

陈剑雄、王宝善、葛洪魁等, 2011, 气枪探测资料对华北地区地壳低速带的约束, 中国地震, 27(1): 49~55。

# 气枪探测资料对华北地区地壳低速带的约束

陈剑雄<sup>1)</sup> 王宝善<sup>1)</sup> 葛洪魁<sup>1)</sup> 林建民<sup>2)</sup> 陈颢<sup>1)</sup>

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京民族大学南路 5 号 10008

2) 浙江海洋学院海洋科学学院, 舟山 316000

**摘要** 地壳低速带是岩石圈中的力学软弱带, 对地震的孕育有重要作用。人工探测和天然地震层析成像资料均表明, 华北地区在不同深度上均存在低速带。为进一步对华北地区地壳低速带的特性进行约束, 我们分析了在唐山地区进行大容量气枪震源探测所获得的高分辨率观测资料。分析中发现, 该地区的地震记录具有如下主要特征: ①直达波  $P_g$  视速度为  $6\text{km/s}$ , 可以追踪到约  $70\text{km}$ ; ②Moho 面反射波  $P_mP$  从  $50\text{km}$  开始就以强势震相出现; ③ $P_mP$  震相在  $150\text{km}$  处比  $P_g$  震相约滞后  $2\text{s}$ 。本文利用合成地震图, 通过波形正演对观测数据进行拟合, 结果表明, 合成地震图不仅可以解释各种震相的走时, 同时也能较好地反映  $P_mP$  和  $P_g$  的相对振幅。模型结果显示: ①该地区平均地壳厚度为  $33\text{km}$ ; ②在该地区上下地壳各存在一个低速层。通过分析热流和大地电磁测深资料, 认为该地区上/下低速层可能分别是流体和热作用的结果。

**关键词:** 气枪震源 理论地震图 波形拟合 低速带

[文章编号] 1001-4683(2011)01-049-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地壳中低速层的存在已被很多研究所证实。但是对于低速带的成因, 尚无统一解释。低速层可能是地壳中的韧性剪切带或流体等引起的, 也可能因岩石的部分熔融或者矿物脱水导致。而岩石波速是由岩石的性质及其所处的环境决定的。岩石的性质包括岩石的矿物组成与含量、矿物的物理性质及分布、岩石的孔隙度分布以及孔隙中流体的性质等; 外界环境包括温度、压力以及孔隙压力等(杨晓松等, 2003)。因而在特定条件下, 如部分熔融、高地温梯度和孔隙流体的存在等因素影响下会造成地壳波速的局部反转, 从而形成壳内低速层。

低速层在构造运动中有非常重要的作用, 一般认为, 岩石圈中的低速层是一个力学软弱带, 此软弱带与相邻地壳层在物质性质上存在较大差异, 在软弱带易产生层间滑动及应变能的积累, 为块体的局部运动以及应力集中、调整和释放提供了条件, 对地震孕育起到很重要

[收稿日期] 2010-07-04; [修定日期] 2011-01-18

[项目类别] 国家自然科学基金项目(40874095)“地下介质变化四维地震监测关键技术和理论的实验研究”、地震行业科研专项经费(200808002)“地震波走时变化的主动源监测技术研究”和中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB09A01)联合资助

[作者简介] 陈剑雄, 男, 生于 1986 年, 中国地震局地球物理研究所硕士研究生, 主要从事主动震源研究

的作用 (Zhao et al, 1996)。

华北地区是目前进行地球物理综合探测比较多的区域,特别是 1966 年邢台地震之后的 30 余年来,先后在华北及周边区域开展了 30 余条、近 20000km 的深地震测深 (DSS) 剖面 (嘉世旭等, 1995; 汪一鹏等, 1989)。人工地震测深实验、大地电磁测深和地热能观测都显示该地区存在低速层 (嘉世旭等, 2009; 嘉世旭等, 2005; 胡圣标等, 2001; 赵国泽等, 1986; Kaye, 1987)。2006 年,我们在河北省遵化市上关湖进行了大容量气枪震源水库激发实验,并沿 NNW 向布设了长达 190km 的地震测线。林建民等 (2008) 对观测数据进行了走时正演拟合,得到 2006 年气枪测线所在剖面的一维地壳速度结构模型。由于林建民等 (2008) 及前人对该处反射波与折射波的数据处理基本都是通过走时反演得到相应速度模型,虽然走时反演的精度较好,但结果存在解的不唯一性。而波形拟合能充分利用波形信息,从观测资料中可获得更多的有用信息 (Wang et al 2010)。本文通过反射率法的理论地震图方法重新处理了气枪剖面数据,进一步约束了该地区低速带的性质。

## 1 气枪震源探测实验与震相分析

2006 年在河北省遵化市上关湖水库 ( $40^{\circ}13'26''N$ ,  $117^{\circ}43'35''E$ ) 进行了大容量气枪激发实验。气枪震源由 4 支 Bolt 1500LL 型气枪组合而成,单枪容量  $1500\text{in}^3$ ,总容量  $6000\text{in}^3$ ,工作压力为 2000psi,激发点水深 18m,气枪沉放深度 9m,在气枪源点沿 NNW 向布设了长 185km 的流动地震台测线,测线位于燕山隆起区内 (图 1)。

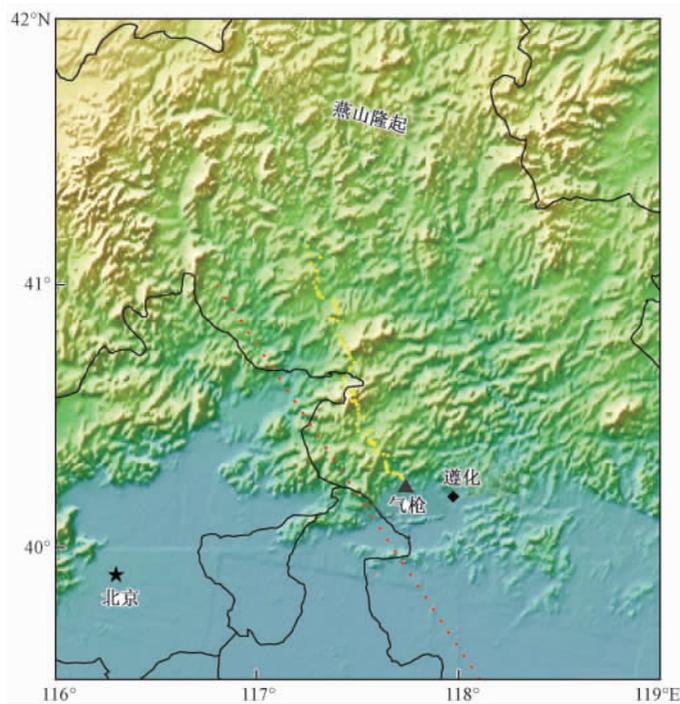


图 1 气枪激发位置以及流动地震台测线分布

▲ 气枪激发位置, ◆ 和 ▲ 为 2 套不同类型的流动接收地震仪所布置的测线位置, 红色点线为深地震测深 (DSS) 测线

由于气枪震源具有良好的重复性(林建民等,2008),我们将200次激发的波形进行线性叠加以提高信噪比。对叠加后的各点记录以6.0km/s的速度进行折合,得到记录折合截面图(图2)。根据震相对比原则及各震相特征,充分利用追逐记录的特点,经过反复仔细的识别、对比,获得4组较为清晰可靠的震相Pg、Pc、PmP、Pn和不太明显的P2。其中直达波Pg和Moho面反射波PmP是本研究的重点。

Pg震相是来自结晶基底以下弱速度梯度层的折射波,在华北地区追踪范围一般随着上地壳构造不同在50~160km之间变化(嘉世旭等,2005)。图2中可见Pg波作为初至波清晰可靠、能量较强、可以连续对比追踪至60km;在30km以内视速度约低于6.0km/s,30~60km处Pg波走时曲线基本平行于距离轴,对应的视速度接近6.0km/s。

PmP震相是来自Moho面的反射波和来自下地壳顶部(即壳幔过渡带)的折射波。图2中PmP波有两个主要特征:①从50km开始就以强势震相出现;②PmP在150km处比Pg的延伸约滞后2s。这表明该地区地壳中极可能存在低速层。林建民等(2008)用走时正演的方法分析了气枪剖面资料得到该地区的一维速度模型,该模型能较好地拟合观测走时,结果表明该地区下地壳存在明显的低速层。但由于只用了走时资料,速度模型不唯一。

震相的振幅受介质性质的限制(如Wang et al,2010)。为定量描述PmP与Pg的振幅比,我们计算了Pg和PmP震相(初至加1s范围内)振幅的均方差之比,结果如图3所示。由于Pg的振幅在60km以远已低于噪声水平,因此我们只计算了50~70km范围内的振幅比。从图3可以看出,在50~70km范围内,PmP的振幅约为Pg振幅的2~5倍,同时这个比值随震中距的增加显著增大。

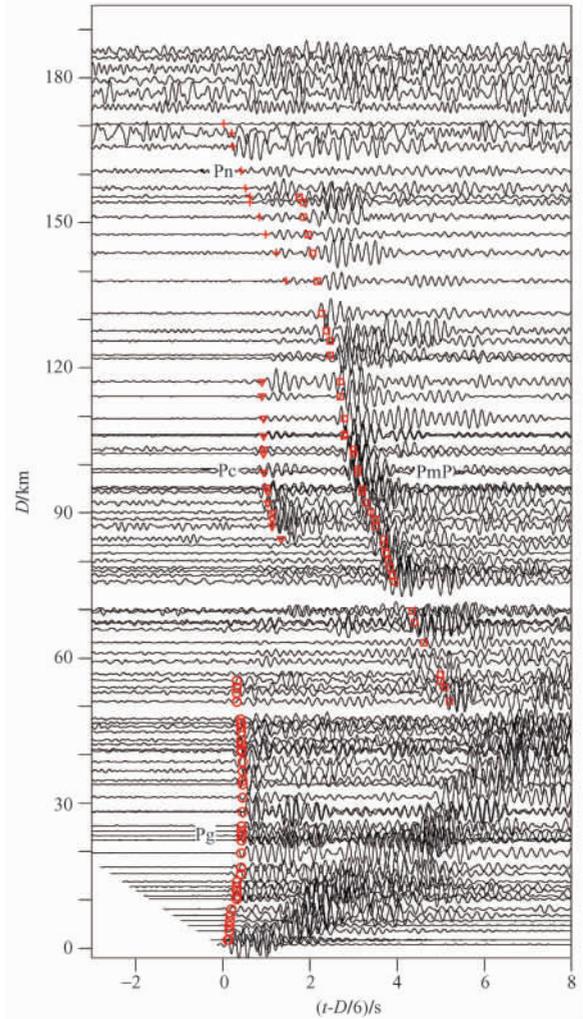


图2 气枪震源地震观测记录折合截面图

记录为200次激发信号叠加结果,每道数据进行道归一,折合速度6.0km/s,带通滤波范围2~8Hz(实际采样点走时:○Pg,▽Pc,□PmP,+Pn)

## 2 波形正演

利用合成地震图可以计算整个地球介质的响应,描述全波场信息,很好地拟合各种震相的相对振幅(Wang et al, 2010)。目前合成地震图的方法有很多(谢小碧等, 1992)。由于本次实验中只有一个震源点,我们只能对介质的一维模型加以限制,因此本文采用 Rongjiang Wang (1999) 发展的一维反射率法计算合成地震图。反射率法主要是通过对介质进行简化,用横向均匀介质或球堆成介质来逼近实际介质。在大多数情况下地球介质的性质纵向变化最快,而横向变化较为缓慢,因此在一级近似情况下,当人工震源相对震中距较小时,把地球介质作为纵向不均匀介质或者水平层状介质来处理比较合适。

首先我们基于林建民等(2008)的模型计算了相应的合成地震图(图4),结果表明,该模型存在如下不足:①Pg波持续距离较远,约达160km;②Pc震相不明显;③PmP震相在70km之后才较明显。因本文主要探讨PmP震相和Pg震相,故我们计算了PmP和Pg的振幅比(图3)。可以看出,在50~70km处,PmP和Pg的振幅比仅为0.2~0.5。据该模型,PmP出现偏晚,而Pn的走时偏大。这表明该模型的Moho面深度可能偏深了。

由于气枪震源的激发深度为10m左右,远小于最小地层厚度,基本可以看作是在地表激发,故近场Pg波基本不因深层结构的影响而改变,因此可以将Pg的振幅作为参考。

图4表明,PmP震相在50~70km之间的振幅比70km以后振幅要小,而在实际地震波形记录中,PmP在50km之后表现为强震相。PmP震相以强震相超前出现,其原因可能是因为壳幔过渡带之上低速带的影响,使得射线路径在经过低速层界面时向下弯曲,从而使地震波经过低速层界面到达Moho面再反射到地表时,其投射到水平方向的距离变小。

对于壳幔过渡带之上存在低速层的情况可分为2类:第一类是低速层下界面未达Moho面。针对此情况,则要在Qseis程序中通过对初始模型中上地壳处的低速界面进行速度、厚度及位置的调整后再计算相应的理论地震图。第二类是以Moho面为下界面的低速层。由于原始模型中PmP整体走时滞后,因此首先调整下界面(Moho面)深度以使PmP的走时与实际记录吻合,由于以Moho面为下界面,射线经过该处低速层上界面时会有一定程度的向下弯曲,弯曲程度取决于低速层上下界面的速度,而射线弯曲程度以及低速层厚度都将影响P波在水平方向行进的距离,最终影响PmP波的地表出露的距离。

在Qseis程序里,通过试错法可对以Moho面为下界面的低速层参数进行反复修改,在保证理论走时与实际走时尽可能一致的前提下,增大PmP在50~80km左右超前的初至振幅,使其尽可能与实际相吻合,最终得到一个修正的理论地震图(图5)。

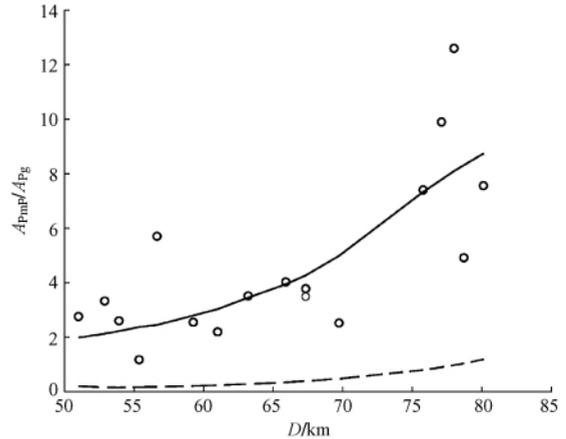


图3 50~70km处PmP与Pg振幅比  
--- 初始模型, — 修正后模型, ○ 实际记录

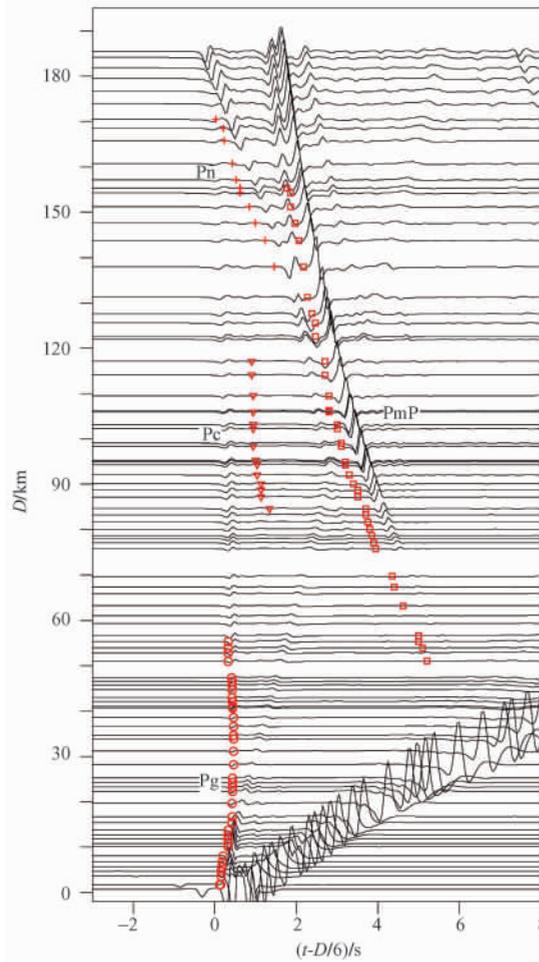


图 4 初始理论地震图(图例如图 2)

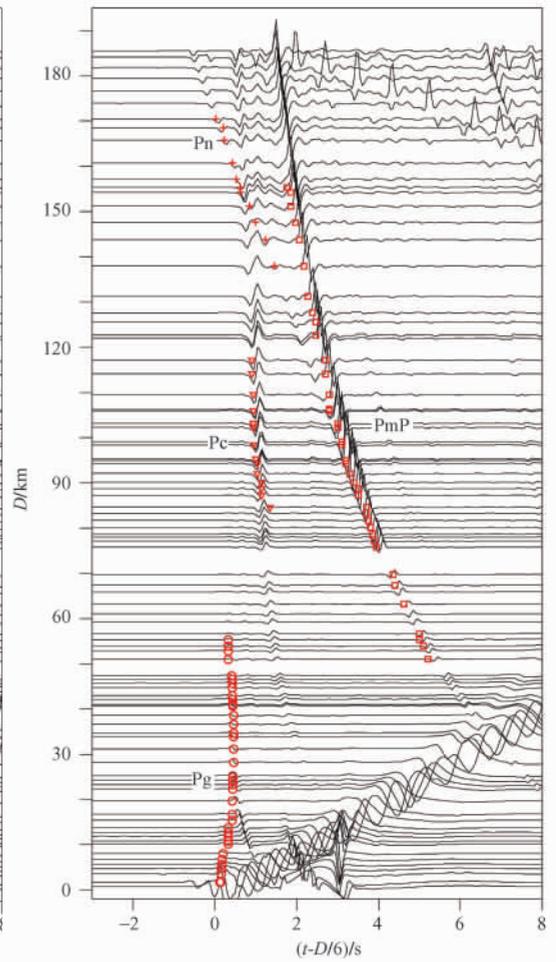


图 5 修正后的理论地震图(图例如图 2)

从图 5 可以看出,新的模型在走时和波形方面都有明显改善。图 6 为修正后模型中的一维地壳速度结构模型,明显看出修正模型中 Moho 面上部的低速层上下界面速度差由初始模型中的  $1.5\text{km/s}$  提高到  $1.7\text{km/s}$ 。由图 5 和 6 可以看出,地壳上部  $10\sim 13\text{km}$  处存在的低速层主要影响了 Pc 波,同时对所有波形振幅的大小有较大影响。

### 3 讨论与结论

本文用反射波的理论地震图拟合气枪震源激发的 PmP 波,在保证理论走时与实际走时相吻合的前提下,参照理论地震图中稳定的 Pg 震相,修正了华北地区燕山隆起区南部一维地壳速度模型(嘉世旭等,1995),通过对地壳与地幔过渡附近的低速带的调整,使得在实际记录中  $50\text{km}$  处就开始以强振幅形式出现的 PmP 震相得到更好的体现。

除低速层外,倾斜地层也可能对地震波的走时产生影响(渡田俊树等,1990;顾功叙,1990;王雪秋等,2002;杨德义等,2003),由于理论地震图反映的是水平层状地层的理想状态,因此可能掩盖了存在的倾斜地层造成的影响。地壳厚度模型(徐煜坚等,1985)表明观

测测线上地壳深度变化不超过 1km。同时大地电磁测量的结果(赵国泽等,1986)也表明在气枪激发实验所在的沧县隆起地区 60km 以上地层产状基本为水平,因此在计算理论地震图时将地壳假设为水平层状是可取的。

波形拟合结果显示该地区地壳厚度仅为 33km,明显比该地区平均地壳厚度薄约 5~6km(徐煜坚等,1985)。嘉世旭等(2005)根据柏各庄-正兰旗测线的观测结果(图 1),得到燕山隆起的一维模型, Moho 面深 40km。我们据该模型计算了合成地震图,发现无法解释观测数据。由于

PmP 震相的斜率决定于下地壳介质的平均速度,而 PmP 的走时偏移则反映了 Moho 面的深度。因修正后模型的合成地震图能很好地解释实际观测的 PmP 的走时和斜率,故我们认为 33km 的 Moho 面深度比较准确。嘉世旭等(2005)的燕山隆起模型和最终模型的差异表明,该地区横向变化明显。

从最终模型中可以看出,该地区在上下地壳各存在一个低速层。据大地电磁测深结果,该地区上地壳存在明显低速区(赵国泽等,1986)。同时该地区的热流值(胡圣标等,2001)仅为 20~60mW/m<sup>2</sup>,属中等偏低,这些极有可能表明上地壳的低速层为流体作用的结果。而该地区下地壳为高速区,那么热作用极可能是下地壳低速层的原因。

据理论地震图而建立的地壳速度模型可为分析气枪地震资料提供参考和修正,因地下介质复杂多样,各种地质与地球物理勘探方法的结合,才能得到尽可能与地下实际状况相符合的准确信息。

致谢:本试验得到中国科学院南海海洋研究所、中国地震局地球物理勘探中心、河北地震局等单位的大力支持;在本文完成过程中,得到了 Walter Mooney 教授和众师兄的指导与帮助,在此深表谢意。

## 参考文献

- 渡边俊树,1990,多薄层低速带对 P 波的影响,国外地质勘探技术,11,28~31。
- 顾功叙,1990,地球物理勘探基础,北京:地质出版社。
- 胡圣标、何丽娟、汪集旻,2001,中国大陆地区大地热流数据汇编,地球物理学报,44(5),611~626。
- 嘉世旭、刘昌钰,1995,华北地区人工地震测深真相与地壳结构研究,地震地质,17(2),97~105。
- 嘉世旭、张先康,2005,华北不同构造块体地壳结构及其对比研究,地球物理学报,48(3),611~620。
- 嘉世旭、张成科、赵金仁等,2009,华北东北部裂陷盆地与燕山隆起地壳结构,地球物理学报,52(1),99~110。
- 林建民、王宝善、葛洪魁等,2008,大容量气枪震源特征及地震波传播的震相分析,地球物理学报,51(1),206~212。
- 汪一鹏、邓启东、朱世龙,1989,华北地区岩石圈动力学特征,中国岩石圈动力学地图集,59,北京:中国地图出版社。

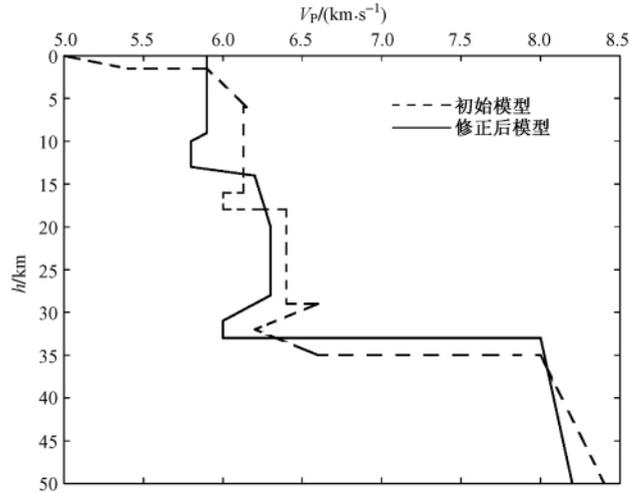


图 6 一维地壳速度结构模型

- 王雪秋、孙建国,2002,地震勘探中的数据保真问题综述,海相油气地质,7(1),55~58。
- 徐煜坚、罗焕炎,1985,华北北部地区地质模型与强震迁移,108~228,北京:地震出版社。
- 谢小碧、郑天愉、姚振兴,1992,理论地震图计算方法,地球物理学报,35(6),790~801。
- 杨晓松、马瑾、张先进,2003,大陆壳内低速层成因综述,地质科技情报,22(2),35~41。
- 杨德义、彭苏萍、常锁亮,2003,地震勘探常规低速带调查方法应用中的问题探讨,物探与化探,27(5),387~389。
- 赵国泽、刘国栋、王家映,1986,北京-柏各庄剖面连续介质大地电磁反演解释,地震学报,8,179~190。
- Rongjiang Wang,1999,A Simple Orthonormalization Method for Stable and Efficient Computation of Green's Functions. Bulletin of the Seismological of America,89(3),733~741.
- Kaye M S,1987,Elastic Wave Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle Beneath the North China Basin. Journal of Geophysical Research,92(B9),9327~9350.
- Wang B and Niu F,2010,A broad 660 km discontinuity beneath northeast China revealed by dense regional seismic networks in China, J Geophys Res,115,B06308,doi:10.1029/2009JB006608.
- Zhao D, Kanamori H, Negishi H et al,1996, Tomography of the source area of the 1995 Kobe earthquake: Evidence for fluids at the hypocenter? Science,274,1891~1894.

## Using information of airgun to contract the low velocity zone in crustal in North China

Chen Jianxiong<sup>1)</sup> Wang Baoshan<sup>1)</sup> Ge Hongkui<sup>1)</sup> Lin Jianmin<sup>2)</sup> Chen Yong<sup>3)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Institute of Marine Science, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China

**Abstract** The low velocity zone is a mechanical weak band in the crust, which plays an important role in breeding of earthquakes. Artificial detection and nature earthquake tomography both show that low velocity layers exist in different depths in North China. We analyzed the high-resolution data detected by large volume airgun source in North China in order to put further constraint on the properties of the low velocity layers there. We found the following main characteristics in airgun data: firstly, apparent velocity of the direct P-wave's is approximately 6km/s, which could be traced upto nearly 70km; secondly, the PmP phase which reflected from Moho begin to appear as strong phases from 50km; thirdly, the PmP phase at 150km is 2s lag of the Pg phase. All these features show that the low velocity layer exist in the crust in this area. We use synthetic seismograms to forward modeling waveform to fit the observed data. The results showed that synthetic seismograms can not only explain the travel time of various seismic phases, but also obtain the amplitude ratio of PmP and Pg. The results of our modeling include: ① the average thickness of crust in this area is 33km; ② there exists a low velocity layer in both the upper and lower crust in this region. By comparing the heat and magnetotelluric data, we conclude that the low velocity layers in the upper and lower crusts were caused by fluid and thermal effect respectively.

**Key words:** Airgun source Theoretical seismogram Waveform fitting Low velocity zone