

doi:10.3799/dqkx.2011.085

南海南部深地震探测及南北共轭陆缘对比

赵明辉¹, 丘学林¹, 徐辉龙^{1*}, 夏少红¹, 吴振利², 李家彪²

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江杭州 310012

摘要: 南海南部最新深地震探测对于南海南北共轭陆缘的对比研究及南海形成演化理论的研究至关重要. 以南海深地震探测发展历程和南海南部区域地质地球物理特征为基础, 借鉴世界上典型共轭陆缘对比研究的方法, 结合2009年新获得的两条海底地震仪测线, 指出了南海南部及深海盆深部结构研究的迫切性与重要性, 并提出西南次海盆的深部结构、洋盆中海山的速度结构与属性及南北共轭陆缘张裂体系, 是今后南海形成演化理论问题的重要突破点.

关键词: 南海南部; 深海盆; 海山; 构造; 深地震探测; 海洋地球物理.

中图分类号: P738

文章编号: 1000-2383(2011)05-0823-08

收稿日期: 2011-05-10

Deep Seismic Surveys in the Southern South China Sea and Contrast on Its Conjugate Margins

ZHAO Ming-hui¹, QIU Xue-lin¹, XU Hui-long^{1*}, XIA Shao-hong¹, WU Zhen-li², LI Jia-biao²

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

2. The Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

Abstract: The deep seismic surveys in the southern South China Sea (SCS) are of vital importance for conjugate continental margins and the theory of formation and evolution of SCS. This paper firstly reviews the survey history, then analyzes the geological and geophysical characteristics and finally presents the significance of deep structure research in southern SCS based on comparing the conjugate continental margins with Newfoundland and Iberia. Deep structures of the southwestern sub-basin, velocity structures of sea mountains in the deep basin, and the whole rifting system could make breakthrough for the theory of formation and evolution of the SCS in the future.

Key words: southern South China Sea; deep basins; sea mountains; tectonics; deep seismic survey; marine geophysics.

南海作为西太平洋最大的边缘海之一,是我国走向深海研究的重要突破口(汪品先,2009).其地理位置独特,构造环境复杂,地质现象丰富,是分析海底扩张、板块运动、扩张脊跃迁、边缘海形成演化理论等国际研究热点的绝佳场所,更是我国重视海洋事业、走向系统深海科学研究的首选研究对象.然而,到目前为止,关于南海的形成演化历史仍然是基于二、三十年前所测的磁异常条带. Taylor and Hayes(1980, 1983)认为南海海盆主体自32~17 Ma的南北向扩张格局没有显著变更. Briaies *et al.* (1993)提出西北次海盆和中央次海盆从

30 Ma开始扩张,扩张中心分别位于18°N和17°N,伴随扩张脊的两次向南跃迁;西南次海盆在23 Ma以后开始张开,两个扩张事件同时在15.5 Ma结束(Cande and Kent, 1995,年龄经过最新年表校正). 姚伯初等(1994)提出南海两段式扩张模式,西南次海盆较老,在40~33 Ma以NE-SW向扩张后,中央次海盆在30~16 Ma以近南北向扩张(姚伯初, 1999). Barckhausen and Roeser(2004)解释了1987年德国太阳号勘测的6条磁测剖面,认为中央次海盆的海底扩张发生在31 Ma,并在23 Ma西南次海盆开始扩张,两海盆均在20.5 Ma结束大洋地壳形

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目群项目(No. KZCX2-YW-Q05-04);科技部“973”项目(No. 2007CB411701);国家自然科学基金(Nos. 41076029, 41074066, 91028002);广东联合基金重点项目(No. U0933006).

作者简介: 赵明辉(1967—),女,博士,副研究员,主要从事海洋地球物理与深部结构研究. * 通讯作者: 徐辉龙, E-mail: hlxu@scsio.ac.cn

成. 李家彪等(2002)通过构造地貌分析,对中央次海盆的扩张方向提出质疑,认为至少在扩张晚期经历了 NW-SE 向扩张. 综上所述,由于早期磁测精度限制及南海复杂的扩张方式,导致 3 个次海盆的张开年龄、张开次序及扩张方向等仍然存在许多争议. 几十年过去了,由于没有重、磁、震数据的更新与介入,有关南海形成演化的基础科学问题一直没有取得突破性进展.

南海深部地壳结构蕴含着南海海盆形成演化历程的重要信息,是探讨边缘海形成演化的“骨架”及深部动力学的基础. 在众多的深部结构研究方法中,人工深地震探测由于分辨率最高、应用范围最广,始终占据着重要的地位. 自 20 世纪 60 年代至今,南海海域经历了声纳浮标探测、双船扩展剖面(ESP)及先进的海底地震仪(OBS)探测 3 个阶段(丘学林等, 2003). 在南海北部陆缘积累了多条深地震探测剖面数据(图 1),如 1985 年中美合作的双船扩展剖面探测(ESP-E、ESP-C、ESP-W)(姚伯初等, 1994; Nissen *et al.*, 1995)、1993 年中日合作的海底地震仪探测(OBS1993)(Yan *et al.*, 2001)、1996 年中德合作的单分量海底地震仪探测(OBH1996-2、OBH1996-3、OBH1996-4)(Qiu *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2009)、2001 年中国科学院南海海洋研究所和广东省地震局和台湾海洋大学合作的海底地震仪探测(OBS2001)(Wang *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2010)、2003 年中国科学院地质地球物理研究所等单位在潮汕坳陷实施的宽频带 OBS 探测实验

(OBS2003)(周龙泉等, 2005)、2006 年国家海洋局第二海洋研究所与中国科学院南海海洋研究所合作在南海中北部完成的 3 条剖面探测(OBS2006-1、OBS2006-2、OBS2006-3)(吴振利等, 2008; 阮爱国等, 2009b)以及后来 2007 年与 2008 年台湾海洋大学完成两条测线(T2007-Line1 和 T2008-Line2)(邱懋翔, 2010). 这些探测取得了大量的研究成果,推测了华南滨海断裂带(赵明辉等, 2004; 徐辉龙等, 2006; Xia *et al.*, 2010),确认出潮汕坳陷巨厚的中生代地层(阮爱国等, 2009a),并识别出高速层(Nissen *et al.*, 1995; Yan *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2006; 邱懋翔, 2010; Zhao *et al.*, 2010)、低速层(赵明辉等, 2004, 2007)等具有特殊构造意义的速度异常层,极大地丰富了对南海北部陆缘深部结构特征的认识.

相对于南海北部陆缘,我国对南海南部陆缘及深海洋盆区域的地质、地球物理资料掌握较少,研究程度较低,严重制约了南海南北共轭陆缘的对比研究,迫切需要加强南海南部及深海盆洋壳区的深部结构探测,从南海全局的角度研究其形成演化问题. 2009 年在国家科技部“973”项目“南海大陆边缘动力学及油气资源潜力”的支持与资助下,中国科学院南海海洋研究所、国家海洋局二所和中国科学院地质与地球物理研究所合作,在南海南部海区完成了 2 条海底地震测线(OBS2009-1、OBS2009-2),填补了南海南部深地震探测的空白(图 1, 2),为南海南北共轭大陆边缘对比研究提供了第一手基础地震数据,对于构建南海的形成演化理论具有重要科学意义.

1 南海南部海域地质地球物理特征

南海南部海区(8°~16°N, 111°~119°E)主要包括西南次海盆、中央次海盆南缘及南沙地块岛礁区. 研究区内地形复杂,有宽阔平坦的深海洋盆,也包括地形多变的南沙岛礁区(图 2). 南沙地块岛礁区主要由西部的永暑礁与大现礁、中部的太平岛及东部的礼乐滩组成. 两个次海盆的南部边缘,形状如锯齿状,海盆中央分布着大小不一的海山. 西南次海盆中部的长龙海山,主体走向为 NE 向,宽 10 km,长 300 km,高 700~3 100 m(姚伯初, 1999);中央次海盆中部的珍珠—黄岩海山链(沿 15°N 方向),东西长 200 km,南北宽 40~60 km,海山顶相对于海底高差达 4 000 m;南北向的中南海山,南北长 100 km,将中央次海盆与西南次海盆分开.

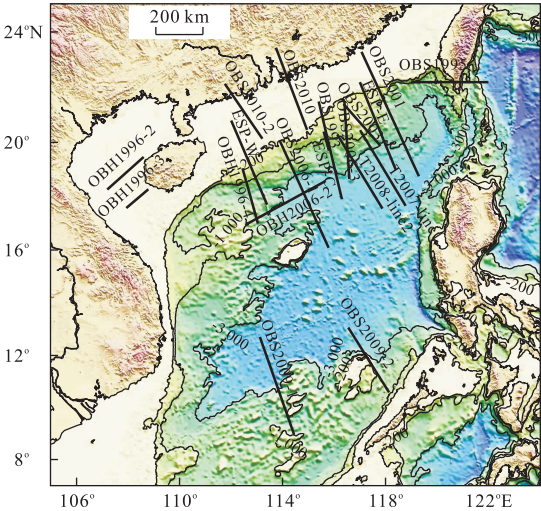


图 1 南海深地震测线实施位置

Fig. 1 Deep seismic survey lines in the South China Sea
等深线单位为 m;水深色标同图 3

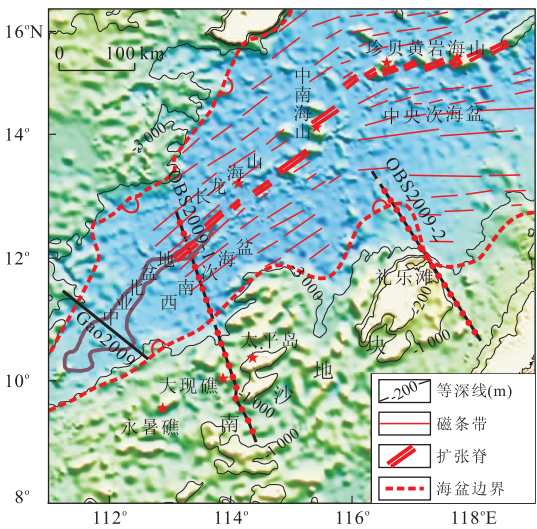


图 2 南沙海域深地震探测位置

Fig. 2 Deep seismic experiments in the Nansha area of the South China Sea

红色点为部署的 OBS;灰色点为没有成功回收的 OBS;磁条带、扩张脊及海盆边界数据参考文章 Briais *et al.* (1993)

研究区内自由空间重力异常特征与上述地形特征基本对应,礼乐滩表现为自由空间重力高值异常带,南部的南沙海槽为一条 NE-SW 走向的负重力梯度带(金庆焕和李唐根,2000);中央次海盆地区为低值正异常区,盆内的海山处为高值负异常(姚伯初等,1994);西南次海盆空间重力异常呈东北向分布,对应于海盆扩张脊的长龙海山表现为一个负异常,这与大洋中脊的重力异常特征一致(金庆焕和李唐根,2000),说明扩张脊相对于周围岩石来说表现为低密度物质. 研究区磁异常特征主体走向以 NE 和近 EW 向为主,由西南部的一 100 nT 向东北礼乐滩南部增至 100 nT;南沙群岛岛礁区表现为局部高值磁异常区,异常值在 -50~100 nT 之间变化(金庆焕和李唐根,2000). 深海盆区表现为磁条带异常区,以中南海山分界,中央次海盆磁条带近 EW 向,磁异常较高,而西南次海盆展示近 NE 向磁条带,磁异常较低(Li *et al.*, 2007). 磁异常强度的差异可能是由于基底岩石磁化率不同,或是由于西南次海盆高的热流值导致较薄的磁化层而引起的(Li *et al.*, 2008).

2 南海南部陆缘深部结构特征及研究方法

2.1 深部莫霍面特征与地壳类型

南海南部的深部结构研究主要是根据重力和水

深资料来计算地壳厚度及莫霍界面深度(苏达权等, 1996; 苏达权, 2002; Braiterberg *et al.*, 2006),地震探测资料主要是根据有限的国外公开发表的声纳浮标、单道地震和双船扩展地震剖面(Ludwig *et al.*, 1979; Taylor and Hayes, 1983),仅仅从宏观上约束区域的地壳厚度与莫霍面深度变化,并没有精细的深地震探测数据.

研究区莫霍面埋深总体变化趋势与水深呈镜像关系,又不同程度地受到新生代隆坳格局影响(图 3). 南沙岛礁区的莫霍面埋深多在 20 km 以上,表现为自 SW 向 NE 逐渐加深,至礼乐滩达到最大(28 km);在西南次海盆与中央次海盆的交界处,莫霍面等值线表现为急剧变化的梯度带,在海盆内莫霍面埋深降至 12 km 以内;在南海南缘的新生代沉降带内,出现多处莫霍面上隆现象,万安盆地、曾母盆地、南沙海槽等处莫霍面埋深仅 12~16 km(图 3),若除去新生代沉积层,这些地区地壳非常薄.

研究区地壳类型分为洋壳和过渡型地壳. 洋壳主要分布在北部深海盆区(图 2),根据附近的声纳浮标和双船扩展地震资料(Ludwig *et al.*, 1979; Taylor

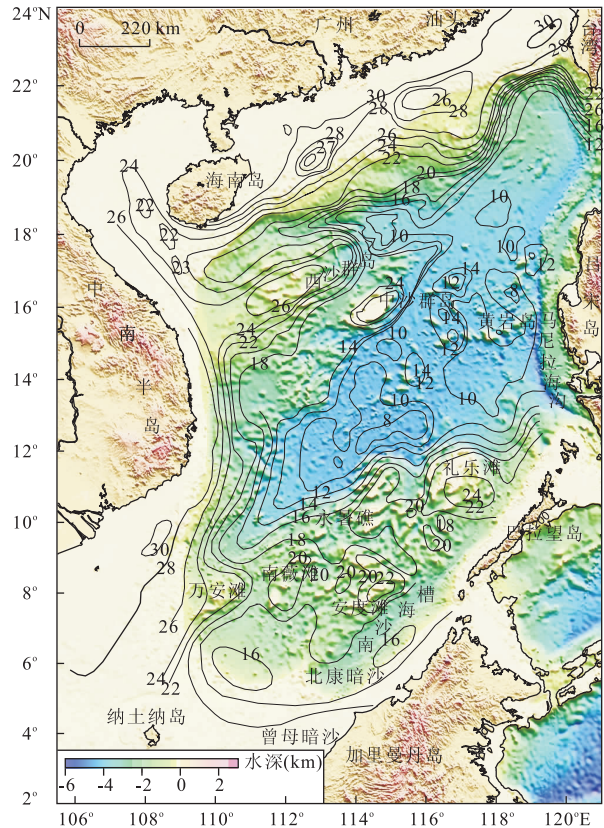


图 3 南海重力计算的莫霍面埋深(苏达权, 2002)

Fig. 3 The isobaths of Moho discontinuity calculated by gravity data in the South China Sea

and Hayes, 1983), 洋壳基底以下可分为 2 个速度层(大洋层 2 和层 3), 层 2 又可细分为两层(2B 和 2C), 速度分别为 5.0~5.2 km/s 和 5.9~6.2 km/s, 厚度一般在 2 km 左右, 与一般大洋和边缘海的层 2 厚度相当(White *et al.*, 1992); 层 3 速度为 6.7~7.1 km/s, 平均厚度在 3.4 km, 比一般大洋层 3 薄 1~2 km(如西太平洋); 层 2 和层 3 总厚度变化不大, 一般地壳厚度为 5~8 km(Ludwig *et al.*, 1979; 万玲等, 2004). 过渡减薄型地壳多分布在由多个块体镶嵌而成的南沙岛礁区, 一般地壳厚度为 18~26 km.

然而, 以上研究主要是根据重力资料计算莫霍界面(苏达权等, 1996; 苏达权, 2002), 深部结构研究是根据有限的声纳浮标、单道地震和双船扩展地震资料进行的(Ludwig *et al.*, 1979; Taylor and Hayes, 1983), 而没有海底地震仪深地震探测数据.

2.2 非火山型共轭陆缘对比分析

目前人们虽然对大陆边缘进行了许多探测与研究, 但对洋盆产生过程中大陆岩石圈在张裂、破裂分离期间岩石圈的变形过程及其特征仍然认识不清, 科学家常常将破裂分离前连在一起的大陆边缘(共轭边缘)放在一起研究, 如研究了 30 多年的 Newfoundland 与 Iberia 共轭陆缘. 这一对共轭陆缘有许多相似之处: (1) 结构与陆壳结构相似, 均具有 3 层速度结构特征; (2) 在陆壳地幔上涌形成蛇纹石化地幔, 从而构成洋陆过渡带; (3) 在张裂初始阶段以典型的半地堑沉积为主等特点(Funck *et al.*, 2004; Péron-Pinvidic and Manatschal, 2009). 然而, 随着地震地球物理资料的不断补充与完善, 越来越多的不同张裂细节被认识. 这一对共轭陆缘存在着明显的张裂不对称, 表现为两者的拉张系数不同、两边的减薄速率不同等. 南海在新生代就像大西洋在中、新生代一样, 也是经过大陆岩石圈张裂(rifting)、破裂分离(breakup)和海底扩张(spreading)生成的小洋盆. 南海与大西洋相比, 其张裂、破裂及海底扩张都较为年轻, 引起岩石圈变形的构造因素仍然存在, 是研究共轭陆缘较为理想的场所. 对 Newfoundland 与 Iberia 这一对共轭陆缘的研究能为南海南北共轭陆缘的张裂体系研究提供思路与借鉴.

3 南海南部深地震探测的重要研究方向及科学意义

此次南沙海域深地震探测数据的处理与格式转

换工作基本完成(丘学林等, 2009; 吴振利等, 2010), 目前在区域地质基础上构建了初始速度结构模型, 完成了各种震相的走时拾取工作, 今后的深部结构模拟与构造解释研究应重点集中在以下几方面.

(1) 西南次海盆的深部结构研究. 西南次海盆位于西沙—中沙地块和南沙地块之间, 是一个 NE 向开口的三角形盆地, 开口在 115°E 附近与中央次海盆相连, 两个次海盆间以南北向转换断层(中南断裂)为边界, 中南断裂两侧的地质与地球物理特征存在明显差异(姚伯初, 1995; Li *et al.*, 2007). 前人对该海盆扩张时间的见解仍然存在分歧, 对海盆内沉积时代也有不同的看法. 通过对该海盆的反射地震剖面对比解释(Schluter *et al.*, 1996; Yan and Liu, 2004), 识别出 T₅(下中新统)以上的地层. Gao *et al.* (2009) 对反射地震剖面解释表明(图 2), 西南次海盆洋壳部分在扩张脊上发育厚的沉积, 且沉积向两侧变薄变新. 一种解释是早期(晚始新世)扩张形成的洋壳被沉积充填; 另一种可能是西南次海盆并未发生全体的扩张, 在西南部保留了洋陆过渡阶段的裂谷, 而被定名为“中业北”的裂谷盆地曾受到同扩张岩浆活动的强烈侵扰(图 2). 李家彪(2011)认为西南次海盆具有渐进式海底扩张模式, 东段是火山侵入段, 中段为中央裂谷, 较为平坦的西段为陆坡延续. 可见, 西南次海盆扩张年代与扩张模式仍然存在理论认识的提升空间. 从穿过西南次海盆的 OBS2009-1 测线的深部结构研究中可望获得基底及莫霍面的展布形态与速度分布特征, 并从深部结构的角度约束西南次海盆的形成演化模式. 由于基底不受新近构造地质作用的影响, 保留着扩张脊、海沟、倾斜的陆块等构造幅度与构造特点, 是识别历史构造特征及推断形成演化动力学机制的关键(Braitenberg *et al.*, 2006). 由于西南次海盆面积窄, 形态对称, 共轭破裂点易于选取, 该区深部结构研究成果还将有助于推进对大陆破裂过程的科学认识.

(2) 南海深海盆中海山性质的研究. 深海盆中分布的海山与南海中具有陆壳性质的微陆块(包括西沙、东沙、中沙, 巴拉望等地块)明显不同(鄢全树, 2008). 海山高差变化较大, 其地壳厚度 6~8 km, 莫霍面埋深 10~12 km, 具有洋壳性质, 一般沿着扩张中心或深达岩石圈的断裂等构造薄弱带分布, 是南海形成演化过程中的产物, 对其性质属性的研究直接关系到南海形成演化模式问题. 西南次海盆中部

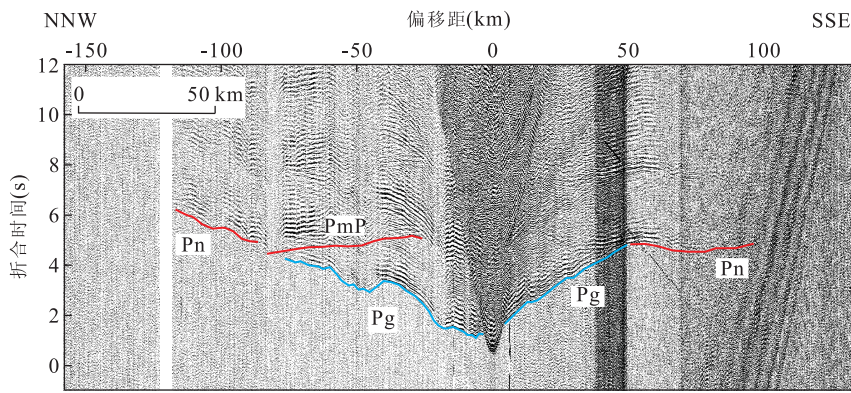


图 4 测线 OBS2009-1 中 OBS33 台站综合记录剖面
Fig. 4 Preliminary seismic record section of OBS33 along the line OBS2009-1
折合速度为 $8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 折合时间 (T_r) = 时间 - 距离 / 8.0

的长龙海山,有学者认为是海底扩张停止后多期火山喷发作用形成(姚伯初, 1999). 南北走向的中南海山较为特殊,是中央次海盆与西南次海盆的分界线,在南海扩张过程中可能充当了转换断层的作用(Li *et al.*, 2007). 中央次海盆中部的珍贝—黄岩海山链是东西向海山链的代表,前人研究表明,这个海山链是在 16 Ma 前南海扩张停止后晚期的火山作用形成的(Taylor and Hayes, 1980; Briais *et al.*, 1993; Yan *et al.*, 2006). 那么这个沿残余洋脊方向发育的火山链的形成机制如何? 是否为扩张结束时剩余岩浆活动的产物(Yan *et al.*, 2006, 2008)? 在残余扩张脊下面是否存在岩浆房? 最新的深地震测线数据将力求解决上述问题.

(3)南海南北共轭被动陆缘的对比研究. 由于受板块变动的影响,南沙海域在中生代位于华南陆缘,作为活动大陆边缘的一部分,在新生代随着南海陆缘裂解和海底扩张,南沙地块漂移至南海海盆南侧(Taylor and Hayes, 1983),成为北部陆缘的共轭陆缘. 南海北部陆缘已进行了多条剖面探测,认识了南海北部陆缘深部地壳结构的基本特征(丘学林等, 2003). 如前所述,南海南部陆缘仅有的两条 OBS 测线(OBS2009-1, OBS2009-2),填补了该区深地震探测的空白(丘学林等, 2009; 吴振利等, 2010),对其深部结构研究显得极为重要. 此次实验共投放海底地震仪(OBS) 37 台,其中 OBS2009-1 测线投放 20 台,成功回收 18 台; OBS2009-2 测线投放 17 台,成功回收 16 台,实验回收率达到 92%. 此次地震数据初步处理结果表明,数据质量良好(图 4),记录来自莫霍界面的反射震相(PmP)及上地幔的折射震相(Pn),可望获得良好的深部地壳结构. 这两条测线

与南海北部陆缘的哪条剖面、哪个位置互为共轭? 如果去掉洋盆,当时是如何张裂的? 南海形成演化故事将如何撰写? 共轭陆缘上发育有相应的盆地,其深部结构、沉积及发育机制的对比研究,对于正确认识南海南部的深部构造与浅部构造、新生代与前新生代构造的成生关系、从南海全局的角度建立南海完整的张裂、拉张、扩张、关闭历史,都具有重要的科学意义.

特别值得说明的是,国家自然科学基金委重大研究计划“南海深海过程演变”于 2010 年 7 月正式立项,这是我国重视海洋事业、走向系统深海科学研究的良好开端. 南海中央次海盆与西南次海盆的大规模的三维深地震探测项目,以及南海磁条带深拖探测项目优先获得了重点项目资助(<http://www.scs-deep.org/>),将力求获得洋盆扩张脊的精细深部速度结构及精确磁条带年龄,为构建整个边缘海生命史提供重要基础数据支持.

致谢:感谢全体科调队员与“实验 2”号全体船员在 2009 年获取地震数据航次中付出的辛勤劳动,特此致谢!

References

Barckhausen, U., Roeser, H. A., 2004. Seafloor spreading anomalies in South China Sea revisited. In: Clift, P., Wang, P., et al., eds., *Continent-ocean interactions within East Asian marginal seas*. Geophys. Monogr., AGU, Washington, D. C., 149: 121–125.

Braitenberg, C., Wienecke, S., Wang, Y., 2006. Basement structures from satellite-derived gravity field: South China Sea ridge. *J. Geophys. Res.*, 111(B05407): 1–15. doi:10.1029/2005JB003938

- Briaies, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Update interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. *J. Geophys. Res.*, 98 (B4): 6299—6328.
- Cande, S. C., Kent, D., 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, 100(B4): 6093—6095.
- Chiu, M. X., 2010. The P-wave velocity modeling of the transitional crust in northern South China Sea continental margin (Dissertation). Jilong, Institute of Applied Geosciences College of Ocean Science and Resource, National Taiwan Ocean University (in Chinese with English abstract).
- Funck, T., Jackson, H. R., Loudon, K. E., et al., 2004. Crustal structure of the northern Nova Scotia rifted continental margin (eastern Canada). *J. Geophys. Res.*, 109 (B09102): 1—19. doi: 10.1029/2004JB003008
- Gao, H. F., Zhou, D., Qiu, Y., 2009. Relationship between formation of Zhongyabei basin and spreading of SW subbasin, the South China Sea. *Journal of Earth Science*, 20(1): 66—76. doi: 10.1007/s12583-009-0007-2
- Jin, Q. H., Li, T. G., 2000. Regional geologic tectonics of the Nansha Sea area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. F., Zhou, Z. Y., Li, J. B., et al., 2007. Structures of the northeasternmost South China Sea continental margin and ocean basin: geophysical constraints and tectonic implications. *Mar. Geophys. Res.*, 28(1): 59—79. doi: 10.1007/s11001-007-9014-9
- Li, C. F., Zhou, Z. Y., Li, J. B., et al., 2008. Magnetic zoning and seismic structure of the South China Sea ocean basin. *Mar. Geophys. Res.*, 29(4): 223—238. doi: 10.1007/s11001-008-9059-4
- Li, J. B., Jin, X. L., Gao, J. Y., 2002. Morpho-tectonic study on late-stage spreading of the eastern subbasin of South China Sea. *Sci. China (Ser. D)*, 45: 978—989.
- Li, J. B., 2011. The three-dimensional tomography and its tectonic evolution in the southwestern subbasin of South China Sea. The first seminar of South China Sea Deep, Shanghai, 1 (in Chinese).
- Ludwig, W. J., Kumar N., Houtz R. E., 1979. Profile-Sonobuoy measurement in the South China Sea basin. *J. Geophys. Res.*, 84 (B7): 3505—3518. doi: 10.1029/JB084iB07p03505
- Nissen, S. S., Hayes, D. E., Yao, B. C., et al., 1995. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension: northern margin of the South China Sea. *J. Geophys. Res.*, 100(B11): 22447—22483. doi: 10.1029/95JB01868
- Péron-Pinvidic, G., Manatschal, G., 2009. The final rifting evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: a new point of view. *Int. J. Earth Sci.*, 98(7): 1581—1597. doi: 10.1007/s00531-008-0337-9
- Qiu, X. L., Shi, X. B., Yan, P., et al., 2003. Recent progress of deep seismic experiments and studies of crustal structure in northern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 13(7): 231—236 (in Chinese).
- Qiu, X. L., Wang, P., Zhao, M. H., et al., 2009. Ocean bottom seismometer experiment in the southern continental margin of the South China Sea, The 25th annual meeting of Chinese Geophysical Society, Beijing, China Science and Technology University Press, 620 (in Chinese).
- Qiu, X. L., Ye, S. Y., Wu, S. M., et al., 2001. Crustal structure across the Xisha trough, northwestern South China Sea. *Tectonophysics*, 341(1—4): 179—193. doi: 10.1016/S0040-1951(01)00222-0000
- Ruan, A. G., Niu, X. W., Wu, Z. L., et al., 2009a. The 2D velocity and density structure of the Mesozoic sediments in the Chaoshan depression. *Geological Journal of China Universities*, 15(4): 522—528 (in Chinese with English abstract).
- Ruan, A. G., Qiu, X. L., Li, J. B., et al., 2009b. Wide aperture seismic sounding in the margin seas of China. *South China Journal of Seismology*, 29(2): 10—18 (in Chinese with English abstract).
- Schluter, H. U., Hinz, K., Block, M., 1996. Tectono-stratigraphic terranes and detachment faulting of the South China Sea and Sulu Sea. *Marine Geol.*, 130(1—2): 39—51, 58—78. doi: 10.1016/0025-3227(95)00137-9
- Su, D. Q., 2002. A special investigation report on exclusive economic zone and continental shelf survey. Maritime Press, Beijing (in Chinese).
- Su, D. Q., Huang, C. L., Xia, K. Y., 1996. The crust in the Nansha trough. *Scientia Geologica Sinica*, 31(4): 409—415 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1980. The tectonic evolution of the South China Sea basin. In: Hayes, D. E., ed., The tectonic and geologic evolution of southeastern Asian Seas and islands. Geophys. Monogr., AGU, Washington, D. C., 23: 89—104.
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1983. Origin and history of the South China Sea basin. In: Hayes, D. E., ed., The tectonic and geologic evolution of southeastern Asian Seas

- and Islands, II. Geophys. Monogr., AGU, Washington, D. C., 27: 23—56.
- Wan, L., Wu, N. Y., Zeng, W. J., et al., 2004. Crustal structure in Nansha and its adjacent area. *Geological Research of South China Sea*, 16: 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., 2009. Toward scientific breakthrough in the South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 28(3): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. K., Chen, M. K., Lee, C. S., et al., 2006. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 412(3—4): 237—254. doi:10.1016/j.tecto.2005.10.039
- White, R. S., McKenzie, D., O'Nions, R. K., 1992. Oceanic crustal thickness from seismic measurements and rare earth element inversions. *Journal of Geophysical Research*, 97 (B13): 19683 — 19715. doi: 10.1029/92JB01749
- Wu, S. M., Qiu, X. L., Zhou, D., et al., 2009. Crustal structure beneath Yinggehai basin and adjacent Hainan Island, and its tectonic implications. *Journal of Earth Science*, 20(1): 13—26. doi: 10.1007/s12583—009—0002—7
- Wu, Z. L., Ruan, A. G., Li, J. B., et al., 2008. New progress of deep crust Sounding in the mid-northern South China Sea using ocean bottom seismometers. *South China Journal of Seismology*, 28(1): 21—28 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. L., Ruan, A. G., Li, J. B., et al., 2010. New progress of deep crust sounding in the southern margin of South China Sea using ocean bottom seismometers. *Journal of Marine Science*, 28(1): 55—61 (in Chinese with English abstract).
- Xia, S. H., Zhao, M. H., Qiu, X. L., et al., 2010. Crustal structure in an onshore-offshore transitional zone near Hong Kong, northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Science*, 37(5—6): 460—472. doi:10.1016/j.jseas.2009.11.004
- Xu, H. L., Qiu, X. L., Zhao, M. H., et al., 2006. Characteristics of the crustal structure and hypocentral tectonics in the epicentral area of Nan'ao earthquake ($M=7.5$), the northeastern South China Sea. Chinese Science Bulletin, 51(SII): 83—91 (in Chinese).
- Yan, P., Deng, H., Liu, H. L., et al., 2006. The temporal and spatial distribution of volcanism in the South China Sea region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(5): 647—659. doi:10.1016/j.jseas.2005.06.005
- Yan, P., Liu, H. L., 2004. Tectonic-stratigraphic division and blind fold structures in Nansha Waters, South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(3): 337—348. doi:10.1016/j.jseas.2003.12.005
- Yan, P., Wang, Y. L., Liu, H. L., 2008. Post-spreading transpressive faults in the South China Sea basin. *Tectonophysics*, 450(1—4): 70—78. doi:10.1016/j.tecto.2008.01.015
- Yan, P., Zhou, D., Liu, Z. S., 2001. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 338(1): 1—21. doi:10.1016/S0040—1951(01)00062—2
- Yan, Q. S., 2008. Geochemistry of Cenozoic alkali basalt from the South China Sea and its geodynamical significance (Dissertation). Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., 1995. Characteristics and tectonic meaning of Zhongnan-Liyue fault. *Geological Research of South China Sea*, 7: 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., 1999. On the lithospheric rifting model in the southwest subbasin of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(2): 37—48 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Zeng, W. J., Hayes, D. E., et al., 1994. The geological memoir of South China Sea survey jointly by China and USA. China University of Geosciences Press, Beijing, 204 (in Chinese).
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xia, S. H., et al., 2010. Seismic structure in the northeastern South China Sea: S-wave velocity and V_p/V_s ratios derived from three-component OBS data. *Tectonophysics*, 480(1—4): 183—197. doi:10.1016/j.tecto.2009.10.004
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xu, H. L., et al., 2007. The distribution and identification of the low-velocity layer in the northern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 17(5): 591—600 (in Chinese).
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Ye, C. M., et al., 2004. Analysis on deep crustal structure along the onshore-offshore seismic profile across the Binhai (Littoral) fault zone in northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.*, 47(5): 845—852 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. Q., Liu, F. T., Liu, J. S., et al., 2005. Determination of the crustal velocity model of Dongsha islands using the inversion of τ -p wave field. *Progress in Geophysics*, 20(2): 503—506 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

金庆焕, 李唐根, 2000. 南沙海域区域地质构造, 海洋地质与

第四纪地质,20(1):1—8.

李家彪,2011. 南海西南次海盆中脊 3D 地震成像及其构造演化. 南海深海过程演变,上海,同济出版社,1.

李家彪,金翔龙,高金耀,2002. 南海东部海盆晚期扩张的构造地貌研究. 中国科学(D辑),32(3):239—248.

丘学林,施小斌,阎贫,等,2003. 南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展. 自然科学进展,13(3):231—236.

丘学林,王平,赵明辉,等,2009. 南海南部大陆边缘的海底地震仪探测. 北京:中国地球物理学会第二十五届年会论文摘要,中国科学技术出版社,620.

邱懋翔,2010. 南中国海北部大陆边缘之海陆地壳过渡带的 P 波速度模式(硕士学位论文). 基隆:台湾海洋大学应用地球科学研究所.

阮爱国,牛雄伟,吴振利,等,2009a. 潮汕坳陷中生代沉积的折射波 2D 速度结构和密度. 高校地质学报,15(4):522—528.

阮爱国,丘学林,李家彪,等,2009b. 中国海洋深地震探测与研究进展. 华南地震,29(2):10—18.

苏达权,2002. 我国专属经济区和大陆架勘测专项综合报告. 北京:海洋出版社.

苏达权,黄慈流,夏戡原,1996. 论南沙海槽的地壳性质. 地质科学,31(4):409—415.

万玲,吴能友,曾维军,等,2004. 南沙及其邻近海域地壳结构特征. 南海地质研究,16:1—9.

汪品先,2009. 南海—我国深海研究的突破口. 热带海洋学报,28(3):1—4.

吴振利,阮爱国,李家彪,等,2008. 南海中北部地壳深部结构探测新进展. 华南地震,28(1):21—28.

吴振利,阮爱国,李家彪,等,2010. 南海南部海底地震仪试验及初步结果. 海洋学研究,28(1):55—61.

徐辉龙,丘学林,赵明辉,等,2006. 南海东北部南澳大地震($M=7.5$)震中区的地壳结构特征与震源构造. 科学通报,51(SII):83—91.

鄢全树,2008. 南海新生代碱性玄武岩的特征及其地球动力学意义(硕士学位论文). 北京:中国科学院研究生院.

姚伯初,1995. 中南—礼乐断裂的特征及其构造意义. 南海地质研究,7:1—14.

姚伯初,1999. 南海西南海盆的岩石圈张裂模式探讨. 海洋地质与第四纪地质,19(2):37—48.

姚伯初,曾维军, Hayes, D. E., 等,1994. 中美合作调研南海地质专报. 武汉:中国地质大学出版社,204.

赵明辉,丘学林,徐辉龙,等,2007. 南海北部沉积层和地壳内低速层的分布与识别. 自然科学进展,17(4):471—479.

赵明辉,丘学林,叶春明,等,2004. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析. 地球物理学报,47(5):845—852.

周龙泉,刘福田,刘劲松,等,2005. 利用 τ -p 波场反演法确定东沙群岛的地壳速度模型. 地球物理学进展,20(2):503—506.