

欧亚大陆及西太平洋边缘海瑞利面波频散反演

徐宏斌^{1,2}, 朱介寿²

(1. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257022
2. 成都理工大学信息工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:从亚洲、欧洲及西太平洋地区台网113个数字地震台所记录的分布在 $40^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\text{S}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 范围内近万个地震事件中, 挑选出发生在1982—2005年间, 震级绝大部分在5.0~7.0之间, 震源深度小于100 km的1700余个事件。共得到周期在8~400 s之间9980余条质量较高的瑞利面波频散曲线进行面波频散反演, 得到欧亚大陆及西太平洋边缘海28个周期的群速度分布图。反映了欧亚大陆及西太平洋边缘海横向和纵向存在着明显的非均匀性。

关键词: 欧亚大陆; 西太平洋; 瑞利面波; 群速度; 面波频散层析成像

中图分类号: P315.3⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2006)04-0314-05

Dispersion Inversion of Rayleigh Surface Wave in Eurasia Continent and Marginal Seas of West Pacific

XU Hong-bing^{1,2}, ZHU Jie-shou²

(1. Geophysical Research Institute, SINOPEC, Shengli Oilfield Company Limited, Shandong Dongying 257022, China;
2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: More than 1700 seismic events (which occurred from 1982 to 2005, distributed in the range of $40^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\text{S}\sim 80^{\circ}\text{N}$, with magnitudes in 5.0~7.0 and focal depths shallower than 100 km) are selected from nearly 10000 events recorded by 113 digital seismic stations in Asia, Europe and west Pacific networks. Total 9980 accurate Rayleigh surface dispersion curves are employed for dispersion inversion, and the distribution map of Rayleigh wave group velocity in 28 periods from 8 s to 400 s for Eurasia continent and marginal seas of west Pacific are obtained. The result shows that horizontal and vertical anisotropy exist in this region.

Key words: Eurasia continent; West Pacific; Rayleigh surface wave; Group velocity; Surface wave dispersion tomography

0 引言

欧亚大陆及其相邻的西太平洋边缘海有着世界上最复杂的地形地貌。由于本区是由许多个块体及微板块拼合而成, 岩石圈横向不均匀性十分显著。这里既有地球上最古老的北欧波罗的前寒武纪地盾区, 也有面积巨大的东欧克拉通地台、西西伯利亚和西伯利亚克拉通地台等, 还有全球规模最大的阿尔卑斯—喜马拉雅新生代造山带。西太平洋有着全球规模最大最发育的沟弧盆体系。在新生代, 印度板块

持续向北推移引起青藏高原缩短及隆升, 印度岩石圈板片的大规模俯冲与拆沉, 青藏高原以及中亚地区岩石圈叠加增厚, 形成了现今地球上最高的青藏及帕米尔高原和喜马拉雅、兴都库什造山带。从印度半岛至青藏高原、新疆、蒙古、贝加尔一带, 成为全球岩石圈最大的汇聚场所^[1]。因而研究欧亚大陆及西太平洋边缘海岩石圈结构有着重要的意义。

近年来随着全球数字地震台网的建立, 一些学

收稿日期: 2006-04-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49734105; 40234047)

作者简介: 徐宏斌(1976—), 男(汉族), 浙江龙游人, 硕士研究生, 研究方向为地震波层析成像。

者(宋仲和、陈国英、庄真等)利用 $4^\circ \times 4^\circ$ 分块面波进行纯路径频散反演; 周兵, 朱介寿对青藏高原及其邻近地区 S 波三维速度成像^[2]。最近朱介寿等用分布于欧亚大陆及西太平洋地区 78 个数字地震台站约 12 000 个长周期波形记录, 挑选出 6 100 条大圆传播路径, 采用频散及波形拟合反演方法, 对东亚及西太平洋边缘海地区地壳上地幔进行了高分辨率 S 波速度三维层析成像^[3]。

在本文中, 作者扩大了反演区域的范围, 增加了新的数字地震台, 使总数达 113 个, 很好地分布于亚洲、欧洲及西太平洋地区。搜集了在 $40^\circ\text{W} \sim 180^\circ\text{E}$, $40^\circ\text{S} \sim 80^\circ\text{N}$ 范围内近万个最新的地震资料数据, 从中挑选出 1982—2005 年间的震级绝大部分都在 5.0~7.0 之间, 震源深度小于 100 km 的 1 700 余个事件。共得到周期在 8~400 s 之间 9 980 余条质量较高的瑞利面波频散曲线进行面波频散反演, 得到欧亚大陆及西太平洋边缘海 28 个周期的群速度分布图。

1 面波频散层析成像原理

目前利用面波研究地壳上地幔的主要方法是频散曲线反演方法。借助于大圆定理, 假设面波沿大圆路径传播, 先根据基阶面波波形测定相速度或群速度频散曲线, 再得到各分区的纯频散曲线, 然后对纯频散曲线反演确定地震波速度结构。

由于面波具有频散的性质, 每个单色波都有自己的传播速度, 而且主要沿地球表面传播。对于 Rayleigh 波基阶振型而言, 它的每一个频率的波对其波长约 $1/3$ 深度内的结构很敏感^[4]。利用面波的这些特性, 只要在震源和台站间的速度结构没有很强的横向变化, 那么面波就可以被用来研究这两点间的深处的平均结构信息(特别是海洋和体波难以达到的地区)。而宽频带数据使得速度结构反演分辨率越来越好。

传统的大圆近似是用 LASA 和 NORSAR 台阵观测 20~30 s 周期范围内异常海洋面波的结果后提出的。根据费马原理, 在几何光学近似和一阶扰动理论情况下该假定是正确的。依据此原理进行层析成像时, 区域化是把所研究的每个区域当作是横向均匀的, 每个区域具有区域纯路径群速度。沿着一条路径观测到的总相移, 作为沿该大圆路径在各区域相移的总和, 而这些区域相移已由相应纯路径相对长度加权了。这是一个用区域相速度的“相位积分近似”的大圆路径有限长度的表达式。

在弱横向不均匀的情况下, 大量可测的扰动相对于横向均匀介质的情况可用线性关系式的适当精度来表示, 该关系式是由速度扰动幂级数中的一阶项给出。则沿着射线 L 的两点 A_1, A_2 之间的相位变化为

$$\Delta\Phi = \bar{\omega} \int_{L(A_1, A_2)} \frac{ds}{C(s)} \quad (1)$$

其中 $C(s)$ 是相速度。利用费马原理, 忽略了由于远离大圆的路径畸变的变化, 相位扰动可能与沿大圆积分的速度扰动有关:

$$\delta\Phi = -\bar{\omega} \int_{L(A_1, A_2)} \frac{\delta C ds}{C^2(s)} \approx -\bar{\omega} C_0^{-2} \int_{L(A_1, A_2)} \delta C ds \quad (2)$$

式中 C_0 是平均的大圆相速度。该式就是经典面波层析成像的基础。

2 反演方法

基于上述理论, 采用两步法研究地壳上地幔群速度分布。

(1) 对研究区域进行网格划分, 计算理论群速度。首先对反演区域进行 $1^\circ \times 1^\circ$ 或 $2^\circ \times 2^\circ$ 剖分为 n 个网格单元; 把每个网格看作是横向均匀的, 且具有区域纯路径群速度值, 然后求取大圆路径; 对某一周期 T , 根据第 j 个网格所假定的群速度 $U_j(T)$ 计算出第 i 条路径 ($i=1, 2, \dots, m$, m 为反演区域内的总射线条数) 的理论群速度 $V_i(T)$ 。

(2) 计算理论群速度。根据震源和台站位置, 求出面波传播的大圆路径, 并记下它在所通过的网格中的路径长度。如对于第 i 条路径, 可求出它在第 j 个网格单元内的长度 d_{ij} 以及大圆路径总长度 D_i 。根据上述理论, 假定该大圆路径的总相移为各均匀网格单元相移之和, 而网格边界上无相移。所以第 i 条路径的理论群速度 $V_i(T)$ 为

$$\frac{1}{V_i(T)} = \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{D_i} \frac{1}{v_j(T)} \quad (3)$$

如果第 i 条路径实测的群速度为 $U_i(T)$, 而待求的第 j ($j=1, 2, \dots, n$) 个网格单元内的区域纯路径群速度值为 $u_j(T)$, 同理可得

$$\frac{1}{U_i(T)} = \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{D_i} \frac{1}{u_j(T)} \quad (4)$$

用式(4)减去式(3), 可得出第 i 条路径实测群速度与理论群速度之差(即群速度的扰动)为

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{1}{U_i(T)} - \frac{1}{V_i(T)} \\ &= \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{D_i} \left(\frac{1}{u_j(T)} - \frac{1}{v_j(T)} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

写成矩阵形式

$$[b]_{m \times l} = [A]_{m \times n} \cdot [X]_{n \times l} \quad (6)$$

其中 b 是走时残差向量; A 是网格单元内射线长度 d_{ij} 与大圆路径总长度 D 比值的大型稀疏矩阵; X 是待求的理论群速度与实测群速度倒数之差向量。对于面波层析成像来说, 矩阵 A 是一个大型稀疏矩阵。这一矩阵通常是奇异的, 其逆算子往往不存在, 因而必须采用迭代方法, 即求其广义逆。通常广义逆有两种方法: 一类是最小二乘解意义下的广义逆, 即求误差向量 L_2 的最小范数。奇异值分解法 (SVD)、共轭梯度法 (CG) 及最小二乘 QR 法 (LSQR) 都属这类方法。另一类寻求 Moore-Penrose 意义下的广义逆, 即不求误差向量 L_2 的极小, 而是求模型参数的最小范数解。属于这类方法的有正交化算法 ORTH 及阻尼最小范数解 DMNLS 法等。而我们的目的是寻找一种精度高、受数据误差干扰小、收敛快的算法。它应具备: ①能充分利用先验信息, 对反演参数进行约束, 使反演结果更为合理, 接近真实模型; ②采用数学方法把病态问题转化为良态问题求解; ③能充分利用大型稀疏矩阵的特点, 减少计算机内存和提高计算精度。大量实践证明, SVD 法计算精度高, 但计算速度慢, 且不能利用大型稀疏矩阵的特点; 正交化算法 ORTH 计算精度与 SVD 相近, 但计算速度也较慢; 而最小二乘 QR 法 (LSQR) 具有收敛快、稳定性好的特点, 以及易于用阻尼因子控制其反演结果质量, 且能充分利用大型稀疏矩阵的特点, 因此被认为是最适合于求解矩阵方程式 (6) 的算法。

根据上述原理, 我们利用了一套比较成熟的计算软件 (图 1)。

3 实际应用

周期为 8~400 s 的长周期面波能带回地下大量的有用信息, 是研究地球结构和震源机制的有力工具。本文使用了全球数字地震台网 (GDSN)、中国数字地震台网 (CDSN) 等台网的记录。地震波形记录以及仪器参数下载自地震联合研究所 (IRIS) 建立的宽频带数字地震台网数据库和我国国内部分数字台站, 包括亚洲, 欧洲, 部分非洲和澳洲及西太平洋地区台网的 113 个数字地震台, 搜集了 -40°E 至 180°E , -40°S 至 80°S 范围内几千个地震事件, 并从中挑选出 1982—2005 年间的 1 700 多个事件。这些地震事件震级绝大部分都在 5.0~7.0 之间, 震源深度小于 100 km。震中及地震台站分布见图 2 (台

站用三角符号表示, 震中用小圆点表示)。利用 FTAN (频率-时间分析) 方法获得频散曲线。经过筛选共得到周期在 8~400 s 之间 9 980 余条质量较高的瑞利面波频散曲线, 这些面波所通过的大圆路径很好地覆盖了欧亚大陆及西太平洋边缘海, 如图 3 所示。

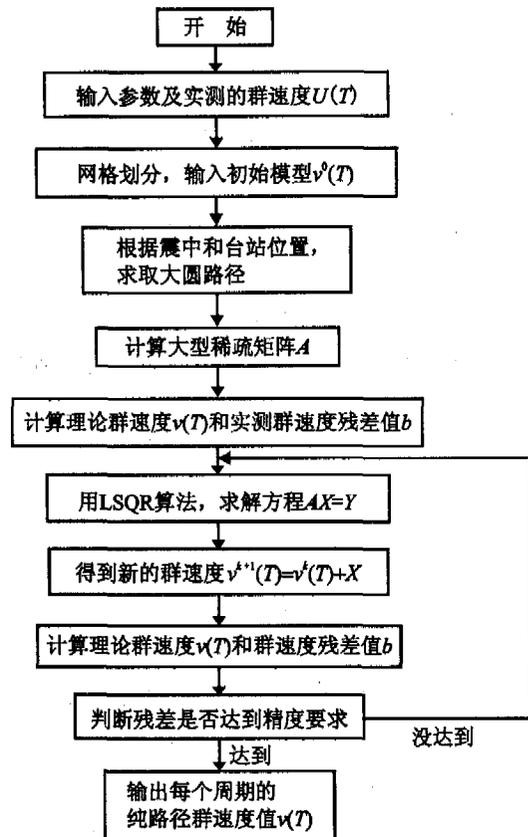


图 1 网格化纯路径频散反演方法流程图

Fig. 1 Flow chart of grid pure-path dispersion inversion.

采用上述的网格化反演方法对其进行反演得到欧亚大陆及西太平洋边缘海不同周期的群速度分布图以及 9 980 条 $2^\circ \times 2^\circ$ 纯路径频散曲线。图 4 为欧亚大陆及西太平洋边缘海周期为 30 s 和 120 s 的瑞利面波群速度分布图, 反映了该地区具有很强的横向不均匀性。

4 结论

(1) 在周期为 30 s 时, RAYLEIGH 波的能量主要集中在 Moho 面上下, 反映了欧亚大陆及其相邻的西太平洋边缘海有很强的横向不均匀性。在图中可以看出欧亚大陆整体上相对海洋显示为低速。其中尤以欧亚大陆南部地中海、阿尔卑斯、里海、黑海、土耳其、伊朗、帕米尔、青藏高原、安达曼、印度尼西亚群岛一线及南海的低速最为突出。以青藏高原为中心的大范围的低速异常向东北一直延伸到蒙古

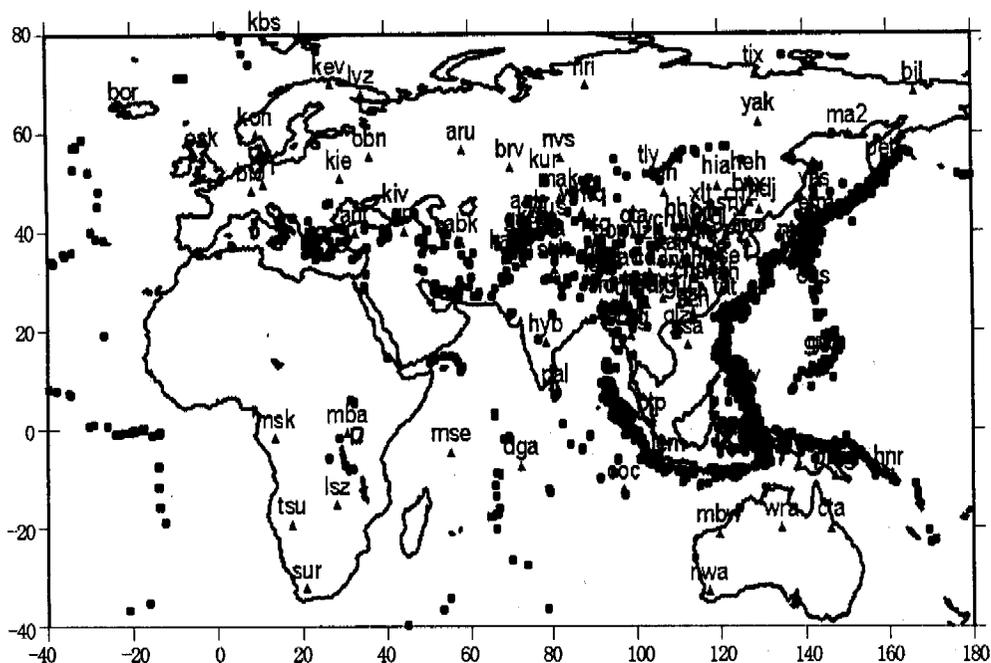


图 2 震中及台站位置分布图

Fig. 2 Distribution of epicenters and seismic stations.

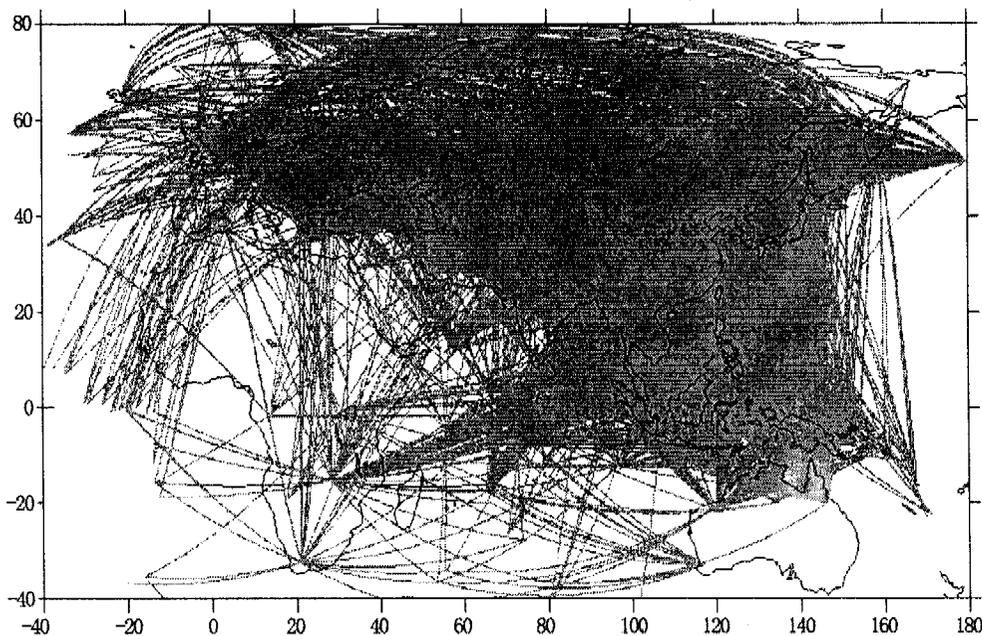


图 3 瑞利波射线覆盖图

Fig. 3 The great circle paths of Rayleigh surface-wave

—贝加尔—大兴安岭地块一带。东欧地块、波罗的地盾、西西伯利亚地块、西伯利亚地块显示为独立的高速异常带。阿拉伯板块、印度板块出现高速异常。

在青藏高原、班达海和喜马拉雅造山带, RAYLEIGH 波群速度值很低 ($< 3.0 \text{ m/s}$); 而在菲律宾海板块、南中国海以及东欧地块 RAYLEIGH 波群速度值比较高 ($> 3.65 \text{ m/s}$), 在日本海地区出现了相对其周边的一个高速异常区。

(2) 在周期为 120 s 时, RAYLEIGH 波群速度分布可以反映出软流圈的横向差异。欧亚大陆西部及北部(欧洲及西伯利亚)显著高于东亚及东南亚以及西太平洋边缘海。印度板块、哈萨克斯坦地块、以及青藏、塔里木、上扬子、鄂尔多斯地块为高速; 红海亚丁湾和东非裂谷出现显著的低速异常, 阿拉伯板块也出现低速异常; 欧亚大陆东部地区和西太平洋边缘海出现大范围的低速异常, 特别是婆罗洲、苏拉

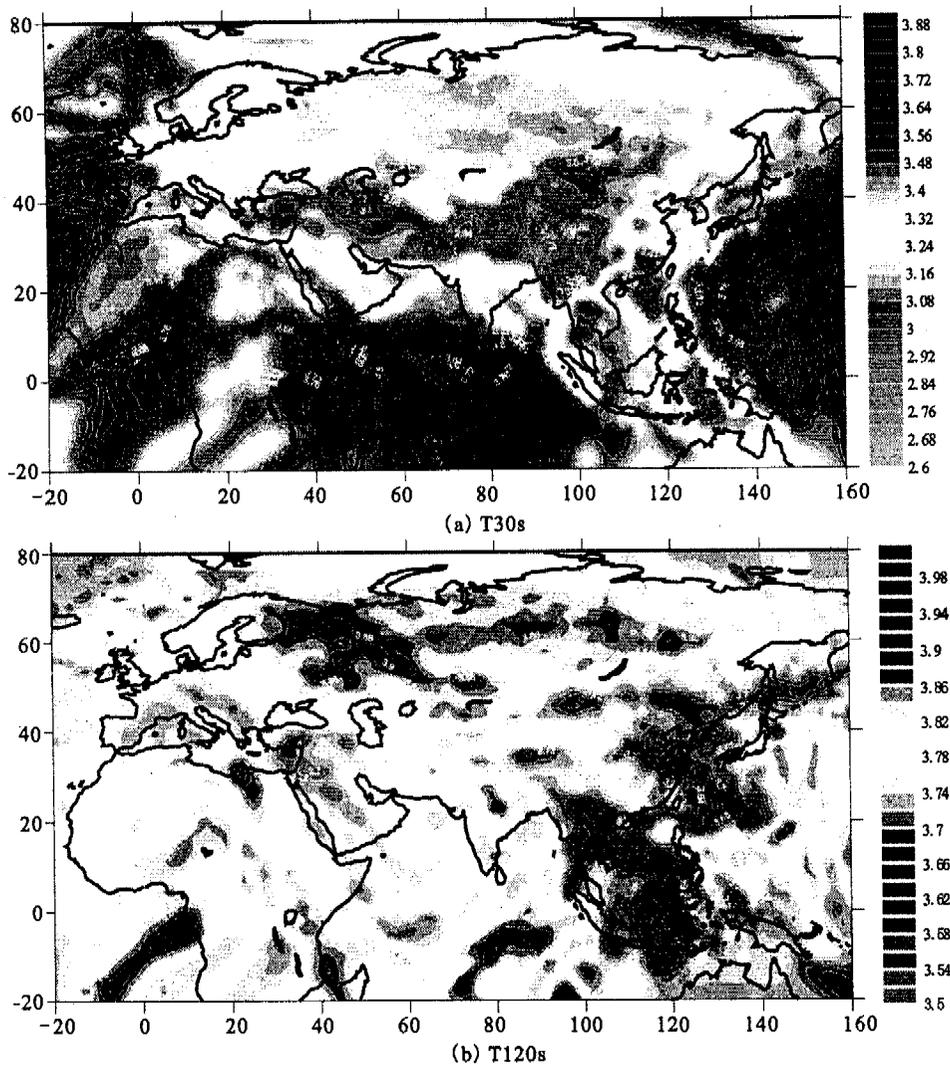


图4 欧亚大陆及西太平洋边缘海瑞利波群速度分布图

Fig. 4 Rayleigh wave group velocity variation in Eurasia continent and marginal seas of west Pacific.

威西海、苏禄海以及部分南海海盆低速异常突出。这些与前人的结果基本相一致。

[参考文献]

[1] 朱介寿, 曹家敏, 李显贵, 等. 中国及邻近区域地球三维结构初始模型的建立[J]. 地球物理学报, 1997, 40(5): 627-648.
 [2] 周兵, 朱介寿, 秦建业. 青藏高原及邻近区域S波三维速度结构[J]. 地球物理学报, 1991, 34(4): 426-441.
 [3] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 646-664.
 [4] Schwab F, Knopoff L. Fast surface wave and free mode com-

putation[A]. In: Bolt A ed. Methods in computational physics [C]. New York: Academic Press. 1972. 87-180.
 [5] 朱介寿, 宣瑞卿, 刘魁, 等. 用瑞利面波研究东亚及西太平洋地壳上地幔速维结构[J]. 物探化探计算技术, 2005, 27(3): 185-192.
 [6] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 欧亚大陆及西太平洋边缘海岩石圈结构[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 387-392.
 [7] 曹小林, 张雪梅, 朱介寿. 中国及邻区的地震面波频散反演[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(3): 295-298.
 [8] 冯锐, 朱介寿, 丁毓玉, 等. 利用地震面波研究中国地壳结构[J]. 地震学报, 1981, 3(4): 335-350.