

莺歌海盆地黄流组二段碎屑锆石年龄与储层物源分析

谢玉洪^{1*}, 童传新¹, 裴健翔¹, 刘平¹, 梁新权^{2*}, 王策^{2,3}, 周云^{2,3},
蒋英^{2,3}, 温淑女^{2,3}, 付建刚^{2,3}, 余世花^{2,3}, 向建华^{2,3}

(1.中海石油(中国)有限公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057; 2.中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 莺歌海盆地位于昆崙隆起和海南隆起之间的南海西北部海域, 是发育在南海北部大陆架西区的新生代含油气盆地。黄流组二段作为优质的天然气储层, 其物源特征一直是当前研究的重要课题。本文利用 LA-ICP-MS 定年技术对莺歌海盆地四个不同局部构造区的中上新统黄流组二段沉积岩中碎屑锆石进行了 U-Pb 同位素分析。结果显示, 东方构造区(DF13)和海口构造区(HK29)年龄频谱相似, 有 40~34 Ma、154~139 Ma、245~241 Ma、416~394 Ma 和 2191~1772 Ma 几个主要年龄峰或年龄区间, 与区域上的几次构造事件密切相关。结合盆地周边区域地质特征, 应用地震沉积学、重矿物和 Sr-Nd 同位素等资料, 发现这两个构造区均以红河物源为主, 但后者受盆地东侧海南隆起的物源影响较大。莲花构造区(L1X)年龄频谱相对简单, 有 247 Ma 一个主要年龄峰, 431 Ma、935 Ma 和 1851 Ma 三个次要峰, 缺少喜山期和燕山期锆石年龄, 物源可能主要来自盆地西侧的昆崙隆起; 岭头构造区(LT11)有 99 Ma 和 234 Ma 两个主要年龄峰, 157 Ma 和 939 Ma 两个次要峰, 其物源以海南隆起为主, 同时有部分红河物源的加入。通过碎屑锆石年代学分析, 对莺歌海盆地黄流组二段储层物源特征有了更清楚的认识, 为今后莺歌海盆地天然气勘探提供重要的理论依据。

关键词: 碎屑锆石; 物源分析; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 黄流组; 莺歌海盆地

中图分类号: P597 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2016)03-0517-014

0 引言

最近由于莺歌海盆地上中新统黄流组的天然气勘探取得了重大突破, 使得预测黄流组的分布和物质来源成为莺歌海盆地天然气勘探的首要关键课题(谢玉洪和范彩伟, 2010)。过去, 从地震沉积相、重砂矿物和 Sr-Nd 同位素等传统方法对莺歌海盆地物源进行过研究, 取得了很多基本认识, 认为莺歌海盆地物源主要来自三个方面: 红河、昆崙隆起和海南隆起(谢玉洪, 2009; 谢玉洪和范彩伟, 2010; 张迎朝等, 2012)。但是这种笼统的认识还不能完全

满足莺歌海盆地整体油气勘探的需要。传统的盆地沉积物碎屑组分和副(重)矿物组合反演源区类型、性质, 是盆地源区组成和构造背景分析中必不可少的一种方法(Dickinson, 1974, 1985; Marsaglia and Ingersoll, 1992), 目前碎屑锆石 U-Pb 定年已经广泛应用于沉积物源研究, 它是揭示造山作用起始时间、碎屑沉积物源区性质(包括时代和组成)、变化和地层不整合面中断时间等物源区分析和古地理重建、地球历史演化等强有力的构造指示器和不可缺少的一种新的方法(Bruguier et al., 1997; Bodet and Schärer, 2000; Cawood and Nemchin, 2001;

收稿日期: 2014-06-11; 改回日期: 2014-11-05

项目资助: 国家科技重大专项(2011ZX05023-004-11)和国家自然科学基金(41576040, 41072081, 40872080)联合资助。

通信作者简介: 谢玉洪(1961-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事海洋油气勘探、开发、生产与科研工作。Email: xieyh@cnooc.com.cn
梁新权(1964-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事构造、沉积、地球化学研究。Email: liangxq@gig.ac.cn

Andersen, 2005; Cawood et al., 2007)。锆石是 U-Pb 同位素定年的重要对象, 对盆地和大陆地壳研究具有特殊意义。使用碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的方法来进行物源分析是可靠且精确的(如 Košler et al., 2002)。本文报导了来自莺歌海盆地不同油气构造区几个关键钻孔中黄流组二段碎屑锆石年龄及其源区综合分析讨论成果。

1 地质背景

莺歌海盆地位于南海北部大陆架西区海南隆起与昆崙隆起之间的莺歌海海域, 盆地呈 NNW 向菱形分布, 面积超过 $11 \times 10^4 \text{ km}^2$ (Wang and Huang, 2008)。其北端与北部湾盆地和三江碰撞造山带相连, 南端与琼东南 NE 向盆地相接(图 1)。显然, 该盆地形成与新生代三江碰撞造山带形成演化或红河断裂带走滑活动和南海扩张作用的双重影响有关, 是一个典型走滑拉分盆地(Tapponnier et al., 1986; Leloup et al., 1995)。莺歌海盆地自新生代以来构造演化主要经历两个阶段: 同裂陷阶段和裂后阶段(图 2), 造成强烈构造沉降, 导致盆地内堆积巨厚新生代沉积物, 最厚达 16 km(龚再升等, 1997)。根据地球物理、地震沉积相、钻孔岩性与古生物等资料, 参考相邻盆地地层划分, 对莺歌海盆地新生代地层进行划分(图 2)。始新世, 盆地以断拗为主要特征, 发育正断层, 沉积中心偏北, 陵水组以下地层有明显褶皱变形, 其上不整合沉积了晚渐新世至早中新世地层, 在盆地边缘沉积块状、厚层状含砾粗砂岩和中、粗砂岩与深灰色泥岩及炭质泥岩, 是一套近源陆相的冲积扇沉积, 陵水组砂岩中含海相化石及海绿石。此后盆地沉积中心逐渐南移, 接受了新近系海相烃源岩。与此同时在盆地东部边缘形成比较广阔的碳酸岩台地, 巨厚泥质岩为主的下、中中新统三亚组-梅山组, 厚度达 7700 m。晚中新世(黄流组)构造稳定, 发生大规模海侵, 沉积厚度显著减小, 厚度稳定, 在盆地东部发育许多近 SN 向的深切谷, 说明沉积期的水系主要是 SN 向分布, 物源主要来自北方。黄流期以后, 大约在 5.5 Ma 以后, 莺歌海盆地进入了一个新的构造阶段, 可能是受南海扩张影响, 莺歌海盆地沿岸发生大规模玄武岩喷发活动。盆地沉降速率再次明显加快, 泥底辟活动达到高峰(姚伯初, 1998; 谢玉洪, 2009; 李胜利等, 2010)。快速充填和走滑活动导致盆地内发育大规模的泥流底辟和超高压, 造就了莺歌海盆地独特

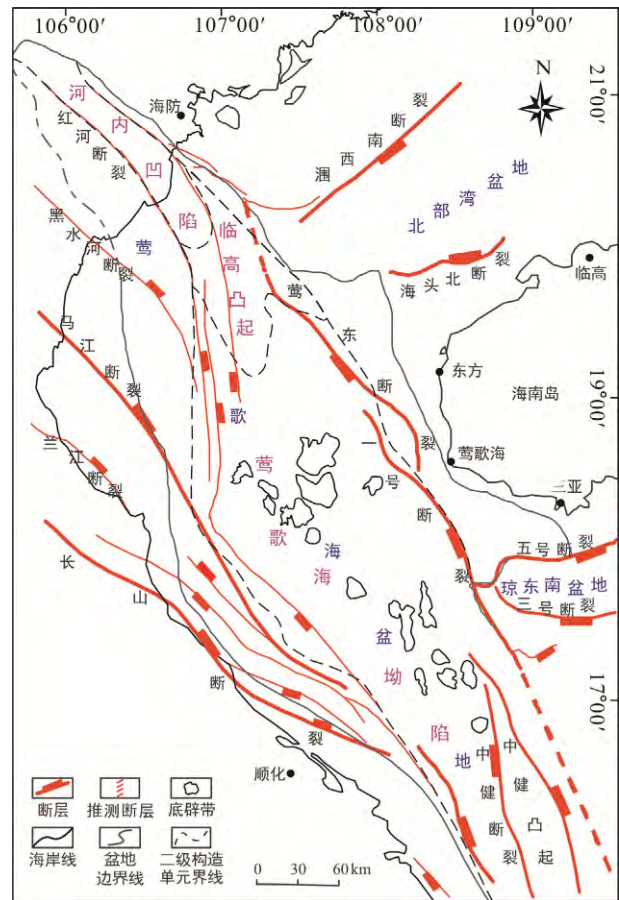


图 1 莺歌海盆地构造纲要图

Fig.1 The structural outline of the Yinggehai Basin

而复杂的底辟油气成藏系统(殷秀兰等, 2005; Wang and Huang, 2008)。

2 黄流组分布及其组成特征

上中新统黄流组介于时间界面 T40-T30 之间(图 2), T40 为区域性的不整合面, 与 10.5 Ma 的全球海平面下降事件有关, 形成区域性的大海退剥蚀面, 界面之下的侵蚀、剥蚀和界面之上的上超现象非常清晰(中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 2006; 任建业等, 2009; 谢玉洪和范彩伟, 2010)。钻井揭露岩性多为粉砂岩、细砂岩与泥岩互层, 细砂岩夹泥岩互层, 或泥岩夹粉砂岩、细砂岩; 平面上沿海南岛周缘地层厚度薄, 岩性粗, 向盆地中央厚度逐渐增大, 岩性逐渐变细, 主要为滨海-浅海-半深海环境的沉积物。盆地中心发育盆底扇, 水道充填砂, 陆架区夹薄层陆架席状砂。

黄流组纵向上分为两段, 顶界与莺歌海组无明显岩性界限, 但在地震测线上有明显反射, 约相当

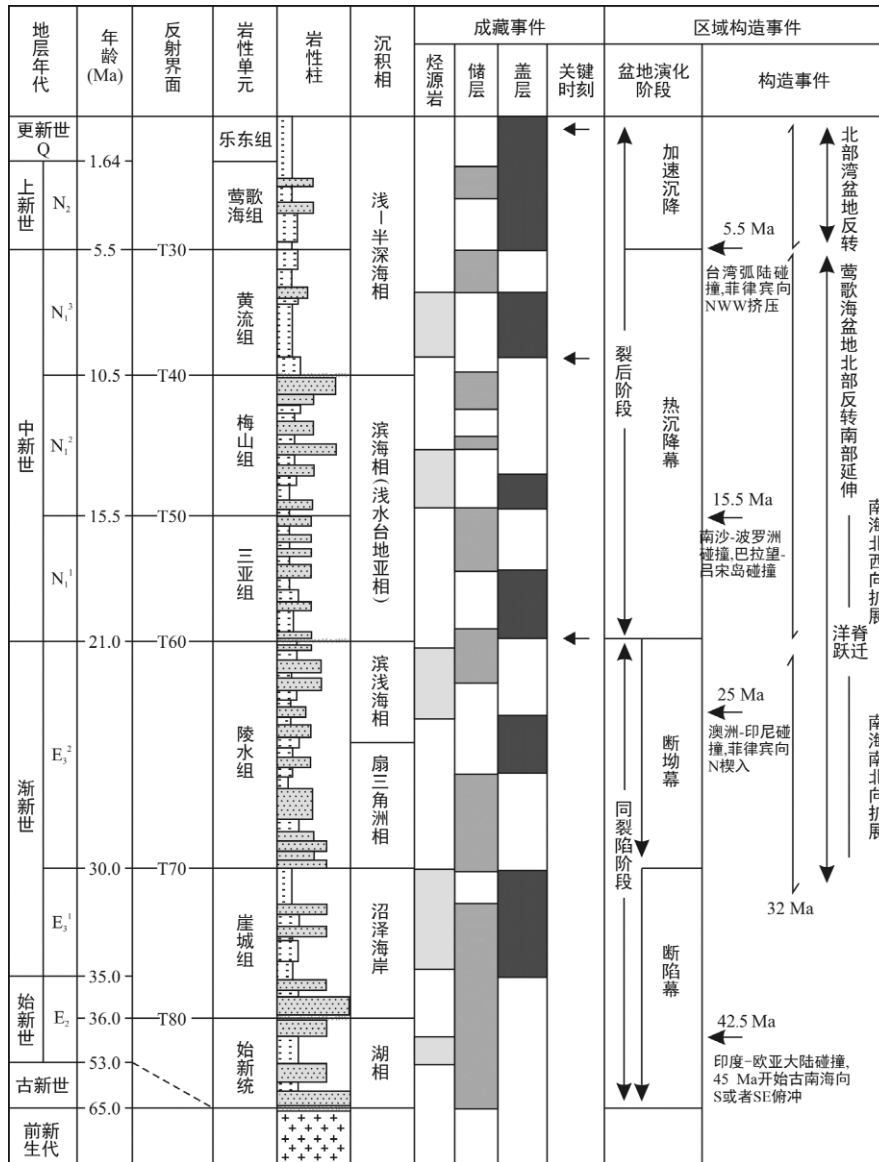


图 2 莺歌海盆地地区地层图(据 Wang and Huang, 2008 修改)
Fig.2 The regional stratigraphic sequence of the Yinggehai Basin

地震 T₃₀ 反射层。一段主要为浅海相泥岩，二段以滨海浅海以及浅海砂岩为主。黄流组二段为莺歌海盆地中深层主要储集层段。

黄流组二段(S₄₀-S₃₁)沉积范围较梅山期缩小，海盆北部边界南移，西部边界东移。盆地中心以北以滨海相为主，有局限的浅海沉积，岸线周围为条带状的海岸平原相，短源三角洲发育；以南为浅海区，盆地中心有残存的半深海；东北侧滨海相带较窄，发育以海南隆起为物源区的短源扇三角洲(图 3)。

黄流组一段(S₃₁-S₃₀)较黄流组二段发生大规模的海进，海平面上升，盆地范围扩大，中心泥拱以西为半深海沉积，以东为浅海沉积，沿盆地东海岸发育有狭长的海岸平原和三角洲相沉积，盆地以北

的海口构造和莲花构造发育有以红河物源为主体的滨海相和三角洲相沉积。

3 样品与实验方法

本次研究测试了 4 个沉积岩样品，分别采自 4 个油气构造(莲花构造、东方构造、海口构造和岭头构造)上的 4 个钻孔(L1X、DF13、HK29 和 LT11)中的黄流组二段(图 3)，样品具体的位置、深度、岩性和重量见表 1。

锆石分选由河北诚信地质服务公司张佩萱和中国科学院广州地球化学研究所李卫完成。全岩样品粉碎至 60 目的粒级，经淘洗分选、磁选和重液分离获得富集锆石的重砂。在双目显微镜下进行人工提

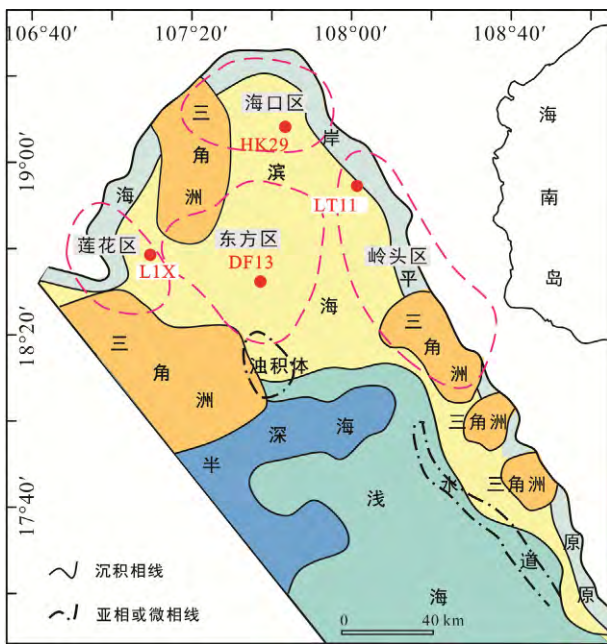


图 3 莺歌海盆地黄流组二段(S₄₀-S₃₁)沉积相与钻孔位置图
Fig.3 The sedimentary facies and sampling maps of the lower Huangliu Formation in the Yinggehai Basin

纯, 分选出无裂隙、透明干净的锆石颗粒。每个样品挑选的锆石一般>1000颗, 随机从中挑选约 300 颗

制成环氧树脂靶, 磨至锆石颗粒中心部位后抛光, 随后对样品进行反射光和透射光照相, 拍摄阴极发光(CL)照片。在此基础上利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)进行原位微区分析。

阴极发光图像(CL)在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素年龄分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上完成测试。每个样品测试 70 颗以上锆石。使用的 ICP-MS 仪器型号为 Resolution M50 和 Agilent 7500a, 激光剥蚀系统为美国 Resonetics 公司的 Resolution M50 深紫外(DUV)193 nm ArF 准分子激光剥蚀仪。分析中采用的激光斑束直径为 33 μm, 频率为 8 Hz, 以 Si 作为外标, 采用标准锆石 TEMORA 作为外标校正。同位素比值数据处理采用 ICPMSDatacal 7.2 软件平滑方法(Liu et al., 2010)进行, 年龄计算采用 ISOPLOT(3.00 版)软件进行(Ludwig, 2003), 具体分析方法和步骤见相关参考文献(Andersen, 2002; Yuan et al., 2004)。部分锆石 CL 图像见图 4, 锆石 LA-ICP-MS 测试结果见表 2(因数据较多表略, 具体数据见网络电子版), 锆石谐和图和年龄频谱图分别见图 5 和图 6。

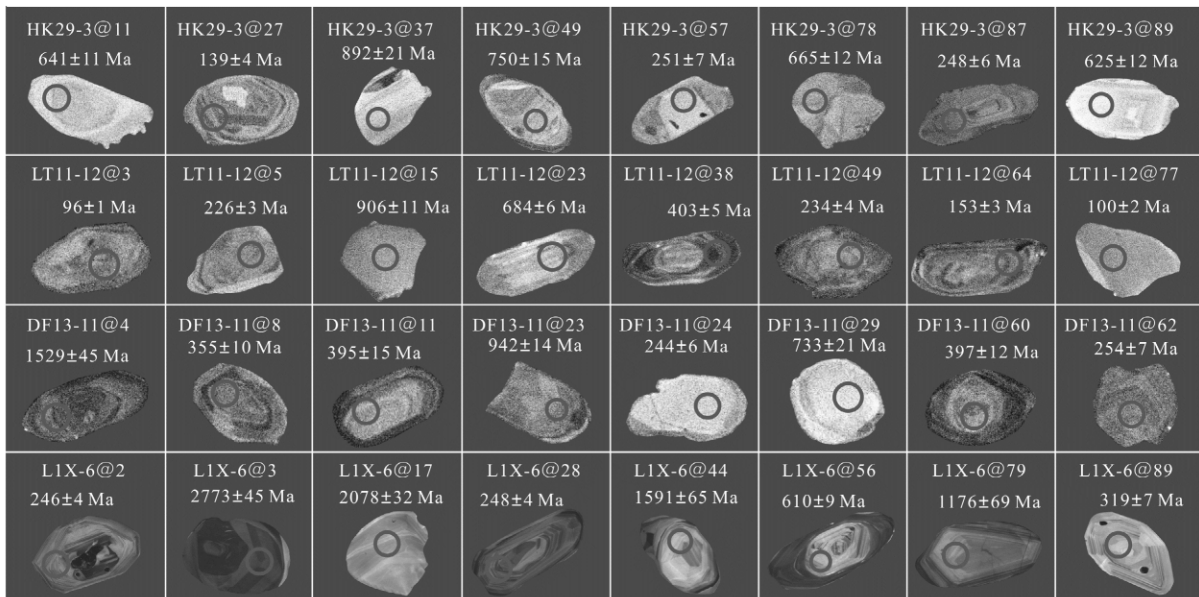


图 4 黄流组二段样品代表性锆石 CL 照片(圆圈代表 LA-ICP-MS 激光点, 直径为 33 μm)

Fig.4 CL images of the representative detrital zircon grains from the lower member of the Huangliu Formation

表 1 黄流组二段所测试样品位置、岩性、重量等特征

Table 1 Parameters of samples collected from the second member of the Huangliu Formation

样号	井号	位置	地层	取样深度(m)	岩性	物质	重量(g)	储层
HK29-3	HK29	海口	黄流组二段	2745~2750	中砂岩	岩屑	880	否
DF13-11	DF13	东方	黄流组二段	3140~3142	粉砂岩	岩屑	1100	是
L1X-6	L1X	莲花	黄流组二段	2685	中砂岩	岩芯	400	否
LT11-12	LT11	岭头	黄流组二段	2148~2150	粉砂岩	岩屑	1320	否

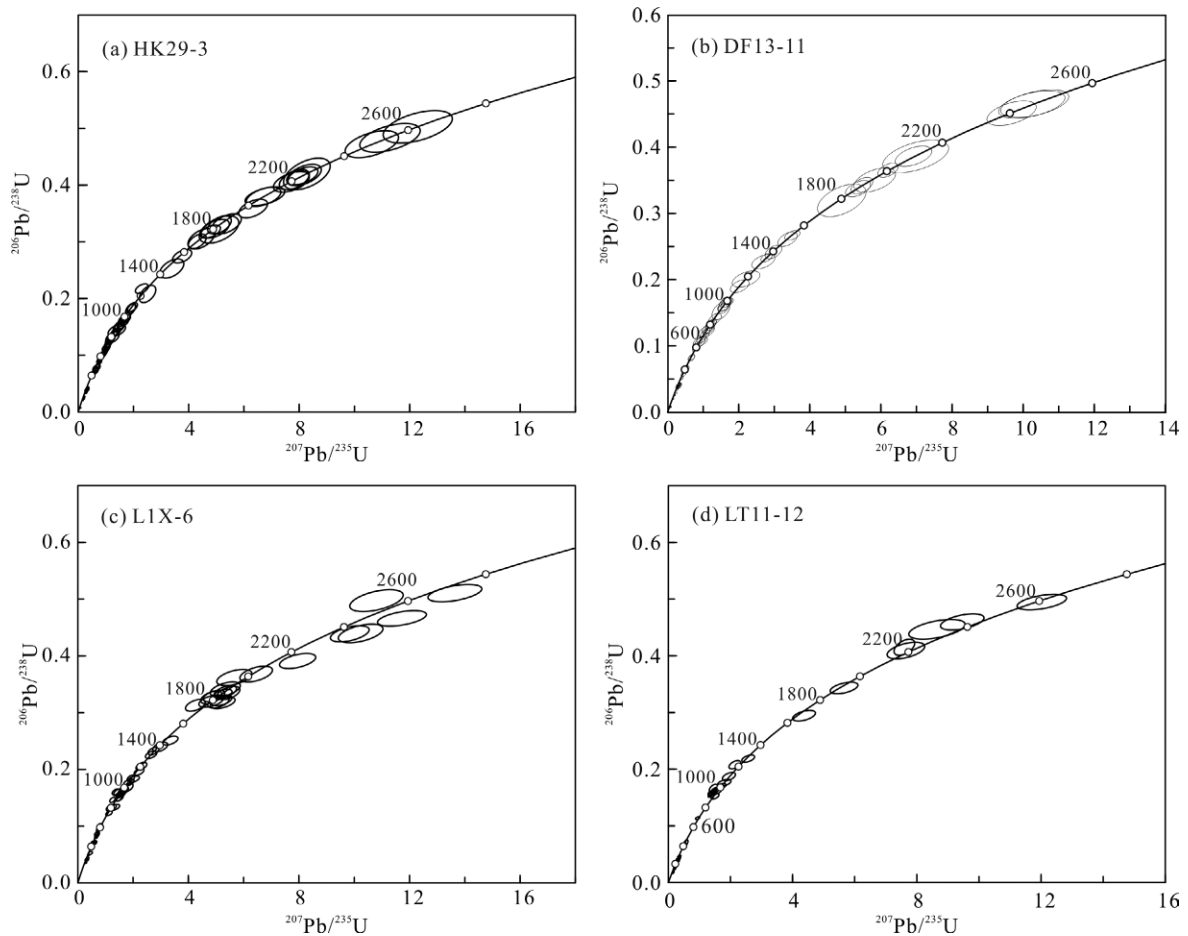


图5 黄流组二段样品 U-Pb 年龄谐和图

Fig.5 U-Pb concordia diagrams of the detrital zircon grains from the second member of the Huangliu Formation

4 测试结果

4.1 黄流组二段碎屑锆石年龄

4.1.1 样品 HK29-3(中砂岩)

对 HK29-3 样品中 90 粒锆石的年龄进行分析, 舍弃谐和度 >110% 和 <90% 的 U-Pb 年龄后, 共得到 85 个有效谐和年龄数据(图 5a)。谐和年龄变化范围为 34~3428 Ma。在谐和年龄频谱特征图上, 碎屑锆石年龄呈现多峰态分布的特征, 有 241 Ma、416 Ma、620~990 Ma 和 2191 Ma 四个主要年龄峰或年龄区间, 34 Ma、139 Ma 和 1772 Ma 三个次要峰(图 6a)。

4.1.2 样品 DF13-11(粉砂岩)

对 DF13-11 样品中 70 粒锆石进行分析, 获得了 40~2450 Ma 的年龄范围。舍弃谐和度 >110% 和 <90% 的 U-Pb 年龄后, 共得到 61 个有效数据(图 5b)。样品碎屑锆石年龄呈现多峰态分布的特征, 1 个主要年龄峰为 245 Ma, 5 次要年龄峰或区间为 40 Ma、154 Ma、394 Ma、630~980 Ma 和 1959 Ma(图 6b)。

4.1.3 样品 L1X-6(中砂岩)

对 L1X-6 样品中 90 粒锆石进行分析, 获得了 21~2773 Ma 的年龄范围。舍弃谐和度 >110% 和 <90% 的 U-Pb 年龄后, 共得到 80 个有效数据(图 5c)。样品碎屑锆石年龄呈现多峰态分布的特征, 1 个主要年龄峰为 247 Ma, 3 个次要年龄峰为 431 Ma、935 Ma 和 1851 Ma(图 6c)。

4.1.4 样品 LT11-12(粉砂岩)

对 LT11-12 样品中 90 粒锆石进行分析, 获得了 98~2606 Ma 的年龄范围。舍弃谐和度 >110% 和 <90% 的 U-Pb 年龄后, 共得到 51 个有效数据(图 5d)。样品碎屑锆石年龄在 99 Ma 和 234 Ma 呈现明显的峰值分布特征。此外, 还有 157 Ma 和 939 Ma 两个小的年龄峰值(图 6d)。

5 讨论

5.1 昆崙隆起及红河源区特征

昆崙隆起位于中南半岛东部, 莺歌海盆地西部,

海岸线长约 3260 km, 是莺歌海盆地主要物源供给区之一(谢玉洪, 2009)。

昆崙隆起从南至北地层出露较全, 从太古界到

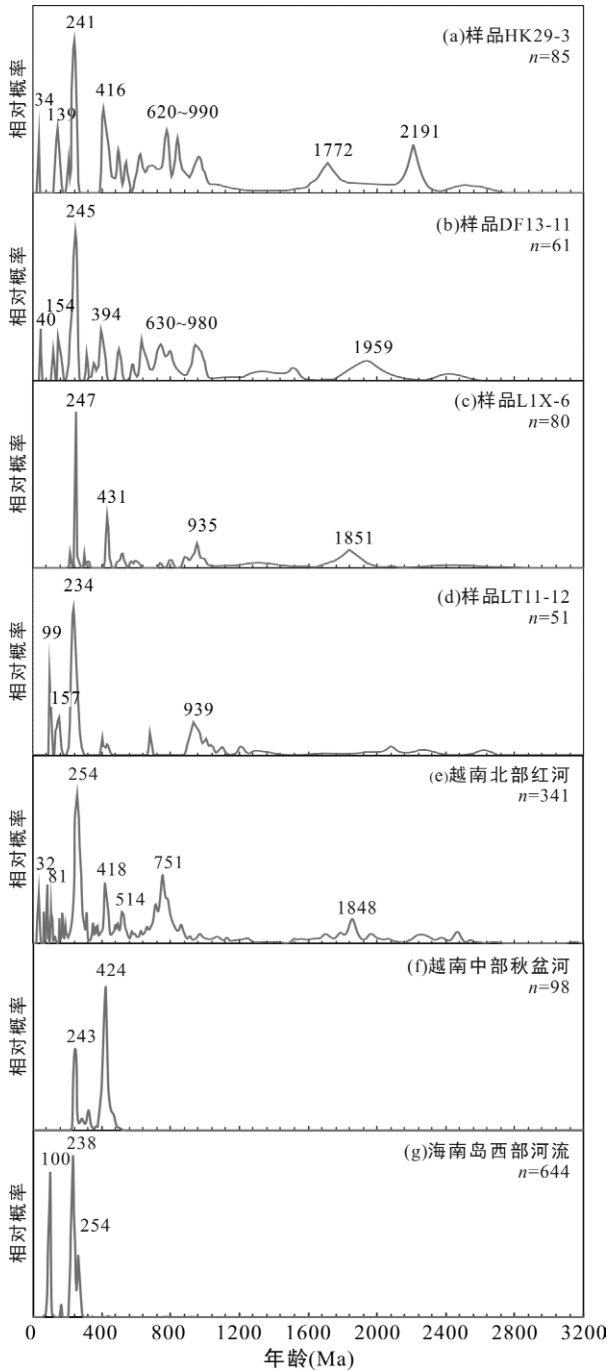


图 6 莺歌海盆地黄流组二段样品(a~d)与物源区主要水系沉积物(e~g)碎屑锆石年龄频谱(现代红河数据 Hoang et al., 2009 和 Lin et al., 2012; 越南中部秋盆河据王策等未发表数据; 海南岛西部河流据王策等, 2015)

Fig.6 Probability distribution for the detrital zircon U-Pb ages of the lower Huangliu Formation (a~d), and the main rivers surrounding the basin (e~g)

新生界均有分布。前寒武系多分布于昆崙隆起中南部、红河剪切带及其南侧的 Song Hong、Posen 和 Cavinh 杂岩体中。Lan et al. (2001)测定 Cavinh 杂岩体中锆石 U-Pb 年龄为 2.8~2.5 Ga。昆崙地体出露大面积的结晶基底岩石, 由角闪岩相和麻粒岩相变质的沉积岩和正片麻岩组成(Tien et al., 1989)。下古生界主要分布在昆崙及其北侧, 中部顺化至计班一带出露面积较大, 北部主要集中于老街和马江, 岩性主要为砂岩、砾岩、粉砂岩和灰岩等。上古生界多局限于昆崙隆起北部, 主要分布在高平、河江以南、黑河和红河之间义路地区以及中部河静以南, 岩性主要为灰岩、砂岩、粉砂岩和页岩等。中生界在红河断裂带两侧和大叻市以西有面积出露, 岩性由三叠系海相和火山沉积岩以及白垩系红色陆生沉积岩组成。新生界分布范围广泛, 从北到南均有分布, 红河三角洲和湄公河三角洲分布面积较广, 其次多为沿岸地区, 岩性主要为砾岩、砂岩、碎屑岩和黏土等。

昆崙隆起内岩浆岩活动频繁, 分布范围较广, 基本可以划分为 6 个期次(吴良士, 2009)。前寒武纪岩浆岩主要为片麻状花岗岩、混合花岗岩、紫苏花岗岩和紫苏花岗闪长岩等, 其形成年代为 1717~1368 Ma, Pham Trung et al. (2009)和 Wang et al. (2011)报道红河剪切带附件的 Posen 花岗岩中锆石 TIMS 和 SHRIMP U-Pb 年龄为 760~723 Ma, 为新元古代岩浆活动的产物。早-中生代岩体零星的分布于中部和北部, 呈中小规模的岩株产出, 在老街至河江一带出露较多, 主要为二云母花岗岩、闪长岩和斜长花岗岩等。Roger et al. (2000)测定 Song Chay 穹隆体中花岗岩的 U-Pb 年龄为 428 ± 5 Ma。Nagy et al. (2001)获得昆崙隆起西部角闪岩相火成岩成岩时代为 451 ± 3 Ma。晚古生代有两期岩浆活动, 岩体在顺化、广义、大叻、计班和黄连山等地区有较大面积出露, 主要为花岗闪长岩、斑状花岗岩、黑云母花岗岩和二长花岗岩等; 早中生代有一次重要的岩浆活动, 在中部广义、嘉莱、昆崙和归仁等地较为发育。此次岩浆活动以花岗岩类为主, 呈现出不同规模的岩基、岩株及岩脉侵入于古生界中, 或被晚三叠世含煤地层所覆盖。主要岩性包括黑云母花岗岩、二云母花岗岩、石英二长岩及少量花岗闪长岩。如 Roger et al. (2012)测定昆崙隆起北部 Phia Bioc 花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 248~245 Ma。Nagy et al. (2001)获得 Kannack 杂岩体和昆崙隆起南部两个花岗岩体的年龄分别为 249 ± 2 Ma 和 253 ± 2 Ma; 晚中生代基

本可分为晚侏罗世—早白垩世和晚白垩世—古新世 2 个期次。晚侏罗世—早白垩世花岗岩主要产于大型火山拗陷中, 规模较小, 分布局限。晚白垩世—古新世分布范围较广, 主要集中于昆嵩隆起东南部富安、多乐、林同、宁顺、平顺等省, 北部仅零星分布, 并以二云母花岗岩、浅色花岗岩侵入为主, 呈中、小型岩基、岩株产出。王东升等(2011)在高平地区获得过铝质 S 型花岗岩 SIMS 锆石 U-Pb 测年结果为 93.9 ± 3.0 Ma。Roger et al. (2012) 获得 Phia Oac 花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 87.3 ± 1.2 Ma; 新生代岩体主要分布于中南部多乐、平福、林同等地区, 以超镁铁质—镁铁质岩喷发为主, 其中可分 2 个期次: 上新世—早更新世和晚更新世—全新世。前者以拉斑玄武岩系列为主, 呈层状产出, 分布广泛, 后者以橄榄辉长苏长岩、橄榄辉长粒玄岩等为主。大量的数据显示红河剪切带周边花岗岩形成年龄集中在 60~20 Ma(如 Leloup et al., 1995; Zhang and Scharer, 1999; Liu et al., 2013)。MyDung et al. (2010) 获得西北部 Pu Sam Cap 杂岩中碱性正长岩和花岗岩的年龄分别为 32.7 Ma 和 35.1 Ma。PhamTrung et al. (2012) 在西北部 PhanSiPan 地区测定该地新生代埃达克质侵入岩的形成时代为 38 Ma。

5.2 海南隆起源区特征

海南隆起位于莺歌海盆地东部, 是莺歌海盆地重要的潜在碎屑物质来源之一。隆起内除泥盆系和侏罗系外, 从中元古界至第四系均有出露(汪啸风等, 1991a)。中、新元古界抱板群和石碌群主要出露于海南西部的抱板、大蟹岭、冲卒岭和石碌等地(张仁杰等, 1991; 张业明和张仁杰, 1997), 是本区出露最古老的地层, 由高绿片岩相—角闪岩相变质岩组成。下古生界出露齐全, 包括寒武系及奥陶系的浅变质页岩、砂岩、粉砂岩、板岩和下志留统砂岩, 其中寒武系仅发育于三亚和万宁地区(姚华舟等, 1999)。上古生界包括有泥盆系灰岩、砂岩、粉砂岩及泥岩, 石炭系板岩、变火山岩和二叠系灰岩、砂岩等, 主要分布在九所—陵水断裂以北(汪啸风等, 1991b; 陈培哲等, 1997)。中生界主要有分布于岛东的下三叠统粗碎屑岩、泥页岩及广泛分布的白垩系红色粗碎屑岩夹泥页岩、火山岩等。

海南岩浆活动强烈, 岩浆岩分布广泛, 具有多期次活动特征。侵入岩占全岛面积的 51%, 喷出岩占海南面积的 13%。中元古代花岗质岩在海南西北部昌江石碌—东方公爱出露。丁式江(1995)在海南西部抱板群花岗闪长岩中获得锆石 Pb-Pb 年龄为

1397 ± 46 Ma。随后, Li et al. (2002) 测得戈枕村抱板群花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1436 ± 7 Ma 和 1431 ± 5 Ma; Li et al. (2008) 测得琼西抱板群变质火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1433 ± 6 Ma, 为中元古代非造山作用产物; 许德如等(2006) 获得戈枕地区侵位于古中元古代抱板群花岗质岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1455 ± 12 Ma 和 1454 ± 12 Ma。加里东期岩浆岩包括昌江和琼中 S 型花岗岩和出露于屯昌和东方的变质基性火山岩以及志留系中的酸性火山岩(付建明和赵子杰, 1997; Xu et al., 2007)。汪啸风等(1991b) 得到抱板混合岩体南端二甲地区条纹状混合岩、条纹—眼球状混合岩的锆石 U-Pb 年龄为 424 Ma。付建明和赵子杰(1997) 在保梅岭岩体锆石中测得锆石核心部分 Pb-Pb 蒸发年龄最大一组数据为 410 Ma, 平均为 369 Ma。丁式江等(2006) 在海南抱板群内(昌江和琼海) 发现有顺层侵位的深熔花岗岩, 其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 368~363 Ma。海西—印支期岩浆作用非常活跃, 280~230 Ma 年龄的岩体在海南普遍存在(Li et al., 2006; Li and Li, 2007), 代表性的岩体有尖峰岭岩体(249 Ma)、长塘岭岩体(264 Ma)、大炮岭岩体(256 Ma)、大田岩体(263 Ma)、抱郎岩体(272 Ma)、志仲岩体(272 Ma)、田仔岩体(245 Ma)、石碌岩体(262 Ma) 和番阳峒(234 Ma) 等(谢才富等, 2005, 2006; 温淑女, 2013; 温淑女等, 2013)。燕山期岩浆活动也非常活跃, 早燕山期侵入岩较少, 主要发育晚燕山期岩浆岩。儋县花岗岩体为其中较大的岩体, 其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 186 Ma(葛小月, 2003), 形成时代属印支晚期—燕山早期。在燕山中、晚期仍有不少的岩浆侵入体分布: 如以马翁岭、长安、金竹园岩体为代表的辉长岩、辉长闪长岩及橄榄辉石岩侵入体, 其形成时代为 151.9 Ma; 以长塘岭—马岭和三狮山—俄地岩体为代表的中粗粒黑云母二长花岗岩—钾长花岗岩岩体, 其年龄为 131.7 Ma; 以红毛岭、三合岭和头隆岭岩体为代表的花岗闪长岩、二长花岗岩和中粒黑云二长花岗岩岩体, 其年龄为 111.5 Ma; 以千家、宝城、税町和屯昌等岩体为代表的二长花岗岩, 其年龄为 96~94 Ma(贾小辉等, 2010)。近年来, 一些学者对在昌江石碌铁矿和屯昌—枫木一带出露的由花岗闪长岩、花岗岩及少量辉绿—闪长玢岩(脉) 组成的侵入体做了同位素年龄测试, 其锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄约为 93 Ma 和 107 Ma, 属早白垩世晚期(贾小辉等, 2010; 王智琳等, 2011; Wang et al., 2012), 地球化学特征显示其为埃达克质岩石; 吊罗山和昌化大岭花

岗岩体的年龄为 90~88 Ma (汪啸风等, 1991b)。在白沙、乐东和三亚等地分布有大面积晚白垩世火山岩, 岩性为流纹岩和玄武安山岩, 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为~102 Ma(周云等, 2015)。此外, 海南南部局部地区有晚白垩世基性岩墙群出露, 形成于~81 Ma (葛小月等, 2003)。

海南新生代喷出岩以玄武岩类岩石为主, 广泛分布于北部地区, 面积约为 4000 km², 占全岛面积的 13%。汪啸风等(1991b)根据火山岩与新生代地层的层序和同位素测年资料, 认为本区新生代火山活动化为 10 期。蓬莱地区与宝石有关的火山岩同位素年龄为 5.43~3.04 Ma。Ho et al. (2000)认为从上新世以来, 北部新生代火山岩可分为两个阶段(第一阶段为新近纪, >3.5 Ma; 第二阶段为第四纪, <2 Ma), 分布于六个不同的火山岩区域。

变质岩可划分出四堡期、加里东期和海西-印支期。除抱板群、屯昌变基性火山岩和儋州洛南地区达角闪岩相外, 其余各期变质岩均为绿片岩相。

5.3 黄流组二段物源分析

海口构造区HK29与东方构造区DF13井黄二段样品碎屑锆石年龄频谱图有一定相似性, 同时也存在不小差异(图6a与b), 表明这两个地区物源有所区别。喜山期年龄峰34 Ma和40 Ma在红河剪切带附近有一定面积的出露, 其形成时代集中于60~20 Ma (如 Leloup et al., 1995; Zhang and Scharer, 1999), 红河现代沉积物年龄峰值为32 Ma(图6e), 该年龄是越南北部红河物源重要的识别标志之一, 可能与红河剪切带的左旋走滑作用和新生代岩浆作用有关, 表明海口构造区和东方构造区有一大部分物源是通过红河水系来自红河剪切带。燕山期年龄(峰值139 Ma和154 Ma)在红河流域和莺歌海盆地东部的海南隆起均有一定规模的岩体产出。海西印支期年龄(280~220 Ma)在莺歌海盆地周边地区均有大面积出露, 包括海南隆起和昆崙隆起。由于其形成时代相近, 利用碎屑锆石U-Pb年龄难以进行有效识别, 结合地震沉积学资料, 海南物源应主要分布在海口构造区(HK29), 而昆崙物源主要分布于东方构造区(DF13)。加里东期年龄在海南分布较少, 现在河流沉积物碎屑锆石U-Pb年龄显示仅在昌化江有少量分布, 其形成年代为440~400 Ma(王策等, 2015)。年龄频谱中出现大量的加里东期年龄(峰值394 Ma和416 Ma), 应主要来自红河流域的Song Chay花岗片麻岩穹隆(Roger et al., 2000)。昆崙隆起中部加里东期岩体的年龄集中在450 Ma (Nagy et al., 2001), 现代河流中该年龄峰为

424 Ma(王策等未发表数据)(图6f), 可能为东方构造区提供了少量碎屑物质。新元古代年龄(1000~600 Ma)是扬子板块的重要年龄组成, 在红河剪切带以北地区有一定岩体的出露(如PhamTrung等, 2009), 该年龄可能主要与Rodinia超大陆的活动和裂解有关, 是红河流域物源的年龄标志之一。中-古元古代(年龄峰1772 Ma、1959 Ma和2191 Ma)年龄则为扬子板块的基底年龄(Chen and Jahn, 1998)。从整体来看, 海口构造区HK29井和东方构造区DF13井黄流组二段以越南北部红河物源为主, 前者在一定程度上受到盆地东侧海南隆起物源的影响。

莲花构造区L1X井样品碎屑锆石年龄频谱显示多峰的特征, 包括印支期(247 Ma)、加里东期(431 Ma)、晋宁期和吕梁期(935 Ma 和 1851 Ma)年龄。早二叠世-三叠纪花岗岩在长山造山带及其南侧地区中有广泛分布, 形成年龄为 276~202 Ma(Carter et al., 2001; Nagy et al., 2001; Liu et al., 2012)。加里东期岩体集中于~450 Ma (Nagy et al., 2001; Roger et al., 2007)。相比 HK29 和 DF13 井, L1X 井明显缺少喜山期和燕山期年龄, 前者缺失可能与该区来自红河的物源较少有关, 后者则直接表明无海南隆起物源的加入。印支期和加里东期锆石年龄与长山造山带对应的年龄基本一致。晋宁期和吕梁期年龄在昆崙隆起分布较少, 可能主要来自隆起北部地区。L1X 井黄流组二段应以昆崙隆起地区物源为主, 有极少一部分来自红河流域。

岭头构造区 LT11 井锆石年龄频谱与其他三个地区的年龄有明显区别, 有 99 Ma 和 234 Ma 两个主要年龄峰, 157 Ma 和 939 Ma 两个次要年龄峰。燕山期年龄峰 99 Ma 和 157 Ma 是海南物源的重要标志。对海南西部现代河流沉积物进行碎屑锆石定年, 结果显示该区燕山期年龄主要集中在~100 Ma 和~160 Ma (王策等, 2015)(图 6g)。Yan et al. (2011)分析了莺歌海盆地东侧地层的碎屑锆石 U-Pb 年龄, 显示有 90~110 Ma 的主要年龄峰值, 这些年龄与 LT11 井样品燕山期年龄一致, 是海南物源年龄的重要组合标志, 表明海南岛是其物源区。新元古代年龄峰 939 Ma 和更古老的年龄可能主要来自红河物源区。

通过以上分析, 绘制了黄流组二段物源分布图(图 7), 从图中可以看出, 红河方向的物源影响范围较宽, 向东到莺东斜坡带地区, 向南东方向已经影响到 DF13 构造, 而且从趋势上看, 也可能延伸的更远。整体来看, 红河物源对莺歌海盆地碎屑沉积贡献最大, 但在盆地不同位置, 影响程度也有所不同,

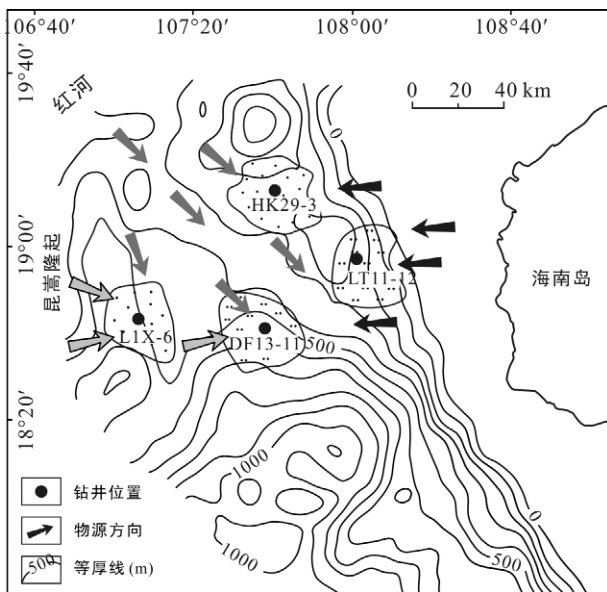


图7 莺歌海盆地黄流组二段物源分布图

Fig.7 Possible provenance distribution of the second member of the Huangliu Formation in the Yinggehai Basin

海南隆起和昆嵩隆起对盆地局部地区影响强烈, 提供了丰足的物源。

对莺歌海盆地四个构造区沉积岩样品碎屑锆石年代学研究表明, 物源区可以通过碎屑锆石年代学进行物源示踪, 结合地震沉积学、重矿物和 Sr-Nd 同位素等研究方法能更准确的识别物源区。海口构造区和东方构造区碎屑锆石年龄频谱相似, 都明显受到红河物源的影响, 但还存在一定的差异, 结合地震沉积学研究, 前者受海南物源的影响强烈, 后者以越南北部红河物源为主, 可能有少量碎屑物质来自海南地区。莲花区和岭头区物源存在很大差异, 前者以昆嵩隆起物源为主, 后者则主要来自海南物源。值得注意的是, 这四个构造区均有来自越南北部红河的物源, 整体上占有一定比例, 表明红河作为莺歌海盆地最主要的物源对其多个构造区提供碎屑供应。此外, 昆嵩隆起对莲花构造区进行局部的物源供应, 海南隆起除了局部物源供给外, 向西有一定的延伸。

5.4 物源与天然气储层的关系

储层是天然气成藏的一个重要因素, 物源供给体系是控制层序发育和沉积演化的重要因素, 亦是影响储层物性的主要因素之一。母岩类型影响岩石颗粒、胶结物的成分及含量, 距离物源区的远近影响砂岩的成分成熟度, 从而影响储层的物性特征, 对物源的研究有助于评价沉积砂体的储集物性, 为油气的圈闭评价提供一定的理论依据(谢玉洪, 2009)。

东方构造区黄流组二段是目前莺歌海盆地发现的最大的优质天然气储层。碎屑锆石 U-Pb 年龄研究表明, 东方构造区相对于海口、岭头和莲花构造区, 是一个混合源区, 以红河剪切带和昆嵩隆起区物源为主。其中红河物源体系对黄流组储层的贡献较大, 影响范围最宽。在东方区不同的黄流组三级层序中, 这些物源区所提供的沉积物的量有所不同, 并且即使在同一个三级层序内的不同体系域都有所变化。总体来看, 东方区物源体系通过河道或中央峡谷以来自红河的远距离物源为主, 在莺歌海盆地莺东和莺西斜坡带分别形成一些以海南和越南中部昆嵩高地短源三角洲和扇三角洲沉积体。由于莺东斜坡带和莺西斜坡带都存在重力流发生的走滑伸展构造, 容易在斜坡带前沿产生浊积体, 三大水系尤其红河水系相对集中注入为粗碎屑搬运到盆地中心提供了物质基础和动力条件。在莺歌海盆地东方油气构造区可以看到物源供给体系频繁交替, 在地震剖面上常可见到三个方向物源相互叠置在一起的情况。周缘沉积物向沉积中心汇聚, 因而在东方构造区形成多个三角洲沉积体系的叠加, 河道砂、河口坝砂等经海水冲刷或相互叠合形成极细砂岩-细砂岩连片广泛分布。因此, 在东方构造区, 有可能找到连片的厚层细砂岩储层, 这也是寻找大面积岩性及岩性-构造复合圈闭气藏的物质基础。这种多物源所形成的沉积构造(如斜层理、微细斜层理等)亦能明显提高沉积储层的物性, 从而有利于天然气的聚集。因此, 东方区存在大型储集体沉积的构造古地理环境(Morley, 2002; Clark et al., 2004; 谢玉洪和范彩伟, 2010; 谢玉洪等, 2012)。

一些研究表明, 东方区黄流组一段与二段, 物源体系存在一定的区别, 黄流组一段沉积厚度大、泥岩分布面积广, 是良好的区域盖层。黄流组不同粒级砂岩物性统计表明, 粒级越粗, 物性越好, 孔渗相关性也越高(张伙兰等, 2013)。黄流组在莺歌海盆地中属于中深层次储层。由于中深层次的埋深相对较大, 且处于高温高压环境, 储层物性的高低是影响成藏与否的关键因素。一般情况下, 储层的孔渗性能随埋深加大而变差, 但在高温高压层段, 储层的孔隙受到一定的保护, 且不同粒级其孔隙增加量不一样。高温热流体活动和强超压的存在是黄流组保留较好储集层物性的主要成岩因素: 高温热流体活动促进了有机质生烃和黏土矿物的转化; 强超压拓宽了生油窗范围, 增加溶蚀作用的时间和强度, 使次生孔隙带发育在更深的地层中。同时, 强超压

还有利于孔隙的保存(谢玉洪和范彩伟, 2010; 谢玉洪等, 2012; 张伙兰等, 2013)。东方区黄流组极细-细砂岩在目前埋深(2600~3500 m)条件下, 可以形成天然气优质储集层(张伙兰等, 2013)。莺歌海盆地中深层仍是今后莺歌海盆地天然气勘探的重要新领域, 有必要加大勘探力度, 进一步深化研究。

6 结 论

对莺歌海盆地四个构造区沉积岩中的碎屑锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 得到以下几点结论:

(1) 海南隆起与昆崙隆起物源区存在明显的差异。昆崙隆起北侧红河物源年龄中多有加里东期、晋宁期和吕梁期年龄, 还有与红河剪切带相关的喜山期年龄。昆崙隆起则缺少喜山期和燕山期年龄。相比之下, 海南隆起区燕山期的两个年龄峰 99 Ma 和 156 Ma, 可以将莺歌海盆地两侧物源加以区分;

(2) 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年可以确定构造区物源的变化。结合地球物理、重矿物和 Sr-Nd 同位素等资料, 东方和海口构造区碎屑锆石年龄频谱复杂, 碎屑沉积物主要来自越南北部红河物源; 莲花区和岭头区年龄结构相对简单, 前者以昆崙隆起物源为主, 后者主要来自就近的海南隆起西部地区, 但这两个构造区可能都有一部分物源来自红河物源区;

(3) 莺歌海盆地黄流组二段是重要的混合物源区, 相对而言, 红河物源对莺歌海盆地碎屑物质供应最宽, 局部则受昆崙隆起和海南隆起物源影响强烈。在盆地中央存在黄流组大型储集体的构造条件, 莺歌海盆地黄流组二段仍是今后莺歌海盆地天然气勘探的重要领域。

致谢: 本文样品采集受到中海石油有限公司湛江分公司各工作人员的协助, 锆石 U-Pb 年龄分析得到中国科学院广州地球化学研究所涂湘林高级工程师和李聪颖博士的帮助和指导, 论文的修改和质量提升得益于两位评审专家的建设性意见, 在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

MyDung T, 刘俊来, QuangLuat N, 陈越, 纪沫, 唐渊. 2010. 越南西北部 Pu Sam Cap 高钾碱性岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成及其区域构造意义. 岩石学报, 26(6): 1902-1914.

PhamTrung H P, 陈福坤, 祝禧艳, 王伟, Thuy T B, Tam B

M, Luat N Q. 2009. 越南西北部 Posen 花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成特征. 岩石学报, 25(12): 3141-3152.

PhamTrung H P, 王涛, 童英. 2012. 越南西北部 Phan Si Pan 地区新生代埃达克质侵入岩时代、成因及构造意义——U-Pb 锆石年龄、元素地球化学和 Hf 同位素证据. 岩石学报, 28(9): 3031-3041.

陈培哲, 钟盛中, 何圣华, 陈贻川. 1997. 全国地层多重划分对比研究(46): 海南省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社.

丁式江. 1995. 琼西戈枕侵入体的地质特征及其发现意义. 大地构造与成矿学, 19(4): 336-343.

丁式江, 胡健民, 宋彪, 陈沐龙, 谢盛周, 范渊. 2006. 海南岛抱板群内顺层侵位深熔花岗岩锆石 U-Pb 定年及其构造意义. 中国科学(D辑), 35(10): 937-948.

付建明, 赵子杰. 1997. 海南岛加里东期花岗岩的特征及构造环境分析. 矿物岩石, 17(1): 29-34.

葛小月. 2003. 海南岛中生代岩浆作用及其构造意义. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文.

龚再升, 李思田等. 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社.

贾小辉, 王强, 唐功建, 姜子琦, 赵振华, 杨岳衡, 王晓地, 赵武强. 2010. 海南屯昌早白垩世晚期埃达克质侵入岩的锆石 U-Pb 年代学, 地球化学与岩石成因. 地球化学, 39(6): 497-519.

李胜利, 于兴河, 谢玉洪, 陈志宏, 刘力辉. 2010. 滨浅海泥流沟谷识别标志、类型及沉积模式——以莺歌海盆地东方 1-1 气田为例. 沉积学报, 28(6): 1076-1080.

任建业, 曾佐勋, 雷超, 佟殿君. 2009. 莺琼盆地构造演化及其成盆动力学机制分析. 中海油(石油)有限公司湛江分公司和中国地质大学(武汉)(内部报告).

汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 1991a. 海南岛地质(一)——地层古生物. 北京: 地质出版社.

汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 1991b. 海南岛地质(二)——岩浆岩. 北京: 地质出版社.

王策, 梁新权, 周云, 付建刚, 蒋英, 董超阁, 谢玉洪, 童传新, 裴健翔, 刘平. 2015. 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. 地学前缘, 22(4): 277-289.

王东升, 刘俊来, 郭强, 吴文彬, 张招崇, 赵志丹. 2011. 越南东北部静足(Tinh Tuc)钨锡矿区花岗岩年代学, 地球化学与区域构造意义. 岩石学报, 27(9): 2795-2808.

王智琳, 许德如, 张玉泉, 陈福雄, 王力. 2011. 海南石碌铁矿床花岗闪长斑岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义. 大地构造与成矿学, 35(2): 292-299.

- 温淑女. 2013. 海南岛二叠纪-三叠纪岩浆作用的年代学与地球化学研究. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文: 1-142.
- 温淑女, 梁新权, 范蔚茗, 王岳军, 池国祥, 梁细荣, 周云, 蒋英. 2013. 海南岛乐东地区志仲岩体锆石U-Pb年代学、Hf同位素研究及其构造意义. 大地构造与成矿学, 37(2): 294-307.
- 吴良士. 2009. 越南社会主义共和国地质构造与区域成矿. 矿床地质, 28(5): 725-726.
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 张业明, 陈沐龙, 付杨荣, 付太安, 李志宏. 2006. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系. 岩石学报, 22(10): 2493-2508.
- 谢才富, 朱金初, 赵子杰, 丁式江, 付太安, 李志宏, 张业明, 徐德明. 2005. 三亚石榴霓辉石正长岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄: 对海南岛海西-印支期构造演化的制约. 高校地质学报, 11(1): 47-57.
- 谢玉洪. 2009. 构造活动型盆地层序分析及天然气成藏模式——以莺歌海盆地为例. 北京: 地质出版社.
- 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, 朱建成, 童传新, 钟泽红, 周家雄, 何胜林. 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.
- 许德如, 夏斌, 李鹏春, 张玉泉, 陈广浩, 马驰. 2006. 海南岛北西部前寒武纪花岗岩质岩SHRIMP 锆石U-Pb年龄及地质意义. 大地构造与成矿学, 30(4): 510-518.
- 姚伯初. 1998. 南海新生代的构造演化与沉积盆地. 南海地质研究, 10: 1-17.
- 姚华舟, 黄照先, 谢才富, 张开明. 1999. 海南岛万宁地区寒武纪地层及其沉积特征. 地层学杂志, 23(4): 270-276.
- 殷秀兰, 马寅生, 冯向阳, 李思田. 2005. 莺歌海盆地东方1-1底辟区深部热流体穿层的热应力及其效应. 地球科学, 30(1): 83-88.
- 张仁杰, 马国干, 蒋大海. 1991. 海南岛前寒武纪地质. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张业明, 张仁杰. 1997. 海南岛前寒武纪地壳构造演化. 地球科学, 22(4): 395-400.
- 张迎朝, 李朝阳, 陈英甫, 孙爱霞, 郭爱华. 2012. 莺歌海盆地莺歌海-黄流组储层特征研究(内部报告). 中海石油研究中心南海西部研究院.
- 张伙兰, 裴健翔, 张迎朝, 姜春艳, 朱建成, 艾能平, 胡潜伟, 于俊峰. 2013. 莺歌海盆地东方区中深层黄流组超压储集层特征. 石油勘探与开发, 40(3): 284-293.
- 中海石油(中国)有限公司湛江分公司. 2006. 莺歌海盆地层序地层和沉积特征. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司(内部报告).
- 周云, 梁新权, 梁细荣, 蒋英, 付建刚, 王策, 董超阁, 邹水长. 2015. 海南白垩系六罗村组火山岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义. 大地构造与成矿学, 39(5): 903-918.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- Andersen. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chemical Geology*, 216: 249-270.
- Bodet F and Schärer U. 2000. Evolution of the SE-Asian continent from U-Pb and Hf isotopes in single grains of zircon and baddeleyite from large rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 2067-2091.
- Bruguier O, Lancelot J R and Malavieille J. 1997. U-Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan-Ganze flysch Central China: Provenance and tectonic correlations. *Earth and Planetary Science Letters*, 152: 217-231.
- Carter A, Roques D, Bristow C and Kinny P. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29 (3): 211-214.
- Cawood P A and Nemchin A A. 2001. Paleogeographic development of the east Laurentian margin: Constraints from U-Pb dating of detrital zircons in the Newfoundland Appalachians. *Geological Society of America Bulletin*, 113(9): 1234-1246.
- Cawood P A, Nemchin A A, Strachan R, Prave T and Krabbendam M. 2007. Sedimentary basin and detrital zircon record along East Laurentia and Baltica during assembly and breakup of Rodinia. *Journal of the Geological Society*, 164: 257-275.
- Chen J and Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284(1): 101-133.
- Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W, Wang E and Chen L. 2004. Surface uplift, tectonics and erosion of Eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 23: 1-20.
- Dickinson W R. 1985. Interpreting provenance relations

- from detrital modes of sandstones. Provenance of arenites. Springer Netherlands: 333–361.
- Dickinson W R. 1974. Plate tectonics and sedimentation. Tulsa: Special Publication SEPM, 22: 1–27.
- Gao S, Liu X, Yuan H, Hattendorf B, Günther D, Chen L and Hu S. 2002. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalysis Research*, 26: 181–195.
- Ho K S, Chen J C and Juang W S. 2000. Geochronology and geochemistry of late Cenozoic basalts from the Leiqiong area, southern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 307–324.
- Hoang L V, Wu F, Clift P D, Wysocka A and Swierczewska A. 2009. Evaluating the evolution of the Red River system based on in situ U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10: Q11008.
- Košler J, Fonneland H, Sylvester P, Tubrett M and Pedersen R B. 2002. U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies—A comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques. *Chemical Geology*, 182(2): 605–618.
- Lan C Y, Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Wang P L, Li H and Van Toan D. 2001. First evidence for Archean continental crust in northern Vietnam and its implications for crustal and tectonic evolution in Southeast Asia. *Geology*, 29(3): 219–222.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong D, Liu X, Zhang L, Ji S and Trinh P T. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3–84.
- Li X H, Li Z X, Li W X and Wang Y J. 2006. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on the Hainan Island. *Journal of Geology*, 114: 341–353.
- Li Z X, Li X H, Zhou H and Kinny P D. 2002. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30(2): 163–166.
- Li Z X and Li X H. 2007. Formation of the 1300 km-wide intra-continental orogen and post-orogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35: 179–182.
- Li Z X, Li X H, Li W X and Ding S. 2008. Was Cathaysia part of Proterozoic Laurentia? — New data from Hainan Island, South China. *Terra Nova*, 20(2): 154–164.
- Lin T, Chung S, Chiu H, Wu F, Yeh M, Searle M P and Iizuka Y. 2012. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints from the Ailao Shan-Red River shear zone on the tectonic and crustal evolution of southwestern China. *Chemical Geology*, 291: 23–37.
- Liu F, Wang F, Liu P and Liu C. 2013. Multiple metamorphic events revealed by zircons from the Diancang Shan-Ailao Shan metamorphic complex, southeastern Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 24: 429–450.
- Liu J, Tran M D, Tang Y, Nguyen Q L, Tran T H, Wu W, Chen J, Zhang Z and Zhao Z. 2012. Permo-Triassic granitoids in the northern part of the Truong Son belt, NW Vietnam: Geochronology, geochemistry and tectonic implications. *Gondwana Research*, 22(2): 628–644.
- Liu Y, Gao S, Hu Z, Gao C, Zong K and Wang D. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-north China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537–571.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Kenneth R. Ludwig.
- Marsaglia K M and Ingersoll R V. 1992. Compositional trends in arc-related, deep-marine sand and sandstone—a reassessment of magmatic-arc provenance. *Geological Society of America Bulletin*, 104: 1637–1649.
- Morley C K. 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia. *Tectonophysics*, 347: 189–215.
- Nagy E A, Maluski H, Lepvrier C, Schärer U, Phan Truong Thi, Leyreloup A and Vu Van Tich. 2001. Geodynamic significance of the Kon Tum massif in central Vietnam: Composite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U-Pb ages from Paleozoic to Triassic. *The Journal of Geology*, 109: 755–770.
- Roger F, Leloup P H, Jolivet M, Lacassin R, Trinh P T, Brunel M and Seward D. 2000. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology. *Tectonophysics*, 321(4): 449–466.
- Roger F, Maluski H, Lepvrier C, Vu Van T and Paquette J L.

2012. LA-ICPMS zircons U/Pb dating of Permo-Triassic and Cretaceous magmatisms in Northern Vietnam — Geodynamical implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 48: 72–82.
- Roger F, Maluski H, Leyreloup A, Lepvrier C and Thi P T. 2007. U-Pb dating of high temperature metamorphic episodes in the Kon Tum Massif (Vietnam). *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(5): 65–572.
- Tapponnier P, Peltzer G and Armijo R. 1986. On the mechanism of collision between India and Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, 19: 113–157.
- Tien P C. 1989. Geology of Kampuchea, Laos and Vietnam (Explanatory note to the geological map of Kampuchea, Laos and Vietnam at 1/1 000 000 scale). Institute of Information and Documentation of Mines and Geology, Hanoi: 149.
- Wang Q, Li X H, Jia X H, Wyman D A, Tang G J, Li Z X, Yang Y H, Jiang Z Q, Ma L and Gou G N. 2012. Late Early Cretaceous adakitic granitoids and associated magnesian and potassium-rich mafic enclaves and dikes in the Tunchang-Fengmu area, Hainan Province (South China): Partial melting of lower crust and mantle, and magma hybridization. *Chemical Geology*, 328: 222–243.
- Wang P L, Lo C H, Lan C Y, Chung S L, Lee T Y, Nam T N and Sano Y. 2011. Thermochronology of the PoSen complex, northern Vietnam: Implications for tectonic evolution in SE Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(5): 1044–1055.
- Wang Z F and Huang B J. 2008. Dongfang 1-1 gas field in the mud diapir belt of the Yinggehai Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 25: 445–455.
- Xu D R, Xia B, Li P C, Chen G H, Ma C and Zhang Y Q. 2007. Protolith natures and U-Pb sensitive high mass-resolution ion microprobe (SHRIMP) zircon ages of the metabasites in Hainan Island, South China: Implications for geodynamic evolution since the late Precambrian. *Island Arc*, 16(4): 575–597.
- Yan Y, Carter A, Palk C, Blichau S and Hu X. 2011. Understanding sedimentation in the Song Hong-Yinggehai Basin, South China Sea. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12: Q06014.
- Yokoyama K, Tsutsumi Y and Nhung N T. 2010. Age distribution of monazites from the nine rivers of Vietnam. *National Museum of Nature and Science*, 46: 97–108.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Günther D and Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28: 353–370.
- Zhang L and Schärer U. 1999. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt, China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 67–85.

Detrital Zircon Ages and Reservoir Source of the Second Member of the Huangliu Formation in the Yinggehai Basin

XIE Yuhong^{1*}, TONG Chuanxin¹, PEI Jianxiang¹, LIU Ping¹, LIANG Xinquan^{2*}, WANG Ce^{2,3}, ZHOU Yun^{2,3}, JIANG Ying^{2,3}, WEN Shunv^{2,3}, FU Jiangan^{2,3}, YU Shihua^{2,3} and XIANG Jianhua^{2,3}

(1. CNOOC China Ltd. Zhanjiang, Zhanjiang 524057, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Yinggehai Basin, located in the southwestern of the South China Sea between the Kontum and Hainan Uplifts, is an important Cenozoic petroliferous basin. As a high quality reservoir, the provenance of the second member of Huangliu Formation has been a key issue in the current study. U-Pb dating of the detrital zircon grains from four sedimentary rocks of the second member of the Huangliu Formation in four gas fields were carried out by using cathodoluminescence (CL) imaging and LA-ICP-MS analysis. The results show that the age spectrum of the Haikou and Dongfang oil and gas tectonic areas (HK29 and DF13, respectively) are similar with age peaks at 40–34 Ma, 154–139 Ma, 245–241 Ma, 416–394 Ma, and 2191–1772 Ma, which are consistent with the several tectonic events in the region. Combining with the geological features of the surrounding areas and the seismology, heavy minerals, and Sr-Nd isotopes data, we found that they have distinct source areas, both of the samples were mainly derived from Red River while HK29 also influenced by the Hainan Uplift. The age spectrum of the Lotus oil and gas tectonic area (L1X) is relative simple with major peak at 247 Ma and several subordinate peaks at 431 Ma, 935 Ma, and 1851 Ma. We infer that the provenance was mainly from the Kontum Uplift. The Lingtou oil and gas tectonic area (LT11) has two major age peaks at 99 Ma and 234 Ma, along with two subordinate age peaks at 157 Ma and 939 Ma. The mainly source area is the Hainan Uplift with small proportion of material from the Red River. The results will provide important theoretical basis for the gas and oil exploration in the future.

Keywords: detrital zircon; provenance analysis; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Huangliu Formation; Yinggehai Basin