维普资讯 http://www.cqvip.com

⑦614-621

第22卷 第6期 地震学报 Vol. 22, No. 6
2000年11月 (614~621) ACTA SEISMOLOGICA SINICA Nov., 2000

文章编号：0253-3782(2000)06-0614-08

横向非均匀介质远震体波接收函数的波场特征*

陈九辉 刘启元 P315.31

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所)

摘要 系统研究了台站下方存在倾斜界面时，远震体波接收函数的波场特征及多方位接收函数对台站下方介质横向非均匀特征的反映能力. 我们利用合成三维横向非均匀介质接收函数的 Maslov 方法，具体模拟了台站下方存在倾斜界面时的接收函数响应. 结果表明，当台站下方存在倾向一致的倾斜界面时，远震体波接收函数的径向分量和切向分量分别随震源方位角的变化呈现对称和反对称的规律性变化. 利用不同震源方位角接收函数径向分量和切向分量的变化规律，可以估计台站下方界面的倾向和倾角. 当台站下方各界面的倾向不同时，随方位角的变化，接收函数只能直观给出界面的整体倾向. 实际观测数据的分析结果表明，对于利用单个台站接收函数研究台站下方介质的横向非均匀特征来说，简单倾斜界面可以看作较好的一级近似.

关键词 波场特征 接收函数 横向非均匀介质 远震体波 Maslov法.

中图分类号：P315.2 **文献标识码**：A

引言

自80年代以来，远震体波接收函数日益广泛用于研究地壳上地幔结构. 这种方法日益受到人们的重视，不仅是由于接收函数方法经济且具有较高的垂向分辨率，而且还因为利用这种方法可以研究台站下方地壳上地幔结构的横向变化. 在美国的大陆岩石圈动力学计划中，接收函数方法被放在非常重要的位置. 迄今为止，远震体波接收函数的一维反演技术已经比较成熟，并且已经取得了许多成果(Owens *et al.*, 1984; Kind *et al.*, 1995; 刘启元等，1997a). 刘启元等(1997b)进一步把接收函数方法扩展到了高密度台阵观测的情况，并首次利用接收函数方法得到了岩石圈三维图象. 但需要指出的是，上述结果仍是在一维介质模型假定下得到的. 在这种条件下，理论接收函数的波形特征与实际观测结果的下列差别是值得考虑的：

(1) 对于一维介质模型来说，接收函数的径向分量与震源方位角无关. 但是，从观测数据中分离出来的接收函数往往表现出明显的方位变化.

* 国家自然科学基金资助项目(49674213). 中国地震局地质研究所论著：2000B0038.
2000-02-25 收到初稿，2000-08-15 收到修改稿并决定采用.

维普资讯 http://www.cqvip.com

(2) 对于横向均匀各向同性介质来说，接收函数的切向分量振幅应为 0，但由观测数据得到的接收函数，其切向分量的振幅常常与相应的径向分量相当，甚至有时超过其径向分量，并表现出某种随方位角变化的规律性. 这是不能用干扰噪声解释的.

(3) 在一维情况下，对同一地壳模型来说，接收函数径向分量上的透射 P 波与其垂直分量的振幅比应随震中距的增大而减小. 但是，实际观测结果表明，对不同方位的接收函数来说，它们常常存在不规则的变化.

上述结果表明，仅用一维地壳模型，无法解释接收函数的上述观测结果，但另一方面，也说明了接收函数随方位的变化有可能用于研究地下介质的横向非均匀特征.

实际上，Owens 和 Crosson(1988)和 Cassidy(1992)曾提出过接收函数有可能用于确定台站下方介质的横向非均匀结构. Zhang 和 Langston (1995) 以及 Zhu 等(1995)也曾研究了具有单一倾斜界面的横向非均匀介质的接收函数. 尽管他们给出的仅是限于长周期地震波形数据的初步结果，但却表明了利用单台远震体波接收函数研究台站下方地壳横向非均匀结构的可能性.

本文的目的在于利用合成地震图技术，系统地研究地壳介质中存在非水平界面时，单个台站远震体波接收函数的波场特征，以便进一步研究单个台站接收函数对台站下方介质横向非均匀性的反映能力和解释方法.

1　合成横向非均匀介质接收函数的计算方法

所谓接收函数是指接收区介质对由下方入射远震 P 波的脉冲响应. Langston(1979)依据等效震源假定，提出了从长周期远震体波波形数据中分离接收函数的方法. Owens 等(1984)将之扩展到宽频带记录的情况，并发展了相应的接收函数线性波形反演方法. 为了解决接收函数反演的不唯一性问题，Ammon 等(1991)提出了保留接收函数径向分量和垂直分量振幅比的接收函数分离方法. 为了避免接收函数反演的不唯一问题，刘启元等(1996)发展了接收函数的最大或然性估计及其非线性反演方法.

计算横向非均匀介质远震体波接收函数的正演问题与计算相应的合成理论地震图过程是类似的. 陈九辉和刘启元(1999)发展了基于 Maslov 渐近理论的三维远震体波接收函数的计算方法. 这里，我们仅作简单的介绍. 有关这个方法的细节，可以参看相应的文献(陈九辉和刘启元，1999).

在三维非均匀介质空间 $X=(x, y, z)$ 中，波动方程可以写成如下的形式：

$$\nabla^2\phi - v^{-2}(x)\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

这里，ϕ 为波函数，t 为时间，v 为弹性矢量空间中某一点 X 处的 P 波或 S 波速度. 如果定义如下的 Fourier 变换及其逆变换

$$\begin{cases} \tilde{\phi}(\omega, x) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t, x)e^{i\omega t}dt \\ \phi(t, x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\phi}(\omega, x)e^{-i\omega t}d\omega \end{cases} \tag{2}$$

方程(1)则可变换到频率域，并有

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\nabla^2 \tilde{\phi}(\omega, x) + \omega^2 v^{-2}(x) \tilde{\phi}(\omega, x) = 0 \tag{3}$$

这里，ω 为圆频率.

如果我们还定义矢量空间坐标的 Fourier 变换及其逆变换

$$\tilde{\tilde{\phi}}(\omega, y) = \left(-\frac{i\omega}{2\pi}\right)^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\phi}(\omega, x) e^{-i\omega p x} dx$$

$$\tilde{\phi}(\omega, x) = \left(\frac{i\omega}{2\pi}\right)^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\tilde{\phi}}(\omega, y) e^{i\omega p x} dp \tag{4}$$

并把频率 ω 和慢度 P 的逆变换结合起来，那末，就可以得到如下形式的 Maslov 的一阶渐近解：

$$\phi(t, x) = -\frac{1}{2^{1/2}\pi} \phi_0(t) * \partial_t \mathrm{Im}\left\{A(t) * \sum_{y=\partial\theta(p, x)} \frac{\tilde{A}^{(0)}(y)}{|\partial_p \theta(p, x)|}\right\} \tag{5}$$

这里，$y=(p, y, z)$是把一个空间坐标矢量变换到相空间的混合空间矢量. $\phi_0(t)$为源时间函数. 在计算接收函数时，它为脉冲函数. $\tilde{A}^{(0)}(y)$为相空间中的振幅系数. 我们有

$$\theta(p, x) = \tilde{T}(y) + px$$

这里，$\tilde{T}(y)$为相空间中的相位系数，$A(t)$为 $\lambda(t)=H(t)t^{-1/2}$的解析函数.

当计算接收函数时，我们需要考虑的仅是接收区结构的响应. 这意味着只需计算在接收区底部入射的射线路径. 为此，我们借助遗传算法来自动寻求射线在接收区底部的入射点，而在三维接收区介质中的射线追踪则可快速完成(陈九辉，刘启元，1999).

2 横向非均匀介质接收函数的波场特征

台站下方地壳介质的复杂性可以用各种横向非均匀介质模型模拟. 本研究主要考虑的将是单个台站接收函数的波场特征. 因此，作为一级近似，倾斜界面足可以描述横向非均匀结构的基本特征. 我们研究的重点将是台站下方存在倾斜界面时，单个台站接收函数随方位角及界面倾向和倾角的变化.

2.1 单个倾斜界面的情况

图 1 给出了台站下方存在单层倾斜界面的地壳模型. 图 1 模型中，界面的倾向为正北方向(0°)，倾角为 15°. 图 2 给出了震中距为 45°时，相应接收函数的径向和切向分量以及它们随入射方位角的变化. 由图 2 可见，接收函数随方位角有明显的规律性变化. 这些规律性变化可以概括为以下几点：

(1) 接收函数径向分量中，各个震相的幅度和到时均以台站下方界面的倾向成轴对称性分布，而其切向分量则为反对称分布.

(2) 在接收函数的径向分量上，P 波投影与相应垂直分量的振幅比随方位角有明显的变化规律：在倾向方向上幅度最小，在逆倾向上幅度最大. 接收函数的切向分量也有类似变化规律. 这种情况是由于台站下方存在倾斜界面造成的，因为入射波在界面的入射角及其在地表的出射角对不同的入射方位来说都将是不同的.

(3) 在接收函数的径向分量上，PS 转换波及后续多次波的到时有相同的变化规律：各后续震相与透射 P 波的相对到时差在界面的倾向(0°)上最大，而在界面的逆倾向(180°)上最小.

维普资讯 http://www.cqvip.com

因此，利用接收函数中各震相幅度和到时随方位角的变化规律及各震相的偏振特征，我们可以推断界面的倾斜方向.

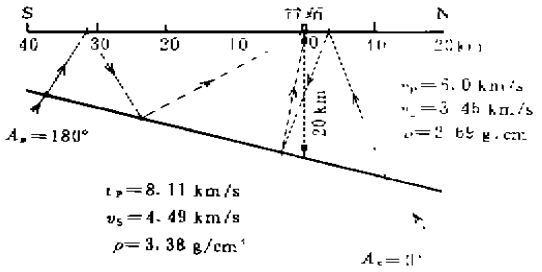

图 1　单层倾斜界面的接收区模型

N 和 S 分别表示北南方向，A_s 表示入射方位，v_P 和 v_S 分别为 P 波和 S 波的速度，ρ 代表密度

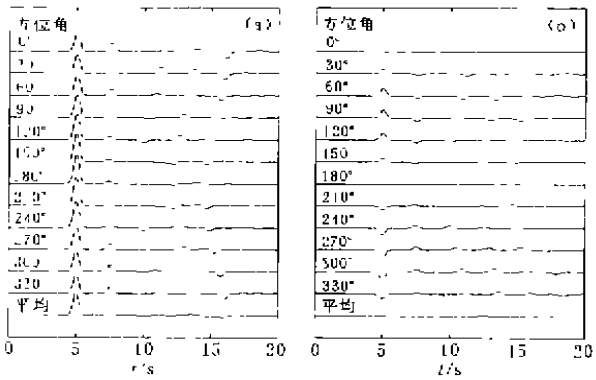

图 2　接收函数随入射方位角的变化

(a) 径向分量；(b) 切向分量

2.2　随界面倾角的变化

当改变台站下方的界面倾角时，接收函数在其垂向、径向和切向分量上的能量分配也将随之改变. 作为一个例子，图 3 给出了当界面倾角不同时，透射 P 波在径向分量上投影幅度随方位角的变化. 需要说明的是，这里我们仅限于考虑入射角小于临界角的情况.

由图 3 可见，接收函数径向分量上 P 波的投影幅度随入射方位角的相对变化有明显的对称性. 图 3 给出的结果表明，随着台站下方倾斜界面倾角的增大，P 波投影在径向分量上幅度随入射方位角的相对变化也有较明显的增加. 对于本研究所用的地壳模型来说，当入射方位角为 0°，界面倾角分别为 10°、15°和 26.6°时，接收函数中透射 P 波在径向分量上投影幅度的变化量分别达到其全部方位平均值的 16%、25%和 52%.

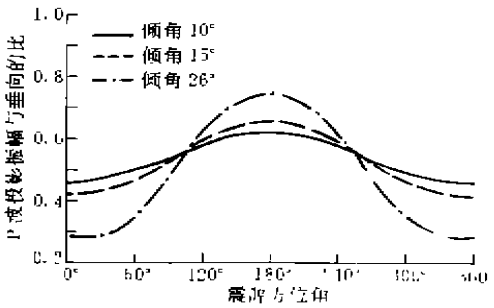

图 3　台站下方界面倾角不同时，接收函数径向分量中 P 波投影幅度随入射方位角的相对变化

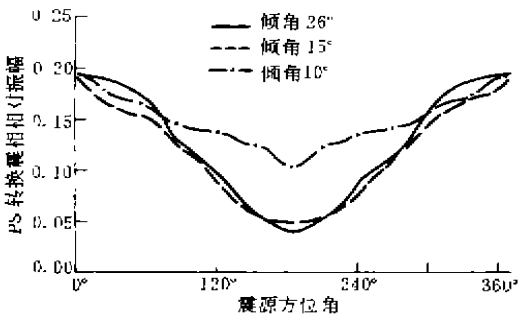

图 4　台站下方界面倾角不同时，接收函数径向分量中 P 波投影幅度随入射方位角的相对变化

图 4 给出了接收函数径向分量上 PS 转换波振幅随入射方位角的相对变化. 由图 4 可见，它的变化幅度不但随入射方位角的相对变化有明显的对称性，而且当台站下方倾斜界

维普资讯 http://www.cqvip.com

面的倾角变大时，其随入射方位角的相对变化也明显增大. 这样，我们可以依此规律，并根据一维接收函数反演得到台站下方介质的速度结构，进一步推断倾斜界面的倾角的大小.

2.3 多个倾斜界面的情况

我们首先考虑二维介质模型的情况，采用的地壳模型如图5所示. 其中浅部界面的倾角为10°，倾向为正南方向；深部界面的倾角为15°，倾向为正北方向. 图6给出了与图5所示模型相应的理论接收函数及其随方位角的变化.

由图6可见，对于图5所示的接收区模型，接收函数的波场比具有单个倾斜界面的接收区模型的情况要复杂得多. 由于接收区两个界面的倾斜方向相反，两个界面的转换震相的相对到时随方位角的变化不同. 但是，它们的相对到时变化仍然保持着独自的变化规律. 另一方面，接收函数径向分量按入射方位角的对称分布规律也依然存在，其切向分量按入射方位角的求和结果保持为0.

上述数值模拟结果表明，对于二维横向非均匀结构的情况，接收函数的切向分量存在幅度为0的两个入射方位，而它们的方位角相差180°. 在这些方位的两侧，接收函数切向分量中的初至P波投影及PS转换波的偏振方向相反. 类似地，入射方位角不同的接收函数径向分量中也存在初至P波投影幅度最大和最小的两个方位. 根据这两个方位，我们可以确定台站下方界面的倾向.

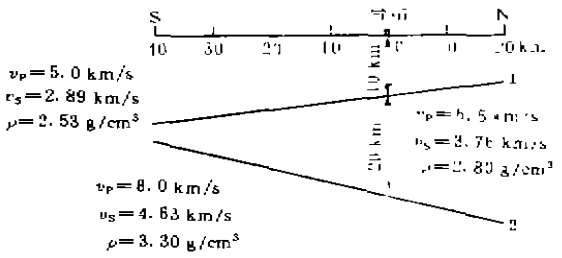

图5 界面倾向不同的二维横向非均匀接收区模型

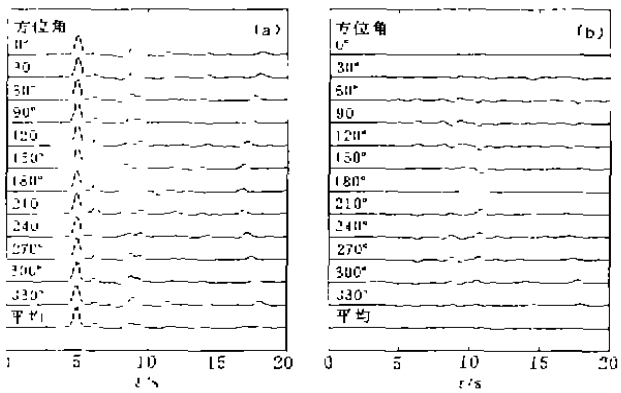

图6 界面倾向不同的二维横向非均匀介质接收函数. 左边的数字表示入射方位角
(a) 径向分量；(b) 切向分量

图7给出了两个界面倾角及倾向不同的三维接收区模型. 图中两个界面的倾角相差45°，由浅到深，3层介质的P波速度(v_P)分别为5.0 km/s、6.5 km/s和8.0 km/s，其S波速度(v_S)和介质密度(ρ)由以下公式给出：

$$\begin{cases} v_S = v_P/1.732 & v_P < 8.0 \\ v_S = v_P/1.800 & v_P \geqslant 8.0 \end{cases}$$

$$\rho = 0.77 + 0.302\, v_P$$

图8给出了与图7相应的接收函数. 由图8可见，接收函数的径向和切向分量的波场特征与前面所述的情况有较大的不同. 它们的差别可以概括为以下几点：① 接收函数的径向分量和切向分量不存在随方位角的对称性分布；② 随方位角的变化，各个震相到时不再有统一的规律；③ 接收函数切向分量不存在振幅为0的方位. 由此可见，当接收区存在多

维普资讯 http://www.cqvip.com

个倾向不同的界面时，接收函数的波场将变得十分复杂.

尽管如此，对于这种较复杂的情况，我们仍然可以找到某些规律：

(1) 依据切向分量初至振动方向的变化，我们可以估计接收区横向非均匀结构的视倾向. 所谓视倾向不是具体界面确切的倾向，而是台站下方各倾斜界面的总体倾向. 例如，对于图 8 所示的情况，倾斜结构的视倾向可估计为 0°和 45°之间的值. 虽然这仅是一个非常粗略的估计，但对进一步的反演研究仍有参考价值.

(2) 虽然台站下方各倾斜界面上的转换波振幅相互影响，但由图 8 仍可看出第二个界面上的转换震相随方位角的变化. 据此，我们可以估计第二个界面的倾向.

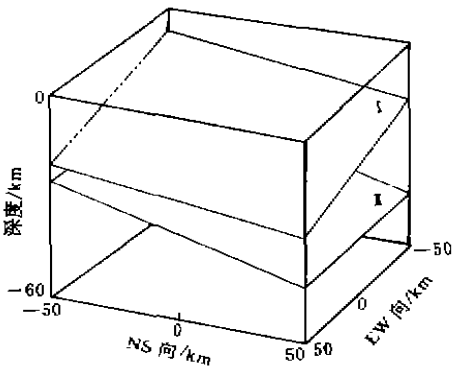

图 7　具有不同倾斜界面的三维横向非均匀接收区模型. 界面 I：倾向正北方向(0°)、倾角 11°；界面 II：倾向为北东方向(45°)，倾角 15°

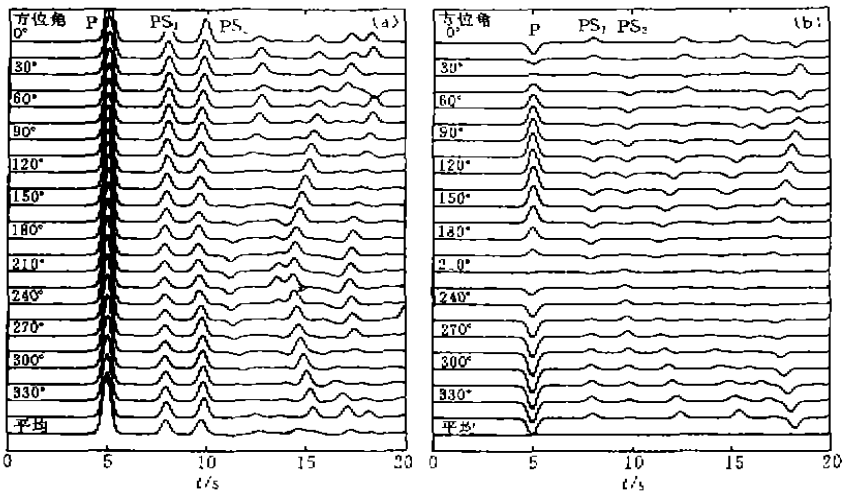

图 8　具有两个倾向不同界面的三维横向非均匀介质接收函数. 左边的数字表示入射方位角
(a) 径向分量；(b) 切向分量

3　观测实例

为了说明如何在实际中应用上面给出的理论研究结果，图 9 给出了由新疆伽师强震群区流动台阵观测记录得到的接收函数剖面(刘启元等，2000). 这里，我们给出的是接收函数的径向分量. 图 9 中台站间距约为 10～15 km. 每个台站的接收函数按方位角从小到大的顺序排列.

事实上，已有的观测结果表明，塔里木盆地中 GLK 和 KZL 台下方的 Moho 面深度约为 42 km，而在其北部的 HAL 台，Moho 面的深度则超过 60 km. 由此可以想象，图 9 所示

维普资讯 http://www.cqvip.com

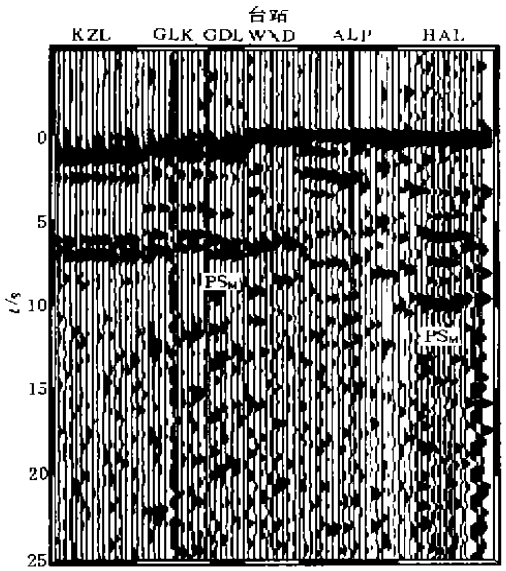

图 9 新疆伽师强震群区的接收函数剖面. PS_M 表示在 Moho 界面上的 PS 转换波

的剖面必定穿过一个倾斜构造. 由图 9 可见，在 HAL、ALP、WXD 和 GDL 台的接收函数中，在 Moho 面转换震相 PS_M 的到时规则变化正反映了这个区域的倾斜构造特征. 例如，在 ALP 台接收函数的入射方位角为 42.8°～149.2°(大约一个象限). 由图 9 可见，PS_M 震相的相对到时在接近 42°的方位上(偏北方向)最大，而在近乎 149°的方位上最小. 根据前面的讨论可知，在 ALP 台站的下方应存在向北的倾斜构造. 这与由台阵观测研究的结果是一致的. 由此可见，上面给出的合成横向非均匀介质接收函数的波场特征，在实际数据中也可以观测到，并且它们可以用于推断台站下方的倾斜结构.

4 讨论与结论

本文通过计算倾斜结构的理论接收函数，系统研究了倾斜结构条件下远震接收函数的波场特征. 结果表明，单个台站的多方位接收函数可以用于估计台站下方的倾斜结构. 虽然本文给出的结果仅限于单个台站的情况，但这一结果也可用于台阵资料的解释.

接收区地壳结构可能存在多个倾斜界面，接收区的结构也可能存在更为复杂的情况. 在这种情况下，仅根据单个台站接收函数的波场特征推断台站下方界面的倾角将会变得十分困难. 对于这种复杂情况，将需要进一步采用波形反演技术. 尽管如此，本研究结果为进一步三维横向非均匀介质的接收函数反演提供了一些必要的理论基础.

参 考 文 献

陈九辉，刘启元. 1999. 合成三维横向非均匀介质远震体波接收函数的 Maslov 方法[J]. 地球物理学报，**42**(1)：84～93

刘启元，Kind R，李顺成. 1996. 接收函数复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)：500～512

刘启元，Kind R，李顺成. 1997a. 中国数字地震台网的接收函数及其非线性反演[J]. 地球物理学报，**40**(3)：356～368

刘启元，沈扬，李顺成，等. 1997b. 延怀盆地及邻近地区地壳上地幔速度结构的地震台阵研究[J]. 地球物理学报，**40**(6)：763～772

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 波速度结构及其地震成因的探讨[J]. 地球物理学报，**43**(3)：356～365

Ammon C J. 1991. The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **81**(6): 2 504～2 510

Cassidy J F. 1992. Numerical experiments in broadband receiver function analysis[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **67**(3): 677～691

Kind R, Kosarev G L, Petersen N V. 1995. Receiver functions at the stations of the German regional seismic network (GRSN)[J]. *Geophys J Int*, **121**(2): 191～202

Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, infered from teleseismic body waves[J]. *J Geophys Res*, **84**(B4): 4 749～4 762

Owens T J, Crosson R S. 1988. Shallow structure effects on broadband teleseismic P waveforms[J]. *Bull Seism Soc Amer*,

维普资讯 http://www.cqvip.com

78(1): 96～108

Zhang Jie, Langston C A. 1995. Dipping structures under Dourbes, Belgium, determined by receiver function modeling and inversion[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**(2): 251～268

Zhu Lupei, Owens T J, Randall G E. 1995. Lateral variation in crustal structure of the northern Tibetan Plateau inferred from teleseismic receiver functions[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**(6): 1 531～1 540

WAVEFIELD FEATURES OF TELESEISMIC RECEIVER FUNCTION IN LATERALLY INHOMOGENEOUS MEDIA

Chen Jiuhui　Liu Qiyuan

(*Institute of Geology, China Seismological Bureau*, 100029 *Beijing*, *China*)

Abstract: In this study we systemically investigate the effects of laterally inhomogeneous crustal structure with planar dipping interfaces on the teleseismic receiver function. For this purpose, the Maslov asymptotic ray theory of the receiver functions in the 3-D laterally inhomogeneous media (Chen and Liu, 1999) is used for computing the synthetic receiver functions, when dipping interfaces exist under a single station. Our results demonstrate that the symmetric and asymmetric variations above the incident azimuths appear on the radial and transverse components of the receiver function, respectively. The dipping direction and dipping angle of the interface beneath the station can be estimated from these features. But, when several different dipping interfaces exist within the crust, only an apparent dipping direction can be inferred from the waveform variations of the receiver function over different azimuths at a single station. By analyzing our observational data it is shown that the planar dipping interface is a well first-order approximation for investigating the crustal lateral inhomogeneity, when only data recorded at a single station are used. And our results given in this study are consistent with those given by seismic array study.

Key words: wavefield feature; receiver function; laterally inhomogeneous media