

闫培、张艺峰、李普春等, 2015, 台湾海峡深地震探测: HX9 测线试验及初步成果, 中国地震, 31(1), 27 ~ 35。

台湾海峡深地震探测: HX9 测线 试验及初步成果

闫培 张艺峰 李普春 王笋

福建省地震局厦门地震勘测研究中心, 福建省厦门市盛光路 669 号 361021

摘要 利用海上大容量气枪震源、陆上地震台站(包括流动台站和固定台站)和海底地震仪首次在台湾海峡地区开展了深地震探测试验。试验结果表明,“延平 2 号”科考船气枪阵列信号最远传播距离达 280km, 成功获得了数万道高质量的地震数据, 并且识别了不同类型的 P 波震相。HX9 剖面一维地壳结构模型表明, 由 2 个速度间断面产生的 Pc 及 PmP 两组反射波和基底折射波(Pg)所反映的地壳结构构成了该区基本的地壳结构特征, 康拉德界面和莫霍界面的深度分别为 16.0 ~ 17.5、28.0 ~ 29.5km。

关键词: 台湾海峡 深地震探测 气枪震源 地壳结构

[文章编号] 1001-4683(2015)01-0027-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

福建省地处东南沿海地区最活跃的地震带上, 受菲律宾海板块与欧亚板块挤压碰撞带的强烈影响, 遭受的地震影响主要来自台湾海峡西侧多次发生过 7.0 级以上大震的滨海断裂带(朱金芳等, 2008; 龚云, 2012; 丁祥焕等, 1999)。滨海断裂带为沿海隆起区与大陆架盆地间的边界断裂, 断裂规模巨大, 沿着 NE 向重力正、负异常的交替部位延伸, 具有强震发生的构造背景(黄昭等, 2006; 詹文欢等, 2004)(图 1)。探明福建邻近海域地壳上地幔结构和主要断裂的深部构造信息, 绘制跨越台湾海峡闽台地区的三维地壳结构图, 不仅为防震减灾工作、重大工程建设和福建区域经济综合规划等提供了重要的基础资料, 对进一步提升闽台地区地震构造活动的认识水平、强化地震灾害的有效预防以及有效控制地震灾害的风险也具有重要意义。

应用人工地震探测方法研究深部构造环境, 是探索台湾海峡和邻近地区地震活动等地球动力学过程的必然途径。由于海洋的特殊性, 迄今为止台湾海峡的主动源深部地震探测仍处于空白状态。目前海洋深部结构探测常用气枪震源结合海底地震仪的方式进行, 我国已具有成熟的设备和技术支持(阮爱国等, 2009; 罗桂纯等, 2006)。近年来, 在南海和渤海海域开展的宽角地震探测计划, 皆采用气枪震源的方式, 获得了许多高分辨率的地震数据

[收稿日期] 2014-08-11; [修定日期] 2014-10-30

[项目类别] 福建省地震局青年科技基金(Y201407)资助

[作者简介] 闫培, 男, 1984 年生, 工程师, 主要从事地震探测及地震安全性评价工作。E-mail: yanpeisea@126.com

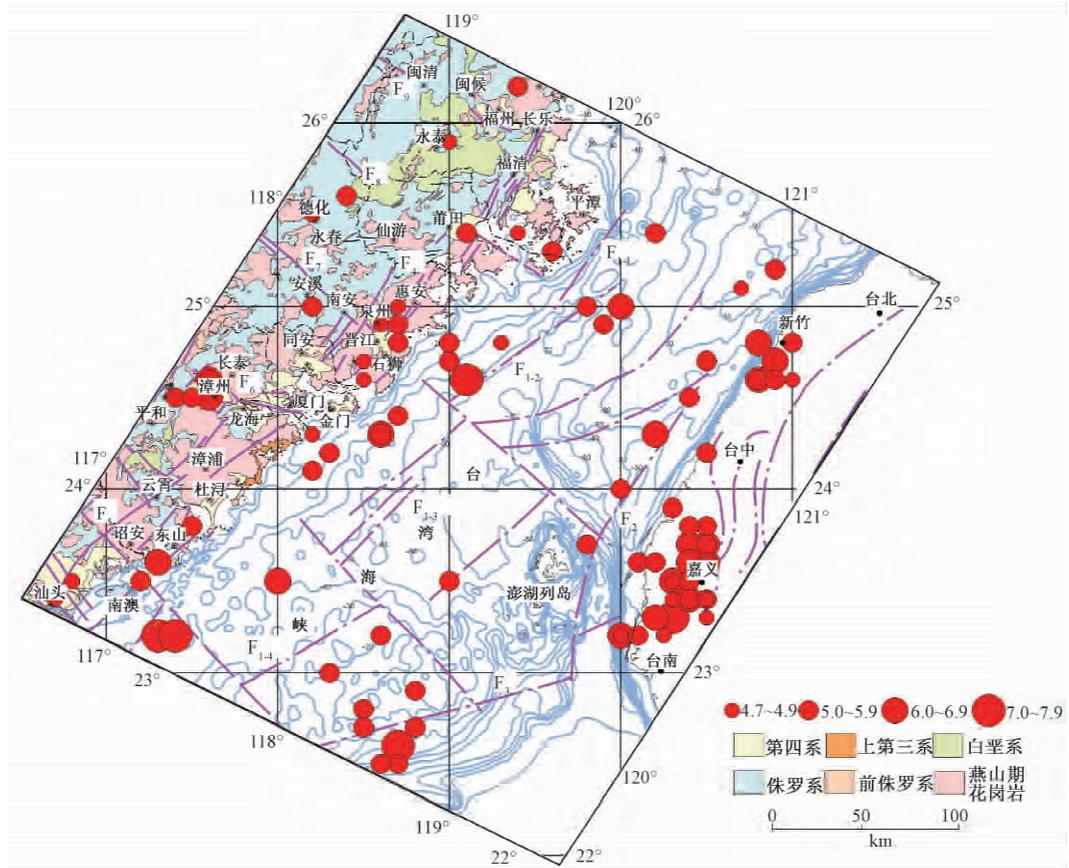


图1 福建沿海及台湾海峡地震构造图

F_1 滨海断裂带 (F_{1-1} 平潭海外断裂; F_{1-2} 泉州海外断裂; F_{1-3} 金门海外断裂; F_{1-4} 东山海外断裂); F_2 台湾海峡东侧断裂; F_3 义竹断裂; F_4 长乐-诏安断裂带; F_5 黄冈河断裂带; F_6 九龙江下游断裂带; F_7 永安-晋江下游断裂带; F_8 沙县-南日岛断裂带; F_9 闽江断裂带

(赵明辉等, 2004; 阮爱国等, 2011; 吴振利等, 2012; 支鹏遥等, 2012; 潘军, 2012)。在台湾海峡西部进行人工地震探测, 可调查滨海断裂带的深部地壳结构和震源的介质状态, 研究断裂深部的构造变形、地球动力学等过程, 判断发震的构造部位和危险程度, 为潜在震源区的划分以及中长期地震活动预测工作提供科学依据。

2013年8~9月, 福建省地震局通过对“延平2号”科考船加装气枪震源系统, 首次在台湾海峡海域开展了深地震探测试验(测线编号为HX9)。本次试验采用大容量气枪阵列作为震源, 海陆均布地震仪双向接收的联合观测系统(图2)。本文详细介绍了此次探测试验的工作流程、震相的识别和分析以及一维地壳结构模型等成果, 为台湾海峡地壳深部结构研究提供了最新的资料。

1 HX9 测线探测试验

野外试验作业包括气枪震源激发、陆地地震仪布设和回收等、海底地震仪布设和回收,

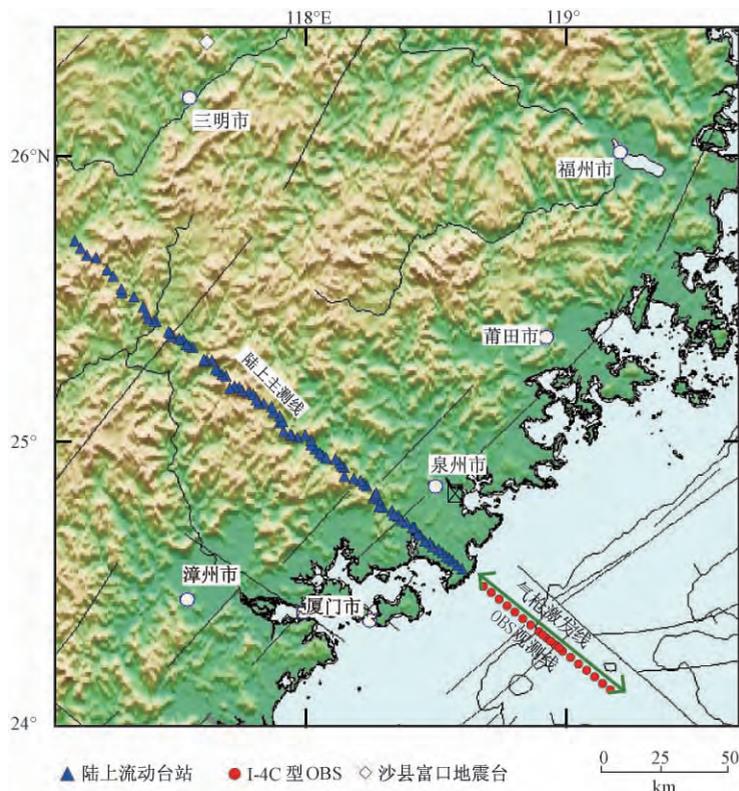


图2 台湾海峡深地震探测测线(HX9)布置图

起始时间 2013 年 8 月 21 日,同年 9 月 3 日结束。气枪震源激发作业的同时,福建省地震台网的 85 个测震台也实时接收海上气枪信号。

1.1 测线布设

1.1.1 气枪震源激发线

由于测线近岸海域过往船只众多、渔网密布,严重威胁到气枪震源激发作业的安全,因此,本次 HX9 试验性探测以 20m 等深线位置作为气枪震源激发线端点,测线另一端点位置尽量往台湾海峡中线方向延伸以获取更大的资料范围。沿气枪激发线以 200m 等间距激发,并进行往、返 2 次激发作业。

1.1.2 海上流动观测线

试验中共投放了 20 台中科院自主研发的 I-4C 型海底地震仪(OBS),并全部成功回收。综合考虑对深部结构的覆盖宽度,HX9 测线海域 OBS 的布设点距为 4km,在跨越滨海断裂金门海外段附近增加 3 个 OBS 点加密,间距 2km,OBS 观测线总长 64km。

1.1.3 陆上流动观测线

为弥补海域炮检距短的不足,在福建陆上布设流动地震台站以尽量拓展炮检距。根据国内外大容量气枪震源最远可探测距离为 200km 左右的研究结果(赵明辉等,2008),本次陆上流动地震仪观测主测线位于 OBS 向陆域的延伸线上,沿晋江-同安-安溪-漳平-永安一线布设,总长 198km。其中:0~100km 内布设 13 套英国 GURALP 型地震仪,点距 10km;0~

158km 内(晋江-同安-安溪-漳平) 布设 80 套中国地震局地球物理勘探中心生产的 PDS-2 型地震仪, 点距 2km; > 158 ~ 198km 内(漳平-永安) 布设 10 套 PDS-2 地震仪, 点距 4km。

1.2 激发参数和接收参数

1.2.1 激发参数

气枪震源由 4 支 Bolt1500LL 型枪组成 6m × 8m 枪阵(前后枪首距离 6m, 枪阵间距 8m), 总容量 8000 inch³, 沉放深度 10 m, 工作压力 2000 磅/平方英寸。试验前利用室内软件模拟气枪子波和各向均匀特性表明: 主脉冲峰-峰值为 62.0Bar·m, 气泡比为 4.5, 振幅频谱中最大振幅频率为 19.8 Hz; 该枪阵组合可输出效果良好的低频高峰的波形, 具有更加趋于球形的方向性。

1.2.2 接收参数

探测试验陆域流动观测采用了 PDS-2 型、Guralp 40-TD 型数字地震仪; 海域流动观测采用 I4-C 型海底地震仪。这 3 种仪器主要采集接收参数见表 1。

表 1 地震仪采集接收参数

地震仪 型号	记录道数	动态范围 /dB	采样率 /Hz	频带	检波器 类型	自振周期 /s	电压灵敏度 /(V·s/m)
PDS-2	3		200	30s/80 Hz	三分量速度型	2.5	120
Guralp40-TD	3	145	200	10s/100 Hz	三分量速度型		2000
I4-C	4	120	250	60s/50Hz	三分量速度型; 压力传感器	2	2000

2 震相分析

2.1 传播距离

通过对地震数据处理分析发现, 无论是布设的流动台还是固定台网, 均能接收到清晰的气枪震源信号, 且地震记录清晰, 震相丰富。从共接收点炮集记录上可清晰识别到 P 波、S 波震相, 气枪激发信号最远传播距离可达 280km(图 3)。

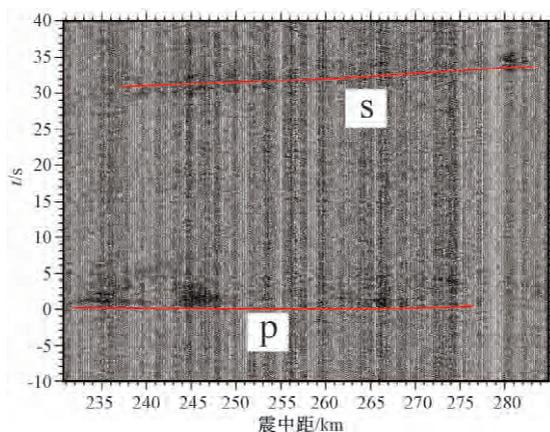


图 3 陆上固定台(沙县富口台)记录
折合速度 6.00km/s

2.2 震相识别与分析

根据波组的对比原则,即:①同相轴明显,②相邻观测点的波组形状有较好的重复性,③符合互换原则,④视速度的合理性,⑤走时曲线有一定的长度且符合理论走时曲线(任隽, 2012),综合考虑不同属性波组的动力学与运动学的不同特征和由于反映不同地段因构造上的差异致使波组变化等因素,利用 Geogiga Seismic 软件系统所显示的记录截面(折合速度 6.00km/s)对 P 波震相进行识别对比。在对流动台资料的处理中,滤波参数范围选择 3~10Hz,识别对比的 P 波主要震相有:Pg、Pc、PmP、Pn(图 4、5、6, NW 方向为福建大陆方向)。由于观测系统的问题,即气枪和 OBS 无法通过台湾海峡中线, OBS 最远仅能记录到 70km 处的信息;同时,测线所在的海域水深平均仅为 40m,存在严重的水底多次波干扰(在 OBS 记录上可以看到规则的干扰记录),因此可以在 OBS 共接收点记录截面图上识别到的 P 波震相仅有 Pg。

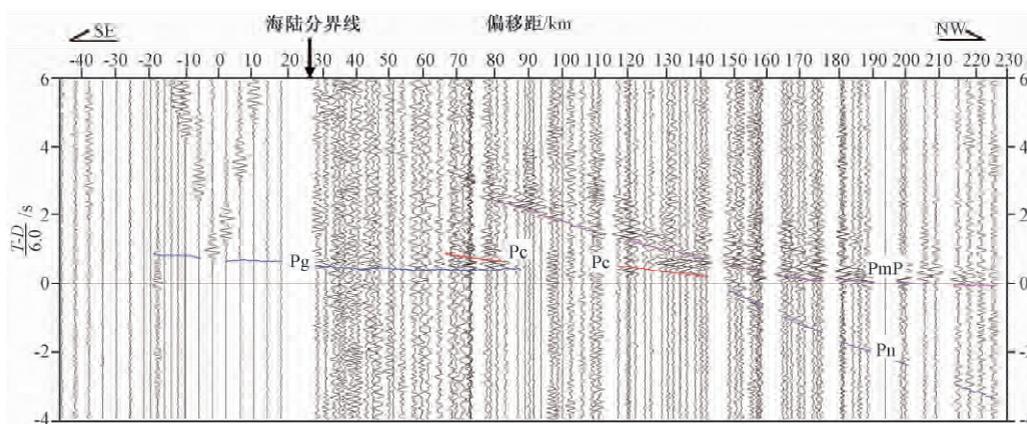


图 4 S1127 共炮点记录截面图

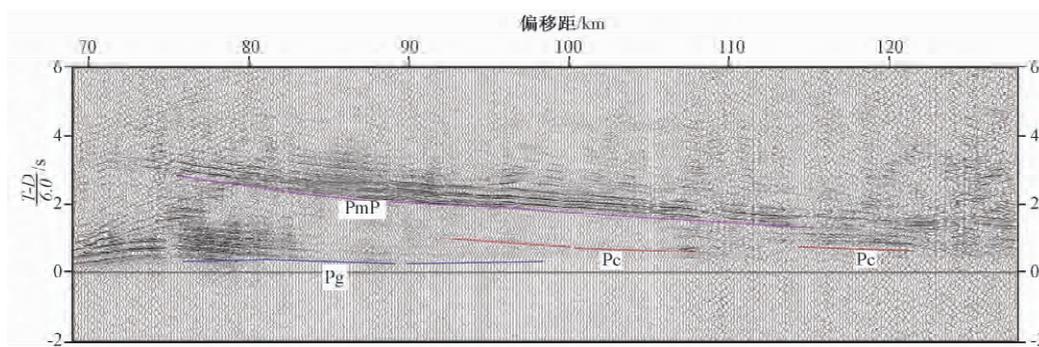


图 5 陆上流动台 9033 共接收点记录截面图

各波组震相命名的含义及其特征如下:

(1) Pg 波为底折射波,该波是来自基底顶部的折射波,具有清晰可靠、可连续对比追踪的特点,最远可识别至距炮点 105km 处。在记录截面图上, OBS 记录到的 Pg 波到时相对于陆地台站的记录存在一定的滞后,这一差异反映了本区基底的起伏变化情况,同时也表明基

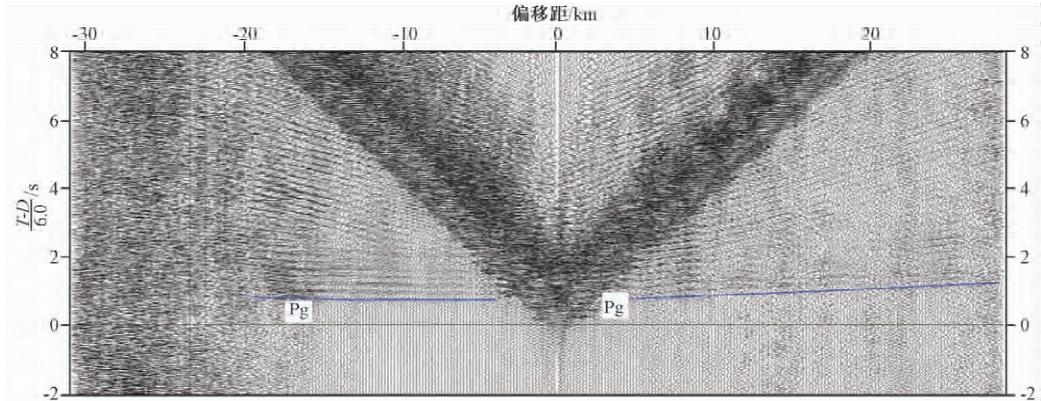


图6 OBS7 共接收点记录截面图

底埋藏深度在本区不同地质构造单元内存在差异。

(2) Pc 波为上地壳底界的反射波,其振幅变化较大,它是紧随 Pg 之后的一组较为明显的反射波组,出现在续至区。该波组在各炮记录截面图上显示出连续性较差、能量较弱的特点,有时在局部地段显示出较强的振幅,其追踪区间在距炮点 50 ~ 150km。利用 T^2-X^2 法求取的平均速度为 6.02 ~ 6.14km/s。

(3) PmP 波是来自莫霍界面的反射波震相,该波为本区优势波,波组连续,振幅能量强,该波组在距炮点 60km 处前后即可追踪,可以识别到距炮点 205km 处。从各炮记录截面图上来看,该波震相距炮点 180km 处向远端延伸显示了较低视速度,这是研究区 PmP 波组的一个重要特征,体现了研究区下地壳速度值相对较低的结构特征。利用 T^2-X^2 法求取的平均速度为 6.22 ~ 6.36km/s。

(4) Pn 波是上地幔顶部的折射波。由于受地震波激发能量制约以及观测干扰背景的影响,该震相约在 145km 炮检距后成为初至波,可追踪至距炮点 225km 处,由其走时曲线所得到的视速度为 7.98 ~ 8.05km/s。

3 一维地壳结构模型

通过以上识别对比出的来自地壳深部不同属性的地震波组震相的走时、振幅等,对 Pg 波资料利用“WH 反演方法”处理计算得到了本区内的基底结构特征和有关速度结构参数;利用本测线各炮的反射波走时资料由 T^2-X^2 法、PLUCH 反演方法求取了地壳深部各层的平均速度、平均深度、单点反射深度等(图 7、8)。根据以上处理计算得到的地壳结构相关参数,建立起一维地壳结构的初始模型,并对设计的初始地壳结构模型采用如下的方法进行计算:

假定波在水平方向上传播速度的变化比垂直方向上的要小得多,则可认为速度是深度的函数 $v(Z)$, 并且速度随深度呈线性变化

$$v = v_0 + KZ = v_0(1 + \beta Z) \quad (1)$$

式中, v_0 为层速度; Z 为深度; K 、 β 为线性参数。

根据上述假定及式(1),可以得到速度随深度线性变化情况下的射线方程式

$$x = \int_0^Z \frac{Pv_0(1 + \beta Z) dZ}{\sqrt{1 - [Pv_0(1 + \beta Z)]^2}} = \frac{1}{P\beta v_0} \left\{ \sqrt{1 - (Pv_0)^2} - \sqrt{1 - [(Pv_0(1 + \beta Z))]^2} \right\} \quad (2)$$

$$t = \int_0^Z \frac{dZ}{v_0(1 + \beta Z) \sqrt{1 - [Pv_0(1 + \beta Z)]^2}} = \frac{1}{\beta v_0} \ln \frac{(1 + \beta Z) [1 + \sqrt{1 - (Pv_0)^2}]}{1 + \sqrt{1 - [Pv_0(1 + \beta Z)]^2}} \quad (3)$$

式中, x 为偏移距 (km); t 为走时时间 (s)。

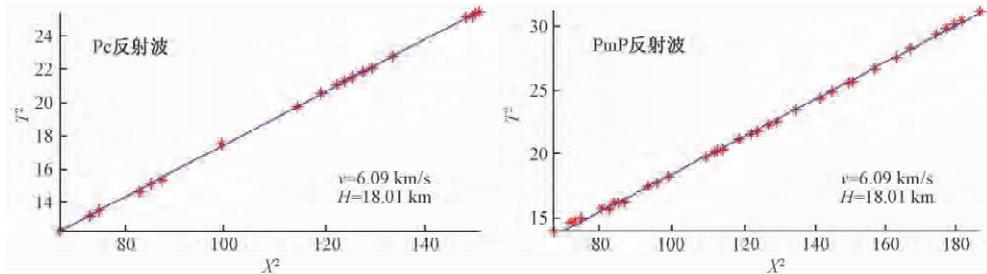


图 7 S1090 炮反射波平均速度、深度图 (T^2-X^2 方法)

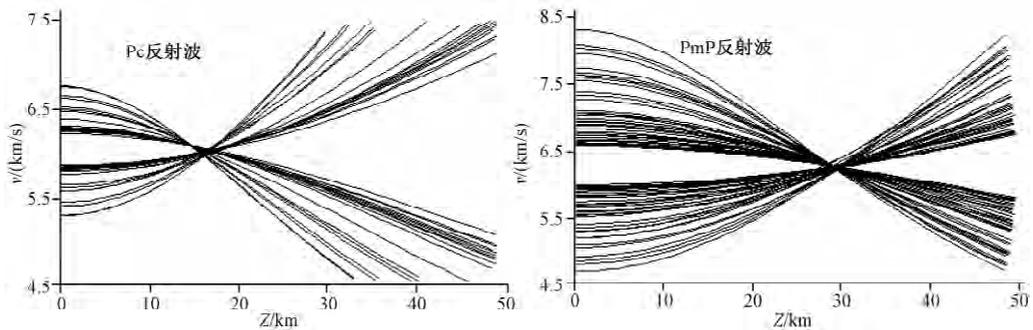


图 8 S1090 炮反射波 $v-Z$ 曲线图 (PLUCH 方法)

利用上述方法的计算程序对建立的初始模型与实测走时数据进行正演拟合, 试错法反复修改地壳速度结构模型, 以实现理论与实测资料的最佳拟合, 最终得到相应的一维地壳速度结构模型 (图 9)。

图 9 结果显示, 该区地壳结构呈明显分层, 由两个速度间断面产生的 Pc 及 PmP 两组反射波和基底折射波 Pg 所反映的地壳结构构成了该区基本的地壳结构特征, 在地壳表层 0.0 ~ 2.0 km 范围内是一个速度随深度增加而增大的强梯度层, HX9 剖面的康拉德界面和莫霍界面的深度分别为 16.0 ~ 17.5、28.0 ~ 29.5 km。这 2 层界面所反映的趋势基本一致, 从东部沿海地区向西部延伸逐渐加深, 说明福建地区地壳厚度从内陆到台湾海峡逐渐变薄, 这与该区域由人工地震测深 (廖其林等, 1988)、接收函数反演 (袁丽文等, 2009; 黄晖等, 2010) 等所得结果是一致的。

从沿剖面各炮反映的结果来看, 不同地段各地震波组具有强弱不连续变化的特征, 不同的速度结构以及地壳界面的起伏等现象较好地反映出地壳结构具有一定差异, 这为进一步

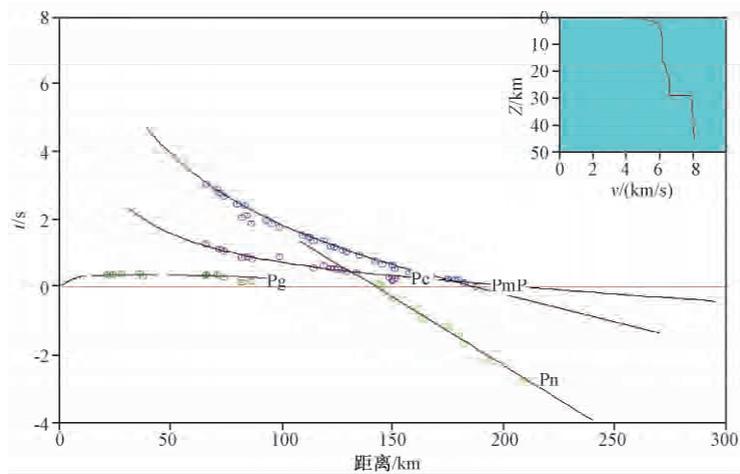


图9 一维走时拟合图
右上侧为对应的速度模型

设计二维地壳速度结构模型提供了必要的参数。

4 结论

2013年在台湾海峡开展的深地震探测试验是我国首次在此地区进行的海陆地震联测试验,通过采用大容量气枪震源激发,布设的流动台站和固定地震台网成功地记录到了数万道的广角反射/折射地震数据,此次试验为继续开展台湾海峡海陆联测打下了坚实基础。

根据不同的地震波组的运动学与动力学特征,统一对波组性质进行了判别与认识,识别了不同类型的P波震相,提取的地震波信息反映了地壳的结构特点。这些资料填补了台湾海峡地区地壳深部数据的空白,对区内结晶基底、壳内界面、莫霍界面构造以及地壳上地幔速度结构、滨海断裂带深部展布和构造属性等研究具有重要意义。

通过初步构建的一维地壳速度结构模型可见,2个速度间断面产生的 P_c 、 P_{mP} 波组和基底 P_g 波所反映的地壳结构构成了该区基本的地壳结构特征,随后通过获得本剖面的结晶基底、壳内结构及莫霍面构造形态等,为后续建立台湾海峡地区速度模型和确定台湾海峡地区的精细地壳结构做好了准备。研究结果可以为深入认识和理解该地区地壳深部结构与构造特点、介质的动力学环境以及对未来地震危险性做出有效的评价等提供重要的基础资料。

致谢:中国地震局地球物理勘探中心张先康研究员对一维地壳结构模型的构建给予了指导,在此特表谢意。

参考文献

- 丁祥焕、王耀东、叶盛基等,1999,福建东南沿海活动断裂与地震,福州:福建科学技术出版社。
 龚云,2012,福建东南沿海地区三维形变场监测及动力学机制研究,博士论文,西安:长安大学。
 黄晖、米宁、徐鸣洁等,2010,福建地区地壳上地幔S波速度结构与泊松比,高校地质学报,16(4),465~474。
 黄昭、王善雄,2006,台湾海峡滨海断裂带的构造特征与活动性,大地测量与地球动力学,26(3),16~22。

- 廖其林、王振明、王屏路等,1988,福州-泉州-汕头地区地壳的爆炸地震研究,地球物理学报,**31**(3),270~280。
- 罗桂纯、王宝善、葛洪魁等,2006,气枪震源在地球深部结构探测中的应用研究进展,地球物理学进展,**21**(2),400~407。
- 潘军,2012,渤海 OBS-2011 深地震探测及深部构造成像研究,博士论文,青岛:中国海洋大学。
- 任隽,2012,渭河盆地深部地壳结构探测与盆地构造研究,博士论文,西安:长安大学。
- 阮爱国、牛雄伟、丘学林等,2011,穿越南沙礼乐滩的海底地震仪广角地震试验,地球物理学报,**54**(12),3139~3149。
- 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。
- 吴振利、阮爱国、李家彪等,2012,南海西南次海盆广角地震探测,热带海洋学报,**31**(3),35~39。
- 袁丽文、郑斯华,2009,用远震接收函数反演福建地区宽频带台站下方莫霍界面深度,华南地震,**29**(3),85~97。
- 詹文欢、孙宗勋、唐诚等,2004,华南滨海断裂带及其对台湾海峡地震活动的控制作用,热带海洋学报,**23**(4),19~24。
- 赵明辉、丘学林、夏少红等,2008,大容量气枪震源及其波形特征,地球物理学报,**51**(2),558~565。
- 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。
- 支鹏遥、刘保华、华清峰等,2012,渤海海底地震仪探测试验及初步成果,地球科学进展,**27**(7),769~777。
- 朱金芳、谢志招、曲国胜等,2008,闽南地区城市活动构造与地震,北京:科学出版社。

Deep seismic exploration in the Taiwan Strait: the experiment of HX9 survey line and preliminary results

Yan Pei Zhang Yifeng Li Puchun Wang Sun

Research Center of Earthquake Reconnaissance of Xiamen, Earthquake Administration of Fujian Province, Xiamen 361021, Fujian, China

Abstract By using marine large volume air-gun seismic source and land seismic stations (including mobile stations and permanent stations) and Ocean Bottom Seismometers, a deep seismic exploration experiment was carried out for the first time in the Taiwan Strait. Experiment result showed the seismic stations could receive the seismic signals from the air-gun arrays of the “YANPING 2” science investigation ship as far as 280km away. Tens of thousands of high quality seismic data were obtained successfully and different types of P-wave seismic phases were identified. A one dimensional crustal structure model about HX9 section shows that the crustal structure which is reflected by Pc and PmP reflection wave from two velocity discontinuity surfaces and basement refraction wave (Pg) constitutes the basic characteristic of the crustal structure in this region. The depth of Conrad discontinuity and Moho discontinuity is respectively 16.0 ~ 17.5km and 28.0 ~ 29.5km.

Key words: Taiwan Strait Deep seismic exploration Air-gun seismic source
Crustal structure