

doi:10.3799/dqkx.2012.087

南海西北次海盆及其邻区地壳结构和构造意义

敖 威¹, 赵明辉^{1*}, 丘学林¹, 阮爱国², 李家彪²

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

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江杭州 310012

摘要: 西西北次海盆的深部地壳结构蕴含着南海北部陆缘拉张过程的重要信息。广角反射/折射测线(OBS2006-2)长386 km, 是目前唯一的一条沿NEE向穿过西沙地块、并平行于西北次海盆扩张脊的深地震测线。通过射线追踪与走时模拟方法(RAYINVR), 获得了OBS2006-2测线下方的速度结构。结果表明: 西沙地块的沉积层厚度约为1~2 km, 而西北次海盆的沉积层厚度大约为2~3 km; Moho界面从西沙地块的27 km逐步抬升到西北次海盆的12 km, Moho界面下方的速度为7.8~8.0 km/s; 未发现壳内高速层和低速层。在西沙地块和西北次海盆的过渡区, 有着较大量的岩浆活动信息, 推测与西北次海盆的初始扩张有关。OBS2006-2测线中114.5°E以西的地区为减薄的陆壳, 而114.5°E以东的地区为洋壳, 莫霍面在陆壳与洋壳的结合处剧烈抬升, 地壳厚度明显减薄。西北次海盆的扩张脊下方可能有残余岩浆的存在。

关键词: 西西北次海盆; 地壳结构; 岩浆活动; 双峰海山; 海底地震仪; 沉积学; 地球物理。

中图分类号: P67; P315

文章编号: 1000-2383(2012)04-0779-12

收稿日期: 2011-12-13

Crustal Structure of the Northwest Sub-Basin of the South China Sea and Its Tectonic Implication

AO Wei¹, ZHAO Ming-hui^{1*}, QIU Xue-lin¹, RUAN Ai-guo², LI Jia-biao²

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

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

Abstract: Deep crustal structure in the northwest sub-basin contains the key information of the rifting process of the northern continental margin of the South China Sea (SCS). A 386 km-long seismic profile (OBS2006-2) with wide-angle reflective and refractive ocean bottom seismometer (OBS) data was acquired across Xisha block and the Northwest sub-basin (NW sub-basin) of the SCS in NEE direction, which is the only profile hitherto parallel to the expanding ridge of the NW sub-basin. The crustal structure along OBS2006-2 has been obtained by using ray-tracing simulation method (RAYINVR), which yields information on the velocities, tectonics, and geophysical properties. Our velocity structure indicates that sediment thickness increases from Xisha block (about 1–2 km) to NW sub-basin (about 2–3 km). Moho interface changes from typical continent margin of South China (~27 km) to oceanic crust (~12 km). The velocity at the top of upper mantle varies from 7.8 to 8.0 km/s. No high velocity layer and low velocity layer have been identified. Voluminous magmatism in transition zone between Xisha block and NW sub-basin, is possibly related to the initial extending of the NW sub-basin. The part of model in the domain of 220–370 km would be of oceanic crust while the western part in the domain of 0–220 km may be of thinned continental crust. Residual magma may exist under the spreading ridge of the NW sub-basin deduced by the anomaly of Pn seismic phase.

Key words: NW sub-basin; crustal structure; magmatism; double-peak seamount; ocean bottom seismometer (OBS); sedimentology; geophysics.

南海的打开是从南海北部陆缘的拉张开始的。由于南海拉张时其东南侧发生顺时针旋转, 导致南

海北部的拉张由东北向西南进行(孙珍等, 2006)。作为拉张的晚期表现, 水深上东深西浅的西沙海槽被

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 41074066, 41076029); 国家基金重大研究计划(No. 91028002)。

作者简介: 敖威(1985—), 男, 硕士, 海洋深部地球物理方向。E-mail: aowei100@163.com

* 通讯作者: 赵明辉, E-mail: mhzhao@scsio.ac.cn

认为是旋转拉张停止后形成的夭折裂谷(丘学林等, 2000; 施小斌等, 2002)。由于旋转造成拉张持续时间的方式的区别, 南海北部陆缘的东北段和西南段的构造活动特点有着明显的差异, 如高速层的分布(Yan *et al.*, 2001; 赵明辉等, 2006; 卫小冬等, 2010)、岩浆活动(Clift and Lin, 2001; Hayes and Nissen, 2005)、沉积盆地类型(孙珍等, 2006)等, 它们同时也导致了研究者对南海北部陆缘构造属性界定存在争论。若要系统地描述南海北部陆缘的拉张过程, 则需要对南海北部的深部地壳结构特征进行详细分析。

数十年来, 在南海北部进行了广泛深入的多道地震/深部地壳结构探测(丘学林等, 2003; Qiu *et al.*, 2007; 阮爱国等, 2009)和重力磁力(郝天珧等, 2002; Li *et al.*, 2007)资料的采集和分析。这些资料加深了对南海北部拉张过程的认识, 也揭示了南海形成演化的复杂性。但目前的测线资料主要分布在珠江口盆地—东沙隆起—台西南盆地一带, 对这部分的陆壳和洋壳以及二者之间的洋陆过渡带的结构都有着较为清晰的认识, 也对南海北部陆缘拉张时的岩浆活动进行了讨论(Yan *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2010)。而西北次海盆—琼东南盆地—北部湾盆地所在的西南段区域测线资料较少, 导致对南海北部陆缘西南段的信息不充足, 无法与东北段进行详细对比。

西北次海盆是南海北部陆缘西南段最为重要的构造单元, 这是因为其作为南海北部陆缘拉张最终形成洋盆的构造区域, 其构造演化活动特征对于了解南海北部陆缘拉张特点以及南海的形成历史有着重要意义(Briais *et al.*, 1993; 姚伯初, 1996)。而目前对于西北次海盆深部结构的认识还很少, 深部结构资料的不足使得对西北次海盆的扩张模式和动力机制的研究还存在不同的见解(吴世敏等, 2001; 姚伯初, 2002; 丁巍伟等, 2009)。深部结构研究的意义在于提供了区域内大的构造活动信息, 可以在此基础上进一步分析洋壳的形成和岩浆活动。大陆边缘拉张和洋盆扩张等构造活动单元和陆壳减薄特征是分析的重点, 这关系到拉张模式和盆地形成等一系列基础地质问题。虽然在南海北部布设的 SE 向深地震测线获得了南海北部的洋陆过渡带特征, 但这些是垂直于扩张脊方向的变化情况, 而对平行于扩张脊方向的结构变化却很少了解, 后者的重要性在于可以补充并获得拉张过程的三维特征, 可以更好的分析南海北部的拉张过程。因此, 全面地获得西北

次海盆的深部地壳结构, 对于了解南海北部拉张与南海的形成有重大意义。

本文以 2006 年在南海西北次海盆地区布设的现今唯一的平行于西北次海盆扩张脊的深地震探测测线为基础, 通过射线追踪方法获得了西沙地块和西北次海盆及二者之间过渡区的地壳结构, 并结合垂直于西北次海盆扩张脊的 OBS2006-1 测线等区域地质地球物理资料进行了对比分析, 获得了测线区域中洋壳和陆壳大致以 114.5°E 为分界这一重要信息, 为了解西北次海盆拉张过程和岩浆活动做了重要补充。

1 数据采集

OBS2006-2 测线是由国家海洋局第二海洋研究所 2006 年布设的。实验采用“奋斗七号”科考船, 总共投放了 20 台/次 SEDIS-IV 型海底地震仪(ocean bottom seismometer, OBS)(李湘云等, 2007), 成功回收 19 台/次。OBS2006-2 测线穿过了西沙地块的部分地区和西北次海盆, 由于天气影响, 整条测线的数据采集分 2 个阶段进行(图 1)。第 1 阶段从西北次海盆向西沙群岛方向进行, 共投放 12 台 OBS, 投放间隔约 26 km, 放炮数量为 841 炮, 放炮长度约 170 km。由于受到 2006 年 9 月 22 日在西沙群岛之东南向约 420 km 的热带低气压影响, 实验中途被迫停止。有信号记录的台站为 OBS6、OBS7、OBS8、OBS10、OBS11、OBS12 号, OBS9 台站丢失。OBS1~OBS5 由于炮检距太大而没有记录到有效信号, 有效信号传播最远距离为 120 km。第 2 阶段采集从西沙群岛向西北次海盆方向进行, 共投放 8 台 OBS, 激发 1106 炮。2 个实验阶段中, 气枪作业时船速均设定为 4.5~5.0 节, 放炮间隔为 120 s, 炮间距 250~300 m, OBS 采样率为 250 Hz。实验获得测线总长度达 376 km, 记录数据质量良好, 信噪比强, 深部信息丰富, 其中第 2 次投放的 OBS3、OBS6 台站的记录数据由于数据格式原因无法读取。第 2 次布设的 OBS1、OBS2、OBS3 与第 1 批的 OBS6、OBS7、OBS8 位置分别有 100 m 左右的误差。由于第 1 批的 OBS6、OBS7、OBS8 台站没有记录到直达水波, 因此它们的水深深度基本参考了第 2 批 OBS1、OBS2、OBS3 台站的深度。前后 2 次放炮覆盖了整条测线, 其中能利用的有效数据为 12 台/次。在后期的走时模拟中, 所使用的有效台站编号从左至右依次为 OBS8、OBS7、OBS5、OBS4、OBS2、OBS1、

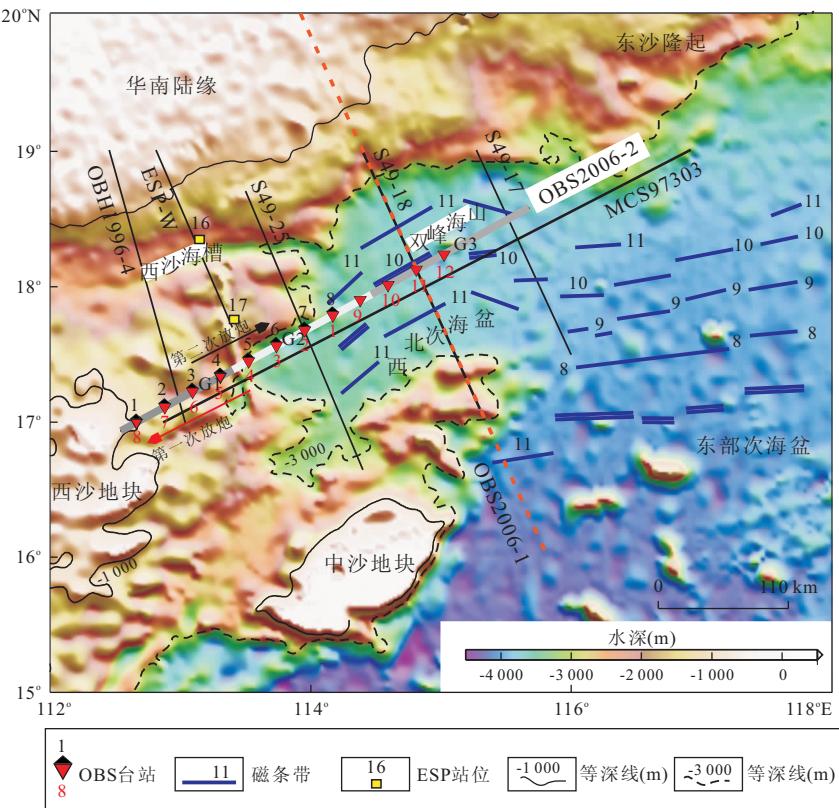
图1 研究区水深及相邻地震测线布设位置(磁条带数据来自于Briais *et al.*, 1993)

Fig. 1 Bathymetry of the research area and surrounding deployed seismic lines

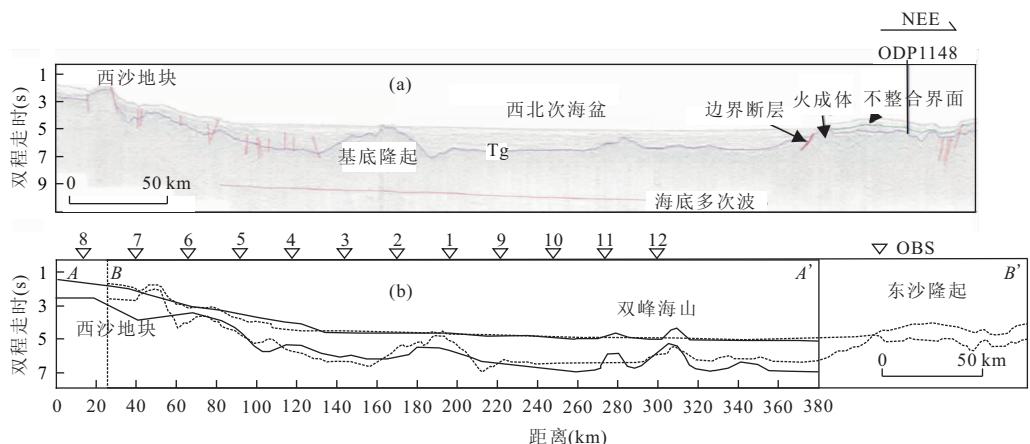


图2 OBS2006-2测线与MCS97303多道地震剖面双程走时对比

Fig. 2 Comparison of twice way time of MCS97303 and OBS2006

a. MCS97303 多道地震剖面,据 Li *et al.*, 2008 修改; b. OBS2006-2 测线与 MCS97303 测线位置与界面对比; AA' 和 BB' 分别对应 OBS2006-2 测线和 MCS97303 测线

OBS10、OBS11、OBS12(图1,2b).在对OBS台站进行时间校正和位置校正后(敖威等,2010),采用相应的数据处理方法(赵明辉等,2004)获得了各个台站的综合记录剖面(图3a).

2 OBS2006-2 测线地壳结构正反演模拟

由于不同深度的震相有着不同的速度特征,有其特殊的构造含义,为了有效区分震相并进行拟合,

以及便于后期进行构造解释,本文在速度建模中将模型从上到下分为 3 部分:沉积层(海底至沉积基底)、地壳(沉积基底至 Moho 面)和上地幔(Moho 面以下区域)。

2.1 沉积层控制

初始模型的建立是在综合分析周围多道地震测线和深部地震测线中的速度和深度资料的基础上进行的。多道地震数据所获得的沉积层信息是获得高分辨率深部地壳结构的重要基础。在本文的研究区内,曾在 1987—1989 年中德联合航次中获得 3 条多道地震剖面(SO49-17, SO49-18, SO49-25),并于 2001 年在“973”项目的资助下获得了 MCS97303 多道地震剖面(图 1)。丁巍伟等(2009)分析了西北次海盆布设的 SO49 系列的 3 条多道地震剖面中的 3 组反射震相,并分别对应于 3 个时间段内的沉积层;沉积层速度随深度从约 2.0 km/s 增大到约 4.0 km/s。刘建华(2000)也从 SO49 系列多道地震剖面中识别出了 4 组沉积相,并认为沉积层的速度

为 2.0~4.6 km/s。这些资料基本提供了西北次海盆内沉积层的速度分布。另外,与 OBS2006-2 测线近于垂直的 OBS2006-1 深地震测线(图 1),获得了西北次海盆扩张方向的地壳结构。结果表明,西北次海盆的构造活动并不强烈,垂直于扩张脊方向的洋壳厚度也没有产生剧烈变化(吴振利等,2011)。而且,与 OBS2006-2 测线(AA', 实线)平行的 MCS97303 测线(BB', 虚线)多道地震剖面(Li et al., 2008)(图 2b)两者平均相距 10 km,所以从 MCS97303 多道地震剖面中识别的基底反射界面可以在构建初始速度模型时对浅部结构进行较好的约束。

2.2 射线追踪与走时模拟

总体来看,本次数据采集质量良好、震相较为丰富、传播距离较远,为后期进行正反演模拟提供了大量的数据支持。在剖面成图过程中,本文进行了折合处理(折合速度为 6 km/s)。这是为了消除由于偏移距引起的走时,从而能重点突出由于深度和速度造

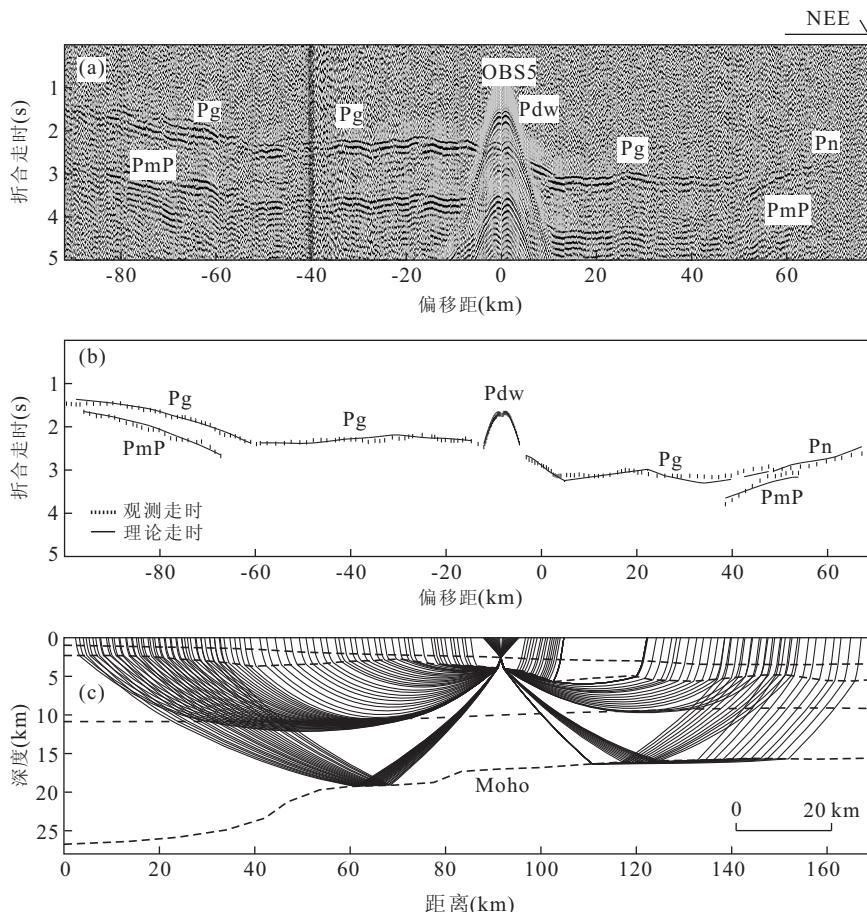


图 3 OBS5 台站地震记录剖面及射线追踪

Fig. 3 OBS5 seismic recording section and ray tracing simulation

a. OBS5 台站垂直分量综合地震记录剖面,折合速度为 6.0 km/s;b. 实际观测走时与理论计算走时拟合结果;c. 速度模型与射线追踪

成的走时特征。同时,折合速度选为接近于地壳的平均速度 6.0 km/s, 经过速度折合后, 走时斜率接近 0 的震相即为 Pg 震相。本文主要拾取了直达水波 (Pdw)、壳内折射波 (Pg)、Moho 面反射波 (PmP)、以及上地幔折射波 (Pn)4 组震相(图 3)。仪器记录的震相信息与放炮方向关系密切。第 1 次放炮从 OBS12 向 OBS1 进行(图 1), OBS12、OBS11、OBS10 位于西北次海盆之上, 有较丰富的折射震相 (Pg、Pn) 记录, 但 Moho 面的反射震相 (PmP) 较少; 位于过渡区的 OBS8、OBS7、OBS6 这 3 个台站有较为丰富的 Pn 震相, 这可能与从西北次海盆到过渡区的 Moho 界面变化有关。第 2 次放炮从 OBS8 向 OBS1 进行, 除 OBS3、OBS6 号台站外, 其余台站都记录到较为丰富的 PmP 反射震相, 但 Pn 震相记录得较少, 这可能是由于沿着地壳减薄方向的地震波信号无法在 Moho 界面形成有效的折射。

在震相分析和走时拾取的基础上, 采用 RAYINVER 软件 (Zelt and Smith, 1992) 对所拾取的震相进行正反演模拟(图 3~5)。不断调整模型中

的节点位置和速度值, 最好地拟合各个震相的观测走时, 从而获得了最终速度结构模型(表 1, 图 6b)。模型中, 沉积层的速度值自上而下为 2.0~4.3 km/s, 其厚度在西沙地块区域为 1~2 km 左右, 而在过渡区和海盆中为 2~3 km。地壳内的速度从上到下为 5.5~6.8 km/s, 其中地壳顶界面速度为 5.5~6.0 km/s。OBS2006-2 测线左端与 OBH1996-4 测线相交, 可以控制模型左端的 Moho 界面深度(约 27 km) (Qiu *et al.*, 2001)。在西沙地块及过渡区区域, 地壳厚度剧烈减薄。地壳厚度从西沙地块的 24 km 左右减薄至西北次海盆的 6~8 km。OBS2006-2 测线在其 11 号台站位置(双峰火山处)与 OBS2006-1 测线相交(图 1)。2 条测线的结构对比显示二者在地壳厚度、壳内速度分布以及 Moho 界面埋深等方面都是吻合的。由于有较为丰富的 PmP 震相, 因此 Moho 界面的深度和形态得到了较好控制(图 7)。Moho 界面速度在地壳厚度减薄的区域和双峰火山之下较小, 约为 7.8 km/s, 在 120~200 km 区域约为 8.0 km/s。

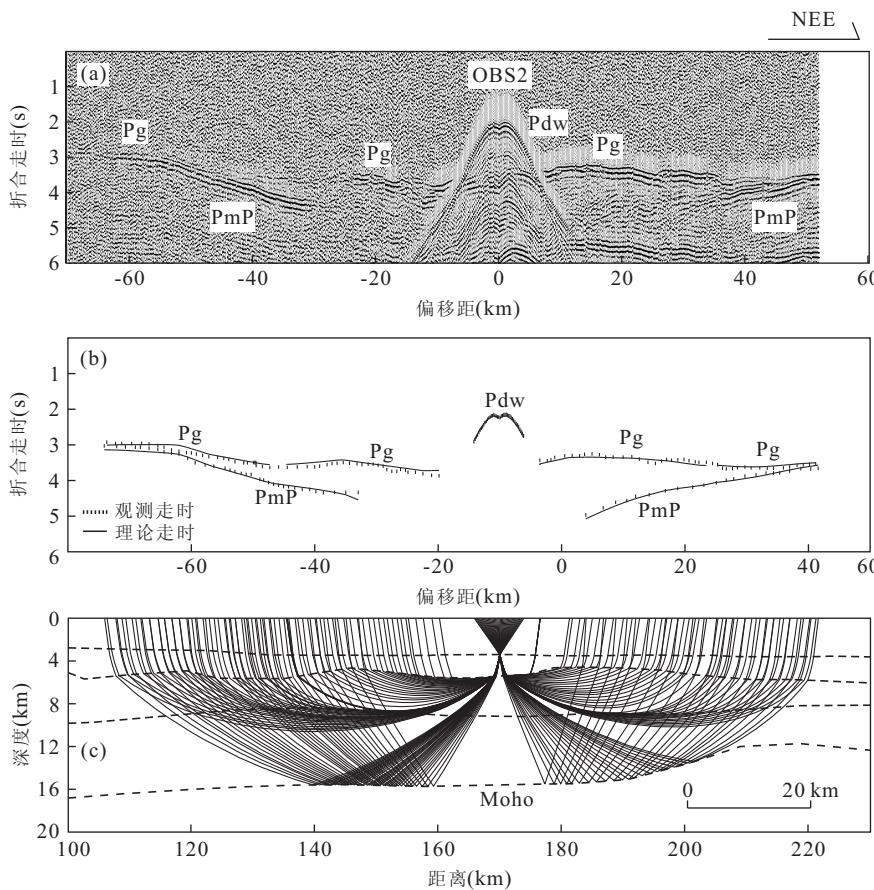


图 4 OBS2 台站地震记录剖面及射线追踪

Fig. 4 OBS2 seismic recording section and ray tracing simulation

a. OBS2 台站垂直分量综合地震记录剖面, 折合速度为 6.0 km/s; b. 实际观测走时与理论计算走时拟合结果;c. 速度模型与射线追踪

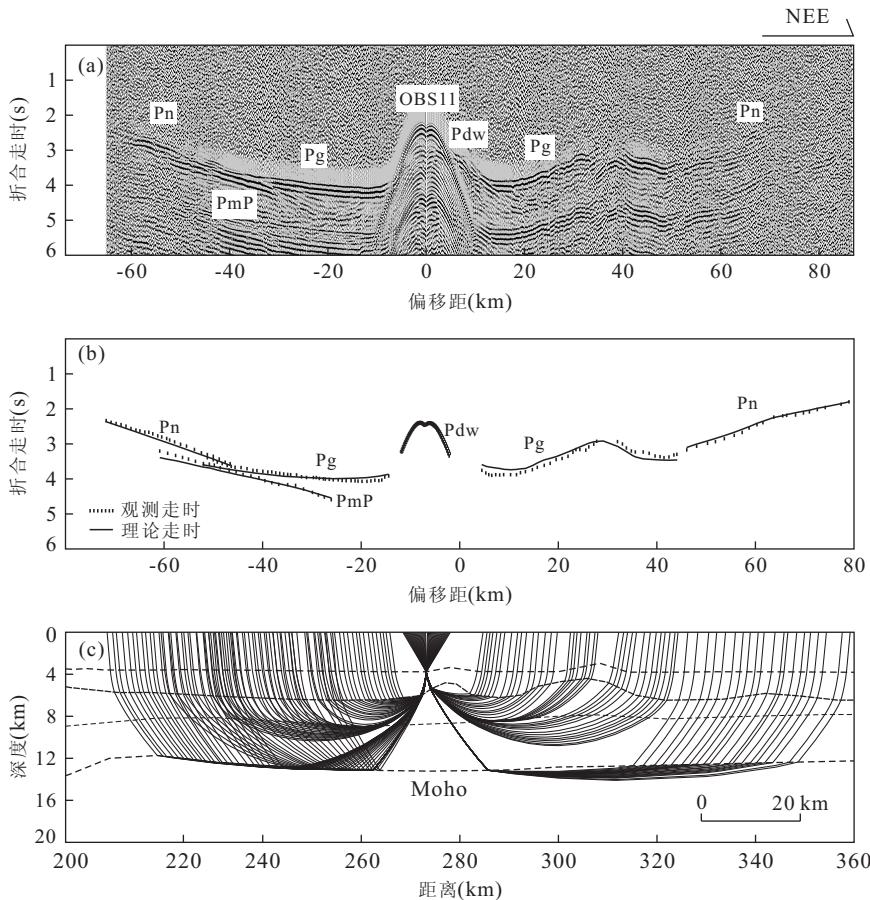


图 5 OBS11 台站地震记录剖面及射线追踪

Fig. 5 OBS11 seismic recording section and ray tracing simulation

a. OBS11 台站垂直分量综合地震记录剖面,折合速度为 6.0 km/s; b. 实际观测走时与理论计算走时拟合结果;c. 速度模型与射线追踪

表 1 OBS2006-2 测线 12 个台站所有震相的射线追踪结果

Table 1 Ray tracing for all seismic phases recorded by total 12 OBSs

震相	拾取点数	追踪点数	百分比(%)	RMS(s)	χ^2
Pdw	344	342	98.5	0.046	0.862
Pg	929	892	96.0	0.087	3.044
PmP	340	337	99.2	0.077	2.633
Pn	184	178	96.7	0.096	3.075
总计	1796	1739	96.8	0.079	2.529

注:该统计结果不包括 OBS10 号台站的 Pn 震相(41 个点); RMS 为计算走时和观测走时残差的均方根值; χ^2 为卡方分布检测值,当 χ^2 接近于 1 时拟合程度最好。

从速度模型上来看(图 6b),沉积基底界面下方的速度在 5.5 km/s 左右,但在 OBS6、OBS1、OBS10 台站下方沉积基底界面下方均存在明显的低速(约为 4.8 km/s)。OBS6 由于处于西沙地块的坡折带,MCS97303 剖面显示该处存在较多较深的断层,这可能是导致其基底速度较低的原因。OBS1 位于减薄陆壳和西北次海盆的洋壳结合段,莫霍面在此处

剧烈抬升。多道地震显示该区域有着较大规模的岩浆活动,因此推测该区基底以下的低速是由于该区较活跃的构造活动造成。而位于西北次海盆扩张中脊处的 OBS10 台站,所在位置与磁条带分辨出的扩张脊位置(10 号磁条带,图 1)是基本重合的,因此其下方基底附近的低速异常可能与扩张脊附近特殊的构造活动有关。

需要指出的是,由于上下地壳内速度梯度不同,一般以 6.4 或者 6.5 km/s 的速度等值线大致区分上下地壳(Qiu et al., 2001; Yan et al., 2001; Wang et al., 2006)。本文在进行走时模拟的过程中,给出 6.4 km/s 的速度等值线以约束地壳内速度梯度的变化。从模型中可以看出,地壳上部具有较大的速度梯度而地壳下部的速度梯度变化较为平缓。为便于构造分析解释,本文结合自由空间重力异常趋势(图 6a 中 G1、G2、G3,数据来自于美国国家地球物理数据中心(NGDC),<http://www.ngdc.noaa.gov/>),将 OBS2006-2 测线的速度模型划分为西

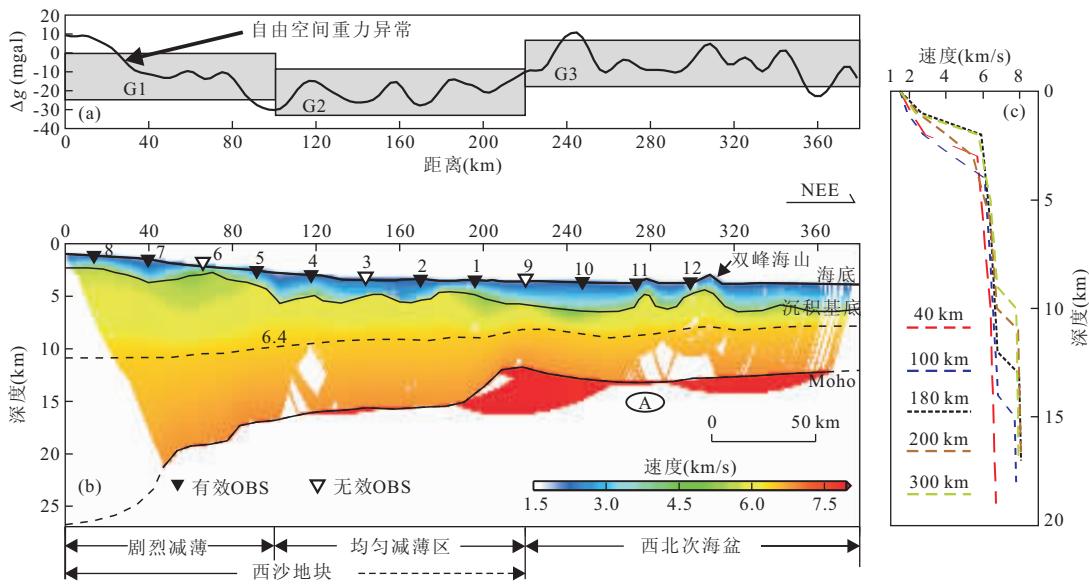


图 6 OBS2006-2 测线最终速度结构及自由空间重力异常

Fig. 6 The final velocity model of OBS2006-2 and its corresponding free-air gravity anomaly
a. OBS2006-2 的重力异常; b. OBS2006-2 最终速度模型; c. 一维速度结构

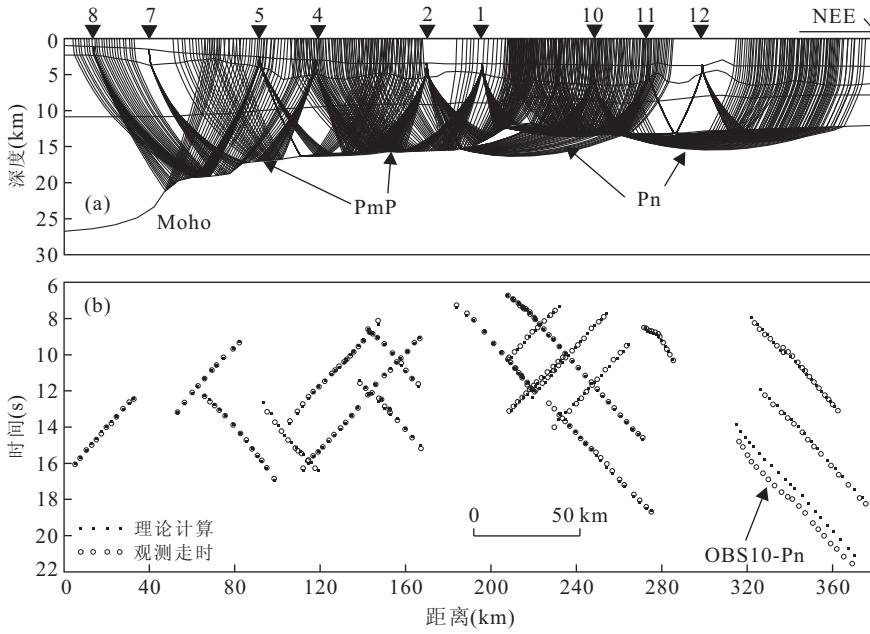


图 7 OBS2006-2 测线所有台站 PmP 及 Pn 震相的走时模拟

Fig. 7 Ray tracing simulation for all PmP and Pn seismic phases
a. PmP 和 Pn 震相覆盖情况; b. PmP 和 Pn 震相走时模拟

沙地块剧烈减薄(G1)、均匀减薄(G2)、西北次海盆(G3)3段进行分析讨论(图6)。

2.3 模型的分辨率测试

为检测最终速度模型对异常体的分辨率程度,进行了检测板测试(Xia et al., 2010)。以最终模型(V1)为基础,将模型的节点网格化之后,给相邻节点的速度值加入正负相间的速度变化,得到扰动模

型(V2)。计算出V2模型中对应于观测走时位置的理论走时 T 。再以V1为初始模型进行反演,拟合走时 T ,得到结果模型V3。计算出V3与V1的异常,并与之前的速度扰动进行对比。本文以拟合全部震相的速度模型为基础模型V1。设定水平网格大小(20 km),同时控制地壳中6.4 km/s速度界面上下速度不变,速度扰动值为0.25 km/s(图8)。对比结

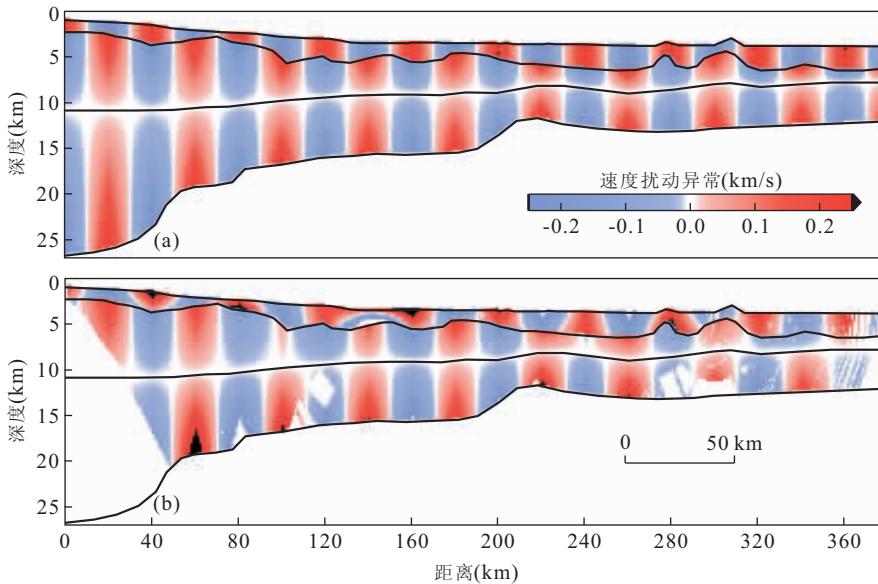


图 8 OBS2006-2 测线速度结构的检测板测试

Fig. 8 Checker board test for the final velocity model of OBS2006-2

a. 输入模型(加入了±0.25 km/s 的速度扰动);b. 输出模型(加入了射线覆盖)

结果显示,绝大部分的速度扰动都得到较好的恢复. 模型对垂向 5 km 以上的分辨较好, 2 km 以下的分辨较差. 沉积层的扰动能得到较好的恢复. 在模型左下端由于受到射线密度较低的影响(图 6b), 恢复情况较差.

3 速度结构分析和讨论

3.1 地壳结构与速度异常

对测线中区域的地壳性质划分是进行后期大地构造分析的基础. 图 6 中显示 G1 段的莫霍面从 27 km 抬升到 17 km, 有着明显的减薄陆壳特征. G3 部分地壳厚度为 6~8 km, 具有典型的洋壳特征(图 6c). 模型中 G2 段(图 6a), 地壳厚度约为 15 km, 位于陆壳和洋壳之间, 莫霍面埋深约为 17 km. 中美合作 ESP-W 测线中 17 号站位(图 1)获得的西沙海槽南侧的莫霍面深度为 24 km, 向南延续时, 地壳厚度剧烈减薄至 15~16 km(Nissen *et al.*, 1995, 图 1), 与本文研究的 OBS2006-2 测线中 OBS5 台站附近的结构特征相似. 中德合作的多道地震测线 SO49-25 在 OBS2 台站地区存在一系列向南倾斜的断层, 并在测线的东南端有向北倾斜的一系列断层(图 9 中虚线框), 指示该区域有着明显的拉张特征(丁巍伟等, 2009). G2 段的速度剖面特征与陆壳特征更为接近, 同时该区未出现磁条带, 显示该区可能没有出现洋壳. 结合上述资料, 本文认为 G2 部分应

属于减薄的陆壳. 从西沙地块减薄的连续性来看, G2 部分很可能与西沙地块是一个块体. OBS2006-1 测线所获得的西北次海盆结构(吴振利等, 2011), 是以扩张中心(双峰海山所代表的洋中脊位置)为轴对称分布(图 10 中虚线框), 结合磁条带分布和南海北部陆缘拉张范围东北段大于西南端的特点(Briais *et al.*, 1993; Hayes and Nissen, 2005; 孙珍等, 2006), 本文认为 OBS2006-2 测线中 114. 5°E 以东的地区为洋壳, 而其 114. 5°E 以西的地区是减薄陆壳(是西沙地块的一部分).

南海北部陆缘 SE 向测线垂直于张裂方向, 如测线 OBS2006-1(吴振利等, 2011), OBS1993(Yan *et al.*, 2001) 和 OBS2003(Wang *et al.*, 2006), 这些速度结构显示在陆壳和洋壳之间都有着较宽的、厚度渐变的过渡带(COT)(Minshull, 2009). 而本文 OBS2006-2 测线平行于西北次海盆的扩张脊(图 1, 磁条带 10), 与在南海北部进行的测线方向不同, 在 OBS9 台站附近显示陆壳和洋壳之间是突变接触的, 该处的莫霍面突然抬升, 地壳厚度剧烈减薄, 表明, 平行于扩张脊方向的陆壳和洋壳的过渡方式完全不同.

3.2 西北次海盆地区的岩浆活动

OBS2006-2 测线速度模型说明: 0~200 km 是西沙地块陆壳, 而在 220~380 km 为典型的洋壳结构(图 6b). 整个模型中较多的海山(包括双峰火山)暗示这一区域曾发生过较多的岩浆活动. 在模型均

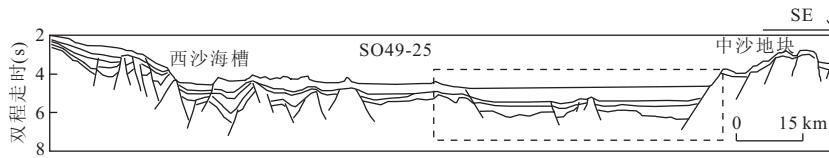


图 9 SO49-25 多道地震剖面(据丁巍伟等,2009, SO49-25 测线位置见图 1)

Fig. 9 Multi-channel seismic profile of SO49-25

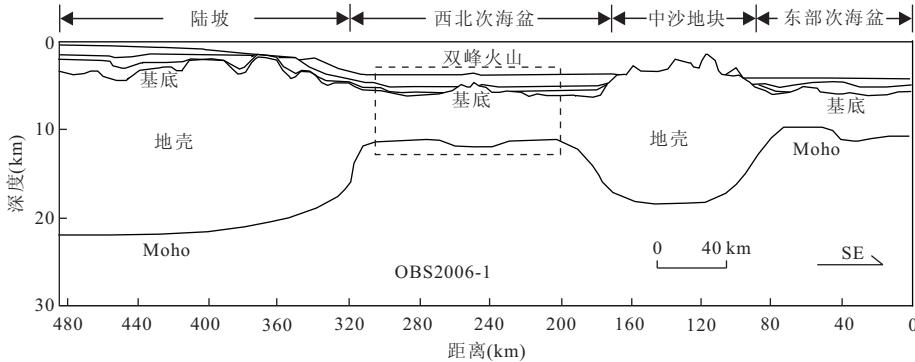


图 10 OBS2006-1 测线速度结构(据吴振利等,2011)

Fig. 10 Velocity structure of OBS2006-1

匀减薄区($100\sim220$ km),基底有明显的多处上凸,结合 MCS97303 多道地震剖面中海山规模来看,推测基底突起是由火山活动引起的(图 2a).物理模拟结果显示了在西北次海盆发生扩张之初,有可能先形成破裂点再逐步延伸为破裂带(Sun *et al.*, 2009),而初始破裂点的位置大致靠近西沙地块.速度模型中 180 km 处和 MCS97303 多道地震剖面中段位置的火山很有可能与西北次海盆破裂拉张之初的情况对应.说明西北次海盆扩张时,在西沙地块减薄区域发生了比较剧烈的岩浆活动.

OBS2006-1 测线的速度结构显示在西北海盆扩张脊下方的莫霍面埋深为 12 km,相比扩张脊两侧下凹约 1 km(图 10).本文的结果显示沿扩张脊走向的莫霍面埋深稳定在 $12\sim13$ km 左右.因此西北次海盆扩张中心的地壳厚度均高于两侧约 1 km.海山下方的莫霍面下凹现象一般有 2 种解释:一是洋壳受到长期负载时产生的弹性挠曲(Watts *et al.*, 1975; Koppers and Watts, 2010);二是由于海山下方的岩浆体侵入或岩浆在莫霍面附近冷却造成洋壳加厚(Watts *et al.*, 1985).吴振利等(2011)将该现象解释为由于存在岩浆上涌通道而造成地壳加厚.本文的速度模型中未发现岩浆体侵入和岩浆通道存在造成速度异常现象,因此更倾向于 Moho 面的下凹可能与海山的负载有关.

磁条带数据显示南海西北海盆在 30 Ma 开始

扩张,并于 28.7 Ma 停止(Briais *et al.*, 1993; Can-de and Kent, 1995).西北次海盆双峰盆地的沉积相表明其海盆扩张的时间为渐新世($T_7\sim T_5$, $32\sim26$ Ma),在西北次海盆形成之后, T_7 界面之上的沉积层在双峰盆地内连续发育(魏喜等,2010),少有构造活动的表现,沉积层在后期被火山活动破坏.这说明西北次海盆形成后有一段构造上的宁静期.西北次海盆扩张脊中心表现出的正地形特征(双峰海山)与东部次海盆(黄岩海山链)形成对比(李家彪等,2002),二者都可能在扩张后期受到火山作用的改造.对挪威大陆张裂边缘分析认为(Breivik *et al.*, 2009),深部地幔物质会在板块破裂初期流向破裂区,并由于浮力作用上涌而加速海底扩张,板块扩张会消耗掉先期形成的岩浆.因此西北次海盆的宁静期可能是由岩浆量的减少造成,而后期双峰海山的形成与岩浆的重新补充有关.

3.3 双峰海山下 Pn 震相异常

在本文的射线追踪及走时模拟过程中,拟合 OBS10 号台站记录的 Pn 震相情况较差(图 7b).OBS10 号台站的 Pn 震相视速度约为 8.2 km/s.由于 RAYINVR 中模型界面的限制,若要拟合包括 OBS10 号台站 Pn 震相的所有震相,则需将模型 260~280 km 处(图 6b 中 A)的 Moho 界面速度调整为 5 km/s 左右以使得射线穿过更大的深度.本文认为,该异常反映了在 OBS10 记录的 Pn 传播途径

中,可能有一个低速体,由于该震相的传播路径在双峰海山和西北次海盆扩张脊的附近,因此推测该低速体可能是残余岩浆。OBS2006-1测线的速度模型和密度模型也说明了西北次海盆扩张脊下方可能存在低速岩浆房(吴振利等,2011)。可能由于残余岩浆的规模较小,OBS11和OBS12台站记录的Pn震相受其影响较小。笔者将在后期工作中进行深入研究与探讨。

4 结论

通过射线追踪和走时模拟,利用RAYINVR软件进行正反演模拟,获得了南海北部唯一NEE向OBS2006-2测线的地壳速度结构。综合速度模型和研究区内构造活动分析,本文得到以下结论:

(1) OBS2006-2测线的沉积层厚度在西沙地块区域约为1~2 km,西北次海盆的沉积层厚度约为2~3 km。地壳厚度由西沙地块的24 km沿NE向减薄至约15 km。西北次海盆洋壳厚度为6~8 km。地壳内从上到下的速度由5.5 km/s增加至6.8 km/s。Moho界面从西沙地块的~27 km逐步向西北次海盆抬升到~12 km,Moho界面下方的速度为7.8~8.0 km/s。

(2) 在西北次海盆和西沙地块之间的过渡区域有着较为强烈的火山活动,并与西北次海盆的初始拉张的情况对应。据区域地质与地球物理资料可说明OBS2006-2测线中114.5°E以东的地区为洋壳,而其114.5°E以西的地区是减薄陆壳,属于西沙地块的一部分。

(3) 双峰海山处(OBS10)Pn震相异常说明西北次海盆扩张脊处可能存在残留岩浆体,双峰海山形成可能与岩浆重新补充有关。

致谢:感谢上海海洋石油局第一海洋地质调查大队“奋斗七号”全部船员的努力协助,及广东省地震局和海南省地震局在设备方面的大力支持。感谢参加本航次调查的科学家Dr. Dmitry Ilinski、吴振利、丁巍伟、郭兴伟和李湘云博士。感谢两位审稿专家和中国科学院南海海洋研究所孙珍研究员、施小斌研究员、朱俊江博士、夏少红博士提出的建设性意见。

References

- Ao, W., Zhao, M. H., Qiu, X. L., et al., 2010. The correction of shot and OBS position in the 3D seismic experiment of the SW Indian Ocean ridge. *Chinese J. Geophys.*, 53(12): 2982—2991(in Chinese with English abstract).
- Breivik, A. J., Faleide, J. I., Mjelde, R., et al., 2009. Magma productivity and early seafloor spreading rate correlation on the northern Vøring margin, Norway—constraints on mantle melting. *Tectonophysics*, 468(1—4): 206—223. doi: 10.1016/j.tecto.2008.09.020
- Briais, A., Patriat, P., Tappognier, P., 1993. Updated 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. doi: 10.1029/92JB02280
- Cande, S. C., Kent, D. V., 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, 100(B4): 6093—6095. doi: 10.1029/94JB03098
- Clift, P., Lin, J., 2001. Preferential mantle lithospheric extension under the South China margin. *Marine and Petroleum Geology*, 18(8): 929—945.
- 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).
- Hao, T. Y., Liu, J. H., Song, H. B., et al., 2002. Geophysical evidences of some important faults in South China and adjacent marginal seas region. *Progress in Geophysics*, 17(1): 13—23 (in Chinese with English abstract).
- Hayes, D. E., Nissen, S. S., 2005. The South China Sea margins: implications for rifting contrasts. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3—4): 601—616. doi: 10.1016/j.epsl.2005.06.017
- Koppers, A. A. P., Watts, A. B., 2010. Intraplate seamounts as a window into deep earth processes. *Oceanography*, 23(1): 42—57.
- 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: 223—238. doi: 10.1007/s11001-008-9059-4
- Li, J. B., Jin, X. L., Gao, J. Y., 2002. Tectonic topography of eastern sub-basin in later spreading. *Science in China (Ser. D)*, 32(3): 239—248 (in Chinese).
- Li, X. Y., Wu, Z. L., Xue, B., et al., 2007. Short-period auto-

- floating ocean bottom seismometer and its operational experiences. *Journal of Tropical Oceanography*, 26(5):35—39 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., 2000. The characteristics of seismic reflection waves in the middle area of the South China Sea and their significance. *Acta Oceanologica Sinica*, 22(6):73—80 (in Chinese with English abstract).
- Minshull, T. A., 2009. Geophysical characterisation of the ocean-continent transition at magma-poor rifted margins. *C. R. Geoscience*, 341(5):382—393. doi:10.1016/j.crte.2008.09.003
- Nissen, S. S., Hayes, D. E., Buhl, P., et al., 1995. Deep penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea. *J. Geophys. Res.*, 100(B11):22407—22433.
- Qiu, X. L., Zhou, D., Xia, K. Y., et al., 2000. OBH experiment and crustal structure of Xisha trough, South China Sea. *Tropic Oceanology*, 19(2):9—18 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. L., Ye, S. Y., Wu, S. M., et al., 2001. Crustal structure across the Xisha trough, northwestern South China Sea. *Tectonophysics*, 341:179—193.
- Qiu, X. L., Shi, X. B., Yan, P., et al., 2003. The deep seismic survey and research progress on crust structure of the northern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 13(3):231—236 (in Chinese).
- Qiu, X. L., Chen, Y., Zhu, R. X., et al., 2007. The application of large volume airgun sources to the onshore-offshore seismic surveys: implication of the experimental results in northern South China Sea. *China Science Bulletin*, 52(4):553—560. doi: 10.1007/s11434-007-0051-1
- Ruan, A. G., Qiu, X. L., Li, J. B., et al., 2009. Wide aperture seismic sounding in the margin seas of China. *South China Journal of Seismology*, 29(2):10—18 (in Chinese with English abstract).
- Shi, X. B., Zhou, D., Zhang, Y. X., et al., 2002. Density, thermal and rheological structures of Xisha trough, South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 21(2):23—31 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Zhong, Z. H., Zhou, D., et al., 2006. Research on opening mechanism of South China Sea: from analogue evidence. *Science in China (Ser. D)*, 36(9):797—810 (in Chinese).
- Sun, Z., Zhong, Z. H., Keep, M., et al., 2009. 3D analogue modeling of the South China Sea: a discussion on breakup pattern. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(4):544—556. doi:10.1016/j.jseae.2008.09.002
- 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
- Watts, A. B., Cochran, J. R., Selzer, G., 1975. Gravity anomalies and flexure of the lithosphere: a three-dimensional study of the Great Meteor Seamount, Northeast Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 80(11):1391—4116.
- Watts, A. B., ten Brink, U. S., Buhl, P., et al., 1985. A multichannel seismic study of lithospheric flexure across the Hawaiian-Emperor seamount chain. *Nature*, 315(9):105—111.
- Wei, X., Jia, C. Z., Zhu, Y. J., et al., 2010. Tectonic evolution and infilling characteristics of the aborted oceanic basin: taking Shuangfeng basin of South China Sea as an example. *Acta Petrolei Sinica*, 31(2):173—179 (in Chinese with English abstract).
- Wei, X. D., Zhao, M. H., Ruan, A. G., et al., 2010. Identification and application of shear waves along the profile OBS2006-3 in the mid-northern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 29(5):72—80 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. M., Zhou, D., Qiu, X. L., 2001. Tectonic setting of the northern margin of South China Sea. *Geological Journal of China Universities*, 7(4):419—426 (in Chinese with English abstract).
- 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 (Ser. D)*, 41(10):1463—1476 (in Chinese).
- 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 Sciences*, 37(40669):460—472. doi:10.1016/j.jseae.2009.11.004
- 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.
- Yao, B. C., 1996. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(2):1—12 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., 2002. Deformation characteristics of continental lithosphere when rifting and breaking-up. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(3):59—67 (in Chinese with English abstract).
- Zelt, C. A., Smith, R. B., 1992. Seismic traveltimes inversion for 2-D crustal velocity structure. *Geophys. J. Int.*, 108(1):16—34.

- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xia, K. Y., et al., 2004. Onshore-offshore seismic data processing and preliminary results in NE South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 23(1): 58—63 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xu, H. L., et al., 2006. Crustal structure and its low 2 velocity layer in transition zone of South China. *Journal of Tropical Oceanography*, 25(5): 36—42 (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 Vp/Vs ratios derived from three-component OBS data. *Tectonophysics*, 480(40547): 183—197. doi:10.1016/j.tecto.2009.10.004
- 丘学林,周蒂,夏戡原,等,2000.南海西沙海槽地壳结构的海底地震仪探测与研究.热带海洋,19(2):9—18.
- 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.
- 阮爱国,丘学林,李家彪,等,2009.中国海洋深地震探测与研究进展.华南地震,29(2):10—18.
- 施小斌,周蒂,张毅祥,等,2002.南海西沙海槽岩石圈的密度结构与热一流变结构.热带海洋学报,21(2):23—31.
- 孙珍,钟志洪,周蒂,等,2006.南海的发育机制研究:相似模拟证据.中国科学(D辑),36(9):797—810.
- 魏喜,贾承造,祝永军,等,2010.夭折大洋盆地构造演化及充填特征探讨——以南海双峰盆地为例.石油学报,31(2):173—179.
- 卫小冬,赵明辉,阮爱国,等,2010.南海中北部OBS2006-3地震剖面中横波的识别与应用.热带海洋学报,29(5):72—80.
- 吴世敏,周蒂,丘学林,2001.南海北部陆缘的构造属性问题.高校地质学报,7(4):419—426.
- 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.
- 姚伯初,1996.南海海盆新生代的构造演化史.海洋地质与第四纪地质,16(2):1—12.
- 姚伯初,2002.大陆岩石圈在张裂和分离时的变形模式.海洋地质与第四纪地质,22(3):59—67.
- 赵明辉,丘学林,夏戡原,等,2004.南海东北部海陆联测地震数据处理及初步结果.热带海洋学报,23(1):58—63.
- 赵明辉,丘学林,徐辉龙,等,2006.华南海陆过渡带的地壳结构与壳内低速层.热带海洋学报,25(5):36—42.
- 附中文参考文献**
- 敖威,赵明辉,丘学林,等,2010.西南印度洋中脊三维地震探测中炮点与海底地震仪的位置校正.地球物理学报,53(12):2982—2991.
- 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.
- 郝天珧,刘建华,宋海斌,等,2002.华南及其相邻边缘海域一些重要断裂的地球物理证据.地球物理学进展,17(1):13—23.
- 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.
- 李湘云,吴振利,薛彬,等,2007. SEDIS-IV型短周期自浮式海底地震仪及应用体会.热带海洋学报,26(5):35—39.
- 刘建华,2000.南海中部地震反射波特征及其地质解释.海洋学报,22(6):73—80.