https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.573

南海海底地震仪三维深地震探测的进展及挑战

赵明辉[1],杜　峰[1,4],王　强[1,4],丘学林[1,4],韩　冰[2],孙龙涛[1],张　洁[3],夏少红[1],范朝焰[1,4]

1.中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室,中国科学院南海海洋研究所,广东广州　510301
2.中国地质调查局广州海洋地质调查局,广东广州　510075
3.国家海洋局第二海洋研究所,浙江杭州　310012
4.中国科学院大学,北京　100049

摘要:获取深部速度结构是认识南海形成演化模式的基础.海底地震仪(OBS)二维与三维深地震探测技术是获取深部速度结构最成功的方法之一.OBS 三维探测结果揭示:西南次海盆横跨残留扩张脊两侧洋壳不对称增生的速度结构特征;东部次海盆具有 4 种不同洋壳类型的速度结构;珍贝－黄岩海山链是在海盆停止扩张后 6～10 Ma 岩浆活动形成的;东沙隆起区显示了张裂期后的岩浆活动及其上涌通道;南海东北部马尼拉俯冲带前缘是受到张裂期后岩浆活动影响的减薄陆壳.IODP367-368 钻探区实施的 OBS 三维探测将以建立南海洋陆转换带(COT)张裂－破裂机制模型为科学目标.OBS 三维探测方法在南海各向异性、岩浆活动、形成演化等方面将继续发挥着不可替代的作用.

关键词:海底地震仪;三维深地震探测;岩浆活动;洋陆转换带;残留扩张脊;地球物理.

中图分类号: P315　　**文章编号:** 1000－2383(2018)10－3749－13　　**收稿日期:** 2018－01－30

Current Status and Challenges for Three-Dimensional Deep Seismic Survey in the South China Sea

Zhao Minghui[1], Du Feng[1,4], Wang Qiang[1,4], Qiu Xuelin[1,4], Han Bing[2], Sun Longtao[1], Zhang Jie[3], Xia Shaohong[1], Fan Chaoyan[1,4]

1.*Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology of Chinese Academy of Sciences, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510301, *China*
2.*Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou* 510075, *China*
3.*The Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou* 310012, *China*
4.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: The deep velocity structures are the basis for building the formation and revolution of the South China Sea (SCS). Two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) OBS surveys are successful technique to acquire the deep seismic structures. The results from 3D OBS surveys in the SCS have enhanced the knowledge for theoretical concepts. In the Southwest sub-basin, the asymmetrical velocity structures have been presented across the extinct spreading ridge (ESR) due to the development of detachment faults. In the central part of the east sub-basin, four types of crust have been defined: thin oceanic crust (<5 km); typical oceanic crust (5－6 km); thick oceanic crust hosting post-spreading volcanoes (>6 km) with significant intrusive roots; and thick oceanic crust with enhanced spreading features (>6 km) but without significant roots. The post-spreading volcanoes (Zhenbei-Huangyan seamounts chain) were formed 6－10 Ma ago during a N-S tensional episode, several millions of years after seafloor spreading ceased in the SCS, and emplaced where the crust was the weakest, might have been

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41730532,91428204,41576070,41376063);广东省基金团队项目(No.2017A030312002);国家自然科学基金委员会共享航次(No.NORC-08).

作者简介:赵明辉(1967－),女,研究员,博士,从事海洋地球物理与深部结构研究.ORCID: 0000-0003-0848-9210.E-mail: mhzhao@scsio.ac.cn

引用格式:赵明辉,杜峰,王强,等,2018.南海海底地震仪三维深地震探测的进展及挑战.地球科学,43(10):3749－3761.

influenced by the Hainan plume activity through a buoyancy-driven partial melting mechanism. The study on Dongsha uplift highlights magmatic activities through upwelling channels after rifting ceasing. The velocity structure in the Manila subduction zone (northeastern SCS) shows the nature of the crust and its relationship with the Manila subduction slab. A 3D OBS survey will be carried out in 2018 in the area of the IODP Legs 367-368, aiming at building a model of lithospheric rifting and breakup mechanism in the continent-ocean-transition (COT) zone of the SCS. The joint 2D and 3D survey method will play a major role in the understanding of the SCS geodynamics by integrating IODP drilling results with information on the deep structures.

Key words: ocean bottom seismometers (OBS); three-dimensional deep seismic survey; magmatism; continental-oceanic transition (COT); extinct spreading ridge (ESR); South China Sea (SCS); geophysics.

0 引言

南海作为西太平洋最大的边缘海之一,是我国走向深海大洋战略的突破口(汪品先,2009,2012);其在新生代经历了早期张裂、破裂、海底扩张、到后期俯冲消减的近于完整的威尔逊循环过程,形成了一个具有独特演化模式的、贫岩浆型张裂陆缘的海盆(Zhou *et al*.,1995;李春峰等,2009;李春峰和宋陶然,2012;李家彪,2011).然而,研究南海存在两大难点,一是南海深海盆覆盖着沉积层,掩盖了海底扩张时期的海底构造;二是南海张裂期后与扩张期后的岩浆活动强烈,改变了先存的构造.为揭示南海形成演化过程,前人在1999年开展了第一次南海大洋钻探,即ODP184航次(Wang *et al*.,2000),通过在高沉积速率的陆坡打钻,获得了东亚季风在南海的记录;在2014年进行了第二次大洋钻探,即IODP349航次,在南海洋盆残留扩张脊附近打钻,以确定南海海盆扩张历史为主要科学目标(Expedition349 Scientist,2014).2017年2~6月,在南海开展了第三次大洋钻探,即IODP367-368航次,以揭示南海从张裂到破裂的演化模型与破裂机制为主要科学目标(Sun *et al*.,2016),这3次大洋钻探极大地丰富了对南海的形成历史、构造、沉积和古环境演变的认识,把南海研究推向了世界地学研究的前沿(Wang *et al*., 2000; Expedition 349 Scientist, 2014;Li *et al*.,2014,2015).

然而,为揭示南海从张裂到破裂的演化模型与机制,除了IODP钻探获取良好的由陆至洋、从沉积物至基底样品,以及钻孔岩心的地质地球化学等研究之外,更需要有地球物理探测的配合.特别是由于IODP钻探孔位有限、深度有限,最多只能获得沉积基底以下100~250 m的样品(Sun *et al*.,2016),无法对更深层的岩石进行约束.因此,开展深地震探测至关重要.

海底地震仪(ocean bottom seismometer,OBS)深地震探测技术,可以获取深至地幔岩石圈结构,是解决深部结构问题的有效手段(郝天珧和游庆瑜,2011;丘学林等,2012).与长缆多道地震探测相比,OBS有效探测深度更大(可达35~40 km),探测范围更广(可达200~300 km),获得的深部速度更为可靠(丘学林等, 2012).尤其是OBS仪器有四分量记录,其垂直分量和水听器分量数据可以记录气枪激发的纵波(P波)震相,获得P波速度结构,两个水平分量记录着转换横波(S波)信息(赵明辉等, 2007; Zhao *et al*., 2010).由于S波对于流体的敏感特性,综合Vp、Vs、Vp/Vs与泊松比等信息可有效约束岩石类型,因此,P/S联合在判断蛇纹石化地幔和下地壳高速层方面,有着得天独厚的优势(陆基孟, 1993).

南海深地震探测经历了声纳浮标、双船扩展剖面(expanding spread profile, ESP)、海底地震仪深地震探测3个阶段.到了20世纪90年代,海底地震仪探测技术日益成熟,在南海北部和南部陆缘开展了多条二维深地震探测剖面(图1),获得了大量数据质量好、深部信息丰富的地震资料.前期OBS探测结果揭示了南海北部陆缘的地壳结构具有由陆向海呈阶梯式减薄的特征,没有发现向海倾斜反射层(SDR),因而确定南海北部陆缘是贫岩浆型(非火山型)大陆边缘(郝天珧等, 2011; 李家彪, 2011; 吴振利等, 2011; 李三忠等, 2012; Ding *et al*., 2016);探明南海北部IODP367-368钻探区发育有大型深水/超深水盆地,如珠江口盆地白云-荔湾凹陷,随着第一口深水井(LW3-1-1井)的成功钻探,白云-荔湾凹陷已成为南海北部最具深水油气资源潜力的战略区(解习农等, 2011; 朱伟林等, 2012; 米立军等, 2016).

然而,OBS二维深地震探测,人工震源只是沿测线单方向放炮,海底地震仪只记录到单方向的深部地震波信息,获得的二维速度结构剖面不能全面地展示具有复杂的三维空间变化的岩石圈结构,如:南海北部陆缘洋陆转换带、残留扩张脊、马尼拉俯冲带等,有时甚至会陷入"盲人摸象"的误区,从而无法解释复杂的地质构造现象.2011年前后,在南海深海盆内完成了两个OBS三维网格探测,标志着南海

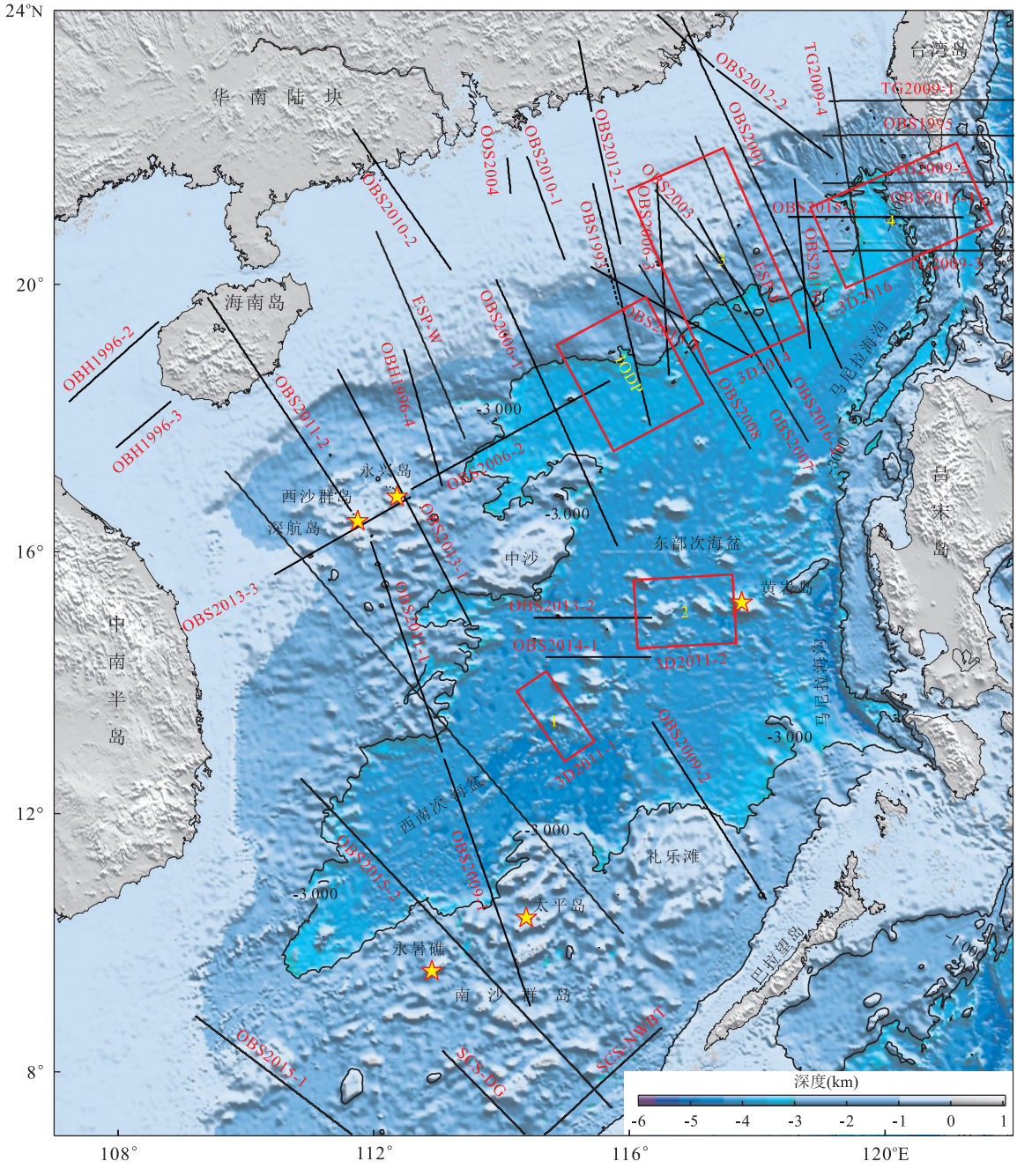

图 1　南海深地震探测现状

Fig.1　Locations of deep seismic surveys in the South China Sea

黑色实线为实施采集的二维深地震测线；标号为 1、2、3、4 的红色方框为已实施 OBS 三维深地震探测区域，具体 OBS 及测线位置见图 2、3、4 和 5；红色方框 IODP 为 2018 年即将实施 OBS 三维探测的洋陆转换带区域，详细部署见图 6

OBS 深地震探测由二维发展到三维，进入新的历史发展阶段（丘学林等，2012）.本文首先综述了 OBS 深地震探测在南海深部结构认识方面的重要作用，接着回顾了南海开展的 4 次 OBS 三维深地震探测实验及其重要突破性成果与认识，然后，详细介绍了为了解决南海洋陆转换带张裂—破裂机制科学问题，2018 年 5～7 月即将在 IODP367-368 钻探区实施的三维深地震探测情况，最后阐明了解决关键科学问题所面临的挑战及其结论.

1　南海三维深地震探测及重要进展

1.1　南海深海盆 OBS 三维深地震探测

海底扩张脊是重要的板块构造边界之一，更是洋

壳开始形成的地方.国际上多个研究计划(RIDGE,InterRidge,ILP,IODP等)都把扩张脊及洋壳增生过程作为研究重点.海底地震仪探测技术及三维层析成像方法的成熟使用,极大地推动了全球三维深部地震结构研究,已成为探讨深部动力学机制的基础.南海是停止扩张的边缘海,其扩张脊我们称其为残留扩张脊(ESR);南海残留扩张脊经历了一个中速—慢速—零速的过程,再加上停止扩张以后受到强烈的岩浆活动的改造,可以肯定南海残留扩张脊的深部地震结构一定会更加复杂,二维剖面研究不能全面地反映残留扩张脊复杂的三维空间变化.

南海西南次海盆呈喇叭形状(图1),形成时间为25～16 Ma(Li *et al*., 2012, 2014),其残留扩张脊沿NE-SW方向,长160 km,水深300～4 300 m,脊轴扩张中心宽有40～50 km(图1,图2a),后期岩浆活动形成的海山丰富,如龙南海山、龙北海山和中南海山,这些海山占据着残留扩张脊的位置.为了解洋脊下方的深部结构特征,2010年12月到2011年3月,部署了OBS三维深地震探测实验(图2a),4条测线共40台OBS,OBS间距为10～15 km,大容量气枪震源为0.098 m^3,炮间距约为200 m.但由于此次实验遭遇恶劣天气影响,只有26台OBS成功回收,为结构模拟带来一定困难与挑战,三维速度结构模拟工作仍在进行之中.二维主测线T1探测结果显示残留扩张脊两侧洋壳不对称扩张(图2b,2c),拆离断层(detachment fault)发育,由于在扩张期和扩张后岩浆供应量随时间和空间发生变化,从而导致地壳厚度的不同(Ding and Li, 2016; Zhang *et al*.,2016).然而,由于T1测线地震速度结构仅仅是二维正演模型,没有进行反演模拟的约束,对于低角度(24°)拆离断层以及上地幔低速带是否存在,二维正演速度结构模型中仍然存在许多推断与不确定性,期待接下来的三维速度结构模拟能够给出更多的验证.

而南海东部次海盆沿残留扩张脊方向上分布的珍贝—黄岩海山链,东西长约200 km,南北宽40～60 km,山顶相对海底高差达4 km.前人研究结果及IODP349航次结果,南海东部次海盆海底扩张年龄在33～15.5 Ma(Taylor and Hayes,1983; Briais *et al*.,1993;Li *et al*.,2014);然而当海底扩张停止后,岩浆活动仍在继续,珍贝—黄岩海山链形成于东部次海盆的残留扩张脊区域,根据珍贝和黄岩海山样品测年,时间分别为7.7 Ma和9.9 Ma(Wang *et al*.,2000);来自于IODP349航次U1431站位的火山碎屑的测年为13～8 Ma(Expedition 349 Scientists,2014),也就是说,形成珍贝和黄岩海山链的大规模岩浆活动是在海盆停止扩张后的2.5～7.5 Ma期间,至少持续了5 Ma.那么这个海山链的形成机制如何?是否属于扩张结束时剩余岩浆活动的产物?还是由于海南地幔柱的影响?

为此,2011年5月,在国家基金委重大研究计划"南海深海过程演变"项目支持下,由中国科学院南海海洋研究所主导,利用"实验2号"船,在东部次海盆开展了大规模的OBS三维深地震探测实验,部署了42台OBS,OBS间隔约10 km,整个OBS台阵呈"丰"字型分布(图3),回收41台,记录有效数据台站39台;震源系统由4支大容量1 500 L型号的BOLT气枪组成,震源总容量0.098 3 m^3,共激发8 252次有效炮点(张莉等,2013);该实验获得了大量数据质量好、深部信息多的地震资料,是截止目前为止在南海最成功的一次三维深地震探测实验,为获得深海盆扩张脊处的深部精细速度结构提供重要基础数据支持(王建等,2014).OBS三维探测揭示南海东部次海盆残余扩张脊速度结构具有复杂的三维空间变化,分为4种洋壳类型:(1)薄洋壳(<5 km),(2)典型洋壳(5～6 km),(3)以扩张期后岩浆活动为主的具有山根的厚洋壳(>6 km)和(4)以扩张特征为主的没有山根的厚洋壳(>6 km)(Zhao *et al*.,2018a,2018b).珍贝—黄岩海山链是海盆停止扩张后6～10 Ma岩浆活动的产物,其形成受到构造与岩浆的双重作用,可能是由于海南地幔柱(Xia *et al*.,2016)活动影响,通过浮力上涌减压熔融机制,岩浆沿着以前的构造薄弱带上涌,形成珍贝—黄岩海山链(He *et al*.,2016; Wang *et al*.,2016).关于东部次海盆背景噪音研究以及残留扩张脊的各向异性研究正在推进(Wang *et al*.,2018).

1.2 南海北部陆缘东沙隆起带三维深地震探测

南海东北部东沙隆起区是一个构造特征比较复杂的区域,发育有多个NE向相互平行的构造带,如高磁异常带、潮汕坳陷、北倾断裂带及磁静区.为了揭示该地区岩浆活动的强度和成因机制、中生代残留体的地壳属性、古俯冲构造体系的存在性和特征等构造信息,夏少红研究团队2014年在该区实施了主动源OBS三维深地震探测(图4),部署了53台OBS,OBS间隔约10～20 km,主测线垂直于南海北部陆缘的构造走向,沿NW-SE向布设,回收48台OBS,记录有效数据OBS有30台(图4a);震源系统由4支大容量1 500 L型号的BOLT气枪组成,震

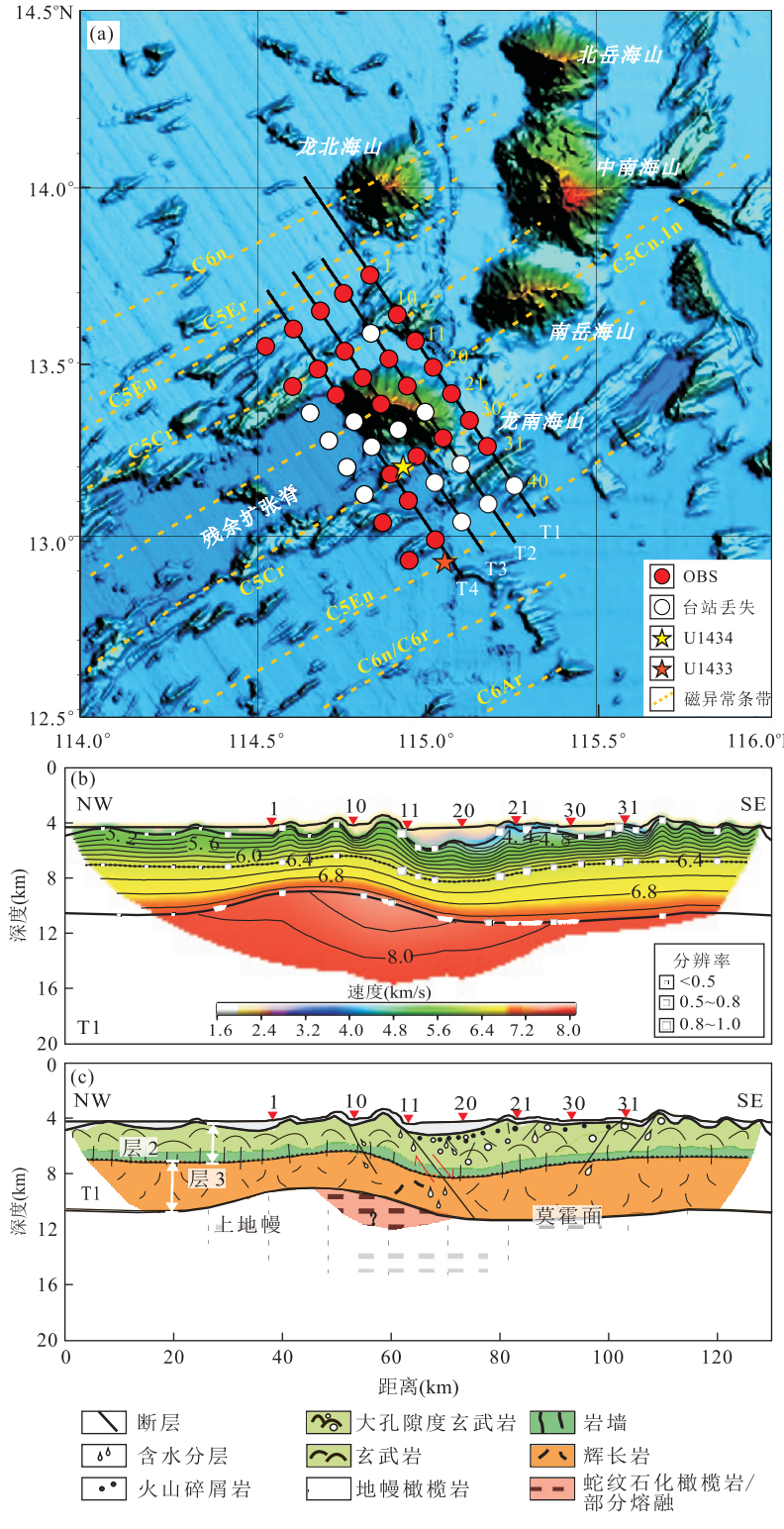

图 2　南海西南次海盆 OBS 三维深地震探测图(a)，T1 测线二维速度结构模型(b)及地质解释模型(c)

Fig.2　The three-dimensional deep seismic survey carried out in the southwestern subbasin of the SCS (a), the two-dimensional velocity model along T1 seismic line (b) and its geological model reference (c)

图 a 对应于图 1 中的红色方框 1，红色圆圈为 OBS 台站，白色为丢失 OBS 台站，黑色线段为放炮测线.图 c 据 Zhang *et al*.(2016)修改

源总容量 0.098 3 m^3，共激发 10 955 个炮点.

根据 OBS 三维探测中获取的多道地震数据以及前人发表的多道数据，在南海北部陆缘中东部共识别出了 45 座海山(图 4b)，并利用椭圆锥体近似

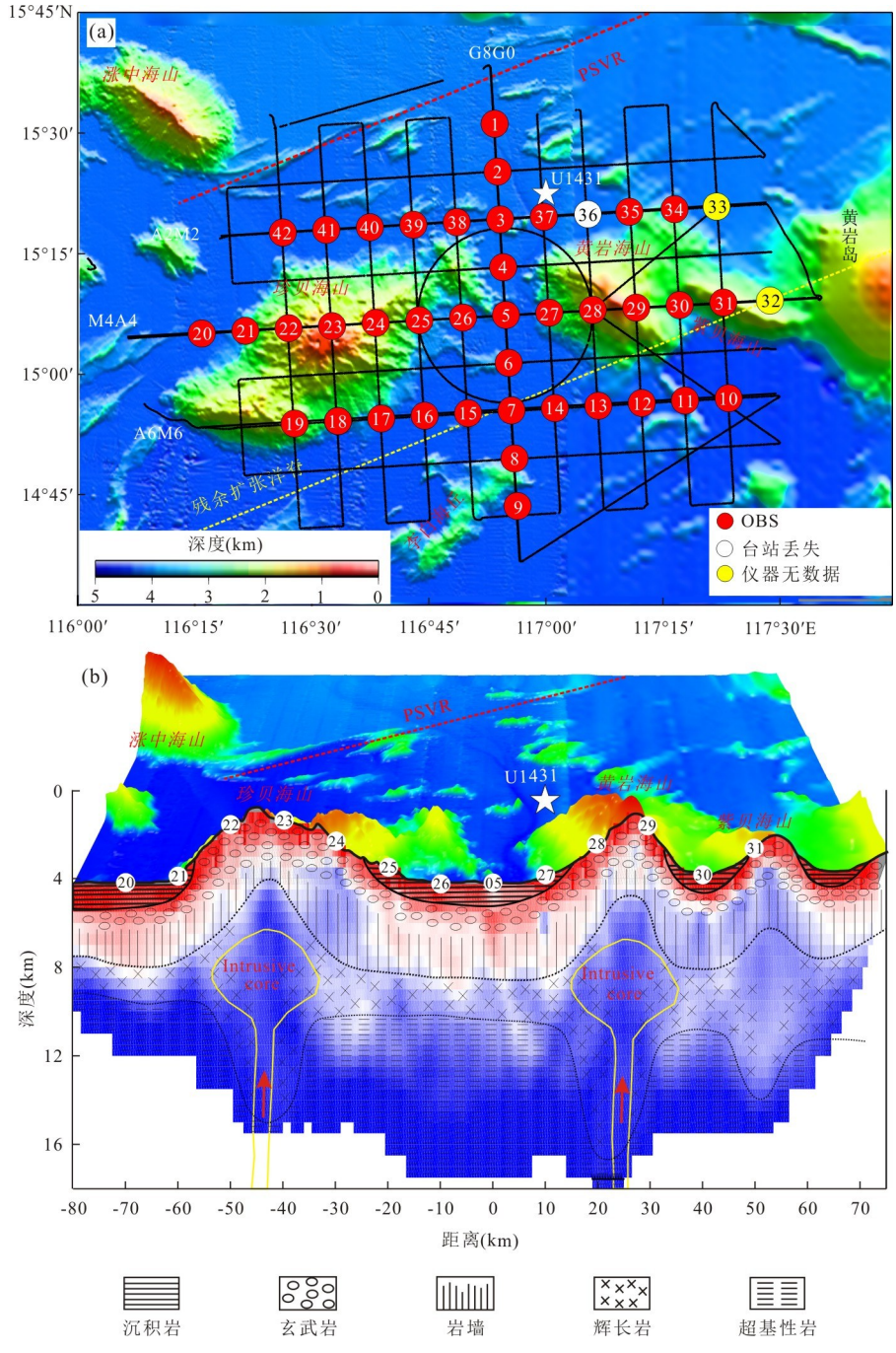

图 3　南海东部次海盆 OBS 三维深地震探测图(a)及横穿珍贝—黄岩海山链的三维速度切片解释模型(b)

Fig.3　The three-dimensional deep seismic survey carried out in the eastern sub-basin of the SCS (a), and the slice interpretation extracted from three-dimensional velocity model across Zhenbei-Huangyan seamounts chain (b)

图 a 对应于图 1 中的红色方框 2,红色圆圈为 OBS 台站,白色为丢失 OBS 台站,黄色为没有数据台站,黑色线段为放炮测线;图 b 据 Wang *et al*.(2016)修改,图中白色五角星为 IODP349 航次 U1431 站位,PSVR 代表扩张停止后岩浆活动岩脊

拟合海山单体形状,据此估算出了这 45 座海山的出露体积总量,达 2 644.89 km^3.通过统计海山椭圆底面长轴信息,发现其长轴优势方位角总体介于45°～90°之间,该方向与南海破裂期和扩张期产生的断裂体系走向(NE 和 NEE 向)较一致,指示这些断裂体系极可能是形成张裂后期火山活动的岩浆通道(Fan *et al*., 2017a,2017b).远震层析成像研究结果显示南海东北部上地幔存在一条明显的低速异常带(Xia *et al*.,2016),该低速异常带推测可能与南海北部裂后期发育的海底火山存在紧密联系(Fan *et al*.,2017a,2017b).南海北部已有的海山底部的地壳结构,显示海山下伏的地壳底部均存在高速异常

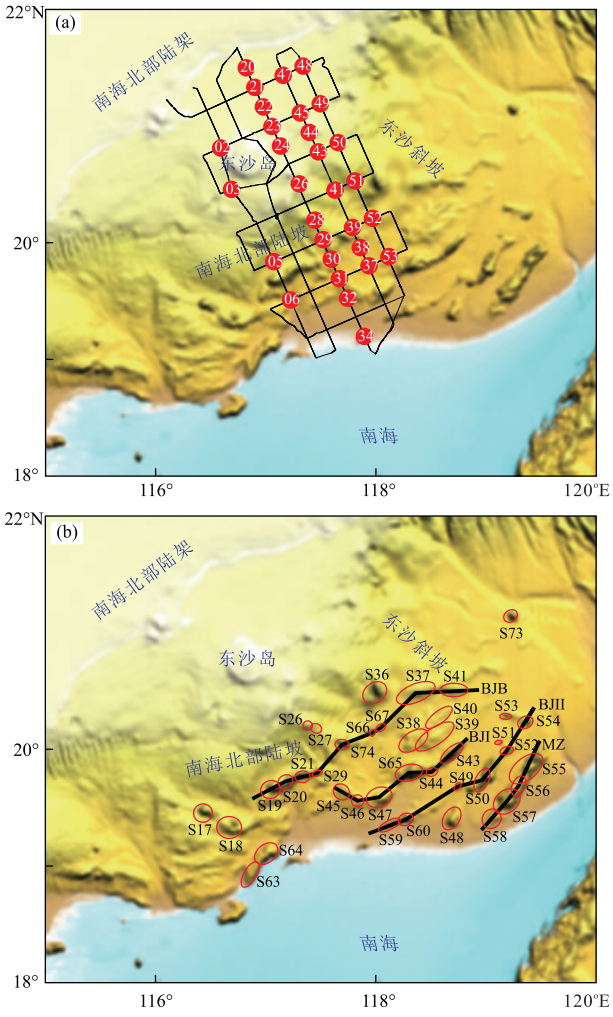

图 4　南海东沙隆起区 OBS 三维深地震探测图(a)及东沙陆坡海山分布(b)

Fig.4　The three-dimensional deep seismic survey carried out in 2014 in the Dongsha Uplift of the northeaster SCS (a) and the seamounts identified in the Dongsha slope (b)

图 a 对应于图 1 中的方框 3，红色圆圈为 OBS 台站，黑色线段为放炮测线；图 b 中红色椭圆表明海山椭圆的底部，黑色线表明东沙陆坡上的 4 条海山链，据 Fan *et al*.(2017a，2017b)修改

结构，且从单、多道地震数据上可以清晰地辨别海山浅部结构以及岩脉发育特征，穿越地壳的高速通道将下地壳高速异常体和浅部海山结构进行了有效衔接，揭示了南海北部下地壳高速体与上覆海山之间存在紧密的空间耦合关系(Xia *et al*.，2017).插值获得的初步三维地壳速度结构刻画了中生代残留盆地、构造薄弱带、下地壳高速体及壳内岩浆通道的空间展布特征，为阐明先存构造体对大陆边缘构造形态的控制作用、裂后期岩浆活动对贫岩浆型陆缘的改造作用提供了观测证据(Fan *et al*.，2017a，2017b).三维反演工作正在进行，期待获得更精细的三维地壳结构.

1.3　南海东北部马尼拉俯冲带三维深地震探测

马尼拉俯冲带是一条“吞噬”南海物质的边界(汪品先，2012)，是构成完整的南海威尔逊循环的端点，更是了解南海的形成与构造演化的关键.最新天然地震层析成像研究表明，南海板片(南海东北部陆缘)已经沿着马尼拉海沟俯冲下去有 400～500 km 深，与贝尼奥夫地震带的走向一致(Wu *et al*.，2016；Wu and Suppe，2017)，其深部动力学过程依赖于时间与空间变化，具有三维各向异性特征；而且南海东北部地壳属性及洋/陆壳边界(COB)位置一直存在争议(Taylor and Hayes，1983；Briais *et al*.，1993；Hsu *et al*.，2004；Li *et al*.，2014)，南海东北部(21°N)是减薄陆壳？还是增厚洋壳？还是受到张裂期后岩浆活动影响的减薄陆壳(Lester *et al*.，2013；McIntosh *et al*.，2013；Eakin *et al*.，2014)？该减薄陆壳与马尼拉俯冲板片的关系是什么？2016 年在南海巴士海峡区域开展的 OBS 三维深地震探测，将获得马尼拉海沟俯冲带(21°N)在三维空间上深部速度结构特征，有望为上述科学问题的解决提供重要科学依据(赵明辉等，2016).

中国科学院南海海洋研究所“实验 2”号，在 2016 年 4～6 月期间执行基金委南海北部地球物理共享航次调查任务，在巴士海峡区域(范围为118°～121.5°E、20°～22°N)完成了大规模的 OBS 三维深地震探测实验；总共投放了 48 台国产便携式 OBS，站位间距约 15 km，成功回收 41 台，回收率 85%；放炮时间长达 13 天，完成 16 条地震测线(图 5)，累计里程 2 300 km，放炮间隔约 90 s，放炮数量高达 10 800炮.为保证航次的顺利开展以及从外交安全考虑，所有放炮测线和 OBS 站位均位于我国南海九段线以内.但由于部分 OBS 仪器是 2016 年国产的新型号 OBS，为节能优化，改版的 OBS 升级更新了 CPU 和存储介质，需要通过这个航次开展海试与验证，实际应用效果仍需提高与改进，前期对部分 OBS 台站出现的记录采样率问题进行了成功修正(张佳政等，2018)，目前获得有效记录数据的 OBS 台站 28 台(图 5).二维主剖面 OBS2015-2 测线速度结构(图 5)结果初步揭示，前人认为是 E-W 向海底扩张形成的磁异常条带(C15-C17)(Hsu *et al*.，2004)，其实是岩浆活动形成的具有高磁特征的火山岩脊，南海东北部的地壳本质是属于受到张裂期后岩浆活动影响的减薄陆壳，地壳厚度为 12～15 km，在下地壳底部存在高速层(刘思青等，2017；Zhao

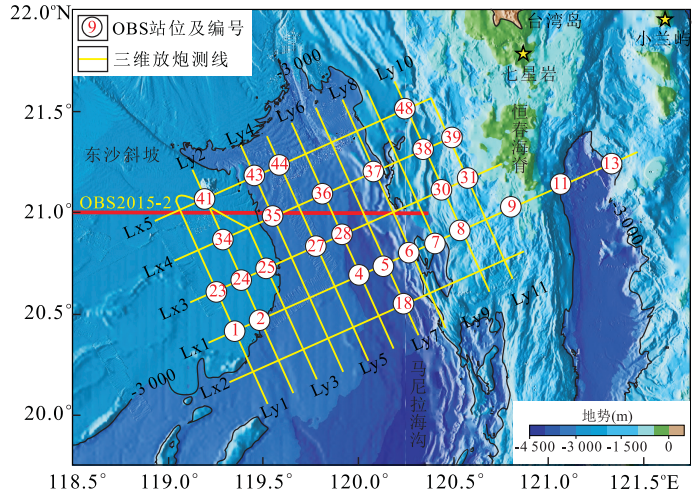

图 5　南海巴士海峡 OBS 三维深地震探测位置

Fig.5　The three-dimensional deep seismic survey carried out in the front of Manila subduction slab

对应于图 1 中的红色方框 4，白色圆圈为 OBS 台站，黄色线段为放炮测线.图中红色线段为 2015 年采集的二维深地震测线 OBS2015-2

et al.，2018b)；三维速度结构模拟工作正在进行之中.

2　即将实施的南海 IODP 钻探区 OBS 三维深地震探测

中外科学家经过了 4 年的科学论证，2017 年 2～6 月，IODP367-368 航次成功在南海打钻，该航次以揭示南海从张裂到破裂的演化模型与机制为主要科学目标(Sun *et al*.，2016)，大致沿着一条垂直于南海北部洋陆转换带(COT)测线设计了 4 个关键站位，分别位于外缘隆起带(41A)、深部圈层的海底剥露单元(14A)、洋陆转换带 COT 区(8B)、稳定扩张海盆最老洋壳 (9B).然而最新大洋钻探成果(http://www.iodp.tamu.edu/)显示：获得 6 口井岩

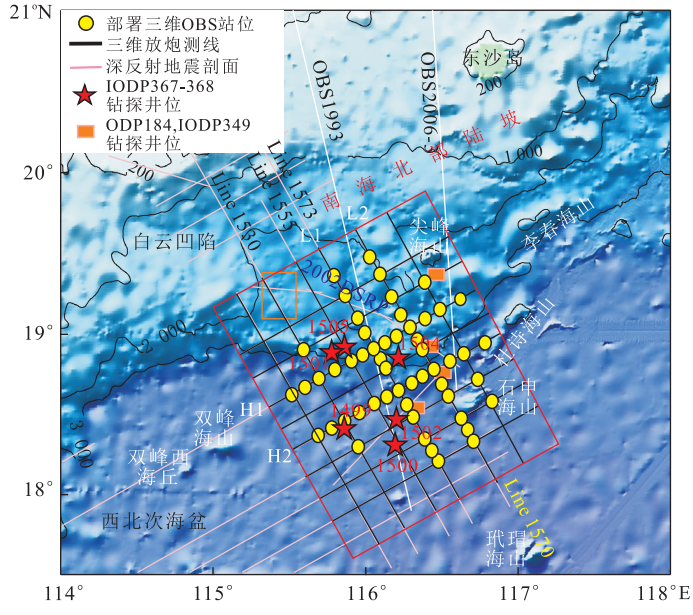

图 6　南海 IODP367-368 钻探区 OBS 三维深地震探测部署

Fig.6　The three-dimensional deep seismic survey (red square) will be carried out in the IODP area of Legs 367-368

对应于图 1 中的红色方框 IODP，图中红色方框为 OBS 三维探测区，黄色圆圈为四分量 OBS 站位，黑色线为项目实施的放炮测线，其中 L1、L2 和 H1、H2 为 4 条二维主测线，各布置 13 台 OBS，其余为辅助放炮测线；粉红色线和橘色方框为中海油采集的长缆深反射剖面(包括 2002DSRP 测线)和三维反射工作区；红色五角星为 IODP367-368 航次钻探站位(1499，1500，1501，1502 和 1504)；橘色方块为 ODP184 和 IODP349 航次站位

心，其中有 3 口井钻遇基底（U1504，U1502 和 U1500）（图 6），位于外缘隆起的 U1504 井（原设计站位 41A）揭示为减薄陆壳，原来设想的地幔出露的位置 U1499 井（原设计站位 8B）没有钻遇基底，无法确定其地壳属性，而与 U1499 相邻井位 U1502 和 U1500 却钻遇了洋壳玄武岩，在如此狭窄的洋陆转换带空间中减薄陆壳与洋壳之间如何转变？而且由于 IODP 钻探孔位有限、深度有限，最多只能获得沉积基底以下 100～250 m 的样品（Sun *et al*.，2016），无法对更深层的岩石进行约束；为了解决南海 COT 地质单元属性以及陆缘张裂－破裂机制问题，需要在横向上和纵向上取得更大范围的认知，约束深部地壳和岩石圈结构.

因此，以南海 IODP367-368 航次的钻探井位为中心部署了 OBS 三维探测网格（图 6），2 条 NW-SE 向主测线沿中海油公司的长缆多道测线（Line1570 和 Line1573）布置，2 条 NE-SW 向主测线同样沿着已有的多道反射剖面（图 6 中粉红色）布置，4 条主测线分别布设 13 台 OBS，在重点 COT 区段 OBS 站位间隔加密到 5～7 km，一共投放 53 台海底地震仪（图 6）；然后利用大容量气枪作为人工震源，沿着设计的 14 条测线及外围包络线（图 6 中红色方框）进行走航式放炮，气枪激发 12 000 次以上.密集的 OBS 站位和炮点数据将为详尽刻画 COT 的形态、速度、各圈层的岩石物性参数等提供基础数据.

3　OBS 三维深地震探测面临的挑战与认识

开展 OBS 三维深地震探测，首先将所有 OBS 仪器沿设计测线全部投入海底后，开始使用大容量气枪沿着设计网格进行人工震源的密集激发，当所有测线激发完成后，进行 OBS 回收.这就要求：(1)开展三维海上探测需要有足够的 OBS 仪器，而且 OBS 仪器留底时间较长，如上述 4 次三维探测实验中一般部署 40～60 台，放炮时间为 10～15 天；(2)为了获得更好的分辨率，在重要构造区带 OBS 间距需要加密，一般为 5～8 km；(3)在部署 OBS 三维探测实验时最好兼顾二维主测线，这样三维速度结构切片可以与二维速度结构模型相互对比研究，更好地约束重要构造区带的速度展布.即将在 2018 年 5～7 月实施的 IODP 钻探区三维深地震探测（图 5），将面临着以下挑战.

3.1　OBS 三维深地震探测能否解读洋陆转换带区三维岩石圈结构？

IODP367-368 钻探结果表明，如此相近的井位，岩性相差如此巨大，那么，这个洋陆转换带的本质是什么，是什么变形过程导致最终的洋盆打开？OBS 三维探测从三维层析成像的角度来对洋陆转换带进行全面透视扫描，不仅可以确定上、下地壳以及岩石圈地幔的三维空间厚度变化，而且可以揭示是否存在随深度变化的拉张和沿走向的分段、有着什么样的断裂系统、洋壳如何出现等等，这些均是判断陆缘伸展机制和破裂方式的最基本要素（Huismans and Beaumont，2011；Makris *et al*.，2012；Sibuet and Tucholke，2012；Sun *et al*.，2016）.钻探和深部结构探测所获得的资料与数据，记录了岩石圈由张裂到破裂的全部过程；如何根据现今的构造与信息反推张裂－破裂时期的构造演化历史，是研究面临的最大挑战.

3.2　OBS 三维深地震探测能否判别速度异常层的空间变化？

张裂大陆边缘岩石圈在破裂前后，由于各圈层的流变结构差异以及岩浆量的多少，导致张裂－破裂样式各异，比如：全岩石圈断裂型、下地壳出露型、上地幔出露型等；IODP367-368 钻探结果表明，位于洋陆转换带处 U1499 钻孔以砾岩层结束（http://www.iodp.tamu.edu/），没有钻遇结晶基底，不清楚出露的岩石类型是什么，而解决破裂机制问题首先要探明南海 COT 是否存在剥露的蛇纹石化地幔，拆离剥露的物质不同将决定不同的张裂－破裂方式.下地壳辉长岩（Vp＝6.8～7.5 km/s）与上地幔橄榄岩（Vp＝8.0～8.3 km/s）用 P 波速度很好分辨；然而，当上地幔橄榄岩与水发生作用，形成蛇纹石化橄榄岩后，根据蛇纹石化程度的不同，其 P 波速度变化很大；当与辉长岩速度相同时，仅依靠 P 波速度无法区分地壳与地幔；此次三维 OBS 深地震探测中的 4 条主剖面（图 5）将开展纵/横波联合反演，根据两者的纵/横波速比及泊松比不同（Christensen，1996；Mjelde *et al*.，2003），可以很好地区分下地壳辉长岩以及上地幔橄榄岩（Zhao *et al*.，2010）.因而，纵/横波联合的多分量 OBS 探测在洋陆转换带研究方面将发挥重要作用，可以弥补钻探在控制面积（一孔之见）和探测深度方面的局限性，这是其他地球物理方法不可替代的.

4　结论

(1)南海由于自身海底覆盖有沉积层，掩埋了海

底扩张时期的海底构造,而且扩张之后强烈的岩浆活动改变了先存的洋底构造,为了解决南海洋壳形成、岩浆活动、马尼拉俯冲机制等具有三维空间属性的重要科学问题,必须依赖于OBS三维深地震探测技术,才能有效地实现研究成果的有机集成与整体提升.深海盆的三维深地震探测获得了残余扩张洋脊下方的速度结构,揭示了洋壳增生方式与扩张停止后的岩浆活动机制.东沙隆起区三维探测展示了张裂期后的岩浆活动及其上涌通道.马尼拉俯冲前缘的OBS三维探测阐明了南海东北部地壳厚度为12～15 km,下地壳存在高速层,属于受到张裂期后岩浆活动影响的减薄陆壳,进一步确定了洋/陆壳边界.

(2)岩浆活动及其形成机制一直是南海的亮点与难点,如何判断岩浆活动是发生在南海陆缘张裂期、还是张裂期后,在海底扩张期形成洋壳时,还是在扩张停止后?在建立地质结构模型时,仔细区分不同时期的岩浆活动,是描述南海形成演化过程的关键.

(3)通过上述4个三维OBS深地震探测在南海的实施,笔者积累了丰富的海上作业实战经验以及大批量室内数据处理能力,针对不同的科学目标与研究区各自复杂的特点,将采用不同的部署方案与处理技术.2018年5～7月即将在IODP钻探区实施的南海OBS三维深地震探测(图6);采用IODP钻探与OBS二维/三维深地震探测等多种地球物理手段相结合,力争用地震波"照亮"整个洋陆转换带的深部岩石圈结构,综合大洋钻探研究成果,从全局角度建立张裂－破裂过程与机制的地质概念模型.

References

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: Solid Earth*, 98(B4): 6299－6328. https://doi.org/10.1029/92jb02280

Christensen, N.I., 1996. Poisson's Ratio and Crustal Seismology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2): 3139－3156. https://doi.org/10.1029/95jb03446

Ding, W.W., Li, J.B., 2016. Propagated Rifting in the Southwest Sub-Basin, South China Sea: Insights from Analogue Modelling. *Journal of Geodynamics*, 100: 71－86.

Ding, W.W., Li, J.B., Clift, P.D., 2016. Spreading Dynamics and Sedimentary Process of the Southwest Sub-Basin, South China Sea: Constraints from Multi-Channel Seismic Data and IODP Expedition 349. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 97－113.

Eakin, D.H., McIntosh, K.D., van Avendonk, H.J.A., et al., 2014. Crustal-Scale Seismic Profiles across the Manila Subduction Zone: The Transition from Intraoceanic Subduction to Incipient Collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(1): 1－17. https://doi.org/10.1002/2013jb010395

Expedition 349 Scientists, 2014. South China Sea tectonics: Opening of the South China Sea and Its Implications for Southeast Asian Tectonics, Climates, and Deep Mantle Process since the Late Mesozoic. International Ocean Discovery Program Preliminary Report 349. http://doi.org/10.14379/iodp.pr.349.2014

Fan, C.Y., Xia, S.H., Sun, J.L., et al., 2017a. Lateral Variations of Crustal Structure in the Northeastern of the South China Sea. AGU Fall Meeting 2017, American Geophysical Union, New Orleans.

Fan, C.Y., Xia, S.H., Zhao, F., et al., 2017b. New Insights into the Magmatism in the Northern Margin of the South China Sea: Spatial Features and Volume of Intraplate Seamounts. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(6): 2216－2239.

Hao, T.Y., Xu, Y., Sun, F.L., et al., 2011. Integrated Geophysical Research on the Tectonic Attribute of Conjugate Continental Margin of South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics (Chinese Edition)*, 54(12): 3098－3116 (in Chinese with English abstract).

Hao, T.Y., You, Q.Y., 2011. Progress of Homemade OBS and Its Application on Ocean Bottom Structure Survey. *Chinese Journal of Geophysics (Chinese Edition)*, 54(12): 3352－3361 (in Chinese with English abstract).

He, E.Y., Zhao, M.H., Qiu, X.L., et al., 2016. Crustal Structure across the Post-Spreading Magmatic Ridge of the East Sub-Basin in the South China Sea: Tectonic Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 121: 139－152.

Hsu, S.K., Yeh, Y.C., Doo, W.B., et al., 2004. New Bathymetry and Magnetic Lineations Identifications in the Northernmost South China Sea and Their Tectonic Implications. *Marine Geophysical Researches*, 25(1－2): 29－44. https://doi.org/10.1007/s11001-005-0731-7

Huismans, R., Beaumont, C., 2011. Depth-Dependent Extension, Two-Stage Breakup and Cratonic Underplating at Rifted Margins. *Nature*, 473(7345): 74－78. https://doi.org/10.1038/nature09988

Lester, R., McIntosh, K., Van Avendonk, H.J.A., et al., 2013. Crustal Accretion in the Manila Trench Accretionary Wedge at the Transition from Subduction to Moun-

tain-Building in Taiwan. *Earth and Planetary Science Letters*, 375: 430－440. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.06.007

Li, C.F., Li, J.B., Ding, W.W., et al., 2015. Seismic Stratigraphy of the Central South China Sea Basin and Implications for Neotectonics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3): 1377－1399.

Li, C.F., Song, T.R., 2012. Magnetic Recording of the Cenozoic Oceanic Crustal Accretion and Evolution of the South China Sea Basin. *Chinese Science Bulletin*, 57(20): 1879－1895 (in Chinese with English abstract).

Li, C.F., Wang, P.X., Dieter, F., et al., 2009. Opening of the South China Sea and Its Implications for Southeast Asian Tectonics Since the Late Mesozoic. *Advance in Earth Sciences*, 24(12): 1339－1351 (in Chinese with English abstract).

Li, C.F., Xu, X., Lin, J., et al., 2014. Ages and Magnetic Structures of the South China Sea Constrained by Deep Tow Magnetic Surveys and IODP Expedition 349. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12): 4958－4983.

Li, J.B., 2011. Dynamics of the Continental Margins of South China Sea: Scientific Experiments and Research Progresses. *Chinese Journal of Geophysics (Chinese Edition)*, 54(12): 2993－3003 (in Chinese with English abstract).

Li, J.B., Ding, W.W., Wu, Z.Y., et al., 2012. The Propagation of Seafloor Spreading in the Southwestern Subbasin, South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 57(24): 3182－3191. https://doi.org/10.1007/s11434-012-5329-2

Li, S.Z., Suo, Y.H., Liu, X., et al., 2012. Basic Structural Pattern and Tectonic Models of the South China Sea: Problems, Advances and Controversies. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(6): 35－53 (in Chinese with English abstract).

Liu, S.Q., Zhao, M.H., Zhang, J.Z., et al., 2017. OBS Seismic Data Processing of the Manila Trench Subduction Zone (21° N) and Some Preliminary Results. *Journal of Tropical Oceanography*, 36(2): 60－69 (in Chinese with English abstract).

Lu, J., M., 1993. The Princle of Seismic Exploration. University of Petroleum Press, Dongying (in Chinese).

Makris, J., Papoulia, J., Mcpherson, S., et al., 2012. Mapping of Sediments and Crust Offshore Kenya, East Africa: A Wide Aperture Refraction / Reflection Survey. In: 2012 SEG Annual Meeting, Las Vegas, 1－5.

McIntosh, K., van Avendonk, H., Lavier, L., et al., 2013. Inversion of a Hyper-Extended Rifted Margin in the Southern Central Range of Taiwan. *Geology*, 41(8): 871－874. https://doi.org/10.1130/g34402.1

Mi, L.J., Liu, B.J., He, M., et al., 2016. Petroleum Geology Characteristics and Exploration Direction in Baiyun Deep Water Area, Northern Continental Margin of the South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 28(2): 10－22 (in Chinese with English abstract).

Mjelde, R., Raum, T., Digranes, P., et al., 2003. Vp/Vs Ratio along the Vøring Margin, NE Atlantic, Derived from OBS Data: Implications on Lithology and Stress Field. *Tectonophysics*, 369(3－4): 175－197. https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00198-7

Qiu, X. L., Zhao, M. H., Xu, H. L., et al., 2012. Important Processes of Deep Seismic Surveys in the South China Sea: Retrospection and Expectation. *Journal of Tropical Oceanography*, 31(3): 1－9 (in Chinese with English abstract).

Sibuet, J.C., Tucholke, B.E., 2012. The Geodynamic Province of Transitional Lithosphere Adjacent to Magma-Poor Continental Margins. *Geological Society, London, Special Publications*, 369(1): 429－452. https://doi.org/10.1144/sp369.15

Sun, Z., Stock, J., Jian, Z., et al., 2016. Expedition 367/368 Scientific Prospectus Addendum: South China Sea Rifted Margin. International Ocean Discovery Program. https://doi.org/10.14379/iodp.sp.367368.2016

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 Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. Geophysical Monography Series. American Geophysical Union, Washington, 23－56.

Wang, J., Yang, T., Qiu, X. L., et al., 2018. Ambient Noise Cross-Correlation Analysis of Active Seismic Experiment Data in the East Sub-Basin of China Sea. In 15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, Honolulu.

Wang, J., Zhao, M.H., He, E.Y., et al., 2014. The Selection of Optimal Inversion Parameters for First-Arrival Seismic Tomography: An Application to 3D Seismic Data from the Central Sub-Basin of the South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 33(5): 74－83 (in Chinese with English abstract).

Wang, J., Zhao, M. H., Qiu, X. L., et al., 2016. 3D Seismic Structure of the Zhenbei-Huangyan Seamounts Chain in the East Sub-Basin of the South China Sea and Its Mechanism of Formation. *Geological Journal*, 51(B4): 448－463. https://doi.org/10.13039/501100001809

Wang, P., Prell, W. L., Blum, P., et al., 2000. Proceedings of the Ocean Drilling Program: Initial Reports, Volume 184. College Station: The Ocean Drilling Program.

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, P. X., 2012. Tracing the Life History of a Marginal Sea—On "the South China Sea Deep" Research Program. *Chinese Science Bulletin*, 57(20):1807－1826 (in Chinese with English abstract).

Wu, J., Suppe, J., 2017. Proto-South China Sea Plate Tectonics Using Subducted Slab Constraints from Tomography. *Journal of Earth Science*, 661(B4): 1－15. https://doi.org/10.1007/s12583-017-0813-x

Wu, J., Suppe, J., Lu, R. Q., et al., 2016. Philippine Sea and East Asian Plate Tectonics since 52 Ma Constrained by New Subducted Slab Reconstruction Methods. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(6):4670－4741.

Wu, Z. L., Li, J. B., Ruan, A. G., et al., 2011. Crustal Structure of the Northwestern Sub-Basin, South China Sea: Results from a Wide-Angle Seismic Experiment. *Science in China (Series D)*, 41(10):1463－1476 (in Chinese with English abstract).

Xia, S. H., Xu, H. L., Sun, J. L., et al., 2017. Seismic Imaging of Late Cretaceous Magmatic System in the Northern Margin of South China Sea. American Geophysical Union Fall Meeting 2017, New Orleans.

Xia, S. H., Zhao, D. P., Sun, J. L., et al., 2016. Teleseismic Imaging of the Mantle beneath Southernmost China: New Insights into the Hainan Plume. *Gondwana Research*, 36:46－56.

Xie, X. N., Zhang, C., Ren, J. Y., et al., 2011. Effects of Distinct Tectonic Evolutions on Hydrocarbon Accumulation in Northern and Southern Continental Marginal Basins of South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition*, 54(12): 3280－3291 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J., Li, J. B., Ruan, A. G., et al., 2016. The Velocity Structure of a Fossil Spreading Centre in the Southwest Sub-Basin, South China Sea. *Geological Journal*, 51(1－2):548－561.

Zhang, J. Z., Qiu, X. L., Zhao, M. H., et al., 2018. Abnormal Data Retrieval of Three-Dimensional OBS Survey at the Bashi Channel Area of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(4):1529－1538 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L., Zhao, M. H., Wang, J., et al., 2013. Correction of OBS Position and Recent Advances of 3D Seismic Exploration in the Central Sub-Basin of South China Sea. *Earth Science*, 38(1):33－42 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.004

Zhao, M. H., He, E. Y., Sibuet, J. C., et al., 2018a. Postseafloor Spreading Volcanism in the Central East South China Sea and Its Formation through an Extremely Thin Oceanic Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(3):621－641.

Zhao, M. H., He, E. Y., Sun, L. T., et al., 2016. Research on Deep Seismic Structures of Mariana Trench Subduction Zone and Its Inspiration for Manila Trench Subduction zone. *Journal of Tropical Oceanography*, 35(1):48－60 (in Chinese with English abstract).

Zhao, M. H., Liu, S. Q., Sibuet, J. C., et al., 2018b. Thinned Continental Crust Intruded by Volcanic Ridges at the Northeastern South China Sea imaged by a Wide-Angle Refraction Data and Its Extension into the Unfolded Manila Slab. In 15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, Honolulu.

Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xia, S. H., et al., 2007. Identification and Analysis of Shear Waves Recorded by Three-Component OBSs in Northeastern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 17(11):1516－1523. (in Chinese with English abstract).

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. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.10.004

Zhou, D., Ru, K., Chen, H. Z., 1995. Kinematics of Cenozoic Extension on the South China Sea Continental Margin and Its Implications for the Tectonic Evolution of the Region. *Tectonophysics*, 251(1－4):161－177. https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00018-6

Zhu, W. L., Zhong, K., Li, Y. C., et al., 2012. Characteristics of Hydrocarbon Accumulation and Exploration Potential of the Northern South China Sea Deepwater Basins. *Chinese Science Bulletin*, 57(20):1833－1841 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

郝天珧,徐亚,孙福利,等,2011.南海共轭大陆边缘构造属性的综合地球物理研究.地球物理学报,54(12):3098－3116.

郝天珧,游庆瑜,2011.国产海底地震仪研制现状及其在海底结构探测中的应用.地球物理学报,54(12):3352－3361.

李春峰,宋陶然,2012.南海新生代洋壳扩张与深部演化的磁异常记录.科学通报,57(20):1879－1895.

李春峰,汪品先,Dieter,F.,等,2009.南海张裂过程及其对晚中生代以来东南亚构造的启示——IODP 建议书 735-Full 介绍.地球科学进展,24(12):1339－1351.

李家彪，2011.南海大陆边缘动力学：科学实验与研究进展.地球物理学报，54(12)：2993－3003.

李三忠，索艳慧，刘鑫，等，2012.南海的基本构造特征与成因模型：问题与进展及论争.海洋地质与第四纪地质，32(6)：35－53.

刘思青，赵明辉，张佳政，等，2017.马尼拉海沟俯冲带前缘(21°N)海底地震仪数据处理初步成果.热带海洋学报，36(2)：60－69.

陆基孟，1993.地震勘探原理.济南：石油大学出版社.

米立军，柳保军，何敏，等，2016.南海北部陆缘白云深水区油气地质特征与勘探方向.中国海上油气，28(2)：10－22.

丘学林，赵明辉，徐辉龙，等，2012.南海深地震探测的重要科学进程：回顾和展望.热带海洋学报，31(3)：1－9.

王建，赵明辉，贺恩远，等，2014.初至波层析成像的反演参数选取：以南海中央次海盆三维地震探测数据为例.热带海洋学报，33(5)：74－83.

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.

汪品先，2012.追踪边缘海的生命史："南海深部计划"的科学目标.科学通报，57(20)：1807－1826.

吴振利，李家彪，阮爱国，等，2011.南海西北次海盆地壳结构：海底广角地震实验结果.中国科学(D辑)，41(10)：1463－1476.

解习农，张成，任建业，等，2011.南海南北大陆边缘盆地构造演化差异性对油气成藏条件控制.地球物理学报，54(12)：3280－3291.

张佳政，丘学林，赵明辉，等，2018.南海巴士海峡三维 OBS 探测的异常数据恢复.地球物理学报 61(4)：1529－1538.

张莉，赵明辉，王建，等，2013.南海中央次海盆 OBS 位置校正及三维地震探测新进展.地球科学，38(1)：33－42. https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.004

赵明辉，贺恩远，孙龙涛，等，2016.马里亚纳海沟俯冲带深地震现状对马尼拉海沟俯冲带的研究启示.热带海洋学报，35(1)：48－60.

赵明辉，丘学林，夏少红，等，2007.南海东北部三分量海底地震仪记录中横波的识别和分析.自然科学进展，17(11)：1516－1523.

朱伟林，钟锴，李友川，等，2012.南海北部深水区油气成藏与勘探.科学通报，57(20)：1833－1841.

* * * \