

危自根,陈 凌,杨小林. 辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带台站下方地壳厚度和平均波速比(V_P/V_S)的横向变化及其构造意义. 地球物理学报, 2011, **54**(11): 2799~2808, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.010

Wei Z G, Chen L, Yang X L. Transverse variations of crustal thickness and V_P/V_S ratio under the stations in the Liaodong anticline-Yanshan belt-Xingmeng orogenic belt and their tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54** (11): 2799~2808, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.010

辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带台站下方地壳厚度和平均波速比(V_P/V_S)的横向变化及其构造意义

危自根^{1,2}, 陈 凌¹, 杨小林³

1 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049

3 陕西省地震局, 西安 710068

摘 要 本文研究采用接收函数 $H-\kappa$ 方法获得了辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带台站下方的地壳厚度和平均波速比(V_P/V_S)。结果显示, 研究区域三个构造区地壳平均厚度略有差别, 分别为 32、33 km 和 35 km, 但横向变化特征各异。辽东台隆地壳中间厚两端薄, 燕山带地壳厚度的变化相对平缓, 而在兴蒙造山带内, 以索伦缝合带为界地壳呈由东南向西北增厚趋势, 并在缝合带附近变化迅速。 V_P/V_S 比值在整个研究地区也表现出显著波动, 特别是在燕山带波速比横向变化明显, 在靠近兴蒙造山带的边界附近(大致对应于南北重力梯度带位置)明显增高; 而在兴蒙造山带波速比则相对偏低, 且横向变化较小。燕山带与兴蒙造山带地壳结构特征的差异表明, 燕山带在中-新生代可能经历了更为强烈的后期改造。南北重力梯度带附近地壳结构的明显改变, 并结合前人观测到的该处岩石圈深部结构的强烈横向变化, 表明重力梯度带可能是一条岩石圈尺度的大型陆内构造边界带, 其两侧地区可能经历了不同的显生宙岩石圈演化过程。兴蒙造山带(索伦缝合带附近)以及辽东台隆地壳厚度的变化与地形相对应, 而其波速比值也相对稳定, 这可能反映了两个区域各自受到的地壳改造横向差异性相对较小, 结构和成分相对均匀。

关键词 辽东台隆, 燕山带, 兴蒙造山带, 地壳厚度, 波速比

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.010

中图分类号 P315

收稿日期 2011-01-05, 2011-10-26 收修定稿

Transverse variations of crustal thickness and V_P/V_S ratio under the stations in the Liaodong anticline-Yanshan belt-Xingmeng orogenic belt and their tectonic implications

WEI Zi-Gen^{1,2}, CHEN Ling¹, YANG Xiao-Lin³

1 State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Shaanxi Earthquake Administration, Xi'an 710068, China

Abstract We obtained the crustal thickness and average crustal V_P/V_S ratio along the profiles across the Liaodong anticline, Yanshan belt and Xingmeng orogenic belt using $H-\kappa$ stacking of receiver functions. The result shows that the average crustal thicknesses of these three tectonic units are 32, 33 and 35km, respectively, indicative of slight differences, and display distinct

transverse variations in the crustal structure. The crust is thicker in the middle and thinner on each side in the Liaodong anteklise, whereas the thickness of the crust varies smoothly in the Yanshan belt. In the Xingmeng orogenic belt, the crust thickens sharply from southeast to northwest near the Solonker suture. The V_p/V_s ratio also fluctuates obviously in the study region. In particular, it varies laterally in the Yanshan belt and increases markedly nearby the boundary area between the Yanshan belt and the Xingmeng orogenic belt (near the north-south gravity lineament (NSGL)). However, the V_p/V_s ratio is relatively low and has no much change in the Xingmeng orogenic belt. The distinct crustal structures between the Yanshan belt and the Xingmeng orogenic belt are probably indicative of a more intense crustal modification in the Yanshan belt compared with the Xingmeng orogenic belt during Mesozoic-Cenozoic time. Significant changes in the crustal structure roughly coincide with the NSGL. This together with the concordant change in the deep lithospheric structure observed previously suggests that the NSGL may be a lithospheric-scale intra-continental tectonic boundary, the opposite sides of which may have evolved differently in the Phanerozoic. The thickening of the crust in the Xingmeng orogenic belt (near the Solonker suture) and the Liaodong anteklise appears to mirror the surface topography, and corresponds to relatively stable V_p/V_s ratios. This feature probably indicates relatively even Phanerozoic modifications of the crust in each region, resulting in minor lateral variations in the crustal structure and components at the present time.

Keywords Liaodong upwarp, Yanshan belt, Xingmeng orogenic belt, Crustal thickness, V_p/V_s ratio

1 引言

不同于世界上的典型克拉通,华北克拉通在中-新生代经历了广泛而强烈的岩石圈构造活化,其岩石圈地幔^[1~6]与地壳^[7,8]的厚度和性质都发生了明显改变,表现为克拉通东部冷的、厚(约 200 km)且难熔的克拉通型岩石圈被新生代热的、薄(<100 km)且相对饱满的大洋型岩石圈所代替。这一古老克拉通的活化过程不仅显著影响了华北克拉通内部的构造格局和深部结构,而且必然在克拉通的边界带和邻近地区留下构造印记。因此,深入认识边界带和周边区域的结构特征及其横向变化,将为进一步研究华北克拉通破坏的过程和机制提供重要补充。

为了系统了解华北克拉通东北部边界区域的壳幔结构特征,中国科学院地质与地球物理研究所地震台阵实验室(www.seislab.cn)分两期布设了由 117 个流动地震台站组成的两条线性台阵(图 1)。台阵跨越辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带三个构造带,并穿过重力发生突然变化的南北重力梯度带。台阵记录的地震数据已经用于区域地壳和岩石圈结构的成像研究,并取得了重要进展^[6~12]。

新的地震学研究进展与其他学科的观测结果相结合表明,华北克拉通东北部边界区域经历了显著

的岩石圈改造和破坏,但改造程度和过程存在横向差异。辽东台隆发生了地壳和岩石圈的明显减薄与破坏^[13~17];北缘的燕山带区域地质构造、壳幔结构和性质都表现出明显的横向变化^[9~11,17~19],可能与该造山带在中生代经历了复杂的挤压和伸展变形以及强烈的岩浆活动有关。位于燕山带以北的兴蒙造山带,属于华北克拉通之外的区域,在显生宙经历了显著的陆壳增生和改造作用^[20]。地震层析成像结果显示,该造山带也发生了岩石圈的改造和减薄^[9,12,21~23]。

为了进一步认识辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带的中-新生代构造演化及其受华北克拉通破坏过程的影响,本文将着重于对三个区域台站下方的地壳结构特征进行对比分析。地壳厚度(H)和波速比(V_p/V_s ,或 κ)是反映地壳结构特征的基本参数,是研究大陆地壳演化的重要信息。已有研究表明,构造特征不同和/或年龄不同的大陆地区往往存在明显的地壳厚度差异,而地壳成分和性质的区域变化则常常反映在波速比的相对大小上^[24]。比如,大陆造山带区域地壳厚度往往超过 40 km,甚至达 70~80 km,而伸展裂隙区地壳大多较薄,只有或不足 30 km;大陆地壳低的波速比可能暗示后期改造作用或存在下地壳拆沉,而波速比超过 1.87 则可能指示地壳中存在流体、部分熔融或者蛇纹岩化现象^[25],或有铁镁质物质的侵入等^[26]。在通常情况下,

大陆碰撞、下地壳拆沉、对称与非对称拉伸,以及基性岩浆底侵等作用都可能造成地壳厚度与波速比以某种线性或非线性关系发生变化^[27].因此,对地壳厚度和波速比的同时观测和对比可以提供区域地壳构造演化的重要约束.

本文利用两条线性密集台阵记录的地震资料,采用接收函数方法来研究辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带台站下方的地壳厚度和波速比横向变化特征.接收函数方法采用接近垂直入射的远震波形记录,具有较高的横向分辨率,因此在布设了密集固定或流动地震台阵的区域,基于该方法可以得到台阵下方高分辨率的结构图像.本文采用 Zhu 等^[28]提出的接收函数 $H-\kappa$ 叠加方法获得研究区域的地壳厚度和平均波速比,并进一步对比分析三个构造区台站下方的地壳结构的变化特征及其与地壳-岩石圈构造过程的关系.

2 数据与方法

本文研究资料来源于中国科学院地质与地球物理研究所地震台阵实验室执行的“华北内部结构计划”(North China Interior Structure Project, NCISP)第三期(NCISP III, 2003~2004年)和第六期(NCISP VI, 2007~2008年)流动地震台阵远震波形记录.第三期共布设了 57 个台站,平均间距约 10 km;第六期总共设了 60 个台站,平均间距约 15 km.地震台站的具体信息可参考 Zheng 等^[10], Tang 等^[9]和李明明等^[12].由于在盆地地区,远震波形记录中的深部结构震相常常被厚沉积层强多次反射波所掩盖,难于分离并有效成像,因此本文未考虑沉积层厚度超过 3000 m 的台站资料.本文使用了测线中 97 个台站的数据,其中燕山带、兴蒙造山带和辽东台隆分

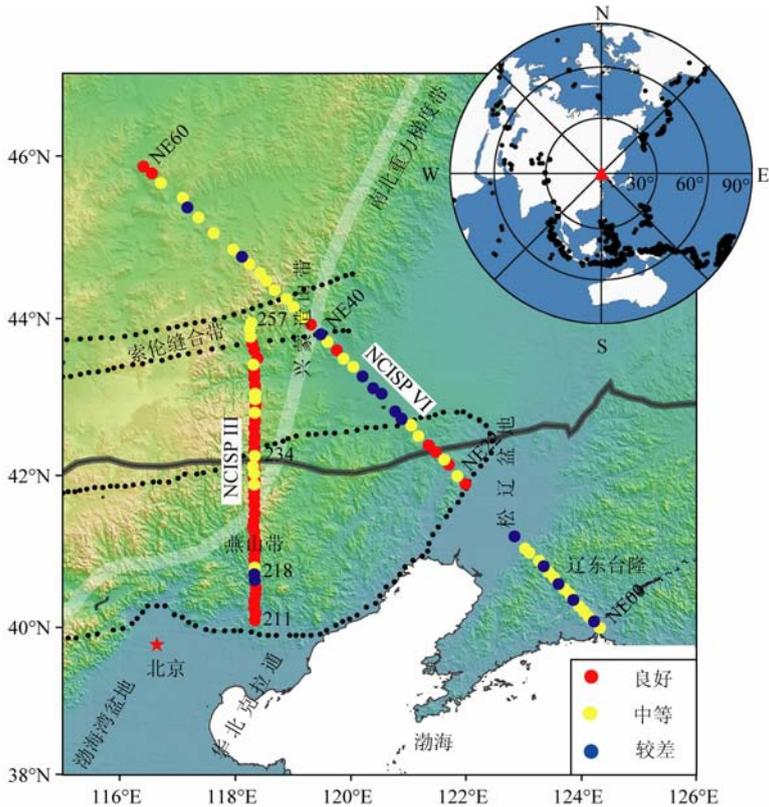


图 1 研究区域、台站以及地震分布

图中圆点代表本文所用到的 97 个台站位置,不同颜色代表不同的数据质量见图例.黑色实线代表华北克拉通的北部边界,白线是南北重力梯度带,右上插图表明地震的分布情况.图中索伦缝合带与燕山带(黑色圆点所围区域)分别参照 Xiao 等^[20]和郑亚东等^[19]结果.

Fig. 1 Study region, stations and earthquakes distribution

Solid circles show the locations of the stations used, different colors indicate different data quality (see legend). Black line shows the northern border of the North China Craton and white line denotes the North-South Gravity Lineament. The earthquakes distribution is shown in the up-right inset. The spatial ranges of the Solonker suture and Yanshan Belt (outlined with black dots) are from Xiao et al. ^[20] and Zheng et al. ^[19].

别有 36、46 个和 15 个(图 1). 这些台站都位于岩石基底之上, 仪器工作状态相对稳定, 数据记录质量较高. 通过精选, 最后共使用了约 16500 个高质量的地震记录, 具体信息见表 1. 所有地震的震级都大于 5.5 级, 震中距为 $30^\circ \sim 90^\circ$, 大多数地震分布在背方位角 $110^\circ \sim 230^\circ$ 之间(图 1).

表 1 研究区域台站和接收函数的具体信息

Table 1 The information of stations and receiver functions in study region

	辽东台隆	燕山带	兴蒙造山带
台站数量	15	36	46
良好台站数量	0	25	17
中等台站数量	11	8	23
较差台站数量	4	3	6
单台最少接收函数	80	85	103
单台最多接收函数	203	268	258
单台平均接收函数	132	170	182
接收函数(总数)	1974	6134	8384

远震接收函数主要由 Ps 转换波和多次反射波等组成, 记录了台站下方速度间断面对地震波的响应. 由于具有消除震源效应的优点, 因此非常适合用来获取地壳和上地幔间断面的结构信息. 本文选取从 P 波到时前 20 s 至到时后 120 s 的时间窗, 并采用最大熵谱反褶积方法提取接收函数^[29, 30].

采用接收函数 $H\kappa$ 叠加方法^[28]来获得单个台站下方的地壳厚度和平均波速比. 在研究区域的接收函数波形记录中, 初至 P 波之后的 30 s 内主要有三个震相, 分别为 Moho 面的 Ps 转换波和 PpPs 及 PpSs+PsPs 地表多次波. 对于一维单层地壳模型, 上述三个震相与初至 P 波的到时差可表示为

$$t_{Ps} = H * (\sqrt{(v_p/v_s)^2 - p^2 v_p^2} - \sqrt{1 - p^2 v_p^2}) / v_p, \quad (1)$$

$$t_{PpPs} = H * (\sqrt{(v_p/v_s)^2 - p^2 v_p^2} + \sqrt{1 - p^2 v_p^2}) / v_p, \quad (2)$$

$$t_{PpSs} = 2H * (\sqrt{(v_p/v_s)^2 - p^2 v_p^2}) / v_p, \quad (3)$$

其中, H 为地壳厚度, V_p 和 V_s 分别为地壳平均 P 波速度和 S 波速度, p 为射线参数.

理论上, 假如给定一个地壳平均速度 \bar{V}_p , 在地壳厚度(H)-波速比(κ)平面上, 方程(1)~(3)表现为三条斜率不同, 但相交于一点的曲线, 而相交点由于同时满足三个方程, 因此对应于最佳的地壳厚度

与波速比. 在实际应用中, 对上述三种震相的贡献进行加权叠加:

$$S(H, \kappa) = \omega_{Ps} r(t_{Ps}) + \omega_{PpPs} r(t_{PpPs}) - \omega_{PpSs} r(t_{PpSs}), \quad (4)$$

其中 ω_{Ps} , ω_{PpPs} , ω_{PpSs} 为加权系数, 且 $\omega_{Ps} + \omega_{PpPs} + \omega_{PpSs} = 1$; $r(t)$ 为接收函数振幅 (PpSs+PsPs 振幅与其他两个震相振幅极性相反, 故取负号). 在方程(4)中, 当选取正确的地壳厚度与波速比时(相交点), 方程右边各个震相($r(t_{Ps})$, $r(t_{PpPs})$, $r(t_{PpSs})$)对应于准确到时(最大振幅), 使叠加能量($s(H, \kappa)$)达到最大值. 因此可以通过测试不同的(H, κ)值, 在 $H\kappa$ 平面上搜索三个震相叠加后的最大振幅, 从而获得最佳的地壳厚度和波速比. 上述方法即为接收函数的 $H\kappa$ 叠加方法^[28], 其主要优点是不用人工挑选震相走时, 故而可以避免挑选震相时人为因素的影响; 同时能高效批量处理大量数据, 因此适用于对大尺度区域地壳厚度和平均波速比的研究.

对大量地震记录进行叠加可以增强信噪比, 获取台站下方的平均结构特征. 在单台数据处理过程中, 首先, 我们在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 震中距内, 以 2° 为步长对每 4° 范围内所有方位角的接收函数进行叠加(步长范围的变化对叠加结果影响很小), 得到按震中距排列的叠加接收函数道集. 然后, 对此接收函数道集进行 $H\kappa$ 叠加搜索, 即得到台站下方的平均地壳厚度和波速比. 图 2 给出了几个代表性台站的资料处理结果.

在 $H\kappa$ 叠加方法中, 不同震相的有效识别对叠加结果的可靠性至关重要. 由于 NCISP III 和 NCIPS VI 两条线性台阵横向跨度大, 台站场地条件、深部结构较为复杂, 因此不同台站接收函数的数据质量存在一定差别. 根据 Moho 面 Ps 转换波和多次反射波的波形特征和识别程度, 对台站接收函数进行分类. 一般来说, Ps 波振幅较大, 受噪声干扰相对较小, 最容易识别; PpPs 波次之; 而 PpSs+PsPs 震相能量较小, 易受噪声干扰, 可辨别性较差, 故不作为分类的依据. 由此, 将台站数据分为三类(图 2): Ps 和 PpPs 震相清晰并且具有很好的一致性, 为“良好”, 如台站 214; Ps 震相容易识别, 但是 PpPs 波却受到某种程度干扰, 为“中等”, 例如台站 NE14; Ps 和 PpPs 都受到干扰, 则为“较差”, 例如台站 218. 通过分类, 良好, 中等和较差的台站数目分别为 42, 42, 13(参见表格 1 和图 1), 由此可见大多数数据是可靠的.

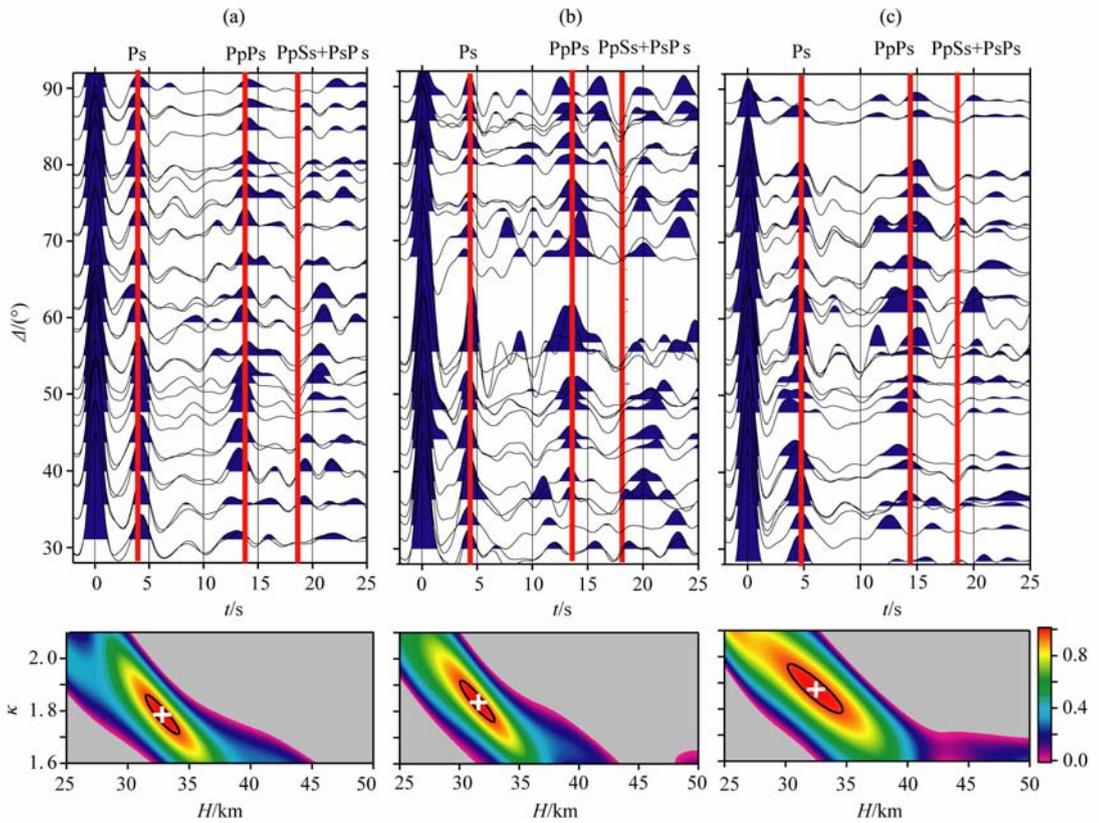


图2 按震中距排列的接收函数道集和 $H-\kappa$ 叠加结果

(a)214 良好;(b)NE14 中等;(c)218 较差.

上图中红色实线为不同震相的理论到时.下图中不同的颜色对应不同的归一化叠加振幅,

黑色椭圆代表了 95% 的置信区间,十字叉表明所求的最佳地壳厚度和波速比值.

Fig. 2 Receiver functions sorted by epicentral distance and $H-\kappa$ stacking results for representative stations belonging to 'good', 'fair', and 'poor' categories, respectively

Red lines in the upper panels give the theoretical arrival times of different phases. Different colors in the lower panels denote different normalized stacking amplitudes; Crosses and black ellipses represent the best estimates of crustal thickness and V_P/V_S ratio and the 95% confidence intervals.

除了数据的质量之外,同时还考虑可能影响结果的其他参数:(1)地壳平均 P 波速度 V_P ,在研究区域,经测试得到 V_P 每增加 0.1 km/s,相应的地壳厚度增加 0.5~0.7 km. κ 值对 V_P 变化不敏感,我们把 V_P 从 6.0 km/s 以 0.1 km/s 为间隔增加到 6.8 km/s,并分别进行 $H-\kappa$ 叠加,发现大多数台站 κ 值的变化都小于 0.03,几乎所有的台站都不超过 0.05,这与 Zandt^[24] 数值测试得到的结果一致.参考前人在研究区人工源地震勘探^[31]和天然地震成像结果^[10],选取 $V_P=6.35$ km/s 来得到最终的 $H-\kappa$ 叠加结果;(2)频率,通过对不同的频率范围进行测试,发现对数据做 0.03~0.5 Hz 滤波,在高频噪声影响和低频较低分辨率两者的平衡方面效果最好;(3)加权系数,根据接收函数波形特征的差异,不同的学者采用了不同的加权系数对 Ps、PpPs 和 PpSs+PsPs 进行 $H-\kappa$ 叠加,比如 Zhu 等^[28] 在研究南加州地壳结构时,基于三震相信噪比顺序减小的特点,选取加权系

数分别为 0.7,0.2,0.1;Al-Damegh 等^[32] 通过研究发现,对于阿拉伯地区的接收函数,最合适的加权系数为 0.4,0.35,0.25;Lombardi 等^[33] 对中西部阿尔卑斯的研究结果表明,低的 Ps 加权系数和高的多次波加权系数在结构复杂区域可能会产生较大的误差.这在我们对个别台站的资料分析结果中也有所反映,但总体来说,不同加权系数组合对我们的结果影响不大.我们选取 0.6,0.3,0.1 作为最佳组合,而将不同加权系数组合(如 0.7,0.3,0.0 和 0.5,0.3,0.2)的影响考虑在误差中.

3 结果

本文通过 NCISP III 和 NCISP VI 两条密集流动台阵接收函数的 $H-\kappa$ 叠加分析,获得了从华北克拉通东北缘至兴蒙造山带区域(松辽盆地除外)的平均地壳厚度与波速比信息.

本文研究结果表明,在研究区,地壳除在靠近松辽盆地和渤海湾盆地区域明显较薄(约 30 km)外,总体表现为由东南或南部大陆边界(小于 30 km)向

西北或北部大陆内部增厚(约 40 km)的趋势(图 3A). 其中,沿与构造走向,特别是南北重力梯度带基本垂直的 NCISPVI 剖面,地壳厚度的变化与地

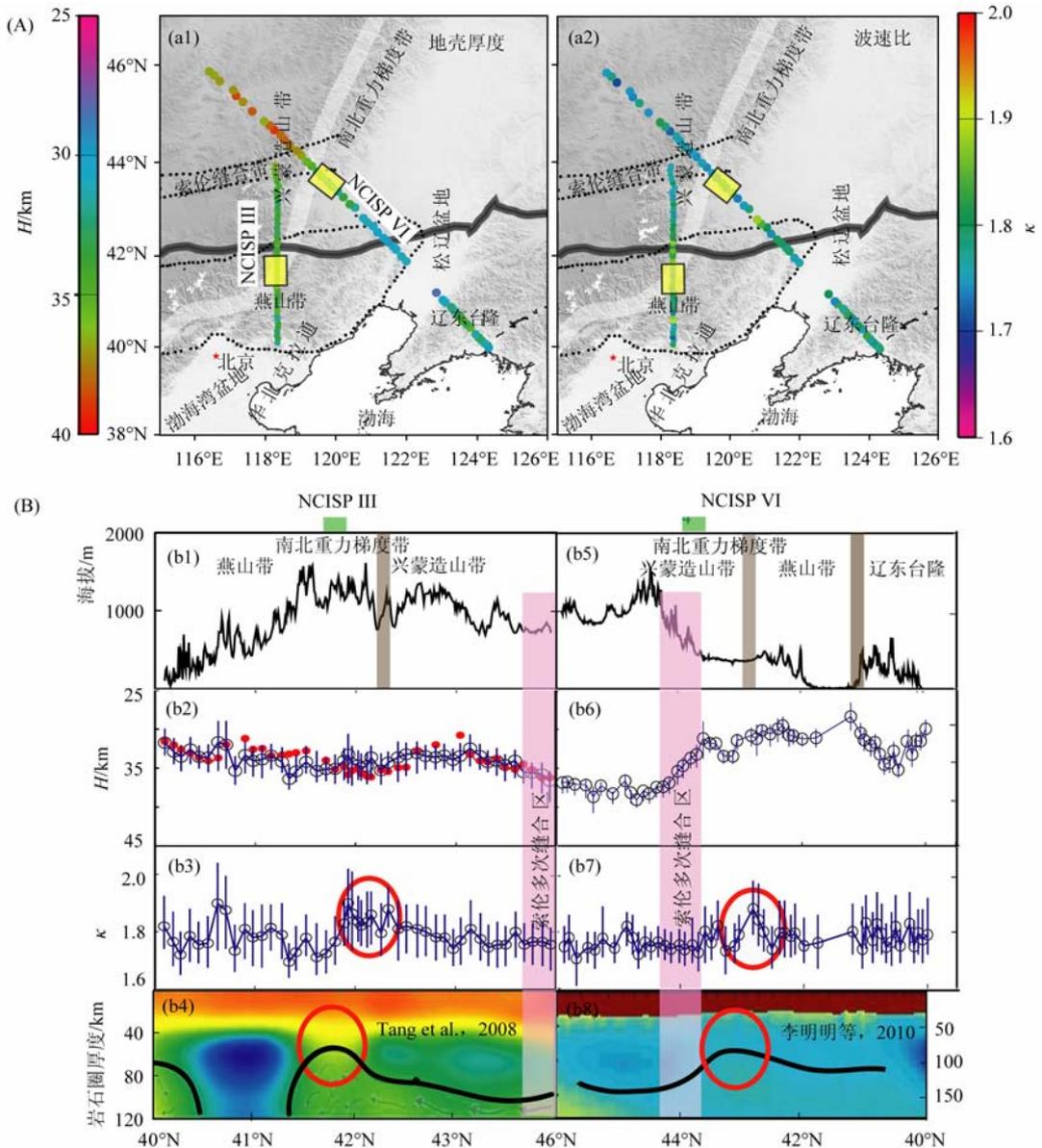


图 3 地壳厚度和波速比的平面分布(A)以及海拔、地壳厚度、波速比和岩石圈厚度(b4, b8 分别修改自 Tang 等^[9]和李明明等^[12]的对比(B)

(A) 不同的颜色代表了不同的地壳厚度和波速比,黑框黄色矩形区域分别标明了根据 Tang^[9]和李明明^[12]等投影的岩石圈结构横向变化最剧烈的区域. 图 B: 灰色长棒和绿色短棒(b1, b5)分别表示区域构造边界和南北重力梯度带的位置, 黑色圆圈和蓝色短线(b2, b3, b6, b7)表示 $H-\kappa$ 方法求出的地壳厚度和波速比值以及误差的大小, 红色圆点(b2)是 Zheng 等^[10]采用接收函数波形反演得出的地壳厚度值. 红色椭圆分别标记波速比值抖动较大的块体交界处(b3, b7)和岩石圈厚度发生横向变化强烈的区域(b4, b8). 黑色实线(b4, b8)标注了岩石圈底界面的大致位置.

Fig. 3 Planar view of the crustal thickness and V_p/V_s ratio (A) and comparison (B) of altitude, crustal thickness, V_p/V_s ratio and

lithospheric structure (b4, b8 modified from Tang et al. ^[9] and Li et al. ^[12], respectively) along the two profiles.

Fig A: different colors represent different values and yellow rectangles indicate the locations where the lithospheric thickness varies rapidly ^[9, 12]. Fig B: grey long bars and green short bars (b1, b5) show tectonic boundaries and the North-South Gravity lineament, respectively. Black dots and blue lines (b2, b3, b6, b7) represent the values of crustal thickness and V_p/V_s ratio and their errors estimated from $H-\kappa$ stacking. Red solid dots (b2) are the Moho depths by Zheng^[10] using waveform inversion of receiver functions. Red ellipses mark the areas where V_p/V_s ratio (b3, b7) and lithospheric thickness (b4, b8) change sharply. Black solid lines give the lithosphere-asthenosphere boundary along the profiles.

表地形大致呈镜像关系(图 3B).而在 NCISP III 剖面的中-北部区域,地壳厚度与地形却显示出不明显或非镜像变化关系,而且我们的结果与 Zheng 等^[10]采用接收函数波形反演得到的地壳厚度基本一致(图 3B).这一特征与构造走向和重力梯度带方向在该区域发生明显转折(图 1、3A)相对应,可能反映了这一地区地壳结构的复杂性.除上述地壳厚度的区域性变化之外,沿测线,辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带三个构造区还表现为各自不同的横向变化特征.辽东台隆地壳中间厚、两端薄,厚度在 28~35 km 范围内变化;燕山带台站下方地壳厚度围绕平均值 33 km 上下平缓波动;而兴蒙造山带变化最为剧烈(31~39 km),并在索伦缝合带附近地壳向北或西北方向迅速增厚.

地壳平均波速比未显示明显的区域性变化.在三个构造区内部,波速比的变化都相对平缓,只在 NCISP III 剖面燕山带南部出现波速比的局部增高(图 3Bb3),但其对应台站(217,218)的数据质量相对较低(图 1 和图 4),因而结果的不确定性较大.而在燕山带与兴蒙造山带边界附近(大致对应于南北重力梯度带位置),波速比沿两条剖面都显示出较大的抖动和明显的增高(高达 1.90,图 3B),可能反映了边界带区域地壳成分和性质与周边地区的差异.值得注意的是,在索伦缝合带区域,波速比约为 1.75,波动很小,而该处地形和地壳厚度则变化相对强烈.

为了进一步分析不同构造区地壳厚度与波速比的变化关系及其差异性,把获得的研究区域所有台站的地壳厚度与波速比值都集中到同一张图上(图 4)进行对比分析(具体信息见表 2).从图中可以看出:辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带三个区域台站下方的地壳厚度和波速比都呈弱的负相关关系,而且包括索伦缝合带在内的大部分区域都以地壳厚度变化为主,波速比变化范围不大;但在靠近重力梯度带的燕山带和兴蒙造山带边界附近,地壳厚度变化相对较小,而波速比变化强烈,与研究区其他多数地区

形成较为鲜明的对比.

如图 4 所示,辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带的地壳厚度和波速比都呈弱的负相关关系.在研究区域台站下方,辽东台隆以地壳厚度变化为主,波速比变化范围不大;燕山带则以波速比变化为主,地壳厚度变化相对较小.其中波速比的强烈横向差异突出体现在燕山带和兴蒙造山带的边界附近、靠近重力梯度带的区域,而台站 217、218 处的高波速比值则可能反映了燕山带内部地壳结构的局部异常(因可信度较低,还需进一步证实);兴蒙造山带的地壳厚度与波速比变化都相对较大,其内部的索伦缝合带主要表现为地壳厚度的变化,波速比变化很小,与重力梯度带的特征截然不同.

尽管本文没有盆地的资料,但在盆山边界附近却得到了可靠的地壳结构信息,从而对盆山区域地壳结构的横向变化有一定的反映.如图 3A 所示,沿测线,在燕山带和兴蒙造山带靠近松辽盆地边界处,地壳厚度(约 30 km)明显薄于造山带内部(35~40 km),这种趋势在辽东台隆更加明显(图 3B).同时我们结果还显示,盆地侧波速比变化范围相对较大,横向变化复杂,而造山带内部(内部构造带处除外)波速比变化相对比较小.本文结果与许卫卫等^[34]采用相同方法得到的渤海湾盆地北部和西部盆山边界(首都圈)附近的地壳结构特征类似.同时利用人工源资料也获得了首都圈附近盆地与山区截然不同的地壳结构^[31].

4 讨论

4.1 地壳结构特征及其横向变化

本文观测结果表明,研究区现今的地壳结构特征与区域地质构造密切相关.研究区地壳总体较薄,绝大部分地壳厚度都在 35 km 之下(图 3、4),与世界其他大陆伸展裂陷区的地壳厚度类似,可能与该地区中新生代经历了广泛的构造伸展作用有关.研究区平均地壳厚度从辽东台隆向兴蒙造山带递增,而平均波速比变化不明显(不包括松辽盆地),表明中新世代的构造伸展作用可能对东南部影响最强烈,对西北部影响相对较弱,而且可能以地壳整体伸展为主.位于研究区中部的燕山带,地壳厚度处于辽东台隆和兴蒙造山带之间,但波速比横向变化显著,特别是在其与兴蒙造山带边界附近、靠近重力梯度带区域尤其突出(图 3、4).这一现象结合其复杂的地壳波速结构^[10]以及大量中-新生代岩浆活动和变质核杂岩分布^[13,17],表明燕山带地壳可能受到了相

表 2 研究区域地壳厚度与波速比的具体信息

Table 2 The information of crustal thickness and V_p/V_s ratio in study region

	辽东台隆	燕山带	兴蒙造山带
地壳厚度范围(km)	28~35	30~36	31~39
平均地壳厚度(km)	32	33	35
波速比范围	1.71~1.88	1.70~1.90	1.74~1.83
平均波速比	1.78	1.79	1.77

当程度的改造. 伴随着构造伸展和岩浆活动的壳幔相互作用可能不同程度地改变了局部区域的地壳成分, 造成其波速比值的增高或降低. 在兴蒙造山带, 尤其是在重力梯度带以西, 地壳较厚, 达近 40 km, 波速比变化也相对较小. 这进一步证实, 该区域在中新生代构造演化过程中, 其地壳可能未受到与燕山带类似的强烈影响.

4.2 地壳结构与岩石圈结构的对应变化

研究区地壳结构最突出的特征, 体现在燕山—兴蒙边界带附近波速比的强烈变化(图 3Bb4, b8 红色椭圆标记)及其两侧区域的显著差异(图 3、4). 通过与前人获得的 NCISP-III 和 VI 台阵之下上地幔结构图像^[7,9,12]进行对比发现, 研究区这种地壳结构特征与其深部岩石圈结构的横向变化具有很好的对应性(图 3B).

首先, 燕山—兴蒙边界带附近地壳平均波速比的明显波动对应于该地区岩石圈厚度的快速改变(约 100 km 的横向范围内变化 20~50 km), 其中高波速比的出现与岩石圈最薄区域以及重力梯度带的位置大体一致(图 3B). 边界带往往是力学和流变学薄弱带, 容易受到热-构造过程影响, 易于变形, 并成为深部地幔物质上涌的通道^[35,36]. 因此, 燕山—兴蒙边界带地壳和岩石圈结构的一致变化特征可能反映了该地区中生代强烈的岩石圈构造影响和壳幔耦合变化过程. 这一边界带区域不仅岩石圈被显著减薄和改造, 其地壳可能也因地幔物质的侵入和岩浆活动而发生成分和密度的改变, 造成波速比的强烈横向差异.

另一方面, 重力梯度带以西的兴蒙造山带相对于边界带区域较厚的地壳和岩石圈, 以及相对稳定的地壳波速比(图 3、4)表明, 该地区岩石圈整体可能在中新生代受到的构造改造程度相对较小. 李明明等^[12]根据他们获得的 NCISP VI 剖面上地幔 S 波速度图像, 认为这种变化可能是由于太平洋板块俯冲的影响在重力梯度带以西迅速减弱所导致. 而 Tang 等^[9]对 NCISP III 剖面的成像结果则显示, 在重力梯度带南部的燕山带内存在局部大于 120 km 厚的岩石圈, 而在北部兴蒙造山带岩石圈厚度则不足 100 km. Tang 等^[9]认为这种岩石圈厚度的横向变化可能是岩石圈经历了不均匀减薄和改造的结果. 需要注意的是, 与近乎垂直于 NNE-NE 构造走向的 NCISP VI 台阵不同, NCISP III 台阵在跨越重力梯度带附近处于近 E-W 和 NNE 两种构造走向转变的区域(图 1、3A). 因此我们认为, 该区域可能受到与这两种走向相关的不同构造过程(中亚造山

带增生和太平洋板块俯冲)的影响, 从而具有更为复杂的壳幔结构.

4.3 重力梯度带与索伦缝合带

地震学和岩石-地球化学研究^[37~39]显示, 在华北地区, 重力梯度带两侧的地壳和岩石圈结构和性质存在显著差异, 与两侧区域显生宙以来截然不同的浅表地质构造和深部地幔动力学过程相对应. 沿 NCISP III 和 VI 台阵的地壳和岩石圈结构图像(图 3、4, 引文[9,12])也显示出类似的大致以重力梯度带为界深浅结构的强烈横向变化. 这些进一步证明, 至少对于华北和东北地区, 重力梯度带可能是分割其东西两部分的岩石圈尺度的大陆内部块体边界.

位于兴蒙造山带内的索伦缝合带形成于两个活动大陆边缘增生楔的同时俯冲碰撞, 标志着兴蒙造山带的最终形成. 研究区域索伦缝合带沿 NCISP

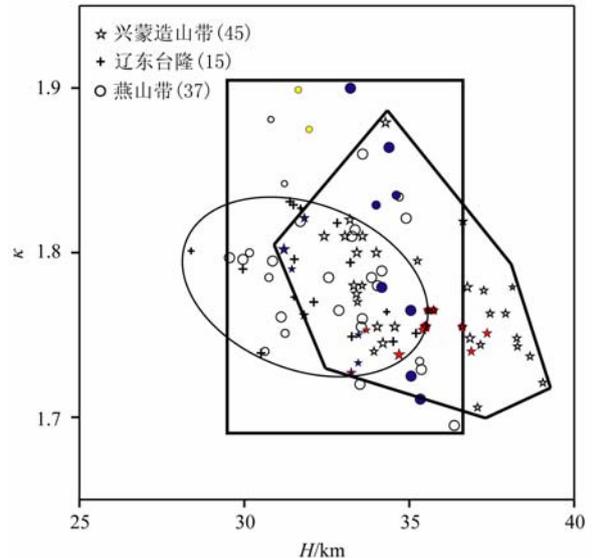


图 4 地壳厚度-波速比的相对变化

星号, 圆圈和十字叉分别代表了兴蒙造山带、燕山带和辽东台隆的地壳厚度与波速比值. 符号大小表明了数据质量的好坏, 符号最大表示良好, 最小表明较差. 蓝色和红色实心符号分别代表了重力梯度带和索伦缝合带附近的值. 黄色圆点代表了台站 217 和 218 的结果. 椭圆、矩形和多边形分别表示了辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带结果的分布范围.

Fig. 4 Crustal thickness versus V_p/V_s ratio

Asterisks, circles and crosses are for the Xingmeng Orogenic Belt, Yanshan Belt and Liaodong Upwarp, respectively. The symbol size denotes the data quality (the bigger, the better). Blue and red solid symbols give the results around the North-South Gravity Lineament and Solonker suture zone, respectively. The two yellow circles represent the results for stations 217 and 218. Ellipse, rectangle and polygon outline the ranges for the Liaodong Upwarp, Yanshan Belt and Xingmeng Orogenic Belt, respectively.

VI 剖面其位置与重力梯度带大致重合,在地形、地壳和岩石圈厚度上也表现出明显的横向变化(图 3B)。而沿 NCISP III 剖面,索伦缝合带则比重力梯度带偏北近 200 km,处于剖面的最北端(图 1)。由于资料的限制,目前还不能有效约束其附近区域的结构横向变化。已获得的成像结果显示,索伦缝合带与重力梯度带区域最显著的差异是其地壳平均波速比值较为稳定,无明显波动(图 3B、4)。那么 NCISP VI 剖面索伦缝合带附近地壳和岩石圈厚度的变化是否反映了重力梯度带的影响?索伦缝合带究竟是另一岩石圈尺度的大陆内部块体边界还只是地壳尺度的边界带?这些问题还有待于更多的地震观测资料和其他学科观测结果的不断积累和认识的深入。

5 结 论

本文基于 97 个流动地震台站一年的观测数据,采用接收函数 $H-\kappa$ 叠加方法获得了辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带台站下方的地壳厚度和平均波速比。研究区地壳结构的复杂变化,反映了不同构造带显生宙地壳演化过程的复杂性。得到以下三点结论:

(1) 辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带三个构造区台站下方的地壳具有不同的横向变化特征。燕山带地壳结构横向变化明显,反映了复杂的地壳构造变形过程;辽东台隆和兴蒙造山带地壳结构变化相对较平稳,可能与各自内部地壳改造横向差异性较小有关。

(2) 南北重力梯度带附近(靠近燕山-兴蒙边界)地壳结构横向变化强烈,而且两侧地壳性质明显不同,这与前人观测到的该处岩石圈结构和性质的横向变化特征一致,体现了深部岩石圈地幔与浅部地壳的构造耦合,并表明重力梯度带可能是岩石圈尺度的大型陆内部构造边界带。

(3) 索伦缝合带附近地壳和岩石圈结构特征变化尚不明确,其性质还需进一步探讨。

致 谢 中国科学院地质与地球物理研究所地震台阵实验室提供数据资料;郑天愉教授提供地壳厚度与速度资料;李明明硕士给予了重要的帮助;评审专家给出了建设性意见和建议,在此一并致谢!

参考文献 (References)

[1] Griffin W L, Zhang A, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al, eds. Mantle

Dynamics and Plate Interaction in East Asia. *American Geophysical Union Geodynamics Series*, 1998, **27**: 107~126

[2] Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2001, **26**(9-10): 747~757

[3] Fan W M, Menzies M. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotecton. Metallogen.*, 1992, **16**(3-4): 171~180

[4] Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Palaeo-zoic and Cenozoic lithoproses and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, et al, eds. Magmatic processes and plate tectonics. London: Geological Society, Special Publication, 1993, **76**: 71~81

[5] Chen L, Tao W, 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

[6] Zhao L, Zheng T Y. Complex upper-mantle deformation beneath the North China Craton: implications for lithospheric thinning. *Geophys. J. Int.*, 2007, **170**(3): 1095~1099

[7] Zheng T Y, Chen L, Zhao L, et al. Crust-mantle structure difference across the gravity gradient zone in North China Craton: Seismic image of the thinned continental crust. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, **159**(1-2): 43~58

[8] Chen L. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications. *Lithos*, 2010, **120**(1-2): 96-115

[9] Tang Q S, Chen L. Structure of the crust and uppermost mantle of the Yanshan Belt and adjacent regions at the northeastern boundary of the North China Craton from Rayleigh Wave Dispersion Analysis. *Tectonophysics*, 2008, **455**(1-4): 43~52

[10] Zheng T Y, Chen L, Zhao L, et al. Crustal structure across the Yanshan belt at the northern margin of the North China Craton. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2007, **161**(1-2): 36~49

[11] 陈 凌, 程 骋, 危自根. 华北克拉通边界带区域深部结构的特征差异性及其构造意义. *地球科学进展*, 2010, **25**(6): 571~581

Chen L, Cheng C, Wei Z G. Contrasting structural features at different boundary areas of the North China Craton and its tectonic implications. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2010, **25**(6): 571~581

[12] 李明明, 何玉梅. 利用瑞雷面波反演华北克拉通东北部边界的岩石圈结构. *地震学报*, 2011, **33**(2): 143~155

Li M M, He Y M. Lithospheric structure beneath northeastern boundary region of the North China Craton from Rayleigh wave dispersion inversion. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2011, **33**(2): 143~155

[13] Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, **233**(1-2): 103~119

- [14] Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, et al. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. *Tectonophysics*, 2005, **407**(1-2): 65~80
- [15] Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2007a, **119**(11-12): 1405~1414
- [16] Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. *Chemical Geology*, 2007b, **242**(1-2): 155~175
- [17] Davis G. A, Zhang Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China. *GSA Memoir*, 2001, **194**: 171~197
- [18] Meng Q R. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 2003, **369**(3-4): 155~174
- [19] 郑亚东, Davis G A, 王 琮等. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题. *地质学报*, 2000, **74**(4): 289~302
Zheng Y D, Davis G A, Wang C, et al. Major mesozoic tectonic events in the Yanshan belt and the plate tectonic setting. *Acta Geologic Sinica* (in Chinese), 2000, **74**(4): 289~302
- [20] Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 2003, **22**(6): 1069, doi: 10.1029/2002TC001484
- [21] 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. *地球物理学报*, 2002, **45**(5): 646~666
Zhu J S, Cao J M, Cai X L, et al. High resolution surface wave tomography in east Asia and west pacific marginal seas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(5): 646~666
- [22] 黄忠贤, 胥 颐, 郝天珧等. 中国东部海域岩石圈结构面波层析成像. *地球物理学报*, 2009, **52**(3): 653~662
Huang Z X, Xu Y, Hao T Y, et al. Surface wave tomography of lithospheric structure in the seas of east China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(3): 653~662
- [23] Huang J L, Zhao D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**: B09305, doi: 10.1029/2005JB004066
- [24] Zandt G, Ammon C J. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*, 1995, **374**(6518): 152~154
- [25] Stuart G W, Bastow I D, Ebinger C J. Crustal structure of the northern main Ethiopian rift from receiver function studies. In: The Afar Volcanic Province Within the East African Rift System, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 2006, **259**(1): 253~267
- [26] Agostinetti N P, Amato A. Moho depth and V_p/V_s ratio in peninsular Italy from teleseismic receiver functions. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**: B06303, doi: 10.1029/2008JB005899
- [27] 嵇少丞, 王 茜, 杨文采. 华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义. *地质学报*, 2009, **83**(3): 324~330
Ji S C, Wang Q, Yang W C. Correlation between crustal thickness and poisson's ratio in the North China Craton and its implication for lithospheric thinning. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2009, **83**(3): 324~330
- [28] Zhu L P, Kanamori H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(B2): 2969~2980
- [29] 吴庆举, 曾融生. 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*, 1998, **41**(5): 669~679
Wu Q J, Zeng R S. The crustal structure of Qinghai-Xizang plateau inferred from broadband teleseismic waveform. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1998, **41**(5): 669~679
- [30] Ai Y S, Zheng T Y, Xu W W, et al. A complex 660 km discontinuity beneath northeast China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, **212**(1-2): 63~71
- [31] 嘉世旭, 张先康. 华北不同构造块体地壳结构及其对比研究. *地球物理学报*, 2005, **48**(3): 611~620
Jia S X, Zhang X K. Crustal structure and comparison of different tectonic blocks in North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(3): 611~620
- [32] Al-Damegh K, Sandvol E, Barazangi M. Crustal structure of the Arabian plate: New constraints from the analysis of teleseismic receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **231**(3-4): 177~196
- [33] Lombardi D, Braumiller J, Kissling E, et al. Moho depth and Poisson's ratio in the Western-Central Alps from receiver functions. *Geophys. J. Int.*, 2008, **173**(1): 249~264
- [34] 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 J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(5): 1077~1084
- [35] Tommasi A, Gibert B, Seipold U, et al. Anisotropy of thermal diffusivity in the upper mantle. *Nature*, 2001, **411**(6839): 783~786
- [36] Vauchez A, Barruol G, Tommasi A. Why do continents break-up parallel to ancient orogenic belts? *Terra Nova*, 1997, **9**(2): 62~66
- [37] Chen L. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S- and P-receiver function migration. *Phys. Earth Planet. Interiors.*, 2009, **173**(3-4): 216~227
- [38] Zheng T Y, Chen L, Zhao L, et al. Crust-mantle structure difference across the gravity gradient zone in North China Craton: Seismic image of the thinned continental crust. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, **159**(1-2): 43~58
- [39] Xu Y G. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity lineament. *Lithos.*, 2007, **96**(1-2): 281~298