

危自根,陈凌. 东北地区至华北北缘地壳结构的区域差异:地壳厚度与波速比的联合约束. 地球物理学报, 2012, 55(11):3601-3614, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.009.

Wei Z G, Chen L. Regional differences in crustal structure beneath northeastern China and northern North China Craton: constraints from crustal thickness and V_p/V_s ratio. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(11):3601-3614, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.009.

东北地区至华北北缘地壳结构的区域差异： 地壳厚度与波速比的联合约束

危自根, 陈 凌

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

摘 要 本文通过对分布相对均匀的 127 个固定台站下方接收函数的 $H-\kappa$ 叠加分析,并结合前人对 97 个线性密集流动台站的研究结果,获得了东北地区和华北克拉通北缘地壳厚度(H)与平均波速比(κ)。结果表明研究区域地壳总体较薄,波速比变化复杂,地壳密度横向变化大,暗示着地壳在中—新生代经历了显著的不均匀破坏与改造。东北和华北北缘都存在明显的东西向差异。东北地区西侧兴蒙造山带地壳大致随着海拔增高逐渐增厚, H 和 κ 分别主要在 31~39 km 和 1.71~1.83 之间变化,平均值分别为~35 km 和~1.77;东侧吉黑褶皱带地壳厚度与海拔不成镜像关系, H 和 κ 集中在 28~37 km 和 1.72~1.89 范围,平均值分别为~33 km 和~1.79。华北北缘西侧燕山带地壳由东往西逐渐增厚, H 和 κ 主要在 28~40 km 和 1.70~1.91 范围内变化,平均值分别为~34 km 和~1.79。东侧辽东台隆地壳表现为中间厚四周薄, H 和 κ 集中在 29~35 km 和 1.71~1.83 范围,平均值分别为~32 km 和~1.77。东北地区吉黑褶皱带相对薄的 H 和变化范围大的 κ 表明,该区域可能由于其自身的地壳结构复杂性和紧邻太平洋板块前缘从而在中新生代遭受到了与太平洋板块俯冲相关的更为强烈的地壳减薄与改造。华北北缘燕山带 H 和 κ 复杂的变化特征表明,该地区可能受到中亚造山带增生和太平洋板块俯冲的共同影响,从而发生了更为复杂的地壳改造变形。

关键词 东北地区,华北北缘,接收函数,地壳厚度,波速比

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.009

中图分类号 P315

收稿日期 2012-01-16,2012-10-11 收修定稿

Regional differences in crustal structure beneath northeastern China and northern North China Craton: constraints from crustal thickness and V_p/V_s ratio

WEI Zi-Gen, CHEN Ling

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

Abstract Using teleseismic waveform records collected from 127 permanent seismic stations which are distributed relatively evenly, in combination with previous studies from 97 temporary seismic stations, we obtained the crustal thickness (H) and average crustal V_p/V_s ratio (κ) beneath the northeastern China and northern North China Craton (NCC) by $H-\kappa$ stacking of receiver functions. The results show relatively thin H and complicated variations both in κ and

crustal density, which suggest intense and uneven reactivation and modification of crust during the Mesozoic-Cenozoic times. Significant E—W difference in crust was imaged in the northeastern China and northern NCC. In northeastern China, H thickens nearly linearly as the elevation increases in the Xingmeng orogenic belt located in the west. H changes from 31 km to 39 km with an average of ~ 35 km, κ varies from 1.71 to 1.83 with an average of ~ 1.77 . No clear correlation was observed between H and elevation in the Jihei fold belt located in the east. The values of H are in a range from 28 km to 37 km with an average of ~ 33 km. κ varies from 1.72 to 1.89 with an average of ~ 1.79 . In the northern NCC, H thickens from east to west in the Yanshan belt located in the west, and changes from 28 km to 40 km with an average of ~ 34 km. κ is concentrated in a range from 1.70 to 1.91 with an average of ~ 1.79 . H is larger in the middle in the Liaodong antecline located in the east, and ranges from 29 km to 35 km with an average of ~ 32 km. κ changes from 1.71 to 1.83 with an average of ~ 1.77 . Complicated variations and a large range in κ and relatively smaller H were observed in the Jihei fold belt (the northeastern China). This suggests that this region may have experienced more intense crustal modification and thinning related to the Pacific plate subduction because of the inherent complexity in crustal structure and being adjacent to the Pacific plate. In the northern NCC, complicated variations and large ranges both in H and κ in the Yanshan belt indicate that this region probably underwent a more complex crustal modification which may be associated with Central Asia Orogenic Belt accretion and Pacific plate subduction.

Keywords Northeastern China, Northern North China Craton, Receiver functions, Crustal thickness, V_p/V_s ratio

1 引言

东北地区位于西伯利亚和华北克拉通之间,属于中亚造山带东部,主要由松辽盆地、吉黑褶皱带和兴蒙造山带三个构造单元组成^[1].随着晚古生代古亚洲洋和晚中生代蒙古洋的相继闭合,东北地区于白垩纪由多个小陆块拼合成为一个完整陆块^[2-3].地质地球化学资料表明东北地区地壳在新生代受到拉伸减薄,其中生代花岗岩和火山岩时代存在着明显的东西差异^[4-5].与东北地区紧邻的华北克拉通北缘,其岩石圈在中新生代的克拉通构造活化中受到了显著的改造与破坏^[6-12].地震学与其它学科资料观测结果表明,这一地区岩石圈被改造的程度与过程存在着横向差异^[13-17].

作为华北克拉通的边界带和相邻区域,辽东台隆、燕山带和东北地区的岩石圈结构和演化必然与华北克拉通在显生届的构造活化和破坏紧密相关.因此,对这些区域的地壳结构研究能为研究华北克拉通破坏的过程与机制提供重要约束.在这方面前人已经做了大量的地球物理观测研究^[1,18-29],包括:两条地学断面^[1,22]的地球物理综合研究、人工源地

震勘探^[26]、天然地震流动台阵^[15,23]和固定台站^[28-29]资料的研究等.然而,目前天然地震流动台阵观测和人工源地震勘探只能约束线性区域的地壳结构,而基于天然地震固定台站的研究主要集中在华北北缘部分,从而不能从整体上反映包括东北地区和华北北缘在内的地壳结构区域变化.

利用两条密集线性流动台阵地震波形数据,危自根等^[15]采用接收函数 $H-\kappa$ 叠加方法^[30]获得了华北克拉通北部边界区域燕山带、辽东台隆和兴蒙造山带台站下方的地壳厚度(H)与平均波速比($V_p/V_s, \kappa$),发现这三个构造区域的地壳结构存在差异.相比于辽东台隆,燕山带的地壳在中新生代的华北克拉通活化中可能经历了更为复杂的后期改造^[16].然而,由于数据空间分布的限制(台阵对研究区线性采样),由它们的结果尚不足以形成对这三个构造区域地壳结构的全面认识.

本研究将综合流动地震台阵与固定台网的观测资料,对比研究东北和华北北缘的地壳结构和性质.通过增加分布在兴蒙造山带、吉黑褶皱带、燕山带和辽东台隆的 127 个中国地震局固定台站记录的波形数据,并结合危自根等^[15]对 97 个流动台站资料的分析结果,我们共获得了 224 个地震台站(图 1)下

方的地壳厚度与平均波速比信息. 结合区域地质构造, 我们对分析上述四个构造区的地壳结构特征及其差异性, 并探讨了造成这些结构差异的原因.

2 数据与方法

本文研究数据包括两部分. 新增加的 127 个固定台站分布在东北和华北北缘的广大区域, 对兴蒙造山带、吉黑褶皱带、燕山带及辽东台隆形成较好的空间覆盖(图 1). 其数据来自中国地震局地球物理研究所“国家数字测震台网数据备份中心”, 包括从 2007 年 7 月到 2010 年 7 月的远震资料^[31]. 其余 97 个流动地震台站组成的两条线性台阵为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”第三期(NCISP III, 2003—2004 年)和第六期(NCISP VI, 2007—2008 年)在华北东北边界及其附近区域的观测实验, 分别沿 N—S 和 NW—SE 向穿越兴蒙造山带、燕山带和辽东台隆(图 1). 危自根等^[15]采用接收函数 H - κ 叠加方法已经获得了台阵下方的地壳厚度与波速比分布. 本文所选用的远震事件震中距为 30° 到 90° (图 1 右上角插图), 震级都大于 5.5 级. 大多数地震事件分布在背方位角 110° 到 230° 之间.

接收函数是由远震径向分量和垂直分量反褶积得到的时间序列, 由于扣除了震源效应和传播路径的影响, 因此非常适合用来研究地壳和上地幔间断面的结构信息. 接收函数波形记录中, 紧随直达 P 波之后的来源于 Moho 面的转换震相主要为 Ps 转换波和 PpPs 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 波的到时关系可以约束 Moho 间断面的深度与地壳平均波速比^[30].

构造一个 H - κ 平面内的叠加函数 $s(H, \kappa)$,

$$s(H, \kappa) = W_{Ps}r(t_{Ps}) + W_{PpPs}r(t_{PpPs}) - W_{PpSs+PsPs}r(t_{PpSs+PsPs}), \quad (1)$$

其中, H 为地表到 Moho 面之间的厚度, κ 为地壳平均 P 波和 S 波速度之比, $r(t)$ 为径向接收函数, t_{Ps} , t_{PpPs} , $t_{PpSs+PsPs}$ 为不同震相的理论到时, W_{Ps} , W_{PpPs} , $W_{PpSs+PsPs}$ 为加权系数, 且 $W_{Ps} + W_{PpPs} + W_{PpSs+PsPs} = 1$. 最佳的地壳厚度与波速比对应 H - κ 平面上最大能量值, 详情可参考^[16, 30].

上述方法即为 Zhu 等^[30]提出的接收函数的 H - κ 方法, 该方法的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. 该方法产生的误差可以用下列公式估计^[30]:

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

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

其中, σ_s 为叠加函数 $s(H, \kappa)$ 的均方差, σ_H 和 σ_κ 分别为 H 和 κ 的均方差.

本文采用最大熵谱反褶积方法提取接收函数^[32-33], 然后在 0.03~0.5 Hz 范围内滤波(该频段充分平衡了高频噪声干扰和低频较低分辨率的影响). 在人工挑选接收函数过程中, 由于不同台站数据的质量存在一定差别, 我们根据 Moho 面 Ps 转换波和多次反射波的波形特征和识别程度, 把台站数据分为三类(图 2). 如果 Ps 和 PpPs 震相清晰并且具有很好的一致性, 这些台站列入“良好”, 如台站 LNWF; 如果 Ps 震相容易识别, 但是 PpPs 波却受到某种程度干扰, 则为“中等”, 例如台站 HLYIL; 假如 Ps 和 PpPs 都受到干扰, 则为“较差”, 例如台站 LNLHT. 通过分类, 良好、中等和较差的台站数目分别为 112, 87, 25(图 1 和表 1), 其中绝大多数数据较差的台站位于盆地边缘和构造带交界处.

经过挑选, 接收函数都超过 50 个的地震台站被用来做进一步研究. 参考前人在研究区域人工源地震勘探^[1, 22, 26]和天然地震成像结果^[23], 根据区域地质情况, 选取 6.35 km/s 和 6.15 km/s 分别作为海拔高于 100 m 和低于 100 m 的地壳平均 P 波速度来估计最终的 H - κ 叠加结果. 基于三震相信噪比顺序减小的特点, 经过大量测试, 选取 0.6, 0.3, 0.1 分别作为 Ps, PpPs 和 PpSs+PsPs 的加权值(不同加权值组合对结果影响非常小).

3 结果

本文通过对分布相对均匀的固定台站下方接收函数的 H - κ 叠加分析, 并结合前期对两条线性密集流动台阵的研究结果^[15], 获得了东北地区和华北克拉通北缘地壳厚度与平均波速比的区域分布(图 3, 表 1).

如图 3 所示, 研究区域地壳厚度整体上从松辽盆地(~ 30 km)向四周造山带逐渐增加. 具体表现为: 辽东台隆地壳中间厚四周薄, 主要在 29~35 km 变化, 平均值 ~ 32 km; 燕山带地壳厚度由东往西逐渐增加, 主要在 28~40 km 变化, 平均值 ~ 34 km; 兴蒙造山带地壳东薄西厚, 主要在 31~39 km 变化, 平均值为 ~ 35 km; 吉黑褶皱带则表现为地壳南

表 1 研究区域台站下方地壳厚度(已去掉地形)和 V_p/V_s 比(κ)的分布
 Table 1 Crustal thickness (altitude removed) and V_p/V_s ratio (κ) under the stations

| Sta. r_u | H (km) | κ | Sta. r_u | H (km) | κ |
|---------------|----------|-----------|---------------|----------|-----------|
| JGD $^1_{xb}$ | 33.0±0.7 | 1.79±0.04 | MOH $^1_{xb}$ | 34.0±0.8 | 1.76±0.05 |
| NZN $^1_{xb}$ | 34.1±1.0 | 1.80±0.05 | N38 $^1_{xb}$ | 31.2±1.6 | 1.80±0.1 |
| TAH $^1_{xb}$ | 35.9±1.0 | 1.78±0.05 | N41 $^1_{xb}$ | 34.7±1.4 | 1.74±0.07 |
| BCT $^1_{xb}$ | 32.7±1.7 | 1.76±0.07 | N59 $^1_{xb}$ | 36.8±1.2 | 1.78±0.06 |
| ARS $^1_{xb}$ | 36.1±0.9 | 1.77±0.04 | N60 $^1_{xb}$ | 36.8±1.6 | 1.75±0.07 |
| IDR $^1_{xb}$ | 33.8±1.5 | 1.79±0.07 | JIP $^1_{xb}$ | 36.5±1.2 | 1.75±0.05 |
| MDG $^1_{xb}$ | 37.3±1.6 | 1.76±0.07 | LIX $^1_{xb}$ | 35.7±1.1 | 1.75±0.05 |
| MZI $^1_{xb}$ | 35.0±0.9 | 1.74±0.04 | TIS $^1_{xb}$ | 34.1±1.0 | 1.71±0.05 |
| ZLT $^1_{xb}$ | 34.3±1.0 | 1.76±0.05 | WLT $^1_{xb}$ | 35.6±1.1 | 1.78±0.05 |
| 245 $^1_{xb}$ | 33.3±1.0 | 1.78±0.05 | XLT $^1_{xb}$ | 36.6±1.1 | 1.77±0.05 |
| 248 $^1_{xb}$ | 32.4±1.1 | 1.81±0.06 | 240 $^1_{xb}$ | 33.6±1.1 | 1.81±0.05 |
| 249 $^1_{xb}$ | 33.4±1.2 | 1.78±0.06 | 241 $^1_{xb}$ | 33.2±1.2 | 1.82±0.05 |
| 250 $^1_{xb}$ | 34.2±1.1 | 1.75±0.05 | 242 $^1_{xb}$ | 33.0±1.1 | 1.81±0.06 |
| 252 $^1_{xb}$ | 34.6±1.1 | 1.76±0.05 | 243 $^1_{xb}$ | 33.4±0.9 | 1.80±0.05 |
| 253 $^1_{xb}$ | 34.0±1.0 | 1.80±0.05 | 239 $^1_{xb}$ | 34.3±1.0 | 1.88±0.05 |
| 254 $^1_{xb}$ | 35.5±1.1 | 1.76±0.06 | N43 $^2_{xb}$ | 36.9±1.5 | 1.74±0.06 |
| NEH $^2_{xb}$ | 32.3±1.3 | 1.75±0.07 | N44 $^2_{xb}$ | 37.4±1.5 | 1.75±0.07 |
| HLH $^2_{xb}$ | 37.4±1.3 | 1.82±0.06 | N45 $^2_{xb}$ | 37.4±1.4 | 1.76±0.06 |
| NJT $^2_{xb}$ | 34.1±1.1 | 1.77±0.05 | N46 $^2_{xb}$ | 38.2±1.5 | 1.75±0.06 |
| XIQ $^2_{xb}$ | 34.9±1.2 | 1.78±0.06 | N47 $^2_{xb}$ | 37.9±1.8 | 1.76±0.07 |
| 246 $^2_{xb}$ | 33.9±1.2 | 1.74±0.06 | N48 $^2_{xb}$ | 39.0±1.3 | 1.72±0.06 |
| 251 $^2_{xb}$ | 34.0±1.3 | 1.76±0.07 | N50 $^2_{xb}$ | 36.6±1.5 | 1.82±0.06 |
| 255 $^2_{xb}$ | 35.6±1.2 | 1.77±0.06 | N52 $^2_{xb}$ | 38.3±1.8 | 1.74±0.07 |
| 247 $^2_{xb}$ | 33.4±1.3 | 1.77±0.07 | N54 $^2_{xb}$ | 37.3±1.7 | 1.78±0.08 |
| 256 $^2_{xb}$ | 35.7±1.1 | 1.77±0.05 | N56 $^2_{xb}$ | 37.2±1.3 | 1.74±0.06 |
| 257 $^2_{xb}$ | 36.6±1.1 | 1.76±0.04 | N58 $^2_{xb}$ | 37.1±1.6 | 1.71±0.08 |
| N36 $^2_{xb}$ | 31.8±1.3 | 1.82±0.07 | 244 $^2_{xb}$ | 33.6±1.1 | 1.78±0.06 |
| N37 $^2_{xb}$ | 31.8±1.7 | 1.76±0.09 | LUB $^2_{xb}$ | 32.9±1.2 | 1.77±0.06 |
| N39 $^2_{xb}$ | 33.2±1.9 | 1.73±0.09 | N42 $^2_{xb}$ | 35.4±1.4 | 1.75±0.07 |
| N31 $^3_{xb}$ | 30.8±1.6 | 1.88±0.09 | N40 $^3_{xb}$ | 33.7±1.9 | 1.75±0.09 |
| N33 $^3_{xb}$ | 31.4±1.1 | 1.79±0.05 | N49 $^3_{xb}$ | 38.1±1.9 | 1.78±0.08 |
| N34 $^3_{xb}$ | 33.5±1.1 | 1.75±0.06 | N55 $^3_{xb}$ | 38.7±1.3 | 1.74±0.07 |
| N35 $^3_{xb}$ | 33.5±1.0 | 1.73±0.06 | N27 $^1_{yb}$ | 30.0±1.3 | 1.80±0.07 |
| 211 $^1_{yb}$ | 31.7±1.1 | 1.82±0.06 | LBP $^1_{yb}$ | 35.6±1.0 | 1.86±0.05 |
| 212 $^1_{yb}$ | 32.9±1.2 | 1.77±0.06 | LLM $^1_{yb}$ | 35.7±1.3 | 1.76±0.05 |
| 213 $^1_{yb}$ | 33.5±1.2 | 1.72±0.06 | MIY $^1_{yb}$ | 34.4±0.9 | 1.82±0.05 |
| 214 $^1_{yb}$ | 32.5±1.2 | 1.79±0.07 | LQS $^1_{yb}$ | 34.4±1.1 | 1.98±0.05 |
| 215 $^1_{yb}$ | 33.6±1.1 | 1.76±0.06 | MDY $^1_{yb}$ | 35.0±1.1 | 1.76±0.06 |
| 216 $^1_{yb}$ | 33.6±1.2 | 1.76±0.07 | SZL $^1_{yb}$ | 32.2±1.3 | 1.86±0.06 |
| 220 $^1_{yb}$ | 33.3±1.0 | 1.81±0.05 | TST $^1_{yb}$ | 35.0±0.9 | 1.78±0.05 |

续表 1

| Sta. r_u | H (km) | κ | Sta. r_u | H (km) | κ |
|--------------------------------|----------|-----------|--------------------------------|----------|-----------|
| 221 ¹ _{yb} | 34.0±0.9 | 1.78±0.05 | ZUH ¹ _{yb} | 32.1±1.2 | 1.79±0.05 |
| 222 ¹ _{yb} | 33.9±1.0 | 1.79±0.05 | CHC ¹ _{yb} | 38.9±1.8 | 1.81±0.07 |
| 223 ¹ _{yb} | 33.4±1.7 | 1.81±0.1 | CHD ¹ _{yb} | 34.5±1.2 | 1.77±0.06 |
| 224 ¹ _{yb} | 34.2±0.7 | 1.79±0.04 | FEN ¹ _{yb} | 35.7±1.2 | 1.77±0.06 |
| 225 ¹ _{yb} | 36.4±1.5 | 1.70±0.07 | KUC ¹ _{yb} | 33.4±1.5 | 1.81±0.08 |
| 226 ¹ _{yb} | 35.4±1.0 | 1.73±0.05 | LOH ¹ _{yb} | 35.0±1.0 | 1.79±0.06 |
| 227 ¹ _{yb} | 34.2±1.5 | 1.78±0.08 | QIX ¹ _{yb} | 33.3±0.9 | 1.77±0.05 |
| 228 ¹ _{yb} | 35.3±1.1 | 1.71±0.05 | QIL ¹ _{yb} | 33.0±1.4 | 1.74±0.07 |
| 229 ¹ _{yb} | 35.1±1.0 | 1.73±0.05 | TLK ¹ _{yb} | 33.4±1.4 | 1.71±0.06 |
| 230 ¹ _{yb} | 35.0±1.0 | 1.77±0.05 | XIL ¹ _{yb} | 34.8±1.3 | 1.75±0.08 |
| 232 ¹ _{yb} | 33.2±1.7 | 1.90±0.08 | XLD ¹ _{yb} | 33.4±0.9 | 1.76±0.05 |
| 233 ¹ _{yb} | 34.4±1.2 | 1.86±0.08 | BEP ¹ _{yb} | 32.1±1.5 | 1.81±0.09 |
| 235 ¹ _{yb} | 34.9±1.2 | 1.82±0.06 | BZH ¹ _{yb} | 29.7±0.9 | 1.79±0.06 |
| 237 ¹ _{yb} | 33.6±1.1 | 1.86±0.06 | CHY ¹ _{yb} | 32.3±0.9 | 1.87±0.05 |
| 239 ¹ _{yb} | 34.3±1.0 | 1.88±0.05 | FXI ¹ _{yb} | 32.4±1.5 | 1.75±0.08 |
| N22 ¹ _{yb} | 31.1±1.2 | 1.76±0.07 | JCA ¹ _{yb} | 32.8±0.9 | 1.80±0.05 |
| N24 ¹ _{yb} | 30.9±1.6 | 1.80±0.09 | JZH ¹ _{yb} | 30.5±1.7 | 1.78±0.09 |
| N26 ¹ _{yb} | 29.5±1.4 | 1.80±0.08 | LYA ¹ _{yb} | 35.0±1.1 | 1.74±0.06 |
| CHF ¹ _{yb} | 33.7±0.8 | 1.76±0.04 | NAP ¹ _{yb} | 32.4±1.3 | 1.77±0.06 |
| NIC ¹ _{yb} | 35.3±1.0 | 1.73±0.06 | SUZ ¹ _{yb} | 31.3±0.9 | 1.76±0.05 |
| 219 ² _{yb} | 35.3±1.7 | 1.73±0.07 | FEN ² _{yb} | 36.0±1.2 | 1.77±0.06 |
| 231 ² _{yb} | 34.0±1.5 | 1.83±0.07 | KUC ² _{yb} | 33.7±2.2 | 1.80±0.09 |
| 234 ² _{yb} | 34.6±1.2 | 1.84±0.06 | XIL ² _{yb} | 34.7±1.3 | 1.74±0.08 |
| 236 ² _{yb} | 35.7±2.0 | 1.83±0.1 | CHC ² _{yb} | 39.6±1.4 | 1.77±0.05 |
| 238 ² _{yb} | 35.3±0.9 | 1.80±0.04 | WEC ² _{yb} | 35.3±1.3 | 1.78±0.06 |
| N23 ² _{yb} | 31.2±1.6 | 1.75±0.09 | SHS ² _{yb} | 28.1±2.0 | 1.84±0.1 |
| N25 ² _{yb} | 30.7±1.7 | 1.79±0.09 | BAC ² _{yb} | 39.8±0.9 | 1.72±0.04 |
| N28 ² _{yb} | 30.6±1.4 | 1.74±0.07 | XIH ² _{yb} | 32.1±1.6 | 1.81±0.08 |
| N29 ² _{yb} | 30.2±1.8 | 1.80±0.1 | JIX ² _{yb} | 32.2±1.8 | 1.82±0.1 |
| SSL ² _{yb} | 33.4±1.1 | 1.81±0.05 | CHR ² _{yb} | 36.6±1.5 | 1.80±0.08 |
| XBZ ² _{yb} | 36.8±2.0 | 1.82±0.1 | SHC ² _{yb} | 34.7±1.4 | 1.83±0.06 |
| BJT ² _{yb} | 33.0±1.3 | 1.96±0.07 | XUH ² _{yb} | 38.4±1.1 | 1.75±0.04 |
| GUY ² _{yb} | 39.3±1.9 | 1.78±0.07 | CHD ² _{yb} | 34.7±1.2 | 1.77±0.06 |
| 217 ³ _{yb} | 31.6±1.1 | 1.90±0.06 | LBG ³ _{yb} | 36.3±1.7 | 1.75±0.08 |
| 218 ³ _{yb} | 32.0±1.2 | 1.88±0.06 | N31 ³ _{yb} | 30.8±1.6 | 1.88±0.09 |
| N30 ³ _{yb} | 31.2±1.9 | 1.84±0.09 | LYN ¹ _{in} | 30.7±0.9 | 1.76±0.05 |
| FST ¹ _{in} | 31.4±0.8 | 1.76±0.04 | MQI ¹ _{in} | 32.6±0.8 | 1.74±0.04 |
| PST ¹ _{in} | 31.4±0.9 | 1.75±0.05 | QYU ¹ _{in} | 31.8±0.9 | 1.74±0.05 |
| YFT ¹ _{in} | 31.8±0.9 | 1.79±0.05 | SNY ¹ _{in} | 29.3±1.0 | 1.82±0.06 |
| YNB ¹ _{in} | 31.3±1.2 | 1.82±0.07 | XFN ¹ _{in} | 32.0±0.9 | 1.77±0.05 |
| ANS ¹ _{in} | 30.0±1.2 | 1.75±0.07 | XYN ¹ _{in} | 34.1±1.2 | 1.76±0.06 |

续表 1

| Sta. τ_u | H (km) | κ | Sta. τ_u | H (km) | κ |
|---------------------------------|----------|-----------|---------------------------------|----------|-----------|
| BX1 _{la} ¹ | 35.2±1.3 | 1.78±0.07 | YKO1 _{la} ¹ | 30.6±1.0 | 1.74±0.06 |
| FSH1 _{la} ¹ | 30.5±1.2 | 1.73±0.07 | GUS1 _{la} ¹ | 30.4±1.3 | 1.80±0.09 |
| KDN1 _{la} ¹ | 31.4±1.2 | 1.80±0.07 | WFD1 _{la} ¹ | 34.0±0.7 | 1.75±0.04 |
| N0 _{la} ² | 29.0±1.5 | 1.79±0.08 | JYT2 _{la} ² | 40.4±1.2 | 1.82±0.07 |
| N2 _{la} ² | 31.5±1.5 | 1.80±0.09 | LYT2 _{la} ² | 30.2±1.7 | 1.82±0.08 |
| N3 _{la} ² | 33.3±1.9 | 1.75±0.09 | MJT2 _{la} ² | 33.7±1.1 | 1.74±0.05 |
| N4 _{la} ² | 31.5±1.8 | 1.83±0.09 | THT2 _{la} ² | 33.3±0.9 | 1.71±0.05 |
| N6 _{la} ² | 35.2±2.0 | 1.75±0.09 | DDO2 _{la} ² | 29.9±1.0 | 1.79±0.07 |
| N7 _{la} ² | 32.8±1.8 | 1.82±0.09 | GAX2 _{la} ² | 30.5±1.5 | 1.80±0.08 |
| N9 _{la} ² | 34.5±1.6 | 1.75±0.08 | HUR2 _{la} ² | 32.6±1.2 | 1.78±0.06 |
| N10 _{la} ² | 33.2±1.7 | 1.79±0.09 | TIL2 _{la} ² | 30.3±1.3 | 1.76±0.06 |
| N12 _{la} ² | 32.1±1.6 | 1.77±0.09 | DL2 _{la} ² | 33.8±0.9 | 1.76±0.05 |
| N14 _{la} ² | 31.4±2.0 | 1.83±0.1 | HSH2 _{la} ² | 30.9±0.9 | 1.81±0.06 |
| N15 _{la} ² | 30.5±1.9 | 1.74±0.1 | JCT2 _{la} ² | 31.7±0.9 | 1.76±0.05 |
| SNY3 _{la} ³ | 30.3±1.5 | 1.78±0.08 | BST3 _{la} ³ | 32.3±1.5 | 1.71±0.06 |
| N1 _{la} ³ | 30.3±1.6 | 1.78±0.1 | HCT3 _{la} ³ | 33.5±1.5 | 1.72±0.08 |
| N8 _{la} ³ | 34.3±2.3 | 1.76±0.12 | LHT3 _{la} ³ | 30.9±1.0 | 1.78±0.06 |
| N11 _{la} ³ | 31.7±1.9 | 1.83±0.12 | LHS3 _{la} ³ | 29.3±1.4 | 1.82±0.08 |
| JY1 _{jb} ¹ | 32.7±1.5 | 1.77±0.06 | MDJ1 _{jb} ¹ | 34.9±1.1 | 1.84±0.06 |
| LBE1 _{jb} ¹ | 35.0±1.1 | 1.80±0.06 | XBH1 _{jb} ¹ | 36.5±0.8 | 1.79±0.04 |
| WDL1 _{jb} ¹ | 31.4±1.0 | 1.73±0.06 | DHT1 _{jb} ¹ | 32.2±1.1 | 1.77±0.05 |
| WUC1 _{jb} ¹ | 28.0±0.9 | 1.79±0.06 | FMT1 _{jb} ¹ | 29.2±0.9 | 1.74±0.05 |
| HHL1 _{jb} ¹ | 36.4±1.5 | 1.78±0.08 | YAS2 _{jb} ² | 29.5±1.7 | 1.76±0.09 |
| BAQ2 _{jb} ² | 36.9±1.2 | 1.72±0.08 | YCH2 _{jb} ² | 30.5±1.1 | 1.72±0.06 |
| BEI2 _{jb} ² | 32.3±2.2 | 1.86±0.14 | LIH2 _{jb} ² | 35.3±1.0 | 1.79±0.04 |
| BNX2 _{jb} ² | 31.3±1.4 | 1.76±0.08 | SHZ2 _{jb} ² | 34.2±2.0 | 1.81±0.1 |
| HEH2 _{jb} ² | 30.8±1.1 | 1.81±0.06 | SGT2 _{jb} ² | 30.2±1.5 | 1.86±0.08 |
| QAN2 _{jb} ² | 31.1±1.5 | 1.75±0.07 | CN2 _{jb} ² | 28.6±2.0 | 1.83±0.13 |
| XUK2 _{jb} ² | 30.8±1.3 | 1.75±0.08 | MIH3 _{jb} ³ | 32.7±1.5 | 1.86±0.09 |
| QTH3 _{jb} ³ | 33.9±1.9 | 1.89±0.12 | YIL3 _{jb} ³ | 32.6±1.1 | 1.81±0.06 |
| TOH3 _{jb} ³ | 33.2±0.9 | 1.79±0.06 | DNI3 _{jb} ³ | 36.9±1.1 | 1.76±0.06 |

注:Sta. τ_u 中 Sta 代表台站名,上标 τ 表示数据质量(1,良好;2,中等;3 较差),下标 u 标明台站所处的构造单元. xb,兴蒙造山带;yb,燕山带;la,辽东台隆;jh,吉黑褶皱带.

东厚北西薄,主要在 28~37 km 变化,平均值为~33 km. 相比于东侧吉黑褶皱带和辽东台隆<37 km 厚的地壳,西侧兴蒙造山带和燕山带的最大地壳厚度接近 40 km. 地壳平均波速比在研究区变化显著,尤其是在松辽盆地和渤海湾盆地周边以及构造边界处和郯庐断裂带附近变化比较复杂,并且出现局部增高(>1.87). 在兴蒙造山带和辽东台隆,波速比变化相对较小,都主要在 1.71~1.83 范围内变化,平

均值都约为 1.77;而在燕山带和吉黑褶皱带变化则相对较大,分别在 1.70~1.91 和 1.72~1.89 范围内变化,平均值也相对稍高(~1.79).

为了进一步分析认识研究区的地壳结构和性质及其与构造的关系,我们将地壳厚度与地表地形及波速比分别进行了对比(图 4,5). 研究区整体上具有地壳随着海拔增加逐渐增厚的特征(图 4b). 采用最小二乘法拟合,获得的线性回归方程为:

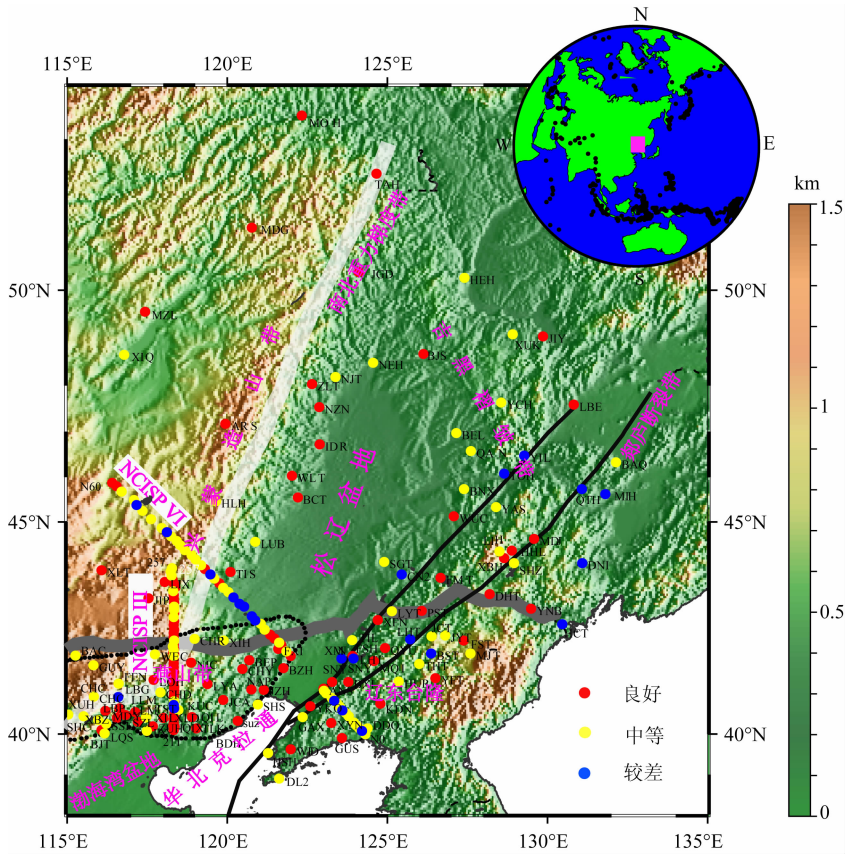


图 1 研究区域、台站以及地震分布

图中圆点代表本文所用到的 224 个台站位置,不同颜色代表不同的数据质量(见右下插图).粗灰线代表华北克拉通的北部边界^[44].细黑线和粗白线分别标明郯庐断裂带和南北重力梯度带的位置.右上插图表明本文所用远震事件的分布情况.图中燕山带(黑色圆点所围区域)参照郑亚东等^[14]结果.

Fig. 1 Map showing the study region and distribution of stations and earthquakes

Solid circles show the locations of the stations used, different colors indicate different data quality (see lower-right inset). Thick gray line shows the northern border of the North China Craton^[44]. Thin black lines and thick white line denote the Tanlu Fault Zone and North-South Gravity Lineament, respectively. The earthquakes distribution is shown in the up-right inset. The spatial range of the Yanshan Belt (outlined with black dots) is from Zheng et al. ^[14].

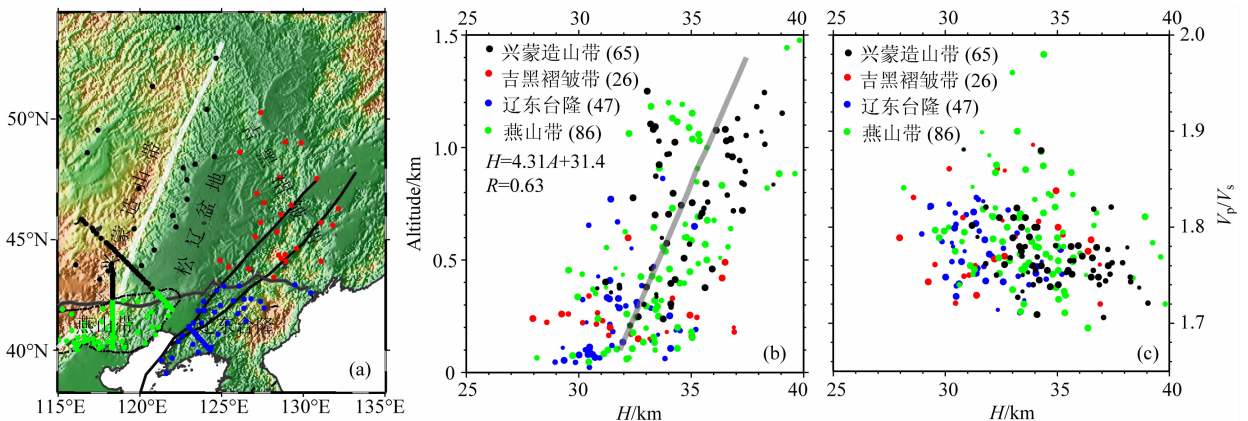


图 4 研究区域地壳厚度与地表地形以及 V_p/V_s 比的相关性

(a) 研究区域四个构造单元的划分。(b) 地壳厚度与海拔高度(A)的相关性.灰线为用最小二乘法拟合的直线, R 值代表相关系数.

(c) 地壳厚度与 V_p/V_s 的相关性。(b)和(c)中,圆点的大小表明了数据质量的好坏,圆点最大表示良好,最小表示较差.

Fig. 4 Correlation of crustal thickness with altitudes and V_p/V_s ratios

(a) Distribution of four tectonic units in the study region. (b) Correlation of crustal thickness with altitudes. Gray line is from the least squares fitting, R is correlation coefficient. (c) Correlation of crustal thickness with V_p/V_s ratios. The dot size in (b), (c) denotes the data quality (the bigger, the better).

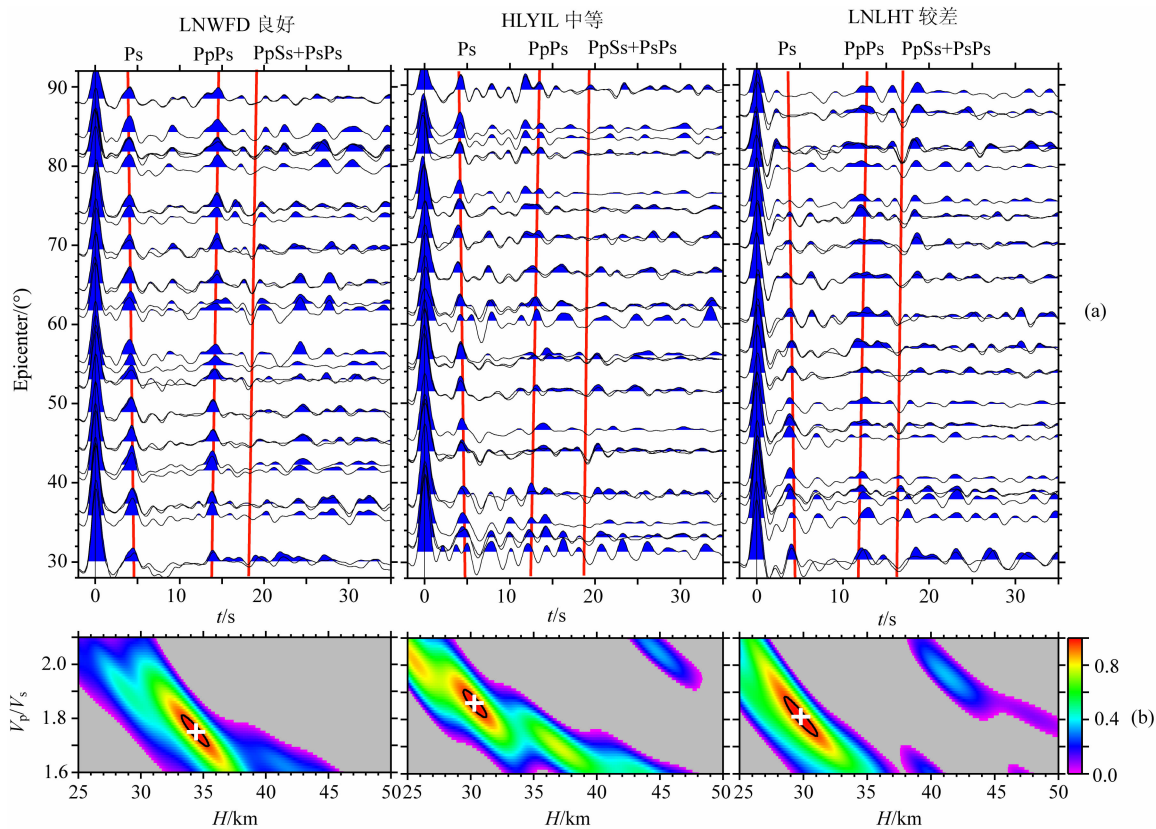


图 2 按震中距排列的接收函数道集和 $H-\kappa$ 叠加结果
 (a) 中红色实线为不同震相的理论到时. (b) 中不同颜色对应不同的归一化叠加振幅,
 黑色椭圆代表了 95% 的置信区间, 十字叉表明所求的最佳地壳厚度和波速比值.

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 (a) give the theoretical arrival times of different phases. Different colors in (b) 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.

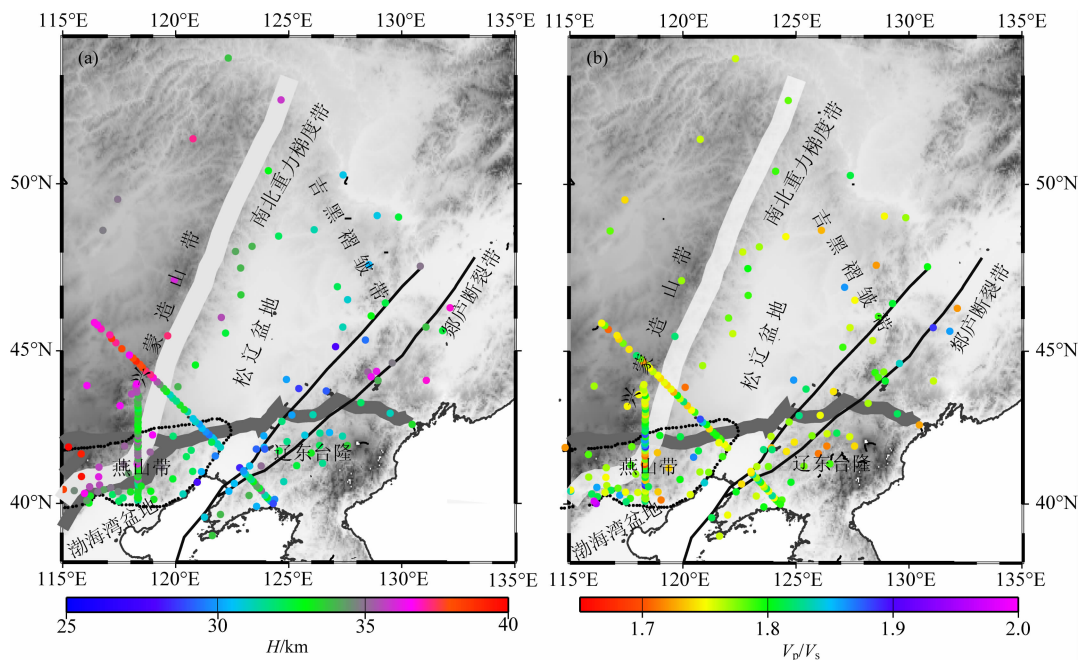


图 3 接收函数 $H-\kappa$ 叠加获得的研究区域地壳厚度 (a) 和 V_p/V_s (b) 分布
 Fig. 3 Distributions of crustal thickness (a) and average V_p/V_s ratio (b) in the study region estimated by $H-\kappa$ stacking of receiver functions

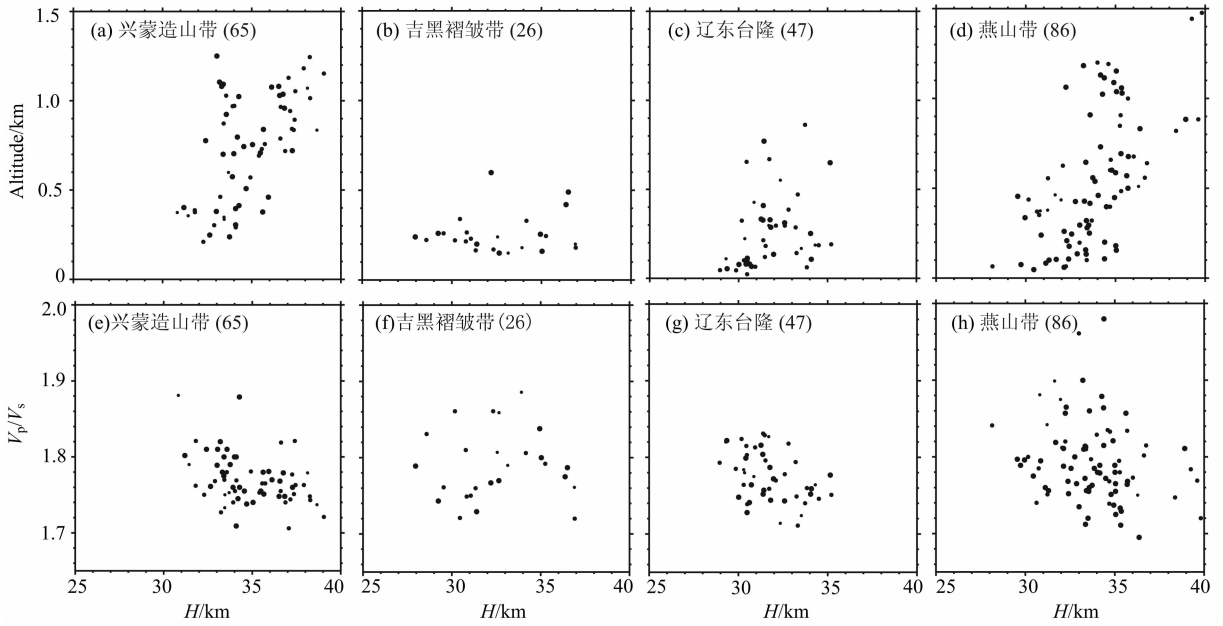


图 5 研究区域不同构造带的地壳厚度(a, b, c, d)与地表地形以及 V_p/V_s (e, f, g, h) 的相关性

Fig. 5 Altitude versus crustal thickness (a, b, c, d) and V_p/V_s ratio versus crustal thickness (e, f, g, h) in different tectonic units of the study region

$$H = 4.31A + 31.4, \quad (4)$$

其中, H 代表地壳厚度(去掉地形), A 表示海拔, 单位为 km, 相关系数 R 为 0.63. 研究区地壳厚度与波速比没有明显的相关性(图 4c). 图 5 展示了四个构造带各自的地壳厚度与海拔以及波速比的分布. 从图中可以看出, 兴蒙造山带、辽东台隆和燕山带三个区域的地壳大致随着海拔增高而逐渐增厚, 其相关系数 R 分别为 0.57, 0.60 和 0.31, 而吉黑褶皱带地壳厚度与海拔则显示出不相关性质 ($R=0.13$), 主要表现为地壳厚度从 ~ 28 km 到 ~ 37 km 的显著变化, 而海拔变化较小 ($\sim 100-600$ m). 兴蒙造山带、辽东台隆和燕山带的地壳厚度与波速比表现出弱的负相关关系, 而吉黑褶皱带则没有这种关系. (尽管本文采用的吉黑褶皱带台站数量相对较少, 但分布比较均匀, 且在海拔相对较高和较低区域都有覆盖(图 1), 因此本文的研究结果基本反映了吉黑褶皱带的地壳结构特征).

4 讨论

4.1 与前人结果对比

我们通过对基于不同方法获得的地壳厚度分布(图 6), 对研究区的地壳结构做了进一步分析. 对比结果显示, 采用接收函数 $H-\kappa$ 叠加方法得到的东北地区地壳厚度变化图像与前人基于人工源资料获

得的结果具有较好的一致性. Li 等^[26] 采用深地震测深资料获得了中国大陆的地壳厚度分布(图 6b), 发现在本文研究区, 燕山带最西端和兴蒙造山带内部 ($\sim 45^\circ\text{N}$) 的地壳较厚, 可达 ~ 40 km. 我们在这两个区域同样得到了约 40 km 的地壳厚度(图 6a). 沿满州里—绥芬河地学断面, 广角地震测深资料显示, 该区域普遍存在纵波波速 > 7.2 km/s 的壳幔过渡带^[34] (图 6c 中虚线和莫霍面之间). 本文采用接收函数 $H-\kappa$ 叠加方法得到的沿断面的地壳厚度均落在这一壳幔过渡带深度范围, 其中在兴蒙造山带(满洲里—大庆)内位于壳幔过渡带底边界附近, 而在吉黑褶皱带内(哈尔滨—穆棱)则接近于壳幔过渡带顶部(图 6c 中红点). 这一特征可能反映了壳幔过渡带波速随深度的变化及其相关的壳幔相互作用存在区域差异. 此外, 本文沿 NCISP III 和 VI 两条流动地震台阵获得的地壳厚度与接收函数波形反演^[35] 和偏移成像^[36] 得到的结果也基本一致(图 6d, 6e).

采用不同方法得到的区域地壳厚度分布的一致性(图 6)进一步证明了本文以及前人研究结果的可靠性. 对于某些台站, 不同方法得到的地壳厚度存在较大的差别, 可能来自于以下几方面的原因: (1) 采用不同资料或方法揭示的是地壳结构不同方面的特征. 比如, 高频人工源反射波对尖锐的波速和密度跳变(间断面)结构敏感, 而远震接收函数转换波则反映相对宽缓的速度随深度的变化; (2) 小尺度的复杂

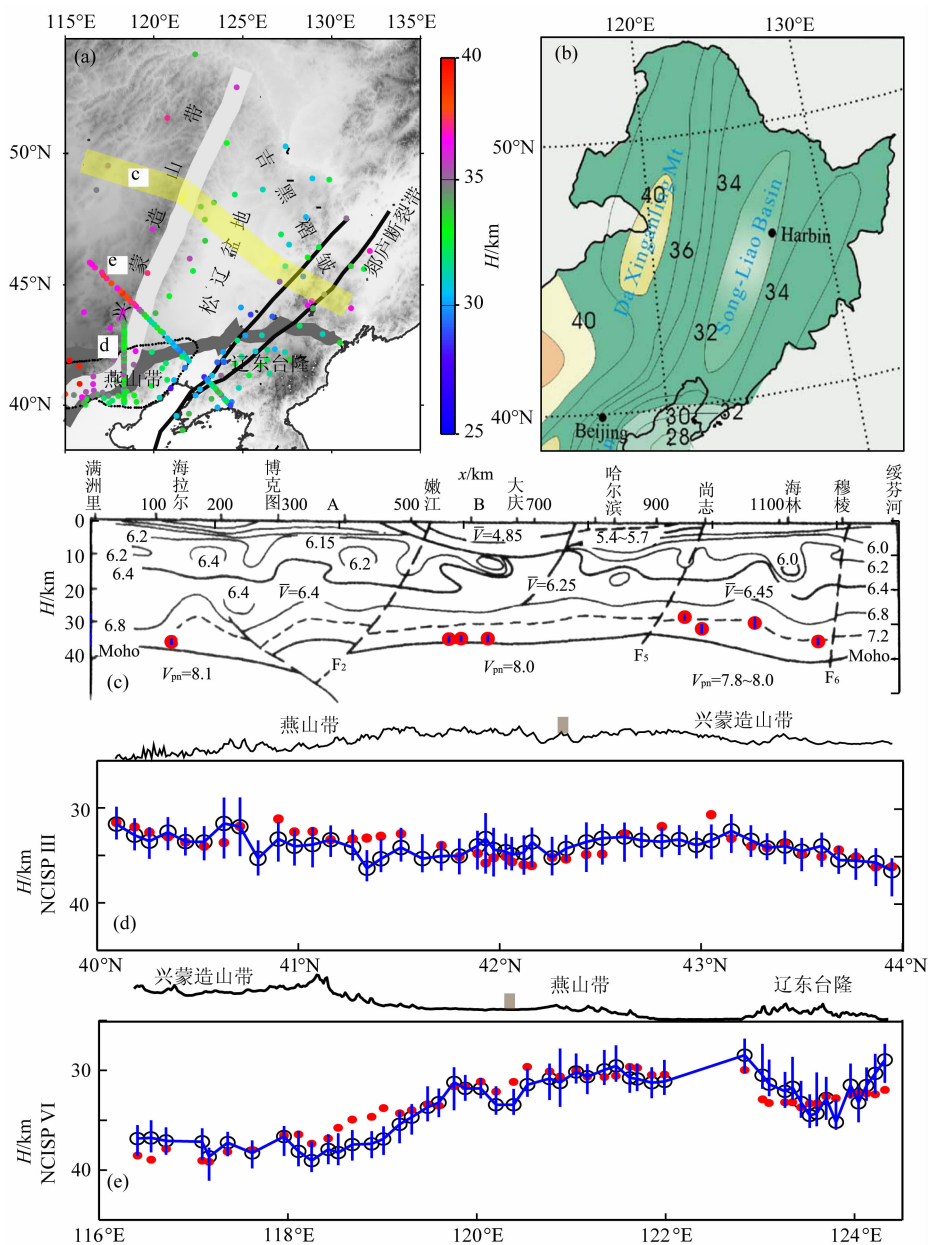


图6 采用不同地震学方法获得的研究区地壳厚度对比

(a) 接收函数 $H-\kappa$ 叠加得到的地壳厚度分布(本文);(b) 由人工地震资料得到的地壳厚度分布^[26];(c) 中国满洲里—绥芬河地学断面下方的地壳 P 波速度^[34],红点表示接收函数 $H-\kappa$ 叠加结果;(d) NCISP III 台站下方接收函数 $H-\kappa$ 叠加结果^[15](圆圈)和波形反演结果^[35](红点)的对比。(e) NCISP VI 台站下方接收函数 $H-\kappa$ 叠加结果^[15](圆圈)和偏移成像结果^[36](红点)的对比。

Fig. 6 Comparison of crustal thickness by different seismological methods

(a) Distribution of H by $H-\kappa$ stacking of RFs in the study region. (b) Distribution of H by active seismic exploration^[26]. (c) P wave velocity under the Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect^[34], red dots represent H by $H-\kappa$ stacking of RFs. (d) H on the profile NCISP III from $H-\kappa$ stacking of RFs^[15] (circles) and waveform inversion of RFs^[35] (red dots). (e) H on the profile NCISP VI from $H-\kappa$ stacking of RFs^[15] (circles) and receiver function migration^[36] (red dots).

结构变化会增加研究结果的不确定性,增大不同结果之间的差异。例如当存在厚的壳幔转换带结构时,由不同方法、不同频率资料获得的地壳厚度估计往往存在明显差别^[37-38]。

4.2 地壳结构特征与横向密度变化

本文接收函数 $H-\kappa$ 叠加结果表明,研究区域地

壳结构特征与区域地质构造密切相关。地壳厚度从松辽盆地四周造山带逐渐增厚(图 3),与地表地形大致对应。地壳总体较薄,尤其是在松辽盆地周边区域薄于 30 km,具有典型大陆伸展裂陷区的地壳厚度。这与这些区域在中新生代经历了广泛的构造伸展并且伸展中心位于松辽盆地的特征是一致的。

总体来看,地壳在重力梯度带西侧比东侧明显增厚,与地表地形相对应,这种现象在东北地区尤其明显,可能与两侧区域显生届以来截然不同的浅表地质构造与深部地幔动力学过程有关^[21,24,34]。辽东台隆、燕山带、吉黑褶皱带和兴蒙造山带四个构造带的地壳厚度与波速比呈现出不同的变化特征(图 5),可能反映了不同构造单元在区域动力学背景下具有不同的构造响应。

艾利均衡模型认为山区地壳存在山根,地表起伏引起的重力异常由山根厚度变化来补偿,因此地壳随着地表海拔的增加而逐渐增厚。上文所述(图 4b),研究区地壳大致随着海拔增高逐渐增厚,相关系数 R 为 0.63,决定系数 $R^2=0.4$,暗示地壳厚度中只有 40% 的信息可以被海拔高程解释(假设地壳达到均衡状态),表明地壳厚度与海拔的相关性相对较弱。研究区地壳厚度与波速比也没有明显的相关性(图 4c)。这些现象揭示了该区域地壳结构的横向不均匀性,暗示地壳存在着横向密度变化。地壳密度的不均匀性得到了重力^[4,21]和磁场资料^[4]的证明。研究区域大范围分布的不同时期的花岗岩与火成岩^[5-6],由于各自密度差异可能会产生地壳密度横向变化。中—新生代的构造事件可能不同程度地改变了局部区域地壳厚度与成分,从而造成地壳厚度与海拔之间相对较弱的相关关系和波速比值的复杂变化。

4.3 地壳结构区域差异

本文通过接收函数 $H-\kappa$ 叠加方法得到的地壳厚度与波速比的分布特征表明东北地区至华北北缘地壳结构存在明显的东西差异(图 3,5)。这种差异同样被其它地球物理^[4,26,39]和地球化学^[5-6]资料所证明。我们研究发现,地壳结构的东、西差异在东北与华北北缘两个区域表现出截然相反的特征。东北地区东侧吉黑褶皱带相比于西侧兴蒙造山带具有较薄的地壳和复杂的波速比,而华北北缘地壳东侧辽东台隆相比于西侧燕山带具有小范围变化的地壳厚度和相对稳定的波速比。

4.3.1 东北地区东西差异

东北地区主要包括兴蒙造山带、松辽盆地和吉黑褶皱带(图 1)。由于盆地厚的沉积层多次波对深部结构震相的干扰,本文无法有效约束松辽盆地内部的地壳结构。然而,我们获得了松辽盆地边界区域(包括位于华北北缘部分)相对可靠的地壳厚度与波速比。研究结果显示(图 3,5),这些盆地边界区域的地壳都比较薄,最薄处只有 ~ 28 km,这与两条近

SE—NE 向穿过东北地区的地质断面得到的结果一致^[1,22]。波速比在边界处变化复杂,高低值共存,暗示了地壳结构强烈的横向不均匀性。

研究结果显示东北地区东侧吉黑褶皱带和西侧兴蒙造山带地壳结构存在明显差异(图 3,5)。整体上兴蒙造山带地壳相对较厚,波速比相对稳定,地壳厚度与海拔相关系数为 0.57;而吉黑褶皱带地壳相对较薄,波速比变化范围大,地壳厚度与海拔相关系数仅为 0.13。东北地区地壳结构的東西差异已被其它地球物理学观测资料所证明。郝天珧等^[18]通过对重力场、磁场、电性结构与深地震测深资料的研究认为中国东部及其邻域具有东西分带、南北分块的特征。地球化学研究发现东北地区花岗岩的形成年代存在东西差异,西侧兴蒙造山带的花岗岩主要形成于早白垩纪,而东侧吉黑褶皱带的花岗岩则主要形成于侏罗纪^[5-6]。这反映两个区域中生代以来的地壳构造演化过程有所不同。

地质资料表明^[40],兴蒙造山带主要由相对简单的额尔古纳和兴安古陆块组成;而吉黑褶皱带则是由多个小古陆块拼合的块体(例如松嫩、张广才岭、佳木斯、老爷岭、兴凯、布列亚等古陆块),因而自形成时地壳结构可能更加复杂。侏罗纪以来,东北地区主要受到太平洋板块向欧亚大陆俯冲的影响^[5-6,41]。侏罗纪时期,东北地区遭到了强烈的陆内挤压造山过程;白垩纪蒙古洋闭合后,该地区作为一个构造整体遭到了强烈的陆内伸展作用,造成岩石圈和地壳的减薄以及广泛的岩浆作用^[2-3,5-6]。与兴蒙造山带相比,吉黑褶皱带由于更靠近太平洋板块前缘从而可能受到其更大的影响。这与本文获得的兴蒙造山带和吉黑褶皱带下方差异显著的地壳结构是一致的。兴蒙造山带较厚的地壳和相对稳定的波速比,东部吉黑褶皱带较薄的地壳和复杂的波速比以及地形与地壳厚度的非镜像关系,可能代表了这两部分对太平洋板块俯冲不同程度的响应。相比于西侧兴蒙造山带,东侧吉黑褶皱带可能由于其自身的地壳结构复杂性和更靠近太平洋板块前缘从而在中新生代遭受到了更为严重的减薄与改造。

4.3.2 华北北缘东西差异

危自根等^[15]通过对两条线性密集流动台阵下方地壳结构的研究认为华北北缘西侧燕山带比东侧辽东台隆可能经历了更为强烈的后期改造。通过在该区域增加近均匀分布的固定地震台站(台站数目接近危自根等^[15]三倍),我们得到了更全面的地壳结构信息。研究表明燕山带和辽东台隆的地壳厚度

与波速比呈现出弱的负相关性并且比危自根等的结果^[15]更加明显(图 5)。Ji 等^[42]认为这种关系可能是由相对富集长英质(较低波速比)的中上地壳减薄和下部地壳铁镁质物质(较高波速比)底侵共同引起。研究区域中新代火山岩和变质核杂岩的出露^[14-15,43]证实了这两种作用的存在。研究结果表明燕山带和辽东台隆地壳结构差异非常明显(图 3,5)。辽东台隆地壳相对较薄且厚度变化范围小,波速比相对稳定,地壳厚度与海拔相关系数为 0.60;而燕山带地壳相对较厚且由东向西厚度显著增加,波速比分布范围也较大,地壳厚度与海拔相关系数仅为 0.31。这种地壳厚度的东西差异和变化趋势与卢造勋等^[1]得到的内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地质断面结果一致。

地壳结构差异特征表明,相比于辽东台隆,燕山带地壳结构更加复杂,经历的后期改造可能更加强烈和不均匀。复杂的地壳改造过程可能不同程度地改变了局部区域的地壳厚度与成分,从而造成燕山带地壳厚度和波速比值的复杂变化。与东北地区单一的 NNE 构造走向不同(图 1,3),重力梯度带在华北北缘呈现出 E—W 和 NNE 走向共存,表现为该区域重力梯度带附近地壳结构的复杂变化(图 3)。前人研究表明^[14-15],华北北缘在中生代经历了与中亚造山带增生(E—W 走向)和太平洋板块俯冲(NNE 走向)相关的复杂的挤压和伸展变形并伴随着强烈的岩浆活动。这两种构造过程可能造成了华北北缘地壳结构的不均匀改造,相对于燕山带,东侧的辽东台隆可能主要受太平洋板块俯冲影响,地壳改造相对较为均匀。

5 结 论

通过对分布相对均匀的 127 个固定台站下方接收函数的 $H-\kappa$ 叠加分析,并结合危自根等^[15]对两条线性密集流动台阵的研究结果,我们获得了东北地区和华北克拉通北缘地壳厚度与平均波速比信息。

(1)研究区域地壳总体较薄,波速比变化复杂,地壳厚度与海拔的相关关系存在区域差异。这些结果表明了地壳结构的强烈横向不均匀性,暗示着地壳在中—新生代可能经历了强烈且不均匀的减薄与改造。

(2)东北地区地壳结构存在明显的东西差异。西侧兴蒙造山带地壳较厚且大致随着海拔增高逐渐增厚,波速比变化相对平稳。东侧吉黑褶皱带地壳较薄

且地壳厚度与海拔不成镜像关系,波速比变化明显。这种差异可能来自于这两部分对太平洋板块俯冲不同程度的响应。相比于西侧兴蒙造山带,东侧吉黑褶皱带由于其自身的地壳结构复杂性和更接近太平洋板块前缘从而在中新生代遭受到了更为严重的减薄与改造。

(3)华北北缘地壳结构呈现出明显的东西向差异。东侧辽东台隆地壳相对较薄且厚度变化范围小,波速比相对稳定;西侧燕山带地壳相对较厚且由东向西厚度显著增加,波速比分布范围较大。这一特征表明了这两部分对中亚造山带增生(E—W 走向)和太平洋板块俯冲(NNE 走向)构造过程的不同响应。与辽东台隆相比,燕山带地壳经历了更复杂的改造。

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流动地震数据资料;中国地震局地球物理研究所“国家数字测震台网数据备份中心”提供固定台站地震波形数据;郑天愉和王炳瑜分别提供地壳结构的接收函数波形反演和偏移成像结果;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] 卢造勋,夏怀宽. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地质断面. 北京:地震出版社,1992.
Lu Z X, Xia H K. Geoscience Transect From Dong Ujimqinqi, Inner Mongolia (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1992.
- [2] Li S T, Mo X X, Yang S G. Evolution of circum Pacific basins and volcanic belts in East China and their geodynamic background. *Journal of China University of Geosciences*, 1995, 6(1): 48-58.
- [3] 张岳桥,赵越,董树文等. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段. *地学前缘*, 2004, 11(3): 123-133.
Zhang Y Q, Zhao Y, Dong S W, et al. Tectonic evolution stages of the Early Cretaceous rift basins in Eastern China and adjacent areas and their geodynamic background. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2004, 11(3): 123-133.
- [4] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1-30.
- [5] Zhang J H, Gao S, Ge W C, et al. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination. *Chemical Geology*, 2010, 276(3/4): 144-165.
- [6] Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Palaeo-zoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. // Prichard H M, Alabaster T, Harris N B M eds. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*: Geological Society. London: Special Publication, 1993, 76;

- 71-81.
- [7] Griffin W L, Zhang A, O' Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton, in Flower. // Martin F J, Chung S L, Lo C H eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. American Geophysical Union Geodynamics Series*, 1998, 27: 107-126.
- [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] 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.*, 2007, 119(11-12): 1405-1414.
- [10] 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.
- [11] Chen L, Wang T, 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.
- [12] 陈凌, 程聘, 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.
- [13] 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.
- [14] 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 Geologica Sinica* (in Chinese), 2000, 74(4): 289-302.
- [15] 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.
- 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 antecline-Yanshan belt-Xingmeng orogenic belt and their tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(11): 2799-2808.
- [16] 何正勤, 叶太兰, 丁志峰. 华北东北部的面波相速度层析成像研究. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1233-1242.
- He Z Q, Ye D L, Ding Z F. Surface wave tomography for the phase velocity in the northeastern part of North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(5): 1233-1242.
- [17] 陈石, 王谦身, 徐伟民等. 华北地区热均衡、重力均衡与深部构造. *地球物理学报*, 2011, 54(11): 2864-2875.
- Chen S, Wang Q S, Xu W M, et al. Thermal isostasy of North China and its gravity isostasy and deep structure. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(11): 2864-2875.
- [18] 郝天兆, 刘伊克, 段昶. 中国东部及其邻域地球物理场特征与大地构造意义. *地球物理学报*, 1997, 40(5): 677-690.
- Hao T Y, Liu Y K, Duan C. The characteristic of geophysical field in the east China and adjacent regions and its tectonics significance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, 40(5): 677-690.
- [19] 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.
- [20] 卢造勋, 姜德禄, 白云等. 东北地区地壳上地幔结构的探测与研究. *东北地震研究*, 2005, 21(1): 1-8.
- Lu Z X, Jiang D L, Bai Y, et al. Exploration and research on the structure of the crust and upper mantle in northeast China. *Seismological Research of Northeast China* (in Chinese), 2005, 21(1): 1-8.
- [21] 杨宝俊, 刘万崧, 王喜臣等. 中国东部大兴安岭重力梯级带域地球物理场特征及其成因. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 86-97.
- Yang B J, Liu W S, Wang X C, et al. Geophysical characteristics of Daxing'anling gravitational gradient zone in the East China and its geodynamic mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(1): 86-97.
- [22] 金旭, 杨宝俊. 中国满州里—绥芬河地学断面地球物理场及深部构造特征研究. 北京: 地震出版社, 1994.
- Jin X, Yang B J. *Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect, China* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1994.
- [23] 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.
- [24] Chen L. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S- and P-receiver function migration. *Earth Planet Interiors*, 2009, 173(3-4): 216-227.
- [25] 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.
- [26] Li S L, Mooney W D, Fan J C. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data. *Tectonophysics*,

- 2006, 420(1-2): 239-252.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 葛藜, 郑勇, 熊熊. 华北地区地壳厚度与泊松比研究. *地球物理学报*, 2011, 54(10): 2538-2548.
Ge C, Zheng Y, Xiong X. Study of crustal thickness and Poisson ratio of the North China Craton. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(10): 2538-2548.
- [30] Zhu L P, Kanamori H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B2): 2969-2980.
- [31] 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁等. "国家数字测震台网数据备份中心"技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1412-1417.
Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(5): 1412-1417.
- [32] 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.* (in Chinese), 1998, 41(5): 669-679.
- [33] 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.
- [34] 刘殿秘, 韩立国, 翁爱华等. 松辽盆地西北边界部分地球物理特征. *地球物理学进展*, 2007, 22(6): 1722-1727.
Liu D M, Han L G, Weng A H, et al. Partial geophysical features of the northwest boundary in Songliao basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(6): 1722-1727.
- [35] 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.
- [36] 王炳瑜, 陈凌, 艾印双等. 华北克拉通东北部及邻区地壳和地幔转换带厚度研究. *地球物理学报*, 2013, 56: 待刊.
Wang B Y, Chen L, Ai Y S, et al. Crustal structure and mantle transition zone thickness beneath the northeastern area of the North China Craton and adjacent region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56: in Press.
- [37] Rumpfhuber E M, Keller G R, Sandvol E, et al. Rocky Mountain evolution: Tying Continental Dynamics of the Rocky Mountains and Deep Probe seismic experiments with receiver functions. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: B08301, doi: 10.1029/2008JB005726.
- [38] Wei Z G, Chen L, Xu W W. Crustal thickness and Vp/Vs ratio of the central and western North China Craton and its tectonic implications. *Geophys. J. Int.*, 2011, 186(2): 385-389.
- [39] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质-地球物理系列图(1:500万). 北京: 地质出版社, 1989.
Liu G D. China Seas and Adjacent Regions, Geophysical Series Maps (1:500 000) (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989
- [40] 张兴洲, 杨宝俊, 吴福元等. 中国兴蒙—吉黑地区岩石圈结构基本特征. *中国地质*, 2006, 33(4): 816-823.
Zhang X Z, Yang B J, Wu F Y, et al. The lithosphere structure in the Hingmong-Jihei (Hinggan-Mongolia-Jilin-Heilongjiang) region, northeastern China. *Geology in China* (in Chinese), 2006, 33(4): 816-823.
- [41] Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 2002, 344(3-4): 175-205.
- [42] Ji S C, Wang Q, Salisbury M H. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson's ratio. *Tectonophysics*, 2009, 463(1-4): 15-30.
- [43] Meng Q R. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 2003, 369(3-4): 155-174.
- [44] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 2005, 136(2): 177-202.

(本文编辑 何 燕)