

何静, 吴庆举, 高孟潭等. 2014. 利用接收函数方法研究蒙古中南部地区地壳结构. 地球物理学报, 57(7): 2386-2394, doi: 10.6038/cjg20140732.

He J, Wu Q J, Gao M T, et al. 2014. Crustal structure and Poisson ratio beneath the central and southern Mongolia derived from receiver functions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7): 2386-2394, doi: 10.6038/cjg20140732.

利用接收函数方法研究蒙古中南部地区地壳结构

何静¹, 吴庆举^{1*}, 高孟潭¹, 张瑞青¹, 余大新¹, M. Ulziibat², S. Demberel²

¹ 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

² 蒙古科学院天文与地球物理研究中心, 乌兰巴托

摘要 2011年8月至2013年7月中国地震局地球物理研究所与蒙古科学院天文与地球物理研究中心在蒙古中南部区域布设了宽频带流动地震台阵, 这为开展远东地区深部结构的精细探测提供了有利的数据基础. 利用台阵记录的远震地震事件, 采用P波接收函数的 $H-\kappa$ 叠加分析和共转换点(CCP)叠加方法获得了台站下方的地壳厚度及平均波速比. 结果显示研究区的地壳厚度介于39 km至45 km之间. 整体上Moho面埋深从西北往东南方向逐渐变浅. 在蒙古主线性构造两侧地壳厚度呈现区域性变化特征, 东南部地区地壳厚度较薄, 约为39 km, 而西北部地区地壳较厚, 达45 km, 为此推测蒙古主构造线可能是地壳的一个陡变带. 此外, 研究地区地壳的平均波速比值(V_P/V_S)在1.70到1.79之间, 均值为1.75, 低于全球大陆的平均值1.78, 这可能暗示着该区其地壳是缺少铁镁质的. 研究还发现测线的西北与东南地区其地壳波速比值较高, 推测是古生代铁镁质地壳的残留或是新生代岩浆底侵的反映.

关键词 接收函数; 蒙古中南部地区; $H-\kappa$ 叠加; CCP 叠加; 地壳厚度; 波速比

doi: 10.6038/cjg20140732

中图分类号 P315

收稿日期 2014-01-20, 2014-07-01 收修定稿

Crustal structure and Poisson ratio beneath the central and southern Mongolia derived from receiver functions

HE Jing¹, WU Qing-Ju^{1*}, GAO Meng-Tan¹, ZHANG Rui-Qing¹,

YU Da-Xin¹, M. Ulziibat², S. Demberel²

¹ Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

² Research Center of Astronomy & Geophysics of Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

Abstract A broadband digital seismic array was deployed by the Institute of Geophysics, CEA and Research Center of Astronomy & Geophysics, Mongolian Academy of Sciences in the central and southern Mongolia, from August 2011 to July 2013. The purpose is to probe the fine deep structure below the Far East. We use the teleseismic events recorded by this array to calculate the P wave receiver functions and obtain crustal thickness and velocity ratio (V_P/V_S) by the $H-\kappa$ stacking and CCP stacking method. The results show that crustal thickness of the study area is between 39 km and 45 km. The Moho becomes gradually shallower from the northwest to southeast. There exists a regional variation across the MML (Main Mongolian Lineament), in the southeast of which the crustal thickness is thinner about 39 km and in the northwest of which it is thicker over 45 km. We speculate that the MML may be a sharp change in the earth's crust. The crustal velocity ratios (V_P/V_S) range from 1.70 to 1.79 with an average of 1.75, which is lower than the global average 1.78 of the continental crust. It may suggest that most of the earth's

基金项目 科技部国际合作项目(2011DFB20210)资助.

作者简介 何静, 女, 1990年生, 在读博士生, 主要从事地球内部构造及动力学方面的研究. E-mail: hejing11@163.com

* **通讯作者** 吴庆举, 男, 1969年生, 固体地球物理博士, 研究员, 主要从事地震学、地球内部结构以及动力学研究. E-mail: wuqj@cea-igp.ac.cn

crust in the central and southern Mongolia lacks mafic component. In the northwest and southeast of the survey line, the V_P/V_S ratios are relatively high, which is likely related to the remanent femic Paleozoic crust or the magma underplating in the Cenozoic.

Keywords Receiver function; Central and southern Mongolia; $H-\kappa$ stacking method; CCP stacking method; Crust thickness; V_P/V_S ratio

1 引言

蒙古地区位于西伯利亚克拉通和华北克拉通与塔里木克拉通之间,且处于中亚造山带(CAOB)的核心位置,是地球上最显著的显生宙陆壳增生与改造的大陆造山带(Badarch et al., 2002). 作为壳幔相互作用和构造运动强烈的区域,CAOB发育了复杂的地壳变形和岩浆活动,一直是地球科学研究的前沿热点之一,引起世界地质学家和地球物理学家的普遍关注(Gao et al., 1994, 1997, 2004; Zorin et al., 1989, 2002, 2003, 2006; Zhao et al., 2006; Lebedev et al., 2006; Mordvinova et al., 2007; Nielsen and Thybo, 2009; Fullea et al., 2012),然而也是目前我们认识较为贫乏的地区之一(Calais et al., 2003).

中亚造山带位于古亚洲洋闭合带,主要由两大板块间的微大陆相互叠覆构成,是现今地球上构造运动较为活跃的地区之一(Zonenshain and Savostin, 1981). 普遍认为该地区的构造演化主要受太平洋板块的俯冲和消减,以及印度—欧亚板块的碰撞和挤压等过程的共同作用和影响. 许多研究认为印度—欧亚板块挤压碰撞的远场效应导致了蒙古高原NNE—SSW地壳缩短(Molnar and Tapponnier, 1975; Barruol et al., 2008; Cunningham, 2005; Koulakov, 1998; Zonenshain and Savostin, 1981; Peltzer and Tapponnier, 1988; Tapponnier and Molnar, 1979; Baljinnyam et al., 1993; Cunningham et al., 1996; Cunningham, 2005)、地幔物质上涌(Khain, 1990; Windley and Allen, 1993)、以及蒙古—贝加尔地区应力状态的变化(Petit and Fournier, 2005; Lesne et al., 1998, 2000; Polyansky, 2002). 但也有研究推测蒙古—贝加尔地区的许多构造特征难以简单地归因于印度—欧亚板块的碰撞挤压. 一些研究认为,软流圈物质的上涌是贝加尔裂谷拉张(Delvaux et al., 1995; Petit et al., 1996; Delvaux et al., 1997; Lesne et al., 2000; Puzyre et al., 1978)和杭爱山脉隆起(Cunningham, 2001; Petit et al.,

2002; Kulakov, 2008; Xiong et al., 2010)的主要动力来源. 截至目前为止对于贝加尔裂谷是主动还是被动裂谷以及杭爱高原的形成等还存在诸多争议.

20世纪80年代以来,地球物理学家们相继对蒙古—贝加尔湖地区进行了许多地球物理探测研究,其中美国加利福尼亚大学洛杉矶分校和威斯康星大学1991年在西伯利亚克拉通和贝加尔裂谷地区布设了36台地震仪进行了为期4个月的地震观测(Gao et al., 1994),1992年又在西伯利亚克拉通、贝加尔裂谷地区以及蒙古褶皱带布设了40台地震仪进行了为期近3个半月的地震观测(Gao et al., 2004);2003年法国、俄罗斯以及蒙古合作的蒙古—贝加尔岩石圈地震观测实验(MOBAL)项目横穿杭爱山脉布设了18个宽频带地震仪,穿越了西伯利亚克拉通、萨彦山脉、杭爱高原以及阿尔泰山脉地区. 利用这些观测资料分别开展了接收函数(Mordvinova et al., 2007; Gao et al., 2004; Zorin et al., 2002)、横波分裂(Gao et al., 1994, 1997; Barruol et al., 2008)、远震层析成像(Gao et al., 2003; Petit et al., 1998)等研究,并得到了一些有意义的研究成果. 其中接收函数以及面波反演等结果显示蒙古地区地壳厚度在44~50 km左右(Gao et al., 2004; Fullea et al., 2012),推测下地壳富含铁镁质(Fullea et al., 2012)或是存在铁镁质的侵入(Nielsen et al., 2009). 此外研究表明该区域普遍存在壳内低速层(Zorin et al., 2002; Mordvinova et al., 2007),并且认为这些低速层与软流层的底辟作用有关(Mordvinova et al., 2007).

接收函数方法是目前研究地球内部速度间断面结构较为有效的方法之一. Langdon(1979)根据谱振幅比方法给出了源等效假定,从长周期远震体波中分离出接收函数. Owens(1987)等将其扩展到了宽频带记录,并提出了接收函数的线性反演. 之后接收函数经过多种改进(Kind et al., 1995; Yuan et al., 1997; 刘启元等, 1996; Ligorria and Ammon, 1999; 吴庆举等, 2007). 目前普遍利用 $H-\kappa$ 扫描叠加和CCP叠加来获取地壳结构特征. 本文拟采取上述两种方法对贝加尔—杭爱山脉与蒙古褶皱带肯特

山脉中间区域即蒙古中南部地区的地壳厚度和波速比进行研究,以期为其整个区域的地壳厚度变化特征及地壳是否富含铁镁质等提供地球物理的深部证据。

2 数据和方法

本研究所用的数据来自中国地震局地球物理研究所与蒙古科学院天文与地球物理研究中心在蒙古中南部地区所架设的流动地震观测台阵在 2011 年

8 月至 2013 年 7 月期间所观测到的远震波形记录。本文选取的测线主要由 12 个台站组成,台站间距约为 50 km,基本上跨越了蒙古中南部地区的主要构造单元,如图 1 所示。在数据处理过程中,我们选取震中距在 $30^\circ \sim 95^\circ$ 之间,震级 5.5 级以上(含 5.5 级)的远震事件,进一步挑选出震相清晰、三分量齐全、垂直分量衰减快且信噪比高(张广成等, 2013)的 473 个远震事件进行接收函数研究。所选远震事件的分布如图 2 所示。

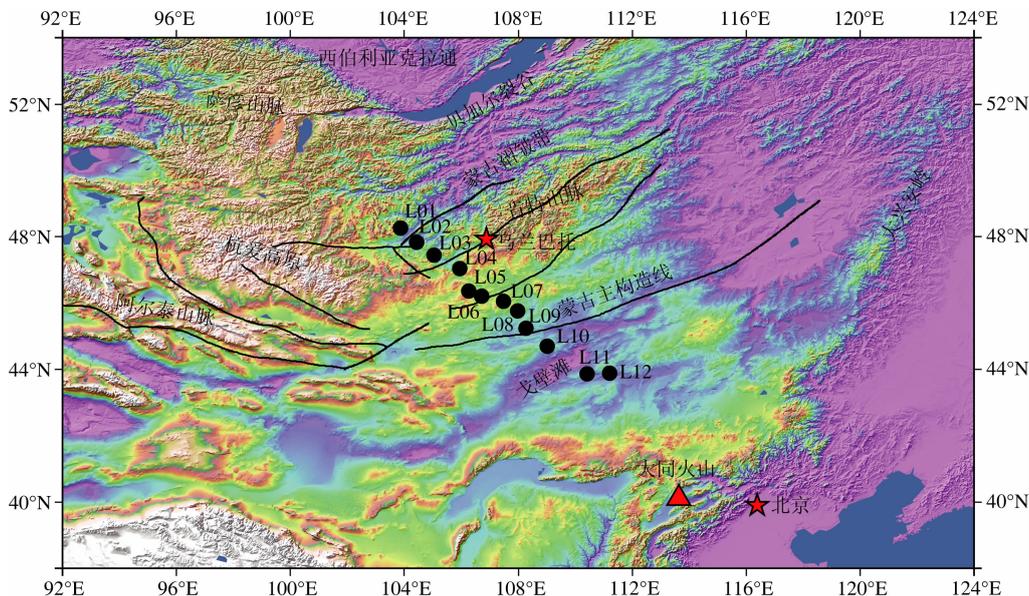


图 1 研究区域周边情况及台站分布图

红色三角形为火山,红色五角形为地名,黑色线为断层,L01—L12 是台站名,黑色点为台站位置。

Fig. 1 Map showing geology of the study area and surrounding regions and distribution of seismic stations

Red triangles denote volcanoes. Red pentagons denote place names. Black lines represent faults.

L01—L12 are station names. Black dots denote station locations.

地震仪器记录到的地震波信号通常可以用震源时间函数、地震波传播路径响应、震源区域的介质响应、接收区域的介质响应以及仪器响应的褶积来表示。对于远震地震事件记录而言,其到达接收台站的地震波可以视为陡角度入射的平面波。利用远震 P 波波形数据的垂直分量对径向和切向分量做反褶积可从中基本去除震源时间函数与传播路径的影响,进而提取到接收区介质响应的径向分量和切向分量,也就是我们要求的 P 波接收函数(吴庆举和曾融生, 1998)。

本文采用时间域反褶积方法来计算接收函数。在提取接收函数之前,首先对数据做以下处理:(1)截取 P 波到时前 50 s,后 150 s,在这一时间段内的波形几乎包含了地球内部各个界面所产生的转换震相(武岩, 2011);(2)对截取的数据进一步去除仪器响应,去倾斜,去均值,重采样,并用 0.05~2 Hz 的频率范围进行带通滤波,从而去除仪器响应和地下

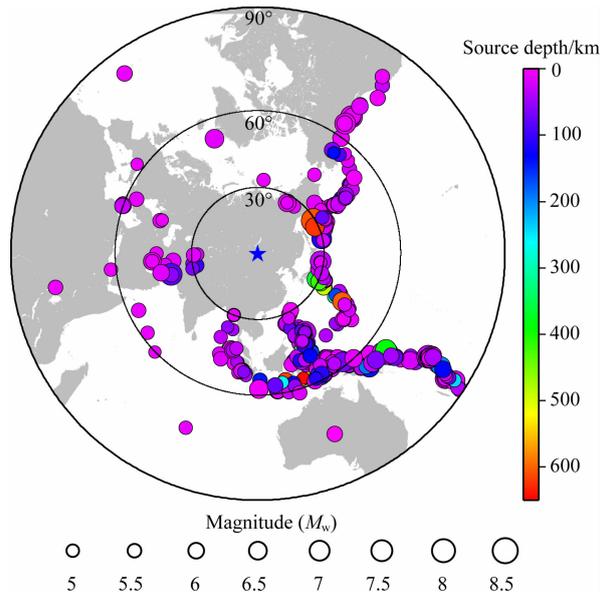


图 2 所用远震事件震中分布

Fig. 2 Epicentral distribution of teleseismic events used in this study

倾斜界面等影响;(3)挑选三分量齐全,震相清晰且垂直分量衰减快的地震事件,有助于在做接收函数褶积时较快地收敛;(4)检查数据参数(射线参数、分量方位角等)。

接收函数记录中,紧随直达 P 波之后的是来源于 Moho 面的转换震相主要为 Ps 转换波和 PpPs 以及 PpSs+PsPs 地表多次波. 利用这些转换震相和地表多次波与直达 P 波的到时关系即公式(1),可以有效约束 Moho 界面的深度与地壳平均波速比. 其中, H 为地壳厚度, V_p 为 P 波速度, V_s 为 S 波速度, p 是射线参数, t_{Ps} 是 Ps 震相与 P 波的到时差,同理 t_{PpPs} 是 PpPs 震相与 P 波的到时差, $t_{PpSs+PsPs}$ 是 PpSs+PsPs 震相与 P 波的到时差.

$$H = \frac{t_{Ps}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{V_p^2} - p^2}},$$

$$H = \frac{t_{PpPs}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2} + \sqrt{\frac{1}{V_p^2} - p^2}}, \quad (1)$$

$$H = \frac{t_{PpSs+PsPs}}{2\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2}}.$$

在进行 $H-\kappa$ ($\kappa=V_p/V_s$) 叠加时,每个 H 和 κ 都会对应一个到时,根据到时可以获得其在接收函数中对应的振幅,这些振幅按照公式(2)进行叠加,对在一定范围内的 H 和 κ 进行扫描,得到最大振幅的位置,即是求得的 H 和 κ 值,这种方法便是 $H-\kappa$ 叠加. 公式(2)中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 是振幅叠加的加权系数,基于三震相信噪比顺序减小的特点,本文在 $H-\kappa$ 叠加时,加权值分别取 0.6, 0.3 和 0.1, 初始速度模型为 IASP91, H 和 κ 的搜索步长分别为 0.5 km 和 0.01. 在 $s(H, \kappa)$ 取得最大值时,对其进行泰勒展开,略去高阶项,便得到 $s(H, \kappa)$ 的方差 (Zhu and Kanamori, 2000), 见公式(3).

$$s(H, \kappa) = \omega_1 r(t_{Ps}) + \omega_2 r(t_{PpPs}) + \omega_3 r(t_{PpSs+PsPs}), \quad (2)$$

$$\sigma_H = 2\sigma_s \left/ \frac{\partial^2 s}{\partial H^2} \right., \quad \sigma_\kappa = 2\sigma_s \left/ \frac{\partial^2 s}{\partial \kappa^2} \right. \quad (3)$$

公式(3)中 σ_H 和 σ_κ 分别为地壳厚度 H 和波速比 κ 的估计均方差,而 σ_s 是叠加函数 $s(H, \kappa)$ 的均方差. 图 3 分别给出 L05、L08 和 L09 这 3 个地震台站的 $H-\kappa$ 扫描结果示意图(白色椭圆为地壳厚度 H 和 κ (V_p/V_s) 的最佳取值范围)。

共转换点叠加(CCP)方法是根据共反射点叠加

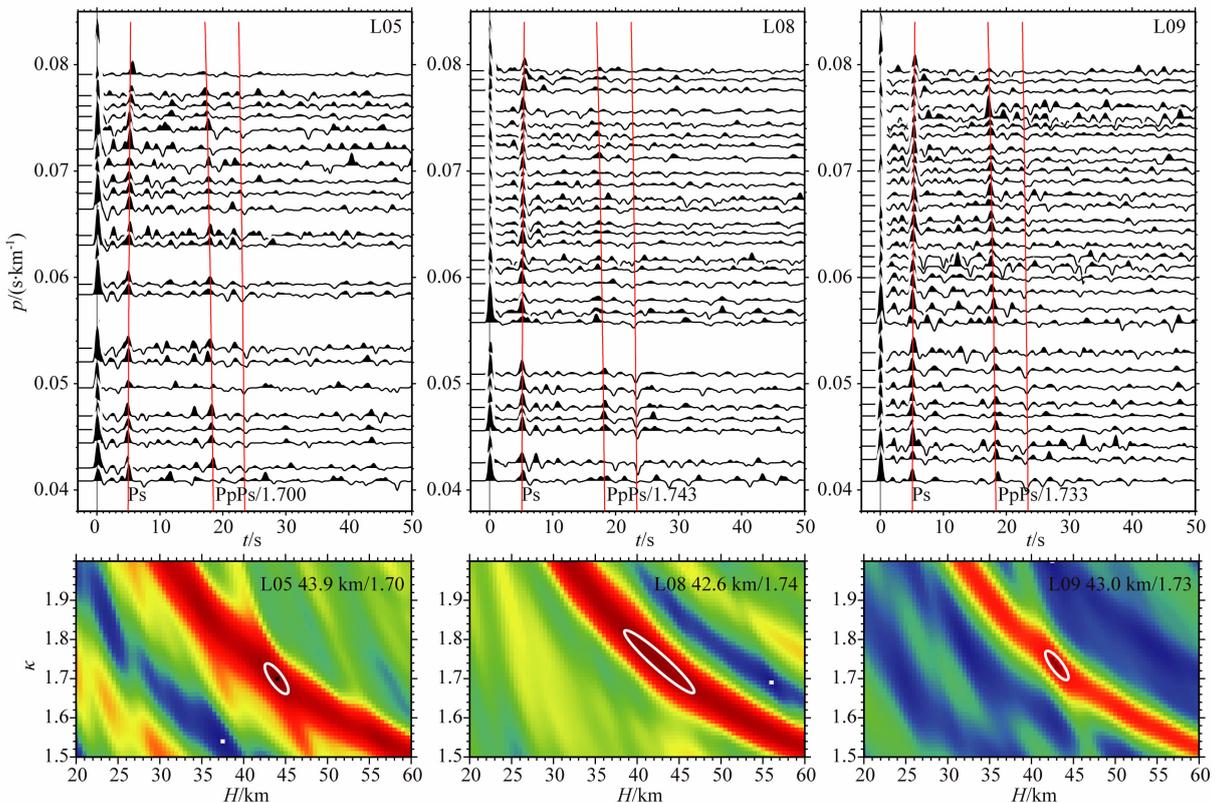


图 3 $H-\kappa$ 叠加方法获得的地壳厚度和 V_p/V_s 波速比估计

Fig. 3 Estimation of crustal thickness and V_p/V_s ratio by $H-\kappa$ stacking method

原理提出来的转换波界面成像方法 (Dueker and Sheehan, 1997), 可以获得直观的叠加剖面, 通过叠加可以凸显弱转换波震相、压制多次波、提高信噪比 (Zhu, 2000). 在 CCP 叠加中, 首先对台站下方结构进行网格划分, 分成若干个共转换点单元, 同时根据初始速度模型进行反向的射线追踪 (本文所用初始速度模型为 IASP91) 获取射线路径. 将接收函数的每个振幅看作某个对应深度界面所产生的转换波, 并反投影到对应的理论转换点. 对同一共转换点单元内的所有接收函数的转换波进行叠加, 这样转换振幅由于相长叠加而得到增强, 便可对台站下方的速度界面进行成像, 获得直观的 CCP 叠加剖面. 为增强莫霍界面的转换波 Ps 的成像效果, 我们还通过调整共转换点单元大小, 来增加共转换点单元内参与叠加的射线的数量 (武岩等, 2011).

3 结果与讨论

本文利用 $H-\kappa$ 扫描方法得到的地壳厚度以及泊松比如表 1 和图 4 所示. 结果显示研究区地壳厚度整体介于 39~45 km 之间, 均值为 42.6 km. L01—L10 号台站之间的地壳厚度较厚, 平均值为 43.3 km, 而位于南部戈壁即接近中国边境地区的 L11—L12 号台站下方的地壳厚度较薄, 约为 39 km, 两者相差约 4.3 km. 同时, CCP 叠加方法与 $H-\kappa$ 扫描方法得到的结果具有很好的一致性, 见图 5 (其中圆圈表示 $H-\kappa$ 叠加方法获得的地壳厚度去除台站海拔高度所得到的 Moho 深度, 洋红色显示为 CCP 叠加获取的 Moho 深度). 由图 5 可以看出, 研究区 Moho 埋深从西北到东南区域逐渐变浅, 且基本上与地形起伏变化趋势相似. 上述地壳厚度的区域性变化特征与 Gao 等 (2004) 的结果基本一致. 他们的结果显示蒙古褶皱带地壳厚度为 44~48 km, 且地壳从北到南逐渐变薄.

L10 和 L11 台站位于蒙古主构造线附近, 从 CCP 叠加剖图上可以看出 L10 和 L11 这两个相邻台站下方的地壳厚度相差较大, 达 4 km. 蒙古主构造线是一个板块消减的缝合带 (Kroner et al., 2005; Windley et al., 2007), 因此 L10 和 L11 台站下方地壳厚度 4 km 多的突变可能是板块消减缝合带 (Kroner et al., 2005; Windley et al., 2007) 的深部反映. 蒙古主构造线不仅是一个地形与构造上的分界线, 将蒙古分为南北两部分, 北部主要是前寒武纪和早古生代的地层, 南部主要是晚古生代的地层

(Badarch et al., 2002), 而且也是地壳厚度的陡变带, 其南侧地壳减薄, 北侧加深.

另外, 本文 $H-\kappa$ 扫描方法结果表明研究区台站下方地壳的波速比值介于 1.70~1.79 (σ 为 0.235~0.273) 之间, 均值为 1.75, 低于全球大陆的平均值 1.78 (Zandt and Ammon, 1995), 但在测线的西北与东南地区即 L01、L11、L12 号台站的波速比值比较高. 研究区的波速比值整体偏低, 且存在显著的横向变化, 一方面可能暗示着蒙古中南部地区的地壳总体以酸性为主, 仅在局部区域保留有铁镁质的地壳, 另一方面研究区地壳组分存在明显的横向差异, 可能反映了中亚造山带由不同块体构成, 也可能与中亚造山带形成后的后期改造有关.

通常而言, 地壳的厚度与构成在研究地壳起源和演化中有着紧密的约束关系, 而地壳的组分和地壳波速比相关 (Ji et al., 2009). 鉴于波速比 $\kappa = V_P / V_S$, 泊松比 $\sigma = 0.5 [1 - 1/(\kappa^2 - 1)]$, 因而波速比与泊松比表现为正相关关系. 实验表明, 温度和压力对泊松比 σ 影响很小, 而泊松比主要是随着岩石的年龄变化的, 大陆地壳的泊松比处于 0.25~0.27 之间 (Zandt and Ammon, 1995). 从岩石成分上来说, 在地壳成分组成中 SiO_2 等矿物的比重越高泊松比越小, 反之, 则越大 (Christensen et al., 1996; 李永华等, 2006). 对于下地壳岩石, 波速比值 $\kappa < 1.75$, $1.75 \leq \kappa \leq 1.81$, 以及 $\kappa > 1.81$ 分别表示岩石是由酸性、中性以及基性成分组成, 然而整个地壳的波速比相对于下地壳的 κ 要小一点, 大约在 0.02 左右 (Zandt and Ammon, 1995; Christensen, 1996; Cahng and Baag, 2007; Niu and James, 2002; Nair et al., 2006; He et al., 2013). 地幔物质的侵入是地壳增生的途径之一, 而地幔中富含铁镁质, 因此这个过程往往伴随着波速比的增大, 同时地壳运动的后期改造则可能使波速比逐渐变小. 另外, 局部熔融对波速比有很大的影响, 波速比会随着熔融程度的增加而增大 (Watanabe, 1993).

测线西北部的 L01 台附近不仅有新生代火山岩出露 (见图 6), 而且地质资料显示有晚古生代二叠纪—三叠纪大陆裂谷火山岩出露 (任纪舜等, 2002). 测线东南部 L11、L12 号台站位于蒙古主构造线的南部, 蒙古主构造线的南部主要是古生代志留纪—泥盆纪和石炭纪岛弧火山岩和火山碎屑岩, 并被中生代白垩纪盆地不整合覆盖 (Windley et al., 2007; 任纪舜等, 2002), 且在南部的我国境内有新生代火山岩出露. 台站 L01、L11 和 L12 的波速

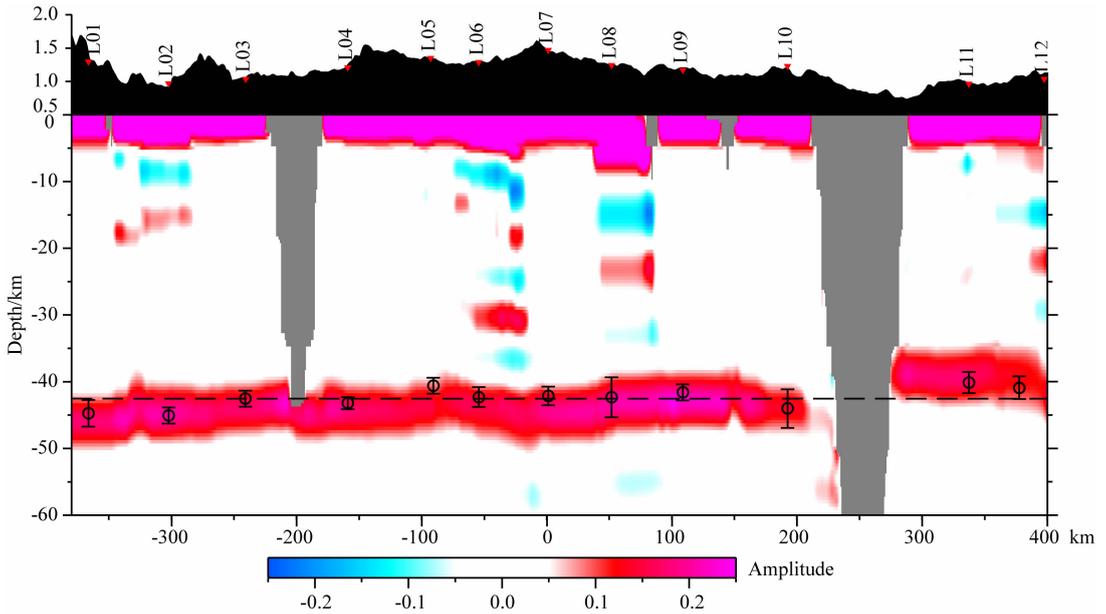


图 5 蒙古中南部地区 CCP 叠加剖面图

图中虚线为 42.5 km 深度, 圆圈为 $H-\kappa$ 叠加方法得到的台站下方的 Moho 深度.

Fig. 5 CCP profile of central and southern Mongolia

Dashed line is the depth of 42.5 km. Circles are Moho depth from the $H-\kappa$ stacking method.

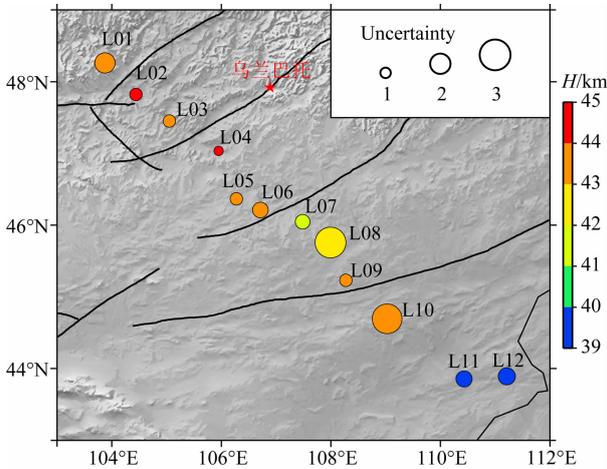


图 4 蒙古中南部地区地壳厚度图

Fig. 4 Crustal thickness distribution of central and southern Mongolia

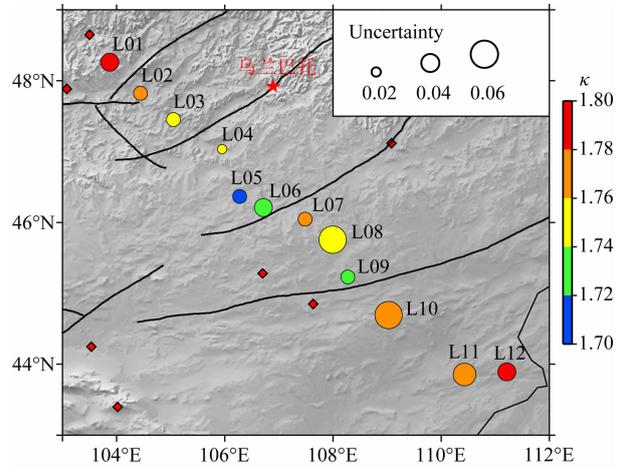


图 6 蒙古中南部地区地壳波速比

红色钻石形代表火山岩出露(IAVCEI, 1973; Whitford-Stark, 1987).

Fig. 6 Velocity ratios of central and southern Mongolia

Red diamonds represent volcano outcrops (IAVCEI, 1973; Whitford-Stark, 1987).

比分别为1.78、1.77和1.79,与其他台站相比偏高,可能与其附近观测到的新生代火山活动有关,也可能是晚古生代铁镁质地壳残余的反映.

本文的研究结果显示,除个别台站外蒙古中南部地区波速比普遍低于或等于 1.76,为此我们推测研究区地壳组分缺乏铁镁质物质.这与前人在本研究区域的北部、西北部以及西部地区获得的研究结果明显不同.面波-岩石学反演研究(Fullea et al., 2012)推测贝加尔南部—蒙古中部地区的下地壳为铁镁质的.人工地震折射剖面研究发现萨彦—贝加

尔褶皱带的下地壳存在一个宽达50~80 km的高速异常,该高速异常也被解释为铁镁质物质的底侵(Nielsen and Thybo, 2009).因此,我们认为铁镁质的下地壳并不是中亚造山带的普遍特征.

4 结论

本文利用 12 个宽频地震台站记录到的远震资料,采用接收函数 $H-\kappa$ 扫描叠加方法以及 CCP 叠

表 1 $H-\kappa$ 方法得到的地壳厚度以及波速比
Table 1 Crustal thickness and V_P/V_S ratio obtained
 by $H-\kappa$ stacking method

台站	纬度 (°N)	经度 (°E)	高程 (m)	地壳厚度 (km)	波速比	泊松比
L01	48.3	103.9	1300	43±2	1.78±0.04	0.269
L02	47.8	104.4	973	44.5±1.2	1.76±0.03	0.261
L03	47.5	105.1	1038	43.4±1.2	1.74±0.03	0.253
L04	47.0	106.0	1213	44±0.9	1.74±0.02	0.253
L05	46.4	106.2	1353	43.9±1.2	1.7±0.03	0.235
L06	46.2	106.7	1291	43.4±1.5	1.73±0.04	0.249
L07	46.0	107.5	1469	41.9±1.4	1.76±0.03	0.261
L08	45.8	108.0	1243	42.6±3.0	1.74±0.06	0.253
L09	45.2	108.3	1171	43±1.2	1.73±0.03	0.249
L10	44.7	109.0	1231	43.1±2.9	1.76±0.06	0.261
L11	43.9	110.4	966	39±1.6	1.77±0.05	0.266
L12	43.9	111.2	1036	39±1.7	1.79±0.04	0.273

加方法获取了台站下方的地壳厚度和波速比值。这两种方法获取的地壳厚度具有很好的一致性。结果表明研究区地壳厚度约在 35~45 km 之内,且由西北往东南逐渐变薄。本文结果与前人的地壳厚度估值基本一致(Gao et al., 2004)。此外,蒙古主构造线两侧台站下方的地壳厚度的陡变特征可能反映蒙古主构造线是一个板块消减的缝合带(Kroner et al., 2005; Windley et al., 2007)。台站下方地壳的平均波速比值介于 1.70~1.79 之间,均值为 1.75,推测研究区大部分地壳是缺乏铁镁质的。测线西北与东南地区的波速比值较高,可能反映研究区的西北与东南地区还残留有古生代铁镁质的下地壳,或与新生代火山活动有关。

致谢 感谢朱露培教授提供的接收函数叠加的程序及技术指导;感谢蒙古科学院天文与地球物理研究中心的相关研究人员以及参与蒙古台站仪器布设、数据提取的全体人员;感谢两位匿名审稿人提出的建设性意见。

References

Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia; implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 87-110.

Baljinnyam I, Bayasgalan A, Borisov B A, et al. 1993. Ruptures of major earthquakes and active deformation in Mongolia and its surroundings. *Geol. Soc. Am.*, 181: 62.

Barruol G, Deschamps A, Deverchere J, et al. 2008. Upper mantle flow beneath and around the Hangay dome, Central Mongolia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 274(1-2): 221-233, doi:10.1016/j.epsl.2008.07.027.

Calais E, Vergnolle M, San'kov V, et al. 2003. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994—2002): implications for current kinematics of Asia. *J. Geophys. Res.*, 108(B10): 2501-2501, doi:10.1029/2002JB002373.

Cahng S, Baag C. 2007. Moho depth and crustal V_P/V_S variation in southern Korea from teleseismic receiver functions: Implication for tectonic affinity. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97(5): 1621-1631.

Christensen N I. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *J. Geophys. Res.*, 101(B2): 3139-3156.

Cunningham W D, Windley B F, Dorjnamjaa D, et al. 1996. A structural transect across the Mongolian Altai; active transpressional mountain building in central Asia. *Tectonophysics*, 15(1): 142-156.

Cunningham W D. 2001. Cenozoic normal faulting and regional doming in the southern Hangay region, Central Mongolia: implications for the origin of the Baikal rift province. *Tectonophysics*, 331(4): 389-411.

Cunningham D. 2005. Active intracontinental transpressional mountain building in the Mongolian Altai: Defining a new class of orogen. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 240(2): 436-444, doi: 10.1016/j.epsl.2005.09.013.

Delvaux D, Moeys R, Stapel G, et al. 1995. Palaeostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part I. Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution. *Tectonophysics*, 252(1-4): 61-101.

Delvaux D, Moeys R, Stapel G, et al. 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, central Asia: Part II. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282(1-4): 1-38.

Dueker K G, Sheehan A F. 1997. Mantle discontinuity structure from midpoint stacks of converted P to S waves across the Yellowstone hotspot track. *J. Geophys. Res.*, 102(B4): 8313-8327.

Fullea J, Lebedev S, Agius M R, et al. 2012. Lithospheric structure in the Baikal-central Mongolia region from integrated geophysical-petrological inversion of surface-wave data and topographic elevation. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13(8): Q0AK09, doi:10.1029/2012GC004138.

Gao S, Davis P M, Liu H, et al. 1994. Seismic anisotropy and mantle flow beneath the Baikal rift zone. *Nature*, 371(6493): 149-151.

Gao S, Davis P M, Liu H, et al. 1997. SKS splitting beneath continental rift zones. *J. Geophys. Res.*, 102(B10): 22781-22797.

Gao S S, Liu K H, Davis P M, et al. 2003. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone. *J. Geophys. Res.*, 108(B4): 2194-2194, doi:10.1029/2002JB002039.

Gao S S, Liu K H, Chen C. 2004. Significant crustal thinning

- beneath the Baikal rift zone: New constraints from receiver functions analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 31(20): L20610, doi:10.1029/2004GL020813.
- He C S, Dong S W, Santosh M, et al. 2013. Seismic evidence for a geosuture between the Yangtze and Cathaysia blocks, South China. *Scientific Reports*, 3: 2200, doi:10.1038/srep02200.
- International Association of Volcanology and Chemistry of Earth's Interior. 1973. Post-Miocene Volcanoes of the World. IAVCEI Data Sheets, Rome: Internatl Assoc Volc Chemistry Earth's Interior.
- Ji S C, Wang Q, Salisbury M H. 2009. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson's ratio. *Tectonophysics*, 463(1-4): 15-30.
- Khain V E. 1990. Origin of the Central Asian mountain belt: collision or mantle diapirism. *Journal of Geodynamics*, 11(4): 389-394.
- Kind R, Kosarev G L, Petersen N V. 1995. Receiver function at the stations of the German Regional Seismic Network (GRSN). *Geophys. J. Int.*, 121(1): 191-202.
- Koulakov I. 1998. Three-dimensional seismic structure of the upper mantle beneath the central part of the Eurasian continent. *Geophys. J. Int.*, 133(2): 467-489.
- Kroner A, Windley B F, Badarch G, et al. 2005. Accretionary growth in the Central Asian Orogenic Belt of Mongolia during the Neoproterozoic and Palaeozoic and comparison with the Arabian-Nubian Shiels and the present Southwest Pacific. European Geosciences Union 2005, Geophysical Research Abstracts, 7: 06650.
- Kroner A, Windley B F, Badarch G, et al. 2007. Accretionary growth in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian-Nubian Shiels. *GSA Memoirs*, 200: 181-209, doi: 10.1130/2007.1200(11).
- Kulakov I Y. 2008. Upper mantle structure beneath southern Siberia and Mongolia, from regional seismic tomography. *Russian Geology and Geophysics*, 49(3): 187-196, doi: 10.1016/j.rgg.2007.06.016.
- Langston C A. 1979. Structure under mount rainier, Washington inferred from teleseismic body waves. *J. Geophys. Res.*, 84(B9): 4749-4762.
- Lebedev S, Meier T, van der Hilst R D. 2006. Asthenospheric flow and origin of volcanism in the Baikal Rift area. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 249(3-4): 415-424, doi:10.1016/j.epsl.2006.07.007.
- Lesne O, Calais E, Deverchere J. 1998. Finite element modeling of crustal deformation in the Baikal rift zone: new insights into the active-passive rifting debate. *Tectonophysics*, 289(4): 327-340.
- Lesne O, Calais E, Deverchere J, et al. 2000. Dynamics of intracontinental extension in the north Baikal rift from two-dimensional numerical deformation modeling. *J. Geophys. Res.*, 105(B9): 21727-21744.
- Ligorria J P, Ammon C J. 1999. Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bull Seismol. Soc. Am.*, 89(5): 1395-1400.
- Li Y H, Wu Q J, An Z H, et al. 2006. The Poisson ratio and crustal structure across the NE Tibetan Plateau determined from receiver functions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(5): 1359-1368.
- Liu Q Y, Kind R, Li S C. 1996. Maximal likelihood estimation and nonlinear inversion of the complex receiver function spectrum ratio. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 39(4): 500-511.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419-426.
- Mordvinova V V, Deschamps A, Dugarmaa T, et al. 2007. Velocity structure of the lithosphere on the 2003 Mongolian-Baikal transect from SV waves. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 43(2): 119-129.
- Nair S K, Gao S S, Liu K H, et al. 2006. Southern African crustal evolution and composition: Constraints from receiver function studies. *J. Geophys. Res.*, 111(B2): B02304, doi:10.1029/2005JB003802.
- Nielsen C, Thybo H. 2009. No Moho uplift below the Baikal rift zone: Evidence from a seismic refraction profile across southern Lake Baikal. *J. Geophys. Res.*, 114(B8): B08306, doi:10.1029/2008JB005828.
- Niu F L, James D E. 2002. Fine structure of the lowermost crust beneath the Kaapvaal craton and its implications for crustal formation and evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.* 200(1-2): 121-130.
- Owens T J. 1987. Crustal structure of the Adirondacks determined from broadband teleseismic waveforms. *J. Geophys. Res.*, 92(B7): 6391-6401.
- Peltzer G, Tapponnier P. 1988. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basing during the India-Asia collision: and experimental approach. *J. Geophys. Res.*, 93(B12): 15085-15117.
- Petit C, Deverchere J, Calais E, et al. 2002. Deep structure and mechanical behavior of the lithosphere in the Hangai-Hovsgol region, Mongolia: new constraints from gravity modeling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 197(3-4): 133-149.
- Petit C, Deverchere J, Houdry F, et al. 1996. Present-day stress field changes along the Baikal rift and tectonic implications. *Tectonophysics*, 15(6): 1171-1191.
- Petit C, Fournier M. 2005. Present-day velocity and stress fields of the Amurian Plate from thin-shell finite-element modelling. *Geophys. J. Int.*, 160(1): 358-370.
- Petit C, Koulakov I, Deverchere J. 1998. Velocity structure around the Baikal rift from teleseismic and local earthquake travel times and geodynamics implication. *Tectonophysics*, 296(1-2): 125-144.
- Polyansky O P. 2002. Dynamic causes for the opening of the Baikal rift zone: a numerical modeling approach. *Tectonophysics*, 351(1-2): 91-117.
- Puzyrev N N, Mandelbaum M M, Krylov S V, et al. 1978. Deep

- structure of the Baikal and other continental rift zones from seismic data. *Tectonophysics*, 45(1): 15-22.
- Tapponnier P, Molnar P. 1979. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal region. *J. Geophys. Res.*, 84(B7): 3425-3459.
- Watanabe T. 1993. Effects of water and melt on seismic velocities and their application to characterization of seismic reflectors. *Geophys. Res. Lett.*, 20 (24): 2933-2936, doi: 10.1029/93GL03170.
- Whitford-Stark J L. 1987. A survey of Cenozoic volcanism on mainland Asia. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, 213: 1-74.
- Windley B F, Allen M B. 1993. Mongolian plateau: Evidence for a late Cenozoic mantle plume under central Asia. *Geology*, 21 (4): 295-298.
- Wu Q J, Li Y H, Zhang R Q, et al. 2007. Receiver function estimated by multi-channel deconvolution. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 50(3): 791-796.
- Wu Q J, Zeng R S. 1998. The crustal structure of Qinghai-Xizang plateau inferred from broadband teleseismic waveform. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 41(5): 669-679.
- Wu Y. 2011. The structure of the crust and upper mantle in North China Craton from teleseismic receiver function [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration.
- Wu Y, Ding Z F, Zhu L P. 2011. Crustal structure of the North China craton from teleseismic receiver function by the common conversion point stacking method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(10): 2528-2537.
- Xiong X, Shan B, Wang J Y, et al. 2010. Small-scale upper mantle convection beneath the Mongolia-Naikal rift zone and its geodynamic significance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53 (4): 529-541.
- Yuan X H, Ni J, Kind R, et al. 1997. Lithospheric and upper mantle structure of southern Tibet from a seismological passive source experiment. *J. Geophys. Res.*, 102(B12): 27491-27500.
- Zandt G, Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*, 374(6518): 152-154.
- Zhao D P, Lei J S, Inoue T, et al. 2006. Deep structure and origin of the Baikal rift zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 243(3-4): 681-691.
- Zhang G C, Wu Q J, Pan J T, et al. 2013. Study of crustal structure and Poisson ratio of NE China by $H-\kappa$ stack and CCP stack methods. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(12): 4084-4094, doi:10.6038/cjg20131213.
- Zhu L P, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *J. Geophys. Res.*, 105(B2): 2969-2980.
- Zhu L P. 2000. Crustal structure across the San Andreas Fault, southern California from teleseismic converted wave. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 179(1): 183-190.
- Zonenshain L P, Savostin L A. 1981. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. *Tectonophysics*, 76(1-2): 1-45.
- Zorin Y A, Kozhevnikov V M, Novoselova M R, et al. 1989. Thickness of the lithosphere beneath the Baikal rift zone and adjacent regions. *Tectonophysics*, 168(4): 327-337.
- Zorin Y A, Mordvinova V V, Turutanov E K, et al. 2002. Low seismic velocity layers in the Earth's crust beneath eastern Siberia (Russia) and central Mongolia: Receiver function data and their possible geological implication. *Tectonophysics*, 359 (3-4): 307-327, doi:10.1016/S0040-1951(02)00531-0.
- Zorin Y A, Turutanov E K, Kozhevnikov V M, et al. 2006. Cenozoic upper mantle plumes in east Siberia and central Mongolia and subduction of the Pacific plate. *Doklady Earth Sciences*, 409(1): 723-726.
- Zorin Y A, Turutanov E K, Mordvinova V V, et al. 2003. The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure. *Tectonophysics*, 371(1-4): 153-173.

附中文参考文献

- 李永华, 吴庆举, 安张辉等. 2006. 青藏高原东北缘地壳 S 波速度结构与泊松比及其意义. *地球物理学报*, 49(5): 1359-1368.
- 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. *地球物理学报*, 39(4): 500-511.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚等. 2002. 中国及邻区大地构造图. 北京: 地质出版社.
- 吴庆举, 李永华, 张瑞青等. 2007. 用多道反褶积方法测定台站接收函数. *地球物理学报*, 50(3): 791-796.
- 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. *地球物理学报*, 41(5): 669-679.
- 武岩. 2011. 利用接收函数方法研究华北克拉通地壳上地幔结构 [博士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 武岩, 丁志峰, 朱露培. 2011. 利用共转换点叠加方法研究华北地区地壳结构. *地球物理学报*, 54(10): 2528-2537.
- 张广成, 吴庆举, 潘佳铁等. 2013. 利用 $H-\kappa$ 叠加方法和 CCP 叠加方法研究中国东北地区地壳结构与泊松比. *地球物理学报*, 56 (12): 4084-4094, doi:10.6038/cjg20131213.

(本文编辑 何燕)