

刘双, 秦满忠. 垂直分量P波接收函数确定宝清台地壳厚度[J]. 华南地震, 2014, 34(4): 47-50. [LIU Shuang, QIN Manzhong. The Crust Thickness of the Baoqing Station Determined by Vertical-component P-wave Receiver Function[J]. South china journal of seismology, 2014, 34(4): 47-50.]

垂直分量P波接收函数确定宝清台地壳厚度

刘双¹, 秦满忠²

(1. 黑龙江省地震局, 哈尔滨 150090; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要: 利用宝清台记录的9个同一方位深远地震资料, 使用垂直分量P波接收函数技术, 成功分离出莫霍面多次反射透射震相PpPmp, 根据其到时计算出宝清台下方地壳厚度约33.5 km, 与前人研究结果基本一致。

关键词: 垂直分量; 接收函数; 宝清台

中图分类号: P315.75

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2014) 04-0047-04

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.04.008

The Crust Thickness of the Baoqing Station Determined by Vertical-component P-wave Receiver Function

LIU Shuang¹, QIN Manzhong²

(1. Earthquake Administration of Heilongjiang Province, Haerbin, 150090, china;

2. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou, 730000, china)

Abstract: The vertical-component P-wave receiver function technique is used to extract the Moho multiples (PpPmp phase) and determine the thickness of the crust below the Baoqing station by 9 depth-teleseismic earthquakes come from the same back azimuth. The paper calculates that the crust thickness is 33.5 km under the Baoqing station. This result is also consistent with previous studies.

Keywords: Vertical-component; Receiver function; Baoqing station

0 引言

远震体波波形包含了震源时间函数、传播路径、接收台站下方的介质结构以及仪器响应等多种复杂信息, 而在地震波中提取相关的地球内部结构信息是地震学研究的目标之一。所谓接收函数, 可以认为是从地震仪器所记录的远震体波波形中去除震源、仪器响应、地震波传播路径等因素的时间序列, 这个时间序列中主要包含了接收台站下方地壳和上地幔速度间断面产生的转换波

(如P-S或S-P)及多次波(如PmsPms、PmpPms和PpPmp等)信息。接收函数已经成为研究台站下方地壳、上地幔速度间断面有效的方法之一^[1-4]。

传统的接收函数需要三分量的地震观测数据, 使用转换波Ps及其多次波来确定地壳厚度。随着大量数字观测数据的积累, 出现了单分量观测资料计算台阵或台站下方地壳结构的方法^[5]。该方法主要是通过分量多次波震相PpPmp, 且该震相走时和S波速度、波速比无关, 仅决定于P波速度和地壳厚度。因此, 和三分量接收函数方法相

收稿日期: 2014-05-20

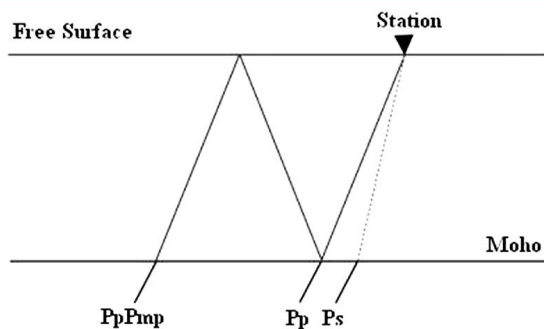
基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2012IESLZ09)

作者简介: 刘双(1983-), 男, 工程师, 主要从事地震安全性评价和结构抗震研究. **E-mail:** liushuang9811216@163.com.

通信作者: 秦满忠(1981-), 男, 助理研究员, 主要从事地震安全性评价和结构抗震研究. **E-mail:** manzhongqin@eyou.com.

比,该方法本身就能减少解的非唯一性。

如图 1 所示, PpPmp 震相在自由表面的反射点可以看作是一个实际的源^[6-7], 因此我们可以用 PpPmp 震相来构建 P 波垂直分量接收函数。Tseng 和 Wang 使用 P 波垂直分量接收函数研究了南印度地区的地壳结构, 并取得了理想的结果^[8]。秦满忠等利用兰州小孔径台阵深远地震资料, 使用垂直分量 P 波接收函数方法计算出兰州台阵下方地壳厚度约 51.6 km, 与现有的研究结果一致^[9]



垂直分量 P 波接收函数主要用 PpPmp 震相, 三分量接收函数主要使用水平分量中的 P-S 转换震相 (如 Ps)

图 1 接收函数中主要震相的传播示意图。

Fig.1 Ray paths of schematic diagram major seismic phases commonly used in crustal receiver function.

本文将利用宝清台记录的 9 个同一方位 (132°~139°) 的深远地震波形, 使用垂直分量 P 波接收函数技术估算宝清台下方的地壳厚度。

1 垂直分量 P 波接收函数

垂直分量 P 波接收函数是研究单台或台阵下方壳/幔结构的一个重要研究方法。传统的径向分量和横向分量接收函数是通过径向分量和横向分量各自与垂直分量做反褶积, 这将有效地消除远震的震源时间函数, 突出转换波震相 Ps^[1]。但这样同时消除了存在于垂直分量之中的相关 P 波多次波 (如 PmsPms、PmpPms 和 PpPmp 等) 重要信息。然而, 垂直分量 P 波接收函数可以通过垂直分量与震源时间函数的反褶积, 将原本存在于垂直分量中能量比较弱的 P 波多次波 PpPmp 信息突出, 进一步用于研究单台或台阵下方的壳/幔结构。

在时间域, 垂直分量远震 P 波波形数据可表示为仪器响应、震源时间函数及介质结构响应的卷积:

$$D(t)=I(t)*S(t)*E(t) \quad (1)$$

式(1)中, $D(t)$ 表示远震垂直分量 P 波波形记录, $I(t)$ 表示仪器的脉冲响应, $S(t)$ 表示入射平面波的有效震源时间函数, $E(t)$ 表示介质结构响应。

由于远震 P 波波形的垂直分量主要由直达波构成, 尾随波列能量较弱, 可忽略不计, 故可令: $E(t) \approx \delta(t)$, 即 $D(t)=I(t)*S(t)$ 。

对于同一台站 (仪器) 记录的不同地震事件, 仪器响应和震源信息可以近似用 P 波初动之后的 2.0~4.5 s 的波形提取, 即 $D_s(t)=I(t)*S(t)$

$$D(t) \cong D_s(t) \quad (2)$$

再通过 $D_s(t)$ 与垂直分量在频率域的反褶积可以得到该台站的介质结构响应:

$$E(\omega) \approx \frac{D(\omega)}{D_s(\omega)} \quad (3)$$

2 数据处理

2.1 资料选取

宝清台 (BAQ) 位于黑龙江省东北部, 使用 BBVS-60 型力平衡反馈式宽频带地震计, 该地震计由三个独立分向传感器 (一个垂直向、两个水平向) 一体化安装组成, 使用了高灵敏度的差分电容位移换能器, 内置力平衡电子反馈电路、控制电路、电源变换电路, 噪声水平低、动态范围大, 容易安装使用, 其频带宽度为 50 Hz~60 s, 使用 EDAS-24IP 数据采集器^[10], 在台站运行期间记录了大量的近震、远震观测波形数据。以确保台阵下方入射波波前几乎是垂直入射我们选择了震中距大于 72° 的深远地震; 震源深度大于 200 km, 避免震中附近地表反射波 (如 pP 和 sP) 和转换波等震相对 PpPmp 震相的干扰; 所选择的地震数据波形简单、具有较低的背景噪声。以此标准, 我们共选取了 2008~2013 年的 9 个地震事件, 以上的地震目录是参考 USGS 的地震目录, 表 1 为选取地震事件的具体参数。

2.2 数据处理

我们首先对选取的 9 个地震事件观测数据做拐角频率为 0.5 Hz 和 1.0 Hz 的巴特沃斯滤波, 以 P 震相到为标准将每道的波形对齐, 截取了 P 震相到前 5 s 和后 15 s 的波形。在图 2A 中可以识别出微弱的多次波震相 PpPmp, 但是由于背景噪声的影响, 它的幅度并没有很好的表现出来。

震源时间函数 (Source Wavelet Time Function) 通常选取初动 P 之后的 2.0~4.5 s 的波形, 一般深

表 1 按震中距排序的地震事件参数(地震目录源自 USGS)

| Table 1 Parameters of the earthquake events with epicentral distance listed (the earthquake catalogue from USGS) | | | | | | | | |
|--|------------|-------------|------------------------|------------------------|----------|--------------|-----------------|--------------|
| Event | Date | Origin Time | $\lambda_N/(^{\circ})$ | $\lambda_E/(^{\circ})$ | Depth/km | Magnitude/mb | Backazimuth/deg | Distance/deg |
| 1 | 2008-18-04 | 20:39:07.1 | -17.34 | -179.02 | 554 | 6.3 | 132.5 | 77.2 |
| 2 | 2009-11-09 | 10:44:55.1 | -17.24 | 178.33 | 595 | 7.3 | 134.7 | 75.8 |
| 3 | 2009-11-22 | 07:48:20.6 | -17.79 | -178.43 | 523 | 6.4 | 132.2 | 77.9 |
| 4 | 2010-06-30 | 04:31:02.2 | -23.31 | 179.12 | 581 | 6.4 | 137.2 | 81.3 |
| 5 | 2010-08-16 | 19:35:49.0 | -20.80 | -178.83 | 603 | 6.2 | 134.2 | 80.2 |
| 6 | 2011-04-03 | 14:07:09.3 | -17.64 | -178.59 | 552 | 6.4 | 132.3 | 77.6 |
| 7 | 2011-07-29 | 07:42:22.6 | -23.78 | 179.76 | 523 | 6.7 | 136.9 | 82.0 |
| 8 | 2012-01-24 | 00:52:05.2 | -24.98 | 178.52 | 580 | 6.3 | 138.5 | 82.5 |
| 9 | 2013-08-28 | 02:54:41.3 | -27.78 | 179.63 | 478 | 6.2 | 139.1 | 85.4 |

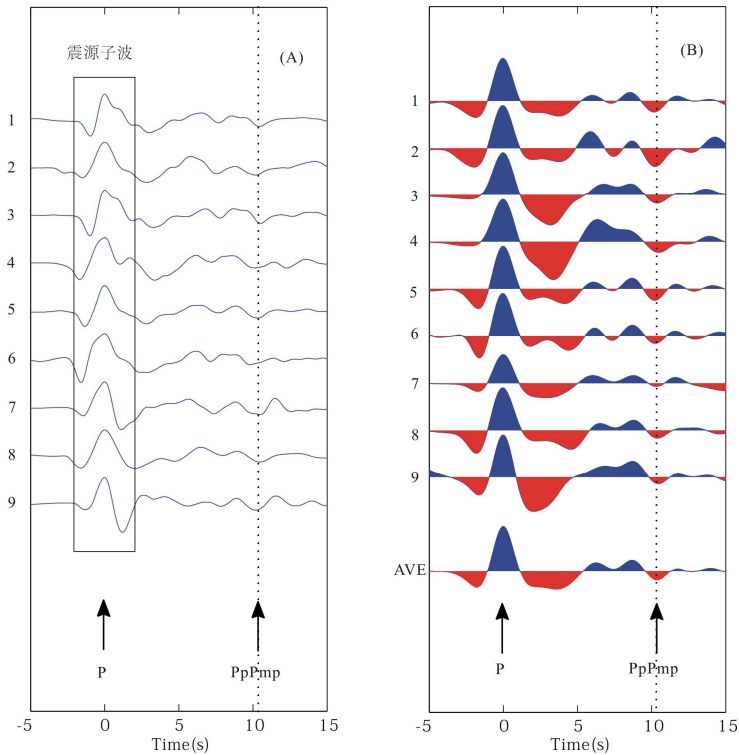
震的震源相对浅源地震较为简单，本文中震源时间函数选取了初动 P 之后的 4.0 s 的波形(如图 2A 中的震源子波)。

为了能够降低背景噪声并将 PpPmp 震相很好的表现出来，我们采用带水准因子的频率域反褶积方法^[11-12]。图 2B 为我们提取的震源时间函数分别与其对应的观测记录波形在频率域的反褶积结果，并对所有反褶积结果做了叠加平均(AVE)，在图中我们可以识别出更为清晰的 PpPmp 震相，并且背景噪声得到了很好的压制。

在图 2B 中的垂直分量 P 波接收函数结果中，直达 P 波之后的 10.0 s 附近可以识别出比较清晰一致的 Moho 面多次波 PpPmp 震相。假定直达 P 波和 PpPmp 震相具有相同的射线参数，根据地震波走时的基本理论，通过直达 P 波和 PpPmp 震相在地壳内的走时差，再给定地壳的平均 P 波速度的条件下，可以估计出间断面的深度 H ，公式如下：

$$H=\frac{t_{PpPmp}}{2\sqrt{\frac{1}{V_P^2-P^2}}}$$

(4)



(A) 原始地震事件记录图(方框中的 4.0s 的波形为我们提取的震源时间函数窗)。(B) 每道观测波形与震源时间函数反褶积得到的 P 波接收函数图, AVE 为 9 道反褶积的叠加平均结果。

图 2 9 个不同地震事件的垂直分量 P 波接收函数结果, 其中 AVE 是叠加的平均结果。

Fig2 The receiver function results of the vertical comonent P-wave of the 9 different earthquake events, AVE is the stackong average result

式(2)中, t_{PpPmp} 是直达 P 波与 PpPmp 震相的走时差, p 是入射波的射线参数, H 代表地壳厚度。取射线参数为 0.044 km/s 和 6.2 km/s, 根据垂直分量 P 波接收函数中得到的 10.4 s 的数值, 最终得到宝清台下方的平均地壳厚度约为 33.5 km。

3 结论与讨论

本研究使用垂直分量 P 波接收函数同样用反褶积的方法来消除震源时间函数以及射线路径等的影响, 与传统三分量接收函数相比, 该方法在反褶积过程中并没有将有用的多次波信息消除, 反而增强了。

本文所选取的数据都属于同一方位 ($132^\circ \sim 139^\circ$) 的深远地震波形, 这些地震数据都具有震源项简单、信噪比高的特点, 同时也避免了地震波在不同方位传播路径上带来的差异, 增强了结果的可靠性。

由于远震的直达 P 波和多次波 PmPmp 都是近乎垂直入射的, 对 PpPmp 的走时影响很小, 所以我们没有做偏移处理。本文使用垂直分量 P 波接收函数得到宝清台下方的平均地壳厚度为 33.5 km, 三分量接收函数 $H-\kappa$ 叠加方法得到的宝清台下方地壳厚度约为 36.9 km, 两者结果基本一致。因此, 可以使用垂直分量 P 波接收函数方法研究深远地震记录丰富的台站下方地壳结构。

参考文献:

- [1] Langston C.A. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves [J]. *Geophys Res*, 1979, 84 (B4): 4749–4762.
- [2] Owens TJ, Zandt G, Taylor S R. Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms [J]. *Geophys Res*, 1984, 89 (B9): 7783–7795.
- [3] 刘启元, 李顺成, 沈杨, 等. 延怀盆地及其临区地壳上地幔速度结构的宽频带地震台阵研究[J]. *地球物理学报*, 1997, 40 (6): 763–771.
- [4] 刘启元, 陈九辉, 李顺成, 郭彪, 等. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔 S 波速度结构及其地震成因的探讨 [J]. *地球物理学报*, 2000, 43 (3): 356–364.
- [5] Langston, Ch.A. J.K. Hammer. The vertical component P-wave receiver function [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2001, 91: 1805–1819.
- [6] Yu, J., G. T. Schuster. Crosscorrelogram migration of IVSPWD data [C]//71st Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. (Expanded Abstracts), 2001, 456–459.
- [7] Sheng J., G.T. Schuster, K.L. Panknow, et al. Coherence-weighted wavepath migration of teleseismic data [C]//EOS Trans. AGU, 2003, 84, S11E–0344.
- [8] Tai-Lin Tseng, Wang-Ping Chen. Probing the Southern Indian Shield with P-Wave Receiver-Function Profiles [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96: 328–333.
- [9] 秦满忠, 张元生, 沈旭章, 等. 小孔径台阵垂直分量 P 波接收函数研究及应用[J]. *地震学报*, 2012, 34 (1): 44–51.
- [10] 中国地震局监测预报司. 地震学与地震观测[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- [11] 危自根, 陈凌. 东北地区至华北北缘地壳结构的区域差异: 地壳厚度与波速比的联合约束[J]. *地球物理学报*, 2012, 55 (11): 3 601–3 614.
- [12] 周民都, 王椿镛, 曾融生. 青藏高原东北缘地壳上地幔速度结构的地震层析成像研究[J]. *地震工程学报*. 2012, 34 (3): 24–233