

吴庆举,李永华,张瑞青等. 用多道反褶积方法测定台站接收函数. 地球物理学报, 2007, 50(3): 791 ~ 796

Wu Q J, Li Y H, Zhang R Q, et al. Receiver function estimated by multi-channel deconvolution. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(3): 791 ~ 796

用多道反褶积方法测定台站接收函数

吴庆举,李永华,张瑞青,张乃铃

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘 要 本文提出了一种在时间域用多道反褶积测定台站接收函数的方法,以提高台站接收函数的测量精度与分辨率.在单道反褶积的基础上,选取若干个质量较好的远震 P 波波事件,构成多道信号,以垂直分量为输入,径向和切向分量作为期望输出,依据最小二乘,设计多道滤波器,提取接收函数.合成地震图与观测地震图的检验表明,多道滤波方法能有效地测定台站接收函数,特别是多道反褶积能够有效地恢复地壳上地幔间断面所产生的弱转换波震相.

关键词 接收函数,反褶积,多道滤波器

文章编号 0001-5733(2007)03-0791-06

中图分类号 P315

收稿日期 2005-11-28, 2006-12-09 收修定稿

Receiver function estimated by multi-channel deconvolution

WU Qing-Ju, LI Yong-Hua, ZHANG Rui-Qing, ZHANG Nai-Ling

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

Abstract Time-domain multi-channel deconvolution is put forward to estimate receiver function, to improve resolution. Based on the deconvolution results of individual teleseismic P waveforms, a number of events with good quality are selected to form multi-channel signals, the vertical components are regarded as inputs, and radial and transverse components are taken as expected outputs. Least-square error is used to design the multi-channel filter, to get the common filter factors, i. e., receiver function. Both synthetic and real data experiments show that multi-channel deconvolution is an effective approach to measure receiver function, especially, it can recover the weak converted phases from the upper mantle.

Key words Receiver function, Deconvolution, Multi-channel filter

1 引 言

接收函数^[1~6]是用远震 P 波波形的垂直分量对径向分量和切向分量作反褶积处理后得到的时间序列,被认为基本消除了震源时间函数和深地幔传播路径效应的影响,可以近似为台站下方地壳上地幔速度结构对近垂直入射平面波的脉冲响应.为压制噪音,提高接收函数的信噪比,通常要对同一方向、

震中距变化较小的多个远震事件的接收函数进行叠加,得到该方向—震中距对的一个接收函数的平均估计.考察台站接收函数的方位性变化特征,可以研究台站下方地壳上地幔速度结构的横向变化以及各向异性.

接收函数实质上是近垂直入射的脉冲平面波在台站下方速度界面产生的 PS 转换波及地表与速度界面之间的多次反射/转换波.与其他地震学研究方法相比,接收函数具有较小的横向采样范围,受介质

基金项目 国家自然科学基金(40274029)资助.

中国地震局地球物理研究所论著号:06AC1012.

作者简介 吴庆举,男,1966年生,固体地球物理学博士,研究员,主要从事地震学、地球内部结构和地球动力学研究.

E-mail: wuqj@ceairigp.ac.cn

横向非均匀性的影响相对较小,具有较高的横向分辨率,特别是接收函数对 S 波速度结构非常敏感,而 S 波速度结构是其他地震学方法难以很好地加以约束的重要参数.因此,接收函数成为观测台站下方地壳上地幔 S 波速度结构最为理想的研究方法之一,被广泛地应用于地壳上地幔间断面的探测与研究^[1-6].

目前,接收函数大致沿着两个相互平行、相对独立的研究方向发展:一是分层结构研究,旨在揭示地壳及上地幔顶部 S 波速度的垂向变化^[7]、倾斜界面的产状^[8]、介质的各向异性特征^[9]、地壳泊松比及地壳厚度等^[10];二是偏移成像研究,试图揭示地壳上地幔间断面的横向变化^[11-16].

测定精确的台站接收函数是接收函数研究的首要步骤.传统的接收函数测定是在频率域用频谱相除并反变换回时间域得到.由于实际的远震资料是有限带宽的,且含有各种噪音,垂直分量一般都存在近零的频谱成分,导致频率域反褶积不够稳定,故要对垂直分量作预白化处理,压制其近零值的频谱成分.但与此同时,又不可避免地压制了能量较弱的转换波震相,特别是上地幔间断面的微弱震相.为此,人们提出了多种反褶积方法,试图提高台站接收函数的测定精度和分辨率.如最大或然性估计^[2]、Wiener 滤波^[17,18]、最大熵谱反褶积^[19]、多重镶窗^[20]、迭代求解^[21]等.

本文提出了一种用多道滤波方法测定台站接收函数的方法,试图以多个远震事件的垂直分量作为输入,水平分量作为输出,设计多道滤波因子,来测定台站接收函数.

2 接收函数和反褶积

接收函数是用三分量远震 P 波波形的垂直分量对径向和切向分量作如下的数学运算后得到的时间序列^[18,19],

$$R(t) = \frac{1}{2} \frac{D_H(\omega)}{D_V(\omega)} e^{i\omega t} d, \quad (1)$$

其中, $R(t)$ 为接收函数, $D_H(\omega)$ 和 $D_V(\omega)$ 分别是水平分量和垂直分量的频谱, ω 是圆频率, t 是时间.

上述数学运算过程称之为反褶积,所得到的接收函数可以看成是台站下方接收介质的近垂直入射平面波的脉冲响应,而与震源时间函数及路径传播效应基本无关.

从三分量远震 P 波波形中分离出台站接收函数

是接收函数研究的关键.人们提出了多种方法来提高接收函数的测量精度和分辨率^[2,17-21],可以概括为频率域和时间域两类方法.频率域算法通过改善频谱估计的精度和分辨率来测定接收函数,时间域算法则依据一定的准则,设计相应的滤波器来计算接收函数.

我们则提出了一种多道滤波的方法,通过设计多道滤波器,在时间域提取接收函数.设计多道滤波器的关键在于滤波器法则的选取.不同的法则决定了不同的滤波器,如最小二乘滤波器、最大似然滤波器、最大熵滤波器等.

我们将以最小二乘滤波器为例,也就是通常所说的 Wiener 滤波,介绍多道滤波的基本原理,并可以非常自然地推广应用于其他形式的多道滤波器.

3 多道滤波

台站接收函数一般是同一方向、震中距变化不大的多个远震事件接收函数的叠加平均,构成某一方向—震中距对的接收函数平均估计,以压制噪音,提高接收函数的信噪比.既然多个事件接收函数的叠加平均可以看成是某一方向—震中距对的接收函数,那么,我们可以认为那些方位角—震中距变化不大的远震事件具有非常相似的接收函数,可以用一个接收函数代替.再者,无论台站下方地壳上地幔速度结构多么复杂,对于方位角—震中距变化不大的若干远震事件而言,理论上,它们应具有非常相似的接收响应.因此,在提取台站接收函数时,我们可以直接从多个远震事件中提取一个共同的接收响应,也就是接收函数,而不必先一一求取单个远震事件的接收函数,再通过叠加平均的方法,获取一个接收函数的平均估计.我们不妨将前一种方法称之为接收函数同步测定法,而将后一种方法称之为接收函数异步测定法.

较之于先提取后叠加的接收函数异步测定法,接收函数的同步测定法可以在接收函数的计算过程中:从若干个看似不相干的远震波形数据中,根据波形的相干性,消除震源时间函数及路径效应,并压制噪音,保留并增强相干信号,得到待求的接收函数.

我们以最小二乘为例,介绍一下多道滤波的基本思想,这一思路可以自然地推广到其他形式的多道滤波器.基于最小二乘法法则的滤波实质上就是著名的 Wiener 滤波.

我们首先简单介绍一下单道 Wiener 滤波.用向

量 x_t^i 表示第 i 个远震 P 波波形垂直分量的时间序列, y_t^i 表示第 i 个远震 P 波波形水平分量的时间序列, f_t^i 表示第 i 个接收函数的时间序列, 在频率域分别用 $X^i(\omega)$, $Y^i(\omega)$ 和 $F^i(\omega)$ 表示。

根据接收函数定义可知, 远震 P 波波形的水平分量和垂直分量以及接收函数这三个时间序列在频率域可表示为

$$Y^i(\omega) = X^i(\omega) F^i(\omega); \quad (2)$$

在时间域可表示成如下的褶积形式:

$$y_t^i = f_t^i * x_t^i. \quad (3)$$

显然可以将接收函数时间序列视为滤波器的单位脉冲响应, 而将远震 P 波波形的垂直分量和水平分量分别当成滤波器的输入和输出, 但事实上不可能得到这样的滤波器, 即在远震 P 波波形的垂直分量的激励下, 其输出与远震 P 波波形的水平分量完全一致, 而只能得到它的近似估计, 即

$$y_t^i = f_t^i * x_t^i. \quad (4)$$

我们期望在 x_t^i 的激励下滤波器 f_t^i 的实际输出 y_t^i 与期望输出 y_t^i 尽可能地相似。

用 e_t^i 代表实际输出与期望输出之间的误差向量:

$$e_t^i = y_t^i - y_t^i = y_t^i - f_t^i * x_t^i. \quad (5)$$

以误差向量的 l_2 模取极小作为滤波器的原则, 就可得到所谓的 Wiener 滤波器, 误差向量的 l_2 范数可表示成

$$E^i = \sum_t (e_t^i)^2. \quad (6)$$

对 (6) 式求极小, 可得到如下的矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_1 & a_0 & a_1 & \dots & a_{n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0^i \\ f_1^i \\ \dots \\ f_n^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 f_t^i 为待定的第 i 个接收函数时间序列, a 为第 i 个远震 P 波波形垂直分量的自相关系数, c 为第 i 个远震 P 波波形垂直分量与水平分量的互相关系数, 即

$$a = \sum_{t=0}^n x_t^i x_{t+}^i, \quad (8)$$

$$c = \sum_{t=0}^n x_t^i y_{t+}^i.$$

自相关系数矩阵是 Toeplitz 矩阵, 由于其对称性, 可采用 Levinson 递推算法求解^[18]。

(7) 式可以简化为如下的表达式:

$$A^i f^i = C^i. \quad (9)$$

对于多个远震事件, 接收函数自身独立于地震事件, 换言之, 所有远震事件均具有非常相似的接收函数, 而与地震事件无关。

有两种设计多道滤波器的方法, 分别加以介绍。

(1) 将 (7) 式或 (9) 式自然扩展成 $(M \times N) \times N$ 维的超定矩阵方程, 其中, M 为参与运算的远震事件数, N 为待求接收函数的数据长度, 表示如下:

$$A f = C, \quad (10)$$

其中, 矩阵 A 为形如 (7) 式或 (9) 式的 M 个远震事件垂直分量的自相关系数所组成的 $(M \times N) \times N$ 维的矩阵, C 则为 M 个远震事件垂直分量与水平分量的互相关系数所组成的长度为 $M \times N$ 的向量, f 为多道滤波所得到的 N 维向量。超定矩阵方程 (10) 式的求解可以用奇异值分解 (SVD) 方法。

(2) 直接从误差表达式 (6) 式出发, 计算 M 个远震事件的预测误差平方和,

$$E = \sum_{i=1}^M E^i = \sum_{i=1}^M \sum_t (e_t^i)^2. \quad (11)$$

对 (11) 式求极小, 即可得到待求的接收函数。

本文所采用的是第二种方法。

4 资料检验

我们分别用合成地震图和实际观测到的远震资料对本文所提出的多道滤波反褶积方法进行了数值检验, 以考察多道滤波反褶积的实际应用效果。

首先, 我们用合成地震图检验多道滤波反褶积方法。我们采用的是单层半无限空间介质, 但在地壳

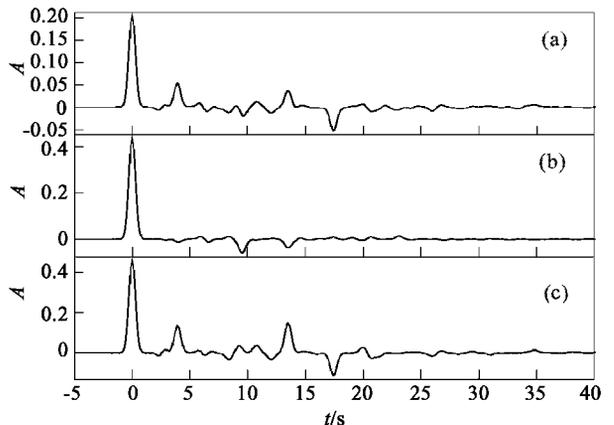


图 1 合成地震图及其接收函数

(a) 径向分量; (b) 垂直分量; (c) 接收函数。

Fig. 1 The synthetic seismogram and receiver function

(a) Radial component; (b) Vertical component; (c) Receiver function.

和上地幔中分别加了一个低速薄层和高速薄层,薄层厚度均为 2 km,速度变化量均为 0.2 km/s,以模拟小速度差界面产生的弱转换波震相.图 1 是脉冲响应的合成地震图及其理论接收函数.

为了在合成地震图中引入震源时间函数和随机噪音,更为逼真地模拟实际的观测地震图,我们选取了 10 个不同远震事件的 P 波波形的垂直分量作为等效震源时间函数(图 2),随机噪音自然也包括其中.分别用图 2 所示的等效震源时间函数与图 1 所

示的合成地震图的径向和垂直分量做褶积运算,得到了 10 个虚拟的远震波形记录.

我们首先用单道 Wiener 滤波反褶积方法计算出相互独立的 10 个接收函数,然后叠加平均,得到 10 个虚拟远震事件接收函数的均值.我们再用本文所论述的方法对上述 10 个虚拟远震事件进行多道反褶积处理,得到一个统一的接收函数.两种方法所得结果示于图 3.

对比图 3a 和图 3b 不难看出,多道滤波反褶积

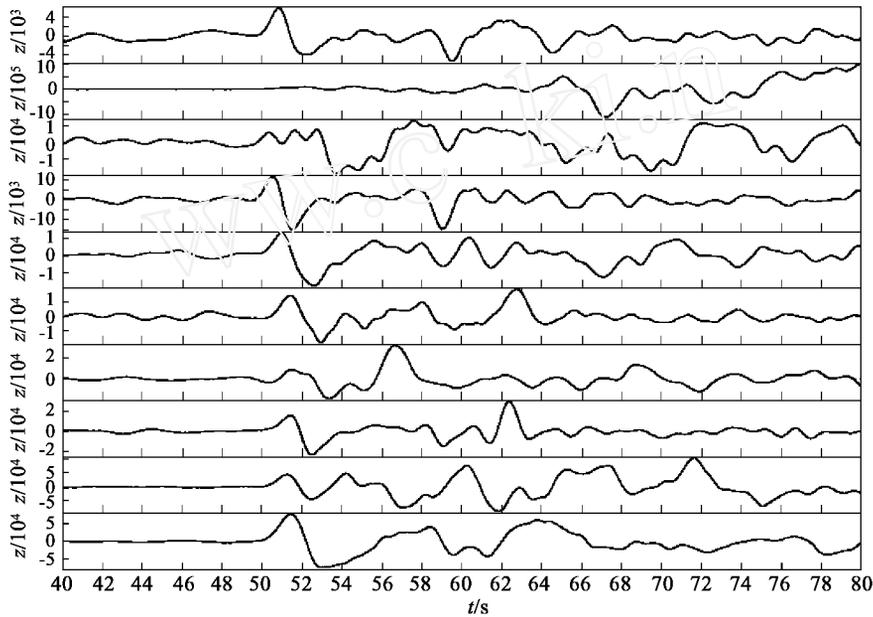


图 2 远震波形数据的垂直分量

Fig. 2 The vertical component of teleseismic waveform

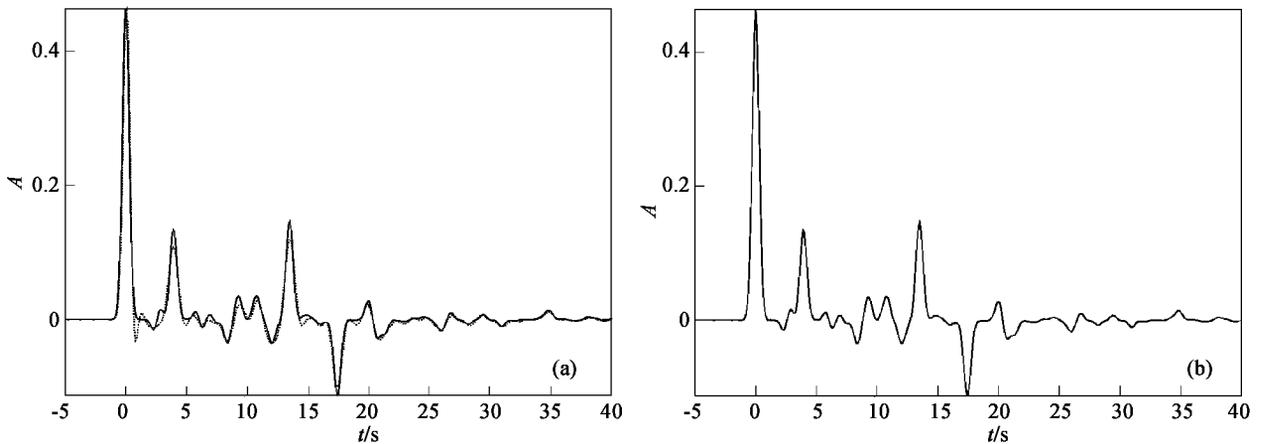


图 3 合成地震图的比较

(a) 实线:合成接收函数,虚线:单道反褶积接收函数;(b) 实线:合成接收函数,虚线:多道反褶积接收函数.

Fig. 3 Comparison for synthetic receiver function

(a) Solid: Synthetic receiver function, Dot: the stacked receiver function from single event deconvolution;
(b) Solid: Synthetic receiver function, Dot: the receiver function from multi-channel deconvolution.

能得到与理论值近乎完全一致的接收函数,其误差要远远小于单道反褶积再叠加的结果,表明多道滤波反褶积的有效性.需要强调的是,单道反褶积再叠加法造成了地壳和上地幔弱转换波震相(分别位于 Moho 界面强转换波前后,介于 0~7.5 s 之间)的明显畸变,而多道滤波反褶积则能非常精确地恢复弱转换波震相.

我们又进一步用实际地震数据对单道反褶积方法和多道反褶积方法作了对比.我们选取了同一台

站记录到的来自同一方向、震中距变化不大的 10 个远震事件的三分量 P 波波形数据,分别用单道反褶积或多道反褶积提取了接收函数,结果示于图 4.从图 4 可以看出,与单道反褶积相比较,多道滤波反褶积所提取的接收函数的波形更加尖锐,振幅更强.值得指出的是,多道滤波反褶积所提取的接收函数在 35s 以后明显强于单道反褶积,而上地幔过渡带之间的弱转换波震相一般出现在 35~80 s 这一时窗范围内.

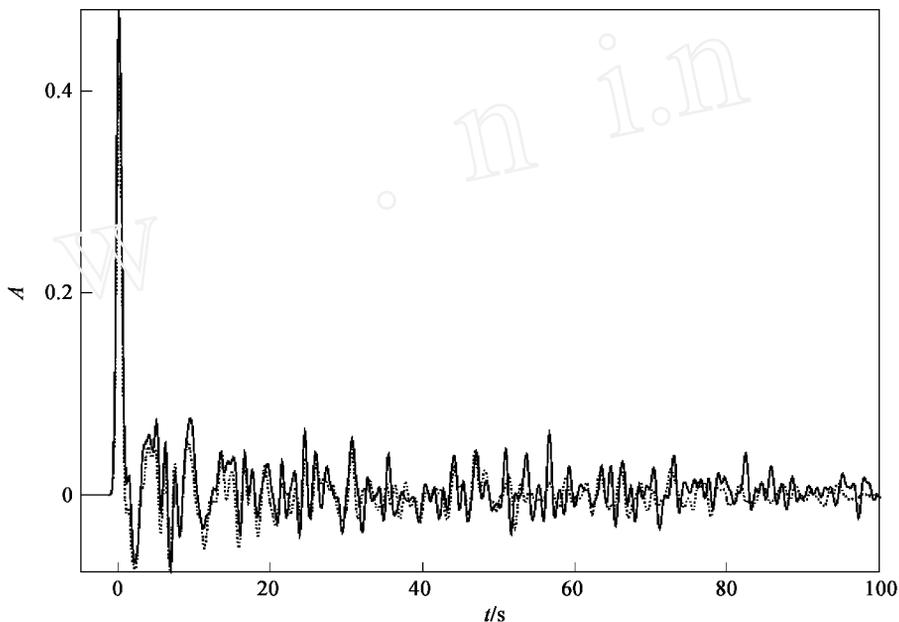


图 4 实测地震图的对比

虚线:单道反褶积接收函数,实线:多道反褶积接收函数.

Fig.4 Comparison of real data

Dot: the stacking receiver function from single event deconvolution;

Solid: the receiver function from multi-channel deconvolution.

5 结 论

多道滤波反褶积方法依据一定的准则,以来自同一方向、震中距变化不大的多个远震事件的垂直分量作为输入,水平分量作为输出,设计多道滤波因子,从而从多个远震事件中测定出统一的台站接收函数.在接收函数的计算过程中,若干个看似不相干的远震波形数据,在多道滤波算子的作用下,根据波形的相干性,消除震源时间函数及路径效应,压制噪音,保留并增强相干信号.

合成资料与实际资料的检验表明,多道滤波反褶积不仅能够有效地恢复接收函数,而且具有一定

的、从背景噪音中提取弱间断面转换波的本领,提高接收函数的分辨率,在提取台站接收函数方面具有潜在的优势,值得加以应用和推广.

参考文献(References)

- [1] Owens T J, 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.*, 1987, **89** (B9): 7783~7795
- [2] 刘启元, Rainer K, 李顺成. 接收函数复谱比的最大或然性估计及非线性反演. *地球物理学报*, 1996, **39**(4): 502~511
Liu Q Y, Rainer K, Li S C. Maximal likelihood estimation and nonlinear inversion of the complex receiver function spectrum ratio. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 1996, **39**(4): 502~511
- [3] 刘启元, Rainer K, 李顺成. 中国数字地震台网的接收函数及

- 其非线性反演. 地球物理学报, 1997, **40**(3): 356 ~ 368
- Liu Q Y, Rainer K, Li S C. The receiver functions at the stations of the Chinese digital seismic network (CDSN) and their nonlinear inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(3): 356 ~ 368
- [4] 刘启元, 李顺成, 沈 扬等. 延怀盆地及其邻区地壳上地幔速度结构的宽频带地震台阵研究. 地球物理学报, 1997, **40**(6): 763 ~ 773
- Liu Q Y, Li S C, Shen Y, et al. Broadband seismic array study of the crust and upper mantle velocity structure beneath Yanhuai basin and its neighbouring region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(6): 763 ~ 773
- [5] 刘启元, 陈九辉, 李顺成等. 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. 地球物理学报, 2000, **43**(5): 356 ~ 365
- Liu Q Y, Chen J H, Li S C, et al. Passive seismic experiment in Xinjiang Jiashi strong earthquake region and discussion on its seismic genesis. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(5): 356 ~ 365
- [6] 刘启元, Rainer Kind, 陈九辉等. 大别造山带壳幔界面的断错结构和壳内低速体. 中国科学(D), 2005, **35**(4): 304 ~ 313
- Liu Q Y, Rainer K, Chen J H, et al. Dislocation structure of the crust-mantle boundary and low-velocity body within the crust beneath the Dabie Shan collision orogen. *Science in China*(Series D), 2005, **48**(7): 875 ~ 885
- [7] 吴庆举, 曾融生. 用宽频带远震接收函数研究青藏高原的地壳结构. 地球物理学报, 1998, **41**(5): 669 ~ 679
- Wu Q J, Zeng R S. The crustal structure of Qinghai-Xizang plateau inferred from broadband teleseismic waveform. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, **41**(5): 669 ~ 679
- [8] Zhu L P, Owens T J, Randall G E. Lateral variation in crustal structure of the Northern Tibetan Plateau inferred from teleseismic receiver functions. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1995, **85**(6): 1531 ~ 1540
- [9] Levin V, Park J. Crustal anisotropy beneath the Ural mtns foredeep from teleseismic receiver functions. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**: 1283 ~ 1286
- [10] Zhu L P, Kanamori H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 2969 ~ 2980
- [11] Zhu L P. Crustal structure across the San Andreas Fault, Southern California from teleseismic converted waves. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 2000, **179**: 183 ~ 190
- [12] 吴庆举, 曾融生, 赵文津. 喜马拉雅—青藏高原的上地幔倾斜构造与陆-陆碰撞过程. 中国科学(D), 2004, **34**(10): 919 ~ 925
- Wu Q J, Zeng R S, Zhao W J. The upper mantle structure of the Tibetan Plateau and its implication for the continent-continent collision. *Science in China*(Series D), 2005, **48**(8): 1158 ~ 1164
- [13] Ai Ynshuang, Zheng Tianyu, Xu W W, et al. A complex 660 km discontinuity beneath northeast China. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2003, **212**: 63 ~ 71
- [14] Ai Ynshuang, Zheng Tianyu. The upper mantle discontinuity structure beneath eastern China. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(21): 2089, doi:10.1029/2003GL017678
- [15] Ai Y S, Zhao D P, Gao X, et al. The crust and upper mantle discontinuity structure beneath Alaska inferred from receiver functions. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2005, **150**: 339 ~ 350
- [16] Tian X B, Wu Q J, Zhang Z J, et al. Joint imaging by teleseismic converted and multiple waves and its application in the INDEPTH passive seismic array. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L2131510.1029
- [17] Gurrrola H, Baker G E, Minster J B. Simultaneous time-domain deconvolution with application to the computation of receiver functions. *Geophys. J. Int.*, 1995, **120**: 537 ~ 543
- [18] 吴庆举, 田小波, 张乃铃等. 用 Wiener 滤波方法提取台站接收函数. 中国地震, 2003, **19**(1): 41 ~ 47
- Wu Q J, Tian X B, Zhang N L, et al. Receiver function estimated by Wiener filtering. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2003, **19**(1): 41 ~ 47
- [19] 吴庆举, 田小波, 张乃铃等. 计算台站接收函数的最大熵谱反褶积方法. 地震学报, 2003, **25**(4): 382 ~ 389
- Wu Q J, Tian X B, Zhang N L, et al. Receiver function estimated by Wiener filtering. *Acta Seismologica Sinica*, 2003, **19**(1): 41 ~ 47
- [20] Park J, Levin V. Receiver functions from multiple-taper spectral correlation estimates. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2000, **103**(26): 899 ~ 917
- [21] Ligorria J P, Ammon C J. Iterative deconvolution and receiver function estimation. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1999, **89**(1): 395 ~ 400

(本文编辑 胡素芳)