

用接收函数叠加技术研究滇西 上地幔间断面埋深^{*}

夏静瑜, 杨海燕, 胡家富

(云南大学 地球物理系, 昆明 650091)

摘要: 在对台站下方的径向接收函数进行分析和对比的基础上, 通过基于动校正的接收函数叠加方法, 利用云南数字地震台网记录的保山、畹町、沧源和腾冲 4 个台站的三分量宽频数据, 计算出了各台站下方的 SV 分量接收函数。结果表明, 在保山、畹町和沧源台下方清楚地显示出了深度 700 km 处的间断面, 较全球平均 660 km 要深。另外, 在深度 290~500 km 之间可能还存在多个间断面; 腾冲台下方 700 km 处的间断面不太清楚, 而且上地幔间断面仅为 210 km 深, 较其它三个台要浅。

关键词: 接收函数; 动校正; 叠加; 间断面; 滇西

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)03-0244-06

0 引言

探明上地幔 410 km 和 660 km 深度附近的间断面的埋藏深度及其横向变化, 对于推断地幔对流的规模、板块迁移特征和力源以及物质成分等问题都有着很重要的意义。目前, 对这两个间断面的全球性探查和对某些俯冲带地区、青藏高原地壳结构的高分辨率研究已取得了明显的进展(杨毅等, 2004; 吴庆举等, 1998; 刘启元等, 1996-2000)。近年来, 在一些以固定或流动高密度台阵所提供的远震记录为基础的研究中, 研究人员通过使用类似于倾斜偏移的技术, 得到了以某个台站为参照的接收函数剖面图(Shaw 等, 1985; Ammon, 1990; Randall, 1989; Owens 等, 1987)。图中间断面上的透射转换震相 P_s 波与 P 波的走时差在各台的变化, 形象地显示了间断面的相对起伏情况。

滇西地区是特提斯构造带东部向南突出的弧形岛弧的组成部分, 即濒临环太平洋构造带的交切带。由于多个板块在此汇聚、俯冲碰撞, 以致区域内深大断裂发育, 所以多年来一直是地学界研究的热点地区。

接收函数(Langston, 1979)作为一种研究地壳上地幔结构的有效手段, 随着其信噪比增强技

术、约束手段和反演方法的快速发展, 目前已被广泛应用。

笔者在对接收函数进行理论分析的基础上, 以云南保山地震台为例, 对比分析了 Q 分量和 SV 分量接收函数削弱直达 P 波影响的效果, 并以 ISR91 模型为基础, 进行射线追踪, 将不同射线参数得到的接收函数校正到距参考震中 67° 处, 然后再进行叠加, 以确定台站下方间断面的深度。应用上述动校正接收函数叠加方法, 对云南数字地震台网的保山、畹町、沧源和腾冲子台下方的径向接收函数进行了计算。

1 理论与方法

1.1 接收函数的定义及时间—深度转换

接收函数是将三分量远震记录中的两个水平分量旋转成径向分量和切向分量, 然后用垂直分量分别对它们作反褶积而得到的径向和切向上的时间序列, 从而消除震源和地幔传播路径对远震体波波形的影响, 使得接收函数仅与台站下方的介质结构有关, 而基本与震源和传播路径无关。

如图 1 所示, 若莫霍面是最深的反射界面, 则接收函数反映了界面转换波 P_s、PPP_s 及 P_sS_s 与直达 P 波之间的时差。

* 收稿日期: 2007-07-15.

基金项目: 国家自然科学基金(40674042)和云南省自然科学基金(2006D0011M)联合资助.

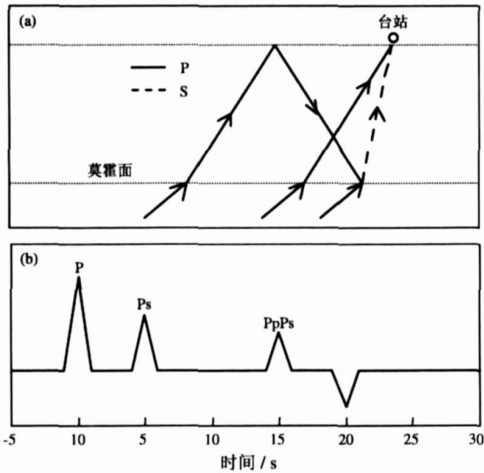


图 1 莫霍面转换震相射线路径 (a) 及相应接收函数 (b)

而 P 转换波和直达 P 波的走时差与地壳厚度 H 之间有如下关系:

$$H = \frac{t_s - t_p}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - \beta} - \sqrt{\frac{1}{V_p^2} - \beta}} \tag{1}$$

式中, β 为射线参数, V_p 和 V_s 分别为纵、横波速度。同理, 多次反射波 PpPs 与 P 转换波之间的时差也提供了如下的约束:

$$H = \frac{t_{PpPs} - t_p}{2 \sqrt{\frac{1}{V_s^2} - \beta}} \tag{2}$$

只要我们给出射线参数和纵、横波速度, 以及 P 转换波与直达 P 波的走时差或者多次反射波与 P 转换波之间的时差, 就可以计算出相应的转换深度。

1.2 Q 分量和 SV 分量接收函数

径向接收函数是利用图 2 a 所示的径向分量与垂直分量进行反褶积得到的。为了更大限度地削弱直达 P 波的影响, 一种比较普遍的方法是坐标几何旋转 (LQT) 方法 (图 2 b), 即先把三分量宽频数字地震记录旋转到径向和切向, 然后再把坐标旋转到 LQT 方向, 其中 L 方向为直达 P 波的射线路径方向, Q 方向与 L 方向正交。对于各向同性介质, L 方向分量主要是 P 波能量, Q 方向分量是 SV 波能量。这种分量几何旋转的方法, 可以最大

限度地保障 P 波能量集中于 L 方向。
设 T 为切向分量, 径向分量 R 垂直于纸面, 入射到地表的入射角为 i (图 2 a), 则:

$$L = Z \cos i + R \sin i$$
$$Q = Z \sin i + R \cos i \tag{3}$$

利用 Q 分量与 L 分量作反褶积, 所得结果称之为 Q 分量接收函数。还有一种是波场矢量分解 (PSH) 方法 (图 2 c), 即把三分量数字地震记录旋转到径向和切向, 得到频率—慢度域的三分量记录 $Z(p, \omega)$, $R(p, \omega)$, $T(p, \omega)$, 然后根据下式分离出上行 P、SV、SH 波的贡献 (Reading 等, 2003), 其表达式为

$$\begin{pmatrix} P(p, \omega) \\ S(p, \omega) \\ H(p, \omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{ZZ}(p) & Y_{ZT}(p) & 0 \\ Y_{RZ}(p) & Y_{RT}(p) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Z(p, \omega) \\ R(p, \omega) \\ T(p, \omega) \end{pmatrix} \tag{4}$$

其中:

$$Y_{ZZ} = -(1 - 2\beta_0^2 \beta) / 2\alpha_0 q_0$$
$$Y_{ZT} = -(1 - 2\beta_0^2 \beta) / 2\alpha_0 q_0$$
$$Y_{RR} = \beta_0^2 / \alpha_0, \quad Y_{SZ} = \beta_0, \quad Y_{TT} = 1/2$$
$$q_0 = (\alpha_0^{-2} - \beta)^{1/2}, \quad \beta_0 = (\beta_0^{-2} - \beta)^{1/2}$$

式中, β 是水平方向的慢度, q_0 和 β_0 是垂直方向的慢度。 α_0 和 β_0 是地表的 P 波和 S 波速度。利用 SV 分量与 P 分量作反褶积, 所得结果称之为 SV 分量接收函数。

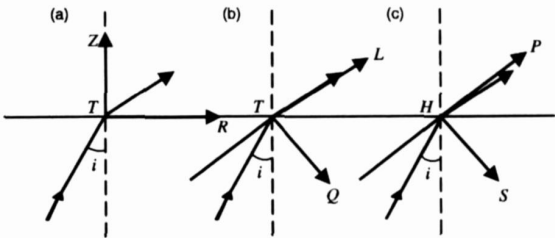


图 2 三分量坐标旋转示意图
(a) 大圆弧方向三分量; (b) LQT 方法旋转;
(c) PSH 方法旋转

为了验证以上两种方法的效果, 我们选取了

保山地震台接收到的一个远震三分量记录（图 3），信号采样率为 50 点 /s，持时为 60 s，预置 10 s，计算出了该台下方的接收函数（图 4）。径向接收函数中，直达 P 波的影响较明显，与之相比，P_s 转换波为弱信号；SV 分量接收函数保证了大部分的 P-S 转换能量集中在 S 波矢量里，有效地抑制了直达 P 波脉冲的影响，突出了 P 转换波；而 Q 分量接收函数虽然对直达 P 波起到了一定的抑制作用，但由于入射角不易精确估算，因此难以最大限度削弱直达 P 波的能量，从而突出了 P 转换波。

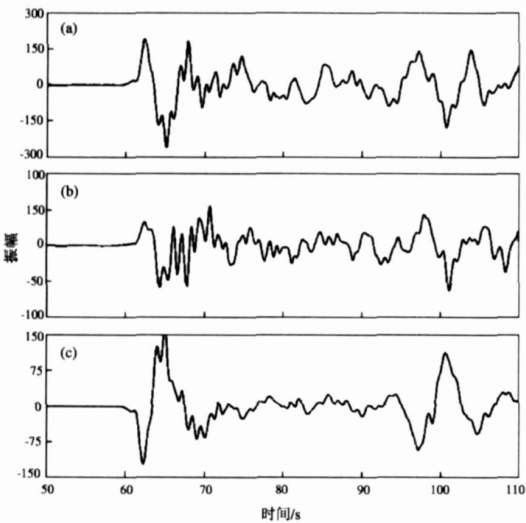


图 3 保山地震台的三分量地震波记录图
(a) EW 向分量；(b) SN 向分量；(c) UD 向分量

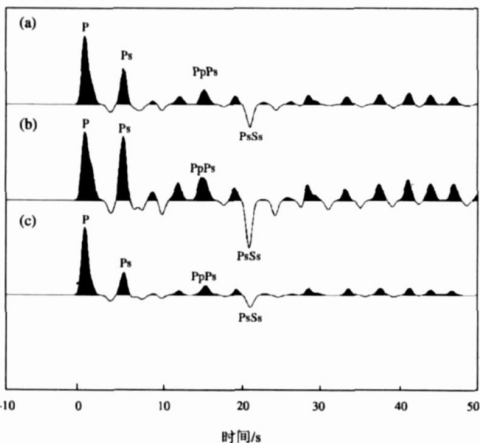


图 4 保山地震台下方的接收函数
(a) 径向接收函数；(b) SV 分量接收函数；
(c) Q 分量接收函数

1.3 基于动校正的接收函数叠加

转换波与直达波的持时差随着震中距的减小而增加。例如，对于深度为 660 km 的不连续面产生的 P_s 震相，在震中距分别为 30° 和 90° 时与直达 P 波的持时差接近 10 s。为了能够探测到接收函数中较弱的转换波震相，其中一个方法是对很多个地震事件的接收函数进行叠加。但由于各个地震事件的射线参数（或震中距）和转换深度的不同，必须先进行动校正。

为了进行接收函数的动校正和叠加，必须建立针对接收函数等价于勘探地震道的概念（Ryberg 等，2000），即引入转换波等效偏移距和等效叠加速度。远震接收函数一般震中距在 23°~80° 之间，如果用标准地球模型 IASP91（Kennet 等，1991），则等价于 P 波在莫霍界面以 37°~23° 角入射，这个范围内正常时差可由下式计算：

$$T_{Ps_1} - T_{P_2} = \frac{Z(v_p - v_s)}{2} (P_1^2 - P_2^2),$$
$$T_{Ps_1} = T_{P_2} + \Delta(t)$$

为了说明动校正对探测接收函数中较弱的转换波震相的有效性，我们用理论接收函数进行验证。单台的理论接收函数是以 IASP91 模型为基础计算出来的，IASP91 模型被修正为含有一个厚度为 60 km 的均匀地壳，P、S 波速度分别为 6.5 km/s 和 3.75 km/s。这些理论接收函数的震中距在 30°~90° 之间，每隔 2° 计算一个接收函数，且震源深度均固定在 600 km 处，以避免深震震相（PP 和 sP）对转换波震相的干扰。各道接收函数进行简单叠加后如图 5a 所示，叠加后的地壳中的转换波震相增强了，但随着转换深度的增加，410 km 和 660 km 不连续面处的 P_s 转换波被削弱甚至消失了。

为了增强上地幔不连续面的深部转换震相，一种延迟叠加的方法（Vinnik 等，1997；Kind 等，1988）被广泛运用，即沿着时差曲线对接收函数进行叠加，并挑选出一系列转换深度对时差影响进行校正。通过实验，得到一个用于校正的参考慢度，其值为 6.4 s/°（对应的震中距为 67°）。

一般情况下，动校正可以通过使用 P、S 波的三维速度模型进行射线追踪计算得到，实际应用

中, 动校正通过使用一维参考模型 (一般使用 IAS91) 进行预测而获得足够的精确度。这些速度模型的区域性变化导致时差曲线产生不到 1 s 的变化, 那就意味着, 时差校正使所有的 P 走时曲线都平行于 P 波, 并固定在选取的 67°震中距上, 校正的走时仅对这个震中距有效。

动校正之后的接收函数及其叠加结果如图 5b 所示, 410 km 和 660 km 处的不连续面被校准到一条垂直的线上, 叠加后这两个深度处的微弱转换波明显增强, 多次反射波的震相被削弱。

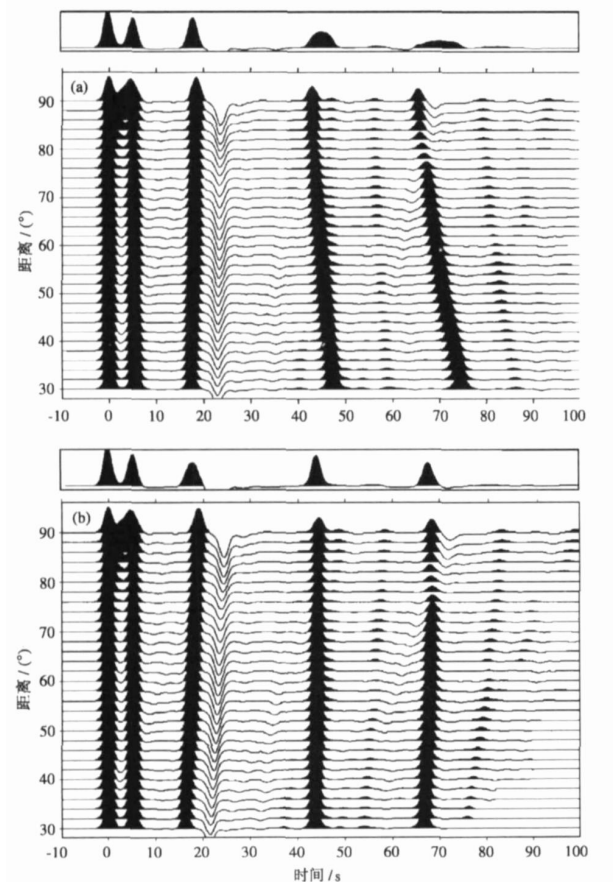


图 5 动校正前 (a)、后 (b) 不同震中距接收函数的叠加

2 滇西地区的上地幔间断面

数字实验表明, 动校正叠加技术有效地增强了深部转换信号。为了检验上述动校正接收函数叠加方法的实际的应用效果, 笔者采用云南数字

地震台网 2000 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 30 日之

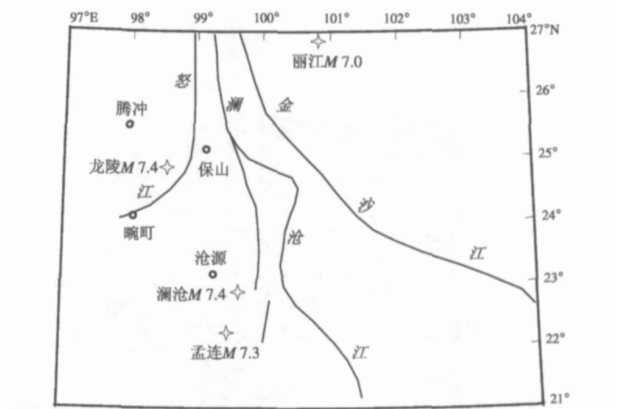


图 6 台站分布示意图

间, 保山、晚町、沧源和腾冲台 (图 6) 记录到的震中距在 30°~80°之间、震级在 6.5 级以上的远震事件, 计算了台站下方的 S_v分量接收函数。

Georg 等 (1995) 研究发现, 接收函数时间—深度转换过程中, 在地壳内直达 P 波与 P 转换波的时差为 1 s 时, 转换界面的深度大致为 8 km, 在地幔中则为 10 km, 利用这一关系就可以估算台站下方的转换界面深度。

图 7a 是保山台 73 个接收函数通过动校正之后的叠加结果。从图中可以明显看出莫霍面 P_s波与 P 波的时差为 5 s, 多次波 PPP 的时差为 15 s, 估算得到地壳厚度为 40 km。另外, 在 28 s~39 s 和 70 s 处还分别存在明显的界面, 其对应的深度分别为 280 km、390 km、470 km 和 700 km。

图 7b 是晚町台 66 个接收函数通过动校正之后的叠加结果, 从图中可以很明显的看出 Moho 面 P_s波与直达 P 波的时差为 4 s, 多次波 PPP 的时差为 12 s, 估算得到地壳厚度为 32 km。另外, 28 s 和 70 s 处还分别存在明显的界面, 其对应的深度分别为 280 km 和 700 km。

图 7c 是沧源台 67 个接收函数通过动校正之后的叠加结果。从图中可以明显看出莫霍面 P_s波与直达 P 波的时差为 4 s, 多次波 PPP 的时差为 12 s, 估算得到地壳厚度为 32 km。另外, 在 30 s~45 s、54 s 和 70 s 处还分别存在明显的界面, 其对应的深度分别为 300 km、450 km、540 km 和 700 km。

图 7d 是腾冲台 89 个接收函数通过动校正之后的叠加结果。从图中可以明显看出莫霍面 P_s波与直达 P 波的时差为 5 s, 多次波 PPP 的时差为 15 s,

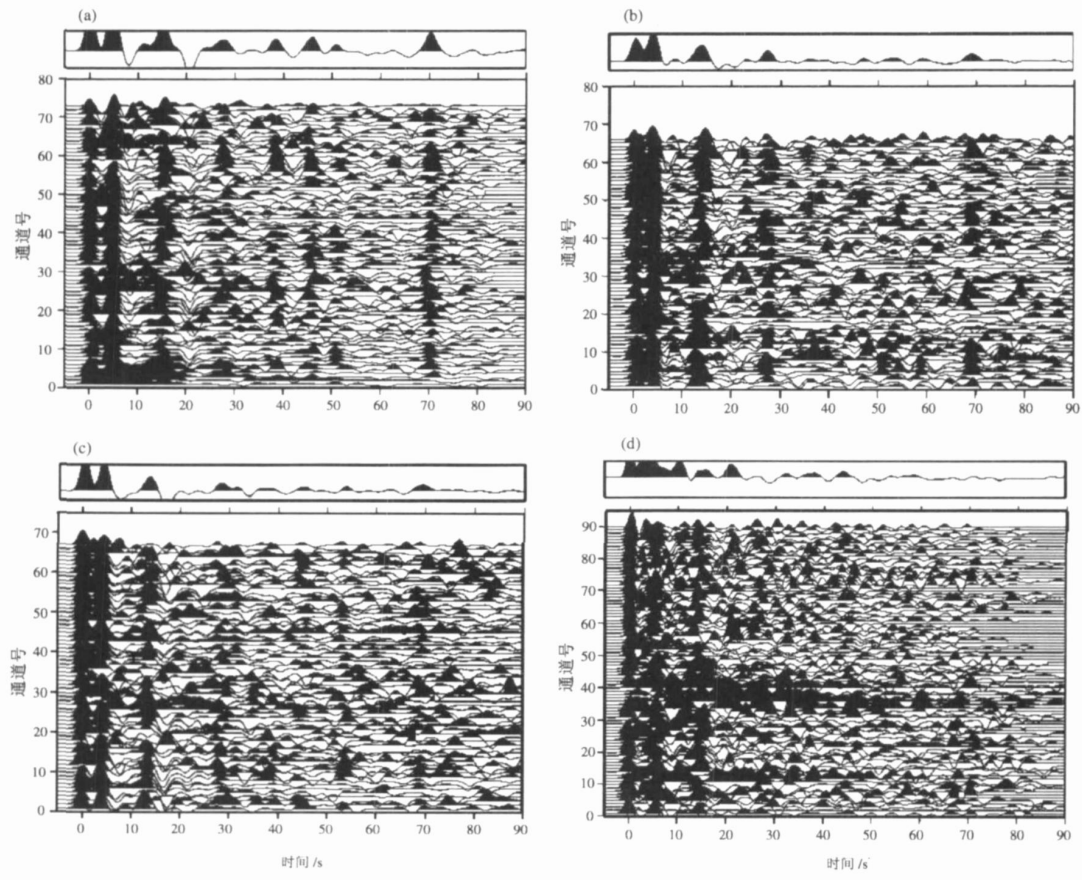


图 7 经动校正之后各台下方的接收函数
及其叠加结果

(a) 保山台; (b) 畹町台; (c) 沧源台; (d) 腾冲台

估算得到地壳厚度为 40 km。另外，在 21 处还存在明显的界面，其对应的深度为 210 km。

3 结论与讨论

径向接收函数由于计算过程简单，被广泛用来反演地壳结构。然而，虽然是远震记录，P波以较小的传播角入射到地表，但径向分量和 Z分量并不垂直，以致接收函数中不可能完全消除直达 P波的影响。并且，接收函数中 P波的能量相当强，以致掩盖了深部界面的微弱转换信号。另外，在反演过程中，程序优先拟合能量强的 P波，而对弱的 P波拟合程度较差，从而掩盖了反演的真正意图。为此，笔者通过计算 SV分量接收函数，有效地压制了直达 P波的影响，增强了深部界面转换波幅度。此外，笔者还引入了勘探地震学中的

动校正技术，以 IAS91模型为基础，将不同震中距的接收函数校正到 67°处，使同一界面产生的转换波具有相同的走时，经叠加后信号得到增强。

保山、沧源、畹町和腾冲地震台的接收函数叠加结果表明，滇西地区地壳厚度在 32~40 km之间，除腾冲台以外，全球普遍存在的 660 km间断面上转换对较明显，只不过滇西地区该间断面的深度为 700 km；另外，在 290~300 km处还存在一个明显的间断面。值得一提的是，腾冲地区 700 km深处的间断面不明显，而滇西地区 290~300 km深处存在的间断面在这里却只有 210 km深。笔者认为腾冲地区地热发育、火山活动频繁，地幔物质上涌可能会改变间断面的结构。总之，滇西地区上地幔 410 km间断面较全球浅、660 km间断面较全球深这一现象绝非偶然，它可能是深部物质运移的结果。因为本文仅用了 4 个台站的资

料，所以更细致的问题还有待进一步研究。

参考文献:

- 刘启元, Kind R, 李顺成, 等. 1996. 接收函数复频谱比的最大或然性估计及非线性反演 [J]. 地球物理学报, 39 (4): 502—513.
- 刘启元, 陈九辉, 李顺成, 等. 2000. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔 S 波速结构及其地震成因的探讨 [J]. 地球物理学报, 43 (3): 356—364.
- 吴庆举, 曾融生. 1998. 用宽频带远震接收函数研究青藏高原的地壳结构 [J]. 地球物理学报, 41 (5): 669—679.
- 杨毅, 周惠兰. 2001. 用接收函数方法研究中国及邻区上地幔间断面的埋藏深度 [J]. 地球物理学报, 44 (6): 783—793.
- Ammon C J, Randall G E, Zandt G. 1990. On the non-uniqueness of receiver function inversions [J]. JGR 95 (B10): 15303—15318.
- George Z, Stephen C M, Terry C W. 1995. Crust and mantle structure across the Basin and Range Colorado Plateau boundary at 37° N latitude and implications for Cenozoic extensional mechanism [J]. JGR 100 (B6): 10529—10548.
- Kennett B L N, Engdahl E R. 1991. Travel times for global earthquake location and phase identification [J]. Geophys J Int, 105 (2): 425—465.
- Kind R, Vinnik L P. 1988. The upper mantle discontinuities underneath

- the GRF array from P to S converted Phases [J]. JGR 62: 138—147.
- Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves [J]. JGR 84 (B9): 4794—4762.
- Owens T J, Taylor S R, Zandt G. 1987. Crustal structure at regional seismic test network stations determined from inversion of broadband teleseismic P waveforms [J]. BSSA 77: 631—632.
- Randall G E. 1989. Efficient calculation of differential seismograms for lithospheric receiver functions [J]. J Geophys Int, 99: 469—481.
- Reading A, Kennett B, Sambridge M. 2003. Improved inversion for seismic structure using transformed S-wave vector receiver functions: Removing the effect of the free surface [J]. Geophys Res Lett, 30 (19): 1981.
- Rhie G T, Weber M. 2000. Receiver function arrays a reflection seismic approach [J]. Geophys J Int, 141 (1): 1—11.
- Shaw P R, Orcutt J A. 1985. Waveform inversion of seismic refraction data and application to young Pacific crust [J]. Geophys J R Astr Soc, 82: 385—414.
- Vinnik L P. 1997. Detection of waves converted from P to SV in the mantle [J]. Phys Earth Planet Int, 15: 39—45.

Depths of Discontinuity Surfaces in Crust and Upper Mantle beneath West Yunnan Determined by Stacking Receiver Function

XIA Jing-yu, YANG Hai-yun, HU Jia-fu

(Department of Geophysics, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)

Abstract

Through introducing the moveout correction technique in exploration seismology, we obtained a method to compute the receiver function beneath a station by stacking receiver function after normal moveout correction. We used the method to determine the SV-component receiver functions from 3-component broad-band digital recordings which were recorded by the Baoshan, Wandong, Cangyuan, Tengchong stations. The results show that at the Baoshan, Wandong, Cangyuan stations, the depth of discontinuity is 700 km and it is deeper than the average of 660 km over the globe, meanwhile, there may be existed several discontinuities between 290 km and 500 km; however, the discontinuity beneath the Tengchong station is not clear at the depth of 700 km, and the depth of discontinuity in upper mantle is only 210 km, shallower than that beneath other 3 stations.

Key words: receiver function; normal moveout correction; stacking; surface of discontinuity; West Yunnan.



张 昱 甘肃省地震局高级工程师。1986年毕业于西安地质学院,获工学学士学位。主要从事地下流体地震分析预报等方面的研究。



何案华 中国地震局地壳应力研究所助理研究员。2005年毕业于中国地震局地壳应力研究所,获地球物理硕士学位。主要从事地震前兆仪器的研制和网络技术工作。



史红军 长春市地震局榆树地震监测台工程师。1996年毕业于中国地质大学(北京),主要从事地震监测工作。



王 博 中国地震局地壳应力研究所在读硕士研究生。2005年毕业于聊城大学环境与规划学院,获理学学士学位。现主要从事地震流体动力学与地震分析预报研究工作。



王 军 中国地震局地壳应力研究所在读硕士研究生。主要从事地震前兆数据分析和软件设计工作。



张丽芬 中国地震局武汉地震研究所研究实习员。2003年华东地质学院资源勘查工程专业,获学士学位。2006年毕业于东华理工大学地球化学专业,获硕士学位。参与并承担了多项水库地震相关研究项目,包括国家科技支撑项目、国家自然科学基金项目、地震研究所科技发展基金项目等。主要从事水库诱发地震工作。



夏静瑜 云南大学地球物理系在读硕士,主要从事地球物理学方面的研究工作。