



南海西北部晚中新世的红河海底扇

王英民^{①②}, 徐强^③, 李冬^①, 韩建辉^④, 吕明^③, 王永凤^①, 李卫国^⑤, 王海荣^⑥

① 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

② 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

③ 中国海洋石油总公司研究总院, 北京 100027;

④ 成都理工大学能源学院, 成都 610059;

⑤ BP America Inc, Houston, TX 77079, USA;

⑥ 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

E-mail: wym3939@vip.sina.com

2010-06-17 收稿, 2010-12-31 接受

国家重点基础研究发展计划(2009CB219407)和国家自然科学基金(40572067)资助项目

摘要 通过对南海西北部地震和钻井资料的研究, 在莺歌海-琼东南盆地结合部发现了一个主要发育于晚中新世(黄流期)的巨型海底扇, 该扇体在纵向地震剖面上具有楔状斜交前积构型, 横向地震剖面上具丘状双向前积构型. 位于扇体前端的YC35-1-2井的岩心和测录井资料表明黄流组主要为下部以砂岩为主, 上部为砂泥互层的重力流沉积, 结合黄流期主要为半深海沉积的区域地质背景, 认为该扇体为一富砂/泥型的海底扇. 其面积达上万平方公里, 最厚处超过2000 m, 其下部富砂部分也超过5000 km². 初步的物源区分析表明其西部的归仁隆起和北部的海南隆起都不可能作为该海底扇的主要物源区, 而通过对莺歌海盆地黄流组的沉积相分析, 认为其沉积物主要来自于红河, 故将其命名为红河海底扇, 它与红河三角洲以及相关的海底峡谷共同构成红河沉积体系. 中中新世末东沙运动在莺琼结合部形成陆架坡折, 并在莺歌海盆地造成大幅度的相对海平面下降, 使红河水系直接推进到莺琼结合部, 这是形成黄流组下部大型富砂海底扇的最重要的条件. 其发现为青藏高原隆升和红河断裂带演化的研究提供了重要信息, 并为南海北部深水油气勘探指出了新方向.

关键词

红河海底扇
红河沉积体系
青藏高原隆升
深水油气勘探

深水油气勘探已经成为全球油气勘探的热点问题之一, 大型的海底扇是深水油气勘探的主要目标, 也是全球沉积学科研究的前沿和重点. 经验表明, 大型海底扇的发育与大型水系的注入密切相关, 一般发育在大型三角洲的前方. 如在密西西比河、尼日尔河以及恒河的三角洲的前方都发育有大型的海底扇, 其上的深水油气勘探都已获得重大突破. 目前在南海北部陆坡区中段的珠江三角洲前方的深水区已发现了大型的白云海底扇, 并已在其上的LW3-1构造、LH34-1构造和LH29-1构造中取得重大油气发现. 在南海北部陆坡区西段的红河三角洲前方是否也发育相应的海底扇, 其形成时期、分布范围和砂体发育

程度如何? 搞清这些问题对青藏高原隆升和红河断裂带演化历史的研究, 以及对南海北部深水油气勘探方向的确定都具有重要意义.

按常理, 在红河这样大型河流形成的三角洲前方应当发育有大型的海底扇. 但到目前为止在国内外文献中仅有一篇文章在其中的示意图上提到过在莺歌海盆地中发育有红河海底扇^[1], 而且该文既没有交代其形成时代, 也没有提出其为海底扇的任何证据.

本文通过对大量区域地震剖面的解释, 在归仁隆起东侧的莺歌海盆地与琼东南盆地的结合部, 于黄流组中发现了一个大型的海底扇, 因其物源主要来自于红河并位于红河三角洲的前方, 故将其命名

为红河海底扇,它与红河三角洲以及相关的地底峡谷共同构成红河沉积体系.

1 海底扇存在的证据

1.1 地震相特征

在归仁隆起东部横跨莺-琼盆地结合部的地震剖面中可以见到在地震反射界面 S40 与 S30 之间(即黄流组)发育有一个巨型的沉积体,在纵向地震剖面上表现为典型的楔状斜交前积构型,自归仁隆起由西向东前积并呈楔状减薄趋势(图 1(b)),在横向地震剖面上则表现为丘状双向前积构型(图 1(a)),这是富砂/

泥型海底扇^[2]的典型地震相特征.垂向上地震相可分为上下两部分,下部(黄二段)振幅较弱、连续性较差,小型水道下切面比较发育,向上(黄一段)则振幅和连续性增强,水道下切面减少,反映下部岩性比较单一,而向上岩性差异增大,结合钻井资料可知其下部以厚层块状砂砾岩为主,向上泥岩夹层增多,表现为一个向上变细的正旋回特征.此乃由重力流沉积构成的扇体的典型特征.结合莺琼盆地在黄流期已处于半深海环境的区域地质背景,推测该沉积体为海底扇.该扇体前积反射构型的纵向延伸距离和宽度都超过了 100 km,由此初步圈定的扇体面积超过上万平方米,扇体最厚之处紧邻归仁隆起,厚度超过 2000 m.

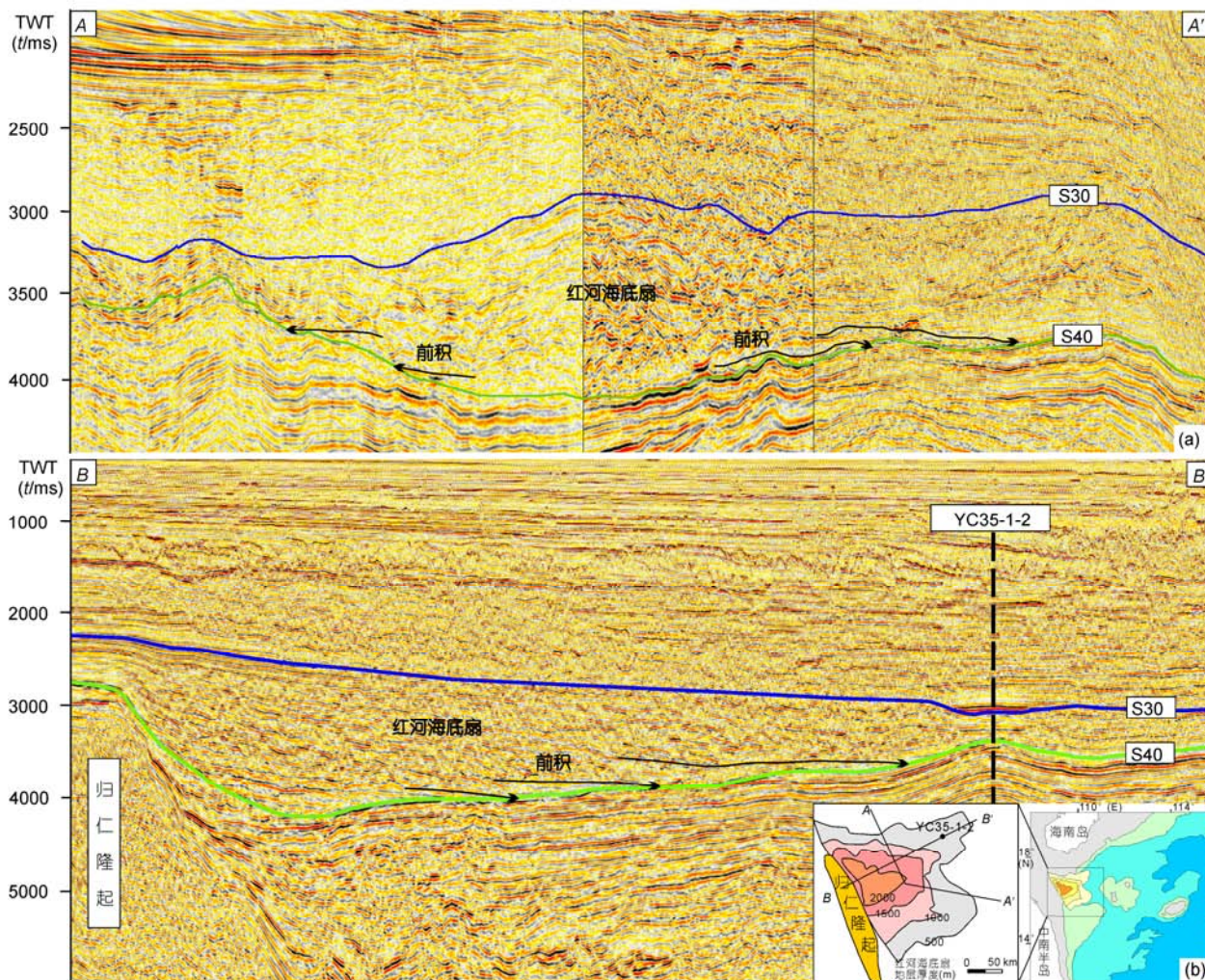


图 1 黄流期红河海底扇的典型地震剖面及平面展布

(a) A-A'剖面,丘状双向前积地震反射构型;(b) B-B'剖面,楔状斜交前积地震反射构型. A-A'和 B-B'为剖面位置

1.2 钻井地质特征

目前在红河海底扇的前端有 YC35-1-2 井钻穿黄流组(位置见图 1), 其测录井资料显示黄流组自下而上发育 8 个向上变细的正旋回, 且总体上表现具向上变细的特征(图 2)。在黄流组底部的 3 个旋回中有近 180 m 的连续取心(4654.3~4835.4 m), 这为确定其沉积相类型提供了宝贵信息。

其最下一个旋回可分为上下两个部分(图 3), 下半部(4773~4828 m)的电测特征为: 低自然伽马、低密度、中-高电阻率、低声波时差, 自然伽马与电阻率曲线呈齿化箱形, 以含砾长石石英粗砂岩主(石英 59%, 长石 10.9%, 岩屑 7.1%), 其底部碳酸岩碎屑含量相对较高, 表现为近源碳酸盐岩碎屑与远源硅质碎屑混源沉积的特点。在该段共识别出五期外扇近端朵体沉积、八期外扇水道沉积以及两期溢岸沉积。外扇近端朵体主要为砂质碎屑流及颗粒流沉积, 以含砾细砂岩为主, 砾石成分主要为石英砾, 偶见泥砾。其分选中等、磨圆较好, 发育逆递变层理和块状层理。其电测特征为低自然伽马、高电阻率、声波时差与密度均低、自然伽马曲线与电阻率呈漏斗形。外扇水道主要为颗粒流沉积, 岩性主要为含砾中-细砂岩, 呈

向上粒度变细的正递变层理。其电测特征为低自然伽马、较高电阻率、低声波时差、低密度、自然伽马与电阻率曲线呈钟形或齿化钟形。溢岸主要为浊流沉积, 以细砂岩为主, 分选磨圆较好, 具块状层理, 其自然伽马较高、电阻率较低、密度低、声波时差较高、自然伽马曲线与电阻率曲线呈微齿状, 远离泥岩基线。

旋回上半部(4753~4773 m)的自然伽马与电阻率曲线呈平直状, 靠近泥岩基线, 具高密度、低电阻率、高声波时差特征。岩性以黑色泥岩为主, 见粉砂岩夹层, 主要为半深海泥夹杂三期外扇远端朵体沉积。半深海泥主要为黑色块状泥岩, 自然伽马较高、电阻率较低、密度高、声波时差较高、测井曲线平直且靠近泥岩基线; 外扇远端朵体主要为浊流及液化流沉积, 以粉砂岩为主, 发育包卷层理、波纹层理及双递变层理, 自然伽马较高, 电阻率较低, 密度高, 声波时差较高, 测井曲线呈指状。

岩心所揭示的其他两个旋回与底部旋回具相似的沉积特征, 区别主要表现为: 其他两个旋回底部不含碳酸盐岩碎屑, 并且粗碎屑含量自下而上逐渐减小。总体上表现为近源减弱远源增强的特点。根据这 3 个旋回建立了测井相模式, 进而对全井段的黄流

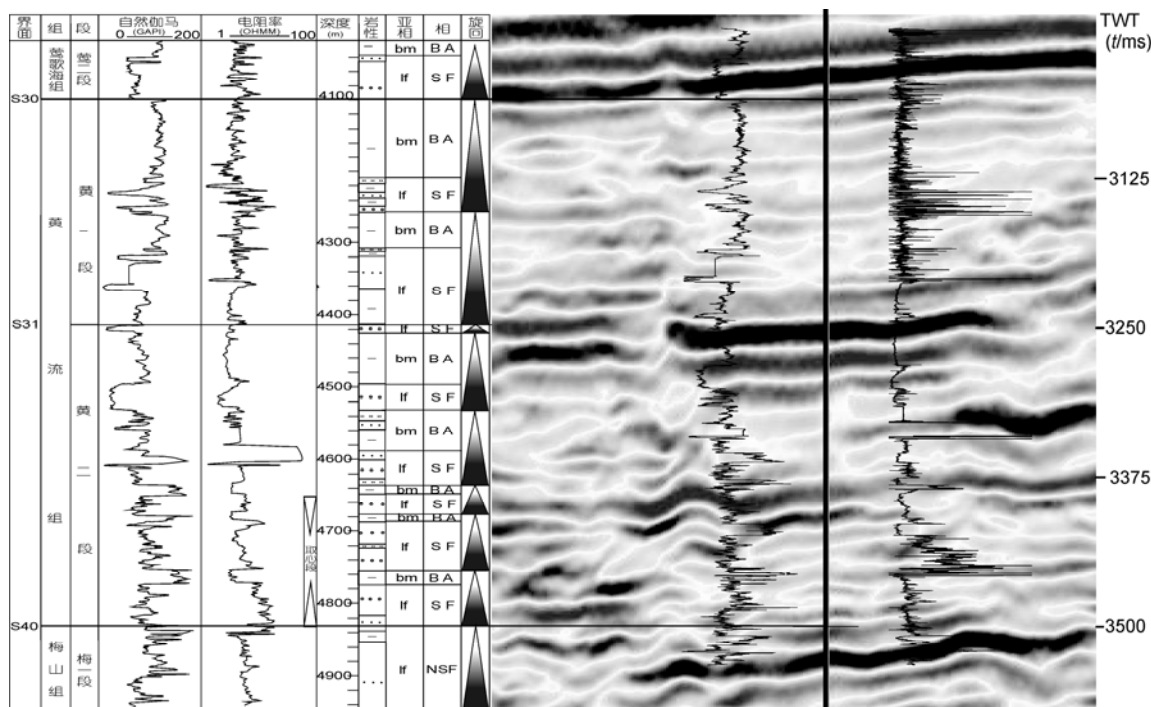


图 2 YC35-1-2 井黄流组测井与地震响应

SF 为海底扇沉积相, BA 为半深海沉积相, NSF 为近岸水下扇沉积相, If 为下扇沉积亚相, bm 为半深海泥沉积亚相

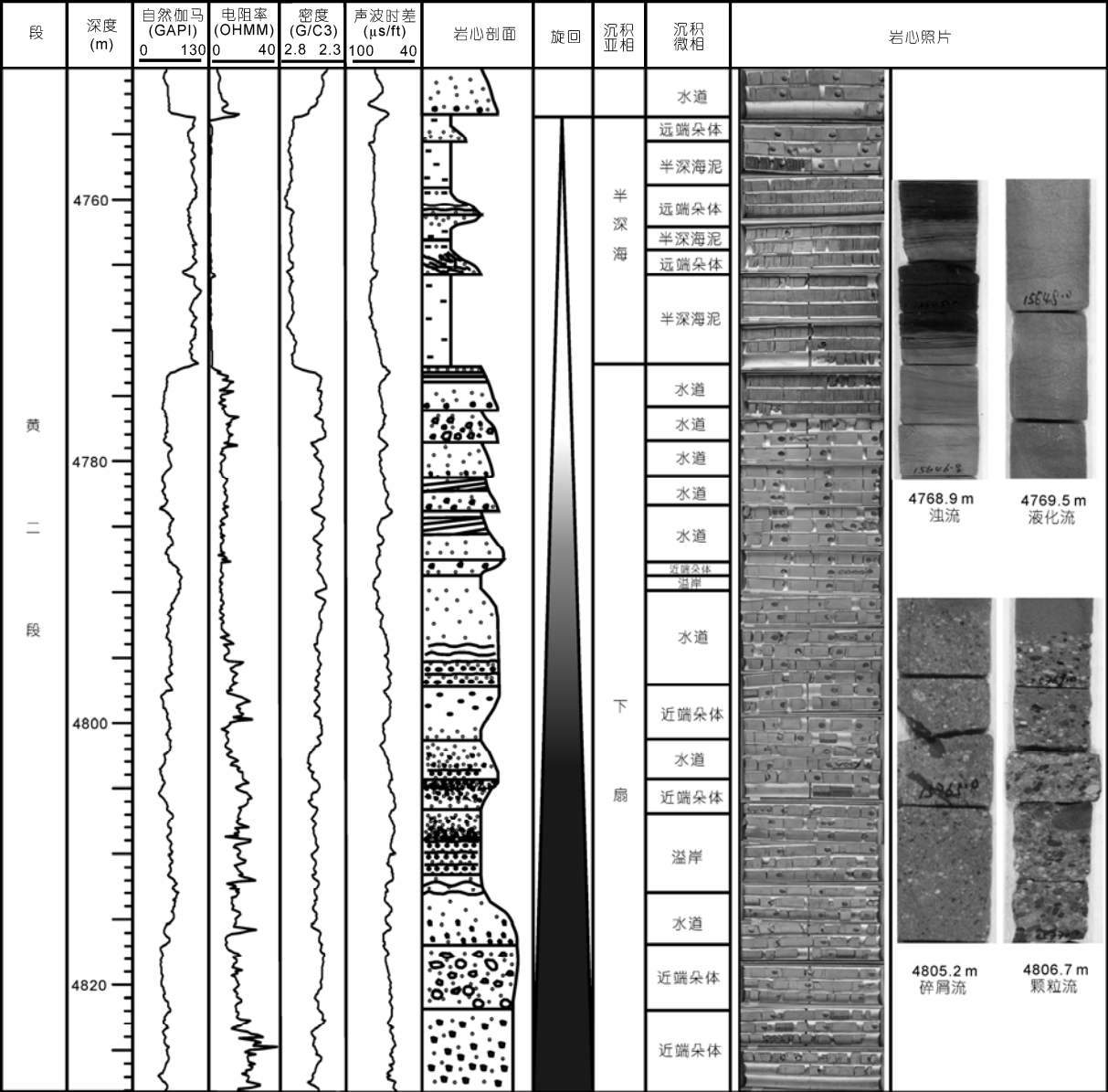


图3 YC35-1-2井岩电特征

组进行了测井沉积相解释. 结果表明黄流组总体上表现为海底扇重力流砂岩与半深海泥岩频繁互层的特点, 其下部的黄二段发育六期海底扇-半深海沉积旋回, 其自然伽马曲线以齿化钟形和齿化箱形为主, 砂地比高达 64%, 主要为外扇分支水道与近端朵体沉积; 其上部的黄一段发育两期海底扇-半深海沉积旋回, 其自然伽马以靠近泥岩基线的平直型为主, 砂地比为 23%, 主要为半深海泥夹外扇远端朵体. 黄流组自下而上粗碎屑含量减少, 这与地震相特征相一致, 并符合黄流期海平面逐渐上升的总趋势.

根据上述宏观的地震相特征和钻井、岩心揭示的沉积微相类型及组合特征, 认为该沉积体为一个巨型的远源富砂/泥型的海底扇.

2 物源分析

从红河海底扇的平面展布看, 其潜在物源可能有 3 个: 归仁隆起、海南隆起以及红河水系(图 1).

关于归仁隆起物源, 因归仁隆起在黄流期为碳酸盐台地^[3], 如果它是主要物源的话, 则其下方的扇体应以碳酸盐岩碎屑沉积为主, 至少要表现出碳酸

盐岩与砂质碎屑岩强烈混积的特征,而通过 YC35-1-2 井岩心观察可知,该扇体主要为远源的陆源碎屑岩沉积,仅见少量的碳酸盐岩颗粒混入,故认定归仁隆起并非主要物源。归仁隆起以西的越南陆上河流主要为南北向展布(如湄公河),未见有大中型河流由西向东注入莺琼结合部。

关于海南隆起物源,通过对其周边地震剖面的分析可知黄流组均表现为向海南隆起的上超尖灭,而并未见有来自海南隆起的前积反射构型(图 4(d)),在位于该扇体北面的 YC26-1-1 井所揭示的黄流组全为大套灰黑色泥岩,这些都表明在黄流期海南隆起可能并非巨型红河海底扇的主要物源。

针对红河水系作为主要物源的可能性,对莺歌海盆地及琼东南盆地的区域地震剖面进行了分析。在自莺歌海盆地西北直至琼东南盆地西部的区域地震大剖面上(图 4(a))可以看到在莺歌海盆地西北部, S40~S30 内发育大型的朝向东南的斜交前积反射构型(图 4(b)),局部见下切河道,此即红河三角洲,其

平面分布范围大于 10000 km²。在红河三角洲的前方(东南方)发育有一个坡折带,其上发育下切水道,在坡折带下方地层明显增厚,在黄流组内发育了一个反射构型十分复杂的水道-堤岸复合沉积体,其底部具有明显的水道下切特征,水道内部充填表现为弱-中振幅、中连续性反射,其外侧堤岸沉积表现为向上凸起的强振幅、中-高连续性反射,共同构成“海鸥翼”状地震相单元,这是典型的水道化海底扇沉积的特征(图 4(c)),但此扇体规模较小,仅 500 km²左右,为陆坡局部洼陷内发育的一个小扇体。在其南部,地震剖面上表现为下切水道充填的特点(图 4(a)和(d)),再向南,则进入到莺琼结合部海底扇主体部位(图 1(a),图 4(e))。综上所述,黄流期的红河沉积体系为一个由三角洲、水道和海底扇组成的大型体系,三角洲主要发育在莺歌海盆地北部,面积达上万平方公里。其东南为由峡谷水道和在陆坡局限洼陷中发育小型海底扇体组成的内扇。在莺琼结合部发育的海底扇主体部位面积也达上万平方公里。红河海底扇与红河

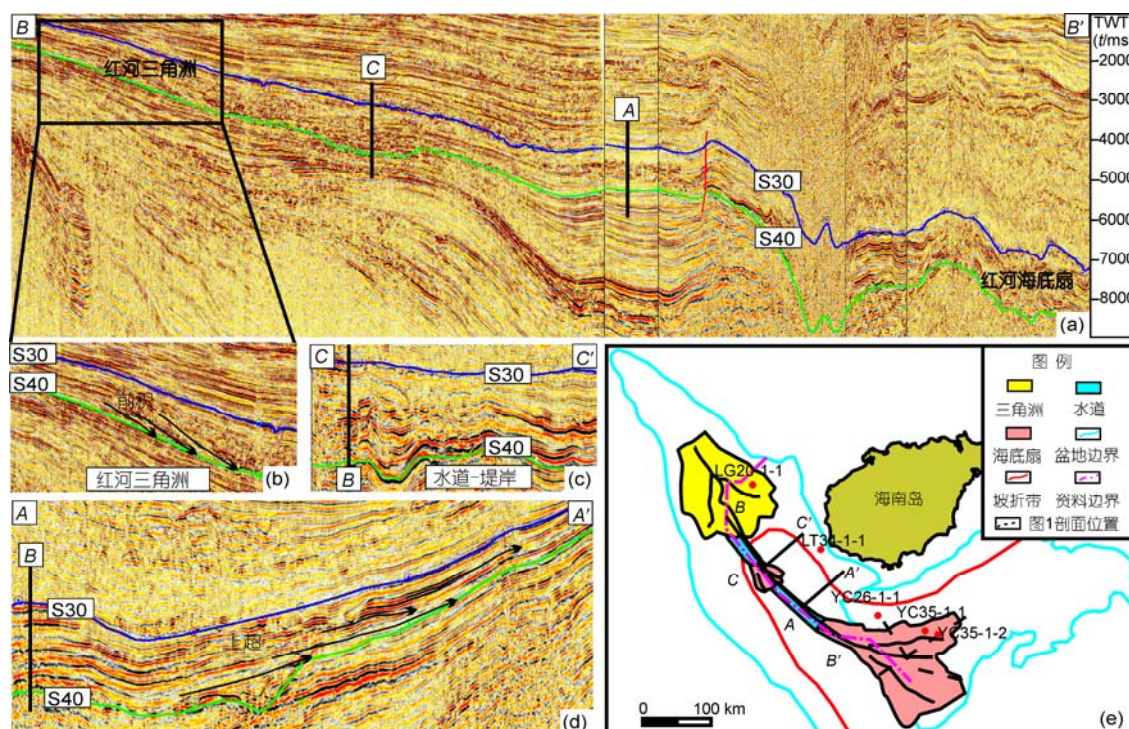


图 4 红河海底扇特征

(a) 红河沉积体系纵向地震反射剖面; (b) 红河三角洲前积; (c) 水道-堤岸复合体; (d) 水道侵蚀及地层向海南岛方向上超; (e) 红河沉积体系平面展布。 (a)~(c)和(e)说明红河三角洲、水道堤岸和红河海底扇共同组成“三角洲-峡谷水道-海底扇”沉积体系; (d)说明海南岛并非红河海底扇的主要物源。 (e) 中 A-A', B-B' 和 C-C' 为剖面位置。 (a) 中 A 表示 A-A' 与 B-B' 剖面相交位置, C 表示 C-C' 与 B-B' 剖面相交位置; (c) 中 B 表示 C-C' 与 B-B' 剖面相交位置; (d) 中 B 表示 A-A' 与 B-B' 剖面相交位置

三角洲以及相关的地底峡谷共同构成红河沉积体系. 中中新世末东沙运动在莺歌海盆地造成大幅度的相对海平面下降, 使红河水系直接推进到莺歌海盆地, 这是形成黄流组下部大型富砂海底扇的最重要的条件.

根据重矿物组合特征开展了物源分析, 研究表明: 红河物源的重矿物组合主要具有变质岩母岩的特点, 即磁铁矿和石榴石含量高, ZTR(锆石、金红石、电气石)含量低. LG20-1-1 井为其代表, 其磁铁矿为 27%, 石榴石为 16.2%, ZTR 为 13%(图 5). 海南岛物源的重矿物组合主要表现为侵入岩母岩的特点, 即磁铁矿和石榴石含量低, ZTR 含量高. 以 LT34-1-1 井为代表, 其磁铁矿为 1.6%, 石榴石为 2.48%, ZTR 为 53.3%(图 5). YC35-1-1 井黄流组的重矿物组合磁铁矿为 1.6%, 石榴石为 23%, ZTR 为 21.6%, 明显表现为石榴石含量高而 ZTR 低的特点(图 5), 与红河物源的重矿物组合特征更为相似, 因此断定红河海底扇的沉积物主要来自红河而非海南岛. 由于归仁隆起及其西部的越东地区主要为碳酸盐发育区, 因此从 YC35-1-1 井黄流组的重矿物组合特征也可以确定其物源应当不是来自于归仁隆起及越东地区.

3 红河海底扇形成的地质背景

根据以上分析, 晚中新世黄流期(10.5~5.5 Ma)是红河海底扇的主要发育期, 从上新世以来红河海底扇突然消失, 转化为长达数百公里的中央峡谷, 推测在中央峡谷的东南出口处西沙海槽末端可能发育大型的海底扇体, 但目前该地区地震资料稀少, 尚缺乏直接证据. 总体上看红河提供的沉积物供给量显著

减少, 这一发育演化历史与青藏高原隆升和红河水系的发育演化历史是一致的^[4~9].

青藏高原在 13~9 Ma 左右强烈隆升剥蚀, 这为晚中新世黄流期的红河海底扇提供了充沛的沉积物供给; 而 10.5 Ma 的东沙运动使南海发生大规模海退, 此时陆架坡折位于 1 号断裂带附近, 控制了红河海底扇在乐东凹陷的发育. 而到 5.5 Ma 红河海底扇因沉积物供给不足而突然消失, 此后进入中央峡谷-西沙海槽末端扇的演化阶段, 其原因值得深思, Clark 等人^[10]曾指出早期的长江水系, 包括金沙江、大渡河等可能都是经红河注入莺歌海盆地的, 此后哀牢山-红河-1 号断裂转变为右旋走滑并造成滇西高原抬升, 使大渡河、金沙江等先后转向东流, 汇入长江^[4,10,11], 使红河的供给量大大减小, 对这一假说一直存在很大争议, 红河海底扇的发育演化历史对认识红河演化历史的揭示无疑具有重要的意义.

4 结论

在莺歌海-琼东南盆地结合部发育有巨型的富砂/泥型的海底扇, 其分布面积达上万平方公里, 最厚处超过 2000 m, 主要形成时期为晚中新世黄流期(10.5~5.5 Ma), 早期存在归仁隆起近源与红河远源混源沉积的特点, 但是归仁隆起并非主要物源, 其主要物质来自古红河, 红河海底扇是红河沉积体系的重要组成部分, 其形成时期与青藏高原隆升和红河的演化历史相对应.

红河海底扇的发现为青藏高原的隆升历史和红河的演化历史研究提供了重要的证据, 并为南海北部深水油气勘探指出了重要方向.

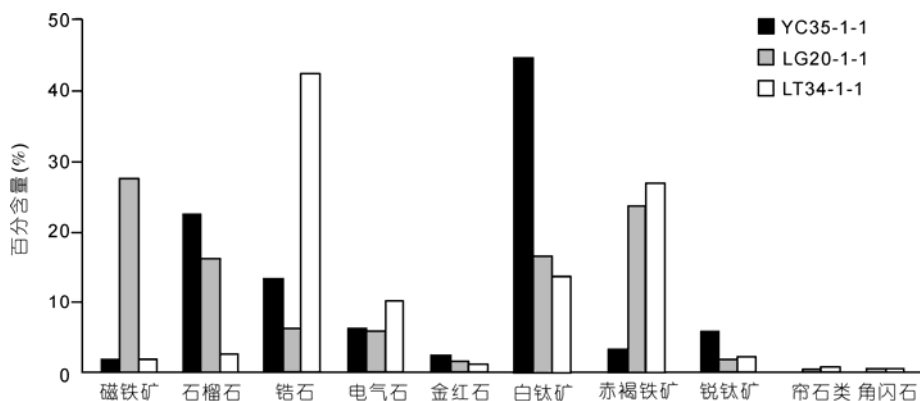


图 5 根据重矿物组合所进行的物源对比

LG20-1-1, 红河物源; LT34-1-1, 海南岛物源; YC35-1-1 的重矿物组合特征更接近于 LG20-1-1

致谢 在研究和论文编写过程中 973 项目首席科学家朱伟林先生给予了大力支持和指导, 中国海洋石油总公司湛江分公司研究院领导和技术人员在资料和地质认识上给予了大力帮助, 在此谨表诚挚的感谢。

参考文献

- 1 王二七. 山盆耦合的一种重要形式: 造山带及其侧陆盆地. 科学通报, 2004, 49: 370-374
- 2 Reading H G, Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system. AAPG Bull, 1994, 78: 792-822
- 3 Fraser A J, Matthews S J, Murphy R W. Petroleum Geology of Southeast Asia. London: The Geological Society, 1997. 436
- 4 向宏发, 万景林, 韩竹军, 等. 红河断裂带大型右旋走滑运动发生时代的地质分析与 FT 测年. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 977-987
- 5 林畅松, 刘景彦, 蔡世祥, 等. 莺-琼盆地大型下切谷和海底重力流体系的沉积构成和发育背景. 科学通报, 2001, 46: 69-72
- 6 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26: 289-295
- 7 Clift P D, Lee J I, Blusztajn J, et al. Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening recorded in the South China Sea. Mar Geol, 2002, 184: 207-226
- 8 Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R, et al. On the mechanism of collision between India and Asia. In: Coward M P, Ries A C, eds. Collision Tectonics. London: The Geological Society, 1986, 19: 115-157
- 9 王成善, 戴紫根, 刘志飞, 等. 西藏高原与喜马拉雅的隆升历史和研究方法: 回顾与进展. 地学前缘, 2009, 16: 1-30
- 10 Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of Eastern Tibet from large-scale drainage patterns. Tectonics, 2004, 23: TC1006, doi:10. 1029/2002TC001402
- 11 Morley C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip fault and rift basins in SE Asia. Tectonophysics, 2002, 347: 189-215