

郭震,唐有彩,陈永顺等. 华北克拉通东部地壳和上地幔结构的接收函数研究. 地球物理学报, 2012, 55(11):3591-3600, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.008.

Guo Z, Tang Y C, Chen John, et al. A study on crustal and upper mantle structures in east part of North China Craton using receiver functions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(11):3591-3600, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.008.

华北克拉通东部地壳和上地幔结构的 接收函数研究

郭 震,唐有彩,陈永顺*,宁杰远,冯永革,岳 汉

北京大学地球与空间科学学院地球物理研究所,北京 100871

摘 要 利用北京大学和早期中国科学院地质与地球物理研究所在华北克拉通东部地区布设的共 34 台宽频带地震仪记录的远震体波资料,获取 P 波接收函数和 S 波接收函数,再分别通过偏移成像和共转换点叠加(CCP)和倾斜叠加得到了华北克拉通东部横跨郯庐断裂带地区沿剖面的地壳和上地幔速度间断面分布. 研究表明,鲁西隆起下方的莫霍面的深度要比华北盆地和青岛地区浅约 5 km,形成类似屋顶状的莫霍面隆起. 郯庐断裂带和聊考断裂带下方的莫霍面有明显的错断. 岩石圈与软流圈的分界面(以下简称 LAB)的深度从太行山山前的约 100 km 深度上升到鲁西隆起下方约 60 km 深,向东在青岛地区下方 LAB 深度进一步变浅. 我们利用倾斜叠加计算台站下方波速比得到地壳内的泊松比变化,结果显示鲁西隆起泊松比值分布相对均匀,而青岛地区内泊松比变化剧烈,可能反应了该地区作为苏鲁大别超高压变质带的北缘经历了较为复杂的地质演化过程.

关键词 华北克拉通,地壳和上地幔间断面,S 波接收函数,LAB,泊松比,鲁西隆起,苏鲁大别超高压变质带

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.008

中图分类号 P315

收稿日期 2012-06-10,2012-07-25 收修定稿

A study on crustal and upper mantle structures in east part of North China Craton using receiver functions

GUO Zhen, TANG You-Cai, John CHEN*, NING Jie-Yuan, FENG Yong-Ge, YUE Han

Institute of Theoretical and Applied Geophysics, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract The P-wave and S-wave receiver function analysis has been performed along a profile which consists of 34 broadband seismographs to image the crustal and upper mantle structure in east part of North China Craton(NCC). The results reveal that the Moho interface lies at a depth of more than 30 km below the North China basin and shallows to less than 30 km in the West Shandong (Luxi) uplift which displays a dome-like shape. This Moho depth jump is roughly coincident with the transverse location of the Liaokao fault. An obvious uplift of the Moho is also detected below the Tanlu fault zone, which reflects that the fault may cut through the Moho under it. The lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) is observed ~ 100 km beneath the Taihang orogenic belt and increases to ~ 60 km below the Luxi uplift. Farther eastward, it seems to be shallower beneath the Qingdao region. We also apply the slant-stack method to determine Poisson's ratio. The result shows rather uniform distribution of Poisson's ratio in the Luxi

基金项目 国家自然科学基金项目(90814002,40821062)资助.

作者简介 郭震,男,1987年生,硕士研究生,主要从事华北地区深部结构研究. E-mail:gzpku@pku.edu.cn

* **通讯作者** 陈永顺,男,1956年生,教授,主要从事地震大地构造学和海洋地球物理学研究. E-mail:johnyc@pku.edu.cn

uplift. In contrast, it is much variable in the Qingdao region which is the north part of the Sulu-Dabie ultra-high-pressure metamorphic belt, implying a more complex evolution history.

Keywords North China Craton, Discontinuity of crust and upper mantle, S receiver function, LAB, Poisson's ratio, Luxi uplift, Sulu-Dabie ultra-high-pressure metamorphic belt

1 引言

华北克拉通块体(以下称为 NCC)是地球上最为古老的形成于太古宙时期的克拉通块体^[1]. 地质和地球化学研究揭示 NCC 块体的东部在晚中生代到新生代期间经历了大规模的活化、岩石圈减薄^[2-3], 并伴随有大规模的断陷盆地形成、岩浆与地震活动^[4].

NCC 岩石圈的减薄具有时空不一致性, 尤其是近似南北走向的重力梯度带(NSGL)两侧岩石圈厚度存在明显差异^[5], 在其西部岩石圈厚度大多在 100~120 km 以上, 而在其东部大多小于 80~100 km^[6]. 对于 NCC 东部岩石圈厚度垂向减薄的程度存在两种不同的观点^[7], 一种认为岩石圈的减薄只涉及到岩石圈下部, 现今的岩石圈地幔是减薄后的残留^[8], 第二种认为部分下地壳与整个岩石圈地幔一起丢失, 导致软流圈地幔和上覆地壳接触^[9]. 而这两种观点都涉及到了晚中生代以来软流圈物质的大范围上涌^[3]. NCC 东部最大的上地幔剪切带-郯庐断裂带被认为是软流圈物质上涌的通道^[10], Chen 等利用 P 波接收函数偏移成像得到郯庐断裂带下方岩石圈, 软流圈边界(LAB)深度精细变化, 发现 LAB 呈现出穹顶状的结构, 最浅部的顶点位于郯庐断裂带下方^[11], 这可能是软流圈物质上涌破坏岩石圈的有力佐证.

接收函数是目前获得地震台站下方断面深度的最有效手段, 它是利用远震入射到台站下方的 Ps 或 Sp 转换波来探测地下速度间断面^[12]. 因此, P 波接收函数在研究地壳波速结构、莫霍面深度、地幔过渡带结构等方面得到了广泛的应用, 但是由于多次波的干扰 P 波接收函数很难确定 LAB 的深度, 因此我们借鉴前人提取 S 波接收函数的方法^[13], 利用共转换点叠加成像(CCP)技术^[14], 获得地震台站下方 LAB 的深度变化.

2 区域构造概况

NCC 东部地区覆盖着一系列中生代沉积盆

地, 统称为华北盆地, 其南北边界分别为内蒙古—燕山造山带和秦岭—大别山造山带; 西侧为山西断陷带, 东部则是郯庐断裂带将华北盆地与胶东隆起分开^[3]; 华北盆地中部为鲁西隆起(图 1).

鲁西隆起区与华北盆地区具有相同的结晶基底, 新生代以来华北盆地和鲁西隆起构造演化过程发生显著的分异作用^[15]. 华北盆地基底在新生代发生大幅度伸展裂陷, 后转入裂陷后的热沉寂时期. 鲁西隆起中新生代进入强烈的地壳运动时期, 发育典型的幔源岩浆活动, 中生代侵入岩分布十分广泛, 类型多样^[16]. 新生代岩浆主要为辉绿岩和玄武岩, 通过对捕虏体的研究表明新生代以来该区又有一次地幔局部熔融、侵入、上涌的过程^[17-18]. 郯庐断裂带是中国东部地区一条规模巨大的北北东向深大断裂, 纵贯华北盆地东部, 横穿了不同地质构造单元, 在中、新生代盆地变形、变位过程中扮演了重要的角色. 中生代时期郯庐断裂是一条强烈的左旋走滑断层或断裂系, 新生代以来却表现出强烈的挤压性质兼有右旋走滑特点, 反映了中国大陆东部自新生代以来构造应力场的变化^[3]. 郯庐断裂带东部的青岛地区属于大别—苏鲁超高压变质带的北东缘(图 1). 大别—苏鲁超高压变质带是北中国板块和扬子板块俯冲碰撞的产物, 在地表形成最厚达 10 km 的超高压变质岩带^[19-20].

为了进一步得到 NCC 东部更大范围的地壳与上地幔间断面结构, 深刻了解新生代以来鲁西隆起的隆升原因与机制, 更加充分地认识 NCC 东部上述三大地质构造体之间的作用、关系, 我们利用北京大学和中国科学院地质与地球物理研究所在 NCC 东部地区布设的一条东西向宽频带地震测线得到的数据, 分析 NCC 东部横穿华北盆地、鲁西隆起、青岛地区东西走向约 600 km 范围内地壳与上地幔结构分布.

3 资料来源及处理方法

本文使用的天然地震记录数据来自两部分: 在 2009—2010 年期间北京大学在华北盆地鲁西隆起东、西缘布设的 21 台宽频带数字地震仪(图 1 中红

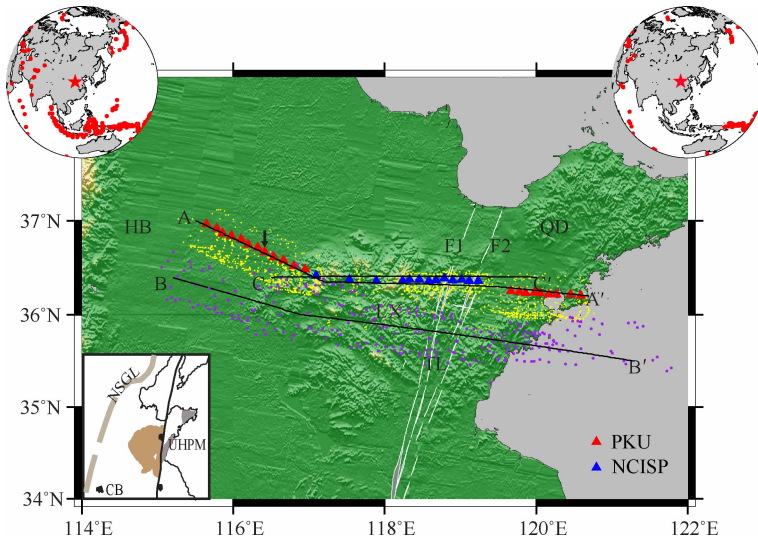


图1 NCC东部地区地质构造背景和台站分布

红色三角为北京大学所布台站,蓝色三角为中国科学院地质与地球物理研究所布设台站(NCISP);黄色圆点为P波接收函数在深度35 km处的出射点,紫色圆点为S波接收函数在深度70 km处的出射点;A-A'为P波接收函数偏移成像时所截剖面,B-B'为S波共转换点叠加时所截剖面;C-C'为Chen^[11]利用P波接收函数获得研究区LAB深度的剖面;F1、F2为郯庐断裂带两支;箭头所指处为图4中莫霍面跃变的位置。左下角插入图为NCC东部地质构造背景,UHPM为苏鲁大别山超高压变质带北缘;NSGL为南北重力梯度带;黑色圆块为沿郯庐断裂带喷溢的新生代玄武岩。左上角插入图为P波接收函数所用事件全球分布;右上角插入图为S波接收函数所用事件全球分布。

HB:华北盆地,QD:青岛地区,TL:郯庐断裂带,LX:鲁西隆起,CB:新生代玄武岩。

Fig. 1 Tectonics in east part of North China Craton (NCC) and seismic stations distribution in the study region

Red and blue triangles are portable stations from PKU and Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (NCISP), respectively; Yellow dots denote the piercing points at 35 km depth for P-to-S converted phases, while purple ones denote S-to-P piercing points at 70 km depth; A-A' is P-to-S migration profile and B-B' is S-to-P CCP profile, both two profiles traverse Tanlu Faults Zone (F1, F2); The C-C' denotes the profile that Chen^[11] used P wave receiver functions migration method to get the depth of LAB in the study region. The location of Moho depth jump, as shown in Fig. 4 is also marked (black arrow). The bottom inset on the left shows the tectonic setting of the study region. UHPM: north part of Sulu-Dabie ultrahighpressure metamorphic belt; NSGL: North-South gravity-gradient line; Black solid circles denote Cenozoic basalts. The top inset on the left illustrates the distribution of teleseismic events used in P-to-S migration, and its counterpart on the right shows the events used in S-to-P CCP. HB: Huabei Basin, QD: Qingdao region,

LX: Luxi uplift, CB: Cenozoic basalt.

色三角)和在2001—2003年期间中国科学院地质与地球物理研究所在鲁西隆起、郯庐断裂带布设的13台宽频带数字地震仪(图1中蓝色三角)。台站间距约为10~15 km,走向为近东西向分布。

我们采用时域迭代的方法得到各台站下方的接收函数^[21],选取初动前15 s,初动后60 s的时间窗截取震相。对于P波接收函数,选取了震级大于5.5级,震中距为30°~90°的地震。对原始数据进行0.1~2.5 Hz的带通滤波,去除低频和低频信号,采用信噪比较好的数据,将原始三分量转换到垂向、径向、切向,选取垂向和径向都有清晰震相的记录。在接收函数的计算中,我们选取 α 为5的低通高斯滤波器,水准因子选取0.001,经过挑选得到1549条接收函数记录,图1左上角插入图为本文P波接收函数所用地震事件的全球分布。

对于S波接收函数,选择震中距为50°~80°的

地震,将三分量转到垂向、径向、切向,去除自由表面的影响,将记录还原到上行的P波方向和S波方向^[22],然后对记录进行0.03~0.4 Hz的带通滤波,选取 α 为1.5。反转S波接收函数的时间轴,使转换波位于时间轴的正向,并对其振幅进行反转,使正向的振动表示了速度随深度增加的界面。最终得到495条有效记录,图1右上角插入图为本文S波接收函数所用地震事件的全球分布。

本研究采用接收函数偏移成像的方法研究台站下方地壳和上地幔间断面结构。利用Wilson发展的基于克希霍夫偏移理论的方法对莫霍面深度进行成像,并进一步利用多次波Ppps、Pspss+ppss成像并与Pms的成像结果进行对比,提高了对莫霍面深度的约束能力^[23]。在二维情况下克希霍夫偏移积分公式为:

$$u_{(x,z)} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega} S_{ir}(\theta) \frac{\partial}{\partial t} u_{(x_m, z=0)} dx, \quad (1)$$

式中 $u_{(x,z)}$ 和 $u_{(x_{in},z=0)}$ 分别为地下和地表处的波场, $1/vr$ 为波传播的几何扩散因子, $S_{cr}(\theta)$ 为倾角因子, 对于 Pms 波, θ 为散射波与直达波之间的夹角, 其修正了入射波在不同方向上的散射强度. 将上式线性化后通过求解关系式 $d = Gm$ 即可解得模型中散射点的强度 m , 其中矩阵 G 可由给定的速度模型和射线参数得到, d 为观测数据, 图 2 为部分台站 P 波接收函数动校正后叠加并归一化之后的结果. 华北盆地内(台站 SW01—SW07)由于巨厚沉积层的影响 P 波直达波有明显的延时, 大致勾勒出盆地的形状, 同时 Pms 波信号较弱, 而且多次波几乎不可见. 而在剖面最东边的青岛地区 Pms 和多次波都比较清晰.

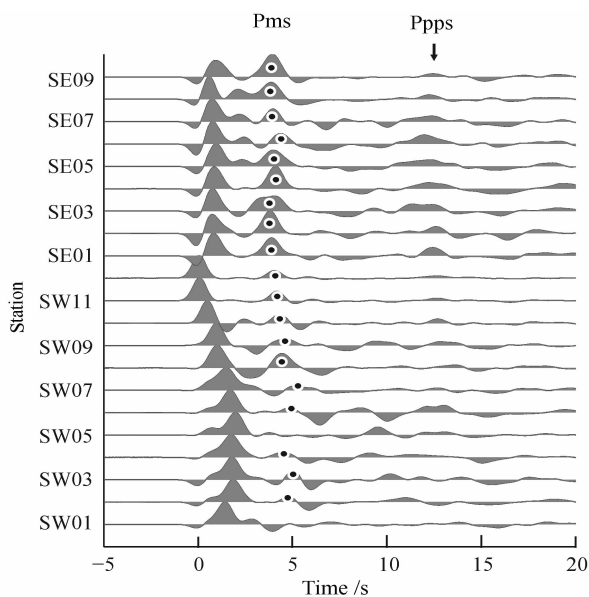


图 2 部分台站 P 波接收函数动校正后叠加并归一化结果
 纵坐标为台站名, 入射 P 波在 Moho 面的转换波及其多次波分别标为 Pms 和 Ppps, 位于青岛地区的台站 Pms 波和 Ppps 都较为清晰, 而位于华北盆地的台站由于受到较厚的沉积层的影响 Pms 波和 Ppps 较弱, 且直达 P 波有明显的延时.

Fig. 2 Moveout-corrected receiver functions at some stations
 Vertical coordinate denotes station names; Converted (Pms) and multiple converted phases (Ppps) at Moho are clearly in Qingdao region while due to the impact of thick sediment in Huabei Basin Pms and Ppps are all weak, and the direct P waves in Huabei Basin are also delayed.

S 波受 P 波尾波影响噪音较大, 可用的远震记录数目远小于 P 波接收函数的事件, 所以我们在 S 波接收函数成像中采用了 CCP 偏移方法: 将 S 波接收函数动校正到理论射线路径上, 在不同深度叠加落入 bin 中的数据. 由于 S 波的入射点较为分散, 成像的 LAB 将是更大范围内平滑的结果.

4 华北克拉通东部地壳与上地幔间断面

4.1 P 接收函数波偏移成像

偏移成像采用的模型取自 CUB 全球模型的差值结果^[24], 并考虑了台站的高程影响. 图 3a 为利用 Pms 转换波偏移成像结果, 结果显示华北盆地内莫霍面深度约为 40 km, 到鲁西隆起下方莫霍面上升到约 30 km, 莫霍面上升范围大致对应于华北盆地和鲁西隆起的交界处的聊考断裂. 而在青岛地区莫霍面深度在 30~40 km 的范围内变化. 图 3b 为 Ppps 多次波偏移结果, 对比图 3a 得到的莫霍面深度, 在鲁西隆起、郯庐断裂带、青岛地区内部两者成像深度较为一致, 而在华北盆地内 Ppps 偏移成像的莫霍面结果比 Pms 偏移成像的莫霍面结果要浅约 5 km.

华北盆地内存在较厚的约 5 km 的沉积层, 图 3a 受沉积层影响直达波的延迟清晰可见, 大致勾勒出凹陷盆地的形态, 台站 SW01—SW07 位于华北盆地沉积层上. 为了探讨较厚的沉积层对接收函数偏移成像得到的莫霍面的结果的影响, 我们对盆地区的 CUB 插值速度模型进行了修正, 加入了 5 km 厚的沉积层^[25], 改正的速度模型见表 1. 偏移成像的结果见图 3c, 黑线以西的区域为使用修正后模型的偏移成像结果, 黑线以东的区域仍使用 CUB 模型. 模型修正后的 Pms 转换波偏移成像结果显示盆地区莫霍面深度约为 32 km, 而在 Ppps 多次波偏移成像的结果中我们未观测到清晰的莫霍面深度分布.

表 1 华北盆地地表沉积层速度模型

Table 1 Velocity model for stratified sediments in Huabei Basin

层厚 (km)	P 波波速 (km/s)	S 波波速 (km/s)
0.5	1.32	0.60
1.5	2.20	1.25
2.0	2.90	1.70
1.0	3.80	2.20

鲁西隆起内由于台站分布较少的缘故, 有些地区莫霍面没有清晰成像. 郯庐断裂(F1、F2)下方莫霍面出现 5 km 范围的深度变化, 莫霍面有明显错断, 提供了郯庐断裂带切穿莫霍面的证据, 进而支持前人提出的郯庐断裂带为岩石圈尺度的中国东部大断裂带, 并且大量对地幔包体的研究也显示新生代郯庐断裂已切入上地幔^[26]. 另外郯庐断裂带下方地

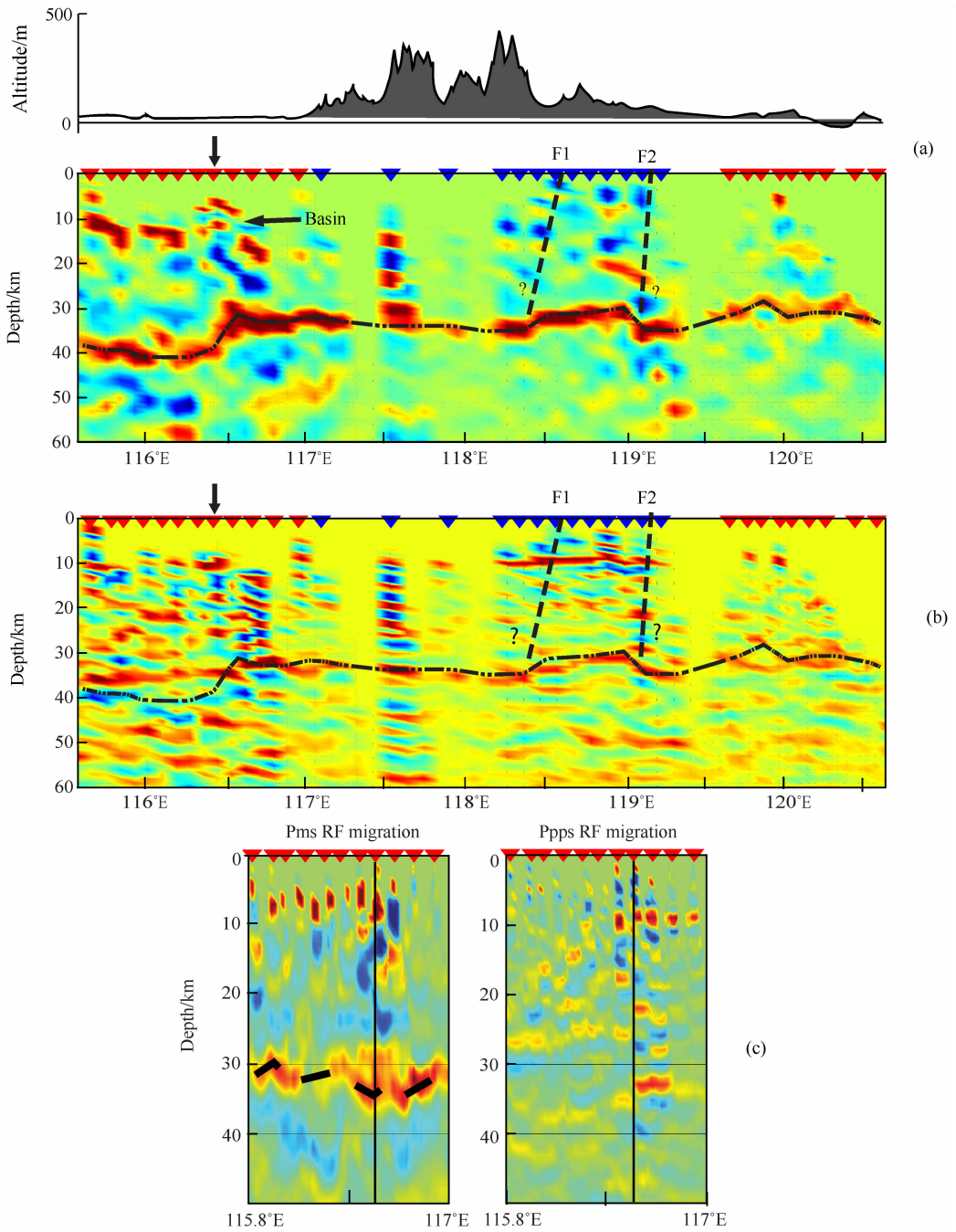


图 3 P 波接收函数偏移成像莫霍面的结果

(a)Pms 转换波偏移成像结果,上方为地表地形. F1、F2 为郯庐断裂带;(b)Ppps 多次波偏移成像的结果. 箭头所对应的下方 Moho 面上升约 10 km,在华北盆地区,P 波直达波大致勾勒出沉积层的形状. (c)在盆地区对速度模型进行沉积层修正后偏移的结果,对黑线以西的区域我们在地表加上如表 1 的速度模型,黑线以东的区域仍然使用 CUB 模型.

Fig. 3 P-to-S migration images

The migration images for line A-A', (a) for Pms and (b) for Ppps. F1 and F2 denote Tanlu Fault Zone, and it seems that the faults have cut through Moho. Arrows indicate a 10-km-jump at Moho, that Moho depth is about 40 km in Huabei Basin and about 30 km in Luxi Uplift, and the jump roughly corresponds to Liaokao fault. (c) Pms and Ppps migration images for the Huabei Basin with modified velocity model.

壳内存在高、低速层相间的现象,显示出复杂的波速变化. 我们推测郯庐断裂穿过莫霍面,可能为软流圈物质上涌提供通道.

青岛地区下方莫霍面深度变化剧烈,在 30~

40 km 的范围内起伏震荡,并在东部有加深的趋势,显示出与郯庐断裂带西侧不同的构造形态. 青岛地区属于苏鲁—大别山超高压变质带的北缘,因此该地区的地壳演化史可能与华北盆地区和鲁西隆起区

不同.

4.2 S波接收函数 CCP 成像

如上文所述,P波接收函数在应用到 LAB 成像时需要考虑多次波的影响,应用范围受到很大限制,但是 Chen 等在考虑到不同情况下 Pms 波和多次波的差异,利用新发展的 P 波接收函数 Wave-Quation 偏移方法成功地得到了鲁西地区(图 4c 对应区域) LAB 深度^[11],现在我们利用 S 波接收函数偏移成像剖面 B-B' 的 LAB 深度,对比 Chen 的结果,将进一步约束整个区域的 LAB 深度变化范围(见图 4a).

图 4b 包括了华北盆地和鲁西隆起西部,在东经 115°—116.5°—一百多公里范围内 LAB 从华北盆地西部约 100 km 上升到鲁西隆起约 60 km,并在鲁西隆起东部地区有进一步上升的趋势,在东经 114°—

115.5°、117°—117.5°处对应于 LAB 深度的波形出现了两个峰值,这可能是由于 CCP 的固有缺陷,即在界面深度变化地区成像较差所致^[14].

图 4c 对应于 Chen^[11]利用 P 波接收函数得到的结果(图 4d),图 1 中 C-C' 剖面标示了 Chen 所用剖面的位置,Chen 的结果显示 LAB 呈隆起型,深度约为 60~80 km,在郟庐断裂附近隆起达到最浅处.我们的结果与 Chen 用 P 波接收函数得到的结果较一致,LAB 深度同样在 60~80 km 处,隆起顶部大致位于鲁西隆起下方.

图 4e 为青岛地区下方的 LAB 深度,由西到东深度进一步减少,最深处为 75 km,最浅处到达 60 km,在东部 LAB 最浅处,LAB 的 Smp 转换波与莫霍面转换波的旁瓣叠加在一起.图 4a 为整个剖面完整的结果,可以看到 LAB 呈西深东浅的形态,在

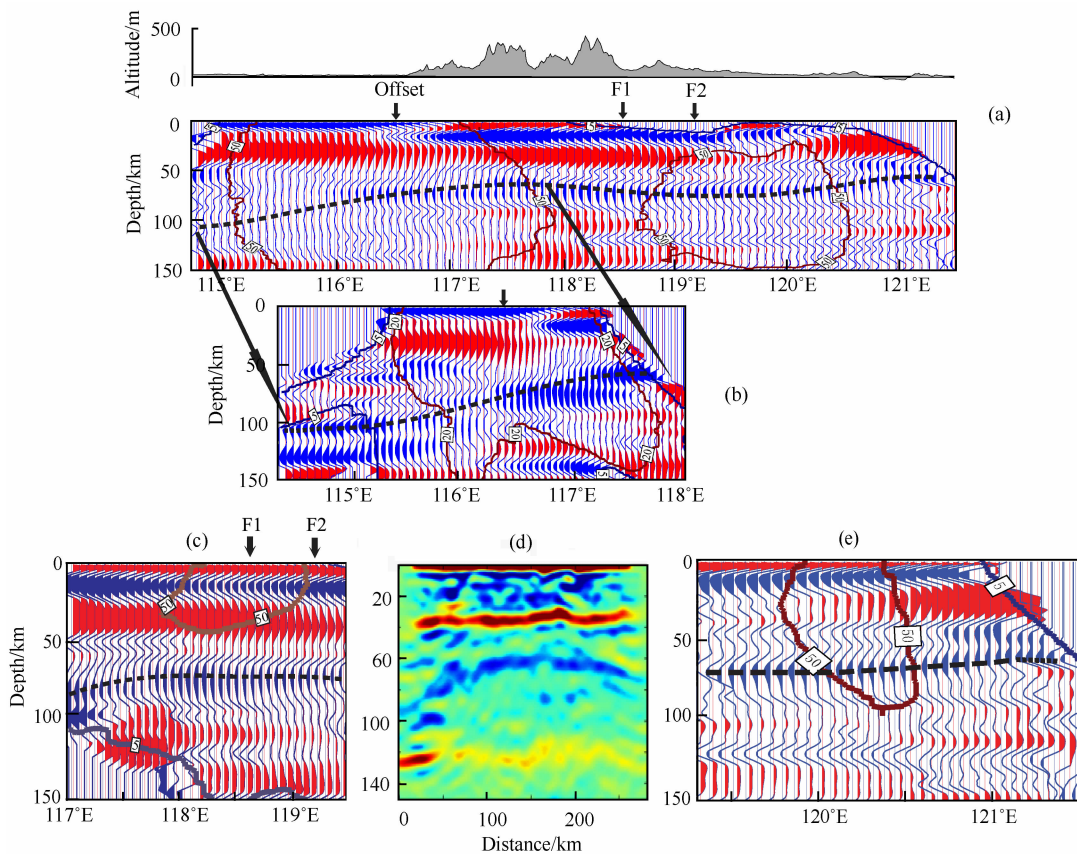


图 4 S 波接收函数共转换点叠加成像 LAB 的结果

(a) 研究区完整结果,(b)为(a)箭头所指的华北盆地和鲁西隆起部分地区的 LAB 成像结果,(c)为郟庐断裂带下方 LAB 的成像,F1、F2 为郟庐断裂,图中的数字代表了射线数量分布;(d)为(c)对应区域 Chen 利用 P 波接收函数得出的 LAB 的结果^[11],横坐标为 Chen 原图中剖面的坐标;(e)青岛地区下方 LAB 的成像结果;offset 为图 3 莫霍面跃变处对应的位置.

Fig. 4 S-to-P CCP images

The depth of LAB in the study region is less than 100 km(a), and beneath the basin-uplift boundary (b) the LAB depth changes from about 80 km in Huabei Basin to about 60 km in Luxi uplift. In Tanlu Fault Zone (c), LAB displays an arc-like shape which is similar to Chen's results^[11] (d). LAB seems to be shallower beneath the Qingdao region (e). F1 and F2 denotes the Tanlu fault. The numbers in images denote ray pathes number.

华北盆地西部最深达到 100 km, 而到胶东隆起东部的东海内岩石圈厚度减薄到 60 km. 并在鲁西隆起中部和胶东隆起的东部形成两个隆起的峰值. 由于整个剖面中华北盆地区的信号较其他地区弱, 我们将 4b 的结果对应于整体剖面上, 以期保持剖面的完整性. S 波对于莫霍面的成像结果较差, 但仍可以看出其深度约 30 km, 对比 P 波偏移结果, 误差范围为 5~10 km, 这样我们也可以粗略地估计对比 P 波的结果和 S 波得出的 LAB 的误差范围为 5~10 km, 但是由于 LAB 的 S_p 转换波周期要大于莫霍面的转换波, 这个误差范围将可能进一步扩大.

4.3 泊松比分布

利用倾斜叠加的方法可以得到每个台站下方的莫霍面(Moho)深度和波速比. 本文选取转换波和多次波都较为清晰的远震记录参与计算, 由于缺乏研究区 P 波波速随深度分布的模型, 我们利用前述偏移方法得出的莫霍面深度进行约束, 选取不同的初始模型, 得到台站下方的莫霍面深度 H 和波速比 κ ^[27-28]. 图 5a 为台站 SE08 和 063 的 $H\kappa$ 搜索叠加结果, 红色十字为搜索过程的最优点, 误差估计采用了 bootstrap 方法. 最终得到对应于 22 个台站的有效结果, 由于沉积层的影响, 位于华北盆地内的台站没有得到有效的波速比. 然后利用如下公式:

$$\sigma = \frac{\left[1.0 - 2\left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2\right]}{2\left[1 - \left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2\right]}, \quad (2)$$

估计沿剖面台站下方地壳平均泊松比, 结果显示如图 5b. 鲁西隆起内(台站 103—051)泊松比较高, 变化也较为平缓, 都大于 0.27. 郯庐断裂带(台站 045—021)泊松比出现一定起伏变化, 从最低的 0.269(台站 027)上升到 0.297(台站 021), 略大于鲁西隆起的值. 而胶东隆起内(台站 SE01—SE09)变化幅度最为剧烈, 本研究的整个剖面中的泊松比最大、最小值均出现在胶东隆起内.

地壳内部平均泊松比作为了解地壳内部介质一个非常重要的参数^[29], 可以对地壳内部物质的成分给出一定的约束^[30]. 根据 Zandt 的研究结果^[29], 上地壳的泊松比值一般要小于下地壳的泊松比值, 当上地壳的泊松比的取值在 0.27~0.28 时, 下地壳的泊松比值应当大于 0.28. 对于下地壳而言高的泊松比可以用较高的温度和围压来解释, 或者预示着下地壳富含铁镁质成分. 由于受台站的数量和分布所限我们无法得到整个区域大范围的泊松比分布, 但现有的结果依然显示了不同区域泊松比的变化具

有不同的特点. 鲁西隆地区得到的较高且较为均匀的泊松比分布似乎预示着下地壳经历过幔源岩浆的大规模侵入. 青岛地区泊松比的强烈变化表明该地区与鲁西隆起经历了不同的构造演化过程.

5 结论和讨论

通过对 NCC 东部接收函数的研究我们获得了沿台阵剖面的华北盆地、鲁西隆起和青岛地区地壳和岩石圈间的精细结构, 我们发现 LAB 由华北盆地下方的~100 km 深度上升到鲁西隆起的~60 km 深度, 在鲁西隆起下方形成穹顶状的拱起, 其最高(浅)处大致对应于郯庐断裂带下方, 这一结果与 Chen 用 P 波接收函数得到的结果一致^[11], LAB 在青岛地区同样具有拱起的形态, 维持在 60 km 深度, 并向东有进一步减薄的趋势. 莫霍面由华北盆地下方的大于 30 km 上升到鲁西隆起下方的~30 km, 上升区大致对应于聊考断裂, 莫霍面呈拱起型. 并且在郯庐断裂带下方莫霍面也有明显的错断, 提供了郯庐断裂带切穿莫霍面的证据, 支持前人关于郯庐断裂带为岩石圈尺度的中国东部大断裂带的认识. 虽然受台站的数量所限无法得到整个区域的泊松比变化, 但依然可以从有限资料中观察到鲁西隆起地区和青岛地区泊松比变化差异较为明显, 鲁西隆起泊松比较高, 且变化较为平缓, 在郯庐断裂带达到最高; 而郯庐断裂带以东的青岛地区泊松比变化非常剧烈, 表明该地区作为苏鲁一大别超高压变质带的北缘经历了更为复杂的地质构造演化过程.

中、新生代以来华北盆地和鲁西隆起构造演化上发生显著的分异作用, 鲁西隆起经历了强烈的地壳运动, 中、新生代都存在幔源玄武岩的喷溢和侵入. 鲁西新生代玄武岩包括了拉斑玄武岩和碱性玄武岩, 对镁铁质包体和巨晶的研究表明, 包体来源于上地幔 58~82 km 深度范围, 这些证据都表明新生代以来该区又有一次上地幔局部熔融、上涌的过程^[9,17]. 我们推断新生代以来, 郯庐断裂带的发育和构造活动促进了上地幔局部熔融和软流圈物质局部上涌, 使得郯庐断裂带下方的岩石圈形成局部的拱起, 最浅处达~60 km. 软流圈物质局部上涌和大规模幔源岩浆的侵入将鲁西隆起抬升约 5 km(如图 6), 其中郯庐断裂和聊考断裂可能提供了幔源岩浆侵入的通道, 同时大规模幔源岩浆的侵入形成该地区地壳普遍较高的泊松比. 而青岛地区起伏变化的莫霍面和泊松比可能与苏鲁一大别山超高压变质带

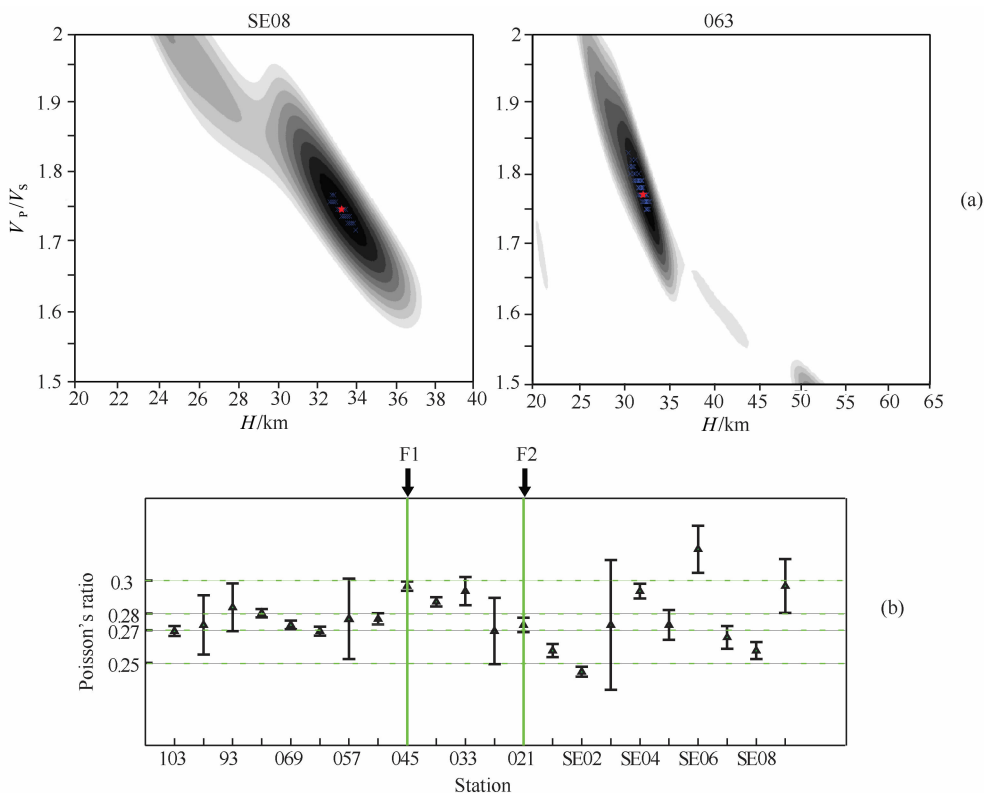


图 5 倾斜叠加获得泊松比的结果

(a) 台站 SE08 和 063 倾斜叠加的结果示意图, 红色五角星为最终搜索得到的结果, 蓝色星号为 bootstrap 搜索结果, 灰度代表了搜索的等值线; (b) 得到的鲁西隆起和青岛地区地壳平均泊松比, F1、F2 为郯庐断裂带。

Fig. 5 Poisson's ratio from Slant-Stack

(a) Stacking results using $H\kappa$ analysis in station SE08 and 063. Red stars denote the final results; (b) Distribution of crustal Poisson's ratios in Luxi Uplift and Qingdao region. F1 and F2 are Tanlu Fault Zone.

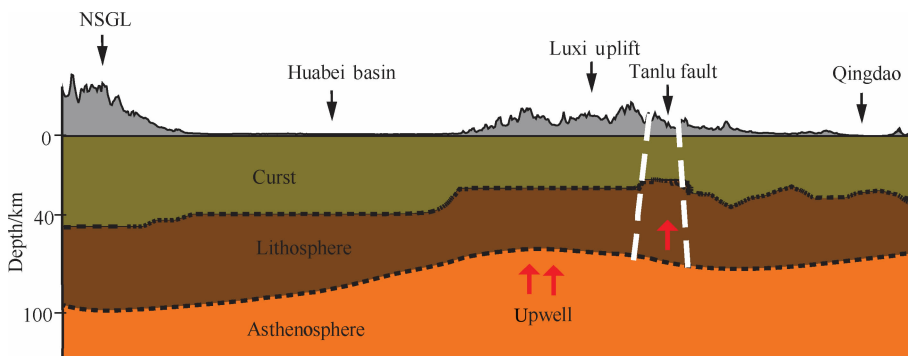


图 6 华北克拉通东部地壳、上地幔结构

红色箭头代表了新生代以来该区地幔局部熔融和上涌的过程。

Fig. 6 Schematic crust and upper mantle structures in east part of North China Craton
Red arrows represents the process of partial melting and upwelling since Cenozoic in this region.

有关, 还有待于进一步研究。

致谢 作者向参与北京大学流动地震台阵的架设、数据采集工作的北京大学“地震大地构造学研究所”的同学和老师表示衷心的感谢。感谢中国科学院地质与地球物理研究所“流动地震台网中心”为本研究提供地震波形数据。

参考文献 (References)

[1] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 1992, 20(4): 339-342.
[2] Ren J Y, Tamakib K, Li S, et al. Late Mesozoic and

- Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 2002, 344(3-4): 175-205.
- [3] Xu Y G, Chuang S L, Ma J L, et al. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in the western and eastern Sino-Korean craton: Constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths. *The Journal of Geology*, 2004, 112(5): 593-605.
- [4] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 2004, 432(7019): 892-897.
- [5] 周新华. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. *地学前缘*, 2006, 13(2).
- Zhou X H. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: review and prospect. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, 13(2): 50-64.
- [6] Chen L, Tao Wang, Zhao L, et al. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the northeastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1-2): 56-68.
- [7] 吴福元, 葛文春, 孙德有等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. *地学前缘*, 2003, 10(3): 51-60.
- Wu F Y, Ge W C, Sun D Y, et al. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, 10(3): 51-60.
- [8] Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobe and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. // *Magmatic processes and plate tectonics*. 1993: 10.
- [9] 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. *长春科技大学学报*, 1999, 29(4): 313-318.
- Wu F Y, Sun D Y. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China. *Journal of Changchun University of Science and Technology* (in Chinese), 1999, 29(4): 313-318.
- [10] Xu Y G, Chung S L, Ma J L, et al. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in the western and eastern Sino-Korean Craton: constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths. *The Journal of Geology*, 2004, 112(5): 593-605.
- [11] Chen L, Zheng T Y, Xu W W. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: B09312, doi: 10.1029/2005JB003974.
- [12] Langston C A. Structure under mount rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(Nb9): 4749-4762.
- [13] Yuan X H, Kind R, Li X Q, et al. The S receiver functions: synthetics and data example. *Geophysical Journal International*, 2006, 165(2): 555-564.
- [14] Dueker K G, Sheehan A F. Mantle discontinuity structure from midpoint stacks of converted P to S waves across the Yellowstone hotspot track. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B4): 8313-8327.
- [15] 李理, 钟大赉, 时秀朋. 鲁西隆起和济阳凹陷新生代隆坳耦合关系. *地质学报*, 2007, 81(9): 1215-1228.
- Li L, Zhong D L, Shi X P. Cenozoic uplifting/subsidence coupling between the West Shandong Rise and the Jiyang Depression, Northern China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2007, 81(9): 1215-1228.
- [16] 张锡明, 张岳桥, 季玮. 山东鲁西地块断裂构造分布型式与中生代沉积-岩浆-构造演化序列. *地质力学学报*, 2007, 13(2): 163-172.
- Zhang X M, Zhang Y Q, Ji W. Fault distribution patterns of the Luxi block, Shandong, and Mesozoic sedimentary-magmatic-structural evolution sequence. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 2007, 13(2): 163-172.
- [17] 邱瑞照, 邓晋福, 周肃等. 华北地区岩石圈类型: 地质与地球物理证据. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2004, 34(8): 698-711.
- Qiu R Z, Deng J F, Zhou S, et al. Lithosphere types in North China-Evidences from geology and geophysics. *Science in China (Ser. D)*, 2005, 48(11): 1809-1827.
- [18] 牛树银, 胡华斌, 毛景文等. 鲁西地区地质构造特征及其形成机制. *中国地质*, 2004, 31(1): 34-39.
- Niu S Y, Hu H B, Mao J W, et al. Structure in western Shandong and its genetic mechanism. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2004, 31(1): 34-39.
- [19] 许志琴, 张泽明, 刘福来等. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制. *地质学报*, 2003, 77(4): 433-450.
- Xu Z Q, Zhang Z M, Liu F L, et al. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, Central China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2003, 77(4): 433-450.
- [20] 杨文采, 程振炎, 陈国九等. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(I)——深反射地震. *地球物理学报*, 1999, 42(1): 41-52.
- Yang W C, Cheng Z Y, Chen G J, et al. Ceophysical investigations in northern Sulu UHPM belt, part I: deep seismic reflection. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, 42(1): 41-52.
- [21] Ligorria J P, Ammon C J. Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999, 89(5): 1395-1400.
- [22] Kennett B L N. The removal of free surface interactions from three-component seismograms. *Geophysical Journal International*, 1991, 104(1): 153-154.
- [23] Wilson D, Aster R. Seismic imaging of the crust and upper mantle using regularized joint receiver functions, frequency-wave number filtering, and multimode Kirchhoff migration. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B05305, doi: 10.1029/2004JB003430.
- [24] Shapiro N M, Ritzwoller M H. Monte-Carlo inversion for a

- global shear-velocity model of the crust and upper mantle. *Geophysical Journal International*, 2002, 151(1): 88-105.
- [25] Zhao L, Zheng T Y, Xu W W. Modeling the Jiyang depression, northern China, using a wave-field extrapolation finite-difference method and waveform inversion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(3): 988-1001.
- [26] 朱光, 牛漫兰, 宋传中等. 郯庐断裂带新生代的土地幔剪切作用与火山活动. *安徽地质*, 2001, 11(2): 106-112.
Zhu G, Niu M L, Song Z Z, et al. Upper mantle shearing and volcanic activities along the Tan-lu fault zone in Cenozoic. *Geology of Anhui* (in Chinese), 2001, 11(2): 106-112.
- [27] Zhu L P, Kanamori H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B2): 2969-2980.
- [28] Owens T J, Zandt G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution. *Nature*, 1997, 387(6628): 37-43.
- [29] Zandt G, Ammon C J. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*, 1995, 374(6518): 152-154.
- [30] 许卫卫, 郑天愉. 渤海湾盆地北西盆山边界地区泊松比分布. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1077-1084.
Xu W W, Zheng T Y. Distribution of Poisson's ratios in the northwestern basin-mountain boundary of the Bohai Bay Basin. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, 48(5): 1077-1084.

(本文编辑 胡素芳)