf	Th	U	Ba	Cr	Ni	Sr	V	B	Cr/Ni	Th/Sc	Cr/Th	La/Sc
1	11.61	11.92	13.04	84.14	266.1	8.60	12.30	2.00	424.1	68.43	28.52	141.3	81.99	64.79	2.40	1.06	5.56	3.56
2	9.45	11.76	10.70	76.26	280.9	9.57	12.14	1.80	454.1	71.72	27.85	129.0	77.44	58.57	2.58	1.28	5.91	3.91
3	7.08	8.56	6.48	73.76	227.8	7.25	9.57	1.47	335.1	55.84	22.11	131.2	57.05	45.82	2.53	1.35	5.84	4.21
4	6.35	5.83	5.14	42.32	187.5	6.23	7.93	1.23	320.7	48.27	15.18	179.9	47.86	35.81	3.18	1.25	6.09	4.46
5	7.25	9.06	7.60	80.17	220.9	7.54	9.71	1.45	360.8	56.82	21.19	111.2	61.81	54.49	2.68	1.34	5.85	3.99
6	6.63	7.27	6.38	74.87	204.9	6.78	8.50	1.33	394.9	51.87	18.70	118.4	54.78	43.24	2.77	1.28	6.10	4.12
7	6.24	6.36	5.82	65.22	447.5	15.27	12.84	1.63	325.8	61.43	15.72	77.21	51.57	42.11	3.91	2.06	4.78	6.12
8	6.16	7.79	6.02	74.74	168.0	5.42	8.11	1.33	365.3	49.76	19.21	94.75	49.88	33.33	2.59	1.32	6.13	4.41
9	6.89	6.01	4.68	66.60	216.6	7.23	7.98	1.16	425.3	52.62	16.86	83.64	48.08	32.00	3.12	1.16	6.60	4.01
10	7.03	8.39	7.51	67.07	240.5	8.27	8.56	1.32	1008	52.73	19.06	122.1	57.76	54.07	2.77	1.22	6.16	4.09
11	7.34	8.53	7.14	65.66	254.1	8.75	9.05	1.41	1033	55.00	19.48	125.9	57.33	44.74	2.82	1.23	6.07	4.02
12	7.03	8.47	7.50	68.19	300.4	10.09	9.50	1.54	513.2	54.28	19.56	114.6	58.02	45.35	2.78	1.35	5.72	4.48
13	7.20	7.78	6.95	66.40	329.8	11.27	10.24	1.53	448.2	55.41	18.24	108.4	56.90	61.20	3.04	1.42	5.41	5.08
14	11.43	13.36	12.84	110.5	887.8	29.35	25.73	3.39	533.4	83.09	28.67	149.2	91.33	75.64	2.90	2.25	3.23	6.76
15	8.75	10.61	10.80	99.77	402.2	13.27	14.07	2.13	484.6	62.76	23.62	223.2	72.89	61.49	2.66	1.61	4.46	4.65
16	6.85	6.66	5.80	63.31	307.7	10.14	8.14	1.26	519.3	53.86	18.71	115.6	54.28	57.70	2.88	1.19	6.62	4.77
17	8.54	9.89	7.99	76.89	237.5	7.50	8.40	1.22	487.3	53.83	23.40	106.8	58.29	59.62	2.30	0.98	6.41	3.65
18	8.05	8.65	7.75	64.55	261.6	8.40	9.61	1.48	704.3	53.98	21.35	118.1	58.24	57.57	2.53	1.19	5.62	3.87
19	8.51	9.06	7.97	75.05	254.3	8.15	8.76	1.41	426.3	55.14	22.62	110.5	60.82	51.10	2.44	1.03	6.30	3.62
20	7.26	8.94	6.98	74.86	272.3	8.87	9.07	1.34	460.6	54.23	22.39	108.2	57.63	61.07	2.42	1.25	5.98	4.27
21	7.29	8.45	7.31	77.93	273.1	9.23	10.02	1.45	469.6	54.75	21.30	117.4	58.64	65.27	2.57	1.37	5.46	4.31
22	10.28	11.80	9.72	83.33	290.9	9.36	9.26	1.65	463.9	60.45	27.56	113.6	69.70	81.79	2.19	0.90	6.53	3.75
23	8.42	9.84	8.23	72.10	216.0	6.72	7.85	1.30	450.6	55.20	25.66	127.7	62.79	63.72	2.15	0.93	7.03	3.73
24	6.50	7.85	9.42	74.86	176.0	5.84	8.20	1.26	569.8	48.54	19.55	101.5	54.14	66.47	2.48	1.26	5.92	3.71
25	9.63	7.52	6.45	70.72	287.3	9.39	9.20	1.32	418.5	51.93	19.31	96.45	56.41	57.88	2.69	0.96	5.65	3.74
26	7.93	8.37	8.16	76.57	198.7	6.84	8.29	1.19	373.8	52.93	21.54	98.16	59.05	54.68	2.46	1.05	6.38	3.81
27	7.28	8.82	7.76	80.59	201.3	6.59	8.33	1.31	384.0	53.08	21.28	121.5	57.37	69.53	2.49	1.14	6.38	3.76
28	7.34	9.47	8.01	86.61	217.4	7.25	10.28	1.51	343.8	54.53	21.02	98.16	59.63	60.61	2.59	1.40	5.30	4.01