

## 南海北部洋陆转换带地震反射特征和结构单元划分\*

朱俊江<sup>1</sup>, 丘学林<sup>1</sup>, 徐辉龙<sup>1</sup>, 詹文欢<sup>1</sup>, 赵明辉<sup>1</sup>, 卫小冬<sup>1</sup>, 孙金龙<sup>1</sup>,  
杨睿<sup>2</sup>, 夏少红<sup>1</sup>, 黄海波<sup>1</sup>

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. 中国科学院广州能源研究所, 可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广东, 广州 510640

**摘要:** 张裂大陆边缘和盆地主要通过岩石圈的伸展作用形成, 被动大陆边缘岩石圈的减薄导致了岩浆的减压熔融, 最终形成了洋壳和减薄的转换带。处理和分析了 2010 年中国科学院南海海洋研究所“实验 2”号采集的南海北部地球物理调查的多道地震数据(MCS2010-1), 总结了南海北部洋陆转换带的地震反射特征。转换带主要由北部裂陷期下沉区段, 中部海山或埋藏海山隆起带和靠近海盆一侧的掀斜断块带组成。通过对比以前南海北部采集的反射地震数据和折射地震波速度模型, 圈定了洋陆转换带的分布范围, 洋陆转换带的宽度在南海东北部是 225km, 中部是 160km, 西北部是 110km。依据零星的大于 6 级地震震中分布, 揭示了南海北部洋陆转换带目前仍是一个地震构造活跃带。

**关键词:** 被动大陆边缘; 洋陆转换带; 南海北部; 多道地震调查; 地震反射

中图分类号: P738.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)03-0028-7

## Seismic reflection characteristic and structure unit division of a continent-ocean transition zone in the northern South China Sea

ZHU Jun-jiang<sup>1</sup>, QIU Xue-lin<sup>1</sup>, XU Hui-long<sup>1</sup>, ZHAN Wen-huan<sup>1</sup>, ZHAO Ming-hui<sup>1</sup>, WEI Xiao-dong<sup>1</sup>,  
SUN Jin-long<sup>1</sup>, YANG Rui<sup>2</sup>, XIA Shao-hong<sup>1</sup>, HUANG Hai-bo<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;
2. Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

**Abstract:** Rifted continental margins and basins are mainly formed by the lithospheric extension. Thinned lithosphere of passive continental margins leads to decompression melt of magma and created oceanic crust as well as thinned ocean-continent transition zone. A multi-channel seismic Line MCS 2010-1 in the northern South China Sea, acquired by the R/V "Shiyan 2" of the South China Sea Institute of Oceanology in 2010, is processed and analyzed in this study. Reflection characteristics of a continent-ocean transition (COT) zone are summarized and outlined. Results show that the COT zone is mainly composed of the northern syn-rift subsidence zone, central volcanic or buried volcanic uplift zone, and tilt faulted blocks near the South China Sea basin. Compared to the previous seismic reflection data and refraction velocity models, the range of the COT zone is outlined, from about 225 km wide in the northeastern South China Sea, 160 km wide in the central to 110 km in the northern-central South China Sea. Epicenter distributions of sporadic and larger than 6 magnitude earthquakes suggest that the COT zone in the northern South China Sea is still an active seismic zone.

**Key words:** passive continental margins; continent-ocean transition zone; northern South China Sea; multi-channel seismic investigation; seismic reflection

收稿日期: 2011-08-25; 修订日期: 2011-09-18。卢冰编辑; 林强校对

基金项目: 中国科学院南海海洋研究所青年人才领域项目(SQ200910); 国家自然科学基金项目(41006030, 41176054); 国家自然科学基金与广东省联合基金项目(U0933006)

作者简介: 朱俊江(1976—), 男, 甘肃省永昌县人, 副研究员, 博士, 研究方向为海洋地球物理。E-mail: jzhu@scsio.ac.cn

\*感谢“实验 2”号的全体船员和船上科学家为采集地震测线 MCS2010-1 数据所付出的劳动。感谢中国科学院地质与地球物理研究所常旭研究员和劳累公司的程大祥对 Geometrics StrataVisor NZ II 地震记录仪的帮助和指导。

洋陆转换带的地震反射和折射地壳速度结构特征对研究南海北部被动张裂大陆边缘的岩石圈演化和形成机制以及天然气水合物聚集有重要的作用。在张裂的大陆边缘, 大陆岩石圈总体是减薄的。岩石圈的减薄常常伴随下伏软流圈的上隆, 导致了岩浆的减压熔融、侵入和喷发溢出, 最终形成了洋壳。张裂大陆边缘和盆地的形成主要是通过岩石圈的伸展作用<sup>[1]</sup>, 并伴随正断层作用以及地壳和岩石圈的减薄作用进行。在大陆地壳伸展期间, 冷的大陆地壳减薄和下沉, 最终形成张裂盆地<sup>[2]</sup>。大陆边缘的伸展作用研究主要通过测量断裂或者通过海底地震仪观测(广角地震)地壳或岩石圈的减薄来进行的。从世界范围来看, 被动张裂大陆边缘主要分为火山型

和非火山型两种类型(图 1), 即富含岩浆活动和岩浆匮乏的大陆边缘。火山型张裂大陆边缘主要表现为大量喷发岩与侵入岩浆活动特征, 地球物理特征主要表现为由玄武岩组成的向海倾斜反射层系列(seawater dipping reflectors)<sup>[3]</sup>, 如格陵兰边缘<sup>[4]</sup>、Vøring 边缘和 Hatton Bank 边缘<sup>[5-6]</sup>。非火山型大陆边缘, 如 Biscay 边缘<sup>[7-8]</sup>、Grand Bank, Newfoundland 边缘<sup>[9]</sup>、加拿大 Nova Scotian 边缘<sup>[10]</sup>都表现为岩浆喷出和侵入活动有限、岩石圈的拉伸为主导作用、减薄陆壳及缺乏向海倾斜反射层的特征。对于缺乏岩浆活动的大陆边缘岩石圈减薄, 更强调在张裂初始阶段中地壳的软化或吸收, 以及在最后阶段地幔蛇纹石化的作用<sup>[11]</sup>。

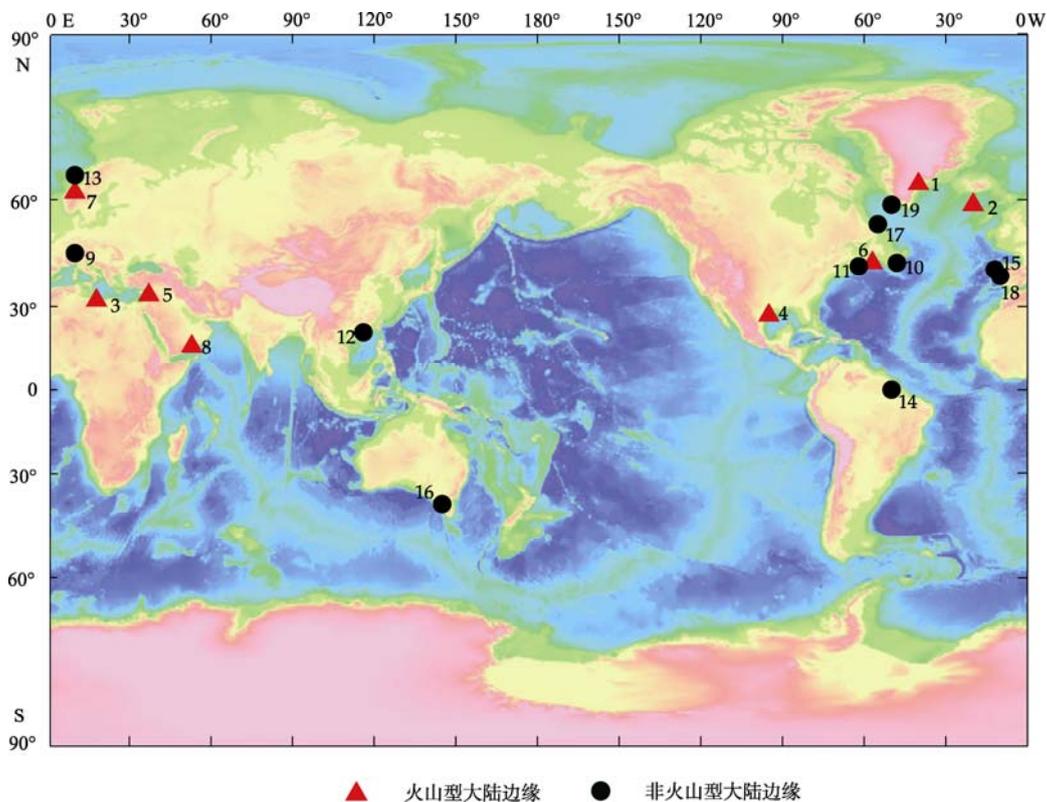


图 1 全球被动大陆边缘分布

Fig. 1 Global distribution of passive continental margins

南海北部被动张裂大陆边缘具有自身的特征, 与世界其他地方的张裂大陆边缘相比有一定的特殊性。南海北部大陆边缘已被解释为非火山型的大陆边缘<sup>[12-13]</sup>。南海北部深地震的探测工作也经历了从最初的低分辨率声呐浮标技术到目前高分辨率的海底地震仪方法的使用<sup>[14-17]</sup>。转换带在不同的被动大陆边缘的特征具有一定的差异性, 主要通过对比一些被动大陆边缘的地震波速度结构<sup>[18]</sup>体现出来。本文重点利用由西向东的 4 条 NW 向横穿南海北部陆

缘的多道地震剖面, 进一步说明南海北部洋陆转换带的反射地震特征, 确定了转换带的分布范围和规模。详细研究南海北部洋陆转换带的地震特征, 将对南海北部大陆边缘拉张机制以及构造属性的定义有重要的科学意义。

## 1 构造背景

古南海的裂解发生在早白垩纪或古新世(65±10MaB.P.)<sup>[19]</sup>, 远离 15°N 和 16°N 的海底扩张中心,

南海岩石圈向北和向南逐渐变老<sup>[19-21]</sup>。南海边缘海盆地的东西向的磁条带异常形成于中渐新世到早中新世时期 (32—17MaB.P.)<sup>[19, 21]</sup>, 磁条带分布展示大约 15.5MaB.P.海底停止扩张<sup>[22]</sup>。最新的海底扩张磁异常修订结果显示对称的海底全扩张率为  $5.6 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 海底扩张开始于大约 31MaB.P., 并沿东西向的南海中部海盆<sup>[23]</sup>发生。在 25MaB.P., 距离西沙南部 50km, 洋脊跳跃之后的海底全扩张率增到  $7.3 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。第 2 次海底扩张活动发生在南海海盆西南部分, 并显示出高的全扩张率  $8 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 在两次扩张轴部位, 大洋地壳形成的结束时间为 20.5MaB.P.<sup>[23]</sup>。新生代南海北部发生 3 次区域构造运动, 中生代末至新生代早期的“神狐运动”, 晚始新世的“南海运动”和中新世末期的“东沙运动”, 神狐运动引起的不整合面为破裂不整合面, 南海运动产生的不整合面为分离不整合面<sup>[24]</sup>。南海东北部从陆架到深海盆有 7 条相互平行的构造带, 北东向构造带, 滨海断裂带、北部拗陷带、中部隆起带、南部拗陷带、下陆坡北倾断裂带、下陆坡磁静区及洋陆边界带<sup>[16, 25]</sup>。大陆边缘位置主要来自以往的地质地球物理调查<sup>[3-7]</sup>, 数字 12 位置为南海北部非火山型大陆边缘<sup>[12-13]</sup>。南海北部主要分布珠江口盆地, 盆地属于大陆边缘裂谷盆地, 经历了古近纪断陷, 晚渐新世至早中新世断拗, 中中新世以后拗陷 3 种沉积体系<sup>[26]</sup>。研究区东部为马尼拉俯冲带, 地震活动频繁, 地震震源深度达到 200km 以上<sup>[27]</sup>。

## 2 数据采集和处理

2010 年 7 月, 南海海洋研究所“实验 2”号科学调查船在南海北部开展了深部地球物理调查<sup>[28]</sup>。除使用海底地震仪外, 沿着计划的二维地震测线也开展了 24 道多道地震调查。多道地震的海上工作主要利用 Geometrics 公司的 StrataVisor NZ II 记录仪。使用 Bolt 大容量气枪为地震震源, 气枪一般投放到海面以下 10m 处, 放炮间距为 50m, 采样率为 4ms, 记录时间为 10s, 检波器间距为 25m。基本数据处理流程包括, 建立地震观测系统、道编辑(剔除坏道)、频率滤波、振幅校正和反褶积、速度分析、水平道校正和倾角时差校正、共深度点叠加和震相偏移。多次波的压制采取了叠前反褶积和 F-K 滤波技术。

依据导航放炮数据, 对原始采集的 SEG-Y 地震格式数据进行预处理, 首先建立观测系统, 对所有炮点和接收点建立位置坐标并写入道头内。利用道

编辑查看所有通道数据, 剔除噪声道, 采集的野外数据中有 3 道地震数据噪音高或地震波信号很弱, 可能由于电缆的接触问题。其他处理流程中都需要对每一个输入参数进行测试和分析, 选取合适的参数进行处理。

## 3 数据分析和解释

地震测线 MCS2010-1 穿越南海北部陆架, 陆坡和海盆区域, 清晰的地震相展示了沿北东向的构造带, 根据偏移成像图, 构造带分为上部斜坡带, 洋陆转换带和南海中央海盆(图 2)。

上部斜坡带的水深变化较大, 从陆架的 100m 到大约 1500m(图 2), 导致海底多次波变化明显, 从地震成像中较容易识别, 海底多次波从共深度点(common depth point, CDP)800 到 2150 非常强烈, 显示切穿沉积层。沉积层内 CDP 100 至 CDP 800, 强振幅反射平行且连续, 也平行于实际反射界面。CDP 1000 至 CDP 1700 同相轴反射受到海底绕射多次波干扰, 显示混乱的震相特征, 识别不同沉积相单元比较困难(图 3)。尽管在实验中采用了大容量 Bolt 气枪做为震源, 采用了预测反褶积和 F-K 滤波技术, 但是仍然难以消除上部斜坡带内的海底绕射多次波, 很难清楚识别基底的轮廓。

洋陆转换带主要由北部裂陷期下沉区段, 中部海山或埋藏海山隆起带和靠近海盆一侧的掀斜断块带组成, 洋盆一侧的掀斜断块(tilt faulted block)带被一系列的北东向正断层分割(图 3、图 4)。海底海山的多次波显示清晰的轮廓, 地震同相轴变窄, 振幅减弱(图 3)。北部裂陷期下沉区主要位于珠江口盆地南部珠二拗陷带内, 地震剖面上显示沉积连续, 从 CDP 2500 至 CDP 3200, 主反射震相为平行连续特征, 比较两侧沉积单元, 显示厚的沉积特征(图 3)。珠二拗陷带内的下第三系沉积厚度较厚, 达到  $5.4 \text{ km}$ <sup>[26]</sup>。北部裂陷期下沉区的基底被一系列的北东向正断层切割, 基底起伏不平, 显示强振幅反射, 为一个明显的破裂不整合面(图 3)。依据南海中部拖网岩石样品, 在北部陆坡取到了辉长岩和闪长岩, Rb-Sr 法测年大约为 140MaB.P.<sup>[29]</sup>, 同时珠江口钻井资料也揭示盆地基底东部主要由中生代火成岩组成, 西部主要由古生代沉积岩、变质岩组成<sup>[30]</sup>。中部海山或埋藏海山隆起带主要由巨大的海山组成, 海山在地震剖面上的宽度为 10—20km(图 3, 地震剖面距离 145—180km)。此带的范围大致为从地震剖面距

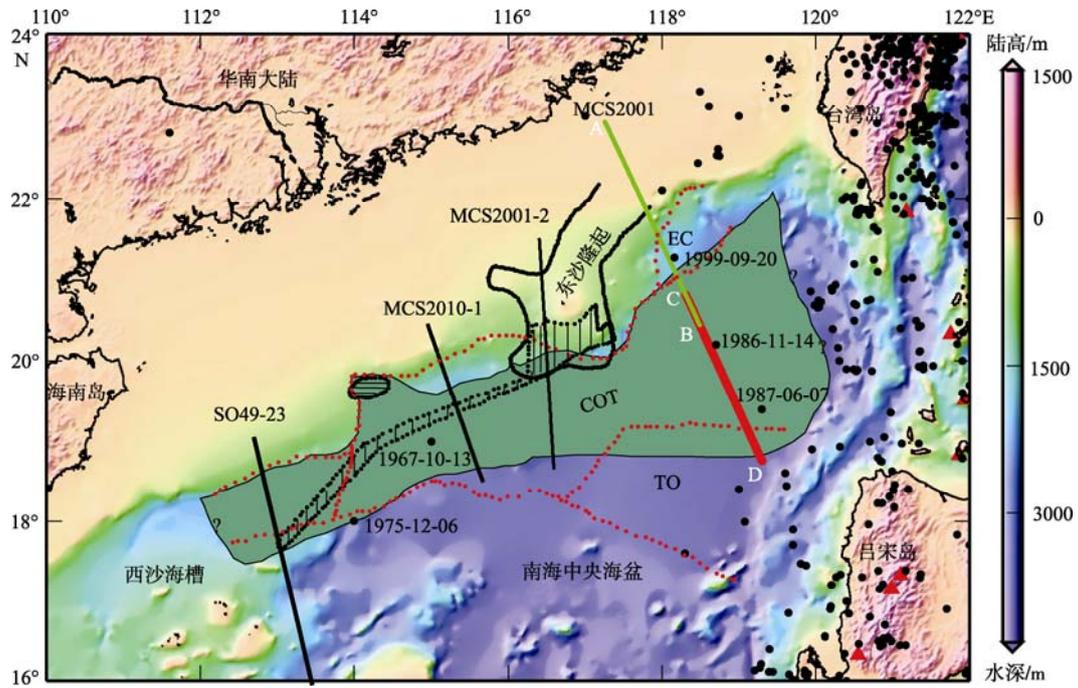


图 2 南海北部反射地震调查位置图

黑心圆点为震级大于 6 级地震震中位置, 红色三角为火山位置, 墨绿色阴影部分为本研究圈定的洋陆转换带范围, 西侧边缘尚无调查数据。COT(continent-ocean transition): 洋陆转换带; TO: 厚的大洋地壳; EC: 伸展大陆地壳。红色点线圈定的洋陆转换带据 Wang 等<sup>[13]</sup>; 黑色横、斜线圈定的范围分别为张裂期和张裂后南海北部火山活动范围(据 Yan 等<sup>[12]</sup>), SO49-23 地震测线据 Qiu 等<sup>[14]</sup>, 标注了洋陆转换带内分布的 5 次大于 6 级地震的时间和震中位置

Fig. 2 Location map of the seismic reflection investigation in the northern South China Sea

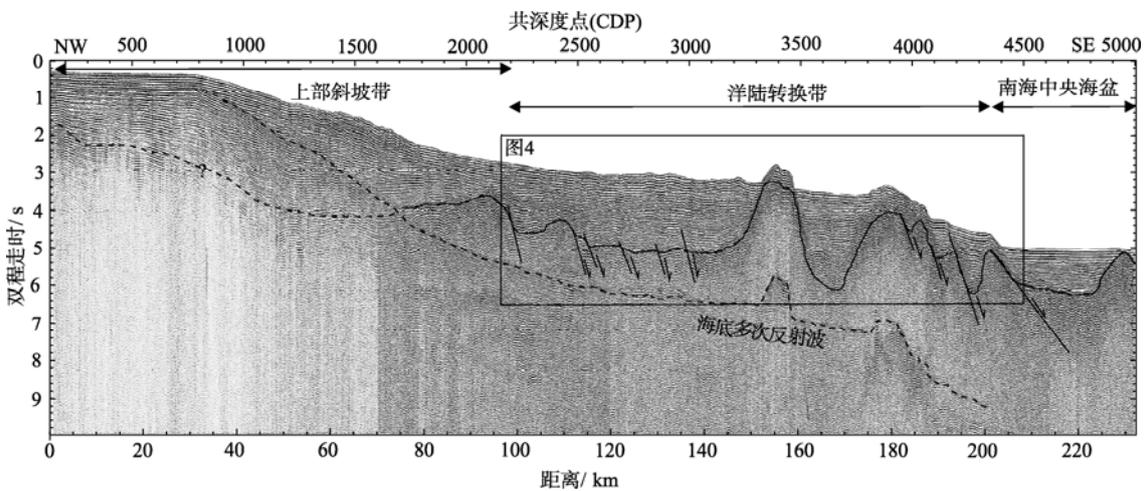


图 3 多道地震 MCS2010-1 测线时间偏移成像图

Fig. 3 Time migration imaging of the multi-channel seismic Line MCS2010-1

离 155km 至 200km(图 4)。海山内部无明显反射特征, 顶部沉积物显示高频, 平行连续的震相特征, 底部沉积单元主要显示为低频, 混杂堆积特征, U1 不整合分割着二者(图 4)。U2 不整合底部沉积相的反射特征为高频、平行连续的强振幅特征。U3 破裂不整合面被正断层切割, 显示高频、不连续震相特征(图 4)。

洋盆一侧的掀斜断块带主要由陡倾的正断层切

割块体组成, 地震剖面范围为 185km 至 210km(图 3), 顶部主要由低频、连续的强振幅沉积相特征, 基底为强烈起伏的 U3 破裂不整合面组成(图 4)。从地震剖面 MCS2010-1 的反射特征和解释分析, 界定了大约 105km 长的洋陆转化带范围。3 个不同区段的反射特征也说明了转换带内的复杂构造特征和演化(图 4)。3 个不整合面对应的地层年龄需要珠江口盆地钻井资料的对比和分析。

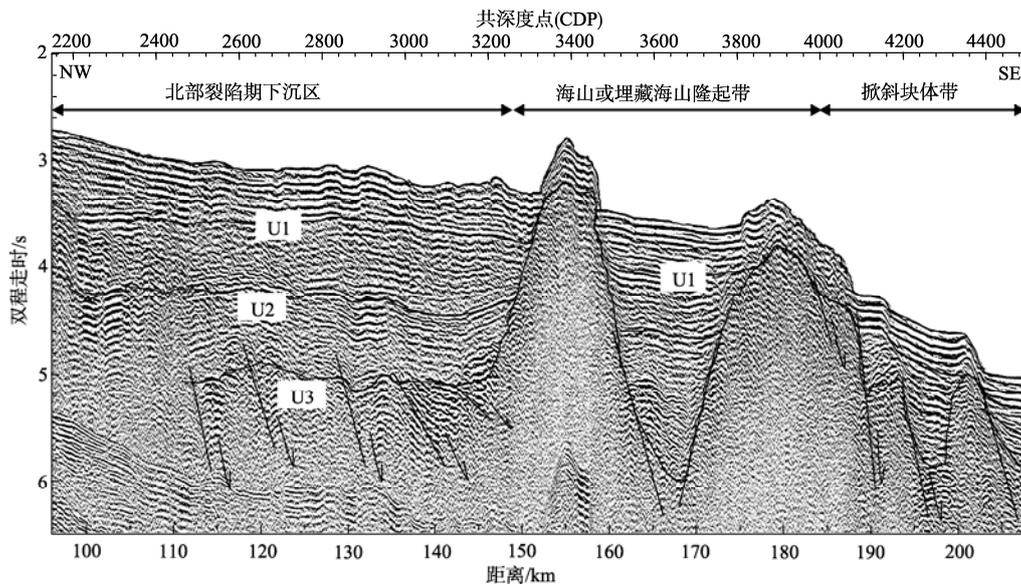


图 4 洋陆转换带地震反射特征

Fig. 4 Seismic reflection characteristics of the continent-ocean transition zone

### 4 讨论和结论

依据采集的南海北部多道地震数据分析 (MCS2010-1), 南海北部洋陆转换带主要由北部裂陷期下沉区段, 海山或埋藏海山隆起带和掀斜断块带组

成, 从北西到南东跨越 110km 的范围(图 4)。南海东北部 MCS2001 地震剖面(测线位置见图 2)展示了很宽的洋陆转换带, 大约为 225km, 海山或埋藏海山隆起带大约 150km, 掀斜断块带大约 40km(图 5)。南海中北部 MCS2001-2 地震剖面(测线位置见图 2)展示了大约

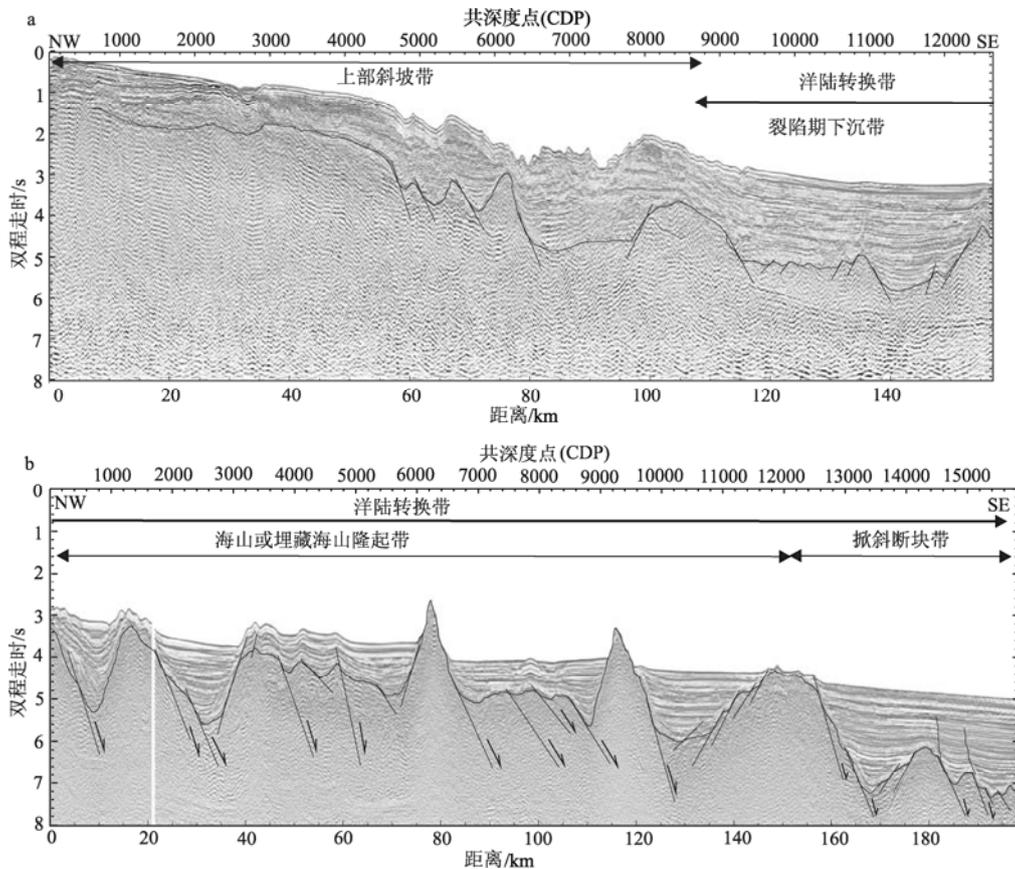


图 5 多道地震测线 MCS 2001 时间偏移成像图

a. 地震测线 MCS 2001 AB 段; b. 地震测线 MCS 2001 CD 段, 位置见图 1

Fig. 5 Time migration imaging of the multi-channel seismic Line MCS 2001. a) AB section of the seismic Line MCS 2001; b) CD section of the seismic Line MCS 2001.

160km 宽的洋陆转换带, 30km 宽的埋藏海山隆起带和 60km 宽的掀斜断块带(图 6)。几条地震剖面清晰地揭示了洋陆转换带的宽度从南海东北部向中部和西部变窄, 分布范围减小的特征, 在南海西北部 MCS2010-1 测线下总体分布要略窄于 Wang 等<sup>[13]</sup> 圈定的范围(图 2)。SO49-23 地震测线也展示了转换带宽度变窄<sup>[14]</sup>(位置见图 2)。Wang 等<sup>[13]</sup> 和 Zhao 等<sup>[31]</sup> 依据沿 MCS2001 测线的海底地震仪数据, 详细模拟了 P 波和 S 波速度结构, 揭示了减薄的陆壳和宽阔的洋陆转换带, 在洋陆转换带内的地壳厚度大约为 11—15km<sup>[13]</sup>, P 波和 S 波速度分别为  $4.5\text{—}7.5\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $2.8\text{—}4\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[13, 31]</sup>。在海盆一侧的掀斜断块带内, 斜向正断层与南海北部地震剖面解释的铲状断层 (listric fault) 和切穿地壳断层 (throughgoing

fault)<sup>[32-34]</sup> 相似, 详细的断层几何学形态需要高分辨率的地震调查, 断层活动与南海北部海底扩张停止后的岩石圈拉伸有关。洋陆转换带内的地表热流也显示从北部陆坡区到海盆的逐渐递增, 东北部达到  $71\text{—}163\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[35]</sup>, 转换带内的高热流特征一致于下陆坡存在的一高热流带, 平均热流为  $90\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[36-37]</sup>。

根据 6 级以上地震震中的分布, 在洋陆转换带范围内有 5 次 6 级以上强地震发生(时间从 1964 年至 2011 年 7 月), 两次分布在东沙隆起的西侧, 3 次在东沙隆起的东侧(图 2), 地震震中都分布在东沙海南地震带内, 这反映了洋陆转换带是目前仍比较活跃的一个构造带, 需要今后的地震台网和海底观测网络进一步的调查研究。

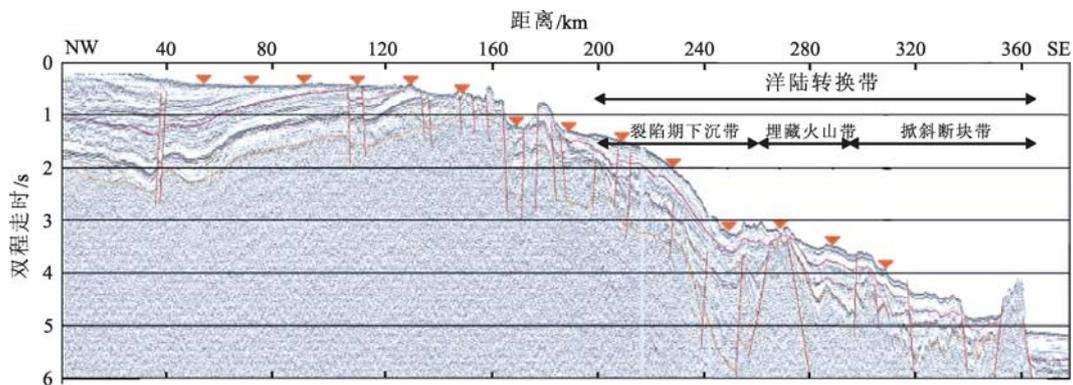


图 6 多道地震测线 MCS 2001-2 时间偏移成像图(据卫小冬等<sup>[38]</sup>修改)

图上红色倒三角形为 OBS 位置

Fig. 6 Time migration imaging of the multi-channel seismic Line MCS 2001-2. Modified after Wei<sup>[38]</sup>.

## 参考文献

- [1] MCKENZIE D. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40: 25-32.
- [2] RANERO C, PÉREZ-GUSSINÉ M. Sequential faulting explains the asymmetry and extension discrepancy of conjugate margins[J]. *Nature*, 2010, 468: 294-300.
- [3] ELDHOLM O, THIEDE J. ODP LEG SCIENTIFIC PARTY. Formation of the Norwegian Sea[J]. *Nature*, 1986, 319: 360-361.
- [4] KORENAGA J, HOLBROOK W S, KENT G M, et al., Crustal structure of the southeast Greenland margin from joint refraction and reflection seismic tomography[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 21591-21614.
- [5] MUTTER J C, TALWANI M, STOFFA P L. Evidence for a thick oceanic crust off Norway[J]. *J Geophys Res*, 1984, 89: 483-502.
- [6] MORGAN J V, BARTON P J, WHITE R S. The Hatton Bank continental margin-III. Structure from wide-angle OBS and multichannel seismic refraction profiles[J]. *Geophys J Int*, 1989, 98: 367-384.
- [7] WHITMARSH R B, AVEDIK F, SAUNDERS M R. The seismic structure of thinned continental crust in the northern Bay of Biscay[J]. *Geophys J R Astr Soc*, 1986, 86: 589-602.
- [8] WHITE R S, MCKENZIE D, O'NIONS R K. Oceanic crustal thickness from seismic measurements and rare earth element inversions[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97: 19683-19715.
- [9] REID I D. Crustal structure of a nonvolcanic rifted margin east of Newfoundland [J]. *J Geophys Res*, 1994, 99 (B8): 15161-15180.
- [10] KEEN C E, POTTER D P. Formation and evolution of the Nova Scotian rifted margin: Evidence from deep seismic

- reflection data[J]. *Tectonics*, 1995, 14 (4): 918-932.
- [11] LAVIER L, MANATSCHAL G. A mechanism to thin the continental lithosphere at magmapoor margins[J]. *Nature*, 2006, 440: 324-328.
- [12] YAN P, ZHOU D, LIU Z. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2001, 338: 1-21.
- [13] WANG T, CHEN M, LEE C, et al. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2006, 412: 237-254.
- [14] QIU X, YE S, WU S, et al. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179-193.
- [15] 丘学林, 施小斌, 阎贫, 等. 南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展[J]. *自然科学进展*, 2003, 13(3): 231-236.
- [16] 丘学林, 赵明辉, 叶春明, 等. 南海东北部海陆联测与海底地震仪探测[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(4): 295-300.
- [17] 李家彪. 中国边缘海形成演化与资源效应[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 1-509.
- [18] MINSHULL T A. Geophysical characterisation of the ocean-continent transition at magma-poor rifted margins[J]. *C R Geoscience*, 2009, 341: 382-393.
- [19] TAYLOR B, HAYES D E. Origin and history of the South China Basin [M]//HAYES D E. Tectonic and geologic evolution of southeast Asian seas and islands, *Geophys Monogr Ser. Washington D C : AGU*, 1983, 27: 23-56.
- [20] BOWIN C, LU R S, LEE C S, SCHOUTEN H. Plate convergence and accretion in Taiwan-Luzon region[J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1978, 62: 1645-1672.
- [21] TAYLOR B, HAYES D E. The tectonic evolution of the South China Sea Basin[M] //HAYES D E. Tectonic and geologic evolution of southeast Asian seas and islands, *Geophys Monogr Ser. Washington D C : AGU*, 1980, 23: 89-104.
- [22] BRIAIS A, PATRIAT P, TAPPONNIER P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. *J Geophys Res*, 1993, 98 (B4): 6299-6328.
- [23] BARCKHAUSEN U, ROESER H A. Seafloor spreading anomalies in South China Sea revisited[M]//CLIFT P, KUHNT W, WANG P, et al. Continent-ocean interactions within East Asian marginal seas, *Geophys Monogr Ser. Washington D C: AGU*, 2004, 149: 121-125.
- [24] 姚伯初. 南海北部陆缘新生代构造运动初探[J]. *南海地质研究*, 1993, 5: 1-12.
- [25] 夏戡原, 黄慈流, 黄志明. 南海东北部台湾西南海区深部地壳结构特征[C] 陈运泰, 滕吉文, 阚荣举, 等. 中国大陆地震学与地球内部物理学研究进展——庆贺曾融生院士八十寿辰. 北京: 地震出版社, 2004: 135-145.
- [26] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1-510.
- [27] 朱俊江, 丘学林, 詹文欢, 等. 南海东北部海沟的震源机制解及其构造意义[J]. *地震学报*, 2005, 27(3): 260-268.
- [28] 孙金龙, 夏少红, 徐辉龙, 等. 2010 年南海北部海陆联测项目简介及初步成果[J]. *华南地震*, 2010, 30 (6): 45-52.
- [29] 刘建华. 南海中部地震反射波特征及其地质解释[J]. *海洋学报*, 2000, 22: 73-80.
- [30] 金庆焕. 南海地质与油气资源[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 41-310.
- [31] ZHAO MINGHUI, QIU XUELIN, XIA SHAOHONG, et al. Seismic structure in the northeastern South China Sea: S-wave velocity and  $V_p/V_s$  ratios derived from three-component OBS data[J]. *Tectonophysics*, 2010, 480: 183-197.
- [32] LI C, ZHOU Z, LI J, et al., Magnetic zoning and seismic structure of the South China Sea ocean basin[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2008, 29: 223-238.
- [33] HAYES D E, NISSEN S, BUHL P, et al. Throughgoing crustal faults along the northern margin of the South China Sea and their role in crustal extension[J]. *J Geophys Res*, 1995, 100 (B11): 22435-22446.
- [34] LÜDMANN T, WONG H K. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 1999, 311: 113-138.
- [35] 张健, 汪集旻. 南海北部大陆边缘深部地热特征[J]. *科学通报*, 2000, 45: 1095-1100.
- [36] 施小斌, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海热流特征及其构造意义[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22: 63-73.
- [37] SHI X, QIU X, XIA K, et al. Characteristics of surface heat flow in the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 265-277.
- [38] 卫小冬, 阮爱国, 赵明辉, 等. 穿越东沙隆起和潮汕拗陷的 OBS 广角地震剖面[J]. *地球物理学报*, 2011, 54: 3325-3335.