

张 帆, 韩晓明, 魏建民. 内蒙古中西部地区地壳结构研究[J]. 华南地震, 2017, 37(1): 105–110. [ZHANG Fan, HAN Xiaoming, WEI Jianming. Study on Crust Structure in the Midwestern Inner Mongolia Region [J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1): 105–110.]

## 内蒙古中西部地区地壳结构研究

张 帆, 韩晓明, 魏建民

(内蒙古自治区地震局, 中国呼和浩特 010051)

**摘要:** 使用接收函数方法和纵波走时数据计算内蒙古中西部的地壳厚度和波速比。接收函数结果显示地壳厚度范围 42.2 km 到 54.9 km, 平均值 45.7 km, 波速比范围 1.58 到 1.77, 平均值 1.69。将接收函数结果、走时计算结果和全球地壳模型 crust 1.0 数据对比, 三种结果相近, 接收函数和走时计算获得的地壳厚度值略高于 crust 1.0 数据。计算结果显示, 内蒙古中西部地壳厚度由东向西逐渐增厚。

**关键词:** 地壳厚度; 地震台网; 内蒙古中西部; 接收函数

中图分类号: P313 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2017) 01-0105-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.01.016

## Study on Crust Structure in the Midwestern Inner Mongolia Region

ZHANG Fan, HAN Xiaoming, WEI Jianming

(Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous, Huhhot 050051, China)

**Abstract:** Receive function method and the data of p-wave travel time is used to calculate the thickness of the crust and wave velocity ratio in Midwest Inner Mongolia. Receive function results show that the crustal thickness range from 42.2 to 54.9, with the mean value of 45.7, and the wave velocity ratio range from 1.58 to 1.77, with the mean value of 1.69. Receive function result, p-wave travel time result and the crust 1.0 are similar, yet the first to is higher. Calculation results show that the crust thickness of Inner Mongolia Midwest gradually increase from east to west.

**Keywords:** Crustal thickness; Seismic Network; Midwestern Inner Mongolia; Receiver function

收稿日期: 2016-11-25

基金项目: 内蒙古自治区 2016 年度科技重大专项“重点地区地震预测预警技术研究开发与推广示范”子课题“重点地区壳幔精细结构反演及地震安全产品集成”; 中国地震局地震科技星火计划 (XH14012Y)

作者简介: 张 帆(1980-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事数字地震学预报方法研究。

E-mail: spacelessness@163.com.

## 0 引言

内蒙古自治区地形狭长,是东北、华北、南北地震带北段等重要构造区的毗邻区域,地质构造复杂,地震活动较为强烈<sup>[1]</sup>。从西至东主要活动断裂带包括狼山山前断裂、色尔腾山山前断裂、大青山山前断裂等。多年来,数位研究者开展了大量的不同区域地壳结构研究工作,如我国西北区地壳中的高速夹层的研究<sup>[2]</sup>、天山东北部地震的重新定位和一维地壳速度模型的改善<sup>[3]</sup>、新疆全区和分区地壳速度模型的分析<sup>[4-5]</sup>、格尔木地区近震波速及地壳厚度的研究<sup>[6]</sup>等。还有一些学者进行了内蒙古局部地壳结构的研究,如:内蒙古中部地区的壳-幔介质分层结构<sup>[7]</sup>、内蒙古满都拉地学断面地震折射测深结果<sup>[8]</sup>、在对北京-怀来-丰镇剖面地壳上地幔构造与速度结构中也得到了内蒙古地区的结果<sup>[9]</sup>、鄂尔多斯地块东南地带 Moho 深度变化特征的研究<sup>[10]</sup>、在研究首都圈上地壳高精度三维 P 波速度模型时,也涉及到了内蒙的燕山隆起区<sup>[11]</sup>等。

远震 P 波波形数据中包含了大量地震台站下方地壳和上地幔速度间断面所产生的  $P_s$  转换波及其多次反射波的信息,接收函数方法是反演台站下方地壳结构的有效手段。接收函数最早由 Phinney 提出<sup>[12]</sup>,目的是用远震体波来研究台站下方的地壳及上地幔的结构。Langston 给出了源等效假定<sup>[13-14]</sup>,从长周期远震体波中分离出接收函数。Owens 等<sup>[15]</sup>将此方法扩展到宽频带地震数据的处理,并发展了接收函数的线性反演方法。近年来,随着数字化观测台站和流动观测台站的出现和增多,用接收函数计算地壳厚度的方法日趋成熟和完善。Zhu 等<sup>[16]</sup>提出在 H-Kappa 域内对多个接收函数进行叠加的方法,并计算得到了中国青藏高原地区及美国洛杉矶盆地的地壳厚度和泊松比,接收函数及其反演方法获得广泛的应用与不断的改进<sup>[17-26]</sup>。

本文中我们使用内蒙古中西部 8 个台站的远震波形数据,采用频率域反褶积方法获得各台站的接收函数,采用了 Zhu 等<sup>[15]</sup>2000 年提出的综合利用一次转换震相  $P_s$  及多次转换震相  $PpPs$ 、 $PsPs$ 、 $PpSs$  叠加搜索能量最大值的方法同时限定地壳厚度  $H$ 、纵横波速比(Kappa)等物理量。同时,我们使用内蒙古地震台网的观测报告提取的纵波走时数据,使用走时公式计算地壳厚度,并将接受函数和走时计算的两种计算结果和全球地壳模型 crust1.0 对比,评估结果和方法的一致性,

分析内蒙古中西部地壳厚度的分布特征。

## 1 方法和原理

### 1.1 接收函数方法计算地壳厚度和波速比

接收函数是某一深度上的介质响应,可以带来台站下方地下界面结构和介质性质的信息。远震 P 波波形含有关于震源时间函数、源区介质结构、上地幔传播路径以及接收区介质结构的丰富信息。Langston<sup>[14]</sup>提出用震源等效化方法来消除有效震源时间函数对远震 P 波波形的影响,得到了接收函数。他认为从一系列水平分层或倾斜分层介质底部入射的平面 P 波产生的地表位移响应在时间域可表示为:

$$\begin{cases} D_V(t) = I(t) * S(t) * E_V(t) \\ D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t) \\ D_T(t) = I(t) * S(t) * E_T(t) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,  $S(t)$  代表入射平面波的有效震源时间函数,  $I(t)$  代表仪器的脉冲响应,  $E_V(t)$ 、 $E_R(t)$ 、 $E_T(t)$  分别代表接收区介质结构脉冲响应的垂直分量、径向分量和切向分量。频率域表示为:

$$\begin{cases} D_V(\omega) = I(\omega) S(\omega) E_V(\omega) \\ D_R(\omega) = I(\omega) S(\omega) E_R(\omega) \\ D_T(\omega) = I(\omega) S(\omega) E_T(\omega) \end{cases} \quad (2)$$

理论计算与实际观测表明,震中距在  $30^\circ \sim 95^\circ$  的远震 P 波到达地震台站下方时,可近似为垂直入射的平面波,台站下方介质响应的垂直分量可近似为脉冲函数,可做如下近似:

$$E_V(t) \approx \delta(t), E_V(\omega) \approx 1 \quad (3)$$

于是,地震 P 波记录的垂直分量可以近似为:

$$D_V(t) \approx I(t) * S(t) \quad (4)$$

径向和切向的介质结构相应可表示为:

$$\begin{aligned} E_R\omega &= \frac{D_R\omega}{I\omega S\omega} \approx \frac{D_R\omega}{D_V\omega} \\ E_T\omega &= \frac{D_T\omega}{I\omega S\omega} \approx \frac{D_T\omega}{D_V\omega} \end{aligned} \quad (5)$$

再将  $E_R(\omega)$  和  $E_T(\omega)$  分别反变换到时间域,即可得到介质结构的径向接收函数  $E_R(t)$  和  $E_T(t)$  切向接收函数。

H-Kappa 方法<sup>[15]</sup>是对于某一对确定的地壳厚度  $H$  和波速比  $\kappa$ ,对于不同 P 波射线参数  $p$  的接收函数,计算转换波和多次波的到时,再根据到时取出该接收函数的振幅值,按照一定比例权重累加在一起,如果  $H$  和  $\kappa$  取值很合适,得到的振幅值

的累加应该是最大的,在深度和波速比张成的空间中进行扫描搜索,从而得到最优的  $H$  和  $\kappa$  的值。转换波的走时:

$$T_{ps}=h(\sqrt{V_s^{-2}-p^2})-\sqrt{V_p^{-2}-p^2} \quad (6)$$

$$T_{pPs}=h(\sqrt{V_s^{-2}-p^2}+\sqrt{V_p^{-2}-p^2}) \quad (7)$$

$$T_{pPs}+p s p s=2h(\sqrt{V_s^{-2}-p^2}) \quad (8)$$

式中  $h$  为地壳厚度,  $p$  为入射波的射线参数。

## 1.2 使用纵波走时计算地壳厚度

地壳中直达波和莫霍面折射波的走时为:

$$t_{pg}=\frac{\sqrt{\Delta^2-h^2}}{V_g} \quad (9)$$

$$t_{pn}=2H\frac{\sqrt{V_n^2-V_g^2}}{V_g V_n}-h\frac{\sqrt{V_n^2-V_g^2}}{V_g V_n}+\frac{\Delta}{V_n} \quad (10)$$

$t_{pg}$  为地壳内直达波走时,  $t_{pn}$  为莫霍面折射波走时,  $V_g$  为地壳内纵波波速,  $V_n$  为莫霍面纵波速度,  $H$  为地壳厚度,  $h$  为震源深度,  $\Delta$  为震中距。从地震观测报告中提取走时数据,将已知变量和

未知变量分离,使用 LSQR 方法求解方程组,由 (4) 式求出地壳平均波速,由式 (5) 求出地壳厚度和莫霍面波速。

## 2 数据

符合接收函数  $H$ -Kappa 方法的数据为震中距在  $30^\circ \sim 95^\circ$  的远震,我们搜集了内蒙古中西部地区 8 个台站的记录的 24 个远震数据,图 1 为以 ( $100^\circ\text{E}$ ,  $40^\circ\text{N}$ ) 为中心绘制的 24 个远震的极坐标分布图。首先对三分量的原始记录作均值处理,去掉直流成分及去除仪器响应的基础上,取直达 P 波前 10 s 作为起始点,在 100 s 的时间窗内截取 P 波波形,将水平分量旋转 to 径向和切向两个方向;然后用垂直分量分别对径向分量和切向分量作反褶积,得到基本消除了路径和震源影响的垂向和径向接收函数,再用系数为 2.5 的高斯滤波对接接收函数进行低通滤波,在消除 1 Hz 以上高频信号同时,保留远震波形的有效成分。

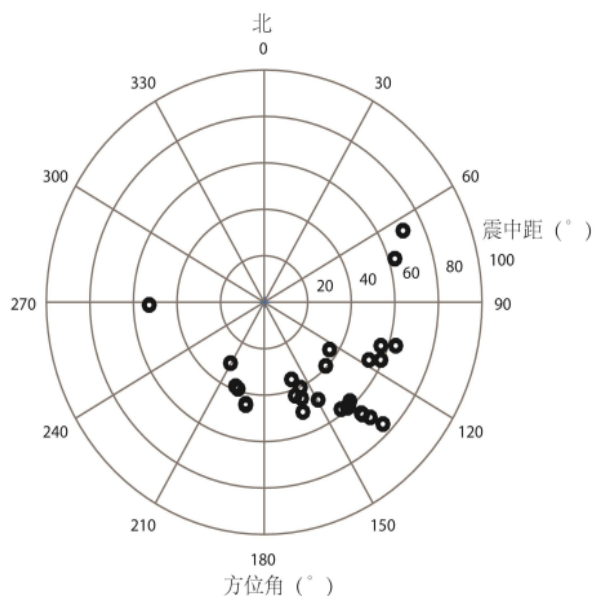


图 1 24 个远震的分布图

Fig.1 The distribution map of 24 teleseisms

使用内蒙古地震台网 2009 年至 2015 年数据,地震 2 651 条,直达波( $P_g$ )走时 13 684 条,莫霍面折射波( $P_n$ )走时 1 742 条,计算地壳厚度。图 2 是用于走时计算地壳厚度的地震分布图。

## 3 结果和分析

图 3 是 8 个台站的接收函数结果,内蒙古中

西部 8 个台站的地壳厚度范围为 39.7 km 到 54.9 km,平均地壳厚度 45.7 km,波速比范围 1.58~1.83,平均值 1.69,台站结果的分布特征显示西部地区的地壳厚度大于中部地区。图 4 是 8 个台站接收函数结果的空间分布。

全球地壳模型 Crust 1.0<sup>[27]</sup>包含丰富的地球内部信息,该模型将地壳结构分为 8 层,地形和水层参考了 ETOPO1 模型,沉积层参考了沉积层模型,地

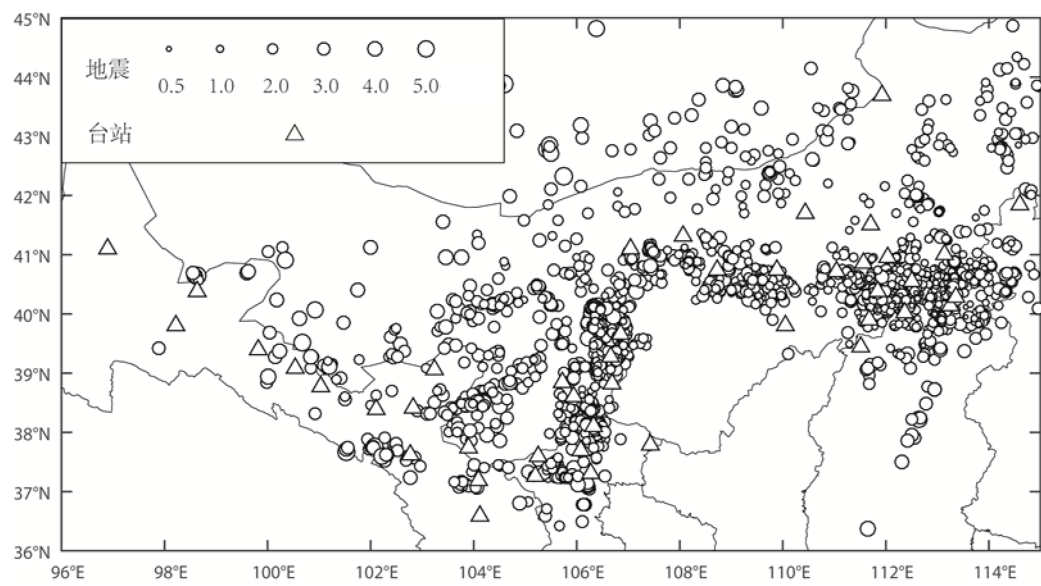


图 2 提取走时的地震和台站分布图

Fig.2 The distribution map of earthquakes and stations for p-wave travel time calculation

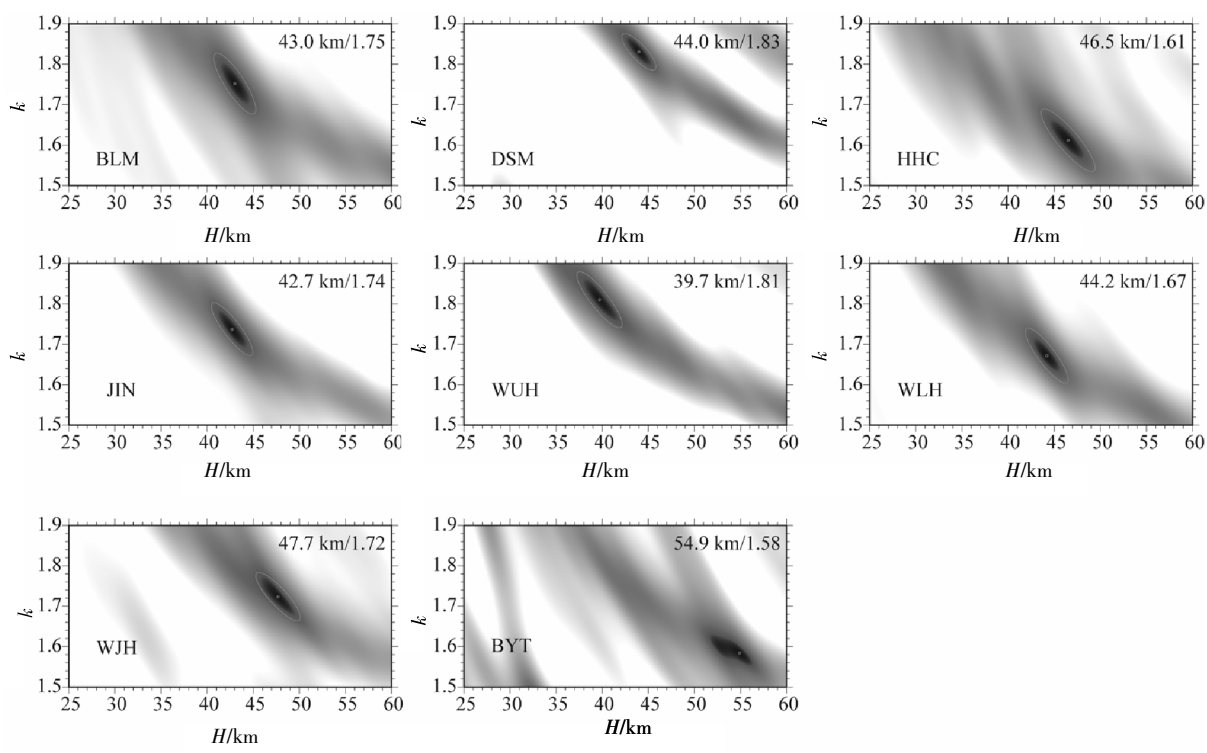


图 3 8 个台站接收函数结果图

Fig.3 Receiver function results of 8 stations

壳厚度数据来自最新的主动源方法和接收函数方法研究成果,无法使用上述方法的地区(如南极洲地区)的地壳厚度由重力方法获得,上中下地壳的厚度和密度数据主要来自于地震资料,模型还经过全球最新地震面波数据的验证和修正。

将纵波走时数据计算的地壳厚度,接收函数结果和 crust 1.0 对比,表 1 列出三者 8 个台站的地壳厚度值和接收函数的误差,图 5 给出三种

结果的对比折线图。其中走时计算所使用数据为台站附近半径 2°范围内的地震事件的纵波走时。可见,三者基本一致,相对趋势一致,接收函数和走时计算结果更加接近,均高与 crust 1.0 数据。

用观测报告提取走时数据,以 0.5°为步长,使用半径为 2°范围内的纵波走时数据计算每个点的地壳厚度,和 crust 1.0 数据对比。图 6 为使用走时计算的结果和 crust 1.0 数据绘制的内蒙古中西

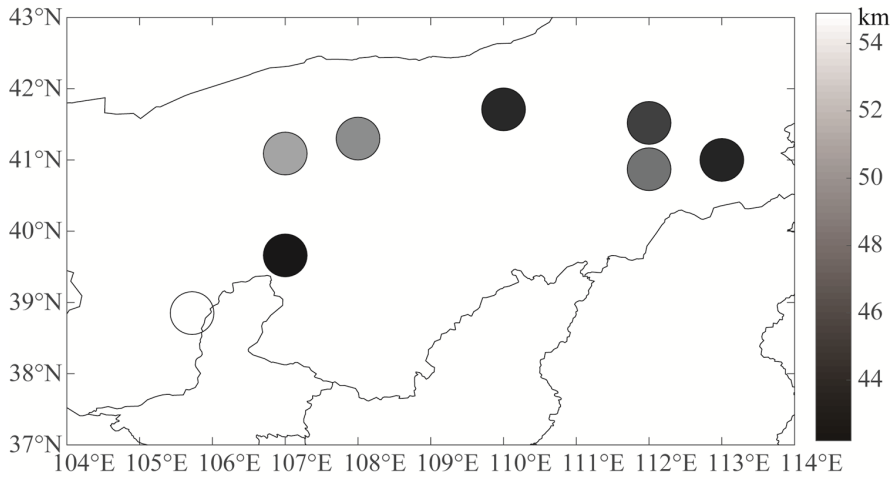


图 4 台站地壳厚度分布图

Fig.4 The distribution map of station crustal thickness

表 1 8 个台站位置接收函数、纵波走时计算结果和 crust 1.0 数据

Table 1 Results of receiver function, p-wave travel time calculation and crust 1.0

| 序号 | 台站代码 | 地壳厚度<br>(接收函数)/km | 地壳厚度<br>(crust 1.0)/km | 地壳厚度<br>(纵波走时)/km | 波速比  | DH  | Dκ   |
|----|------|-------------------|------------------------|-------------------|------|-----|------|
| 1  | HHC  | 46.5              | 37.9                   | 41.4              | 1.61 | 2.0 | 0.04 |
| 2  | WJH  | 47.7              | 43.7                   | 49.3              | 1.72 | 2.6 | 0.06 |
| 3  | DSM  | 44.0              | 44.6                   | 47.9              | 1.83 | 1.9 | 0.04 |
| 4  | BLM  | 43.0              | 42.5                   | 45.1              | 1.75 | 2.1 | 0.09 |
| 5  | WLH  | 44.0              | 38.0                   | 43.2              | 1.67 | 1.6 | 0.05 |
| 6  | BYT  | 54.9              | 53.0                   | 52.5              | 1.58 | 2.7 | 0.09 |
| 7  | JIN  | 42.7              | 37.2                   | 40.8              | 1.74 | 2.9 | 0.09 |
| 8  | WUH  | 39.7              | 41.7                   | 49.6              | 1.81 | 2.9 | 0.08 |

部地壳厚度分布对比图，图中显示出走时计算结果和 crust 1.0 接近，相对趋势一致，厚度值略高于 crust 1.0。使用 P 波走时数据计算地壳厚度时，震相到时读取误差和深度测定误差会对结果产生影响，同时地震数据的分布的不均匀也会对计算产生影响，地震较少的区域结果稳定性较差。

接收函数结果、纵波走时计算的结果和 crust 1.0 的 moho 面深度分布特征一致性较好，结果显示内蒙古中西部地壳厚度呈现由东向西逐渐增厚的分布特征，西南的鄂尔多斯块体北缘地带地壳厚度较大，东南的晋冀蒙交界地区地壳厚度值较低。

4 结语

使用接收函数  $H$ -Kappa 方法，对内蒙古中西部 8 个台站的地壳厚度和波速比，内蒙古中西部 8 个台站的地壳厚度范围为 39.7 km 到 54.9 km，平均地壳厚度 45.7 km，波速比范围 1.58~1.81，平均值 1.69，台站结果的分布特征显示西部地区的地

壳厚度大于中部地区。

使用由内蒙古地震台网观测报告提取的纵波走时数据，应用走时公式和 LSQR 算法计算内蒙古中西部的地壳厚度，将结果和 crust 1.0 对比，结果显示走时计算结果和 crust 1.0 接近，相对趋势一致，厚度值略高于 crust 1.0。

对比使用走时计算结果、接收函数结果和 crust 1.0 数据在 8 个台站位置的地壳厚度，三者基本接近，相对趋势一致，接收函数和走时计算结果均高与 crust 1.0 数据。

经过比较，接收函数结果、纵波走时计算的结果和 crust 1.0 的一致性较好，结果显示，内蒙古中西部地壳厚度由东向西逐渐增厚。

参考文献:

[1] 曹 刚. 内蒙古地震研究[M]. 北京: 地震出版社, 2001.  
[2] 曾融生, 滕吉文, 阚荣举, 等. 我国西北部地壳中的高速夹层[J]. 地球物理学报, 1965, 14 (2): 94-106.  
[3] 孙安辉, 陈棋福, 陈 颢, 等. 天山东北部地震的重新

- 定位和一维地壳速度模型的改善[J]. 中国地震, 2011, 27 (3): 235-247.
- [4] 陈向军, 上官文明, 宋秀青, 等. 新疆全区和分区地壳速度模型的分析[J]. 中国地震, 2014, 30 (2): 17, 8-187.
- [5] 刘文学, 刘贵忠, 周 刚, 等. 新疆和周边地区地壳厚度和  $V_p/V_s$  比值变化的接收函数约束[J]. 地球物理学报, 2011, 54 (8): 2 034-2 041.
- [6] 都昌庭, 崔国信, 邱鹏程, 等. 格尔木地区近震波速及地壳厚度[J]. 高原地震, 2002, 14 (3): 29-34.
- [7] 李 祥, 包东健, 陈原平, 等. 内蒙古中部地区的壳幔介质分层结[J]. 华北地震科学, 1987, (4): 60-67.
- [8] 刘昌铨, 嘉世旭, 杜官恒, 等. 江苏响水-内蒙古满都拉地学断面地震折射测深结果[J]. 地震地质, 1991, (3): 193-204.
- [9] 祝治平, 张先康, 张建狮, 等. 北京-怀来-丰镇剖面地壳上地幔构造与速度结构研究[J]. 地震学报, 1997, (5): 499-505.
- [10] 任 泉, 徐志国, 杨 辉, 等. 鄂尔多斯地块东南缘地带 Moho 深度变化特征研究[J]. 地球物理学报, 2012, 12 (55): 4 089-4 096.
- [11] 杨 峰, 黄金莉. 首都圈上地壳高精度三维 P 波速度模型-基于石油地震叠加速度和人工地震测深剖面[J]. 地球物理学报, 2013, 5 (56): 1 487-1 496.
- [12] Phinney R A. Structure of the Earth's crust from spectral behavior of long -period body waves [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1964, 69 (14): 2 997-3 017.
- [13] Langston C A. The effect of planar dipping structure on SOURCE and receiver responses for constant ray parameter [J]. BSSA, 1977, 67: 1 029-1 050.
- [14] Langston C A. Structure under mountainier, Washington, inferred from teleseismic body waves [J]. JGR, 1979, 84: 4 749-4 762.
- [15] Zhu L P, Kanamor H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions [J]. J. Geophys. Res, 2000, 105 (B2): 2 969-2 980.
- [16] 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 wave forms[J]. JGR, 1984, 89: 7 783-7 795.
- [17] 许卫卫, 郑天愉. 接收函数方法及研究进展[J]. 地球物理学进展, 2002, 17 (4): 605-613.
- [18] 贺传松, 王椿镛, 吴庆举. 接收函数方法及其新的进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18 (2): 224-228.
- [19] 安张辉, 周民都, 吴庆举, 等. 接收函数方法研究进展[J]. 地震工程学报, 2004, 26 (4): 362-364.
- [20] 王小平, 朱元清, 于海英. 用远震接收函数反演上海及其邻区地壳速度结构[J]. 地震研究, 2006, 29 (3): 239-244.
- [21] 李 华, 王良书, 李 成, 等. 大别造山带西段宽频带数字地震台阵观测与地壳上地幔结构[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38 (7): 862-871.
- [22] 李永华, 吴庆举, 田小波, 等. 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, 2009, 52 (1): 67-80.
- [23] 楼 海, 王椿镛, 吕智勇, 等. 2008 年汶川 MS8.0 级地震的深部构造环境——远震 P 波接收函数和布格重力异常的联合解释[J]. 中国科学 (D 辑), 2008, 38 (10): 1 207-1 220.
- [24] 刘 春, 崇加军, 倪四道, 等. 利用远震接收函数反演陕西地震台站下方的地壳厚度[J]. 地震地质, 2009, 31 (2): 313-320.
- [25] 唐明帅, 郑 勇, 葛 粲, 等. 帕米尔东北缘地壳结构的 P 波接收函数研究[J]. 地球物理学报, 2004, 57 (10): 3 176-3 188.
- [26] 何 静, 吴庆举, 高孟潭, 等. 利用接收函数方法研究蒙古中南部地区地壳结构[J]. 地球物理学报, 2014, 57 (7): 2 386-2 394.
- [27] Laske G, Masters G, Ma Z, et al. CRUST1.0: An Updated Global Model of Earth's Crust [C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2012.