



南海北部 IODP U1499 站位砾石层的古沉积环境及构造意义

任金锋^{1,2,3}, 孙 鸣^{1,2*}, 朱本铎², 韩 冰², 张伙带², 吕文超²

1. 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东广州 510760
2. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510760
3. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 南海北部 IODP 367 航次深海钻遇砾石层, 因前期地球物理资料预测不足, 导致出现多种成因猜测. 利用南海北部大量高精度地震、油气钻井和 IODP 资料, 从构造地层学、层序地层学和沉积充填动力学等角度, 恢复研究区砾石层沉积时的古地貌特征. 研究表明, 砾石层形成于晚始新世—早渐新世, 发育于小型断陷陆相湖盆周缘, 以近源三角洲相沉积为主, 其物源主要来自湖盆周缘的东沙和礼乐中生代地层剥蚀区; 砾石层的顶界面对于 T70 与 T60 重合面, 其中 T70 为南海北部海底渐进式扩张形成的破裂不整合面, 年龄介于 33.0~28.4 Ma, 具有东早西晚的特征. 此外, 认为南海北部洋陆转换带的位置并非目前认为的 3 000 m 水深附近, 而应该是水深更深的一系列小型箕状断陷的南部边缘.

关键词: 南海大洋钻探; 砾石层; 古沉积环境; 构造意义; 石油地质.

中图分类号: P736

文章编号: 1000 — 2383(2018)S2 — 0179 — 13

收稿日期: 2018 — 01 — 11

Paleo-Sedimentary Environment and Tectonic Significance of Gravel Layers at IODP Site U1499 in Northern South China Sea

Ren Jinfeng^{1,2,3}, Sun Ming^{1,2*}, Zhu Benduo², Han Bing², Zhang Huodai², Lü Wenchao²

1. MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou 510760, China
2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China
3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Gravel layers were drilled at IODP 367 Site U1499 in northern South China Sea. A variety of possible genetic mechanism for gravel layers, which are incorrect or uncertain predictions from observations in geophysical data in advance, have been proposed through the lithostratigraphic units in the cored sediment at site U1499. Using tectonostratigraphy and sediment-filling dynamics, this study restores the paleo-geomorphology during the gravel layers sedimentation period based on a high-resolution seismic database and IODP site data from the northern margin of the South China Sea. The results indicate that the gravel layers should be deposited in proximal delta sedimentation environment along Late Eocene-Early Oligocene lacustrine basin peripheral, whose provenance is mainly from Mesozoic erosion areas of Dongsha and Liyue. The top of the gravel layers corresponds to a coincidence boundary of T70 and T60 in seismic profiles. T70 unconformity is likely directly related to the continental breakup during the initial opening of the northern South China Sea. T70 boundary age is estimated to be at 33.0–28.4 Ma and is earlier in the east than that of the west. Besides, this paper suggests that the position of ocean-continent transition zone may be near the southern edge of a series of small extensional half-grabens in the northern South China Sea rather than a geomorphic abrupt domain with a water depth of 3 000 m.

Key words: International Ocean Discovery Program (IODP); gravel layer; paleo-sedimentary environment; tectonic significance; petroleum geology.

基金项目: 国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金 (Nos.KLMMR-2017-A-05, KLMMR-2015-A-16)构造与油气资源教育部重点实验室开放研究基金课题 (No.TPR-2015-12)中国地质调查局地质调查项目 (No.121201002000161411)国家自然科学基金 (Nos.91428207, 91628301).

作者简介: 任金锋 (1987 —), 男, 工程师, 博士, 主要从事海洋基础地质方面研究. ORCID:0000-0002-3567-5337. E-mail: jf_ren@163.com

* 通讯作者: 孙鸣, E-mail:569811200@qq.com

引用格式: 任金锋, 孙鸣, 朱本铎, 等, 2018. 南海北部 IODP U1499 站位砾石层的古沉积环境及构造意义. 地球科学, 43 (Suppl. 2): 179–191.

0 引言

2017年3月初,由中科院南海所孙珍研究员和美国加州理工学院 Joann Stock 教授为首席科学家的南海第三次国际大洋钻探 IODP367 航次,在 U1499 站位 3 760 m 水深的海底以下 930 m 处,钻遇厚层深灰色砾石,砾石大小在 2~3 cm 到 10 cm. 由于地球物理手段没有事先检测出来,在意料之外,导致科学家对砾石层的形成成因给予了多种类型的解释:(1)可能是在陆上峡谷的河流中,暴雨冲刷两岸,在河床中形成大小不一的砾石;(2)可能是在紧邻山区河流的浅海中,由山区河流直接将砾石搬运到海洋中;(3)可能是在深海峡谷中,由浊流或碎屑流将砾石搬运到深海峡谷中堆积.但每一种观点都很难对砾石层的成因做出比较可靠的解释.具体的,U1499B 井的岩性单元 VIII 以粘土岩和富含超微化石的微细碳酸钙沉积物为主(Sun *et al.*, 2018),为正常深海静水泥质沉积,争议较小,而岩性单元 IX 有砂岩、角砾岩及主要由沉积岩破碎后再搬运形成的砾岩,岩性不具有特殊性和排他性,陆上环境、浅水环境或深水陆坡环境均可发育,因此出现多种猜测结果.究其原因,930 m 处岩性自上而下发生了明显的变化,仅可判断水动力条件发生了明显的突变,但无法对砾石层的古沉

积环境做出判断,尤其是对沉积相类型做出明确判断.此外,砾石层顶部的大型不整合面与南海构造运动有什么关联,砾石层沉积时期的古地貌特征对南海北部洋陆转换带位置的确定有什么构造意义等问题也有待进一步探讨.

本文将从构造地层学、层序地层学、沉积充填动力学等角度,将西沙海域的琼东南盆地、东沙海域的珠江口盆地和西北次海盆等区域与 U1499 站位所在的区域进行砾石层沉积时期的地层结构样式及其内部沉积充填规律的类比分析,进而恢复研究区砾石层沉积时的古地貌特征,为揭示南海海盆发生的拉张破裂和海底扩张过程等重大构造运动提供参考依据.

1 区域地质背景

新生代以来,受两期不同方向的海底扩张和短期改造等构造作用,以及南海周缘走滑及挤压等主控因素制约,在南海北部陆缘深水区域形成一系列 NE 向展布的深水盆地,由西向东分别为琼东南盆地、西沙海槽盆地、珠江口盆地、尖峰北盆地和笔架盆地(图1).这些盆地经历了裂陷期、热沉降期和晚中新世以来的新构造期等 3 个构造演化阶段(张功成, 2010; 解习农等, 2015; 陈芳等, 2016; Wang *et al.*, 2016).

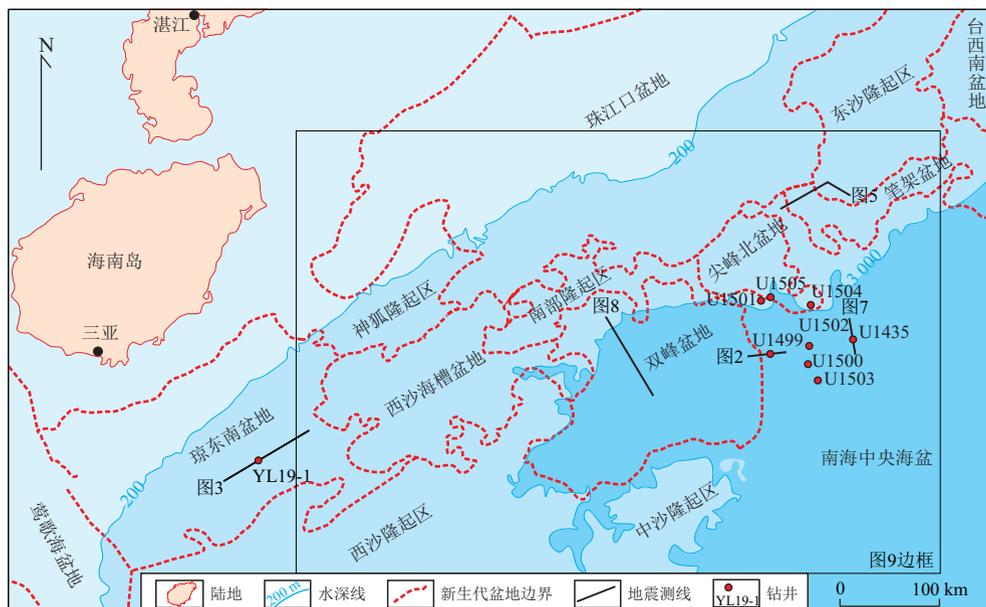


图 1 南海北部陆缘沉积盆地分布图

Fig.1 The sedimentary basins of the northern margin of South China Sea

这些盆地的裂陷期始于古近纪, 神狐运动之后形成一系列地堑或半地堑. 多数盆地发育 3 期裂陷幕(雷超等, 2015; 张功成等, 2015): 第一期裂陷幕发育于古新世—早始新世 (Tg), 主要为冲积粗碎屑沉积; 第二期裂陷幕发育于中晚始新世 (T80), 珠江口盆地形成了断陷湖盆沉积, 而琼东南盆地则形成了陆相断陷湖盆—海陆过渡相沉积; 第三期裂陷幕发生于渐新世 (T70), 珠江口盆地白云坳陷和琼东南盆地形成了海陆过渡相和浅海相沉积. 南海北部陆缘盆地自北向南、从东向西, 断坳不整合面逐渐从 T70 演变为 T60, 整体具有东早西晚、北早南晚的趋势.

IODP U1499 站位位于经度 115°51.6'E, 纬度 18°24.6' N 附近, 水深约 3 760 m, 构造位置上属于南海北部大陆坡底, 即东部次海盆 (Sun *et al.*, 2018)(图1). 南海东部次海盆洋壳的形成开始于早渐新世, 依据东部次海盆中的磁异常解释为 C12n (~32 Ma) (Briaies *et al.*, 1993; Franke *et al.*, 2014), 其海底扩张停止于中中新世 (~15Ma) (Barckhausen and Roeser, 2004; Barckhausen *et al.*, 2014), 同时南海东部也开始向马尼拉俯冲.

2 砾石层发育的古沉积环境分析

2.1 U1499 站位

依据 IODP 367/368 的地震剖面与钻井标定得知, U1499 站位 930 m 处对应于时间地震剖面的 5.9 s 附近 (图2a). 通过对 IODP 367/368 航次计划书中过 U1499 站位的地震剖面重新解释发现, 虽然砾石层位于基底的一个构造高地上, 但仍发育于一系列由小型半地堑组成的地垒之中, 并位于向西倾斜的断层的上盘 (图2b), 最大厚度不超过 500 m. 砾石层地震波组顶部多以削截为主, 之上主要为上超反射, 因

此该“上超下削”型界面应为大型不整合面, 可能与南海海底破裂及开始扩张有关. 结合区域构造地层解释, 本文认为该界面为破裂不整合面 T70.

依据 IODP 367/368 的航次报告 U1499 站位的地层岩性描述发现, 破裂不整合面 (砾石层顶部 929.02 m) 之上为岩性单元 VIII, 厚约为 167.32 m, 由红棕色至红灰色的粘土岩和富粘土质白垩地层组成. 基于钙质含量的多少, 可划分为 VIII A 和 VIII B 两个亚单元: VIII A 由中—晚中新世暗红棕色粘土岩夹粉砂岩和有孔虫砂岩夹层组成; VIII B 由早—中中新世红棕色至红灰色的富粘土质超微化石白垩地层和富粘土质白垩地层组成 (Sun *et al.*, 2018)(表1). 结合其弱振幅、中—低连续的地震反射特征, 判断岩性单元 VIII 为半深海—深海重力流沉积到正常静水深—深海泥质沉积 (表1).

破裂不整合面 T70 之下为岩性单元 IX, 与上覆地层有明显的差别, 厚约为 153 m, 由前中新世砂岩、粘土岩、杂基支撑的角砾岩和砾石组成. 可划分为 3 个亚单元: IX A 为褐至绿灰色砂岩和角砾岩; IX B 为暗灰色杂基支撑的角砾岩; IX C 为灰色至暗灰色砾石与粉砂夹层, 砾石大小在 2~3 cm 至 10 cm (Sun *et al.*, 2018)(表1). 砾石层对应于高振幅、中连续和低频的地震反射特征, 且局部发育斜交型地震相.

综合构造单元、地震反射和岩性特征, 判断岩性单元 IX 的沉积环境是由陆盆浅水沉积到海陆过渡相沉积的快速过渡或转变. 依据 U1499 站位的古生物测年得知, 破裂不整合面处几米之内存在年龄的快速变化 (Larsen *et al.*, 2018). 因此, 推测 U1499 站位处的破裂不整合面是 T70 和 T60 界面的重合面. 此外, 岩性单元 IX 和 VIII 之间存在巨大的沉积环境差异, 可判断南海早期存在一个快速拉张、快速海侵的过程.

表 1 U1499 站位 930m 上下岩性单元 VIII 和 IX 的岩性和地震反射特征

Table 1 Lithostratigraphy and seismic expression of Unit VIII and Unit IX at site U1499

岩性单元	次级单元	深度范围	时代	岩心描述特征	地震反射特征	推测沉积相
VIII	VIII A	761.70~892.10 m	中—晚中新世	暗红棕色粘土岩与粉砂岩和有孔虫砂岩夹层	中振幅、强连续反射	半深海—深海泥质沉积
	VIII B	892.10~929.02 m	早—中中新世	红褐色至红灰色富粘土超微化石白垩地层 (微细的碳酸钙沉积物) 和富粘土白垩地层, 底部红棕色富超微化石粘土岩中含褐黑色铁锰结核	弱振幅、中低连续反射	半深海—深海重力流沉积
IX	IX A	929.02~933.28 m	前中新世	褐至绿灰色砂岩和角砾岩	高振幅、弱连续反射或不规则杂乱反射	陆上河道相沉积或近源三角洲平原沉积
	IX B	933.28~933.35 m		黑灰色杂基支撑的角砾岩		
	IX C	933.35~1 081.8 m		灰色至暗灰色砾石含粉砂夹层		

注: 岩性特征来自 IODP367 航次报告整理.

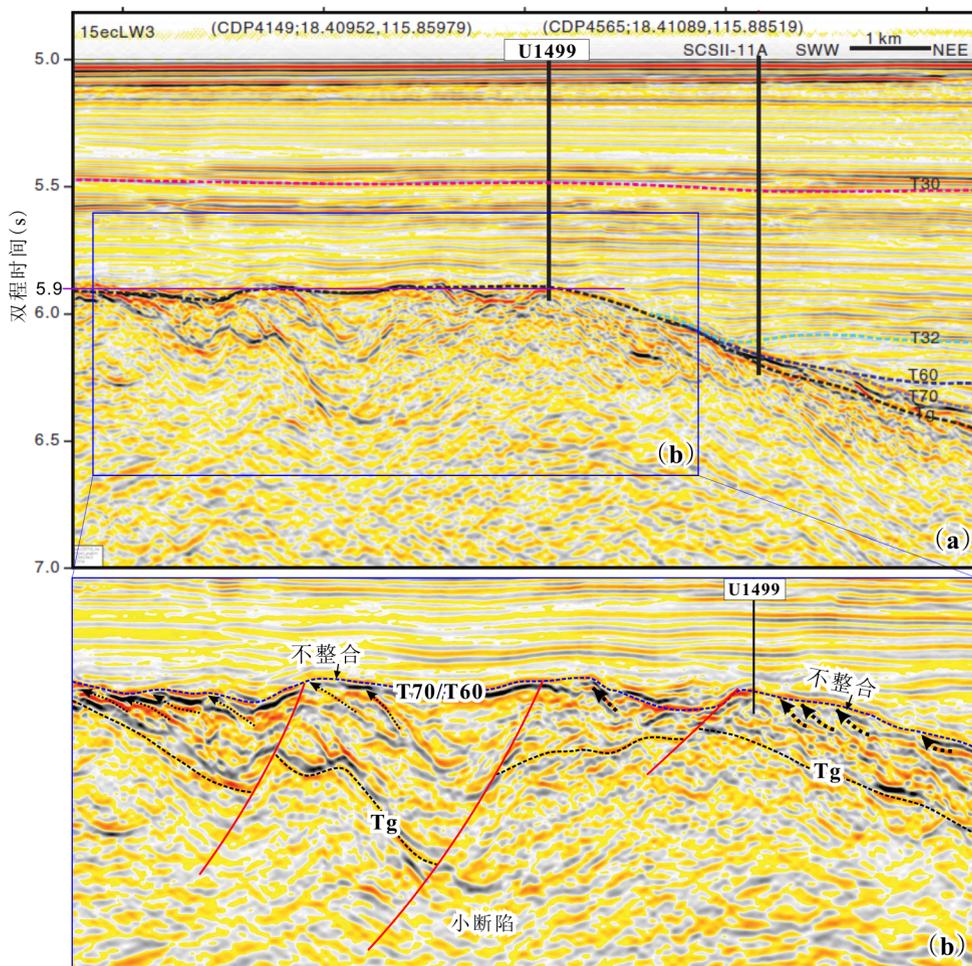


图 2 U1499 站位过井地震剖面的再解释

Fig.2 Reinterpretation of cross-well seismic profile in site U1499

地震剖面来自 Sun *et al.* (2016), 地震剖面位置见图 1

2.2 西沙隆起区

通过琼东南盆地南部西沙隆起区的 YL19-1 过井地震剖面解释发现, 琼东南盆地北礁凹陷 Tg — T70 之间的地层表现为中低振幅、中低频和高连续地震反射特征, 呈平行—亚平行地震相 (图 3a)。YL19-1 相应的地层综合柱状图显示: 早渐新世崖一段顶部为厚层泥岩夹薄层砂岩, 中部为碳质泥岩夹三层 1~2 m 厚的煤层, 底部为厚层砂岩夹薄层泥岩, 测井自然 GR 曲线为指形、钟形和少量箱形, GR 和 ILD 值总体较高, 即泥岩含量较高, 推测崖一段为海岸平原相沉积 (图 4); 早渐新世崖二段整体为砂岩、泥岩和灰岩互层, 砂岩为浅灰色至灰白色细砂岩, 少量粉砂岩, 局部含砾石, 分选性较差, 见冲刷面, 泥岩见高岭土化, 泥灰岩滴盐酸少量起泡, 易碎—较硬。自然 GR 曲线主要为箱形和少量钟形, GR 和 ILD 值总体比崖一段低, 即泥岩含量相对较低, 推测崖二段为障壁海

岸相沉积 (图 4)。因此, 综合认为琼东南盆地北礁凹陷 Tg — T70 之间的早渐新世应为海陆过渡相沉积。

西沙隆起区 T70 之下存在明显的削截, 且地震反射表现为高振幅、中低频和低连续特征。Tg — T70 之间的地层发育于一系列小型半地堑组成的构造单元中。地震相以 S 型或斜交型的楔状为主, 前积作用明显 (图 3b)。总之, 与琼东南盆地北礁凹陷 Tg — T70 的海陆过渡相沉积对比认为, 西沙隆起区 Tg — T70 之间应该是小断陷湖盆内的陆相沉积, 且西沙隆起区 Tg — T70 之间的构造单元和沉积特征与 U1499 站位处极其相似。

2.3 东沙隆起区

LF35-1-1 井证实了东沙隆起区中生界的发育, 其中生代地层存在明显的褶皱变形, 认为该特征与南海北部晚白垩世晚期古太平洋板块向华南陆缘俯冲的远程效应有关。晚白垩世发生的沉积作用以陆相

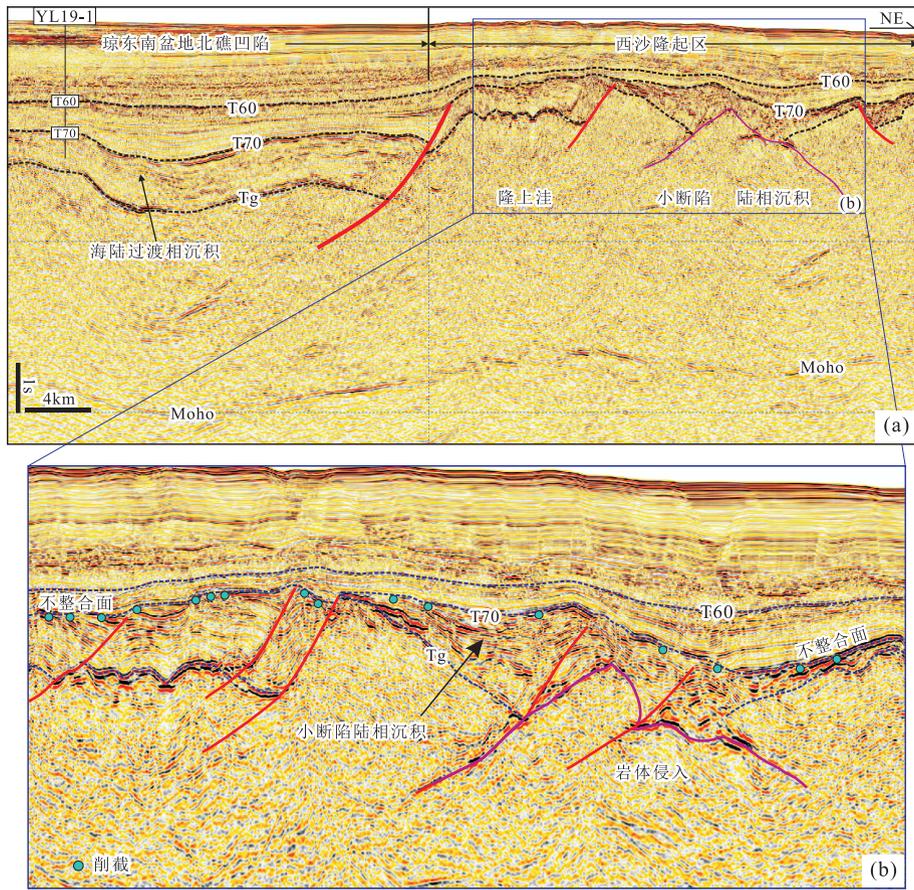


图 3 琼东南盆地西沙隆起区 Tg — T70 之间的地层发育特征

Fig.3 Stratigraphic pattern during Tg — T70 of Xisha uplift area

地震剖面位置见图1

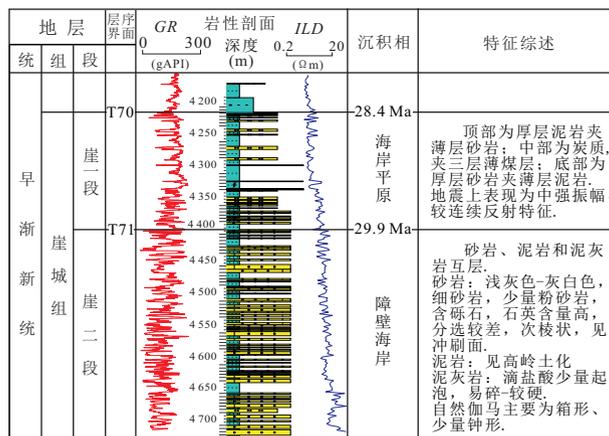


图 4 YL19-1 早渐新世崖城组沉积相柱状图

Fig.4 Histogram of Early Oligocene sedimentary facies during Yacheng Formation of well YL19-1

湖盆沉积为主，同时由于区域构造隆升，导致了部分区域的中生代地层遭受了剥蚀夷平，形成角度不整合界面 Tg。而在古近纪早期，由于太平洋板块向欧亚板块后撤，上地幔隆升，岩石圈减薄，上地壳拉张下沉(蔡周荣等, 2010)，即神狐运动作用下，导致东沙隆

起区发生构造反转，开始发育由多个微型地堑与半地堑组成的断陷构造单元(图5)。东沙隆起区尽管接受了非常薄的陆相沉积(地震相以高振幅、弱连续为主)，但地震剖面显示，T70 界面之下同样发生了不同程度的剥蚀，表现出大量的削截反射特征。与凹陷区

横向对比来看, T70 界面同样是“下削上超”型界面, 具有破裂不整合的特征. 因此, 我们认为东沙隆起区 Tg — T70 之间也发育与 U1499 站位处类似的地层构造单元, 只是断陷规模更小, 可能以山间陆相沉积为主, 同时期小断陷湖盆周围是以中生代地层为主的剥蚀区.

2.4 IODP 349 U1435 站位

IODP 349 U1435 站位位于南海东部次海盆北部, 处于 U1499 站位东部的石申海山之上. U1435 站位渐新统 (36.04~77.65 m(海底以下深度)) 对应于岩性单元 IB, 主要为粉砂质粘土岩与粘土岩互层及粉砂夹层, 但在下部钙质增多, 且超微化石的比例逐渐增加, 其底界面之上为泥质砂岩, 界面之下为一套砂岩层之上的碳酸盐岩, 它作为硬底的沉积, 代表漫长的时期或较慢的积累过程, 可能是一期达几百万年的沉积间断 (24.67~11.9 Ma)(IODP Preliminary Report, 2014)(图6).

前渐新统 (77.65~300.00 m) 包括单元 II 和单元 III, 单元 II(77.65~275.54 m) 主要为砂岩沉积, 大部分由黑灰色粉砂质中砂岩组成, 也有少量粗粒砂岩, 偶见砾岩, 是在一个相对高能浅海沉积环境中形成的. 古生物方面, 在 79.78 m 到 299.16 m 的底部, 没有发现微体生物化石和浮游有孔虫或者放射虫. 在岩心 21R 到 26R 中, 有很少量的深海有孔虫出现, 这表明在岩性单元 II 中存在由浅水到半咸水的沉积 (IODP Preliminary Report, 2014). 通过岩心观测, 29R-CC 段发现了中型卵石砾岩, 分选较差, 磨圆程度不高, 部分呈尖棱状, 推测其沉积环境可能是陆上近源扇三角洲平原沉积; 19R-2A 段发现顶部灰色层状粉砂质砂岩与底部灰白色块状粗砂岩之间存在平缓倾斜的侵蚀界面相, 且层状粉砂质砂岩具有平行层理, 反映了高能浅水沉积特征, 推测可能为三角洲前缘水下分流河道沉积; 15R-1A 段在块状灰色砂岩内部含有一些分散的黑色碳屑颗粒, 推测可能为

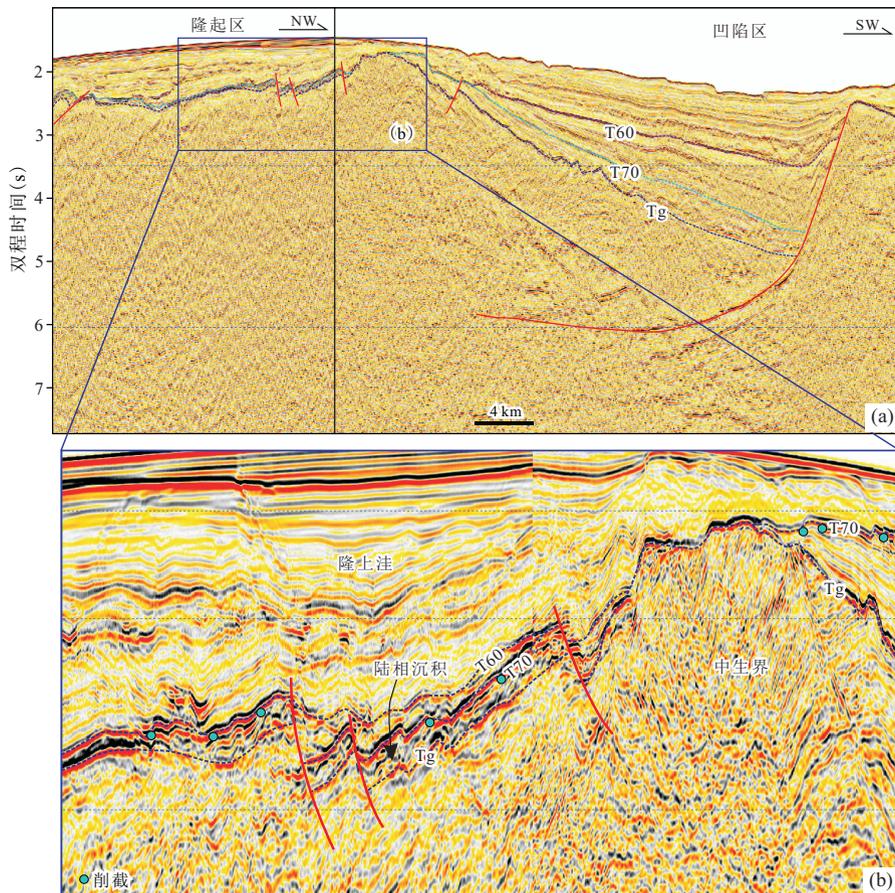


图 5 东沙隆起区 Tg — T70 之间的地层发育特征

Fig.5 Stratigraphic pattern during Tg — T70 in Dongsha uplift areas

地震剖面位置见图1

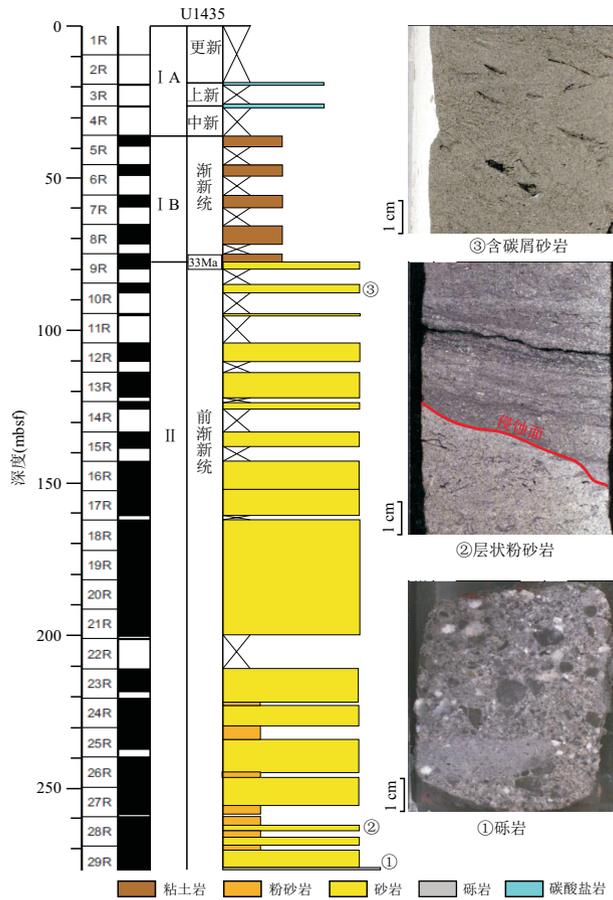


图 6 U1435 站位的岩性地层单元和前渐新统岩心特征

Fig.6 Lithostratigraphy units and pre-Oligocene core facies in site U1435

据IODP Preliminary Report (2014) 修改

海岸平原沉积. 因此, 我们认为 U1435 站位前渐新统的沉积环境是由陆上近源三角洲相沉积逐渐向海陆过渡相沉积的演变.

通过井震标定及过井地震剖面的再解释, 岩性单元 I 中的单元 IA 和单元 IB 的分界对应于地震剖面的 T60, 是渐新统与中新统的分界. T60 界面在 U1435 站位处为一套“双强反射波组”的底界, 在 U1435 站位北部表现为轻微不整合, 是一套中强振幅反射的顶和一套弱振幅强连续反射的底, 在 U1435 站位南部表现为轻微不整合, 但地层厚度非常薄 (图7). 岩性单元 I 和 II 的分界对应于地震剖面的 T70, 是渐新统与前渐新统 (或始新统) 的分界. T70 界面在 U1435 站位处为一套“弱反射波组”的顶界, 在 U1435 站位北部是一套中强振幅反射的底界, 界面之下也表现为轻微不整合, 在 U1435 站位南部表现为明显的角度不整合, 显示剥蚀比较明显, 界面之下的地层倾角在 4.7° 左右 (图7). 岩性单元 II 发育在由小断裂控制的断陷中, 内部发育多套地震反射为强振幅、弱连续的

沉积体, 且多分布在断层根部, 推测为近源湖盆三角洲沉积.

综上所述, 我们认为 U1435 站位处 T70 为破裂不整合, 前始新统地层主要是晚始新世沉积, 由于 T70 界面之后岩浆岩体的多次侵入, 导致 T70 之后接受非常薄的沉积. 而晚始新世地层结构样式也进一步证实了沉积环境由陆相近源三角洲沉积相逐渐演变到海陆过渡相沉积的推断.

2.5 西北次海盆

U1499 站位西部的南海西北次海盆发育类似的由多个小型地堑、半地堑组成的复式地层构造单元, 前人认为沉积基底 Tg 是一套强反射地震波组的顶界 (丁巍伟等, 2009; 敖威等, 2012; 赵钊等, 2016; 钱星等, 2017), 而通过最新高精度二维地震剖面解释发现 Tg 应为该套强反射的底界, 其顶界应该是 T70 破裂不整合面 (图8). 具体的, 界面之下表现出削截反射特征, 主要存在于由向海倾斜断层控制的箕状半地堑的缓坡带, 表明存在不同程度的剥蚀; 界面之上为一

套强连续弱振幅的地震反射，推断为深海相沉积地层，且该套地层上超尖灭于 T70 界面之上(图8)。Tg — T70 之间的该套强振幅、弱连续或杂乱反射的地震相与 U1499 站位处的地震相非常相似。通过区域横向

对比，西北次海盆可能亦发育类似 U1499 站位的砾石层或粗粒近源沉积。不同的是，U1499 站位处小断陷的控凹断层是向陆倾斜的，而西北次海盆的小断陷的控凹断层是向海倾斜的。强反射的小断陷北部虽

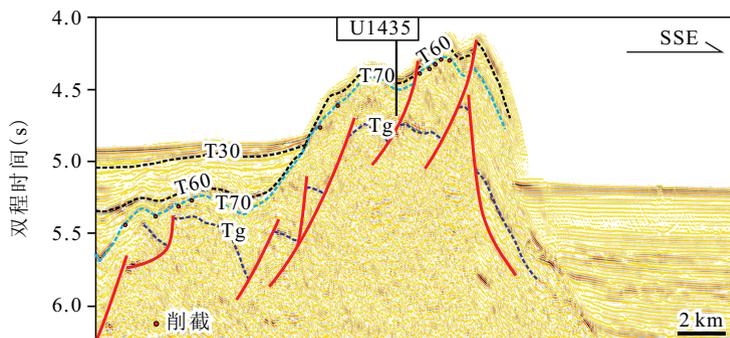


图 7 U1435 站位过井地震剖面的再解释

Fig.7 Reinterpretation of cross-well seismic profile in site U1435

地震剖面来自Sun *et al.* (2016), 剖面位置见图1

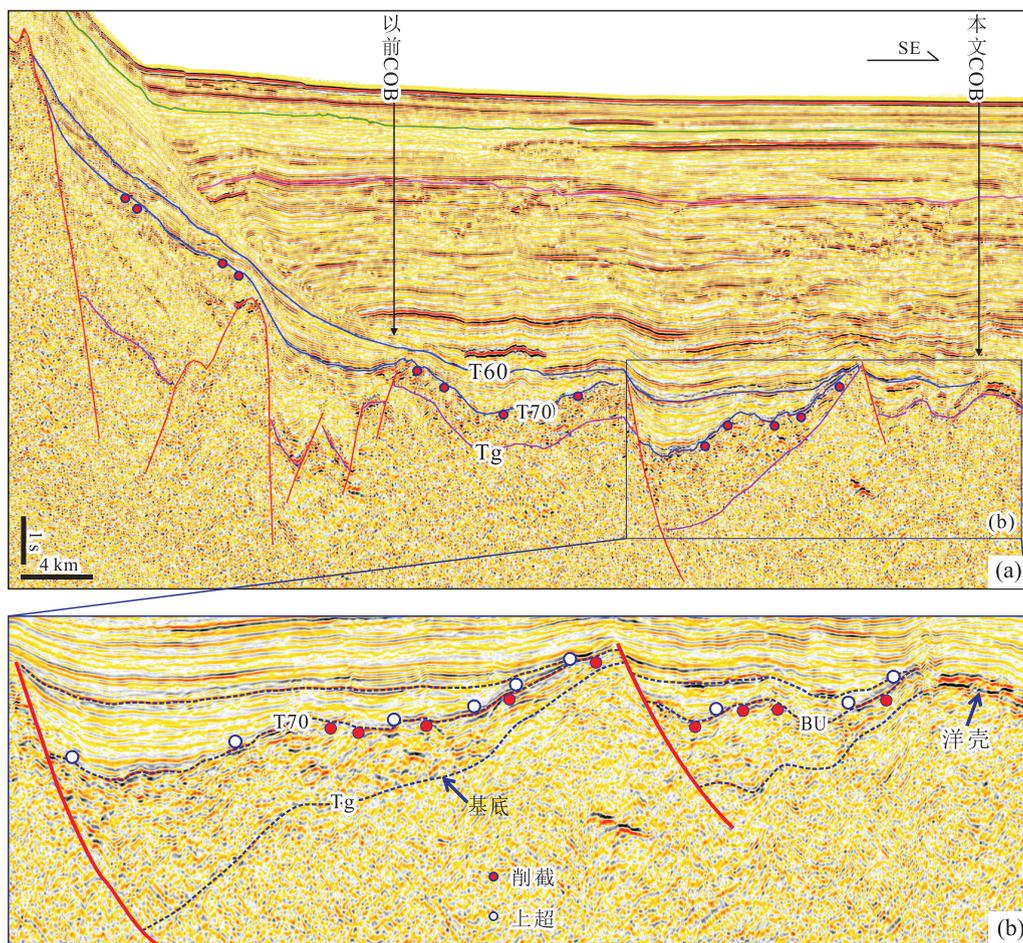


图 8 南海西北次海盆 Tg — T70 之间的地层发育特征

Fig.8 Stratigraphic pattern during Tg — T70 in the northwest sub-sea basin, South China Sea

地震剖面位置见图1; COB. 洋陆转换边界; BU. 破裂不整合

受沉积后期岩浆底辟侵入的影响, 不能准确识别凹陷结构类型, 但其地层以弱振幅、弱连续的地震反射为主, 剥蚀程度较低, 推断其为海陆过渡相沉积。

3 南海北部砾石层沉积时的古地貌特征分析

通过南海北部陆缘盆地地震剖面的连片解释, 依据各区域油气钻井资料, 分西沙海槽盆地、珠江口盆地和笔架盆地建立各自区域的时深转换公式, 计算得到南海北部陆缘盆地 Tg - T70 之间 (晚始新世—早渐新世) 的厚度分布图 (图9)。

晚始新世—早渐新世厚度整体较薄, 最大厚度在 500 m, 大部分地区沉积厚度小于 200 m, 结合同沉积时期的地层结构样式, 推测砾石层沉积时期南海北部陆缘具有浅水湖盆的古地貌特征。沉积厚度中心主要分布在两个区域, 即珠江口盆地区和西沙海槽盆地, 从油气钻井资料揭示的沉积相来看, 砾石层沉积时期珠江口盆地为陆相湖盆沉积, 而西沙海槽盆地由早期的陆相湖盆沉积逐渐演变到晚期的海陆过渡相沉积。从次级沉积厚度中心的展布方向来

看, 沉积中心整体呈 NE 向展布, 反映了砾石层沉积时期总体受 SE - NW 向伸展应力控制, 形成以半地堑或地堑相间的南北分带构造格局。此外, 次级沉积厚度中心分布整体呈零星分散式分布, 反映了砾石层沉积时期南海北部陆缘早期受神狐运动的影响, 即在均一伸展应力的影响下, 由无数条小型断裂的控制形成均匀分布的零星分散式沉积厚度中心, 晚期受南海北部拉张破裂的影响, 南海北部东西发生差异化沉降, 沉积厚度中心也出现差异性变化。

总之, 砾石层沉积时期, 古地貌特征整体呈现“南高北低”的特征, 与现今南海北部陆缘“北高南低”的地貌特征有明显的不同。因此, 从区域来看, 砾石层沉积时期物源搬运方向整体为由南向北搬运, 但从局部看来, 主要物源以湖盆周缘的近距离物源为主, 而沉积物源的母岩可能既有来自古隆起 (如西沙隆起区、中沙隆起区、神狐隆起区和南部隆起区等) 的变质岩或岩浆岩, 又有来自中生代地层剥蚀区 (如东沙隆起区) 的沉积岩。按南海扩张陆缘共轭关系推断, 砾石层沉积时期物源的母岩还可能来自礼乐中生界剥蚀区的沉积岩, U1499 站位处断陷湖盆砾石层沉积时期紧邻北部东沙隆起区和南部礼乐隆起区的

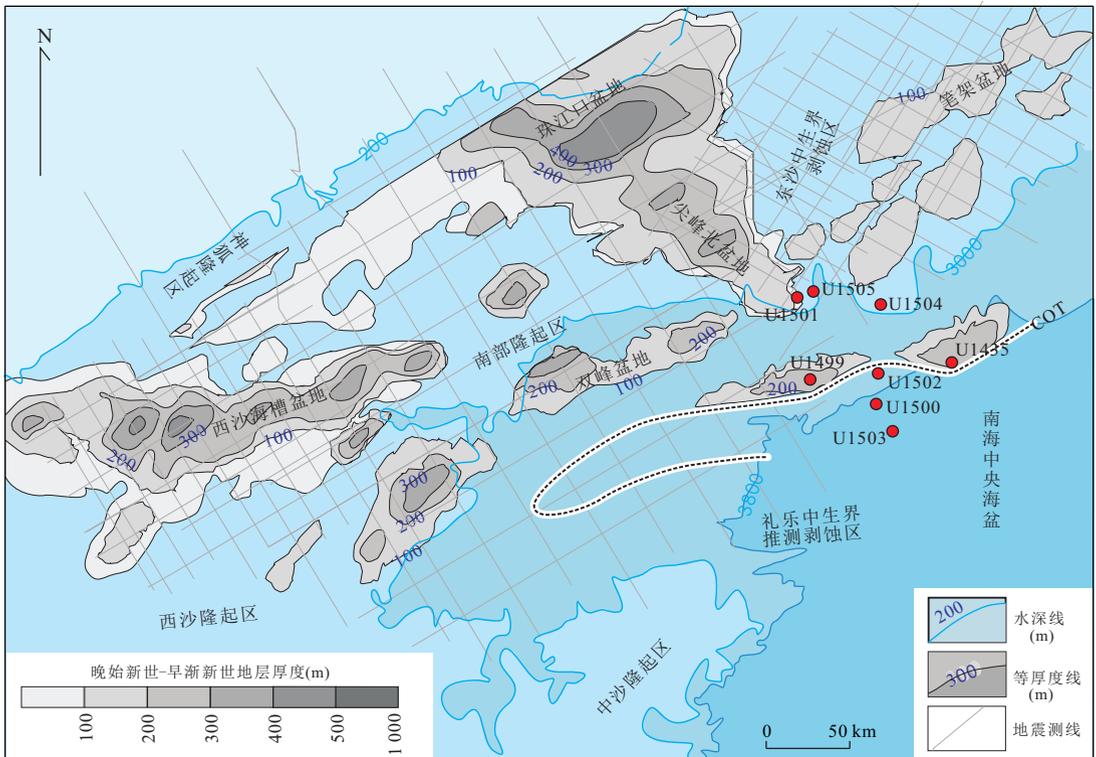


图9 南海北部陆缘 Tg - T70 (晚始新世—早渐新世) 的地层厚度

Fig.9 The thickness map during Tg - T70 (Late Eocene - Early Oligocene) in the northern continental margin of South China Sea

图幅位置见图1蓝色框

中生界剥蚀区, 即物源的母岩大部分都应该是被剥蚀中生代地层的沉积岩。

U1499 站位总结报告认为砾石层中的砾石成分主要为再剥蚀和再搬运而形成的砂岩或粉砂岩, 且单个岩性成分由火成岩、沉积岩和变质岩颗粒组成 (Sun *et al.*, 2018)。根据其成岩和变形程度来判断, 估计至少是上亿年形成的沉积岩, 即物源为被剥蚀的侏罗纪—白垩纪时期的沉积岩。该结果进一步验证了我们对于砾石层物源的判断。

4 讨论

在分析了 IODP367 U1499 站位、西沙隆起区、东沙隆起区、IODP349 U1435 站位和西北次海盆砾石沉积时期的地震地层结构样式及其沉积充填规律之后, 本文探讨以下几个问题: (1) 砾石层顶部的破裂不整合面 T70 的发育年龄, 是判断砾石层是什么时代沉积物的关键, 那么 T70 界面从东到西为什么不同? (2) U1499 站位处 T70 和 T60 界面重合, 使得 T60 界面在部分地区也呈现出破裂不整合的特征, 那么 T70 和 T60 界面为什么重合? (3) 3 760 m 水深处, 海底以下 930 m 钻遇的砾石层发育于由小型断裂控制的箕状断陷中, 且其顶界面 T70 破裂不整合面, 说明 U1499 站位所在的位置不是目前大多数学者认为的洋壳, 而是陆壳或洋陆转换带, 那么地震剖面上洋陆转换带应该如何识别?

4.1 南海北部的破裂不整合面

T70 界面为南海北部可进行区域横向对比的大型不整合面。目前普遍认为该界面是因南海北部海底开始扩张导致大陆破裂, 而形成的破裂不整合面。

然而 T70 界面的发育年龄在南海北部存在较大差异: 珠江口盆地 T70 界面普遍被认为是 32 Ma (米立军等, 2008); 琼东南盆地 T70 普遍被认为是 28.5 Ma (由 LS13-1-1 的古生物年龄证实) (杜同军, 2013; 刘新宇等, 2013); IODP349 U1435 站位处的 T70 界面为海陆过渡相沉积向海相沉积过渡的一个岩性突变不整合面 (分选较差的砂岩与黑色泥岩分界面), 年龄约为 33 Ma (Li *et al.*, 2015a)。IODP368 U1505 站位也钻遇一个岩性突变不整合面, 地震剖面上对应于 T70 和 T60 界面重合的一个不整合面, 界面年龄范围介于 23.8~32.0 Ma (Sun *et al.*, 2016)。IODP367 U1499 站位钻遇岩性不整合面, 地震剖面上也对应于 T70 和 T60 界面重合的不整合面, 界面年龄范围介于 28.4~32.0

Ma 之间 (Sun *et al.*, 2016)。由于 U1505 和 U1499 站位均钻遇 T70 和 T60 界面的重合面, 所以我们采取其界面附近的最老年龄代表 T70 界面的年龄, 因此从东到西来看, T70 界面在 U1435 站位为 33 Ma, 珠江口盆地为 32 Ma, U1505 和 U1499 界面年龄范围也介于 28.54~32.00 Ma, 琼东南盆地为 28.4 Ma。而 Cameselle *et al.* (2015) 研究认为南海西北次海盆的海底扩张不是大陆裂陷的突然破裂, 而是海底扩张中心由东向西的渐进式蔓延。因此本文认为由于南海北部由东向西渐进式蔓延的海底扩张, T70 界面的年龄应该是从东到西逐渐变小, 即从东部 33 Ma 逐渐减小的西部的 28.4 Ma, 其界面具有较大的穿时性。

4.2 局部区域 T70 界面和 T60 界面的重合

IODP349 U1435 位于洋陆变换带边界附近的一个构造高地, 钻遇的 T60 界面与 T70 界面虽没有完全重合, 但仅钻遇 41.61 m 的渐新统地层, 在地震剖面上对应于一个半同相轴 (图 7)。地震解释发现 U1435 站位渐新世沉积较薄, 与 T70 界面之后石申海山的岩浆侵入有关, 岩浆的侵入使得 T70 界面之前的地层被抬高变成构造高地, 在深海背景下接受较少的沉积。

IODP368 U1505 位于南海北部陆缘的外缘隆起带, 钻遇的 T60 界面之后的新近系沉积地层厚度不足 400 m, 古近系虽遭受区域严重剥蚀, 但其地层厚度从地震剖面上看仍明显厚于新近系。北部陆缘外缘隆起带的地质属性比较复杂, 多由基底杂岩、岩浆侵入体或这些地质体的复合体所组成。由于南海北部陆缘细颈化带至远端构造带发育大规模的拆离断裂系统导致外缘隆起带发生一定程度的构造隆起变形, 以及 T70 界面 (或海底开始扩张) 之后外缘隆起带的底部岩浆的活动, 均使得外缘隆起带经历了区域构造隆升, 整体遭受严重剥蚀, T70—T60 时期接受非常少的海相或海陆过渡相沉积, 导致了地震剖面上 T70 界面与 T60 界面的重合。

IODP367 U1499 站位位于洋陆变换带边界附近的一个小型构造高地, 砾石层沉积之后短短几米厚的地层, 年龄就出现快速变化, 之后就直接进入深海相沉积, 使得在地震剖面上 T70 界面与 T60 界面重合。地震解释发现 U11499 站位所处的小型构造高地的形成, 也与 T70 界面之后基底岩浆侵入有关 (图 2)。

因此, 我们推测南海北部陆缘外缘隆起带或洋陆转换带 T70 界面与 T60 界面的重合, 可能多与构

造隆起变形或岩浆底辟侵入有关。

4.3 洋陆转换带的位置

洋陆转换边界 (continent ocean boundaries, COB) 的识别用于区分特殊的陆壳与洋壳类型 (孙珍等, 2016)。基于地球物理资料的观测调查大陆边缘从陆壳到洋壳的截然变化, 进而大致确定 COB 的位置, 但是其误差通常在 10~100 km (Eagles *et al.*, 2015)。然而通常情况下, 洋壳和陆壳之间的过渡不是一个截然的界面, 以 Iberia 边缘为例, 存在一个宽 170~200 km 的过渡区域, 其既不属于正常洋壳、也不属于陆壳, 称之为洋陆转换带 (continent ocean transition zone, COT) (任建业等, 2015)。

就南海而言, 近十几年内不同的学者通过反射地震、折射地震 (ocean bottom seismometers, OBS) 以及重磁等资料识别了南海的洋陆转换带 (COT) 位置, 然而不同的学者得出的结果之间存在较大的差异 (Wang *et al.*, 2006; Zhou and Yao, 2009; Chen *et al.*, 2016; 朱俊江等, 2012; Chen, 2014; Bai *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015b), 其中 Wang *et al.* (2006)、朱俊江等 (2012) 和 Gao *et al.* (2015) 认为南海北部的洋陆转换带是东西长约 650 km, 南北宽约 250 km 的区域, 其余大部分学者认为南海的洋陆转换带主要在水深约 3 000 m 的位置。而 IODP367/368 钻探结果认为南海北部陆缘为窄洋陆转换带型破裂边缘, 非一个跨度很大的区域。U1499 站位的水深为 3 760 m, 在 T70 界面之下钻遇小型断陷陆相湖盆内发育的砾石层, 反映了 U1499 站位处还不是洋壳, 而是陆壳或洋陆转换带, 这与南海北部洋陆转换带位于 3 000 m 左右的认识相悖。如图 8 所示, 南海西北次海盆的洋陆转换带应位于向海倾斜的小断层控制的箕状断陷的南部位置, 而非以前认识的 3 000 m 水深左右且有岩浆底辟侵入的位置。按此识别方法, 南海西北次海盆的洋陆转换带至少应向南推进 100 km 左右, 反映了西北次海盆当时很窄, 南北向可能只有 25~50 km 宽, 至少并非现今约 250 km 的宽度, 因此南海北部洋陆转换带的位置仍需进一步深入研究。

5 结论

(1) U1499 钻遇的砾石层应是晚始新世—早渐新世的沉积, 多发育于一些由小断裂控制的断陷湖盆周缘或陆上山间河道中, 多以陆相近源三角洲平原相沉积为主。

(2) U1499 砾石层的物源不应是来自华南大陆, 而主要来自砾石层沉积时期湖盆周缘的东沙、礼乐中生代地层剥蚀区。

(3) T70 应是南海北部伴随海底由东向西的渐进式扩张而形成的破裂不整合, 其界面可能具有较大穿时性, 年龄为 33.0 Ma 到 28.4 Ma 之间, 且具有东早西晚的特征。

(4) T70 和 T60 界面在南海北部陆缘的近端带、细颈化带和远端带都没有重合, 而在外缘隆起带或洋陆转换带出现界面的重合, 可能多与外缘隆起带构造隆起变形或岩浆底辟侵入有关。

(5) 南海北部洋陆转换带并非以前认识的 3 000 m 水深左右且有岩浆底辟侵入的位置, 而应该位于水深更深的向海倾斜的小断层控制的箕状断陷的南部位置。

致谢: 衷心感谢两位匿名审稿人的建设性意见。

References

- Ao, W., Zhao, M. H., Qiu, X. L., et al., 2012. Crustal Structure of the Northwest Sub-Basin of the South China Sea and Its Tectonic Implication. *Earth Science*, 37(4): 779–790 (in Chinese with English abstract).
- Bai, Y., Wu, S., Liu, Z., et al., 2015. Full-Fit Reconstruction of the South China Sea Conjugate Margins. *Tectonophysics*, 661: 121–135.
- Barckhausen, U., Engels, M., Franke, D., et al., 2014. Evolution of the South China Sea: Revised Ages for Breakup and Seafloor Spreading. *Marine and Petroleum Geology*, 58(Part B): 599–611.
- Barckhausen, U., Roeser, H. A., 2004. Seafloor Spreading Anomalies in the South China Sea Revisited. In Clift, P., Wang, P., Kuhnt, W., et al., eds., *Continent-Ocean Interactions within East Asian Marginal Seas. Geophysical Monograph*, 149: 121–125.
- Briais, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated Interpretation of Magnetic Anomalies and Seafloor Spreading Stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 98B: 6299–6328. <https://doi.org/10.1029/92JB02280>
- Cai, Z. R., Liu, W. L., Wan, Z. F., et al., 2010. Determination of Cenozoic Tectonic Movement in the Northern South China Sea and the Relationship between Oil-Gas Reservoir and Tectonic Movement. *Marine Science Bulletin*, 29(2): 161–165 (in Chinese with English abstract).
- Cameselle, A. L., Ranero, C. R., Franke, D., et al., 2015. The Continent-Ocean Transition on the Northwestern South China Sea. *Geophysical Research Abstracts*, 16: EGU2014-14917.
- Chen, F., Lu, H. F., Liu, J., 2016. Sedimentary Geochemical Response to Gas Hydrate Episodic Release on the Northeastern Slope of the South China Sea. *Earth Science*, 41(10): 1619–1629 (in Chinese with English abstract).

- Chen, L., 2014. Stretching Factor Estimation for the Long-Duration and Multi-stage Continental Extensional Tectonics: Application to the Baiyun Sag in the Northern Margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 611: 167–180.
- Cullen, A., Reemst, P., Henstra, G., et al., 2010. Rifting of the South China Sea: New Perspectives. *Petroleum Geoscience*, 16: 273–282.
- Ding, W. W., Li, M. B., Zhao, L. H., et al., 2009. Cenozoic Tectono-Sedimentary Characteristics and Extension Model of the North-West Sub-Basin, South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 147–156 (in Chinese with English abstract).
- Du, T. J., 2013. Sequence Stratigraphic and Deep Water Sedimentary Characteristic in the Qiongdongnan Basin (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao, 19–82 (in Chinese with English abstract).
- Eagles, G., Pérez-Díaz, L., Scarselli, N., 2015. Getting over Continent Ocean Boundaries. *Earth Science Reviews*, 151: 244–265.
- Franke, D., Savva, D., Pubellier, M., et al., 2014. The Final Rifting Evolution in the South China Sea. *Marine Petroleum Geology*, 58: 704–720.
- Gao, J. W., Wu, S. G., McIntosh, K., 2015. The Continent-Ocean Transition at the Mid-Northern Margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 654: 1–19.
- IODP Preliminary Report, 2014. South China Sea Tectonics: Opening of the South China Sea and Its Implications for Southeast Asian Tectonics, Climates, and Deep Mantle Processes since the Late Mesozoic. International Ocean Discovery Program Preliminary Report, 349.
- Larsen, H. C., Mohn, G., Nirrengarten, M., et al., 2018. Rapid Transition from Continental Breakup to Igneous Oceanic Crust in the South China Sea. *Nature Geoscience*, 11: 782–789.
- Lei, C., Ren, J. Y., Zhang, J., 2015. Tectonic Province Divisions in the South China Sea: Implications for Basin Geodynamics. *Earth Science*, 40 (4): 744–762 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. F., Li, J., Ding, W., et al., 2015a. Seismic Stratigraphy of the Central South China Sea Basin and Implications for Neotectonics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120: 1377–1399.
- Li, C. F., Lin, J., Kulhanek, D. K., et al., 2015b. Site U1435. In: Li, C. F., Lin, J., Kulhanek, D. K., eds., The Expedition 349 Scientists, South China Sea Tectonics. Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 349: College Station, TX, International Ocean Discovery Program. <https://doi.org/10.14379/odp.proc.349.107.2015>
- Liu, X. Y., Zhang, D. J., Zuo, Q. M., et al., 2013. The Research of Biostratigraphy in the Deepwater Area of Qiongdongnan Basin, Northwestern South China Sea. *Journal of Stratigraphy*, 37(4): 571–572 (in Chinese).
- Mi, L. J., Zhang, G. C., Shen, H. L., et al., 2008. Eocene-Lower Oligocene Sedimentation Characteristics of Baiyun Sag in the Deep Water Area of Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 29(1): 29–34 (in Chinese with English abstract).
- Qian, X., Zhang, L., Wu, S. G., et al., 2017. Sedimentary Response to Tectonic Evolution of the Northwest Sub-Basin, South China Sea. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(2): 248–257 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Pang, X., Lei, C., et al., 2015. Ocean and Continent Transition in Passive Continental Margins and Analysis of Lithospheric Extension and Breakup Process: Implication for Research of the Deepwater Basins in the Continental Margins of South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 102–114 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Stock, J., Klaus, A., et al., 2018. Expedition 367 Preliminary Report: South China Sea Rifted Margin. International Ocean Discovery Program. <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.367.2018>
- Sun, Z., Liu, S. Q., Pang, X., et al., 2016. Recent Research Progress on the Rifting-Breakup Process in Passive Continental Margins. *Journal of Tropical Oceanography*, 35(1): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Stock, J., Jian, Z., et al., 2016. Expedition 367/368 Scientific Prospectus: South China Sea Rifted Margin. International Ocean Discovery Program. <https://doi.org/10.14379/iodp.sp.367368.2016>
- Wang, G. H., Wang, H., Gan, H. J., et al., 2016. Paleogene Tectonic Evolution Controls on Sequence Stratigraphic Patterns in the Fushan Sag, Northern South China Sea. *Journal of Earth Science*, 27(4): 654–669.
- Wang, T., Chen, M., Lee, C., et al., 2006. Seismic Imaging of the Transitional Crust across the Northeastern Margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 412: 237–254.
- Xie, X. N., Ren, J. Y., Wang, Z. F., et al., 2015. Difference of Tectonic Evolution of Continental Marginal Basins of South China Sea and Relationship with SCS Spreading. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 77–87 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., 2010. Tectonic Evolution of Deepwater Area of Northern Continental Margin in South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4): 528–533 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Wang, P. J., Wu, J. F., et al., 2015. Tectonic Cycle of Marginal Oceanic Basin: A New Evolution Model of the South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 27–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Zhao, Z. G., Shen, H. L., et al., 2016. Tectonic Evolution and Hydrocarbon Geological Conditions of Shuangfeng Basin in the Ultra-Deep Water Area of the Northern South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 37(Suppl.1): 47–57 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Yao, B., 2009. Tectonics and Sedimentary Basins of the South China Sea: Challenges and Progresses. *Journal of Earth Science*, 20: 1–2. <https://doi.org/10.1007/s12583-009-0001-8>
- Zhu, J. J., Qiu, X. L., Xu, H. L., et al., 2012. Seismic Reflection Characteristic and Structure Unit Division of an Ocean-Continent Transition Zone in the Northern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 31(3): 28–34 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

敖威, 赵明辉, 丘学林, 等, 2012. 南海西北次海盆及其邻区地壳结构和构造意义. *地球科学*, 37(4): 779–790.

- 蔡周荣, 刘维亮, 万志峰, 等, 2010. 南海北部新生代构造运动厘定及与油气成藏关系探讨. 海洋通报, 29(2): 161-165.
- 陈芳, 陆红锋, 刘坚, 2016. 南海东北部陆坡天然气水合物多期次分解的沉积地球化学响应. 地球科学, 41(10): 1619-1629.
- 丁巍伟, 黎明碧, 赵俐红, 等, 2009. 南海西北次海盆新生代构造—沉积特征及伸展模式探讨. 地学前缘, 16(4): 147-156.
- 杜同军, 2013. 琼东南盆地层序地层和深水区沉积充填特征 (博士学位论文). 青岛: 中国海洋大学, 19-82.
- 雷超, 任建业, 张静, 2015. 南海构造变形分区及成盆过程. 地球科学, 40(4): 744-762.
- 刘新宇, 张道军, 左倩媚, 等, 2013. 南海北部西区琼东南盆地深水区生物地层研究进展——以 LS33-1-1 井为例. 地层学杂志, 37(4): 571-572.
- 米立军, 张功成, 沈怀磊, 等, 2008. 珠江口盆地深水区白云凹陷始新统——下渐新统沉积特征. 石油学报, 29(1): 29-34.
- 钱星, 张莉, 吴时国, 等, 2017. 南海西北次海盆构造演化的沉积响应. 大地构造与成矿学, 42(2): 248-257.
- 任建业, 庞雄, 雷超, 等, 2015. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的启示. 地学前缘, 22(1): 102-114.
- 孙珍, 刘思青, 庞雄, 等, 2016. 被动大陆边缘伸展——破裂过程研究进展. 热带海洋学报, 35(1): 1-16.
- 解习农, 任建业, 王振峰, 等, 2015. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系. 地学前缘, 22(1): 77-87.
- 张功成, 2010. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征. 石油学报, 31(4): 528-533.
- 张功成, 王璞珺, 吴景富, 等, 2015. 边缘海构造旋回: 南海演化的新模式. 地学前缘, 22(3): 27-37.
- 赵钊, 赵志刚, 沈怀磊, 等, 2016. 南海北部超深水区双峰盆地构造演化与油气地质条件. 石油学报, 37(增刊 1): 47-57.
- 朱俊江, 丘学林, 徐辉龙, 等, 2012. 南海北部洋陆转换带地震反射特征和结构单元划分. 热带海洋学报, 31(3): 28-34.