

珠江口盆地韩江-陆丰凹陷珠江组下段碎屑锆石来源与储层物源示踪

焦鹏^{1,2}, 郭建华^{1,2}, 王玺凯^{1,2}, 刘辰生^{1,2}, 郭祥伟^{1,2}

[1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;

2. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南 长沙 410083]

摘要:珠江组下段作为珠江口盆地东部优质的油气储层,其物源分布特征至今仍存在争议。为了研究韩江-陆丰凹陷珠江组下段物源分布特征及其岩性组成,利用 LA-ICP-MS 定年技术对珠江口盆地东部 7 个不同局部构造区的下中新统珠江组下段砂岩样品进行了碎屑锆石 U-Pb 定年分析。结果显示,样品中碎屑锆石以岩浆成因为主,主要存在 98~114, 137~163, 211~247 和 387~428 Ma 四个年龄区间,变质成因为次。通过与周缘潜在物源区岩层(体)年龄对比,并结合年龄频谱特征,认为研究区早中新世珠江早期至少存在 4 条供给碎屑物质的水系,其中,海丰 28 构造区和陆丰 2 构造区的沉积物源主要来自韩江物源;南侧东沙隆起为陆丰 22 构造区主物源区;汕尾物源除为惠州 10 构造区供源外,还与珠江物源在惠州 08 构造区交汇;陆丰 13 构造区以东沙隆起物源为主,可能有部分韩江物源的加入。韩江-陆丰地区具备发育浅层和中深层优质储层的地质条件,仍是今后珠江口盆地东部油气勘探的重要领域。

关键词: 锆石 U-Pb 定年;物源;珠江组下段;韩江-陆丰凹陷;珠江口盆地

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Detrital zircon genesis and provenance tracing for reservoirs in the Lower Zhujiang Formation in Hanjiang-Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin

Jiao Peng^{1,2}, Guo Jianhua^{1,2}, Wang Xikai^{1,2}, Liu Chensheng^{1,2}, Guo Xiangwei^{1,2}

[1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha, Hunan 410083, China]

Abstract: High-quality reservoirs in the Lower Zhujiang Formation in eastern Pearl River Mouth Basin have triggered many disputes over their provenance distribution patterns and lithologies. As an attempt to dispel the doubts over the issue, we performed U-Pb dating on some detrital zircons in sandstone samples from the Lower Zhujiang Formation in the Lower Miocene of 7 different structural zones in eastern Pearl River Mouth Basin with LA-ICP-MS dating technology. The results show that the zircons were mostly magmatic origin, followed by metamorphic origin. The zircons of magmatic origin showed up during four age intervals: 98–114, 137–163, 211–247 and 387–428 Ma. By comparing the ages of the zircons with those of potential provenance rocks and combining the age spectrum, we suggest that there were at least 4 water systems serving as detrital material providers during the early Zhujiang time of the Early Miocene. Hanjiang provenance was the source of sediments in Haifeng 28 and Lufeng 2 structural zones, Dongsha uplift provenance provided sediments for Lufeng 22 structural zone, Shanwei provenance generated materials for Huizhou 10 structural zone and joined Zhujiang provenance at Huizhou 08 structural zone, and Dongsha uplift provenance, possibly together with Hanjiang provenance, provided materials for Lufeng 13 structural zone. Based on the above analyses, we propose that Hanjiang-Lufeng area, with favorable geological conditions for the formation of shallow and medium to deep reservoirs, be the key future exploration

收稿日期:2017-06-07;修订日期:2018-03-07。

第一作者简介:焦鹏(1985—),男,博士研究生,沉积学与层序地层学研究。E-mail:jp870625@csu.edu.cn。

通讯作者简介:郭建华(1957—)男,教授,博士生导师。E-mail:gjh796@csu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41603046);国家科技重大专项(2011ZX05023-001)。

target in Pearl River Mouth Basin.

Key words: zircon U-Pb dating, provenance, Lower Zhujiang Formation, Hanjiang-Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin

韩江-陆丰凹陷是珠江口盆地东部重要的油气远景区,近期在区内下中新统珠江组的油气勘探中取得了重大突破,使得对珠江组分布和沉积物源的研究具有较高的经济价值。邵磊等^[1]通过沉积物元素地球化学分析表明,珠江口盆地在渐新世之前沉积物来源以华南沿海的硅酸盐为主。王维等^[2]认为珠一坳陷存在南北两大物源体系,其中,华南褶皱带为北部物源体系,珠一坳陷基底隆起和东沙隆起为南部物源体系。张向涛等^[3]通过稀土元素配分特征及判别分析发现,韩江-陆丰地区自古近纪以来就接受古珠江和古韩江带来的北部陆源物质沉积。李小平等^[4]利用地震、重矿物等资料对东沙隆起的物源提供能力进行研究发现,晚渐新世到早中新世早期东沙隆起发育独立的古水系持续向陆丰地区提供碎屑物质。焦鹏等^[5]通过元素地球化学特征分析表明,陆丰地区珠江组物源主要为长英质火山岩。已有的沉积物源认识相对笼统,尚不能明确盆地不同位置沉积物源的差异,因此利用现有勘探资料开展可信的物源预测,是当前韩江-陆丰凹陷油气勘探面临的首要关键问题。

碎屑锆石定年是目前沉积物源研究方面广泛应用且效果明显的一种新方法,其优势在于通过碎屑锆石 U-Pb 定年与潜在物源区已知的岩层(体)年龄进行对比^[6-8],并配套微量元素反映源区物质组成来确定沉积物源更加可靠和精准^[9-15]。本文选取 7 个不同局部构造区珠江组下段砂岩进行碎屑锆石 U-Pb 定年,结合区域资料,研究早中新世韩江-陆丰凹陷不同物源体系的分布特征,并以此为基础探讨物源与储层发育的关系。

1 地质背景

韩江-陆丰凹陷位于闽粤沿海的东南部,台湾海峡西南部,是中国近海新生代被动大陆边缘裂谷盆地珠江口盆地的一部分(图 1),经历了晚白垩世-早渐新世多幕裂陷、晚渐新世一早中新世的裂后拗陷及中中新世晚期至今的块断活动阶段,凹陷总体上表现为北断南超的结构特征,其幕式裂陷期发育了古新统神狐组、始新统文昌组和下渐新统恩平组,裂后断-拗转换期主要发生在晚渐新世,该时期盆地沉积充填了上渐新统珠海组海相粗碎屑岩,中中新世盆地开始进入热沉降拗陷阶段^[5]。文昌组受南北两侧控边断裂影

响,凹陷整体呈现双断结构,分别自南北边界向中央超覆,凹陷中间洼陷受两侧断裂控制,呈地堑结构样式;恩平组发育面积更广,沉积中心相对统一,以北侧控边断裂活动为主,整体呈半地堑特征^[14];珠海组沉积期,对凹陷起分割作用的海丰凸起和惠陆低凸起逐渐向水下低隆起过渡,接受沉积的范围显著扩大,物源由盆内隆起和低凸起逐渐向北部华南褶皱带转换,碎屑物质供应充足^[2],钻井揭露岩性可以分为上下两段,下部以砂岩为主,局部夹棕红色或杂色岩层,研究区缺失该段地层,上部以砂泥岩互层为特征;随着珠海组后期海侵的不断扩大,盆地进入整体沉降期,珠江组沉积范围逐渐扩大,珠江组介于时间界面 T_6^0 — T_4^0 之间,底界 T_6^0 为区域性的不整合面,顶界与韩江组无明显岩性界限,但在地震剖面上有明显反射,约相当于地震 T_4^0 反射层。本组厚度一般在 1 000 m 以上,平面上向北、东、南方向变薄,韩江凹陷-东沙隆起一带,厚度小于 500 m,纵向上以 T_5^0 为界可分为上下两段,下段岩性组合分两种,海丰凸起、陆丰凹陷一带由 3~4 个旋回的砂泥岩组成,岩性较细,一般为粉砂岩、细砂岩,夹有多层薄层石灰岩,东沙隆起、惠陆低凸起南部一带下部为厚层砂岩夹薄层泥岩,顶部发育石灰岩及生物礁滩灰岩,该段主要为三角洲-滨岸环境的沉积物,上段全区以大段泥岩为主,间夹少量细砂岩、粉砂岩,主要为滨浅海及浅海环境的沉积物(图 1b)。珠江组下段是本区中深层主要的油气储集层段^[15]。

地球物理、钻达基底探井和区域地质资料综合分析揭示出南海北部陆缘的基底基本上是中国华南古陆向海域的延伸。华东南闽粤陆域主要经历了加里东期、海西期-印支期及燕山期 3 期变质作用及 4 个大的岩浆活动期。其中,晚三叠世-晚侏罗世本区岩浆活动最为强烈,具有由老到新,由海向陆存在海相喷发向陆相喷发转变、强度逐渐减弱的规律^[16-18](图 1a)。

2 样品与测试

本次研究测试样品 7 个,分别采集于珠江口盆地东部 XJ17-3, HZ08-1, HZ10-1, LF2-1, LF13-2, LF22-1 和 HF28-2 构造区珠江组下段(图 1)。所有样品粉碎成 200 目,经多次精细淘洗和电磁初选初步分离出重矿物组分,再经镜下挑选,分别获得所需锆石样品。锆石阴极发光(CL)图像在中国科学院地球化

学研究所的 JXA-8100 电子探针仪器上完成, 锆石 U-Pb 年龄测定在北京大学大陆动力学教育部重点实验室的 ELAN6100 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)与 GeoLas200M 型激光熔蚀探针(LAM)的联机上进行。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质^[38], 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标^[39], ²⁹Si 作为内标元素。仪器分析空白、检出限以及对国际标准物质 42 种主微量元素定量分析结果参考 Gao 等^[40]。

3 分析结果

样品的同位素比值及元素含量计算采用 Glitter, 有效年龄的计算、谐和图和频谱图的绘制采用 Isoplot 3.0 完成。为了提高年龄分析的精度, 文中年龄选取标准如下: 对于年龄大于 1 000 Ma 的锆石, 取 ²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄进行分析, 对于年龄小于 1 000 Ma 的锆石, 取 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄进行分析。对编号 XJ17-3, HZ08-1, HZ10-1, LF2-1, LF13-2, LF22-1 和 HF28-2 的锆石进行了 U-Pb 年龄测定, 舍弃谐和度小于 90% 和大于 110% 的年龄, 获得有效谐和年龄数据分别为 57, 47, 47, 40, 51, 49 和 41 个。样品锆石年龄谐和图见图 2。

确定锆石成因是利用锆石测年判断物源属性首要解决的问题, 除了利用锆石的形态判定锆石成因, 大量研究表明锆石中微量元素的分布对锆石成因和源区岩石类型具有重要的指示意义, 它反映了主岩的组成和结晶环境及幔源和壳源物质的混合^[10,41-43]。

3.1 惠州凹陷

3.1.1 样品 XJ17-3

样品 XJ17-3 谐和年龄范围介于 104~2 800 Ma, 主要集中在 106~435 Ma(图 2a)。有效锆石年龄从太古代至中生代均有分布, 按占比多少依次为: 中生代锆石为 36.8%, 元古宙锆石为 33.4%, 古生代锆石为 26.4%, 太古宙锆石为 3.5%(表 1)。锆石 CL(阴极发光)图像中绝大部分锆石具有振荡环带结构, 部分锆石由于 Th 和 U 元素含量较高, 导致发光性较差。锆石颗粒的粒径大小相差不大, 大部分锆石晶形完好, 个别锆石保留了其长柱状的颗粒形态, 表明碎屑物质未经过长距离搬运(图 3a), 锆石年龄区间为 83~162, 249~428 和 633~837 Ma, 占总量的 79%; REE(稀土元素)球粒陨石标准化配分模式(图 4a)为 HREE(重稀土元素)富集, LREE(轻稀土元素)相对亏损的左倾型; Ce 元素正异常和 Eu 元素负异常明显; Th/U 值介于 0.40~1.73(图 4b), 以岩浆成因为主。

样品锆石微量元素特征(图 4a, 图 5)反映的源区岩石组成: 酸性岩浆岩 20%, 中性岩浆岩 20%, 基性岩浆岩 60%。

3.1.2 样品 HZ08-1

样品 HZ08-1 谐和年龄范围介于 95~2 556 Ma, 主要集中在 95~150 Ma(图 2e)。有效锆石年龄从元古宙至中生代均有分布, 其中中生代锆石占比最多, 为 76.6%, 其次为古生代锆石, 占 12.7%, 元古宙锆石为 10.7%(表 1)。锆石 CL 图像与样品 XJ17-3 相似, 多具典型岩浆锆石振荡环带结构(图 3b), 年龄区间为 98~195 Ma 和 293~390 Ma, 占总量的 78%; 同样 LREE 相对亏损; Ce 强正异常(图 4c); Th/U 值分布范围 0.41~1.34(图 4d), 主要为岩浆成因, 部分锆石呈均质无分带, 可能为变质成因。样品锆石微量元素特征(图 4c, 图 5)反映的源区岩石组成: 酸性岩浆岩 24%, 中性岩浆岩 18%, 基性岩浆岩 58%。

3.2 陆丰凹陷

3.2.1 样品 LF2-1

样品 LF2-1 谐和年龄范围介于 89~720 Ma, 主要集中在 96~175 Ma(图 2c)。有效锆石年龄分布于元古代和中生代, 其中以中生代锆石为主, 达 95.7%, 剩余为元古代锆石, 仅占 4.3%(表 1)。CL 图像中锆石粒径不等, 发光性较差, 呈面状分带(图 3c), 区间为 97~165 Ma, 占总量的 79%; REE 球粒陨石标准化配分模式(图 6a)表现为 HREE 富集, LREE 相对亏损的特征; Ce 元素正异常明显; Th/U 分布范围 0.41~1.31(图 6b), 大部分为岩浆成因。样品锆石微量元素特征(图 5, 图 6a)反映的源区岩石组成: 酸性岩浆岩 20%, 中性岩浆岩 29%, 基性岩浆岩 51%。

3.2.2 样品 HZ10-1

样品 HZ10-1 谐和年龄范围介于 110~2 017 Ma, 主要集中在 110~170 Ma(图 2d)。有效锆石年龄范围为早元古代至中生代白垩纪。其中, 中生代锆石占比最多, 达到 85%, 其次为元古宙锆石, 占 12.5%, 古生代锆石仅占 2.5%(表 1)。CL 图像中锆石多保留长柱状形态, 具振荡环带结构(图 3d), 区间为 111~164 Ma, 占总量 90%; HREE 富集, LREE 相对亏损; Ce 强正异常(图 6c); Th/U 分布范围为 0.43~1.66(图 6d), 岩浆成因占绝大多数。样品锆石微量元素特征(图 4, 图 6c)反映的源区岩石组成: 酸性岩浆岩 17.5%, 中性岩浆岩 42.5%, 基性岩浆岩 40%。

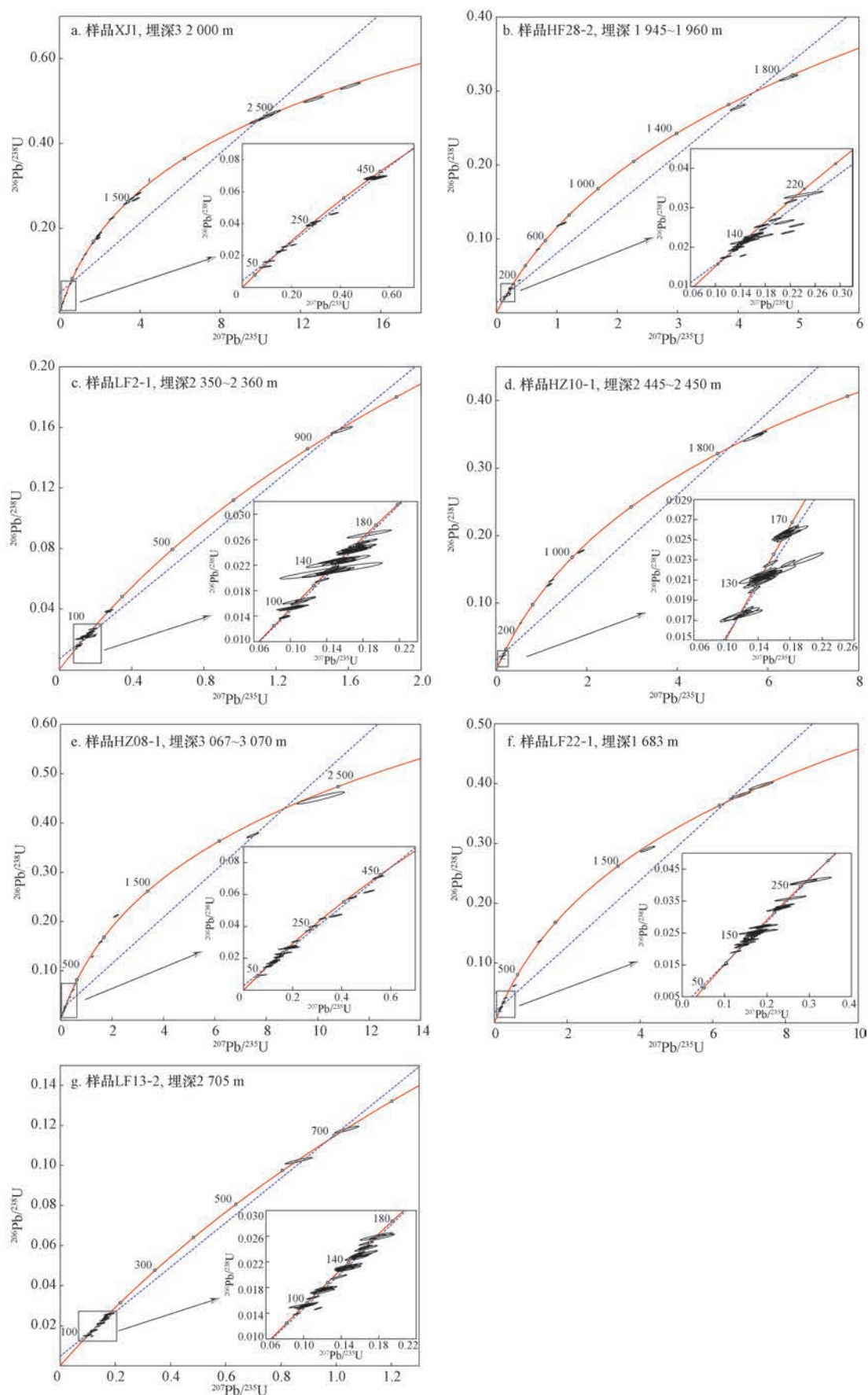


图2 珠江口盆地东部珠江组下段碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 2 Concordia diagram of U-Pb dating of detrital zircons from the Lower Zhujiang Formation of the eastern Pearl River Mouth Basin

表 1 珠江口盆地东部珠江组下段碎屑锆石 U-Pb 年龄

Table 1 U-Pb dating statistics of detrital zircons from the Lower Zhujiang Formation, eastern Pearl River Mouth Basin

样品编号	样品碎屑锆石 U-Pb 年龄组成/%									
	Kz	Mz			Pz		Pt			Ar
		K	J	T	Pz ₂	Pz ₁	Pt ₃	Pt ₂	Pt ₁	
XJ17-3	0	14.0	19.3	3.5	5.3	21.1	8.8	15.8	8.8	3.5
HZ08-1	0	46.8	27.7	2.1	10.6	2.1	4.3	2.1	4.3	0
LF2-1	0	63.8	31.9	0	0	0	4.3	0	0	0
HZ10-1	0	55.0	30.0	0	0	2.5	5.0	2.5	5.0	0
LF13-2	0	45.1	49.0	3.9	0	0	2.0	0	0	0
LF22-1	0	12.2	63.4	12.2	4.1	0	2.0	0	6.1	0
HF28-2	0	51.2	29.3	7.3	0	2.4	4.9	0	4.9	0

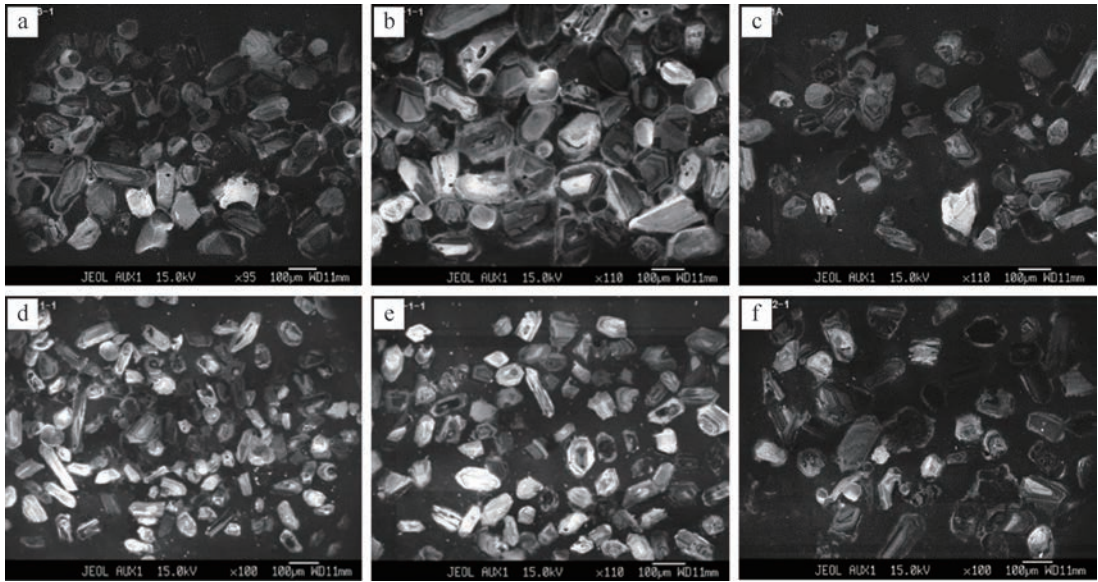


图 3 珠江口盆地东部部分代表性碎屑锆石样品阴极发光 (CL) 图像

Fig. 3 CL images of representative detrital zircons from the Lower Zhujiang Formation of eastern Pearl River Mouth Basin

a. 样品 XJ17-3; b. 样品 HZ08-1; c. 样品 LF2-1; d. 样品 HZ10-1; e. 样品 LF22-1; f. 样品 HF28-2

3.2.3 样品 LF13-2

样品 LF13-2 谐和年龄范围介于 88~950 Ma, 主要集中在 97~170 Ma(图 2g)。有效锆石年龄分布于元古代和中生代, 其中以中生代锆石为主, 达 98%, 剩余为元古代锆石, 仅占 2.0%(表 1)。CL 图像中锆石发光性较差, 多具振荡环带结构, 区间为 89~105 Ma 和 125~172 Ma, 占总量的 84%; HREE 富集, LREE 相对亏损; Ce 强正异常(图 6e); Th/U 值介于 0.41~1.46(图 6f), 多数为岩浆成因。样品锆石微量元素特征(图 4, 图 6e)反映的源区岩石组成: 酸性岩浆岩 24.5%, 中性岩浆岩 24.5%, 基性岩浆岩 51%。

3.3 东沙隆起

样品 LF22-1 谐和年龄范围介于 96~2 200 Ma,

主要集中在 130~173 Ma(图 2f)。有效锆石年龄范围为早元古代至中生代白垩纪, 以中生代锆石占比最多达 87.8%, 其次为元古宙锆石, 占 8.1%, 古生代锆石仅占 4.1%(表 1)。锆石 CL 图像中, 锆石粒径不等, 呈等轴状、近等轴状及长柱状, 大部分锆石具有振荡环带结构(图 3e), 区间为 96~260 Ma, 占总量的 73%; REE 球粒陨石标准化配分模式(图 7a)表现为 HREE 富集, LREE 相对亏损的特征; Ce 元素正异常明显; Th/U 分布范围为 0.41~1.27(图 7b), 岩浆成因为主, 部分锆石呈面状或弱分带, 可能为变质成因。样品锆石微量元素特征(图 5, 图 7a)反映的源区岩石组成: 酸性岩浆岩为 32%, 中性岩浆岩为 19%, 基性岩浆岩为 49%。

3.4 韩江凹陷

样品 HF28-2 谐和年龄范围介于 110~800 Ma,

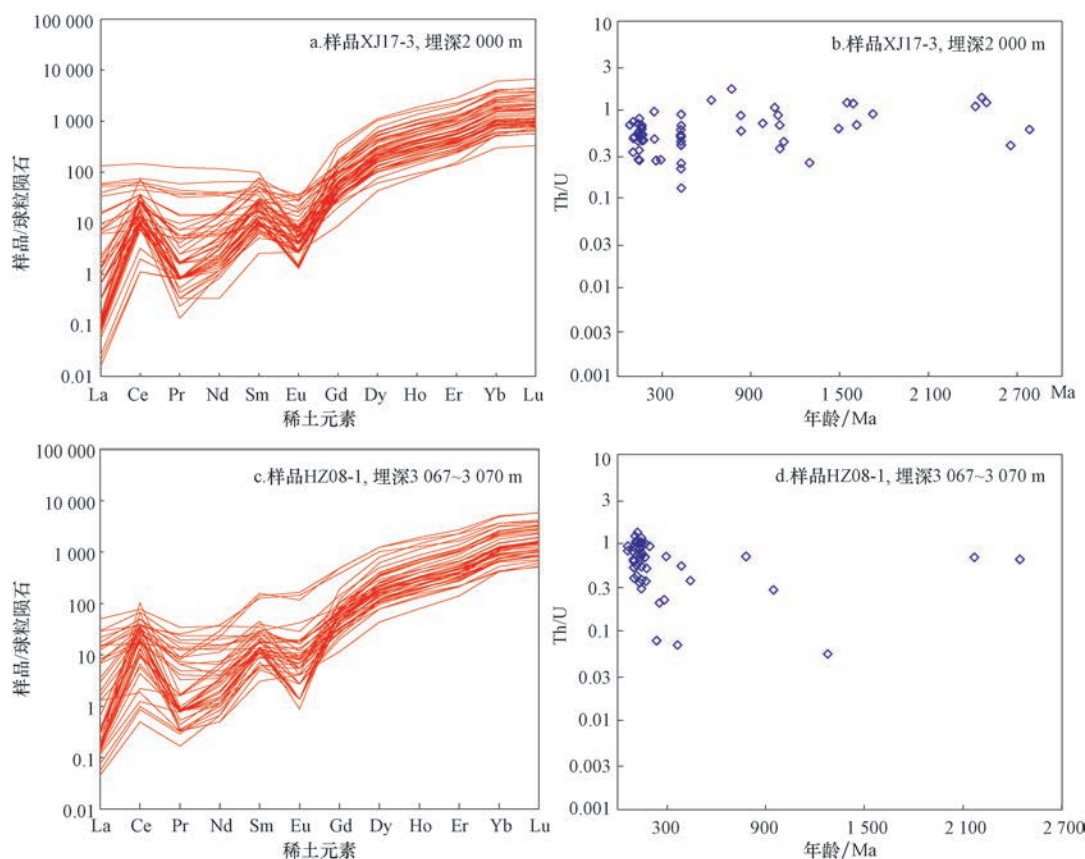


图4 惠州凹陷珠江组下段碎屑锆石球粒陨石标准化配分及年龄与 Th/U 比值

Fig. 4 RREs in chondrite normalized plot as well as age and Th/U ratios of detrital zircons from the Lower Zhujiang Formation in Huzhou Sag

a. XJ17-3 稀土配分; b. XJ17-3 年龄与 Th/U 比值; c. HZ08-1 稀土配分; d. HZ08-1 年龄与 Th/U 比值

主要集中在 110 ~ 150 Ma (图 2b)。有效锆石年龄范围为早元古代至中生代白垩纪, 其中中生代锆石占比最多, 达到 87.8%, 其次为元古宙锆石, 占 9.8%, 古生代锆石仅占 2.4% (表 1)。CL 图像中, 锆石发光性较差, 呈等轴状、近等轴状, 大部分锆石具有振荡环带结构 (图 3f), 区间为 112 ~ 242 Ma, 占总量的 73%; REE 球粒陨石标准化配分模式 (图 8a) 表现为 HREE 富集, LREE 相对亏损的特征; Ce 元素正异常明显; Th/U 值介于 0.42 ~ 1.23 (图 8b), 多为岩浆成因, 部分锆石呈无环带, 可能为变质成因。样品锆石微量元素特征 (图 4, 图 8a) 反映的源区岩石组成: 酸性岩浆岩 12.5%, 中性岩浆岩 35%, 基性岩浆岩 52.5%。

4 讨论

4.1 潜在物源区

4.1.1 珠江流域

珠江流域内出露地层所属时代和岩性分带性明显, 上游主要出露中生界; 中游中生界剥蚀殆尽, 以古

生界出露为主; 而下游则广泛分布喜马拉雅期和燕山期的火山岩及花岗岩。珠江流经扬子和华夏两个地块, 大致以江绍断裂为界, 珠江上游, 包括南盘江、红水河、北盘江、左江、右江以及中游的柳江均属于扬子地块, 位于其南缘, 中游的桂江、北江、西江、东江和北江则位处华夏地块^[44]。

珠江流域范围内岩浆岩活动频繁而强烈, 主要分布在广东省境内 (图 1) 和桂东南, 可以划分出 6 个活动期次^[44]。前寒武纪岩浆岩主要为黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩、镁铁质和超镁铁质岩等, 仅在桂北地区可见, 其形成年代为晋宁期^[45]。李献华^[19]报道桂北地区三防花岗岩中锆石 SHRIMP 和 U-Pb 年龄为 $825 \text{ Ma} \pm 8 \text{ Ma}$, 为新元古代雪峰期岩浆活动的产物。早古生代花岗岩体在区内较分散, 多分布于桂-湘交界、粤-桂交界、桂东南云开地区和武夷山地区, 典型的出露于桂东北越城岭-苗儿山岩体, 呈中等规模复式岩基产出, 主要岩性为细-粗粒二长花岗岩, 丁兴等^[20]报道的粤东古寨岩体成岩时间为 $507 \text{ Ma} \pm 17 \text{ Ma}$, 程顺波等^[21]利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法

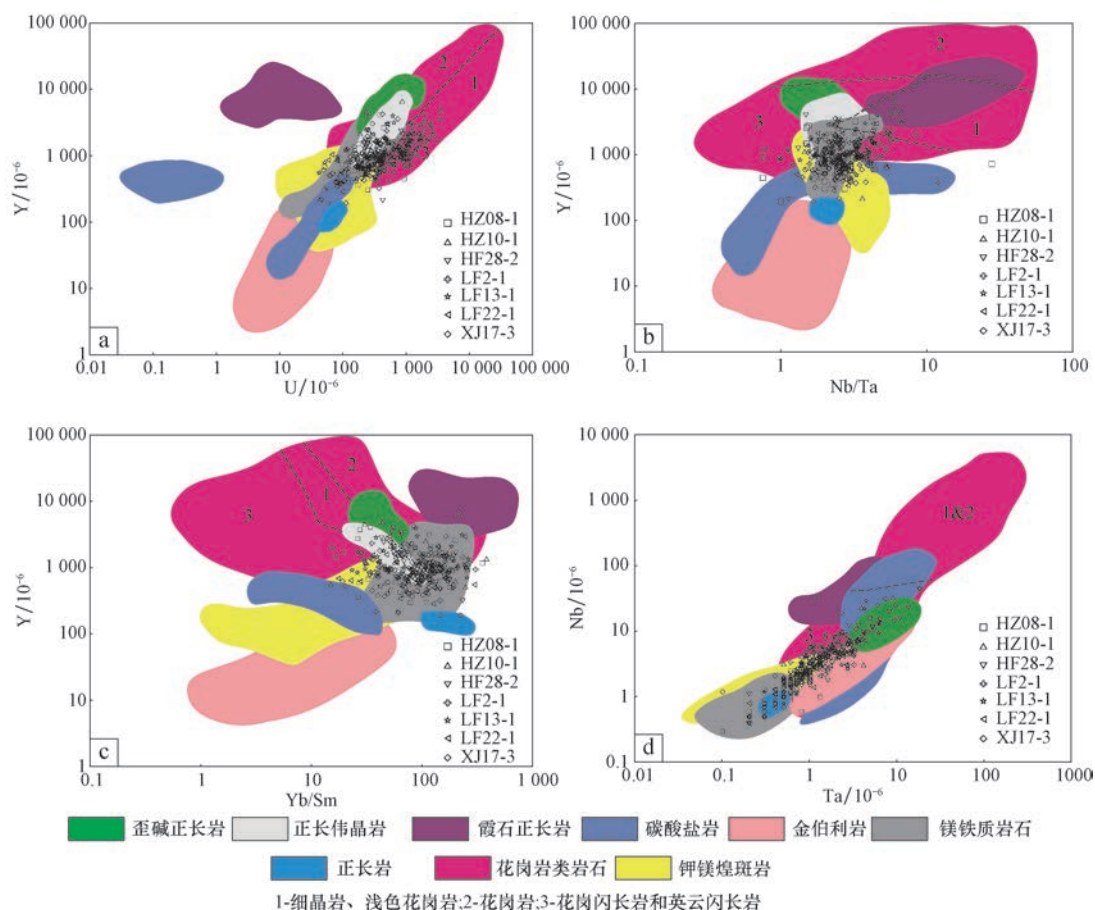
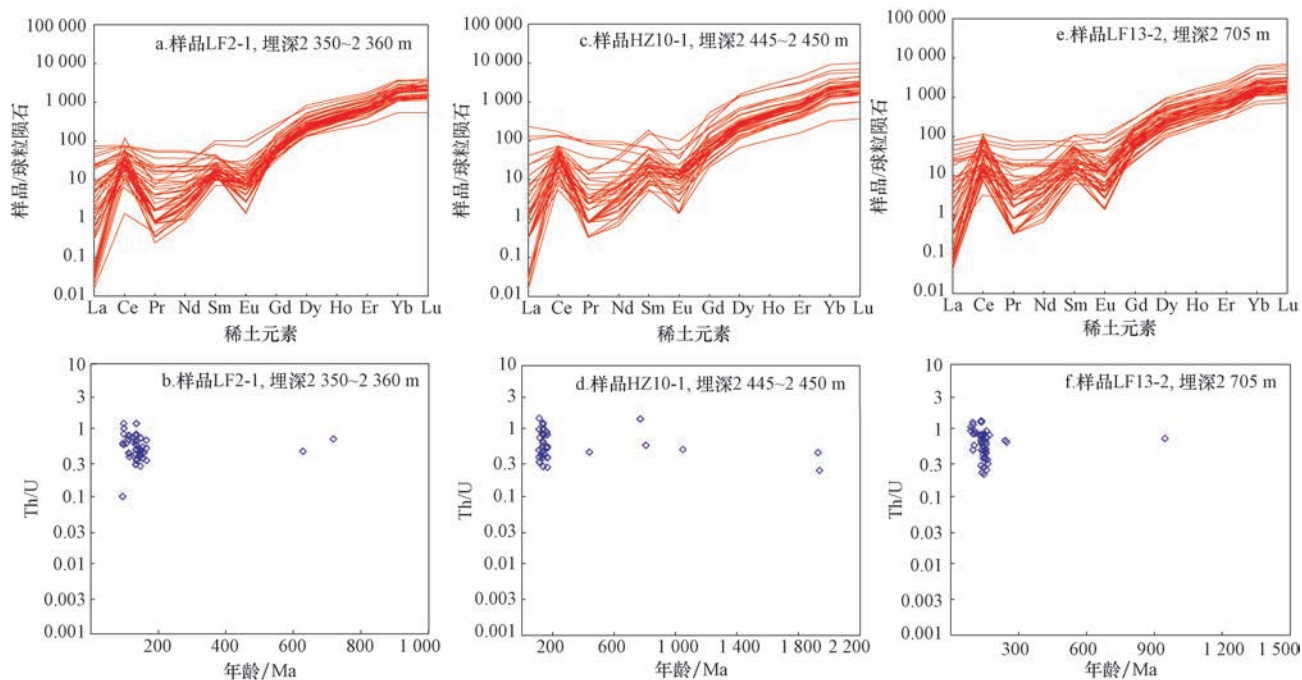
图 5 珠江口盆地东部珠江组下段锆石组成岩石类型判别图解^[10]Fig. 5 Diagram showing zircon-based rock typing for the Lower Zhujiang Formation, eastern Pearl River Mouth Basin^[10]

图 6 陆丰凹陷珠江组下段碎屑锆石球粒陨石标准化配分及年龄与 Th/U 比值

Fig. 6 RREs in chondrite normalized plot as well as age and Th/U ratios of detrital zircons from the Lower Zhujiang Formation in Lufeng Sag

a. LF2-1 稀土配分; b. LF2-1 年龄与 Th/U 比值; c. HZ10-1 稀土配分; d. HZ10-1 年龄与 Th/U 比值; e. LF13-2 稀土配分;

f. LF13-2 年龄与 Th/U 比值

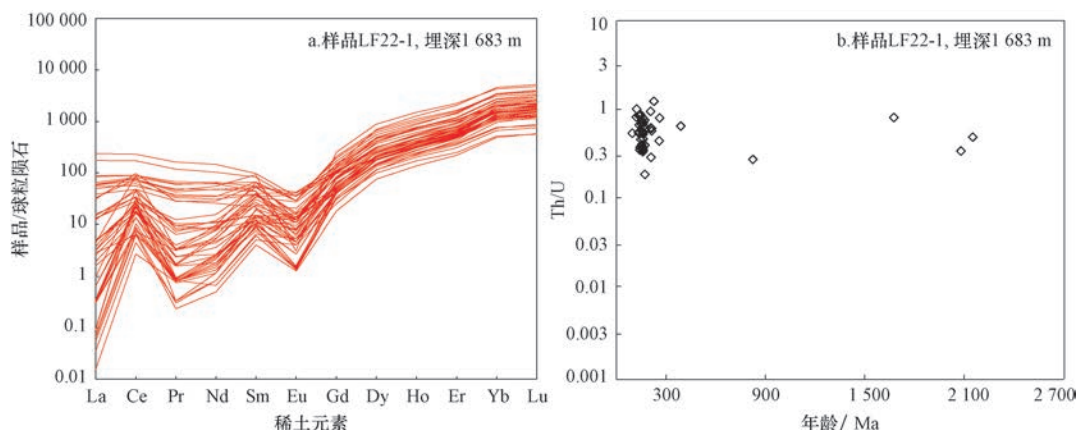


图7 东沙隆起珠江组下段碎屑锆石球粒陨石标准化配分及年龄与 Th/U 比值

Fig. 7 RREs in chondrite normalized plot as well as age and Th/U ratios of detrital zircons from the Lower Zhujiang Formation in Dongsha Uplift

a. LF22 - 1 稀土配分; b. LF22 - 1 年龄与 Th/U 比值

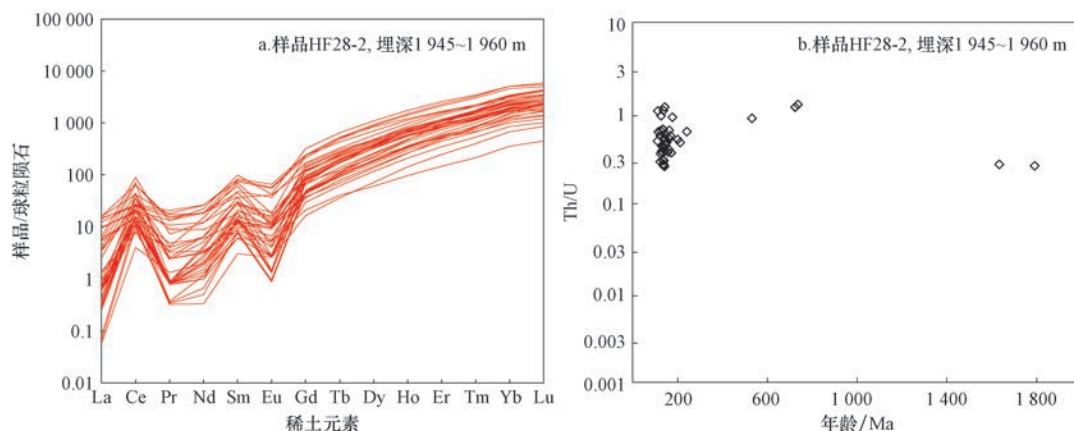


图8 韩江凹陷珠江组下段碎屑锆石球粒陨石标准化配分及年龄与 Th/U 比值

Fig. 8 RREs in chondrite normalized plot as well as age and Th/U ratios of detrital zircons from the Lower Zhujiang Formation in Hanjiang Sag

a. HF28 - 2 稀土配分; b. HF28 - 2 年龄与 Th/U 比值

获得越城岭花岗岩成岩年龄为 423 ~ 438 Ma, 耿红艳等^[22]测定的诗洞杂岩体和广平杂岩体 U - Pb 年龄分别为 461 Ma ± 35 Ma 和 444 Ma ± 6 Ma; 在桂东南、粤中和赣南有晚古生代岩体零星出露, 岩石类型主要有二长花岗岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩和片麻状花岗岩等, 贾小辉^[23]测定桂东南那丽花岗岩的 U - Pb 年龄为 262 Ma。早中生代流域内岩浆活动广泛, 岩体在桂东南大容山—十万大山一带、台马、旧州、粤东北地区都有较大面积的出露, 印支期复式岩体一般由多期花岗质岩浆活动构造, 岩性主要包括黑云母二长花岗岩、不等粒二云母花岗岩、中粗粒黑云母花岗岩及黑云母花岗岩等, 如邓希光等^[24]测定桂东南旧州、台马和浦北三个花岗岩体的年龄分别为 230 Ma ± 4 Ma, 236 Ma ± 4 Ma 和 233 Ma ± 5 Ma, 徐夕生等^[25]获得粤东北贵东复式岩体中鲁溪和下庄两个花岗岩体锆石 U - Pb 年

龄分别为 239 Ma ± 5 Ma 和 235.8 Ma ± 7.6 Ma, Peng 等^[26]测定粤西那蓬花岗岩的 U - Pb 年龄为 206 Ma ± 1.8 Ma; 严成文等^[27]测定粤西内瀚黑云母二长花岗岩的 U - Pb 年龄为 246.7 Ma ± 7.1 Ma; 孙涛等^[28]测定粤北下庄二云母花岗岩的 U - Pb 年龄为 228 Ma ± 0.5 Ma; 晚中生代火山活动最为强烈, 集中分布于流域内的广东省境内, 可以分为晚三叠世—晚侏罗世和早白垩世—古新世两个期次, 其中, 晚三叠世—早侏罗世为海相喷发, 在粤东北见碱性玄武岩、安山岩夹流纹岩, 中侏罗世在粤东及粤中主要为陆相火山碎屑岩夹安山岩及流纹岩, 花岗岩体出露面积广, 岩石类型主要为二长花岗岩、黑云母花岗岩和花岗闪长岩, 杨锋等^[29]在粤西北地区太保岩体获得的 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄为 158.4 Ma ± 2 Ma 和 160.5 Ma ± 1.6 Ma; 张敏等^[30]测定粤北大东山花岗岩 U - Pb 年龄为 158.4 Ma ±

1.1 Ma;邓平等^[31]测定粤北诸广山南体长江和企岭岩体 U-Pb 年龄分别为 $160 \text{ Ma} \pm 2 \text{ Ma}$ 和 $156 \text{ Ma} \pm 2 \text{ Ma}$, 还有部分代表性岩体如^[16]: 禾洞(145 Ma), 连阳(144 Ma), 佛冈(168 Ma), 新兴(184 Ma), 德庆($99 \text{ Ma} \pm 2 \text{ Ma}$)^[22], 四会($166.6 \text{ Ma} \pm 2.9 \text{ Ma}$)^[32]。

4.1.2 韩江流域

流域范围内地层缺失志留系、中-下泥盆统及古近系。流域内的粤东、闽西南地层均属于华南地层区, 闽西南出露最元古界出露齐全, 主要分布于长汀、武平、上杭和永定一带, 粤东上元古界云开群出露于兴宁、梅县、蕉岭等地, 均为一套浅变质的细碎屑岩, 下古生界缺失志留系, 包括寒武系、奥陶系变质石英砂岩、变质粉砂岩、千枚岩、千枚状泥岩和硅质岩, 上古生界缺失中下泥盆统, 包括上泥盆统一下石炭统石英砂砾岩、砂岩, 上石炭统一下二叠统灰岩、白云岩, 中上二叠统泥岩、粉砂岩、石英细砂岩等, 中生界主要包括三叠系、侏罗系含煤碎屑岩、火山碎屑岩及白垩系红色碎屑岩^[16-18](图1)。

韩江流域范围内以燕山期岩浆活动十分强烈为特征, 岩浆岩分布面积约占流域面积的30%。早古生代花岗岩体分布于粤东和平一带, 闽西南主要集中于宁化地区, 龙岩、清流地区小面积分布, 徐先兵等^[33]、张爱梅等^[34]通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测得闽西南玮埔岩体年龄为 $429.9 \text{ Ma} \pm 3.0 \text{ Ma}$ 至 $447.1 \text{ Ma} \pm 4.7 \text{ Ma}$, 宁化岩体($448.2 \text{ Ma} \pm 2.5 \text{ Ma}$), 都属于加里东期。海西期-印支期岩浆活动不太活跃, 岩体零星分布, 闽西南古田、河田, 粤东梅县、和平地区可见, 王丽娟等^[35]获得的古田-小陶花岗质杂岩体中小陶花岗岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $222 \text{ Ma} \pm 3.0 \text{ Ma}$, 于津海等^[36]报道的富城-红山花岗质杂岩中富城黑云母花岗岩、粗石坝花岗岩和珠长洞花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 $239 \text{ Ma} \pm 17.0 \text{ Ma}$, $231 \text{ Ma} \pm 16.0 \text{ Ma}$ 及 $229 \text{ Ma} \pm 6.8 \text{ Ma}$ 。燕山期岩浆活动非常活跃, 发生了多期侵入活动, 侵入岩遍布流域, 闽西南代表性岩体有: 才溪($150 \text{ Ma} \pm 3.0 \text{ Ma}$)、莒舟($133.9 \sim 136.0 \text{ Ma}$)、紫金山($168 \text{ Ma} \pm 4.0 \text{ Ma}$, $119 \text{ Ma} \pm 15.0 \text{ Ma}$)、虎岗增坑($147.98 \text{ Ma} \pm 0.86 \text{ Ma}$)、虎岗灌洋($143.0 \text{ Ma} \pm 1.1 \text{ Ma}$)等^[17], 粤东代表性岩体有^[37]: 大埔($136.3 \text{ Ma} \pm 0.6 \text{ Ma}$)、揭西($134.9 \text{ Ma} \pm 0.4 \text{ Ma}$)、龙窝($169.1 \text{ Ma} \pm 2.5 \text{ Ma}$)、白石($157.8 \text{ Ma} \pm 2.3 \text{ Ma}$)、荷泗(140 Ma)、青溪(147 Ma)、莲塘(90 Ma)、莲花山桃子窝($168.9 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$)等。

流域范围内新生代岩浆活动较微弱, 岩浆活动以

喷发为主, 闽西南明溪-宁化湖村出露小面积佛县群, 主要岩性为碱性玄武岩^[17], 粤东火山岩分布于沿海的汕头-揭阳一带(图1), 出露喜马拉雅期橄榄玄武岩岩筒和玄武质角砾岩筒^[16]。

变质岩在流域内可划分出加里东期、海西期-印支期和燕山期。加里东绿片岩相变质岩带主要分布于粤东地区, 闽西南则主要出露包括晚泥盆纪-一晚三叠纪早期地层, 变质作用微弱, 为未分的亚绿片岩相-低绿片岩相, 燕山期变质岩多分布于粤东沿海一带(图1), 变质岩为角闪岩相、绿片岩相^[16-17]。

4.1.3 东沙隆起

东沙隆起位于研究区南部, 面积约 $3.00 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要由中生代燕山期中酸性岩浆岩组成, 间夹燕山早期酸性侵入岩和基性喷发岩, 探井揭露的基底岩性有花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等, 李平等^[46]利用 K-Ar 法和 Rb-Sr 法获得东沙隆起基岩样品绝对年龄: 如 LH11-1-1A($90.62 \text{ Ma} \pm 1.49 \text{ Ma}$, $72.78 \text{ Ma} \pm 1.37 \text{ Ma}$), HZ25-2-1X($99.8 \text{ Ma} \pm 1.53 \text{ Ma}$), HZ32-1-1($88.5 \text{ Ma} \pm 3.6 \text{ Ma}$) 和 HZ35-1-1(105 Ma), 时代属于燕山晚期晚白垩世。

4.2 珠江组下段物源

4.2.1 物源与古水系

惠州凹陷西北部 XJ17-3 主要碎屑锆石年龄具有相对较宽的年龄变化范围, 有 138, 162 和 428 Ma 三个年龄峰值, 105 Ma 和 146 Ma 两个次要峰值(图9a)。加里东期年龄峰值 428 Ma 是珠江物源的重要标志, 对现代珠江流域主流河流砂体碎屑锆石 U-Pb 定年, 结果显示流域范围内有 8 组年龄峰值, 且分带性明显, 上游年龄峰值 1 800 ~ 2 000 Ma 和 230 ~ 380 Ma, 中游年龄峰值 2 300 ~ 2 800, 800 ~ 1 000 和 440 ~ 660 Ma, 下游年龄峰值 230 ~ 380 Ma 和 90 ~ 200 Ma^[21], 其中, XJ17-3 样品加里东期年龄峰值 428 Ma 可能是通过珠江水系来自江南造山带, XJ17-3 样品燕山期(年龄峰 138 Ma 和 162 Ma) 则与下游东南沿海花岗岩带有关。而且上游珠江流域主要出露燕山期、加里东期及中新元古代花岗岩、花岗闪长岩及其同期基性或超基性岩及少量的印支期岩浆岩, 与 XJ17-3 反映的源区岩石类型较为一致。

韩江凹陷北部 HF28-2(“一主(137 Ma)三次(111, 124 和 143 Ma)”)与陆丰凹陷东北部 LF2-1(“一主(134 Ma)三次(98, 114 和 145 Ma)”)珠江组下段样品碎屑锆石年龄频谱特征相似

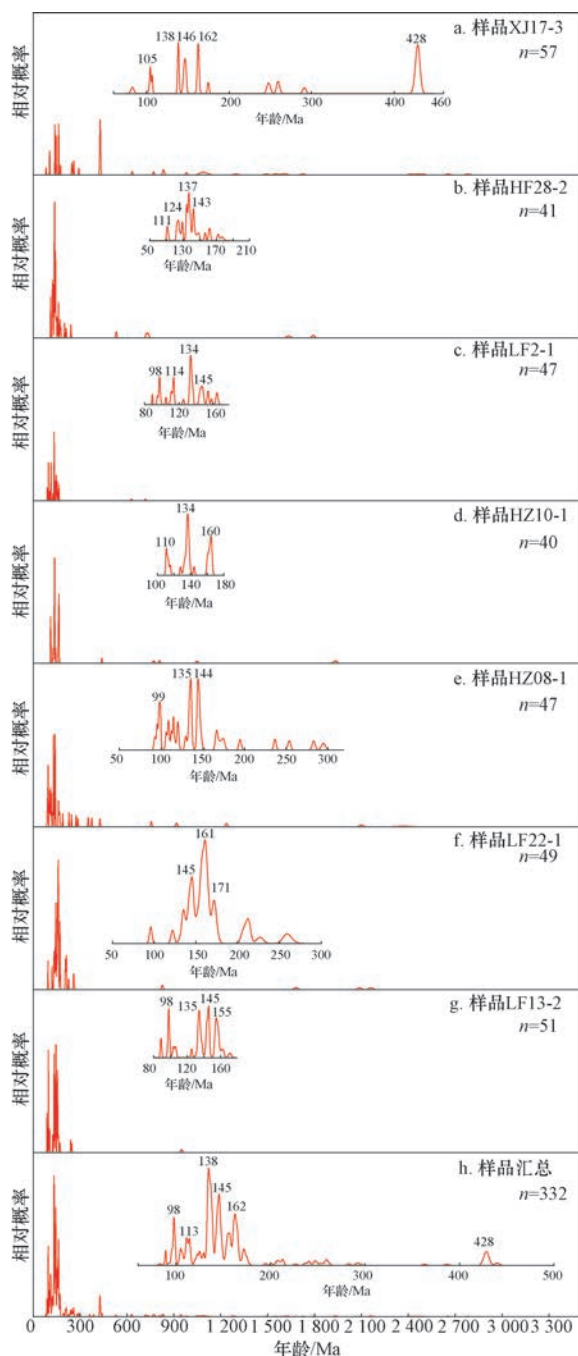


图9 珠江口盆地东部珠江组下段
碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱

Fig. 9 Age spectrum of zircon U-Pb dating of the Lower
Zhujiang Formation in eastern Pearl River Mouth Basin

(图9b,c),源区物质组成基本一致,两者年龄频谱中含有丰富的燕山期(K_1 , J_3 和 J_2)年龄,燕山期年龄峰值137 Ma 和 134 Ma 在粤东沿海地区广泛分布,包括珠江流域下游和韩江流域下游,形成年龄为120~170 Ma。相比XJ17-3, HF28-2 和 LF2-1 明显缺乏加里东期年龄,加里东期年龄的缺乏一方面是因为韩江流域内加里东期岩体分布较少,另一方面则说明珠江物

源碎屑物质没有影响到上述两个构造区。总的来看,韩江凹陷北部 HF28-2 与陆丰凹陷东北部 LF2-1 珠江组下段以韩江物源为主。

陆丰凹陷西北部 HZ10-1 样品碎屑锆石年龄有136 Ma 一个主要年龄峰值,112 Ma 和 164 Ma 两个次要年龄峰值,年龄频谱中出现大量的燕山期(K_1 , J_2)年龄(图9d),仍应来自广东沿海,但与邻近 LF2-1 不同的是缺乏 J_3 年龄(图9c,d),源区物质组成也明显不同。表明陆丰凹陷西北部 HZ10-1 存在不同于韩江物源的其他物源,推测是通过北部汕尾水系来自莲花山韧性剪切带。

惠州凹陷东北部样品 HZ08-1 碎屑锆石年龄频谱与 XJ17-3 和 HZ10-1 既有一定相似性,也存在部分差异,与 XJ17-3 相同的是 HZ08-1 年龄无明显缺失,源区物质组成也类似,不同在于 HZ08-1 无加里东期年龄峰;与 HZ10-1 相同的是其也含有丰富的燕山期年龄,有135 Ma 和 144 Ma 两个主要年龄峰值(图9d,e),主要差异是 HZ08-1 有超过20%晚于海西印支期的年龄(表1),且两者源区物质组成不同。综合来看,惠州凹陷东北部 HZ08-1 珠江组下段以珠江物源为主,汕尾水系可能为 HZ08-1 区提供部分碎屑物质。

东沙隆起 LF22-1 样品碎屑锆石年龄具有与陆丰凹陷西北部 HZ10-1、韩江凹陷北部 HF28-2 类似的频谱特征,有一个主要年龄峰值161 Ma,两个次要年龄峰值145 Ma 和 171 Ma(图9f)。燕山期年龄主峰161 Ma 是盆内基底凸起与东沙隆起物源的重要标志。前人获得珠江口盆地基底样品锆石 U-Pb 年龄为163.8~100.4 Ma^[47],与 LF22-1 样品锆石燕山期年龄一致;钻遇基底的近百口钻井揭示东沙隆起与珠一坳陷基底主要为中生代岩浆岛弧,岩性为花岗岩、玄武岩等^[2,48,49],与 LF22-1 反映的源区物质中酸性岩浆岩(35%)占比大吻合,表明东沙隆起是其主要物源区。

陆丰凹陷南部 LF13-2 样品碎屑锆石年龄频谱表现为多峰特征,主要包含燕山早期(155 Ma)和燕山晚期(98, 135, 145 Ma)年龄(图9g)。侏罗纪一晚白垩世花岗岩在华南沿海地区分布广泛,盆地内部的东沙隆起地区也有发现,前者形成年龄71~196 Ma,后者形成年龄70.5~163.8 Ma,这些年龄与样品 LF13-2 燕山期年龄基本一致,相比 HZ08-1 和 LF13-2 明显缺失海西期和加里东期年龄可能与该区无珠江物源加入有关;锆石年龄频谱与 LF2-1 和 LF22-1 类似,源区物质组成与 LF22-1 的更为接近。总体来看,LF13-2 构造区珠江组下段以东沙隆起物源为主,并且在一定程度上受到盆地东北侧韩江物源的影响。

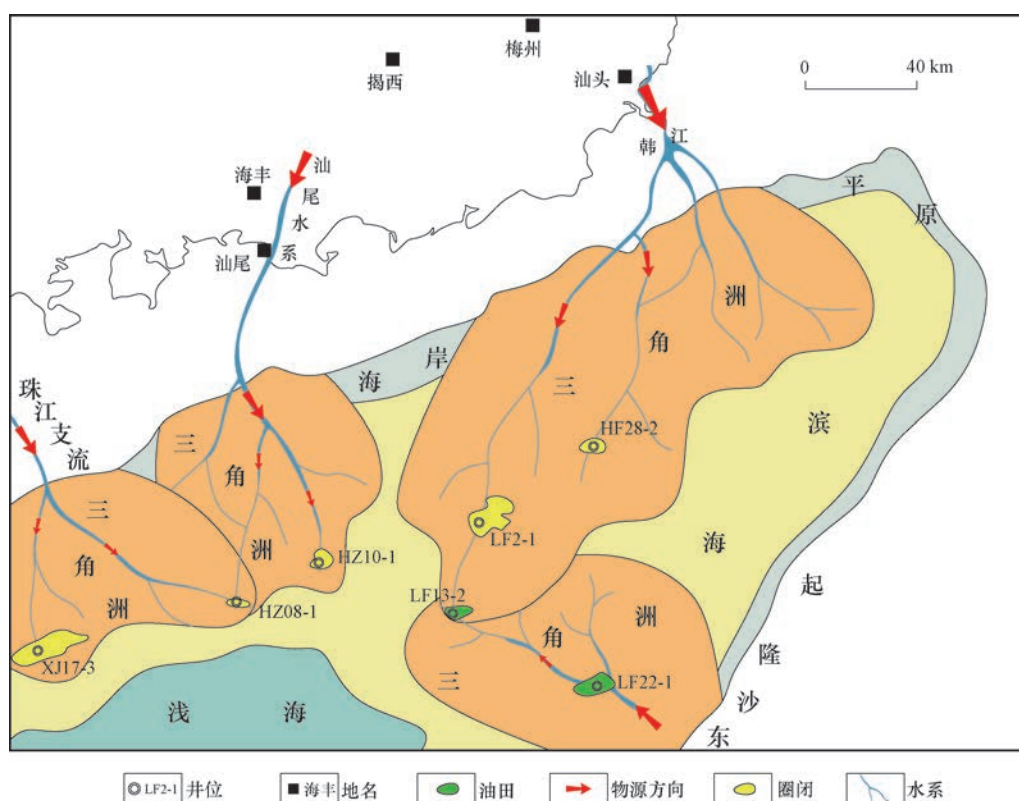


图 10 珠江口盆地东部珠江组下段沉积相与物源分布

Fig. 10 Sedimentary facies and possible provenances of the Lower Zhujiang Formation, eastern Pearl River Mouth Basin

在上述分析的基础上,结合沉积相研究成果,编绘了韩江-陆丰地区珠江组下段沉积相与物源分布图(图 10),由图中可以看出,珠江组沉积早期,韩江-陆丰地区广泛发育三角洲沉积,至少存在 4 条供给物质的水流体系沿研究区南北两侧分布,其中,南向以韩江为物源区的三角洲在研究区内影响范围最广,由北向南影响韩江凹陷北包括 HF28-2 构造在内的大部分地区,向西南一直延伸到陆丰凹陷北的 LF2-2 构造,并有继续向 LF13-2 构造延伸的趋势;东沙隆起除为 LF22-1 构造提供物源外,其影响范围还包括紧邻东沙隆起的陆丰凹陷南部,最远可以延伸至 LF13-2 构造;相比韩江水系和东沙水系,汕尾水系和珠江水系影响范围较小,局限于研究区西部,前者是 HZ10-1 构造碎屑物质沉积供应的主要通道, HZ08-1 构造以珠江物源为主,可能有少量的碎屑物质是通过汕尾水系搬运。

4.2.2 物源与油气储层关系

物源供给体系与后期成岩作用是影响储层物性的两个重要因素。通常情况下,物源区母岩类型对物源指向区砂岩组分起主要控制作用^[50],大多数碎屑岩储层原生孔隙度降低最主要的原因是压实作用^[8,51],砂

岩组分中抗压能力不同的刚性和塑性颗粒的比例对储层孔隙度损失率起控制性作用,压实作用对石英颗粒为主的砂岩造成的岩石孔隙度损失是火山岩岩屑为主的砂岩的 1/2,前者在压实过程中孔隙度损失约 25%,而后者则可达 50%^[51-53]。沉积岩中岩屑的含量在很大程度上受物源区岩石结晶颗粒大小的控制,粒径越小,砂岩中岩屑越容易形成^[54],因此,砂岩中岩屑含量差异明显可能是因为沉积母质来源于不同构造背景的源区,比如,砂岩中以变质岩和侵入岩为母质的石英或长石富集,含少量岩屑,而以火山岩为母质的砂岩中明显岩屑富集^[8,50]。有国外学者研究表明^[51],受深部自生石英形成及长石和岩屑溶蚀作用的影响,砂岩中富含石英和长石最有利于浅层(地温 < 120 °C)优质储层形成,砂岩中含一定量长石和岩屑最有利于深层(地温 > 140 °C)优质储层形成。研究区珠江组下段物源整体以侵入岩为主,部分变质岩,砂岩中富含石英或长石,含少量岩屑,抗压能力强,在成岩过程中孔隙度损失不大,珠江组下段细砂岩在埋深 1 700 ~ 2 600 m 可以形成优质的油气储层,这在前期陆丰 13-2 油田和陆丰 22-1 油田的勘探过程中得到了证实。韩江-陆丰地区浅层和中深层仍是今后珠江口盆地东部油气勘探的重要领域,急需增加勘探投入,深化研究。

5 结论

1) 韩江-陆丰凹陷不同构造区早中新世珠江早期碎屑锆石年龄主要分布于燕山期,与周缘古老岩层(体)年龄分布较为一致,其潜在物源区以岩浆岩为主,此外还有部分变质岩。

2) 韩江-陆丰凹陷北部珠江和韩江物源区差异明显,可以加以区分。盆地西北侧珠江物源年龄中多有前寒武纪、加里东期、印支期和燕山期年龄,而东北侧韩江物源年龄中则缺乏中-新元古代和加里东期年龄以丰富的燕山期年龄为特征。

3) 早中新世珠江早期至少存在4条水体系向韩江-陆丰凹陷供应碎屑物质,相对而言,南向的韩江物源影响包括海丰28构造区和陆丰2构造区的大部分地区,对盆地碎屑物质沉积贡献最大;南侧东沙隆起为陆丰22构造区主物源区;汕尾物源除为惠州10构造区供源外,还在惠州08构造区与珠江物源交汇;陆丰13构造区以东沙隆起物源为主,还可能有一部分碎屑物质来自韩江物源。韩江-陆丰地区有利于浅层和中深层优质储层的发育,该区珠江组下段仍是今后珠江口盆地东部油气勘探的重要领域。

参 考 文 献

- [1] 邵磊,庞雄,乔培军,等. 珠江口盆地的沉积充填与珠江的形成演变[J]. 沉积学报,2008,26(2):179-185.
Shao Lei, Pang Xiong, Qiao Peijun, et al. Sedimentary filling of the Pearl River Mouth Basin and its response to the evolution of the Pearl River[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 179-183.
- [2] 王维,叶加仁,杨香华,等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪多幕裂陷旋回的沉积物源响应[J]. 地球科学,2015,40(6):1061-1071.
Wang Wei, Ye Jiaren, Yang Xianghua, et al. Sediment provenance and depositional response to multistage rifting, Paleogene, Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2015, 40(6): 1061-1071.
- [3] 张向涛,陈亮,余清华,等. 南海北部古韩江物源的演化特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2012,32(4):41-48.
Zhang Xiangtao, Chen Liang, She Qinghua, et al. Provenance evolution of the Paleo-Hanjiang River in the North South China sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(4): 41-48.
- [4] 李小平,施和生,杜家元,等. 珠海组-珠江组时期东沙隆起物源提供能力探讨[J]. 沉积学报,2014,32(4):654-662.
Li Xiaoping, Shi Hesheng, Du Jiayuan, et al. Capability of Dongsha Massif as provenance during Zhuhai-Zhujiang formations[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(4): 654-662.
- [5] 焦鹏,郭建华,张向涛,等. 珠江口盆地陆丰凹陷珠江组泥岩元素地球化学组成及意义[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(7):2347-2356.
Jiao Peng, Guo Jianhua, Zhang Xiangtao, et al. Element geochemistry

of the Neogene Zhujiang formation mudstones in Lufeng depression, Pearl River Mouth Basin and its geological implication[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(7): 2347-2356.

- [6] 王策,梁新权,周云,等. 莺歌海盆地东侧物源年龄标志的建立:来自琼西6条主要河流碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的研究[J]. 地学前缘,2015,22(4):277-289.
Wang Ce, Liang Xingquan, Zhou Yun, et al. Construction of age frequencies of provenances on the eastern side of the Yinggehai Basin: Study of LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircons from six modern rivers, western Hainan, China. [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(4): 277-289.
- [7] 谢玉洪,童传新,裴健翔,等. 莺歌海盆地黄流组二段碎屑锆石年龄与储层物源分析[J]. 大地构造与成矿学,2016,40(3):517-530.
Xie Yuhong, Tong Chuanxin, Pei Jianxiang, et al. Detrital zircon ages and reservoir source of the second member of the Huangliu formation in the Yinggehai Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(3): 517-530.
- [8] 付晓伟,朱伟林,陈春峰,等. 丽水-椒江凹陷西斜坡明月峰组上段碎屑锆石物源[J]. 地球科学-中国地质大学学报,2015,40(12):1987-2001.
Fu Xiaowei, Zhu Weilin, Chen Chunfeng, et al. Detrital zircon provenance of Upper Mingyuefeng Formation in west slope of Lishui-Jiaojiang Sag, the East China Sea [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(12): 1987-2001.
- [9] Condie K C, Beyer E, Belousova E, et al. U-Pb isotopic ages and Hf isotopic composition of single zircons: The search for juvenile Precambrian continental crust [J]. Precambrian Research, 2005, 139(1-2): 42-100.
- [10] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602-622.
- [11] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: Examples from Eastern Australian granitoids [J]. Journal of Petrology, 2006, 47(2): 329-353.
- [12] Izuka T, Hirata T. Simultaneous determinations of U-Pb age and REE abundances for zircons using ArF excimer laser ablation-ICPMS [J]. Geochemical Journal, 2004, 38(3): 229-241.
- [13] 雷玮琰,施光海,刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. 地学前缘,2013,20(4):273-284.
Lei Weiyan, Shi Guanghai, Liu Yingxin. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences (Beijing); Peking University), 2013, 20(4): 273-284.
- [14] 焦鹏,郭建华,张向涛,等. 陆丰地区古近系恩平组沉积演化特征及沉积模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):9-19.
Jiao Peng, Guo Jianhua, Zhang Xiangtao, et al. Sedimentary evolution characteristics and sedimentary model of Paleogene Enping Formation, Lufeng area, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(5): 9-19.

- [15] 万琼华,刘伟新,罗伟,等.珠江口盆地陆丰凹陷A油田储层质量差异及低渗储层主控因素[J].石油与天然气地质,2017,38(3):551-560.
Wan Qionghua, Liu Weixin, Luo Wei, et al. Reservoir quality differences and major factors controlling low-permeability reservoirs of Oil-field A in the Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 551-560.
- [16] 广东省地质矿产局.广东省区域地质志[M].北京:地质出版社,1988.
Guangdong Province Bureau of Geology and Mineral Resources. Guangdong province regional geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [17] 福建省地质矿产局.福建省区域地质志[M].北京:地质出版社,1985.
Fujian Province Bureau of Geology and Mineral Resources. Fujian province regional geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- [18] 江西省地质矿产局.江西省区域地质志[M].北京:地质出版社,1984.
Jiangxi Province Bureau of Geology and Mineral Resources. Jiangxi province regional geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.
- [19] 李献华.广西北部新元古代花岗岩锆石U-Pb年代学及其构造意义[J].地球化学,1999(1):1-9.
Li Xianhua. U-Pb zircon ages of granites from northern Guangxi and their tectonic significance[J]. Geochimica, 1999, 28(1): 1-9.
- [20] 丁兴,周新民,孙涛.华南陆壳基底的幕式生长——来自广东古寨花岗岩闪长岩中锆石LA-ICPMS定年的信息[J].地质论评,2005,51(4):382-392.
Ding Xing, Zhou Xinmin, Sun Tao. The episodic growth of the continental crustal basement in South China: single zircon LA-ICPMS U-Pb dating of Guzhai granodiorite in Guangdong[J]. Geological Review, 2005, 51(4): 382-392.
- [21] 程顺波,付建明,马丽艳,等.桂东北越城岭岩体加里东期成岩作用:锆石U-Pb年代学、地球化学和Nd-Hf同位素制约[J].大地构造与成矿学,2016,40(4):853-872.
Cheng Shunbo, Fu Jianming, Ma Liyan, et al. Origin of the Yuechengling caledonian granitic batholith, northeastern Guangxi: constraint from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(4): 853-872.
- [22] 耿红燕,徐夕生, S. Y. O'Reilly, 等.粤西白垩纪火山-侵入岩浆活动及其地质意义[J].中国科学:地球科学,2006,36(7):601-617.
Geng Hongyan, Xu Xisheng, S Y O'Reilly, et al. Cretaceous volcanic-intrusive magmatism in western Guangdong and its geological significance[J]. Science in China (Series D-Earth Sciences), 2006, 36(7): 601-617.
- [23] 贾小辉,王晓地,杨文强,等.广西钦州地区那丽花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及其地质意义[J].地质通报,2012,31(1):82-89.
Jiao Xiaohui, Wang Xiaodi, Yang Wenqiang, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the Nali granite in Qinzhou area of southern Guangxi and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(1): 82-89.
- [24] 邓希光,陈志刚,李献华,等.桂东南地区大容山-十万大山花岗岩带SHRIMP锆石U-Pb定年[J].地质论评,2004,50(4):426-432.
Deng Xiguang, Chen Zhigang, Li Xihua, et al. Shrimp U-Pb zircon dating of the Darongshan-Shiwandashan Granitoid belt in southeastern Guangxi, China[J]. Geological Review, 2004, 50(4): 426-432.
- [25] 徐夕生,邓平,ReillySYO,等.华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针ICPMS U-Pb定年及其成岩意义[J].科学通报,2003,48(12):1328-1334.
Xu Xisheng, Deng Ping, Reilly S Y O, et al. Single zircon LA-ICPMS U-Pb dating of Guidong (SE China) and its petrogenetic significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(12): 1328-1334.
- [26] Peng B, Wang Y, Fan W, et al. LA-ICPMS Zircon U-Pb dating for three indosinian granitic plutons from Central Hunan and Western Guangdong Provinces and its petrogenetic implications[J]. Acta Geological Sinica, 2006, 80(5): 660-669.
- [27] 严成文,张献河,李宏卫,等.粤西罗定内翰岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].矿物学报,2014,34(4):481-486.
Yan Chengwen, Zhang Xianhe, Li Hongwei, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and the geological significance of the Neihan Granite, Luoding County, Guangdong Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2014, 34(4): 481-486.
- [28] 孙涛,周新民,陈培荣,等.南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J].中国科学:地球科学,2003,33(12):1209-1218.
Sun Tao, Zhou Xinmin, Chen Peirong, et al. Mesozoic strongly peraluminous granites from Eastern Nanling Range, southern China: Petrogenesis and implications for tectonics[J]. Science in China (Series D-Earth Sciences), 2006, 36(7): 601-617.
- [29] 杨锋,冯佐海,汪钥龙,等.粤西北太保花岗岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学研究[J].桂林理工大学学报,2016,36(1):160-169.
Yang Feng, Feng Zuohai, Wang Yuelong, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of Taibao granite in northwestern Guangdong[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(1): 160-169.
- [30] 张敏,陈培荣,张文兰,等.南岭中段大东山花岗岩体的地球化学特征和成因[J].地球化学,2003,32(6):529-539.
Zhang Min, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Dadongshan granite pluton in mid Nanling Range[J]. Geochimica, 2003, 32(6): 529-539.
- [31] 邓平,任纪舜,凌洪飞,等.诸广山南体燕山期花岗岩的锆石SHRIMP-U-Pb年龄及其构造意义[J].地质论评,2011,57(6):881-888.
Deng Ping, Ren Jishun, Ling Hongfei, et al. Yanshannian granite Batholiths of Southern Zhuguang mountain: SHRIMP Zircon U-Pb dating and tectonic implications[J]. Geological Review, 2011, 57(6): 881-888.
- [32] 刘军锋,李超,李贺,等.四会岩体:一个潜在的含铜钼矿化岩体[J].岩石学报,2015,31(3):791-801.
Liu Junfeng, Li Chao, Li He, et al. The Shihui pluton in South China Block: A potential Cu-Mo bearing pluton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(3): 791-801.
- [33] 徐先兵,张岳桥,舒良树,等.闽西南埭埔岩体和赣南莒蒲混合岩

- 锆石 La-ICPMS U-Pb 年代学:对武夷山加里东运动时代的制约[J]. 地质论评, 2009, 55(2): 277-285.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Shu Liaogshu, et al. Zircon La-ICPMS U-Pb dating of the Weipu granitic pluton in Southwest Fujian and the Changpu migmatite in South Jiangxi: constraints to the timing of Caledonian movement in Wuyi mountains[J]. Geological Review, 2009, 55(2): 277-285.
- [34] 张爱梅, 王岳军, 范蔚茗, 等. 闽西南清流地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(3): 408-418.
- Zhang Aimei, Wang Yuejun, Fan Weiming, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of Caledonian granites from the Qingliu area, southwest Fujian[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(3): 408-418.
- [35] 王丽娟, 于津海, 徐夕生, 等. 闽西南古田-小陶花岗岩杂岩体的形成时代和成因[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1470-1484.
- Wang Lijuan, Yu Jinhai, Xu Xisheng, et al. Formation age and origin of the Gutian-Xiaotao granitic complex in the southwestern Fujian province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1470-1484.
- [36] 于津海, 王丽娟, 王孝磊, 等. 赣东南富城杂岩体的地球化学和年代学研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1441-1456.
- Yu Jinhai, Wang Lijuan, Wang Xiaolei, et al. Geochemistry and geochronology of the Fuchen complex in the southeastern Jiangxi province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1441-1456.
- [37] 凌洪飞, 沈渭洲, 孙涛, 等. 广东省 22 个燕山期花岗岩的源区特征及成因: 元素及 Nd-Sr 同位素研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(11): 2687-2703.
- Ling Hongfei, Shen Weizhou, Sun Tao, et al. Genesis and source characteristics of 22 Yanshannian granites in Guangdong province: study of element and Nd-Sr isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(11): 2687-2703.
- [38] Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. Geostandards Newsletter, 1995, 19(1): 1-23.
- [39] Nicholas J G Pearce, William T Perkins, John A Westgate, et al. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials[J]. Geostandards Newsletter, 1997, 21(1): 115-144.
- [40] Gao S, Liu X M, Yuan H L Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry[J]. Geostandards Newsletter, 2002, 26(2): 181-196.
- [41] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18(4): 423-439.
- [42] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 2002, 184(1-2): 123-138.
- [43] 闫义, 林舸, 李自安. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(2): 184-190.
- Yan Yi, Lin Ge, Li Zian. Provenance tracing of sediments by means of synthetic study of shape, composition and chronology of zircon[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(2): 184-190.
- [44] 赵梦, 邵磊, 乔培军. 珠江沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄特征及其物源示踪意义[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 0915-0923.
- Zhao Meng, Shao Lei, Qiao Peijun. Characteristics of detrital zircon U-Pb geochronology of the Pearl River sands and its Implication on provenances[J]. Journal of Tongji University(Science and Technology), 2015, 43(6): 0915-0923.
- [45] 孙涛. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 332-335.
- Sun Tao. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(3): 332-335.
- [46] 李平鲁, 梁慧娴, 戴一丁. 珠江口盆地基岩油气藏远景探讨[J]. 中国海上油气, 1998, 12(6): 361-369.
- Li Pinglu, Liang Huixian, Dai Yiding. Exploration perspective of basement hydrocarbon accumulations in the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 1998, 12(6): 361-369.
- [47] Shi Hesheng, Xu Changhai, Zhou Zuyi, et al. Zircon U-Pb dating on granitoids from the northern south China sea and its geotectonic relevance[J]. Acta Geological Sinica, 2011, 85(6): 1359-1372.
- [48] 李平鲁, 梁慧娴, 戴一丁, 等. 珠江口盆地燕山期岩浆岩的成因及构造环境[J]. 广东地质, 1999, 14(1): 1-8.
- Li Pinglu, Liang Huixian, Dai Yiding, et al. Origin and tectonic setting of the yanshan igneous rocks in the Pearl River Mouth Basin[J]. Guangdong Geology, 1999, 14(1): 1-8.
- [49] 张孟然, 姜正龙. 珠江口盆地白云凹陷沉降特征分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016(1). DOI:10.16452/j.cnki.sd-kjzk.20160229.013.
- Zhang Mengran, Jiang Zhenglong. Analysis of subsidence characteristics of baiyun sag, pearl river mouth basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2016(1). DOI:10.16452/j.cnki.sd-kjzk.20160229.013.
- [50] Dickinson W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones[M]. Provenance of Arenites, 1985: 333-361.
- [51] Tobin R C, Schwarzer D. Effects of sandstone provenance on reservoir quality preservation in the deep subsurface: experimental modelling of deep-water sand in the Gulf of Mexico[J]. Geological Society London Special Publications, 2014, 386(1): 27-47.
- [52] Pittman E D, Larese R E. Compaction of lithic sands: Experimental results and applications[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75: 8(8): 1279-1299.
- [53] Paxton S T, Szabo J O, Ajdukiewicz J M, et al. Construction of an intergranular volume compaction curve for evaluating and predicting compaction and porosity loss in rigid-grain sandstone reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(12): 2047-2067.
- [54] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and Sandstone[M]. German: Springer, 1972.