

https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.588



南海北部中央峡谷水道的岩相—地球化学特征及其源区性质

尤丽^{1,2}, 钟佳², 张迎朝², 李才², 吴仕玖², 代龙², 蔡玉蔓³

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

3. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018

摘要: 峡谷水道是南海北部琼东南盆地深水区主要储集层, 乐东—陵水凹陷黄流组储集岩以粉、细砂岩为主, 储层物性好。然而目前针对不同期水道主要物源供给及水道形成的母岩区性质、古风化程度等研究甚少。对中央峡谷西段水道的砂泥岩进行了岩石薄片与重矿物成分观察统计、岩石主量、微量/稀土元素分析, 结果表明: 岩石类型以岩屑石英砂岩和长石岩屑砂岩为主, 崖城、陵水区重矿物分别为磁铁矿、白钛矿、锆石、电气石与白钛矿、石榴石、电气石、锆石的组合; 地球化学特征表现为泥岩较砂岩 SiO₂ 含量低, Fe₂O₃、MgO、K₂O、稀土含量偏高, 与其含有高粘土矿物有关。砂、泥岩 Al₂O₃/TiO₂、K₂O/Al₂O₃、K₂O/Na₂O 比值说明物源区富石英、贫钾长石, 分别为石英质沉积与中性火成岩源区; 砂岩较泥岩具有较高 SiO₂/Al₂O₃ 比值、低 ICV、CIA、CIW 值, 表明源区经历了低—中等程度的风化作用, 是稳定构造环境再循环沉积而成, 泥岩的形成环境较砂岩动荡。
关键词: 峡谷水道; 岩相; 地球化学; 源区性质; 黄流组; 深水区; 琼东南盆地。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2018)02-0514-11

收稿日期: 2017-09-26

Petrography-Geochemistry and Source Significance of Western Canyon Channel of Northern South China Sea

You Li^{1,2}, Zhong Jia², Zhang Yingzhao², Li Cai², Wu Shijiu², Dai Long², Cai Yuman³

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

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

3. The Geological Survey Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China

Abstract: Canyon channel is the main reservoir of the deepwater area in Qiongdongnan basin in the northern South China Sea. Reservoir stones have good physical properties since they are dominated by powder and fine sandstones. However, there are few studies on the main provenance supply, nature of the parent rock area in different periods of channel formation, and paleo-weathering degree. In this study, it is found that the rock types are mainly debris-quartz sandstone and feldspar-debris sandstone. The heavy mineral assemblages show that they are dominated by magnetite, ilmenite, zircon and tourmaline in Yacheng area, whereas they are dominated by ilmenite, garnet, tourmaline and zircon in Lingshui area. Geochemical characteristics of mudstone show significantly lower SiO₂ content, but higher Fe₂O₃, MgO, K₂O and the total amount of rare earth contents relating to high clay minerals than sandstone. Al₂O₃/TiO₂, K₂O/Al₂O₃ and K₂O/Na₂O ratios in mudstone and sandstone indicate that the source area is enriched in quartz and depleted in potassium feldspar, and is of quartz sediment source, and neutral igneous rock source respectively. The sandstone is characterized with higher SiO₂/Al₂O₃ ratio, lower ICV, CIA and CIW values compared to mudstone, indicating that the source regions have experienced low to moderate weathering, and they are the depo-

基金项目: 国家“十三五”重大专项(No.2016ZX05026-002); 中海石油(中国)有限公司湛江分公司项目(No.ZYKY-2016-ZJ-02).

作者简介: 尤丽(1983—), 女, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事沉积学与储层地质学研究。ORCID:0000-0003-0912-9815. E-mail: youlil1@cnooc.com.cn

引用格式: 尤丽, 钟佳, 张迎朝, 等, 2018. 南海北部中央峡谷水道的岩相—地球化学特征及其源区性质, 地球科学, 43(2): 514—524.

sition of recirculation in the stable tectonic environment, whereas the formation environment of mudstone is more active.

Key words: canyon channel; petrography; geochemistry; source significance; Huangliu Formation; deepwater area; Qiongdongnan basin.

0 引言

峡谷水道作为深水区重要的油气储集层,备受国内外学者关注.琼东南盆地乐东—陵水凹陷黄流组水道相发现的千亿立方大气田(谢玉洪,2014)进一步证实了峡谷水道是南海北部深水区的主要储集层.乐东—陵水凹陷黄流组发育多期重力流峡谷水道相储层(王振峰,2012;苏明等,2013),早期主要发育在乐东段,晚期发育于陵水段(姚哲等,2015a,2015b),以粉、细砂岩为主,少量中砂岩,局部见含砾砂岩,储层物性好,以特高一高孔、特高一高渗物性特征为主(尤丽等,2015).近年来的研究集中于中央峡谷水道成因、展布及沉积物源、充填及沉积相/微相等(李冬等,2011,2013,2015;王振峰,2012;苏明等,2013;谢玉洪,2014;左倩媚等,2015),研究区发育多期峡谷水道沉积并呈明显分带特点,且不同期沉积充填、类型等差异明显;海南隆起、昆嵩隆起、越南红河是乐东—陵水凹陷段峡谷水道沉积物的物质供给.然而针对不同期水道主要物源供给及水道形成的母岩区性质、古风化程度等研究甚少(李冬等,2015;左倩媚等,2015).碎屑岩岩相特征、地球化学组成与源区性质(包括源岩类型、古气候环境等)密切相关(郭春涛等,2017;尤丽等,2017).因此,可应用碎屑岩的岩相—地球化学特征评价物源区特征、古沉积环境等(毛光周和刘池洋,2011;Yang *et al.*,2012;Jian *et al.*,2013;高丹等,2016).本文通过岩石薄片与重矿物成分观察统计,确定了黄流组峡谷水道相储层岩石类型及成分特征;通过岩石主量、微量/稀土元素分析研究了岩石地球化学特征;最后综合岩石学与地球化学特征,确定了峡谷水道沉积古环境、源区特征等,以期为优质储层评价与预测提供地质基础,并指导深水区下步勘探部署.

1 地质概况

乐东—陵水凹陷位于南海北部琼东南盆地中央拗陷带西段(雷超等,2011a,2011b),西以1号断层与莺歌海盆地为界,东与松南低凸起相接,北以2号断层为界与崖南低凸起、陵水低凸起南倾末端相邻,南与陵南低凸起毗邻(图1).乐东—陵水凹陷构造演化经历了古近纪裂陷期和新近纪—第四纪裂后期.

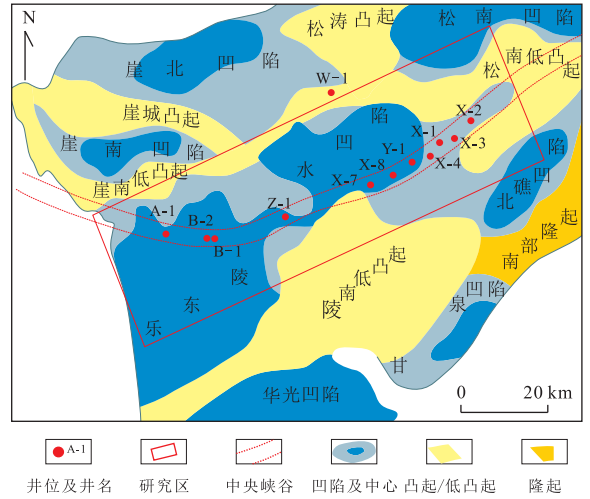


图1 研究区位置与井位分布

Fig.1 The location of study area and wells distribution

其中,中新世以来的裂后拗陷期可细分为早中新世—中中新世的裂后缓慢热沉降和晚中新世—第四纪的裂后加速沉降.黄流组水道相发育于裂后拗陷充填期.在裂后充填期沉积演化受区域热沉降作用控制,沉积范围逐步扩大.研究表明,琼东南盆地新近纪以来海平面总体呈上升趋势,在晚中新世(10.5 Ma)黄流组沉积早期存在一次较大的海平面下降,且下降持续时间较长.受构造背景和全球海平面大规模下降的影响,黄流组沉积时期盆地物源充足,发育下切浊积水道,水道下切或流经整个盆地(何云龙等,2010).该水道平行于陆架坡折发育,地震剖面上呈“V”型、“W”型、“U”型、复合型等多样化形态特征,总长大于425 km,水道西起莺歌海盆地中央拗陷带,经乐东—陵水凹陷、松南—宝岛凹陷、长昌凹陷,向东延伸至西沙海槽,最终注入南海西北次海盆(苏明等,2014).

2 样品与分析方法

笔者针对琼东南盆地深水区中央峡谷乐东—陵水凹陷段黄流组不同期水道沉积,自西向东选取254件砂岩样品进行了岩石薄片观察与鉴定,选取6口井的16件细粒砂岩和泥岩样品(包括凹陷西缘乐东段的A-1井1个砂岩和2个泥岩壁心样品,凹陷南坡陵水段西段的Z-1井2个砂岩和2个泥岩壁心样品、X-8井1个砂岩和1个泥岩壁心样品、X-7井1

表 1 黄流组峡谷水道砂、泥岩样品信息

Table 1 Data of samples from sandstone and mudstone from Huangliu Formation canyon channel

岩性 井号	泥岩								岩屑石英砂岩							钙质砂岩
	A-1		Z-1		X-7	X-8	X-4	X-1	A-1	Z-1	X-8	X-4	X-1		X-7	
样品	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5	MS6	MS7	MS8	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8
深度(米)	4 254	4 353	3 750	3 962.5	3 467.8	3 398	3 234.85	3 344.9	4 273	3 833	3 890.5	3 436.8	3 258.2	3 344.2	3 345.41	3 489.4
样品类型	壁心								岩心		壁心			岩心		壁心

表 2 黄流组峡谷水道砂、泥岩样品主量元素(%)、微量元素(10^{-6})、稀土元素(10^{-6})分析结果Table 2 Results of major elements (%), trace elements (10^{-6}) and rare earth elements (10^{-6}) from sandstone and mudstone from Huangliu Formation canyon channel

样品	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5	MS6	MS7	MS8	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8
TiO ₂	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.8	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
Al ₂ O ₃	16.8	17.0	15.9	14.7	15.7	16.4	13.1	14.7	7.5	6.6	7.6	6.7	7.3	7.5	7.4	5.5
Fe ₂ O ₃	6.2	6.6	6.9	6.1	6.2	6.4	5.2	6.7	4.2	5.9	4.4	4.7	4.7	4.1	4.2	3.7
MnO	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.8
MgO	2.3	2.5	2.7	2.6	2.4	2.4	2.0	2.6	1.3	1.2	1.7	1.2	1.3	1.3	1.3	1.1
CaO	6.5	6.6	3.5	6.6	9.9	5.2	14.7	6.3	1.6	2.5	4.9	2.5	3.1	2.3	2.3	15.6
Na ₂ O	1.0	1.0	1.2	0.7	1.1	1.3	1.1	1.4	1.5	0.9	0.8	1.3	1.1	1.3	1.2	0.8
K ₂ O	3.7	4.1	3.3	3.0	3.2	3.3	2.7	3.0	1.4	2.2	1.7	1.9	2.2	2.2	2.2	1.7
SiO ₂	47.7	46.4	50.7	50.5	45.6	49.2	45.5	49.4	71.8	70.2	68.2	71.1	69.9	70.7	71.0	60.5
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2.8	2.7	3.2	3.4	2.9	3.0	3.5	3.4	9.6	10.6	8.9	10.6	9.6	9.4	9.6	11.8
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	24.0	24.3	19.9	21.0	22.4	23.4	21.8	18.4	15.0	16.5	15.2	16.8	18.3	18.8	18.5	18.3
K ₂ O/Na ₂ O	3.7	4.1	2.8	4.3	2.9	2.5	2.5	2.1	0.9	2.4	2.1	1.5	2.0	1.7	1.8	2.1
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
ClA	60.0	59.2	66.5	58.6	52.6	62.5	41.6	58.0	62.4	54.1	50.7	54.0	53.2	56.4	56.6	23.1
ClW	69.2	69.0	77.0	66.5	58.8	71.5	45.5	65.6	71.0	66.1	57.2	63.9	63.4	67.5	67.9	24.9
ICV	1.2	1.3	1.2	1.4	1.5	1.2	2.0	1.4	1.4	2.0	1.9	1.8	1.8	1.6	1.6	4.4
Sc	16.8	17.4	16.6	14.6	16.5	17	12.8	14	6.46	5.15	6.48	5.53	5.31	4.12	5.99	4.51
V	122	130	132	123	124	140	105	123	58	54.5	60	54.1	53	57.2	57	42.2
Cr	169	273	288	284	116	226	128	113	284	1840	1441	388	933	261	387	451
Co	15.2	16.3	16.9	14.7	13.2	14.6	12.4	14.2	9.81	17.5	12.8	9.35	11.8	9.48	9.9	8.98
Ni	66	99.4	90.6	99.4	48.8	72.8	42	41.1	72.5	648	448	62.7	272	63.5	101	217
Cu	55.4	110	115	171	108	66.4	148	157	151	357	128	330	63.4	72.6	60.6	175
Zn	132	158	160	193	164	126	173	186	317	153	114	467	79.6	98.4	86.6	138
Sr	280	296	176	298	322	237	452	273	645	91.8	132	760	134	131	130	463
Y	20.3	23.2	24.3	22.8	28.7	25.8	24.5	24.2	13.4	17.9	17.9	16.3	17.4	17.2	18	20.2
Zr	225	238	303	264	280	296	242	285	137	140	232	143	157	164	173	90.4
Nb	13.8	15.7	16.5	12.4	15.6	15.9	10.9	17.7	9.17	1.84	8.44	8.81	5.26	7.94	8.72	4.87
Ba	1573	569	437	589	523	1094	682	441	5315	274	330	5477	328	1059	780	520
Th	15.7	15.9	16.4	14.9	15.7	16.7	13.3	15.1	11.3	12	12.3	9.73	10.3	10.3	14.2	8.68
U	2.36	2.66	2.88	2.65	2.46	2.64	2.27	2.49	2.1	1.56	1.9	1.68	1.38	1.54	1.58	1
Pb	52	96.7	31.4	25.6	23.8	31.1	24.4	22	623	24.2	68.2	551	17.8	33.2	30.9	18.4
Th/U	6.65	5.98	5.69	5.62	6.38	6.33	5.86	6.06	5.38	7.69	6.47	5.79	7.46	6.69	8.99	8.68
Th/Sc	0.93	0.91	0.99	1.02	0.95	0.98	1.04	1.08	1.75	2.33	1.90	1.76	1.94	2.50	2.37	1.92
La	38.8	40.7	43.4	39	45	44.6	37.9	39.4	31.6	32.3	35.4	27.3	30.2	36.6	36.2	25.7
Ce	70.7	78	84.2	71	81	86	67.7	75	63.1	63.5	67.5	59.2	57.6	77	68.7	47.4
Pr	8.8	9.28	10.1	8.59	10.1	9.88	8.46	8.87	7.42	7.5	8.04	6.46	6.97	8.61	8.22	5.68
Nd	33.6	35.6	39.1	33.2	39.4	37.8	33	34.6	29.3	30	31.5	26	28	33.9	32.6	22.3
Sm	6.18	6.59	7.38	6.11	7.23	7.04	6.12	6.4	5.49	5.82	5.84	5.16	5.43	6.13	6.17	4.29
Eu	1.41	1.31	1.43	1.22	1.48	1.48	1.26	1.24	1.82	1.02	0.99	1.9	1.03	1.28	1.14	0.84
Gd	4.99	5.25	6.05	4.96	5.91	5.64	4.41	4.86	4.71	4.68	4.44	4.73	4.4	4.93	4.92	3.45
Tb	0.77	0.86	0.95	0.8	0.97	0.9	0.79	0.82	0.62	0.72	0.68	0.65	0.7	0.73	0.74	0.6
Dy	4.08	4.61	5.05	4.37	5.31	4.97	4.36	4.51	3.05	3.71	3.49	3.35	3.63	3.66	3.81	3.29
Ho	0.77	0.87	0.94	0.84	1.02	0.95	0.83	0.87	0.53	0.66	0.65	0.61	0.66	0.66	0.68	0.65
Er	2.12	2.38	2.63	2.34	2.88	2.69	2.42	2.52	1.42	1.75	1.78	1.63	1.76	1.75	1.82	1.79
Tm	0.4	0.44	0.5	0.44	0.53	0.5	0.45	0.48	0.27	0.31	0.33	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32
Yb	2.33	2.61	2.95	2.63	3.02	2.93	2.52	2.77	1.66	1.7	1.9	1.87	1.72	1.82	1.87	1.77
Lu	0.36	0.37	0.43	0.4	0.46	0.44	0.39	0.41	0.33	0.25	0.28	0.35	0.26	0.28	0.28	0.26
ΣREE	175.3	188.9	205.1	175.9	204.3	205.8	170.6	182.8	151.3	153.9	162.8	139.5	142.7	177.7	167.5	118.3
LREE/HREE	10.1	9.9	9.5	9.5	9.2	9.8	9.6	9.6	11.0	10.2	11.0	9.3	9.6	11.6	10.6	8.8

个砂岩和1个泥岩壁心样品,陵水段东段的X-4井1个砂岩和1个泥岩壁心样品、X-1井2个砂岩和1个泥岩岩心样品;表1)进行了元素地球化学分析。

砂岩组成通过铸体薄片鉴定与统计,骨架碎屑组成采用面积估算法统计,即将薄片分成若干个视域,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划分。砂岩骨架碎屑成分鉴定与统计在中海油实验中心湛江实验中心进行。

主量、微量、稀土元素测试在国土资源部南京矿产资源监督检测中心完成。主量元素测试步骤:称取0.7 g 试料置于25 mL 瓷坩锅中,加入5 g 无水四硼酸锂、0.4 g 氟化锂和0.3 g 硝酸铵搅拌均匀,移入铂—金合金坩锅中;烘干于装有试料的坩锅中,加入1 mL 溴化锂溶液,置于电热板上烘干;将坩锅置于自动火焰熔样机上,盖上坩锅盖,以丙烷气为燃气,氧气助燃,于1 150~1 250 °C 熔融10~15 min;移离火焰,熔融物可在坩锅内冷却直接成型;玻璃样片与坩锅自然剥离,取出样片并贴上标签,放于干燥器内保存。熔融过程中要转动坩锅,使粘在坩锅壁上的小熔珠和试料进入熔融体中。每隔一定时间,熔样机自动摇动坩锅,将气泡赶尽,并使熔融物混匀。主量元素采用X 荧光光谱仪测得未知样片分析元素的强度,根据校准曲线计算各元素的主次成分量,检测依据GB/T 14506-2010。X 射线管电压为50 kV、电流为50 mA,粗狭缝,视野光栏直径为30 mm。

微量元素测试步骤:准确称取0.1 g 试料于四氟乙烯烧杯中,加氢氟酸、硝酸、盐酸、高氯酸于电热板上加热蒸至近干;加入硝酸,加热蒸至白烟冒尽时取下;加入盐酸微热溶解盐类,将溶液转移至塑料比色管中,用7%盐酸稀释定容至25 mL,摇匀。稀土元素测试步骤:准确称取0.05 g 试料于四氟乙烯烧杯中,加氢氟酸、硝酸、盐酸、高氯酸于电热板上加热蒸至近干;加入硝酸,加热蒸至高氯酸白烟冒尽时取下;加入硝酸微热溶解盐类,将溶液定量转移至25 mL 塑料瓶中,用水稀释定容至25 mL,摇匀。微量/稀土元素采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-AES)测定各元素强度,根据校准曲线计算各元素含量,检测依据SY/T6404-1999。

3 结果

3.1 岩石学特征

砂岩薄片观察与鉴定结果表明,黄流组水道储

层的岩性以粉、细砂岩为主,细砂岩的岩石类型以岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩为主(图2)。其中,凹陷西缘的崖城A区与凹陷南坡的陵水X/Y/Z区以岩屑石英砂岩为主(图3a),局部发育长石岩屑石英砂岩(图3b)和石英砂岩(图3c);凹陷中心的崖城B区不稳定组分含量较高,以长石岩屑砂岩为主,部分长石岩屑石英砂岩(图3d)。碎屑组分以单晶石英为主,次为长石与岩屑。云母含量低,局部多晶石英含量较高。单晶石英在陵水X/Y/Z区与崖城A区含量大于50%,平均含量约为62.5%,显示为远源沉积特征;在崖城B区由于粗粒、细粒砂岩均有发育,因此单晶石英含量变化大(17.5%~63.0%)。长石在崖城A区与陵水X/Z区含量较低(小于10%),主要为钾长石,偶见斜长石;在崖城B区表现为钾长石与斜长石均有发育、以钾长石含量较高为特征,钾长石含量为3%~20%,斜长石含量小于5%。岩屑在崖城B区以大量石英岩岩屑为主,含量为3%~40%,次为变质岩岩屑,含量为0.5%~11.0%,部分岩浆岩、喷出岩岩屑;崖城A区与陵水X区岩屑含量较低,以变质岩岩屑为主(平均含量分别为4.0%、5.0%),次为石英岩岩屑,少量喷出岩岩屑。以上岩石类型与组分的差异分布,暗示不同构造带的多期次水道母岩类型和水动力条件等不尽相同。

研究区黄流组储集砂岩重矿物组合主要为磁铁矿、白钛矿、锆石、电气石与石榴石,局部发育少量或微量的不稳定矿物辉石,其组合特征在不同构造带显著不同(图4)。由于钻井过程使用的泥浆添加剂中含有赤褐铁矿,本次研究重矿物组合特征暂不考虑赤褐铁矿,分析其他未被影响的矿物组合面貌。崖城A/B区为磁铁矿、白钛矿、锆石与电气石的重矿物

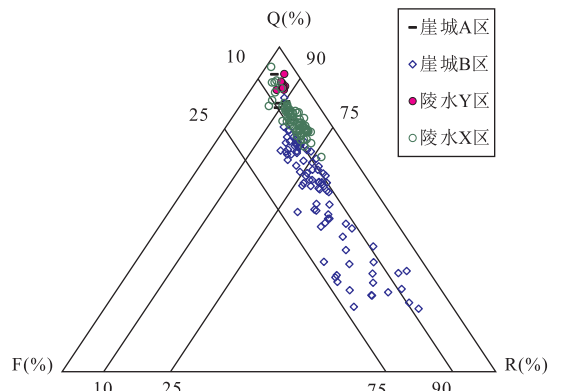


图2 黄流组峡谷水道砂岩岩石类型

Fig. 2 Sandstone composition classification of Huangliu Formation canyon channel

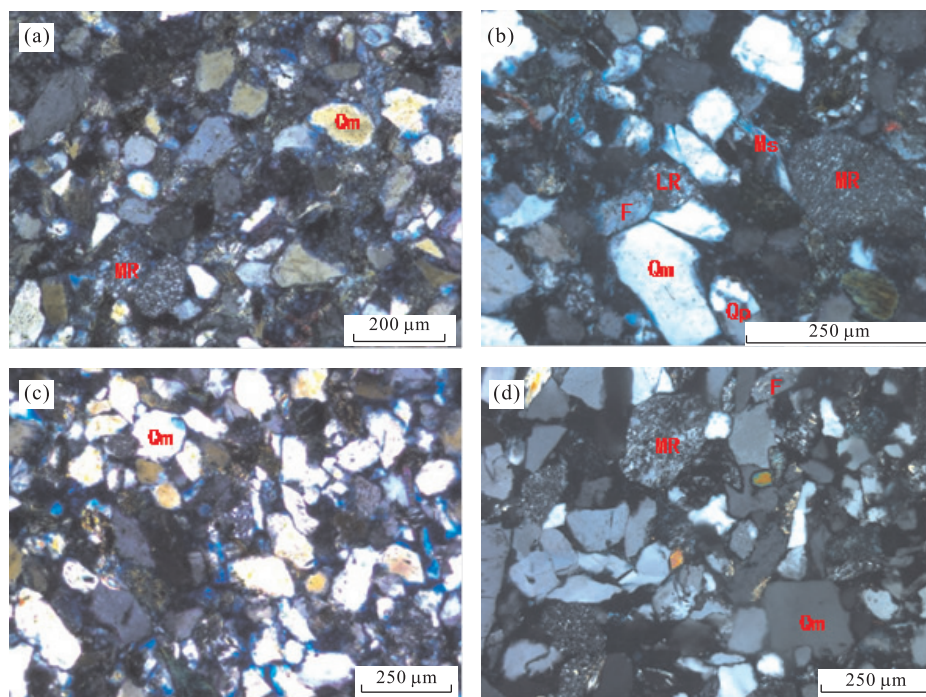


图 3 黄流组峡谷水道储集岩岩石类型显微照片

Fig.3 Micrograph of rock types from Huangliu Formation canyon channel

a.Z-1, 3 768 m, 细粒岩屑石英砂岩, 壁心(+); b.X-8, 3 435.1 m, 细粒长石岩屑石英砂岩, 壁心(+); c.A-1, 4 389 m, 细粒石英砂岩, 壁心(+); d. B-2, 4 734.9 m, 细一中长石岩屑石英砂岩, 岩心(+). Qm. 单晶石英, Qp. 多晶石英, Kf. 钾长石, Pl. 斜长石, Ms. 云母, MR. 变质岩岩屑, VR. 岩浆岩岩屑

组合, 指示母岩类型以岩浆岩与沉积岩为主, 与已报道的海南岛望楼河、宁远河样品重矿物组合相似(王策等, 2014), 表明崖城 A/B 区主要受北部海南岛物源影响, 陵水 Y/X 区具白钛矿、石榴石、电气石、锆石的重矿物组合, 母岩类型以沉积岩为主, 其次为岩浆岩与变质岩(图 3); 越南昆嵩隆起中北部蓝江流域母岩重矿物以富含白钛矿(张伙兰等, 2014)为特征, 中南部的秋滨河以石榴石为主要特征(左倩媚等, 2015), 加上中部地区局部发育的火山岩母岩, 综合表明陵水 X/Y 区主要受越南物源影响, 也存在其他如海南岛、峡谷周边隆起或凸起区等多物源影响。陵水 Y/X 区具有自西向东沉积岩与变质岩母岩相对含量增加、岩浆岩相对含量减少的特征, 表明其可能整体由东向西受海南岛物源影响的程度减弱。此外, 峡谷地形地貌特征导致其水动力条件变化, 乐东—陵水凹陷段自西向东峡谷的宽度与高度呈增大趋势(苏明等, 2013), 因此由西向东其侵蚀峡谷壁较老地层的能力增强, 笔者推测这也是陵水区由西往东沉积岩母岩相对含量增加的原因之一。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素 如表 2 所示, 砂岩样品的 SiO_2

含量约为 60.5%~71.8%, 其中陵水 Z 区较崖城 A 区和陵水 X 区略偏低、钙质砂岩较岩屑石英砂岩明显偏低; Fe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 含量分别为 3.7%~5.9%、1.1%~1.74%、1.4%~2.2%、0.8%~1.5%, CaO 含量为 1.6%~4.9%。岩屑石英砂岩中的 Fe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 含量高于钙质砂岩, 可能与其含有较多的粘土矿物有关; 钙质砂岩中 CaO 含量(SS8 号样品的 CaO 含量高达 15.6%)明显高于岩屑石英砂岩, 与其含有较高含量的方解石类碳酸盐胶结物有关。

泥岩样品的 SiO_2 含量(45.5%~50.7%)明显低于砂岩样品, Fe_2O_3 (5.2%~6.9%)、 MgO (2.0%~2.7%)、 CaO (3.5%~14.7%)、 K_2O (2.7%~4.1%) 含量明显高于砂岩样品, 这与泥岩含有较多的伊利石、绿泥石与高岭石等粘土矿物有关; 其 Na_2O 含量为 0.7%~1.4%, 与砂岩样品含量相当。

主量元素 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 K_2O 与 SiO_2 均呈现明显的负相关性, 而 Na_2O 、 MnO 与其关系不显著, 表明大量 SiO_2 以碎屑石英形式存在。图 5 显示研究区砂岩样品落在岩屑砂岩

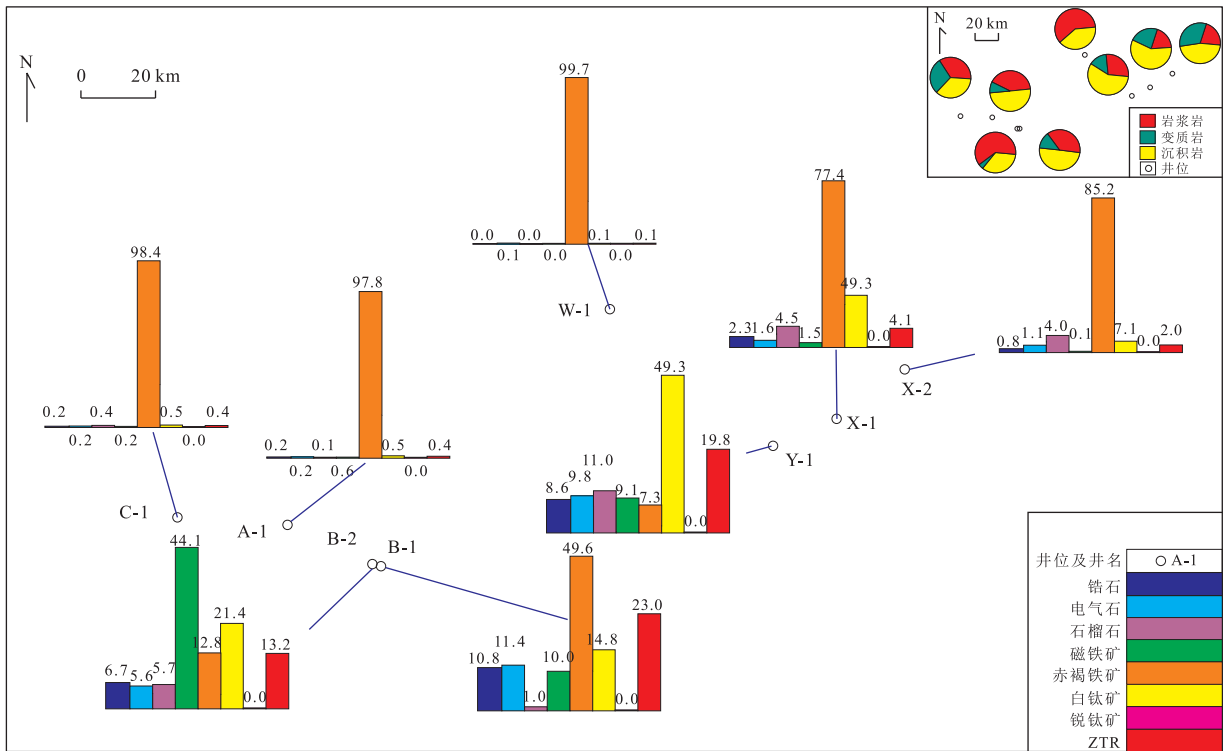


图 4 黄流组水道储层重矿物组合(a)与母岩类型分布(b)

Fig.4 The heavy mineral combination (a) and the distribution of parent rock type (b) of Huangliu Formation canyon channel

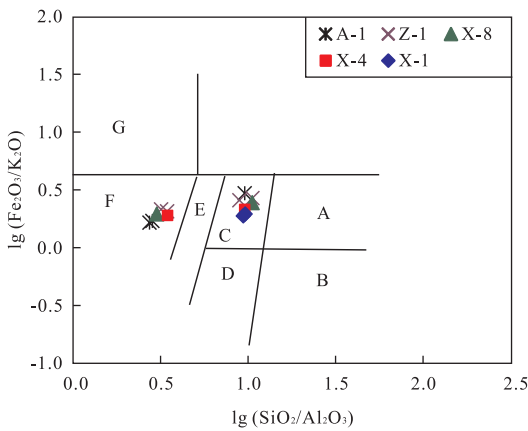


图 5 黄流组峡谷水道砂岩的 $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ - $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 图解

Fig.5 Chemical classification of Huangliu Formation canyon channel

图中 A、B、C、D、E、F、G 分别代表亚岩屑砂岩、亚长石砂岩、岩屑砂岩、长石砂岩、杂砂岩、页岩、铁页岩;据 Herron(1988)

区域,泥岩样品落在泥页岩区域。

3.2.2 微量元素 砂、泥岩样品中亲石元素 Sr、Ba 等在研究区分布范围较广。砂岩中 Sr、Ba 含量分别为 $61.8 \times 10^{-6} \sim 760 \times 10^{-6}$ 、 $274 \times 10^{-6} \sim 5477 \times 10^{-6}$, 泥岩中 Sr、Ba 含量分别为 $176 \times 10^{-6} \sim 452 \times 10^{-6}$ 、 $437 \times 10^{-6} \sim 1573 \times 10^{-6}$, Sr 含量总体低于上

地壳值,局部井如 A-1、X-7 井砂岩样品 Sr 含量较高,可能与其含有较高含量的碳酸盐胶结物有关;Ba 在大部分样品中的含量高于上地壳值,在不同井区泥岩和砂岩样品中亲石元素相对含量有差别。过渡族元素 Cr、Ni 在泥岩中含量低于砂岩样品中,V、Co 则在砂岩样品中含量较高,说明长英质组分差异分布特征。泥岩样品中的 Y、Zr、Nb 等高场强元素含量高于砂岩,与后太古代澳大利亚页岩(PAAS)相比,多数元素含量明显偏低,Zr 在泥岩样品中含量较高。砂岩样品中 Th/U、Th/Sc 比值分别为 $5.38 \sim 8.99$ (平均值 7.14)、 $1.75 \sim 2.50$ (平均值 2.06),较泥岩样品高(平均值分别为 6.07、0.99),也高于上地壳(UC)、后太古代澳大利亚页岩(PASS)和北美页岩(NASC)Th/U、Th/Sc 比值。

3.2.3 稀土元素 图 6a 和 6b 显示,峡谷水道 6 口钻遇井的曲线特征类似,呈斜率负值的右倾型,分布曲线斜率在轻稀土部位较重稀土大,说明峡谷水道中轻稀土元素相对富集。Eu 元素在配分模式图中略显“下凹”, δEu 值基本小于 0.92(图 6c、6d),为弱 Eu 负异常;砂岩样品除在 A-1 与 X-8 井大于 1、为 Eu 正异常外, δEu 值总体较泥岩样品偏小。砂岩的 $\sum\text{REE}$ 含量相对较低,为 $118.3 \times 10^{-6} \sim 177.7 \times 10^{-6}$,平均为 151.7×10^{-6} ;泥岩的 $\sum\text{REE}$ 含量为 $170.6 \times 10^{-6} \sim$

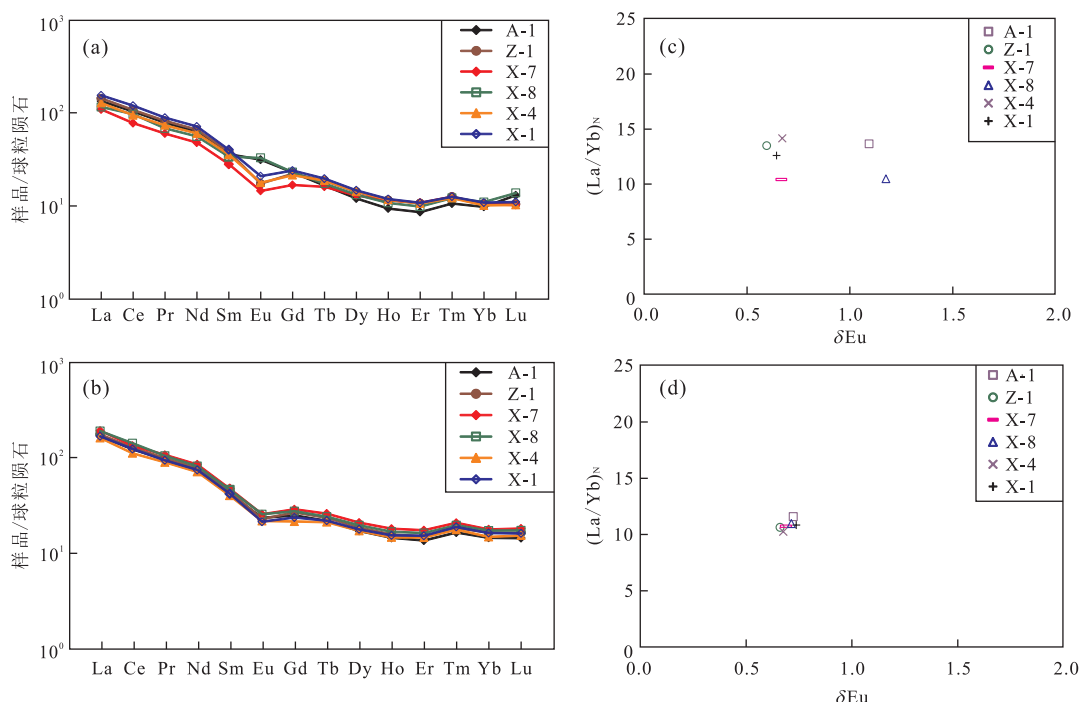


图 6 黄流组峡谷水道稀土元素分布

Fig.6 REE pattern of of Huangliu Formation canyon channel

a.砂岩球粒陨石标准化分布模式;b.泥岩球粒陨石标准化分布模式;c.砂岩 $(La/Yb)_N$ 与 δEu 关系;d.泥岩 $(La/Yb)_N$ 与 δEu 关系

205.8×10^{-6} , 平均为 188.6×10^{-6} , 相对较高, 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。砂岩样品中钙质砂岩的 ΣREE 含量明显较低, 主要与其碳酸盐胶结物含量较高导致较少的碎屑组分有关。砂岩样品的轻、重稀土元素比值为 $9.3 \sim 11.6$ (钙质砂岩中 LREE/HREE 比值较低), 总体高于泥岩样品 ($9.2 \sim 10.1$), 说明砂岩较之泥岩, 其轻稀土较相对平坦的重稀土富集程度更大。

4 讨论

4.1 物源性质

物源性质是决定碎屑岩化学组成的主要因素, 因此可通过碎屑岩主量元素特征判别, 包括元素比值 (毛光周和刘池洋, 2011; Saminpanya *et al.*, 2014; 肖斌, 2014) 与元素组合的判别图 (Perri, 2014; Saminpanya *et al.*, 2014; Tao *et al.*, 2014), 如 K_2O/Al_2O_3 比值大于 0.5, 指示钾长石相对于斜长石和粘土矿物等铝硅酸盐矿物富集, 比值小于 0.4 则反映钾长石匮乏的特点。研究区样品中 TiO_2 与 Al_2O_3 显著的正相关性 与层状硅酸盐矿物有关, Al_2O_3 含量明显高于 TiO_2 , Al_2O_3/TiO_2 比值为 $14.0 \sim 23.2$ (平均为 16.0), 砂岩、泥岩的 $Al_2O_3/$

TiO_2 比值分别为 $14.0 \sim 18.8, 19.6 \sim 23.2$; Al_2O_3 赋存于长石中, TiO_2 赋存在铁镁质矿物中 (Saminpanya *et al.*, 2014), 表明源区主要为长英质物源。 K_2O/Al_2O_3 比值为 $0.2 \sim 0.3$, 呈现钾长石匮乏特征。 K_2O/Na_2O 比值较高, 为 $0.9 \sim 4.3$ (图 7a), 也进一步证实了物源区以富石英、贫钾长石为特征, 反映物源区经历了长期的化学风化作用。

Roser and Korsch (1988) 根据碎屑岩主量元素判别函数 F_1-F_2 , 将物源区划分为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、镁铁质火成岩物源区 4 个区域。图 7b 显示砂岩样品主要落于石英质沉积岩物源区, 泥岩样品落在中性火成岩区, 说明研究区砂岩为古老的石英质沉积物源区的强烈风化、搬运再沉淀而形成; 图 7c 揭示泥岩主要为以玄武安山岩—安山岩为主 (靠近玄武岩一侧的安山岩) 的基—中性火成岩物源区。越南东部昆崙隆起母岩岩性复杂 (刘海龄等, 2015), 以中、新生代碎屑岩与古生代石灰岩为主, 局部有基性、酸性喷出岩和花岗岩出露 (张伙兰等, 2014); 海南岛以大面积花岗岩母岩出露为主, 局部发育沉积岩母岩 (王策等, 2014); 峡谷自西向东的地形地貌特征导致其水动力条件变化而侵蚀峡谷壁已沉积的较老地层, 为研究区储集砂岩发育提供了丰富的物质来源; 海南岛西南部局部发育

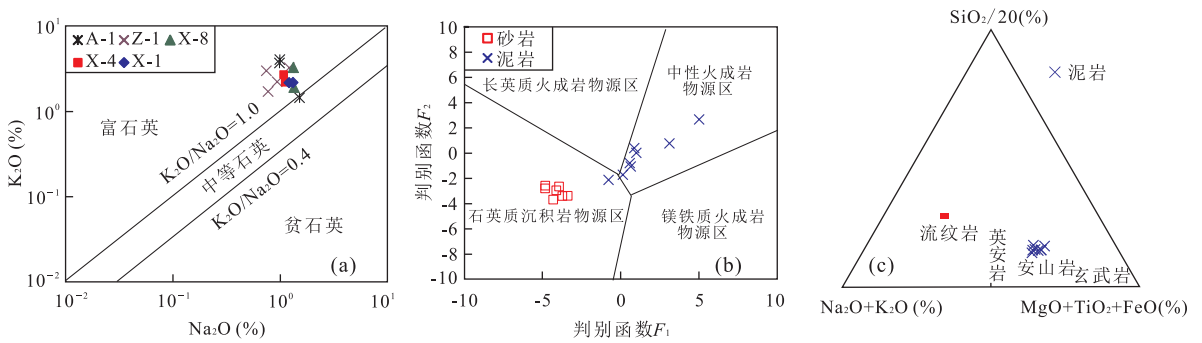


图 7 黄流组峡谷水道沉积母岩性质判别图解

Fig.7 Discrimination diagrams for provenance of Huangliu Formation canyon channel

图 a 据 Saminpanya *et al.* (2014); 图 b 据 Roser and Korsch (1988); 图 c 据 Hayashi *et al.* (1997)

中性安山岩母岩与乐东—陵水凹陷南部陵南低凸起东北侧钻遇的基—中性火山岩可能是该区泥岩的主要物源区. Tao *et al.* (2014) 报道过类似砂、泥岩的差异物源区影响, 如准格尔盆地东北部的杂砂岩和泥岩, 砂岩为长英质和基性混源区影响, 泥岩则为长英质源区影响, 且二者为不同构造背景成因.

沉积岩中稀土元素组成与分布模式主要取决于物源区母岩组成, 受成岩作用和变质作用影响小 (胡国辉等, 2012; Tao *et al.*, 2014). 稀土元素在海水和河水中含量非常低, 并在河流与地表水的剥蚀搬运过程中变化不明显. 因此, 稀土元素含量及配分模式可以代表沉积岩母岩性质, 反映物源区的地球化学特征. 前人研究表明 (赵梦等, 2013; 王永凤等, 2011), 越南红河物源沉积物稀土元素配分曲线上 Eu 呈“上凸”, 为 Eu 正异常; 海南岛物源沉积物的 Eu 呈“下凹”, 为 Eu 负异常. 研究区峡谷水道的稀土元素配分模式为普遍富集轻稀土、重稀土含量较低且波动较小. 砂岩样品除 X-8、A-1 井为 δEu 微正异常特点, 与越南红河物源相似, 其 δEu 值总体较泥岩偏小、为负异常 (图 6), 记录了沉积岩源岩的 Eu 亏损, 与海南岛物源沉积物有一定的相似性. 然而由于未收集到昆嵩隆起的其他水系如蓝江、秋盆河 (王策等, 2014) 等相关地球化学参数进行对比, 也存在越南昆嵩隆起其他水系物源、峡谷周边隆起或凸起区、侵蚀峡谷两壁老地层等影响的可能. 泥岩样品 δEu 值在 0.7 左右, 弱 Eu 负异常, 笔者推测与海南岛、乐东—陵水凹陷周边隆起或凸起区局部发育的玄武—安山岩等有关. 综上所述, 峡谷水道主要受海南岛与越南物源共同影响, 也存在峡谷周边隆起或凸起区等影响.

4.2 源区古风化作用与沉积物成分成熟度

岩石的风化作用引起 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等的亏损

流失, Al_2O_3 富集, 形成粘土矿物, 进而提出化学蚀变作用指标 CIA、化学风化作用指标 CIW 及评价图解, 评价源区的古风化程度, 判断古气候环境 (胡国辉等, 2012; Perri, 2014; Saminpanya *et al.*, 2014; Tao *et al.*, 2014; 肖斌, 2014). CIA 和 CIW 值越高, 反映在岩石风化过程中, 活泼的阳离子相对于稳定的残留组分 (如 Al^{3+}) 更容易迁移 (胡国辉等, 2012); CIA 值 < 65 为低化学风化, $65 \sim 85$ 代表中等化学风化, $85 \sim 100$ 表示强化学风化程度 (Srivastava *et al.*, 2013; 肖斌, 2014). 差异风化程度等古气候特征, 也导致沉积物的成分成熟度明显不同, 亦可通过 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值与成分变异指数 ICV 等参数进行沉积物成分成熟度判断. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值越大, 说明石英含量增多、长石等减少, 成熟度高 (胡国辉等, 2012); 低 ICV 值表明来自较高成分成熟度且含有大量粘土矿物的沉积源区, 指示沉积物的再循环沉积特点, 而 ICV 值高的碎屑岩指示初次沉积特点 (胡国辉等, 2012; Srivastava *et al.*, 2013).

黄流组峡谷水道的砂、泥岩样品, 除局部由于钙质胶结较强、化学风化蚀变指数较低外 (胶结较强的砂、泥岩不能完全反映源区性质), CIA 值总体为 $50 \sim 65$, 低于后太古代澳大利亚页岩 (PASS, 70.36), ICV 值 ≤ 2.0 , 表明其源区经历了低—中等程度的风化作用, 沉积物成分成熟度较高且含有大量的粘土矿物, 可能是稳定构造环境下经历了一定的再循环沉积而成. 泥岩的 CIA 值 ($41.6 \sim 66.5$)、CIW 值 ($45.5 \sim 77.0$) 总体高于砂岩 (分别为 $23.1 \sim 62.4$ 、 $24.9 \sim 71.0$), 泥岩的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值 ($3.3 \sim 4.2$)、ICV 值 ($1.2 \sim 2.0$) 总体低于砂岩 (分别为 $9.6 \sim 12.0$ 、 $1.4 \sim 2.0$), 说明泥岩的源区较砂岩的源区遭受的化学风化作用强, 沉积物成分成熟度较高且含有大量的粘土矿物, 这与砂、泥岩不同类型母岩的抗风

化能力与风化时间等因素有关,泥岩的基一中性火山岩母岩较砂岩的石英质沉积母岩抗风化能力较弱,进而风化作用强、沉积物成分成熟度高,此外笔者也推测泥岩的形成环境较砂岩更加动荡.对比不同构造带,笔者发现在乐东段的 A-1 井 CIA/CIW 值较大、ICV 值较小,认为海南岛物源影响乐东段崖城 A 区源区风化作用较强、沉积物成分成熟度更高;而陵水东段的 X-1 井 CIA/CIW 值居中,陵水西段 CIA/CIW 值较小,可能与水道往东受侵蚀峡谷壁较老地层等影响有关;陵水段 ICV 值自西向东呈变小趋势,这与水动力条件、搬运距离远近等有关.

5 结论

(1)黄流组水道储层的岩性以粉、细砂岩为主,细砂岩的岩石类型以岩屑石英砂岩和长石岩屑砂岩为主;重矿物组合表现为崖城区具磁铁矿、白钛矿、锆石与电气石的组合特征,陵水区具白钛矿、石榴石、电气石、锆石的组合特征.

(2)黄流组峡谷水道砂岩的 Al_2O_3/TiO_2 、 K_2O/Al_2O_3 比值分别为 14.0~18.8、0.2~0.3,泥岩的 Al_2O_3/TiO_2 、 K_2O/Al_2O_3 比值分别为 19.6~23.2、0.2~0.3, K_2O/Na_2O 比值大于 1,说明物源区富石英、贫钾长石.砂岩样品在函数母岩性质图解中落于石英质沉积岩物源区,泥岩样品落在中性火成岩物源区.

(3)黄流组峡谷水道泥岩的 CIA 值、CIW 值总体高于砂岩,说明泥岩的源区较砂岩遭受的化学风化作用强,化学风化蚀变指数 CIA 值为 50~65,低于后太古代澳大利亚页岩值,表明源区经历了低—中等程度的风化作用.

(4)黄流组峡谷水道砂岩具有较高 SiO_2/Al_2O_3 比值、低 ICV 值,表明其来自较高成熟度且含有大量粘土矿物的沉积源区,是稳定构造环境下再循环沉积而成;泥岩的 SiO_2/Al_2O_3 比值、ICV 值均偏低,说明其形成环境较砂岩动荡.

致谢:感谢国土资源部南京矿产资源监督检查中心蔡玉曼高级工程师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!感谢中国石油大学(华东)曲希玉副教授的指导!感谢评审专家对文章提出的宝贵意见与建议!

References

Gao, D., Chen, 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). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.095>

Guo, C. T., Gao, J., Li, Z., et al., 2017. Depositional and Provenance Records of Upper Devonian to Lower Carboniferous Sandstones from Bachu Area, Northwestern Tarim Basin: Implications for Tectonic Evolution. *Earth Science*, 42(3): 421–434 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.032>

He, Y. L., Xie, X. N., Li, J. L., et al., 2010. Depositional Characteristics and Controlling Factors of Continental Slope System in the Qiongdongnan Basin. *Geological Science and Technology Information*, 29(2): 118–122 (in Chinese with English abstract).

Herron, M. M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Research*, 58: 820–883.

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. <https://doi.org/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). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2011.016>

Li, D., Wang, Y. M., Wang, Y. F., et al., 2011. The Sedimentary and Foreground of Prospect for Levee-Overbank in Central Canyon, Qiongdongnan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(4): 689–694 (in Chinese with English abstract).

Li, D., Xu, Q., Wang, Y. F., 2015. Provenance Analysis of the Pliocene Central Canyon in Qiongdongnan Basin and Its

- Implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33 (4): 659—664 (in Chinese with English abstract).
- Li, D., Xu, Q., Wang, Y. F., et al., 2013. Filling Evolution and Sand Distribution in the West Part of Central Canyon, Qiongdongnan Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 48 (5): 799—803 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. L., Yao, Y. J., Shen, B. Y., et al., 2015. On Linkage of Western Boundary Faults of the South China Sea. *Earth Science*, 40(4): 615—632 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqke.2015.049>
- 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).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.12.002>
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenances Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major Elements Data. *Chemical Geology*, 67: 119—139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Sampanya, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2014.01.007>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.07.028>
- Su, M., Xie, X. N., Wang, Z. F., et al., 2013. Sedimentary Evolution of the Central Canyon System in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 34(3): 467—478 (in Chinese with English abstract).
- Su, M., Zhang, C., Xie, X. N., et al., 2014. Controlling Factors on the Submarine Canyon System: A Case Study of the Central Canyon System in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Science China Earth Sciences*, 44(8): 1807—1820 (in Chinese).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2014.02.007>
- 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. 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 (J. JPI)*, 33(6): 50—52, 68 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. F., 2012. Important Deepwater Hydrocarbon Reservoirs: The Central Canyon System in the Qiongdongnan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(4): 646—653 (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., 2014. A Major Breakthrough in Deepwater Natural Gas Exploration in a Self-Run Oil/Gas Field in the Northern South China Sea and Its Enlightenment. *Natural Gas Industry*, 34(10): 1—8 (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. <https://doi.org/10.2110/jsr.2012.6>
- Yao, Z., Wang, Z. F., Zuo, Q. M., et al., 2015a. Critical Factors for the Formation of Large-Scale Deepwater Gas Field in Central Canyon System of Southeast Hainan Basin and Its Exploration Potential. *Acta Petrolei Sinica*, 36(11): 1358—1366 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Z., Zhu, J. T., Zuo, Q. M., et al., 2015b. Gravity Flow Sedimentary System and Petroleum Exploration Prospect of Deepwater Area in the Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Natural Gas Industry*, 35(10): 21—30 (in Chinese with English abstract).
- You, L., Liu, C., Zhong, J., et al., 2017. Petrography-Geochemistry and Source Significance of Submarine Fan from West Area of Qiongdongnan Basin. *Earth Science*, 42(9): 1531—1540 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.503>
- You, L., Wang, Z. F., Zhong, J., et al., 2015. Reservoir Char-

acteristics and Influential Factors of the Huangliu Formation Canyon Channel in the Ledong-Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(10): 31–38 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H. L., Xie, J. Y., Liu, Y., et al., 2014. Controlling Factors of Storage Capacity Differences of Huangliu Formation Sandstone in XF Area of the Yinggehai Basin and Their Geologic Significance. *Nature Gas Industry*, 34(5): 43–48 (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(Suppl. 1): 61–69 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.S10.007>

Zuo, Q. M., Zhang, D. J., He, W. J., et al., 2015. Provenance Analysis of Huangliu Formation of the Central Canyon System in the Deepwater Area of the Qiongdongnan Basin. *Haiyang Xuebao*, 37(5): 15–23 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

高丹, 程日辉, 沈艳杰, 等, 2016. 北黄海盆地东部拗陷侏罗纪西南物源—沉积体系与源区构造背景. *地球科学*, 41(7): 1171–1187. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.095>

郭春涛, 高剑, 李忠, 等, 2017. 塔里木盆地巴楚地区上泥盆统一石炭统沉积—物源记录及其构造演化. *地球科学*, 42(3): 421–434. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.032>

何云龙, 解习农, 李俊良, 等, 2010. 琼东南盆地陆坡体系发育特征及其控制因素. *地质科技情报*, 29(2): 118–122.

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): 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. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2011.016>

李冬, 王英民, 王永凤, 等, 2011. 琼东南盆地中央峡谷深水天然堤—溢岸沉积. *沉积学报*, 29(4): 689–694.

李冬, 徐强, 王永凤, 2015. 琼东南盆地上新世中央峡谷物源分析及其意义. *沉积学报*, 33(4): 659–664.

李冬, 徐强, 王永凤, 等, 2013. 琼东南盆地中央峡谷西段充填

体系沉积演化与砂体分布. *石油地球物理勘探*, 48(5): 799–803.

刘海龄, 姚永坚, 沈宝云, 等, 2015. 南海西缘结合带的贯通性. *地球科学*, 40(4): 615–632. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.049>

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.

苏明, 解习农, 王振峰, 等, 2013. 南海北部琼东南盆地中央峡谷体系沉积演化. *石油学报*, 34(3): 467–478.

苏明, 张成, 解习农, 等, 2014. 深水峡谷体系控制因素分析——以南海北部琼东南盆地中央峡谷体系为例. *中国科学: 地球科学*, 44(8): 1807–1820.

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 (江汉石油学院学报)*, 33(6): 50–52, 68.

王振峰, 2012. 深水重要油气储层——琼东南盆地中央峡谷体系. *沉积学报*, 30(4): 646–653.

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, 2014. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示. *天然气工业*, 34(10): 1–8.

姚哲, 王振峰, 左倩媚, 等, 2015a. 琼东南盆地中央峡谷深水大气田形成关键要素与勘探前景. *石油学报*, 36(11): 1358–1366.

姚哲, 朱继田, 左倩媚, 等, 2015b. 琼东南盆地深水区重力流沉积体系及油气勘探前景. *天然气工业*, 35(10): 21–30.

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. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.503>

尤丽, 王振峰, 钟佳, 等, 2015. 乐东—陵水凹陷黄流组峡谷水道储层特征及影响因素. *天然气工业*, 35(10): 31–38.

张伙兰, 谢金有, 刘亿, 等, 2014. 莺歌海盆地 XF 区黄流组砂岩储集性能差异的控制因素及其地质意义. *天然气工业*, 34(5): 43–48.

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. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.S10.007>

左倩媚, 张道军, 何卫军, 等, 2015. 琼东南盆地深水区中央峡谷黄流组物源特征. *海洋学报*, 37(5): 15–23.