

南海共轭大陆边缘发育演变时空特征的非均性与目标钻探井位

祝文君,杜学鑫,尚鲁宁,李攀峰,潘军,祁江豪,孟元库,胡刚

Spatiotemporal heterogeneity of the conjugate continental margin evolution in the South China Sea and future ocean drilling wells

ZHU Wenjun, DU Xuexin, SHANG Luning, LI Panfeng, PAN Jun, QI Jianghao, MENG Yuanku, and HU Gang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062001

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in



关注微信公众号,获得更多资讯信息

祝文君, 杜学鑫, 尚鲁宁, 等. 南海共轭大陆边缘发育演变时空特征的非均性与目标钻探井位 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 110-123. ZHU Wenjun, DU Xuexin, SHANG Luning, et al. Spatiotemporal heterogeneity of the conjugate continental margin evolution in the South China Sea and future ocean drilling wells[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 110-123.

南海共轭大陆边缘发育演变时空特征的非均性与目标 钻探井位

祝文君1,2,杜学鑫1,2,尚鲁宁2,李攀峰2,潘军2,祁江豪2,孟元库1,胡刚1,2

山东科技大学地球科学与工程学院,青岛 266590
 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266237

摘要:南海是西太平洋最大的边缘海之一,位于欧亚板块、菲律宾海板块和印度-澳大利亚板块的转换交接部位,也是太平洋构造域与特提斯洋构造域全球两大构造体系的交汇点,蕴含着丰富的前沿地球科学问题。聚焦南海区域4+1次大洋钻探航次 (ODP184、IODP349、IODP367、IODP368及 IODP368X),系统总结了中生代以来南海深海盆从陆缘张裂、海底扩张,到气候环境和沉积演变取得的重要进展。基于南海共轭大陆边缘在形成演化过程中时空分布不均一性,凝练了陆缘伸展减薄过程、洋陆过渡带张破裂过程、岩浆活动动力学机制和莫霍面优选等4个科学主题。以往的大洋钻探多数限于南海大陆边缘北部中段,对整个南海的控制约束作用有限。针对上述科学问题,对南海相关数据进行了详细解释分析,在南海东北次海盆、西南次海盆和西北次海盆提出9个科学钻探站位,以期全面、完整和具体地揭示南海生命史。在今后工作中坚持深浅结合、难易结合的原则,开展实施南海大洋钻探,不仅具有支撑未来天然气水合物钻采船在南海海域钻探的现实需求,而且对刻画南海完整生命史具有重要科学意义。

关键词:大洋钻探;构造地质;共轭大陆边缘;莫霍面;中国南海 中图分类号:P736.1 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062001

Spatiotemporal heterogeneity of the conjugate continental margin evolution in the South China Sea and future ocean drilling wells

ZHU Wenjun^{1,2}, DU Xuexin^{1,2}, SHANG Luning², LI Panfeng², PAN Jun², QI Jianghao², MENG Yuanku¹, HU Gang^{1,2}

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

Abstract: The South China Sea is one of the largest marginal seas in the Western Pacific. It is located at the transition and junction of the Eurasian Plate, the Philippine Sea Plate and the Indo-Australian Plate and contains a wealth of cutting-edge geoscience issues. Based on the previous ocean drilling expeditions (ODP184, IODP349, IODP367, IODP368, and IODP368X) in the South China Sea, the important progresses were summarized systematically since the Mesozoic, including the basin rifting, seafloor spreading, climate change, and sedimentary evolution respectively. Focusing on the Spatiotemporal heterogeneity during the evolutionary process of the conjugate continental margin, four scientific themes are proposed, such as the extension and thinning process of the continental margin, the rift process of the ocean-continent transition zone, the dynamic mechanism of magmatic activity. Most of the previous oceanic drilling expeditions are constrained to the middle part of the northern continental margin of the South China Sea, and have limited control on the entire South China Sea. In order to solve the above scientific problems, 9 drilling sites are proposed in the northeast sub-basin, southwest sub-basin and northwest sub-basin of the South China Sea through the detailed interpretation of the relevant data. Thus, a comprehensive, complete and specific evolution process of the South China Sea will be revealled. Adhering to the principle of combining the depth and the shallow, and the combination of difficulty and ease, the proposed sites will be carried out for the implementation of the South China Sea ocean drilling in the future, which not only has the practical needs to support the future drilling and mining of natural gas hydrate in the South China Sea, but also has important scientific significance for depicting

^{1.} School of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

资助项目:中国地质调查局海洋地质调查项目(DD20190236, DD20221710);自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室开放基金 (2021COSIMZ003)

作者简介:祝文君(1998一),硕士研究生,主要从事海洋地质学研究, E-mail: 1094569539@qq.com

通讯作者:胡刚(1979一),博士,正高级工程师,主要从事海洋沉积学研究, E-mail: hugang@mail.cgs.gov.cn

收稿日期:2022-06-20; 改回日期:2022-08-10. 张现荣编辑

the complete life history of the South China Sea.

Key words: Ocean drilling; tectonic geology ; conjugate continental margin; Moho discontinuity; South China Sea

1 区域地质背景

南海位于欧亚板块、菲律宾海板块和印度-澳 大利亚板块的转换交接部位,也是太平洋构造域与 特提斯洋构造域全球两大构造体系的交汇点,其东 侧处于西太平洋弧后扩张的构造背景^[1],西侧受 (古)特提斯洋关闭^[23]和印支半岛挤出^[4]的影响,构 造活动复杂(图1)。以中南断裂为界,南海可以分 为西南、西北和东部3个次海盆。中生代以前南海 及东亚大陆主要伴随着古太平洋板块的俯冲、俯冲 停止与后撤的构造过程,亚欧大陆东南缘由主动大 陆边缘转变为被动大陆边缘,然而对于中生代俯冲 带在南海的具体位置还存在不确定性^[5]。南海周 边,包括东南亚地区,新生代主要受三大板块活动 和重组事件的影响。新生代南海起源于华南大陆 裂解,继而发生海底扩张、板块俯冲、陆陆碰撞,近 乎囊括了威尔逊旋回的所有过程。大洋钻探揭示, 东部次海盆约 33 Ma 开始扩张,在约 23.5 Ma 发生 一次扩张轴的跃迁,与此同时西南次海盆开始扩张 并不断向西南方向迁移至 16 Ma 停止扩张,而东部 次海盆于 15 Ma 停止扩张^[6]。

南海是西太平洋最大的边缘海之一,是一个 EN-WS 走向的半封闭海,总面积约 350 万 km²,南海 整体上呈菱形, EN-WS 向延伸,南北跨越 2 000 km, 东西横跨约 1 000 km,南海海底地形从周边向中央 倾斜,水深逐渐增大,由外向内由浅到深依次为陆 架和岛架、陆坡和岛坡、深海盆地地形单元,其中,陆 架和岛架总体上地形平坦,地貌上以陆架平原为 主,发育有水下浅滩、水下三角洲、侵蚀洼地和阶地等。



Fig.1 Schematic map of geomorphology and tectonics of the South China Sea^[7]

受欧亚板块、太平洋板块和印-澳板块的复杂 动力学作用,其地质构造复杂,火山、地震频发,在 长期的内营力和外营力作用下,形成了复杂多变的 海底地貌。南海海底地形从周边向中央倾斜,依次 分布着海岸带、陆架、陆坡和深海盆地等地貌单 元,海岸带典型地貌单元主要包括海滩、水下岸 坡、海湾堆积平原、水下三角洲等;陆架和陆坡典 型地貌为陆架堆积-侵蚀平原、陆架堆积平原、陆架 侵蚀平原、大型水下浅滩等;陆坡或岛坡是南海地 貌类型最复杂的区域,其次级地貌类型主要有陆坡 斜坡、陆坡海脊、大型峡谷群和陆坡阶地等;深海 盆地地貌主要以平原地貌为主,发育有深海平原、 海沟、深海海脊以及线状或链状海山等大洋型地貌。

2 南海大洋钻探与南海生命史

自 1999年中国在南海首次实施大洋钻探 ODP184航次之后,南海先后共计开展了 4+1 个大 洋钻探航次,截至目前, ODP 与 IODP 在南海钻井 共 18 口井,其中 ODP 钻井未曾钻遇结晶基底,而 在 IODP349、367、368、368X 航次中共有 6 处钻探 到了玄武岩基底,分别为 U1431、U1433、U1434、 U1500、U1502、U1503,具体钻探位置见图 2。

2.1 大洋钻探计划 184 航次

1999 年实施的 ODP184 航次是在中国海域的首次深海钻探,通过对南海半深海海域沉积物连续取芯,试图揭示长时间尺度气候演变尤其是晚新生代东亚季风的演变,及其与地质构造运动的关系。

亚洲季风系统是全球气候的重要组成部分,而 南亚-东南亚季风气候的演变与喜马拉雅-青藏高原 造山带的生长、边缘海盆的打开和关闭以及全球气 候的变化都有关。而中国南海位于亚欧大陆东部, 太平洋西侧,经历两季季风,其沉积物记录了构造 造山带的侵蚀和风化以及全球和区域气候的变化, 是记录古海洋学对冬季和夏季季风反应的理想位 置,因此 ODP184 航次旨在恢复南海南北部的沉积 物剖面,以提供能够阐明从千年尺度到构造尺度等





不同时间尺度上的区域和全球气候变化的记录。 ODP184具体的科学主题为^[9]:①记录南海新生代的 历史,包括生物地层学、岩石地层学、年代学、古气 候学和古海洋学;②在构造时间尺度上重建东亚季 风在新生代晚期的演化和变异;③识别以及更好地 理解构造隆起、侵蚀风化、半远洋沉积以及气候变 化,包括亚洲季风演化以及新近纪全球变冷之间的 联系。

1143 站位目的是在海表温度(SST)相对稳定的 西太平洋暖池区提供新近纪以来古海洋学记录,重 建横跨南海的海温梯度,反映该地区的季节性发 展;站位1144至1148主要是为了恢复连续的半远 洋沉积序列,有助于在更高分辨率的时间尺度上重 建古海洋历史。其中站位1144可以恢复连续的半 深海沉积物序列,是重建更新世中晚期高分辨率地 质历史的理想站位,且为重构南海海温梯度提供北 部约束条件;站位1145用来重构第四纪南海水体 深度梯度;站位1146利用相对较浅的斜坡盆地和 相对适中的沉积速率恢复连续的半深水沉积序列, 重建中新世中上段的东亚季风史;站位1147旨在 恢复1148站位失去的最上层剖面记录;站位1148 可能反映了南海盆地海底扩张早期陆源沉积物的 输运^[9]。

总体来说,ODP184 航次恢复了记录过去 31 Ma 以来南海地质历史的半远洋沉积物序列;首次提供 了相对富含碳酸盐的细粒沉积物的高分辨沉积记 录。南海北部渐新世和中新世的分界线(1148 站 位)以沉积变形、岩性突变和地层间断(约 24~ 27 Ma)为特征,有助于了解该地区新生代构造和气 候变化的时间和性质。低陆源输入和部分高碳酸 盐岩产量导致中新世北部斜坡的沉积环境与南部 礁区相似;中新世以后,南海南北部的沉积速率有 显著差异^[9]。

2.2 综合大洋钻探计划 349 航次

ODP184 航次主要针对南海形成后沉积地层的 钻探,提供了古气候与古环境变化的直接证据,但 南海海盆开启和关闭的时间问题制约了对东亚地 质构造和古环境演化研究的深入。因此,以"南海 海底扩张"为主题的 IODP349 航次于 2014 年实施, 揭示南海扩张过程及其对晚中生代以来东南亚构 造、气候和深部地幔过程的启示,共设置 5 个站位 (1431—1435),其中 3 个站位(U1431、U1433 和 U1434)位于古扩张脊附近,其余两个站位(U1432、 U1435)靠近大陆的洋陆转换边界附近(图 2)。

南海海盆洋壳的年龄受磁异常、海洋测深以及 热流的影响。而南海打开时间以及事件的不确定 性阻碍了对东南亚其他地质活动的了解,包括从中 生代俯冲到新生代裂谷作用的地球动力学转变、南 海海盆新生代的打开机制、海洋地壳增生与地幔演 化、古海洋学和沉积响应,解决这一系列问题的关 键是确定南海扩张的起止时间。基于此, IODP349 航次的科学目标主要包括[10]:①建立不同区域和特 点各异的大洋地壳增生模式,检验南海从中生代活 动大陆边缘到新生代被动大陆边缘过渡的地球动 力学假说;②揭示海盆中洋壳性质并了解与洋壳和 深部地幔过程伴生的构造挤压及岩浆活动:③开发 一个与各种构造事件和区域气候过程相连接的完 整南海 3D 沉积与沉降模型;④增加对大陆边缘发 展进程相关的地幔和岩石圈相互作用等地球动力 学的深入了解。

IODP349 航次首次成功在南海洋盆基底进行取 芯,并在 U1431、U1433 和 U1434 三个地点取得玄 武岩。349 航次获得以下初步主要结论:东部次海 盆与西南次海盆之间海床的伸展终末年龄差异不 大,扩张的初步停止年龄约为中新世早期(16~20 Ma); 在 U1435 站位钻探发现一个约 32 Ma 明显的不整 合面,上部为海相沉积,下部为分选差的砂岩和黑 色泥岩,这种不整合可能与南海最初打开期间的大 陆张裂有关,因此,海底扩张开始时间估计在 32~33 Ma 左右; U1431 站位钻探得到的火山碎屑 角砾岩和砂岩的年代为中中新世晚期至晚中新世 早期(约8~13 Ma),表明海山火山活动始于海底扩 张停止后的几百万年,揭示了正在消亡的扩张中心 岩浆来源的时间演化过程^[10]。

2.3 大洋发现计划 367/368/368X

南海已有航次分别解决了扩张开始与停止时 间以及扩张后沉积过程与古环境响应的科学主题, 但南海扩张的机制和张破裂过程等依然存疑。根 据之前的地震探测以及大洋钻探,对于大陆岩石圈 伸展破裂有两个端元模型:富岩浆型与贫岩浆型。 为了检验南海北部陆缘张裂到底属于哪一种模式, 2017年相继开展了以"检验大陆裂解期间岩石圈的 减薄过程:在南海张裂陆缘钻探"科学主题的 IODP367/368/368X 航次。 IODP367 航次钻取了 U1499、U1500两个站位;IODP368 航次钻取了 U1501—U1505共5个站位,后续 IODP增加了一 个补充航次368X,3个航次选取站位均位于南海北 部大陆边缘附近(图 2)。 IODP367/368 航次针对远端带盆地、洋陆过渡 带、早期洋壳以及成熟洋壳进行钻探站位选择,聚 焦解决南海北部陆缘存在的重要科学问题^[11-12]: ①研究大陆张破裂地质历史过程;②与其他非火山 型或贫岩浆型大陆裂谷边缘进行比较,检验现有大 陆张裂模型;③进一步了解南海和东南亚在新生代 的古海洋学和环境演变。以构造和基底为主要钻 探目标的沉积物岩心将提供有关东南亚边缘新生 代区域环境演变信息。

IODP367/368/368X 航次首次获得了南海新生代 陆海变迁的全部沉积记录^[11-13],并在U1500、U1501、 U1502、U1504分别钻遇了不同类型的基底岩石,包 括前新生代(很可能是中生代)沉积岩、前新生代基 性—超基性变质岩、破裂最早期蚀变玄武岩、早期 洋盆新鲜玄武岩,为研究陆地向海洋演变、提出新 的陆缘破裂类型提供了第一手的岩石学和地球化 学证据。

航次初步证实南海大陆岩石圈破裂模式与大 西洋典型火山和非火山型模式不同。南海陆缘裂 谷期就有强烈的岩浆作用^[14],也获得了扩张脊型玄 武岩(MORB),陆洋转换迅速,建立了南海张裂过程 的板缘裂解新观点。IODP368 航次在 U1502 站位 发现了 40 MaBP 前的深水有孔虫和玄武岩^[15],说明 南海在破裂之前已经有深水裂谷发育和岩浆作 用。考虑到南海海盆扩张东早西晚,结合最新的地 震层析成像结果^[16],Huang^[17]提出东亚海与华南之 间的斜滑俯冲后撤应该是南海打开的驱动力,但由 于东亚海和古南海都已下沉至地幔转换带及以下^[18], 因此短时间内很难判断哪个板块直接驱动。

2.4 南海大洋钻探对关键科学问题的破解

大洋钻探航次在南海研究取得了重大进展: ODP184 航次成功地揭示了南海 30 Ma 以来的气候 环境演变,发现低纬区水汽交换驱动的水循环和碳 循环周期性,提出了气候演变低纬驱动的新观点^[19]。 首次钻进了渐新世沉积层序(1148 站位),并在中新 世/渐新世界面发现 24~27 Ma 沉积扰动不连续或 沉积缺失,记录南海北坡一个重要的沉积和构造事 件^[20]。

IODP 349 航次首次实现对南海深海盆大洋玄 武岩的钻探和取芯, 澄清了有关南海海盆扩张历史 的争论^[6], 发现了火成碳酸岩^[21]、深海红层和大规模 深海浊流沉积。洋底玄武岩的年龄支持东部次海 盆及西南次海盆分别在 16 和 15 Ma 停止扩张。东 部次海盆洋中脊在海底扩张结束后的 5 Ma 内(7.4~ 12.8 Ma)仍广泛发育火山作用。在洋陆过渡带证实 了 33 Ma存在一个明显不整合面(破裂不整合),该 界面指示了南海由大陆地壳破裂到海底扩张开始 的时间为 33 Ma,证实了南海自东向西渐次打开。

IODP367/368/368X初步航次成果揭示了南海从 大陆岩石圈破裂到初始海底扩张的岩浆过程并不 是大西洋式的火山型或非火山型(贫岩浆型)。对 南海北坡而言,其大陆在超伸展-破裂过程中并未率 先出现蛇纹岩地幔剥露,而是在大陆地壳破裂之后 快速形成玄武岩洋壳。

南海大洋钻探成功钻取了中生代以来南海深 海盆演化历史的岩芯记录,从海盆张裂、海底扩张, 到气候环境、生物和沉积演变,均取得了一系列的 国际性的突破进展,使南海成为全球边缘海研究的 典范。但是以往的大洋钻探多数限于南海大陆边 缘北部中段,对整个南海的控制约束作用有限,在 共轭大陆边缘的伸展减薄过程、洋陆过渡带的张破 裂过程等方面,仍然需要更进一步的研究,以期获 得对南海生命史全面、完整的揭示。

3 南海时空演化特征的非均性

由于南海存在东北次海盆、西南次海盆和西北 次海盆,海盆边缘形成的共轭大陆边缘在时空分布 上均具有不均一性,尤其是在共轭大陆边缘的伸展 减薄过程、洋陆过渡带的张破裂过程、岩浆活动的 动力机制及莫霍面优选等方面,仍然需要更进一步 的大洋钻探支持,以期获得南海完整生命史。

3.1 南海南北陆缘减薄过程差异

南海南北陆缘是由新生代华南大陆张裂形成 的共轭陆缘,现今的地球物理观测表明,南海北部 陆缘整体拉张因子比南部陆缘大,表现为非对称式 伸展减薄,而指示陆缘伸展减薄程度的主要指标是 伸展因子。

同时,南部陆缘伸展因子具有一定空间差异 性,在巴拉望西北滨海区具有减薄强烈的地壳,而 全地壳伸展因子在该区域可以达到 2.0,在洋陆过 渡带区可以达到 3.0^[22]。根据多道地震和重力反演 得到的礼乐滩区域上地壳伸展因子均小于 1.1,全 地壳伸展因子约为 1.8,而在洋陆过渡带区可以达 到 3.3 左右,南沙地区上地壳伸展因子为 1.3 左右, 全地壳伸展因子为 2 左右,在靠近洋陆过渡带区可 达 3.4^[23]。通过对新采集和重新处理的多道地震剖 面解释,结合钻井、拖网等资料,计算得到中央海盆 东南部陆缘和西南次海盆东南部陆缘上地壳拉张 因子为1.6和1.8左右,相差并不大。西南次海盆东 南部陆缘从陆到洋,全地壳拉张因子从2.5增加到 5.5左右,下地壳拉张因子从4增加到10左右,其中 在距离洋陆过渡界约200km处,受礼乐断裂的影 响,全地壳拉张因子达到4,下地壳拉张因子可达 7。而中央海盆东南部陆缘从陆到洋,全地壳拉张 因子从1.5缓慢增加至4.1,下地壳拉张因子与全地 壳拉张因子几乎相等。研究表明海盆在张裂期受 到拉张时,不仅下地壳初始强度不同,地壳拉伸量 也不同,特别是下地壳,如西南次海盆下地壳的拉 伸程度远远高于中央海盆^[24]。

同样,北部陆缘伸展因子也具有空间差异性, 并且与南部存在明显不同。利用南海北部陆缘现 今地壳厚度、新生代基底埋深和地表断层参数等地 质和地球物理资料,计算得到^[25],琼东南盆地自陆 架边缘到深水坳陷区全地壳拉张因子平均为 1.5~4.2,自陆架边缘到深水盆地逐渐增大^[26-27],而 珠江口盆地位于洋陆过渡带上,拉张因子自北向南 逐渐增大,向东南方向的洋陆过渡带逐渐增大到 2.4,并在深水盆地区达到最大值4。其中白云凹陷 为一个拉张中心,拉张因子在1.5~6之间波动,由陆 向洋逐渐变大,反映了南海北部地壳在南海形成过 程中由陆向洋拉伸程度逐渐增大,地壳厚度逐渐变 薄^[28]。

从以上分析能清晰看到,南海南北陆缘,甚至 是单侧陆缘的横向上,存在伸展减薄的不均一性, 其产生存在的机制问题值得全面开展钻探进行深 入研究。

3.2 南海洋陆过渡带张破裂过程差异

南海具有典型的南北共轭大陆边缘,在张破裂 过程中发育了具有空间差异性的洋陆过渡带及其 伴生的洋陆转换边界(图1)。

目前对南海北部陆缘洋陆过渡带位置没有统一认识,特别是东北陆缘洋陆过渡带的构造属性争 议较大^[5, 29-31],南海东部海盆岩浆作用分布不均,减 薄陆缘和洋盆中均有分布,并且岩浆作用时间分 散,扩张前和扩张完成后均有发育^[32],最新的 OBS 地震资料速度结果显示,东北部洋陆过渡带区域具 有显著的地幔抬升,结合 Vp/Vs 结果分析,认为东北 部洋陆过渡带位置存在地幔抬升的部分蛇纹石化 结果^[33-34]。而最新大洋钻探结果揭示,北部陆缘中 部并没有钻遇蛇纹石化地幔,且多道反射地震上显 示约 15~25 km 的洋陆过渡带,因此认为北部陆缘 发生陆壳到洋壳的快速转换,从而提出其介于火山 型和非火山型的中间型被动陆缘。西北陆缘洋陆 过渡带^[35]宽度约 5~10 km,并且在洋陆过渡带发育 与洋壳扩张相关的火山^[35],表明西北陆缘由初始扩 张过程突然转变成岩浆作用为主导的陆壳到初始 洋壳扩张过程的快速转换。

在南部陆缘洋陆过渡带的认识也同样存在差 异,其中巴拉望西北陆缘作为南海北部陆缘的共轭 陆缘,目前对于洋陆过渡带的划分还存在争议,对 于过渡带内高重力异常区域地质属性不清楚,南部 磁异常条带相对北部较弱,并且对于磁异常条带的 位置不确定^[36-38],同时西南次海盆在陆壳破裂之前 经历较长时间的拉张作用形成两侧很宽的伸展陆 壳,但是洋陆过渡带宽度为 0~20 km,破裂期地幔 岩浆作用弱,伴随莫霍面抬升,且深部没有发现下 地壳高速层,因此岩浆供应比较弱,主要是以构造 拉伸作用占主导地位。西南次海盆的洋壳扩张并 非同时发生的,而是由东向西递进式扩张,且经历 了从离散到整体的扩张演化过程^[30]。

目前,第三阶段的大洋钻探持续时间最长且钻 位最多,总计3个航次共计完成了7个钻位取芯,集 中解决南海大陆边缘裂解过程。但洋陆过渡带在 空间分布上的差异性和动力机制的不同,仍需要对 南海洋陆过渡带进一步的钻探,才能确定是否具有 蛇纹石化地幔出露,从而有助于我们理解南海陆缘 类型。

3.3 南海岩浆活动的地幔动力学机制

南海及邻区岩浆岩分布广泛,主要发育于南海 及周缘的广东、广西、海南岛、台湾岛、中南半岛、 加里曼丹岛、菲律宾群岛,其形成时间和空间分布 均有差异。自晚中生代末或古新世早期以来,南海 内散落的微陆块开始裂解并随后裂离华南块体,南 海北缘处于伸展的构造背景,形成了一系列的裂陷 盆地。在新生代早期,双峰式火山活动出现于这些 盆地内,南海海底扩张时期(33~15.5 Ma)^[20],其周 缘几乎没有岩浆活动,为岩浆活动宁静期。在海底 扩张之后,虽然岩浆绝对量不大,但大范围的岩浆 活动影响着南海及其邻近的广泛区域。总体而言, 南海裂后期岩浆活动大体可分为15.5~5.5 Ma和5 Ma 至今两个阶段^[5]。

南海北部陆坡区裂后岩浆活动形成的火山大 致平行于3000m等深线分布,向西延伸至西沙海 槽,呈现出斑片状展布特征^[39],但南海北部陆缘是

属于富岩浆型陆缘还是贫岩浆型陆缘一直是一个 较大争议的问题。从目前的研究成果来看,南海北 部陆缘缺少岩浆富集型陆缘较常见的向海倾斜反 射特征,张裂陆缘发育宽广,表明岩浆作用在南海 张裂期没有发挥主导作用,可能属于贫岩浆型陆缘 或过渡型陆缘。但同时南海北部陆缘存在海山、岩 席、岩墙等岩浆活动遗留的证据,这似乎与贫岩浆 陆缘的结论相矛盾。大洋钻探最新结果表明,南海 海盆内的火山喷发主要集中在晚中新世,并没有在 南海扩张停止的时候就大规模地开始活动,岩浆活 动主要沿残留扩张脊分布,沿中央海盆和西南海盆 的扩张脊上分布有一长串的高海山,年代为14~ 3.5 Ma,海山的整体年龄向残余扩张脊方向呈现年 轻化的趋势^[40]。南海南部边缘,在 ODP 1143 中约 2 Ma 的火山灰和 0.4 Ma 和 0.5 Ma 的岩石样品表 明,第四纪期间存在活跃的岩浆活动,且在郑和地 块和礼乐海槽西部地壳中发现了指示岩浆作用的 高速层^[39,41],可能是该区域岩浆活动的指征。

关于南海裂后岩浆活动的成因机制众说纷纭, 一是基于海南地幔柱模型,结合南海北缘下地壳高 速体及海山分布特征与海山岩石样本的化学特性, 提出受海南地幔柱东支影响的南海北部陆缘壳内 岩浆活动模型^[40,42];二是基于地震层析成像证据及 地幔柱影响区域大陆地壳较厚的地质事实,提出浮 力驱动的上升流可能是形成扩张后岩浆作用的最 佳机制^[43];三是通过大量地震地层学研究发现,南 海壳内火成岩侵位通常与主要地质和沉积学边界 同时存在,提出扩张后火山作用是由海洋岩石圈和 衰减大陆岩石圈的冷却和沉降引起的伸展作用触 发的^[30,44];四是认为新生代自南海海底扩张前开始 的减压熔体的侵入是扩张后火山作用的起源^[43,45]。

目前对于南海裂后期岩浆活动的起源及其侵 位模式仍存在很大的争议,但对于南海裂后期岩浆 活动对地壳产生强烈改造的观点达成了共识。由 于裂后岩浆活动对于地壳结构的强烈扰动,西北次 海盆、东部次海盆、西南次海盆东北部沿垂直扩张 脊方向地壳速度结构呈现明显的横向变化,且在东 部次海盆、西南次海盆扩张脊下方均发现低速异 常,或指示了海盆之下存在残余岩浆^[44]。当前对于 破裂阶段的岩浆还没有直接的定年结果,这制约着 对海山等岩浆活动形成的认识,无法完全揭示其深 部的岩浆过程。

3.4 南海莫霍面钻探选区与科学意义

南海中央海盆发育洋壳,深地震探测剖面显示

其莫霍面深度为 10 km 左右,且其上的沉积层厚度 不大,是验证天然气水合物钻采船极限钻探能力, 以期进行莫霍面钻探的理想区域之一。在南海开 展莫霍钻探将是人类历史上第一个钻穿莫霍的伟 大壮举,可以检验莫霍面的地质性质,解决长期困 扰科学界的关于莫霍面的有关争论,建立标准的地 壳结构。吴招才等^[46]利用南海海盆及周边最新的 重力数据,经过海底地形、沉积层的重力效应改 正等方法,得出了南海海盆及周边莫霍面的起伏 特征。

陆架区:南海北部陆架区莫霍面深度多在 25~27 km,东沙群岛局部地壳增厚不明显。西沙 地块的莫霍面深度为 23~26 km,地壳厚度为 21~ 22 km。中沙地块为 20~22 km,地壳厚度为 18~ 20 km,它们之间存在一个近 NE向、浅至 17 km 左 右的莫霍面隆起带。在南沙地块,礼乐滩以东区 域,莫霍面变化较为平缓,除礼乐斜坡东南的水深 误差造成局部莫霍面降低外,总体上深度多在 22 km 以上;西侧的中业群礁和郑和群礁区域,莫霍 面多在 17~20 km,总体上也较为平缓,局部分布有 近 NW 向的莫霍面下凹^[46]。

海盆区:南海海盆区莫霍面深度为 8~14 km, 地壳厚度为 3~9 km^[46]。海盆内发育众多海山,相 应的莫霍面和地壳都偏深、偏厚,在西南海盆两侧 靠近陆缘位置,洋壳厚度都有减薄趋势,可能与西 南海盆初始扩张时岩浆供应不足有关;在东部海盆 南北边缘地壳厚度存在不对称性,北侧较薄,南侧 较厚,可能反映了地壳最终破裂时的不对称性。

由于目前没有钻穿莫霍面的先例,关于莫霍面 普遍的科学问题和相关猜想都没有得到解决和验 证。因此,如果能在在南海选取施工难度小、时间 节约的工区首先开展莫霍面钻探,将对地球系统重 大科学问题提供史无前例的解决方案,将验证关于 莫霍面性质的假说。

4 未来南海钻探目标与区域优选

根据对南海关键科学问题的梳理,以及已有大 洋钻探在南海关键科学问题推动的基础上,未来为 揭示南海全面、完整和具体的演化史,必须实施南 海进一步的钻探研究工作。本文基于已有研究进 展和搜集资料,针对南海东部次海盆、西南次海盆 和西北次海盆等地貌与构造单元,聚焦南海形成演 化历史背景下的海底构造、沉积过程、资源与环境 效应等重大科学问题,提出了钻探井位建议。

4.1 东部次海盆钻探目标与井位建议

前已述及南海大洋钻探主要集中在北部陆缘 中部,由于共轭大陆边缘时空演化的非均一性特 征,在东北次海盆区域有望揭示洋陆过渡带结构、 上地幔剥露和水合物赋存等重要科学问题。

目前对南海北部陆缘洋陆过渡带位置没有统 一认识,特别是东北陆缘洋陆过渡带的构造属性争 议较大[5,22-24]。南海东部海盆岩浆作用分布不均,减 薄陆缘和洋盆中均有分布,并且岩浆作用时间分 散,扩张前和扩张完成后均有发育[25],东北部陆缘 最新的 OBS 地震资料速度结果,认为存在地幔抬升 的部分蛇纹石化结果^[26-27], 广角折射地震结果显示, 在洋陆过渡边界位置具有独立的高速异常,发现其 速度梯度特征和北大西洋剥露蛇纹石化地区相 似。蛇纹石化作为联系地质、地球物理、地球化学 以及地球微生物的重要纽带,对于我们了解南海的 岩石圈破裂和初始洋壳扩张具有重要意义。因此, 对东北部洋陆过渡带的钻探能够针对南海是否具 有蛇纹石化地幔出露提供进一步岩石学证据,且有 可能钻遇原位地幔物质,补充认识西太平洋边缘海 的初始扩张模式。

同时,南海东北部洋陆过渡边界位置处可能存 在的下地壳或上地幔剥露,或许是开展莫霍面钻探 的有利区域,此处多道地震剖面基底隆起可能存在 辉长岩或者地幔橄榄岩的剥露^[29]。此外,马尼拉俯 冲带北段增生楔可分为下部斜坡区、上部斜坡区和 背逆冲断层区 3 个构造区域。其中下坡区自西向 东发育了明显的褶皱变形和逆冲推覆等现象,而上 坡区相对于下坡区却有了非常明显的抬升,地形由 西向东逐渐升高,并且发育了清晰的似海底反射层 (BSR),这说明该处可能为水合物赋存区,具有一定 的资源赋存意义^[5]。

4.2 西北次海盆钻探目标与井位建议

南海东北部陆缘与南海西北部陆缘的地壳结 构存在诸多差异,最新的多道地震反射资料研究指 示在白云-荔湾凹陷存在 NW 向的边界走滑断裂,将 南海东北部与西北部构造一分为二^[27]。针对西北 次海盆与东部连接处开展调查和钻探(图 3),有望 直观展示南海北部陆缘的东西部地壳结构差异,获 得白云凹陷沉积基底及地壳伸展减薄的重要信息, 判断北西向断裂带在南海东西部构造演化中所扮 演的角色,为南海形成演化的动力学过程提供基础 证据。

南海西北部相间分布北部陆缘、西沙块体、中 沙块体等刚性块体,中间发育西沙海槽与西北次海 盆。这种独特的构造背景与全球典型的张裂陆缘 (如大西洋两侧大陆边缘)具有显著差异,通过实施 西沙钻探,有望对南海陆缘刚性块体相间的地壳结 构特征形成直观认识,为研究"板缘裂解"与"板内 裂解"的动力学机制提供支撑。

其次,西北陆缘洋陆过渡带宽度约 5~10 km, 并且在洋陆过渡带发育与洋壳扩张相关的火山^[35], 说明西北部陆缘由初始扩张过程突然转变成由岩 浆作用为主导的快速转换,与已有钻探揭示的张破



图 3 南海西北次海盆陆缘伸展与张破裂钻探井位(M3测线)

Fig.3 Drilling well for continental margin extension and rift in the northwestern sub-basin of the South China Sea (M3 profile)

裂过程存在差异。同时,西北次海盆陆坡-海盆段是 沉积物汇聚的主要场所,是我国深水区油气勘探由 陆坡向海盆进军的主要目标区域,其内部存在优质 的深水扇系统,是油气勘探的重要目标。通过西北 次海盆陆坡-海盆转换地区钻探(图4),不仅可揭示 洋陆过渡带结构与张破裂过程,而且有望对西北次 海盆内深水扇进行识别,有利于西北次海盆的油气 勘探前景预测。

4.3 西南次海盆钻探目标与井位建议

陆缘伸展破裂过程是认识大陆如何变成洋盆 的重要信息,通过国际大洋钻探对南海北部中段张 破裂过程已取得显著进展。由于南海东北部与其 东南部共轭陆缘间发生了非对称破裂,伴随着复杂 的构造和岩浆相互作用,向海方向岩浆作用的逐渐 增强最终取代了构造作用,导致板块分离^[35]。南海 从陆壳到初始洋壳扩张过程中在洋陆边界的地球 动力学过程存在较大的横向变化^[47-48]和较强的岩浆 输出^[8]。

尽管南海北部陆缘伸展破裂机制正在逐渐被 揭示,南海南部陆缘,尤其是西南次海盆裂解过程 研究不足。西南次海盆洋陆过渡带地壳结构、伸展 过程的认识不充分,直接阻碍了对南海西南次海盆 陆缘构造属性的判断。因此,在南海西南次海盆陆 缘洋陆过渡带极度减薄区进行钻探(图5),有望丰 富南海板缘裂解机制,并对比大西洋型陆内裂解的 异同点,为认识边缘海形成演化提供新见解。 西南次海盆是一个开口向东北的"V"型盆地, 其东北部扩张量大于西南部,海盆两侧的洋壳年龄 由东北向西南递减,呈渐进式扩张形态^[49],从磁条 带异常可以追溯到最晚期的海底扩张延伸到西南 次海盆的最西南角。南海作为由东向西渐进扩张 形成的边缘海,关于海盆扩张停止的动力学机制一 直未能得到回答,而西南次海盆可能保留了南海海 底扩张停止的重要信息,在此开展钻探可以回答南 海最终停止扩张的成因(图 6),揭示南海最后一期 扩张的细节信息,并为边缘海形成演化及消亡提供 新视角。

另外,南海西南次海盆还是研究不连续莫霍面的理想场所,根据已有的重力数据揭示的南海莫霍面分布特征,结合最新数据研究表明,海盆内基底起伏较大并被大量地壳级断裂错断,且扩张中心表现为深的中央裂谷。西南次海盆地壳厚度异常薄,局部地壳厚度仅4~5km(含沉积层),莫霍面埋深可达1.5~3.6km(沉积层除外),推测该区域发育拆离断层并伴随蛇纹石化上地幔^[50],是南海海区迄今发现的最薄地壳(图7),接近卫星探测的结果^[51]。目前,针对南海西南次海盆莫霍面深度及地壳厚度的研究主要利用地球物理手段,缺乏实际钻井约束。依据现有的地球物理资料分析,可以明显发现南海区域莫霍面由陆架向洋盆抬升,洋盆处的莫霍面埋深相对较浅,是莫霍面钻探的远景靶区。

综上所述,南海西南次海盆建议钻探选址有 3个:①西南次海盆北部陆缘洋陆过渡带钻探,建议



图 4 南海西北次海盆洋陆过渡带钻探站位(M3测线)

Fig.4 Drilling well in the continent-ocean transition zone of the northwestern sub-basin (M3 profile)



图 5 南海西南次海盆洋陆过渡带钻探站位(M1 测线)

Fig.5 Drilling well for the continent-ocean transition in the southwestern sub-basin (M1 profile)



图 6 南海西南次海盆扩张停止机制钻探站位(M1测线) Fig.6 Drilling well for seafloor spreading of the southwestern sub-basin (M1 profile)

孔位 SCSD5、6,此设计目的是为了揭示洋陆过渡带破裂过程,解决南海西南次海盆打开的科学问题; ②西南次海盆西南角中止破裂位置,建议孔位 SCSD7、8,此设计目的是为了揭示南海末期扩张过程,解决南海如何结束扩张的科学问题;③西南次海盆残留洋中脊钻探,建议孔位 SCSD9,目的是为了钻穿最薄的洋壳,揭示西南次海盆壳幔演化过程。

4.4 南海深部科学钻探建议站位汇总

针对南海南北共轭大陆边缘的构造演变时空 分布的非均一性,聚焦南海破裂不整合及其发育机 制、南海莫霍面钻探、南海陆缘与海盆岩浆过程和 南海洋陆过渡带结构等4个方面科学问题,选取以 往大洋钻探在东北次海盆、西北次海盆和西南次海 盆的钻探空白区,甄选9个钻探站位,不仅能够为 揭示南海完整生命史提供重要信息,而且还能支撑 未来天然气水合物钻采船在南海海域的钻探需求, 站位汇总如图8和表1所示。



图 7 南海西南次海盆 NH973-1 测线中央峡谷位置莫霍面钻探靶区^[51]

Fig.7 The Moho drilling position in the central canyon in the southwestern sub-basin(NH973-1 profile)



图 8 南海深部科学钻探井位汇总图 Fig.8 Summary map of future scientific drilling wells in the South China Sea

5 结论

(1)梳理了南海历次大洋钻探从海盆张裂、海 底扩张,到气候环境、生物和沉积演变的科学目标 与结果,认为以往的大洋钻探多数位于南海大陆边 缘北部中段,对整个南海的控制约束作用有限,并 指明未来钻探的科学目标应聚焦共轭大陆边缘形 成演化在时空分布上的不均一性。

(2)针对南海南北共轭大陆边缘的构造演变时 空分布的非均一性,分析了南海破裂不整合及其发 育机制、南海莫霍面钻探,南海陆缘与海盆岩浆过 程,南海洋陆过渡带结构等4个关键科学问题,提

rable r Summary of sites for the future scientific drining program in the South China Sea					
编号	坐标	水深/m	终孔深度/m	钻进深度/m	科学主题
SCSD1	19.2°N, 118.35°E	5 000	6 700	1 700	洋陆过渡带与破裂
SCSD2	21°N, 120.65°E	2 100	3 100	1 000	俯冲带与环境效应
SCSD3	17.51°N, 114.62°E	4 750	7 200	2 450	陆缘伸展减薄过程
SCSD4	17.09°N, 113.74°E	3 700	4 800	1 100	洋陆过渡带与资源
SCSD5	13.19°N, 112.95°E	2 900	5 000	2 100	陆缘伸展减薄过程
SCSD6	11.05°N, 113.72°E	5 500	7 150	1 650	陆缘伸展减薄过程
SCSD7	9.49°N、110.55°E	2 900	5 900	3 000	洋陆过渡带与破裂
SCSD8	10.17°N, 114.02°E	2 500	4 450	1 950	洋陆过渡带与破裂
SCSD9	12.39°N、113.79°E	4 400	9 500	5 100	莫霍面钻探

表1 南海深部科学钻探计划站位汇总

Table 1 Summary of sites for the future scientific drilling program in the South China Sea

出了未来南海大洋钻探的科学目标以及钻探需求, 南海进一步大洋钻有望阐述全面、完整和具体的南 海生命史。

(3)选取南海东北次海盆、西南次海盆和西北 次海盆等以往钻探空白区,针对性地提出了在以上 区域开展大洋钻探的优选井位,钻探实施对揭示整 个南海发育演化史具有重要作用。但限于资料掌 握情况,仍需开展进一步勘查和资料搜集工作,在 不同海盆确定的未来南海深部科学钻探的9个站 位 SCSD1-9,应坚持问题优先、深浅结合、难易结合 的原则,逐步开展以上优选钻探井位的论证与实施。

参考文献 (References)

- 石耀霖, 王其允. 俯冲带的后撤与弧后扩张 [J]. 地球物理学报, 1993, 36(1): 37-43. [SHI Yaolin, WANG Qiyun. Roll-back subduction and back-arc opening [J]. Acta Geophysica Sinica, 1993, 36(1): 37-43.]
- [2] 方念乔. "海南陆缘弧"体系的构建与"特提斯南海"的识别:一个关于"古南海"演化新模式的探讨[J]. 地学前缘, 2016, 23 (6): 107-119. [FANG Nianqiao. A new model on the Mesozoic "South China Sea"(SCS): reconstructing the Hainan marginal arc and recognizing the Tethyan SCS [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23 (6): 107-119.]
- [3] 李三忠,李涛,赵淑娟,等.东亚原特提斯洋(V):北界西段陆缘属性及微陆块拼合[J].岩石学报,2017,33(6):1633-1652.[LI San-zhong, LI Tao, ZHAO Shujuan, et al. Proto-Tethys ocean in East Asia (V): attribute of contientnal margin and microcontinental assembly in the west segment of the northern Proto-Tethys Tectonic Domain [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(6):1633-1652.]
- [4] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine [J]. Geology, 1982, 10 (12): 611-616.
- [5] Li C F, Zhou Z Y, Li J B, et al. Structures of the northeasternmost South China Sea continental margin and ocean basin: geophysical con-

straints and tectonic implications [J]. Marine Geophysical Researches, 2007, 28 (1): 59-79.

- [6] Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349 [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15 (12): 4958-4983.
- [7] Song T R, Li C F, Wu S G, et al. Extensional styles of the conjugate rifted margins of the South China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 177: 117-128.
- [8] 翦知湣. 进军深海科学前沿:我国参与大洋钻探的进展[J]. 科学通报, 2018, 63 (36): 3877-3882. [JIAN Zhimin. Towards the scientific frontier of deep-sea research: progress of China's participation in ocean drilling [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63 (36): 3877-3882.]
- [9] Wang P X, Prell W, Blum P. Proceedings of the ocean drilling program, 184 Initial Report[R]. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 2000.
- [10] Li C F, Lin J, Kulhanek D K, et al. Proceedings of the international ocean discovery program, 349: South China Sea Tectonics[R]. College Station, TX, 2015.
- [11] Sun Z, Stock J, Klaus A. Expedition 367 preliminary report: South China Sea rifted margin[R]. International Ocean Discovery Program, 2018.
- [12] Jian Z, Larsen H C, Alvarez Zarikian C A. Expedition 368 preliminary report: South China Sea rifted margin [R]. International Ocean Discovery Program, 2018.
- [13] Childress L B, Briais A, Deng J M, et al. Expedition 368X preliminary report: South China Sea rifted margin [R]. International Ocean Discovery Program, 2019.
- [14] Sun Z, Ding W W, Zhao X X, et al. The latest spreading periods of the South China Sea: new constraints from macrostructure analysis of IODP Expedition 349 cores and geophysical data [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2019, 124 (10): 9980-9998.
- [15] Larsen H C, Mohn G, Nirrengarten M, et al. Rapid transition from continental breakup to igneous oceanic crust in the South China Sea [J]. Nature Geoscience, 2018, 11 (10): 782-789.

- [16] Gao J W, Wu S G, Mcintosh K, et al. Crustal structure and extension mode in the northwestern margin of the South China Sea [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016, 17(6): 2143-2167.
- [17] Huang C Y, Wang P X, Yu M M, et al. Potential role of strike-slip faults in opening up the South China Sea [J]. National Science Review, 2019, 6 (5): 891-901.
- [18] Zhao F, Alves T M, Wu S G, et al. Prolonged post-rift magmatism on highly extended crust of divergent continental margins (Baiyun Sag, South China Sea) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 445: 79-91.
- [19] 汪品先. 低纬过程的轨道驱动[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 694-701. [WANG Pinxian. Orbital forcing of the low-latitude processes [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(5): 694-701.]
- [20] Li X H, Li J B, Yu X, et al. 40Ar/39Ar ages of seamount trachytes from the South China Sea and implications for the evolution of the northwestern sub-basin [J]. Geoscience Frontiers, 2015, 6 (4): 571-577.
- [21] 张也,黄宝春.特提斯喜马拉雅地块白垩纪古纬度变化对印欧碰撞 模式的制约[J].中国科学:地球科学,2017,60(6):1057-1066. [ZHANG Ye, HUANG Baochun. The influence of Cretaceous paleolatitude variation of the Tethyan Himalaya on the India-Asia collision pattern [J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(6):1057-1066.]
- [22] Franke D, Barckhausen U, Baristeas N, et al. The continent-ocean transition at the southeastern margin of the South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28 (6): 1187-1204.
- [23] 丁巍伟, 李家彪. 南海南部陆缘构造变形特征及伸展作用: 来自两条 973多道地震测线的证据[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3038-3056. [DING Weiwei, LI Jiabiao. Seismic stratigraphy, tectonic structure and extension factors across the southern margin of the South China Sea: evidence from two regional multi-channel seismic profiles [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3038-3056.]
- [24] 邱宁,姚永坚,张江阳,等. 南海东南部陆缘地壳结构特征及其构造 意义[J]. 地球物理学报, 2019, 62 (7): 2607-2621. [QIU Ning, YAO Yongjian, ZHANG Jiangyang, et al. Characteristics of the crustal structure and its tectonic significance of the continental margin of SE South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62 (7): 2607-2621.]
- [25] 张云帆, 孙珍, 周蒂, 等. 南海北部陆缘新生代地壳减薄特征及其动力学意义[J]. 中国科学 D辑:地球科学, 2007, 37(12): 1609-1616.
 [ZHANG Yunfan, SUN Zhen, ZHOU Di, et al. Charateristics of Cenozoic crustal thinning in the northern continental margin of the South China Sea and its dynamic significance [J]. Science in China (Series D:Earth Sciences), 2007, 37(12): 1609-1616.]
- [26] 雷超,任建业,佟殿君. 南海北部洋陆转换带盆地发育动力学机制 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1287-1299. [LEI Chao, REN Jianye, TONG Dianjun. Geodynamics of the ocean-continent transition zone, northern margin of the South China Sea: implications for the opening of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1287-1299.]
- [27] 佟殿君, 任建业, 雷超, 等. 琼东南盆地深水区岩石圈伸展模式及其 对裂后期沉降的控制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2009,

34 (6): 963-974. [TONG Dianjun, REN Jianye, LEI Chao, et al. Lithosphere stretching model of deep water in Qiongdongnan Basin, northern continental margin of South China Sea, and controlling of the post-rift subsidence [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2009, 34 (6): 963-974.]

- [28] Li C F, Li J B, Ding W W, et al. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2015, 120 (3): 1377-1399.
- [29] Mcintosh K, Lavier L, van Avendonk H, et al. Crustal structure and inferred rifting processes in the northeast South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 612-626.
- [30] Li C F, Zhou Z Y, Hao H J, et al. Late Mesozoic tectonic structure and evolution along the present-day northeastern South China Sea continental margin [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 31 (4-6) : 546-561.
- [31] Barckhausen U, Engels M, Franke D, et al. Evolution of the South China Sea: revised ages for breakup and seafloor spreading [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 599-611.
- [32] Song X X, Li C F, Yao Y J, et al. Magmatism in the evolution of the South China Sea: geophysical characterization [J]. Marine Geology, 2017, 394: 4-15.
- [33] Wan X L, Li C F, Zhao M H, et al. Seismic velocity structure of the magnetic quiet zone and continent-ocean boundary in the northeastern South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2019, 124(11): 11866-11899.
- [34] Hou W A, Li C F, Wan X L, et al. Crustal S wave velocity structure across the northeastern South China Sea continental margin: implications for lithology and mantle exhumation [J]. Earth and Planetary Physics, 2019, 3 (4): 314-329.
- [35] Cameselle A L, Ranero C R, Franke D, et al. The continent-ocean transition on the northwestern South China Sea [J]. Basin Research, 2017, 29 (S1): 73-95.
- [36] Braitenberg C, Wienecke S, Wang Y. Basement structures from satellite-derived gravity field: South China Sea ridge [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2006, 111 (B5): B05407.
- [37] Sun Z, Zhong Z H, Keep M, et al. 3D analogue modeling of the South China Sea: a discussion on breakup pattern [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(4): 544-556.
- [38] Franke D, Savva D, Pubellier M, et al. The final rifting evolution in the South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 58: 704-720.
- [39] 丘学林,赵明辉, 敖威,等. 南海西南次海盆与南沙地块的OBS探测和地壳结构[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3117-3128. [QIU Xuelin, ZHAO Minghui, AO Wei, et al. OBS survey and crustal structure of the Southwest Sub-basin and Nansha Block, South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3117-3128.]
- [40] Fan C Y, Xia S H, Zhao F, et al. New insights into the magmatism in the northern margin of the South China Sea: spatial features and volume of intraplate seamounts [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2017, 18 (6): 2216-2239.
- [41] Zhang Y X, Xia S H, Cao J H, et al. Extensional tectonics and post-rift magmatism in the southern South China Sea: new constraints from

multi-channel seismic data [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 117: 104396.

- [42] Jiang Y L, Hu H J, Gluyas J, et al. Distribution characteristics and accumulation model for the coal-formed gas generated from permo-carboniferous coal measures in Bohai Bay Basin, China: a review [J]. Acta geologica Sinica - English Edition, 2019, 93 (6): 1869-1884.
- [43] Zhao M H, He E Y, Sibuet J C, et al. Postseafloor spreading volcanism in the central east South China Sea and its formation through an extremely thin oceanic crust [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2018, 19 (3): 621-641.
- [44] 欧阳青, 吴振利, 卫小冬, 等. 南海海盆残留扩张中心地壳速度结构 对比及构造意义[J]. 科学通报, 2017, 62 (21): 2380-2391.
 [OUYANG Qing, WU Zhenli, WEI Xiaodong, et al. Comparison of crustal structures in the fossil spreading center of South China Sea basins and the tectonic significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62 (21): 2380-2391.]
- [45] Chang J H, Lee T Y, Hsu H H, et al. Comment on Barckhausen et al., 2014 – Evolution of the South China Sea: revised ages for breakup and seafloor spreading [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 676-678.
- [46] 吴招才,高金耀,丁巍伟,等.南海海盆三维重力约束反演莫霍面深 度及其特征[J].地球物理学报,2017,60(7):2599-2613.[WU

Zhaocai, GAO Jinyao, DING Weiwei, et al. Moho depth of the South China Sea basin from three-dimensional gravity inversion with constraint points [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60 (7) : 2599-2613.]

- [47] Li C F, Song T R. Magnetic recording of the Cenozoic oceanic crustal accretion and evolution of the South China Sea basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57 (24): 3165-3181.
- [48] Ding W W, Sun Z, Mohn G, et al. Lateral evolution of the rift-to-drift transition in the South China Sea: evidence from multi-channel seismic data and IODP Expeditions 367&368 drilling results [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 531: 115932.
- [49] Fan C Y, Xia S H, Cao J H, et al. Lateral crustal variation and post-rift magmatism in the northeastern South China Sea determined by wideangle seismic data [J]. Marine Geology, 2019, 410: 70-87.
- [50] Zhang J, Li J B, Ruan A G, et al. The velocity structure of a fossil spreading centre in the Southwest Sub-basin, South China Sea [J]. Geological Journal, 2016, 51 (S1): 548-561.
- [51] Yu J H, Yan P, Wang Y L, et al. Seismic evidence for tectonically dominated seafloor spreading in the Southwest Sub-basin of the South China Sea [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2018, 19 (9): 3459-3477.