

南海北部海陆过渡带地壳平均速度及莫霍面深度分析

夏少红, 丘学林, 赵明辉, 徐辉龙, 施小斌

(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)

摘要: 南海北部海陆过渡带是一条深地震探测的空白带, 其地壳结构研究不仅可以揭示华南沿海地区地震活动规律和构造活动特征, 而且可以以以往在海上和陆上使用深地震探测所获得的地壳结构模型进行有效的衔接。鉴于南海北部海陆过渡带地壳结构的重要性, 2004年我们在香港外海域进行了一次海陆地震联测实验。本文以此次实验中广东和香港地区固定地震台网以及担杆岛流动台所获得的数据为基础, 对各台站接收到的Pg和PmP震相进行了近似横向均一的二维结构模拟, 获得了各台站对应的地壳平均速度和PmP反射点处的莫霍面深度值。其结果显示研究区地壳平均速度普遍为 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 比全球地壳平均速度 $6.45\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 要低, 这可能与普遍发育于华南沿海地带的中地壳低速层有关。研究区东边的SHW台所获得的地壳平均速度为 $6.7\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 要明显高于全球地壳平均速度, 它可能是由于局部异常结构所造成的, 其与地幔岩浆的侵入作用可能存在一定联系。研究区莫霍面深度在26—35km左右, 变化趋势较为明显, 从北西向南东方向逐渐变浅, 属于地壳减薄型结构, 推测其可能与南海北部边缘的形成演化有密切联系。研究表明南海北部海陆过渡带是一个明显的转换地带, 它的深部地壳结构特征应该与南海的扩张演化有密切联系, 这些认识推进了华南地区和南海北部陆缘地壳结构和构造属性的深入研究。

关键词: 南海北部海陆过渡带; 地壳平均速度; 海陆地震联测; 莫霍面

中图分类号: P738 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)04-0063-08

Analysis of crustal average velocity and Moho depth beneath the onshore-offshore transitional zone in the northern South China Sea

XIA Shao-hong, QIU Xue-lin, ZHAO Ming-hui, XU Hui-long, SHI Xiao-bin

(Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China)

Abstract: In order to study the crustal structure beneath the onshore-offshore transitional zone in the northern South China Sea, we carried out an onshore-offshore seismic experiment offshore of Hong Kong in 2004. Based on the data recorded by the permanent seismic stations in Guangdong Province and Hong Kong and by portable seismic stations on the Dangan Islands, we obtained a series of laterally homogeneous 2-D models using Pg and PmP phases for every station, determined the crustal average velocity, and constrained variations of Moho depth. The results show that the crustal average velocity is generally about $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, which is lower than the global crustal average velocity of $6.45\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. It suggests that a low velocity layer in the middle crust has developed beneath onshore-offshore transitional zone in the northern South China Sea. However, the average crustal velocity of $6.7\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ in the eastern part of the study area was higher than the global average velocity ($6.45\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$) according to the data at the SHW station, which could imply magma underplating and a high velocity layer in the lower crust. The Moho depth was about 26–35km and gradually thinned from northwest to southeast. These results indicate the onshore-offshore transitional zone is the transitional boundary between the northern South China Sea and South China. By modeling and analyzing these data, we have obtained some new knowledge: a low velocity layer of middle crust was generally

收稿日期: 2009-05-08; 修订日期: 2009-08-13。卢冰编辑

基金项目: 中国科学院海洋地质与环境重点实验室基金(MGE2009KG09); 国家自然科学基金(U0933006); 科技部“973”项目(2007CB411701); 中国科学院边缘海地质重点实验室基金(MSGL0704)

作者简介: 夏少红(1981—), 男, 湖北省监利县人, 博士, 现为中国科学院南海海洋研究所助理研究员, 主要从事海洋地球物理与层析成像结构研究。E-mail: shxia@scsio.ac.cn; shxia1982@yahoo.com; Tel.: 020-89023155

detected and no high velocity body of lower crust was found on land, while the opposite occurred at sea, namely high velocity body of lower crust was detected and no low velocity layer of middle crust was found; and the thickness of crust thinned from land to sea. These results have improved our understanding on crustal structure and tectonics of South China and the northern South China Sea.

Key words: onshore-offshore transitional zone; northern South China Sea; crustal average velocity; onshore-offshore seismic experiment; Moho

南海北部边缘是南海惟一的拉张边缘,与南海扩张形成有相同的力学背景,其中记录了许多南海扩张和演化历史的重要信息。南海北部边缘的地壳结构、物质组成和构造属性是探讨南海形成演化的关键问题,是国内外地球科学家关注的热点。目前在南海北部海域已进行过多次气枪震源的深地震探测(图 1a),如 1985 年中美合作的双船地震探测^[1-2],以及后来中外合作开展的多次海底地震仪探测^[3-6]。在相邻的华南大陆也进行了数次炸药震源的深地震探测实验^[7-9](图 1a)。这些探测获得了大量数据质量好、深部信息多的地震资料,经分析处理和计算模拟获得了许多新的认识,如陆上剖面普遍发现有中地壳低速层,下地壳没有高速体,而海上剖面没有见到中地壳低速层,许多地方发现有下地壳高速体,并且地壳厚度由陆向海有逐渐减薄的趋势,这些认识推进了华南地区和南海北部陆缘地壳结构和构造属性的深入研究^[10-13]。

由于已往的深地震探测大都是海上和陆上分开进行的,因而使得南海北部海陆过渡带成为一条深地震探测的空白带^[14]。该过渡带的构造位置却十分重要,这里是华南地块正常陆壳和南海北部陆缘减薄陆壳的衔接带,也是南海北部陆缘地震带分布的区域,历史上曾多次发生 7 级以上大地震^[15]。著名的华南滨海断裂带在这里大致沿 30 米等深线分布^[16-18],它把华南沿海和南海北部陆架两个构造走向和特征截然不同的地质单元分隔开来,并控制了南海北部陆缘地震带的强震活动^[19]。因此,研究南海北部海陆过渡带的地壳结构不仅可以揭示华南沿海地区地震活动规律和构造活动特征,为本地区的防震减灾和区域稳定性评价提供服务 and 指导,而且可以将以往在海上和陆上使用深地震探测所获得的地壳结构模型进行有效的衔接,这非常有利于海陆对比研究以及南海北部边缘构造动力学成因的研究。本文以 2004 年在香港外海域进行的一次海陆联测的深地震探测实验为基础,通过分析处理担杆岛上的流动地震台站以及广东省和香港地区的固定地震台网所记录的震相数据,通过不同台站近似横向

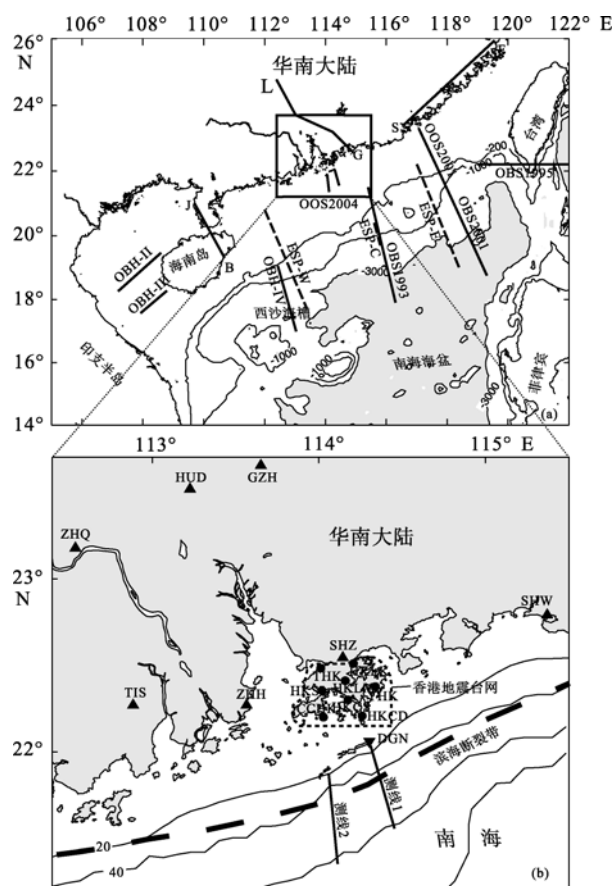


图 1 南海北部大陆边缘深地震测线位置图

(a)南海北部及华南大陆深地震测线位置,图中 OBS、OBH 分别表示不同的海底地震仪测线,OOS 表示海陆地震联测测线,ESP 表示双船剖面主测线;(b)2004 年海陆地震联测测线及接收到气枪信号的地震台站位置图,图中三角形代表广东地区地震台网,圆圈表示香港地区地震台网,倒三角表示担杆岛流动台站

Fig. 1 Location map of deep seismic survey lines in the northern continental margin of the South China Sea

均一的二维结构模拟结果,分析了南海北部海陆过渡带的地壳平均速度和莫霍面深度变化情况,同时为下一步进行三维地震层析成像结构研究打下了坚实基础。

2 南海北部海陆地震联测实验

2.1 野外数据采集

2004 年 7 月,我们在南海北部进行了一次海陆地震联测的实验,其工作海区是香港外海域的担杆列岛附近,气枪震源采用的是从美国 BOLT 公司新

进口的4支1500LL型长寿命气枪枪阵,单枪气室容量达1500立方英寸,枪阵总容量为6000立方英寸,工作压力达2000psi。此次海陆联测实验布置了两条近平行的测线(测线1和测线2),测线均为近NNW—SSE方向(图1b),每条测线长约50km。在担杆列岛上布置了一个流动台站,并利用香港天文台和广东省地震局的24台固定地震台站分别进行了海上气枪信号的记录,其中图1b显示的16个台站为接收到有效气枪信号的台站,其他8个台站没有接收到气枪信号。同时,在船上架设了2台地震仪进行近场信号监测。气枪放炮间隔40—120s,船速3.7—4.3节,两条测线共进行了657次激发。使用差分全球定位系统(DGPS)准确测量了每次放炮的炮点坐标,Hypack导航系统记录了原始导航数据^[14,20]。

2.2 数据处理

按照海陆联测地震数据的处理流程^[20-21]对各台站记录的地震数据进行了处理,将它们分别转化成了标准的SAC格式,把原始导航数据整理成了UKOOA标准格式文件,然后通过读取UKOOA文件中的炮点数据截取SAC格式文件中的有效信号段,使之转化为国际通用的SEG Y格式,这样我们使用地震软件包SU^[22]对SEG Y格式文件进行了分析,发现地震波能量主要分布在3—10Hz的范围,最后通过滤波、均衡等处理后就得到了各台站的单台地震记录剖面图(图2—3)。数据处理的结果显示,担杆台(DGN)记录到很强的气枪信号,香港台网的8个地震台站记录到清晰的地震信号,广东台网距离较近的7个台站也记录到地震信号,其中肇庆台(ZHQ)记录到最远距离255km的气枪信号,这组信号振幅较强且连续稳定,可在230—255km范围内连续追踪,花都台(HUD)和广州台(GZH)也记录到200多公里的气枪信号。此次海陆地震联测实验的有效信号范围覆盖了香港、珠江口和珠江三角洲地区,为建立该地区的二维或三维地壳结构模型提供了重要的数据基础。

2.3 震相特征

利用地震记录剖面对来自不同深度、不同属性的地震波组进行了识别对比,根据它们的运动学与动力学特征识别出的主要震相是Pg和PmP。我们主要选取了担杆岛流动台站(DGN)、香港地区的CCHK台、THK台和YHK台(图2)以及广东省地震台网的ZHQ台、SHW台和ZHH台为例(图3),分析了不同震相的记录特征。其中,Pg波为地壳内部的折射波,该波是近距离观测记录到的初至波,它

在担杆台(DGN)和香港地区的大部分台站所记录的剖面上均有明显的震相显示,且可追踪至90km以远,反映了该组震相能量强、可连续追踪的特点。而且在各台站的记录剖面上Pg震相的折合走时曲线形状相似,图4显示了各台站接收到的测线1剖面的Pg震相,从中可以发现在炮号47—50处Pg震相的走时在各台站上均有一个较为明显的拐点,存在Pg折合到时滞后跳跃的现象(图4),跳跃前Pg波的视速度为 $6.0\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,跳跃后其视速度变为 $5.5\text{—}5.7\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,这反映了往海区方向沉积层可能突然变厚,引起基底埋深的变化,从而引起Pg波震相到时明显的滞后,根据Pg的这些特点,可以确定该地区沉积层厚度分布的大致情况。担杆岛流动台站(DGN)记录的Pg震相振幅强且连续追踪,测线2剖面能追踪至80km左右,但在70km左右震幅逐渐衰减(图2a)。香港CCHK台的测线1剖面上记录的Pg震相能够追踪至80多公里,且震相清晰连续(图2b)。在香港地区THK台的测线1剖面上Pg可以连续追踪至85km左右,但在偏移距60—65km之间的Pg震相较弱(图2c),其可能与地下的异常结构有关。在香港YHK台测线2的剖面上记录到的Pg震相也可以清晰地追踪至80km左右(图2d)。而在广东台网的地震台站中由于偏移距较大,没能记录到Pg震相。

PmP震相是来自莫霍界面的反射波,该震相总体上具有振幅能量强、较为连续可靠的波组特征,它在所有台站上均有记录,但记录长度和强弱有所变化,反映了研究区莫霍界面较为复杂的特点。PmP震相在偏移距45km左右开始明显出现,最远可以追踪至255km,反映了研究区莫霍界面深度变化较大。DGN台测线2剖面上记录了清晰的PmP震相,它从大约45km开始,一直可以连续追踪至80km,且在60km左右的偏移距处振幅明显加强,其视速度大概为 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (图2a),而测线1剖面上虽然能拾取到PmP震相,但振幅较弱。香港地区的YHK台也记录到明显的PmP震相,其视速度在 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,测线1剖面上PmP震相从60km开始,一直连续追踪至测线1的最远点91km左右,而测线2剖面从65km到116km均记录到连续且能量极为强烈的反射震相(图2d)。香港THK台测线1剖面上从67km开始记录到PmP震相,连续追踪至110km左右结束(图2c),而在CCHK台测线2剖面上从65km左右开始记录到PmP震相,连续追踪至80km左右(图2b),且两条剖面上的PmP震相视速度

均为 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。广东省地震台网的 ZHH 台两条剖面上均记录了很清晰的 PmP 震相, 最远追踪至 115km 左右, 受炮点下沉积层厚度的变化影响, 使得 PmP 震相随偏移距有些起伏, 且该震相的视速度大约为 $6.1\text{--}6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3a—b)。广东地区的 ZHQ 台记录到了远至 255km 的 PmP 震相, 这组信号强、连续稳定, 可在 230—255km 范围内连续追踪, 视

速度约为 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3c)。同时在 SHW 台测线 1 剖面上 PmP 震相也能从测线起点追踪至 157km 左右(图 3d), 且其折合速度到时较其他台站要早, 可能反映了地下高速异常的特征。从以上各剖面的震相分析可知, PmP 震相的视速度在 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 小于地壳的平均速度, 它可能与华南沿海普遍发育的中地壳低速层有关。

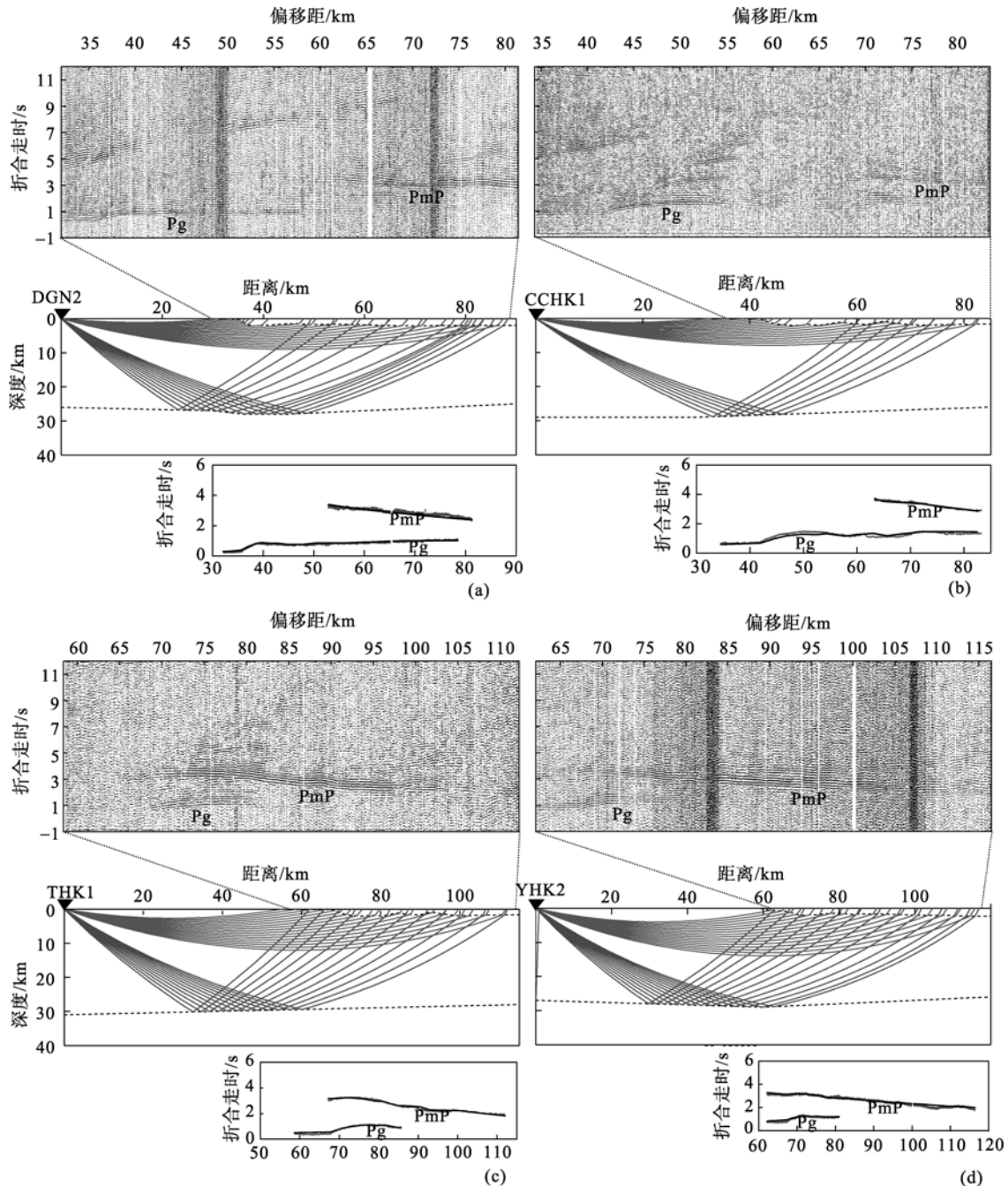


图 2 香港台网单台地震记录剖面与二维射线追踪模拟及走时对比图

(a)DGN 台第二条测线; (b)香港地区的 CCHK 台第一条测线; (c)香港地区的 THK 台第一条测线; (d)香港地区的 YHK 台第二条测线

Fig. 2 Seismic recording section and ray-tracing modeling for Hong Kong seismic network

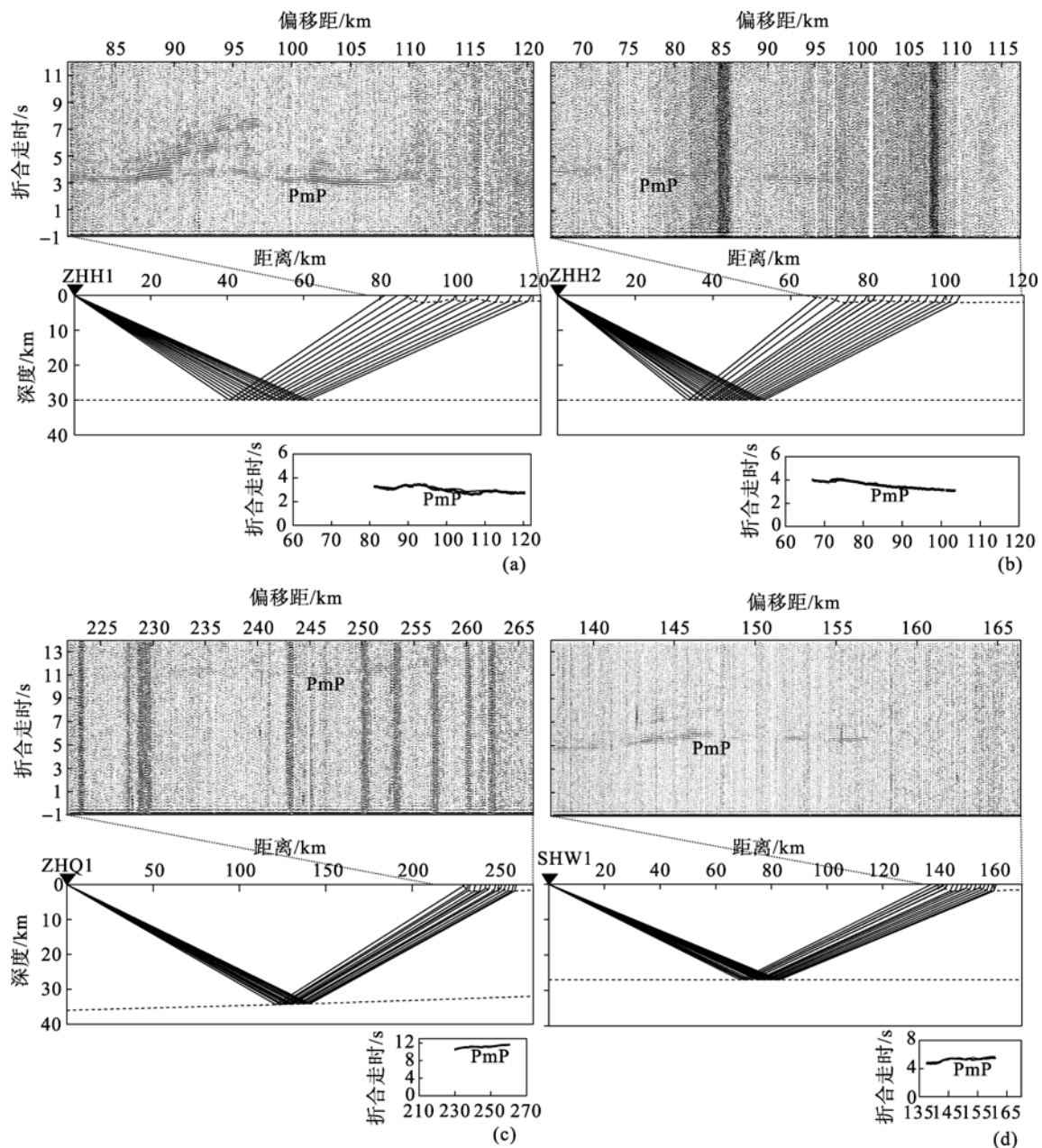


图3 广东台网单台地震记录剖面与二维射线追踪模拟及走时对比图

(a) 广东地区 ZHH 台第一条测线; (b) 广东地区 ZHH 台第二条测线; (c) 广东地区 ZHQ 台第一条测线; (d) 广东地区 SHW 台第一条测线

Fig. 3 Seismic recording section and ray-tracing modeling for Guangdong seismic network

3 二维射线追踪模拟

本次海陆地震联测实验的两条测线长度均在 50km 左右, 由于研究区属于南海北部大陆拉张边缘地带, 其地壳物质组成相似, 且根据以前的地震探测结果显示, 研究区地壳速度的横向差异性较小, 因此我们使用 RAYINVR 软件^[23]对各台站进行近似二维地壳结构的模拟, 获得了一系列横向均一的二维模型, 通过这些模型分析了南海北部海陆过渡带的地壳平均速度和莫霍面的深度变化趋势。

首先根据 P_g 震相的特征分析了沉积层的分布

和厚度(图 4)。本次宽角地震实验的射线由于穿透很深, 仅仅受测线和台站底下沉积层的影响, 而由于广东和香港地区固定地震台网的各地震台站均布设在基底岩石上, 受沉积层的影响很小, 且从各台站的 P_g 折合走时与炮号间的关系曲线图(图 4)可知, P_g 曲线的变化趋势基本一致, 并不随台站的变化而有很大改变, 因此推测 P_g 的变化主要受测线底下的沉积层厚度变化的影响。根据 Li 等^[24]的研究方法和测线周边多道地震的研究结果, 我们将沉积层速度定为常值 $3.0\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 然后根据各台站 P_g 随炮点的变化特征确定了各炮点下沉积层的厚度变化特征, 且

根据拾取到的来自沉积层多次反射的 Pg 震相 (Multiple Pg)进一步确定了沉积层厚度的变化^[25]。在对各台站模拟的过程中,沉积层厚度始终与各炮点下的厚度相对应。从各台站 Pg 和 PmP 拟合的结果和变化趋势可知(图 2—3),我们确定的沉积层厚度能很好地对所有台站的震相进行合理拟合。

由于此次研究工作中只拾取了非常清晰的 Pg 和 PmP 震相,且目的主要是为了通过对各台站进行拟合来分析研究区地壳的平均速度和莫霍面深度的变化特征,因此在对各台站进行模拟时,除了沉积层由以上介绍的方法确定外,地壳中的速度主要根据是否拾取到 Pg 震相分为两种类型,一是拾取到 Pg 震相的台站,对地壳速度设置了梯度,且从基底至莫霍面的梯度一致,这主要是为了对 Pg 震相的射

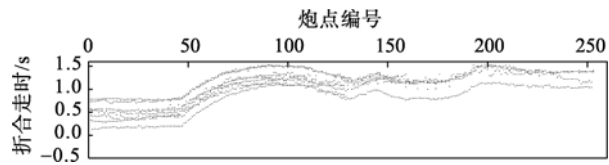


图 4 Pg 震相走时曲线与炮点之间的变化趋势图
Fig. 4 Variation trend between Pg phases and Shot number

线路径进行合理的追踪(图 2);二是只拾取到 PmP 震相的台站使用了平均地壳速度来进行模拟(图 3)。最后利用模拟获得的结果在表 1 中列出了各台站对应的地壳平均速度和莫霍面深度以及拟合的 rms 和 χ^2 值,这样就为我们分析海陆过渡带的地壳结构特征提供了依据。图 2 展示了其中 4 个拾取到 Pg 震相台站的模拟结果,地壳的速度值从基底的约 $5.5\text{--}5.6\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 到莫霍界面处的 $6.8\text{--}6.9\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,其地壳平均速度为 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,4 个台站 PmP 震相反射点所对应的莫霍面深度从 26km 到 30km 左右。而图 3 显示了广东台网只拾取到 PmP 震相的拟合结果,大部分台站获得的地壳平均速度为 $6.1\text{--}6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,反射点莫霍面深度由海到陆从 30km 到 35km 左右(图 3a—c)。但从最东边的 SHW 台获得的结果却显示地壳平均速度为 $6.7\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,反射点莫霍面深度在 28km 左右(图 3d)。这些结果表明南海北部海陆过渡地区的地壳结构较为均一,但局部地区也存在异常特征。

在宽角地震实验中速度对 PmP 震相的影响程度远远大于莫霍面深度对其的影响,因此我们设置了

表 1 各台站拾取到的 Pg 和 PmP 震相个数、模拟获得的地壳平均速度和反射点处莫霍面深度以及 RMS 和 χ^2 值

Tab. 1 Number of Pg and PmP phases for every station and results of ray-tracing modeling

台站名 ^{a)}	Pg 走时个数	PmP 走时个数	地壳平均速度 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	莫霍面深度 km	RMS 值 ms	χ^2 值
Dangan1	251	85	6.2 (5.6—6.8)	27	92	2.857
HKCD1	253	0	6.15 (5.5—6.8)	27	70	0.492
HKCS1	127	0	6.15 (5.5—6.8)	27	79	0.625
HKLM1	176	154	6.2 (5.6—6.8)	28	99	1.947
CCHK1	253	98	6.15 (5.5—6.8)	28—29	105	4.394
HKSL1	154	146	6.25 (5.6—6.9)	28	77	1.235
THK1	128	208	6.3 (5.7—6.9)	29—30	83	2.778
YHK1	253	142	6.2 (5.6—6.8)	29	110	4.810
SHZ1	0	98	6.3	26	61	2.322
ZHQ1	0	171	6.15	35	81	0.167
HUD1	0	251	6.2	35	201	4.067
GZH1	0	162	6.2	33	78	0.608
ZHH1	0	253	6.1	31	113	1.282
SHW1	0	214	6.7	28	169	2.862
Dangan2	375	217	6.35 (5.7—7.0)	27—28	84	1.459
HKCD2	242	346	6.2 (5.5—6.9)	28	109	1.183
HKLM2	170	348	6.15 (5.5—6.8)	28—29	91	0.837
CCHK2	127	242	6.2 (5.5—6.9)	27—28	117	1.852
HKLK2	0	352	6.2 (5.5—6.9)	27	55	0.299
THK2	0	358	6.2 (5.5—6.9)	27—28	91	0.837
YHK2	122	390	6.2 (5.6—6.8)	27—28	101	1.032
TIS2	0	227	6.2	28	74	0.550
ZHQ2	0	173	6.15	34	96	1.860
GZH2	0	286	6.2	33	134	1.804
ZHH2	0	292	6.1	31—32	95	0.913

a) 台站编号后的数字 1 和 2 对应测线 1 和测线 2 所获得的数据。

3 个不同的地壳平均速度值($6.1\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, $6.3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), 利用各台站接收到的 PmP 震相对莫霍面深度分别进行了求解, 从中可以发现对于偏移距较远的台站如 GZH、ZHQ 等, 地壳平均速度为 $6.1\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 时莫霍面深度为 27km、29km, 速度为 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 时为 33km、37km, 速度为 $6.3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 时为 40km、45km, 表明地壳平均速度对这些台站求解莫霍面深度有很大影响。而从以往的研究结果可知, 当取地壳平均速度为 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 时所求得的莫霍面深度与前人结果较为一致, 这也与前面使用 Pg 和 PmP 震相获得的结果相吻合, 因此研究区的地壳平均速度应该最接近 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对于偏移距较近的香港台网以及 TIS、ZHH、SHZ 等台站, 3 个不同的地壳平均速度所获得的莫霍面深度变化不大, 多数只相差 1—2km 左右, 因此对于这些较近台站所求得的莫霍面深度误差应该在 2km 左右。

4 地壳结构分析及讨论

图 5 显示了各台站 PmP 震相反射点的位置分布和莫霍面深度值, 其结果显示南海北部海陆过渡带的莫霍面深度从近海地区的 26—28km 变化到沿海大陆地区的 33—35km, 与南海东北部海陆地震联测实验获得的近海地区 25—28km 的莫霍面深度相一致^[26]。莫霍面深度由北西向南东有明显减薄的趋势, 这与前人的研究结果相一致^[8,27], 也符合南海北部边缘为拉张型边缘的属性, 表明此海陆过渡带的深部结构与南海的扩张演化有密切联系。通过对比本研究获得的莫霍面深度与根据重力数据计算

的莫霍面深度, 发现图 5 中显示的莫霍面深度普遍要深于重力数据计算得到的深度, 这与 Nissen 等^[2]在海区获得的结果一致, 它可能是由于在重力计算中对地壳密度估算误差引起的。蔡学林等^[28]研究了中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构和动力学型式, 将本文研究区所属的华南地区及临海边缘划分成了具有整体伸展动力学型式的减薄型地壳结构, 并且认为其地壳平均速度为 $6.26\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 地壳厚度在 30km 左右, 这与本研究获得的结果较为一致。

从表 1 中模拟的各台站结果可知, 南海北部海陆过渡地区的地壳速度结构较为均一, 表明该地区地壳物质组成基本相似。研究区的地壳平均速度为 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 比全球平均地壳速度 $6.45\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[29]要明显偏低, 与以往华南地区的深地震探测获得的地壳平均速度较为一致^[7-9], 推测其可能与华南及邻近地区上下地壳之间普遍发育的壳内低速层有关^[7-9,30]。在南海东北部海陆地震联测二维地壳结构模拟中获得了壳内低速层的结构, 其地壳平均速度也在 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 研究认为这些壳内低速层与岩石中含水矿物的脱水作用以及地壳高热流等有关^[30]。而在南海北部边缘海区的深地震探测结果没有获得中地壳低速层, 但发现下地壳有高速体出现^[4-5], 同时根据研究区东边 SHW 台模拟的结果也显示了异常高速的地壳平均速度($6.7\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), 根据海区海底地震仪探测剖面的结果^[4-5]推测该异常高速的地壳平均速度可能与下地壳高速体有关。这些结果表明南海北部海陆过渡带可能是普遍发育有中地壳低速层的华南大陆与发育有下地壳高速体的南海北部边缘的转换地带, 其结构特征较为独特。同时根据南海东北部和此次海陆地震联测实验获得的两条二维深地壳结构剖面可知^[25-26,31], 在南海北部海陆过渡地区探测到了发育于此处的滨海断裂带, 该断裂带宽度为 6—10km 左右, 在速度模型上表现为低速结构, 沿着该断裂带在历史上曾发生过几次大地震活动, 且研究分析认为其可能是华南大陆与南海北部的分界断裂^[32]。这些研究结果为下一步进行海陆过渡带的三维地震层析成像打下了很好的基础。

5 结论

根据广东和香港地区固定地震台网以及担杆岛流动台站所记录的 2004 年海陆地震联测的数据, 分析模拟了各台站接收到的 Pg 和 PmP 震相, 获得了各台站对应的地壳平均速度和莫霍面深度值, 并以

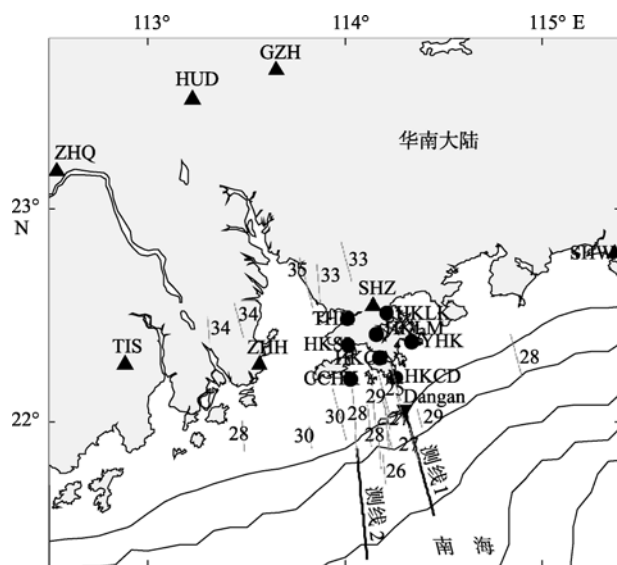


图 5 PmP 震相反射点分布及莫霍面深度图
(细线表示反射点位置, 数值表示对应的莫霍面深度值)

Fig. 5 Reflective points of PmP phases and Moho depth

此对南海北部海陆过渡带的地壳结构进行了分析。其结果显示南海北部海陆过渡带的地壳结构较为均一,地壳平均速度在 $6.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,要明显低于全球平均地壳速度 $6.45\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,其可能是由于普遍发育于上下地壳之间的低速层造成的。研究区莫霍面深度为 26—35km 左右,且由北西向南东有明显的变浅趋势,属于典型的减薄型地壳结构。根据东边

SHW 台模拟得到的地壳平均速度显示异常的高速,达到 $6.7\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,其可能与地壳内局部异常高速体有关,说明研究区东部可能发育有局部的下地壳高速体。结合华南大陆普遍发育有中地壳低速层而南海北部边缘探测到了下地壳高速体,认为南海北部海陆过渡带是一个明显的转换地带,它的深部地壳结构特征应该与南海的扩张演化有密切联系。

参考文献

- [1] 姚伯初, 曾维军, HAYES D E, 等著. 中美合作调研南海地质专报[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1994: 1–203.
- [2] NISSEN S S, HAYES D E, YAO B, et al. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the process of crustal extension: Northern margin of the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B11): 22447–22483.
- [3] QIU X L, YE S Y, WU S M, et al. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179–193.
- [4] 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.
- [5] WANG T K, CHEN M K, LEE C S, et al. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2006, 412: 237–254.
- [6] 吴振利, 阮爱国, 李家彪, 等. 南海中北部地壳深部结构探测新进展[J]. *华南地震*, 2008, 28(1): 21–28.
- [7] 廖其林, 王振明, 王屏路, 等. 福州—泉州—汕头地区地壳结构的爆炸地震研究[J]. *地球物理学报*, 1988, 31(3): 270–280.
- [8] 尹周勋, 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.
- [9] 嘉世旭, 李志雄, 徐朝繁, 等. 雷琼拗陷地壳结构特征[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(5): 1385–1394.
- [10] 郝天珧, 刘建华, 宋海斌, 等. 华南及其相邻边缘海域一些重要断裂的地球物理证据[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(1): 13–23.
- [11] 吴世敏, 周蒂, 丘学林. 南海北部陆缘的构造属性问题[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(4): 419–426.
- [12] 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.
- [13] HAYES D E, NISSEN S S. The South China Sea margins: Implications for rifting contrasts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237: 601–616.
- [14] 丘学林, 陈颢, 朱日祥, 等. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用: 南海北部试验结果分析[J]. *科学通报*, 2007, 54(2): 463–469.
- [15] 陈恩民, 黄咏茵. 华南十九次强震暨南海北部陆缘地震带概述[J]. *华南地震*, 1984, 4(1): 11–32.
- [16] 刘以宣. 华南沿海的活动断裂[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 5(3): 11–21.
- [17] 徐杰, 张进, 周本刚, 等. 关于南海北部滨海断裂带的研究[J]. *华南地震*, 2006, 26(4): 8–13.
- [18] 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.
- [19] 赵明辉, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海东北部滨海断裂带的研究现状与展望[J]. *华南地震*, 2003, 23(1): 20–27.
- [20] 夏少红, 丘学林, 赵明辉, 等. 香港与珠三角地区海陆联合地震探测的数据处理[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(1): 35–38.
- [21] 赵明辉, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海东北部海陆联测地震数据处理及初步结果[J]. *热带海洋学报*, 2004, 23(1): 58–63.
- [22] COHEN J K, STOCKWELL J W. The SU user's manual[M]. Colorado School of Mines, 1995: 1–40.
- [23] ZELT C A, SMITH R B. Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure[J]. *Geophys J Int*, 1992, 108: 16–34.
- [24] LI H, MOROZOV I B, SMITHSON S B. 3D seismic analysis of the Coast Shear Zone in SE Alaska and Western British Columbia: Broadside analysis of ACCRETE wide-angle data[J]. *Tectonophysics*, 2008, 448: 20–32.
- [25] XIA S H, ZHAO M H, QIU X L, et al. Crustal structure in an onshore-offshore transitional zone near Hong Kong, northern South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37: 460–472.
- [26] 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 南海东北部海陆联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(5): 845–852.
- [27] ZHANG Z, WANG Y. Crustal structure and contact relationship revealed from deep seismic sounding data in South China[J]. *Phys Earth Planet Interiors*, 2007, 165: 114–126.
- [28] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构与动力学型式[J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 543–557.
- [29] CHRISTENSEN N I, MOONEY W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view[J]. *J Geophys Res*, 1995, 101: 9761–9788.
- [30] 赵明辉, 丘学林, 徐辉龙, 等. 南海北部沉积层和地壳内低速层的分布和识别[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(4): 471–479.
- [31] 夏少红, 丘学林, 赵明辉, 等. 香港地区海陆地震联测及深部地壳结构研究[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(5): 1389–1397.
- [32] 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.