

郭晓然, 闫培, 李普春, 等. 福建—台湾海峡深部地壳结构探测与滨海断裂带性质研究[J]. 华南地震, 2019, 39(2): 34–42. [GUO Xiaoran, YAN Pei, LI Puchun, et al. The Exploration on the Deep Crustal Structure in the Fujian–Western Taiwan Strait and Study on the Littoral Fault Zone[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(2): 34–42]

福建—台湾海峡深部地壳结构探测与 滨海断裂带性质研究

郭晓然, 谢志招, 闫培, 李普春, 王 笋
(福建省地震局厦门地震勘测研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于 2012 年实施的漳浦—下洋—武平人工地震爆破探测数据以及 2015 年实施的陆海联测 HX07 的数据, 用射线追踪和正演走时拟合方法, 获得了福建南部—台湾海峡的初步二维纵波速度模型。剖面显示: 滨海断裂带表现为宽约 20 km 的切穿地壳的破碎低速带, 与其两侧的地壳结构存在较大的横向差异, 莫霍面在滨海断裂带处发生较大的突变, 其深度由左侧的 30 km 左右抬升至右侧的 28.8 km 左右, 上下地壳厚度比亦由靠陆一侧的 1: 1 降至向海一侧的 0.5: 1; 上述特征表明滨海断裂带是华南地块正常型陆壳与海区减薄型陆壳的分界断裂。地壳速度在海陆过渡带偏高, 康拉德面和莫霍面在此处也有显著抬升, 推测其可能是在地壳的伸展拉张及太平洋板块与菲律宾海板块向欧亚大陆板块的俯冲的共同作用下, 深部软流圈物质沿着长乐—诏安深大断裂上侵形成的。

关键词: 深部地壳结构; 华南地块; 滨海断裂带; 海陆联测

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)02-0034-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.02.006

The Exploration on the Deep Crustal Structure in the Fujian–Western Taiwan Strait and Study on the Littoral Fault Zone

GUO XiaoRan, Xie ZhiZhao, YAN Pei, LI PuChun, WANG Sun

(Xiamen Center for Seismic Survey, Earthquake Administration of Fujian Province, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the data of the blasting seismic survey line Zhangpu–Xiyang–Wuping in 2012 and the data of Onshore–offshore seismic experiment HX07 carried out in 2015, we got the two-dimensional longitudinal wave velocity model of southern part of Fujian–Taiwan Strait Region. The profile shows that the Littoral Fault Zone manifest as a 20km wide low-velocity fracture zone that cuts through the crust. There is a large lateral difference between crustal structures on both sides of the crust. The Moho has a big mutation at the Littoral Fault Zone. Its depth is raised from about 30km on the left to about 28.8km on the right. The thickness ratio of the

收稿日期: 2018-05-30

基金项目: 国家自然科学基金 41474071、U1505232、41774104 联合资助

作者简介: 郭晓然(1989–), 女, 助理工程师, 主要从事深部地球物理工作。

E-mail: gxr19890902@126.com.

upper and lower crusts is also reduced from 1:1 on the land side to 0.5:1 on the seaward side.. The above characteristics show that the Littoral Fault Zone is the boundary fault between the normal continental crust and the thinned continental crust in the South China block. The crustal velocity is high in the transition zone between sea and land, and the Conrad and Moho are also significantly uplifted here. It is speculated that the deep asthenosphere may have formed along the Changle-Zhaoan deep major fault under the joint extension of crustal extension and subduction of Pacific plate and Philippine sea plate to Eurasian plate.

Keywords: Deep crustal structure; South China block; Littoral fault zone; Onshore-offshore seismic experiment

0 引言

福建及台湾海峡地区位于中国大陆的东南边缘,处于印度板块、欧亚板块和太平洋板块三大板块交汇作用的区域,地质背景复杂,构造活动强烈,区域内发育多条北东向断裂带,例如邵武—河源断裂带、政和—海丰断裂带、长乐—诏安断裂带等,在台湾海峡西部的滨海断裂带,历史上曾经发生过多次七级以上大地震(图1),近期小震活动频繁。福建省遭受的地震影响也主要来自这些断裂构造^[1-3]。大量震后的研究表明,破坏性地震的发生与区域的深部地壳结构、物性状态及动力学环境有着密切的关系。滨海断裂带被认

为是华南大陆与南海的分界,在南海北部陆缘,人们曾经对其进行过多次的深地震和反射地震探测,对位于南海北部陆缘的滨海断裂带的浅部及深部的地壳结构特征以及构造属性都有了较为详细的了解,但是由于地理条件限制等原因,在台湾海峡区域进行的深部探测则较少,对于滨海断裂带在台湾海峡的分布形态及构造属性等还存在较大的争议^[4-8]。此外,华南地块位于古亚洲、特提斯、太平洋三大构造域的交接部位,其地质构造十分复杂,关于华南地块的构造属性及形成演化历史等一直存在一些争议,例如:华南东南部的构造分区及东南沿海地区是否存在地幔柱等目前还没有统一的结论^[9-10]。

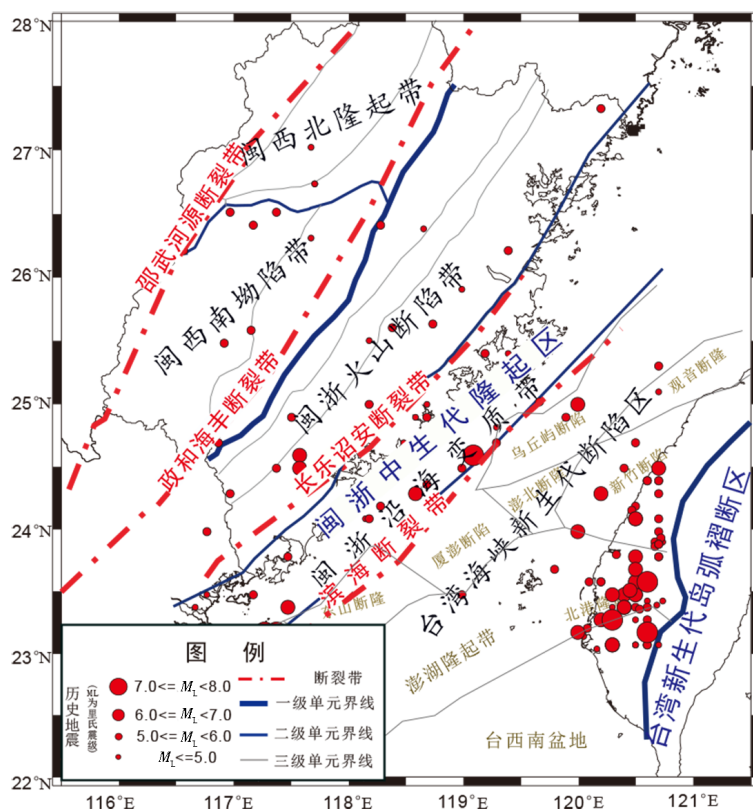


图1 研究区域地质构造图^[11]
(图中历史地震主要为发生在 963—2015 年间的地震)

Fig.1 The geological structure of research area

(The historical earthquakes in the map are mainly earthquakes that occurred between 963 and 2015)

探明福建—台湾海峡地壳速度结构及滨海断裂带在台湾海峡的分布形态及构造属性,查明福建陆域与台湾海峡区域的深部地壳结构特征和介质物理特性,建立福建—台湾海峡地壳—上地幔速度结构模型,对福建省的防震减灾工作及华南地块构造属性及台湾海峡形成演化历史的研究都具有重要意义^[1]。2012—2015年福建省地震局在这一区域开展了多次深地震探测,本文利用期间采集的数据,建立福建—台湾海峡的P波速度结构,为滨海断裂带及华南东南部深部构造研究提供新的地质地球物理证据。

1 数据采集

本研究主要结合2012年福建省地震局委托中国地震局地球物理勘探中心实施的漳浦—下洋—武平人工爆破深地震测线数据,以及2015年福建省地震局实施的陆海联测HX07的数据进行。漳浦—下洋—武平深地震测线位于福建省南部,测线西起闽赣粤交界的龙岩市武平县,东至漳州市漳浦县,测线总长度250 km,沿剖面布设4个爆

破激发点(图2中粉红色五角星),共布设140台地震仪,观测点距1.5~2.0 km。分别在剖面的36.583 km、82.781 km、152.482 km、251.122 km处4个不同位置进行了4次药量分别为2499 kg、2583 kg、2982 kg、2982 kg的爆破激发。陆海联测HX07测线气枪激发测线由闽浙沿海变质带起始,沿NW-SE方向横穿台湾海峡,测线总长为136 km。气枪震源是4支BOLT(2000 in³)气枪组成的枪阵,总容量8000 in³,炮间距200 m,放炮时间间隔约90 s,气枪作业时船速设定为4.0节。海上部分福建海洋研究所“延平二号”科考船投放了30台国产宽频带4通道海底地震仪,台湾方面投放了10台法国OBS,沿测线共投放40台OBS,丢失4台,成功回收36台。陆上数据主要由布置的100台流动地震台PDS-1型数字地震仪取得。除了走航激发外,15年还在测线上方选取了三个海上固定点(图2中海上红色五角星),联合石黄峰和棉花滩两个水库(图2中陆上红色五角星)进行了重复激发实验。

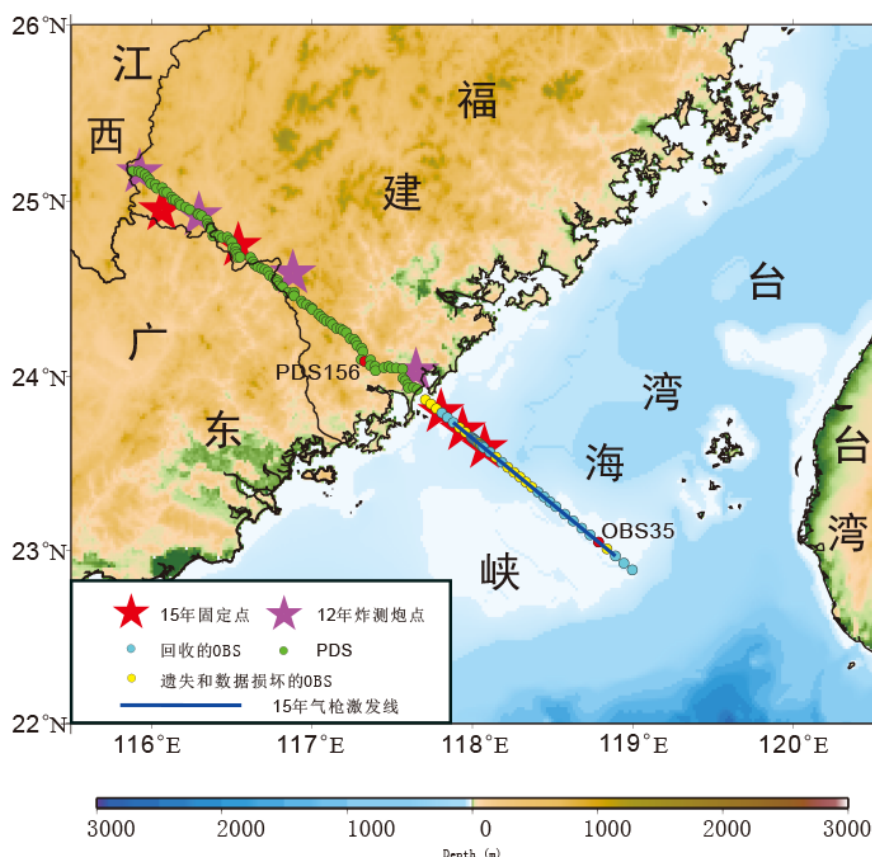


图2 陆海联测测线布设位置图

Fig.2 Distribution of onshore-offshore seismic profiles

2 数据处理与震相特征

通过对数据的初步处理,我们得到了这两次探测试验的共接收点和共炮点记录剖面,识别与拾取到了较为丰富的震相数据(表 1)。这里我们将 P_s 定义为沉积层内的折射震相, P 为沉积层内的反射震相, P_g 为地壳中的折射震相,其中上地壳的折射震相为 P_{g1} ,下地壳的折射震相为 P_{g2} ; P_{cp} 为康拉德面的反射震相; P_i 是下地壳低速层的反射震相; P_{mp} 为莫霍界面的反射震相; P_n 是上地幔顶部的折射震相。此次资料处理解释中识别的 P 波主要震相有: P_{s1} 、 P_{s2} 、 P_2 、 P_{g1} 、 P_{g2} 、 P_{cp} 、 P_i 、 P_{mp} 、 P_n 。其中 P_s 震相仅在海域 OBS 台站拾取到,由于台湾海峡沉积层厚度变化较大,各 OBS 台站拾取到的 P_s 震相与 P 震相在到时与追踪长度上有较大的区别。 P_g 震相(P_{g1} 和 P_{g2}) 大约出现在距炮点 10.0 km 之后,该震相以清晰可靠的初至波被观测记录到,一般可追踪至距台站 110.0 km(图 3、图 4)。 P_{cp} 波组紧随 P_{g1} 之后出现,该波组在各台站记录剖面上基本都表现为能量弱,连续性差,仅在少数台站记录剖面的局部区域显示出较强的振幅,可以连续追踪对比,其追踪区间一般为 50~110 km, PDS156 台最远可追踪对比距炮点 120 km 以远(图 4)。 P_i 波组仅在 12 年炸测试验的记录剖面中识别出,该组震相表现较不稳定,时强时弱,追踪区间一般为 50~130 km,最远可至 150 km。 P_{mp} 波组是一组优势波组,震相清晰、可靠,一般在 60~290 km 区间能够被有效的识别对比出来(图 3~图 4)。 P_n 波组一般 150 km 左右进入初至区,最远可追踪至 330 km 以远,由其走时曲线所得到的视速度约为 7.80~8.10 km/s。

3 模型

通过对沿测线部署的地震仪记录到的震相特征及区域地质资料、前人研究成果进行详细分析^[11-13],结合反演得到的二维浅部层析成像结果,我们构建了二维地壳速度结构初始模型;并采用 2D 射线追踪程序 Rayinvr^[14]进行射线追踪和走时拟合,最终获得一个较为理想的速度结构模型。最终速度模型(图 6)显示,剖面从上到下共分为 8 层:第 1 层为地表与海水层,海水层速度为 1.50 km/s,地表速度在 4~5 km/s 左右,第 2~4 层为结晶基底及沉积基底以上层位,其厚度沿测线变化较大,

表 1 震相拾取结果
Table 1 Seismic phases picked-up

| 震相来源 | 震相类型 | 点数 | |
|----------|----------|-------|-------|
| 走航 (OBS) | P_s | 1751 | 4319 |
| | P_g | 1728 | |
| | P_2 | 143 | |
| | P_{cp} | 114 | |
| | P_{mp} | 576 | |
| 走航 (PDS) | P_g | 3719 | 15496 |
| | P_{cp} | 450 | |
| | P_{mp} | 10307 | |
| | P_n | 1470 | |
| 炸测 | P_g | 266 | 696 |
| | P_{cp} | 155 | |
| | P_i | 70 | |
| | P_{mp} | 163 | |
| | P_n | 42 | |
| 固定点 | P_g | 269 | 717 |
| | P_{mp} | 267 | |
| | P_n | 181 | |

在福建陆域基本在 1.0 km 左右,到闽浙沿海变质带,增至 1.5~3.0 km;至台湾海峡新生代凹陷区与澎湖断隆带约为 4.0~7.0 km,速度等值线最比较密集,海底面速度约为 2.25 km/s,基底速度在福建陆域较高,约为 5.80 km/s,在台湾海峡区域基本上为 5.40~5.60 km/s,局部速度较高,达 5.70 km/s,受新生代构造影响,沉积基底起伏较大,沉积层厚度和速度局部变化较大;第 5 层是上地壳,速度从 5.70~5.90 km/s 增加至 6.20~6.45 km/s,在海陆过渡带偏高,上地壳厚度在剖面西部较为稳定,厚度在 15~12 km 左右,到东侧的台湾海峡新生代凹陷区,迅速减薄至 9.5~7 km;第 6 层是下地壳顶部的低速层,低速层内速度约为 6.18~6.20 km/s,厚度约为 5~6 km,自西向东在模型 220 km 左右尖灭,第 7 层是下地壳(不包括低速层),速度由 6.30~6.50 km/s 逐渐变化至 6.60~6.90 km/s,莫霍面在滨海断裂带处出现较为突然的抬升;第 8 层是上地幔顶部,速度从 7.9~8.0 km/s 增加底部的 8.1 km/s。模型中福建陆域地表速度及海底面主要利用区域地质资料和重力水深数据设置,第一层的速度结构在模拟过程中作为已知条件保持不变;模型中其他界面的设置则主要参考了反演得到的二维浅部层析成像结果和区域地质资料,它们在

模拟过程中的调整较多,埋深及形态基本上是在正演过程中由震相来确定的。从全部震相的追踪图(图 5)中可以看到,绝大多数震相都得到了较好

的拟合,最终模型拟合的 RMS 值为 0.122 s, χ^2 值为 0.909(表 2)。

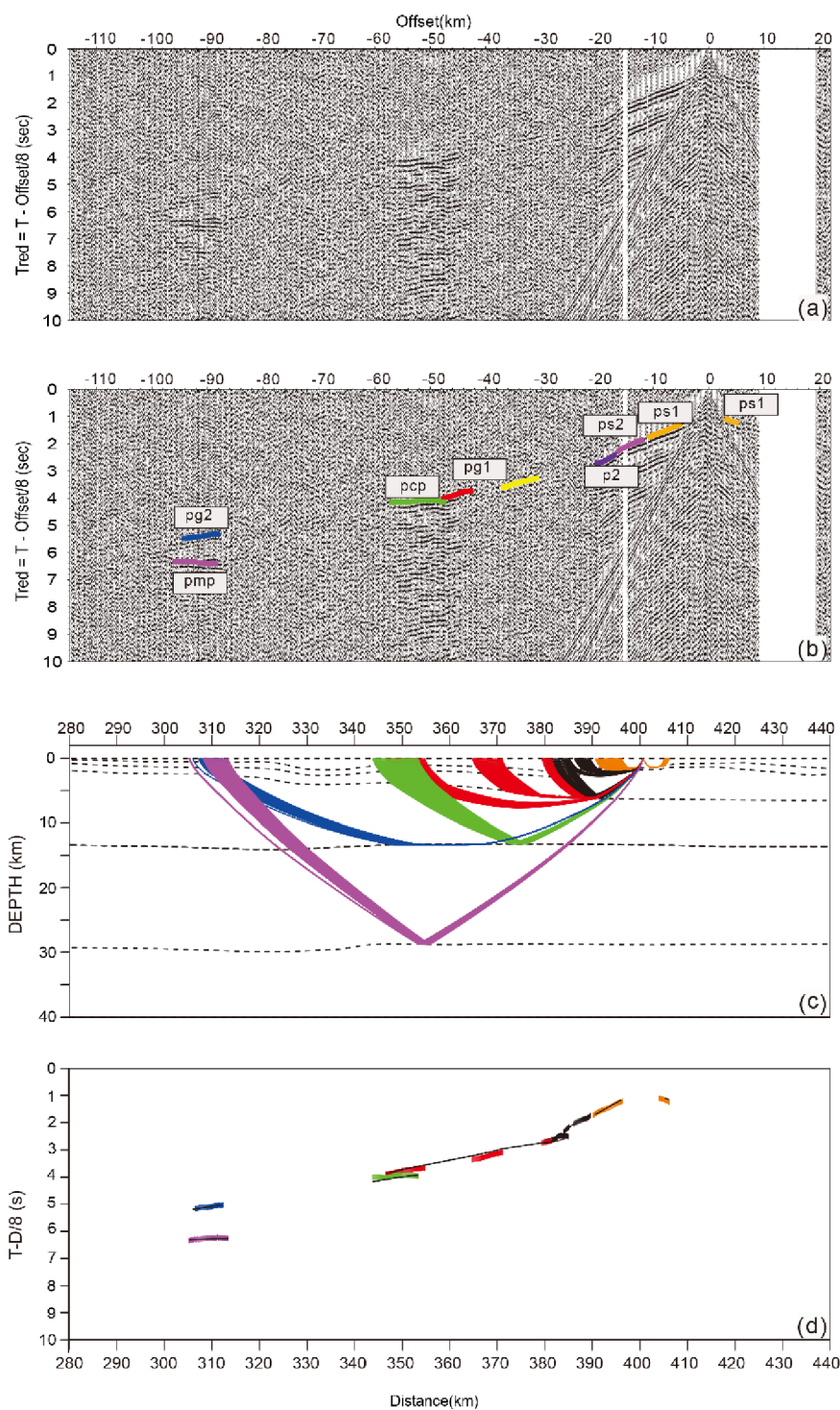


图 3 OBS35 台站地震记录剖面及射线追踪

(a)OBS35 台站的地震剖面,折合速度为 8.0 km/s; (b)OBS35 台站的震相拾取; (c)纵波速度结构模型和射线追踪; (d)实测走时(虚线)和计算走时(实线),不同颜色的射线与不同颜色的走时相对应

Fig.3 Seismic record section and ray tracing at OBS35 station

(a)Seismic record section with reduced velocity of 8.0 km/s; (b)Seismic phases picked-up at OBS35 station; (c)P-wave velocity structure model and ray tracing; (d)Measured travel time(dashed line)and computed travel time(solid line). Different colors of rays correspond to different colors of travel time.

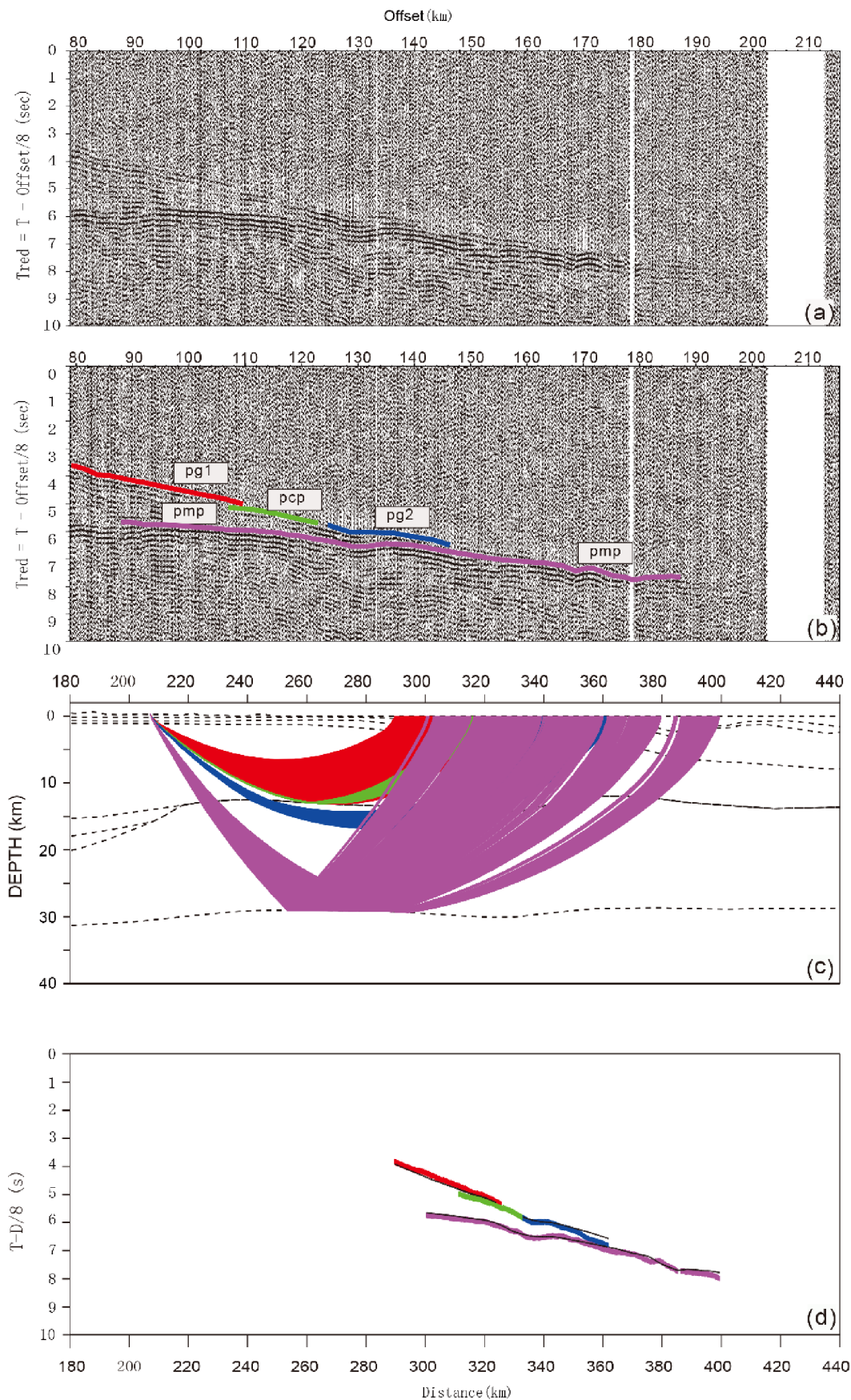


图 4 PDS156 台站地震记录剖面及射线追踪, 其他同图 3

Fig.4 Seismic record section and ray tracing at PDS156 station, and the others are the same as Figure 3.

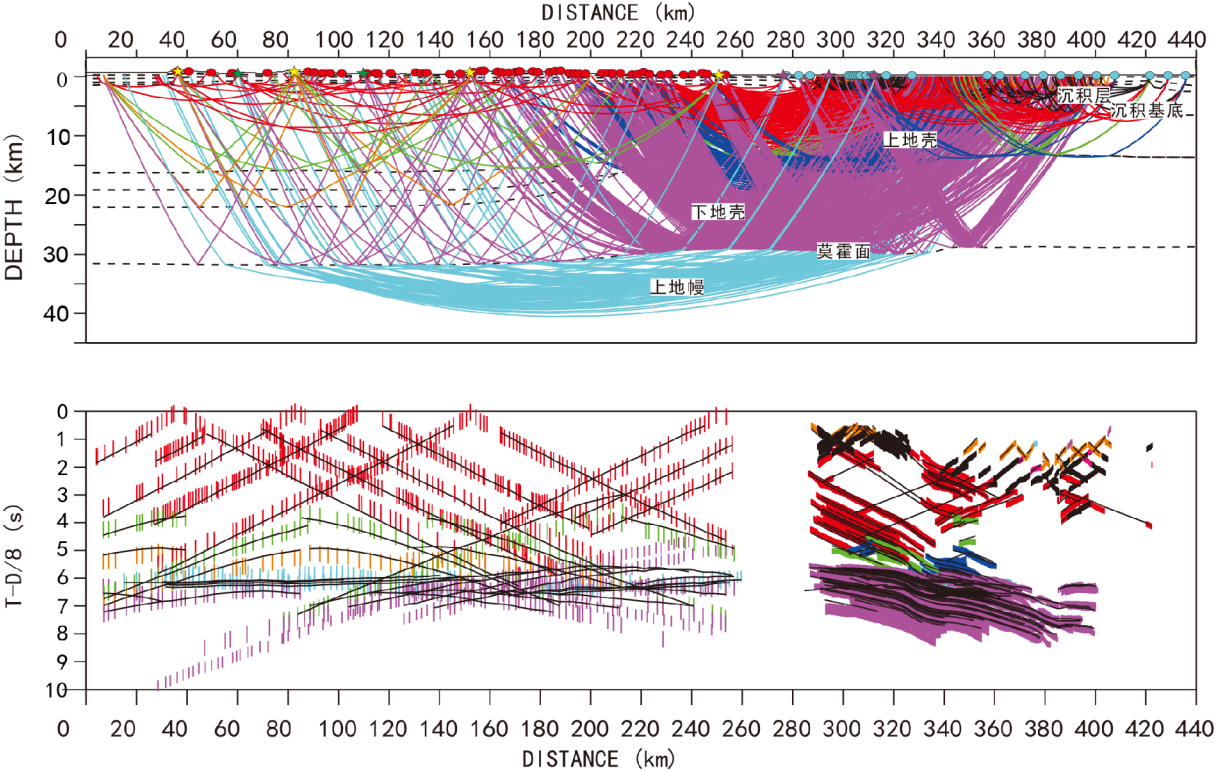


图 5 所有台站的射线追踪(a)与走时模拟(b)
(图中橙色代表 Ps1 震相, 黑色代表 Ps2 震相, 黑紫色代表 P2 震相, 红色代表 Pg1 震相, 浅绿色代表 Pcp 震相, 蓝色代表 Pg2 震相, 紫色代表 Pmp 震相, 橘色代表 Pi 震相, 天蓝色代表 Pn 震相; b 图中黑色实线代表理论走时, 短竖线代表观测走时, 其长短代表拾取走时的不确定性)

Fig.5 Ray tracing(a)and travel time simulation(b)of all stations
(In the two figures, orange represents Ps1 phase, black represents Ps2 phase, black purple represents P2 phase, red represents Pg1 phase, light green represents Pcp phase, blue represents Pg2 phase, purple represents Pmp phase, orange represents Pi phase, and sky blue represents Pn phase; the black solid line in Figure b represents the theoretical travel time, the short vertical line represents the observation travel time, and its length represents the uncertainty in the travel time picking-up.

表 2 震相射线追踪结果
Table 2 Ray tracing for all seismic phases

| 震相 | 追踪点数 | RMS | Picks Uncertainty | χ^2 |
|------|--------|-------|---|----------|
| Ps | 1143 | 0.104 | 0.1 | 0.982 |
| P | 120 | 0.088 | 0.1 | 0.776 |
| Pg1 | 4513 | 0.103 | 0.1/0.2/0.3 | 0.818 |
| Pcp | 588 | 0.140 | 0.1/0.2/0.3 | 0.889 |
| Pg2 | 1810 | 0.090 | 0.1/0.2/0.3 | 0.794 |
| Pmp | 10 283 | 0.126 | 0.1/0.2/0.3 | 1.041 |
| Pi | 70 | 0.222 | 0.3 | 0.554 |
| Pn | 1628 | 0.192 | 0.1/0.2/0.3 | 0.983 |
| 全部震相 | 20 792 | 0.122 | (15 年走航数据均为 0.1, 固定点激发数据为 0.2; 12 年数据由于位置稍有偏差, 设置为 0.3) | 0.909 |

注: 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 1 时, 拟合程度最好

4 讨论及结论

滨海断裂带是闽粤沿海地区的一条重要活动构造,该断裂带对福建东南沿海和台湾海峡区域的地震活动有着明显的控制作用。结合前人研究可以发现滨海断裂带在南海北部边缘呈现为断面倾向南东,断距较大,控制两侧沉积物分布的深大断裂^[4,15]。从剖面中我们可以看到,在台湾海峡南部,滨海断裂带出现在模型 320~340 km 处,据海陆交界线约 60~80 km,与东山海外断裂位置基本一致,宽约 20 km;断裂带内部呈现明显的低速结构,在速度模型中表现为切穿地壳的破碎低速带,与其两侧的地壳结构存在较大的横向差异(图 6)。滨海断裂带两侧速度结构有较大差异,滨海断裂带西侧(0~300 km),上下地壳厚度基本相等,地壳厚度约为 28~31 km(不包括沉积盖层),与华南地块正常的陆壳特征基本一致,在其东侧的台湾海峡区域(350~440 km),地壳厚度迅速减

薄至 22~25 km(不包括沉积层),表现为减薄陆壳的特征;上地壳在断裂带西侧厚度在 12~15 km 左右,到断裂带东侧的台湾海峡新生代凹陷区,迅速减薄至 7~9.5 km,上下地壳厚度比亦由陆域的 1:1 降至 0.8~0.5:1;莫霍面在滨海断裂带处发生较大的突变,其深度由左侧的 30 km 左右抬升至右侧的 28.8 km 左右(图 6)。根据以上速度结构特征,结合重磁资料^[16-17],推测滨海断裂带应该是华南地块正常型陆壳与减薄型陆壳的分界断裂。

模型显示,地壳速度在海陆过渡带整体偏高(图 6),莫霍面和康拉德面有较为明显的抬升,考虑到此区域位于漳州盆地附近,地温梯度值高达 80°C/km 以上,二维电性结构剖面也在此区域显示出低阻特征^[18-19],推测高速异常可能是在太平洋板块与菲律宾板块向欧亚大陆板块俯冲作用下,深部软流圈物质沿着超壳断裂长乐—诏安断裂上侵造成。

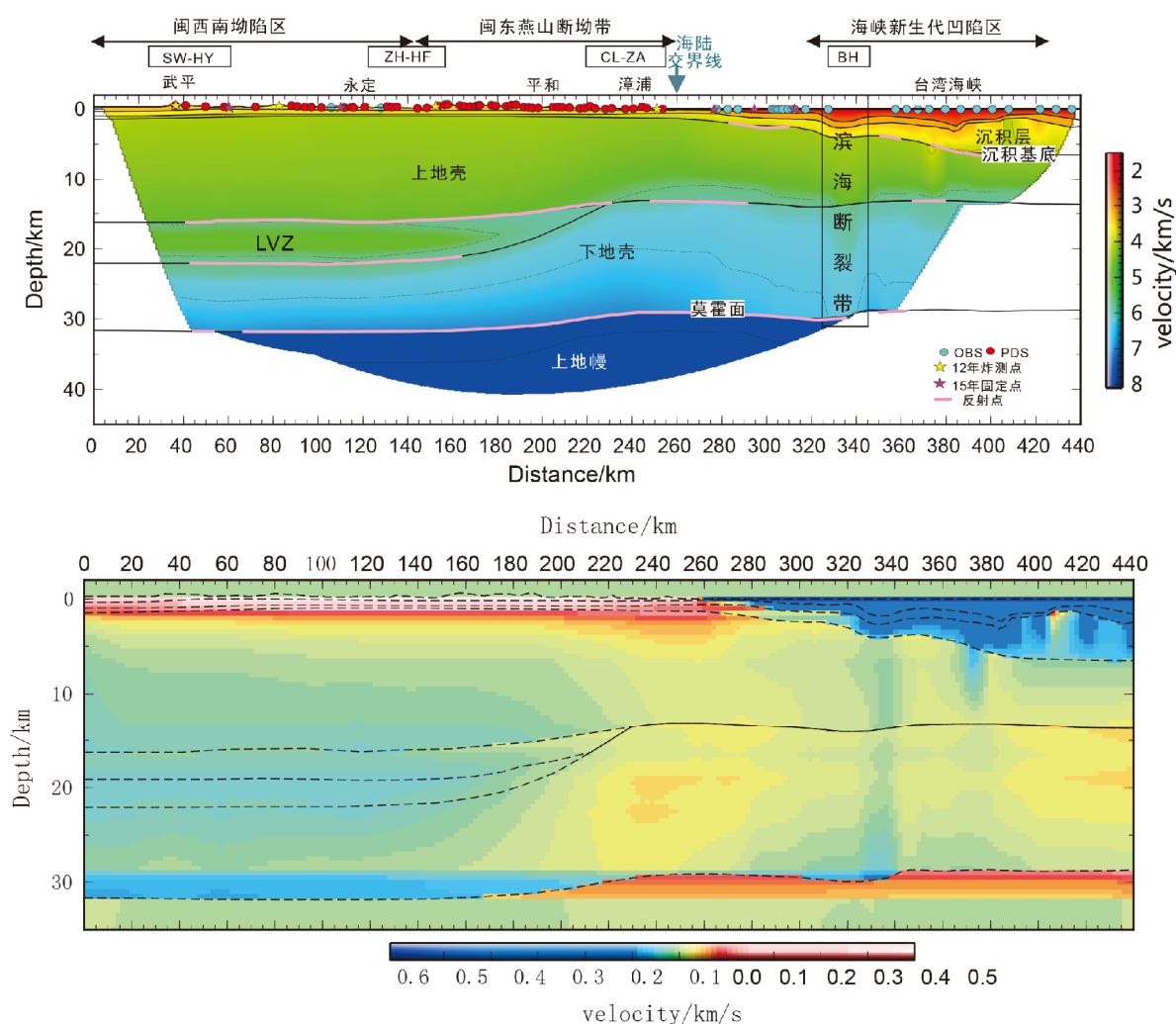


图 6 最终 P 波速度结构模型与速度扰动

Fig.6 P-wave velocity structure model and velocity disturbance

通过对福建—台湾海峡陆海联测测线的数据处理分析, 获得了该区域下方的地壳速度结构, 综合研究区地壳结构对比及构造地质分析, 本文得到以下认识:

(1) 二维速度剖面显示, 滨海断裂带位于离岸 60~80 km 处, 断裂带内的地壳纵波速度和两侧相比明显较低, 沉积层厚度较两侧有明显增大, 与其两侧的地壳结构存在较大的横向差异, 表现为宽约 20 km 的切穿地壳的破碎低速带。

(2) 滨海断裂带两侧速度结构有较大差异: 滨海断裂带陆侧, 地壳厚度约为 31~28 km (不包括沉积盖层), 在其东侧的台湾海峡区域地壳厚度则减薄至 22~25 km (不包括沉积层) 表现为减薄陆壳的特征, 上下地壳厚度比亦由陆域的 1:1 降至 0.5:1; 莫霍面在滨海断裂带处发生较大的突变, 其深度由左侧的 30 km 左右抬升至右侧的 28.8 km 左右。上述特征表明滨海断裂带是华南地块正常型陆壳与海区减薄型陆壳的分界断裂。

(3) 地壳在海陆过渡带呈现整体高速, 康拉德面和莫霍面在此处也有显著抬升, 结合区域地热和电磁特性, 推测其可能是在太平洋板块和菲律宾海板块向亚欧大陆板块的俯冲作用下, 深部软流圈物质沿着长乐—诏安深大断裂上侵形成的软流圈隆起。

致谢: 感谢承担航次工作的“延平 2 号”全体船员及参加出海的各位科学家; 感谢中国科学院南海海洋研究所赵明辉研究员提出的建设性意见。文中部分图件使用了 GMT 绘图软件^[20]。

参考文献:

- [1] 丁祥焕, 王耀东, 叶盛基. 福建东南沿海活动断裂与地震[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1999.
- [2] 黄昭, 王善雄. 台湾海峡滨海断裂带的构造特征与活动性[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(3): 16-22.
- [3] 詹文欢, 孙宗勋, 唐诚等. 华南滨海断裂带及其对台湾海峡地震活动的控制作用[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(4): 19-24.
- [4] 曹敬贺. 南海北部珠江口海域滨海断裂带的地震学特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [5] 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 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[J], 2004, 47(5): 845-852.
- [6] 杨肖琪, 宋文隆, 陈承惠. 台湾海峡地质构造特征[J]. 台湾海峡, 1996, 15(2): 127-135.
- [7] 钟建强. 滨海断裂带之所在及其活动性初探[J]. 华南地震, 1987, 7(4): 1-7.
- [8] 薛佳谋. 南澎大断裂的发育特征及其发震意义[J]. 华南地震, 1986, 6(3): 20-28.
- [9] 卢华复. 关于华夏古陆[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 413-417.
- [10] 赵海玲, 狄永军, 刘振文, 等. 东南沿海地区新生代火山作用和地幔柱[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 781-788.
- [11] 闫培, 张艺峰, 李普春, 等. 台湾海峡深地震探测: HX9 测线实验及初步成果[J]. 中国地震, 2015, 31(1): 27-35.
- [12] 王笋, 谢志招, 张艺峰, 等. 晋江外海沉积层上地壳速度结构的二维层析成像[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 106-110.
- [13] 伊周勋, 赖明惠, 熊绍柏, 等. 华南连县—博罗—港口地带地壳结构及速度分布的爆炸地震探测结果[J]. 地球物理学报, 1999, 42(3): 383-392.
- [14] Zelt C A, Smith R B. Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure [J]. Geophysical Journal International, 1992, 108(1): 16-34.
- [15] 徐辉龙, 叶春明, 丘学林, 等. 南海北部滨海断裂带的深部地球物理探测及其发震构造研究[J]. 华南地震, 2010, 30(S1): 10-18.
- [16] 杨小秋, 施小斌, 许鹤华. 台湾海峡及其邻区现今构造应力场数值模拟[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2307-2318.
- [17] 张季生, 高锐, 李秋生, 等. 台湾海峡及邻区地球物理特征及地壳密度结构[J]. 地质论, 2008, 54(5): 1-6.
- [18] 朱金芳, 方盛明, 张先康, 等. 漳州盆地及其邻区地壳深部结构的探测与研究[J]. 中国地震, 2006, 22(4): 405-417.
- [19] 韩凯. 华南东南部壳幔电性结构特征及其动力学背景研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [20] Wessel P, Smith W H F. New version of the generic mapping tools released. EOS Trans[J]. AGU, 1995, 76(33): 329.