

李传金,徐佩芬,孙勇军等. 用远震接收函数研究山西地区地壳厚度变化:“晋中坡折带”及其地质意义探讨. 地球物理学报, 2010, 53(5):1143~1148, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.015

Li C J, Xu P F, Sun Y J, et al. The Jinzhong transition belt and its geological significance by receiver function in Shanxi region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(5):1143~1148, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.015

## 用远震接收函数研究山西地区地壳厚度变化: “晋中坡折带”及其地质意义探讨

李传金<sup>1,2</sup>, 徐佩芬<sup>1</sup>, 孙勇军<sup>1,2</sup>, 贾建喜<sup>3</sup>

1 中国科学院地球深部研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 山西省地震局, 太原 030021

**摘 要** 利用山西数字地震台网中心 6 年的远震数据计算接收函数并进行  $H-k$  搜索, 以获得台站下方的地壳厚度. 结果表明, 山西地区在平遥盆地北缘的文水—晋中—一线, 地壳厚度存在北厚南薄差异变化的坡折带, 称之为“晋中坡折带”. 该带呈 NEE 向延伸, 其南部地区地壳厚度 37~40 km, 北部地区厚 41~45 km. 本文分析认为, 该坡折带代表早前寒武纪基底构造, 是华北克拉通内部的重要构造边界. 山西地区基底构造保存完好, 地壳厚度未明显减薄.

**关键词** 接收函数,  $H-k$  搜索, 地壳厚度, 晋中坡折带, 山西地区

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.015

中图分类号 P315

收稿日期 2010-01-06, 2010-04-26 收修定稿

### The Jinzhong transition belt and its geological significance by receiver function in Shanxi region

LI Chuan-Jin<sup>1,2</sup>, XU Pei-Fen<sup>1</sup>, SUN Yong-Jun<sup>1,2</sup>, JIA Jian-Xi<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of the Study of Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Seismological Bureau of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China

**Abstract** Seismic data collected by Shanxi Digital Seismic Network during a six-year time period were used to compute crustal thickness using the receiver function method and  $H-k$  search. The results show that at the northern margin of Pingyao Basin in Shanxi region, there exists a transition belt along the line between Wenshui and Jinzhong, called Jinzhong transition belt. The belt acts as a dividing line between the south thin crust (about 37~40 km) and the north thick crust (about 41~45 km) trending in NEE direction. We consider this transition belt being related to early precambrian basement structure and an important tectonic boundary inside the North China Craton. In this region, the basement structure is well-preserved and the crust is relatively thick.

**Keywords** Receiver function,  $H-k$  search, Crustal thickness, Jinzhong transition belt, Shanxi region

## 1 引言

山西地区构造地理位置独特,中、新生代近南北向块断作用与基底构造的复合叠加,造就了该区西缘基本以离石断裂、东缘受邢台断裂所围限的近南北向的中、新生代地块构造特征<sup>[1,2]</sup>. 华北克拉通早前寒武纪基底构造带,包括恒山、五台山以 NE 走向横跨本区中部,其北部为基底广泛出露的地质区,南部为盖层广泛覆盖的正常台地环境,发育/残留了如沁水盆地等保存相对完整的显生宙盖层盆地. 本区尤其是东侧的太行山,地处华北克拉通东、西部地壳厚度变化的过渡部位,是我国南北重力梯度带的重要组成部分. 华北区域航磁图上清晰显示的异常条带以平行基底构造线的方向展布<sup>[3]</sup>,表明该地区基底构造在盖层之下保存相对完好. 由于遭受张扭构造切割,本区新生代发育汾渭地堑系,并以一组 NE 向雁行谷地呈总体近 NNE 向从中部穿过<sup>[4]</sup>.

上述构造特征决定了该区是华北地区地壳演化最重要的构造部位之一. 对该地区地壳厚度的研究,不仅有助于探讨早前寒武纪基底构造框架,也有助于探讨中、新生代时期该区构造发育的深部背景和特征,进而探索中、新生代构造与早前寒武纪基底构造的叠加关系,以及中新生代发生在华北克拉通东部的大规模地壳、岩石圈减薄和克拉通破坏在该地区的响应特征.

本文采用接收函数方法研究山西地区的地壳厚度变化. 接收函数方法是研究壳幔结构的有效方法,对于单个地震台站获得的接收函数,  $H-k$  搜索能综合利用转换波的多次波震相,获得比较可靠的莫霍面深度<sup>[5~7]</sup>.

## 2 接收函数 $H-k$ 搜索方法

接收函数方法是将天然地震资料的三分量记录从垂向、东西向和南北向坐标系中转换到垂向、径向和切向坐标系中,用径向分量和切向分量分别与垂向分量反褶积得到径向接收函数和切向接收函数. 接收函数基本消除了震源效应,可看成是接收台站下方介质结构的响应.

接收函数  $H-k$  搜索则是利用径向接收函数的 Ps 震相和 PpPs 震相(实际中 PpSs + PsPs 震相的能量相对较弱,本文未予采用)共同约束间断面的深度. 这两个震相与初至 P 波的到时差  $t_{Ps}$ 、 $t_{PpPs}$  分别为

$$t_{Ps} = H(\sqrt{(V_P/V_S)^2 - p^2 V_P^2} - \sqrt{(1 - p^2 V_P^2)})/V_P, \quad (1)$$

$$t_{PpPs} = H(\sqrt{(V_P/V_S)^2 - p^2 V_P^2} + \sqrt{1 - p^2 V_P^2})/V_P \quad (2)$$

其中,  $H$  表示地表到转换波界面的厚度,  $V_P$  和  $V_S$  表示地表到转换波界面平均的 P 波速度和 S 波速度,  $p$  为射线参数.

设计一目标函数  $s$ ,  $s = \omega_1 r(t_{Ps}) + \omega_2 r(t_{PpPs})$ , 其中  $r(t)$  为接收函数,  $r$  值大小对应接收函数的振幅,  $\omega_i$  为权值且  $\sum \omega_i = 1$ . 在给定 P 波平均速度  $V_P$  情况下,只有当获得合适的  $H$  和  $k$  ( $k = V_P/V_S$ ) 时,才能使得  $t_{Ps}$  和  $t_{PpPs}$  能表示各自震相的波峰时刻,  $r(t_i)$  达到极大值,目标函数  $s$  才会达到极大值. 一般情况下,来自莫霍面的 Ps 震相和 PpPs 震相波峰值要比来自其他间断面相应震相的波峰值大. 因此,在给定地壳厚度  $H$  值和合理反映岩石波速比的  $k$  值范围内搜索,使得目标函数  $s$  达到最大值,则对应的  $H$  和  $k$  就是地壳厚度和波速比. 由于波速比  $k$  和泊松比  $\delta$  存在关系  $\delta = (1 - (k^2 - 1)^{-1})/2$ , 还可通过波速比  $k$  计算出泊松比  $\delta$ .

## 3 地震数据及处理结果

本文远震数据选自山西省数字地震台网中心 21 个数字地震台站 2001 年 1 月到 2006 年 10 月间的远震记录,台站分布如图 1 所示. 从中挑选出 5 级以上、震中距在  $30^\circ \sim 90^\circ$ 、初动尖锐、震相清晰、信噪比高的远震事件 850 个,远震震中分布如图 2. 采用吴庆举等<sup>[8]</sup>提出的最大熵谱反褶积方法提取接收函数,高斯系数为 2.5,水准量值取 0.001,进行 0.05~1 Hz 的带通滤波. 剔除受盆地影响<sup>[9]</sup>、P 波初至前有负的边瓣等未能获得高质量接收函数的 3 个台,共获得 18 个台 1009 个接收函数.

通常将某一震中距和反方位角范围内的接收函数进行叠加并取平均,以压制横向结构差异和远震震中分布不均一性的影响. 本文中以每  $5^\circ$  震中距、 $10^\circ$  反方位角为步长,将每  $10^\circ$  震中距,  $20^\circ$  反方位角范围内的接收函数叠加、平均,获得该范围内的平均接收函数. 将这一范围内所有接收函数的水平慢度的平均值作为平均接收函数的水平慢度,获得不同范围内的多个平均接收函数. 对台站不同范围内获得的多道平均接收函数进行  $H-k$  搜索,其中  $H$  值范围取 30~50 km,  $k$  值范围取 1.5~2.2,权值  $\omega_1$  和  $\omega_2$  均取 0.5,参考人工地震勘探成果<sup>[10~12]</sup>取地壳 P

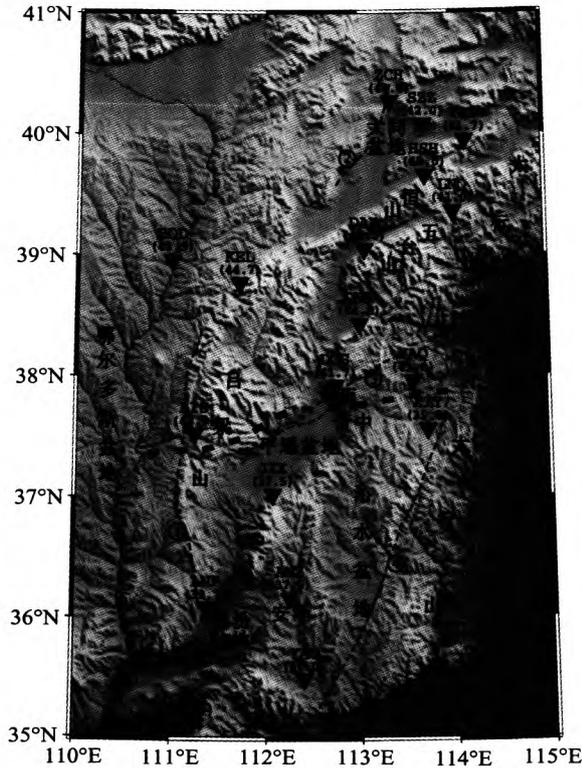


图 1 研究区域及地震台站分布  
倒三角示意地震台站,图中 LNF 和 39.7 等分别表示地震台代码和地壳厚度(km).黑色粗虚线示意地壳厚度南北差异的坡折带位置,黑色细虚线表示断层<sup>[1,2]</sup>:①离石断裂,②口泉断裂,③交城断裂,④晋获断裂,⑤太行山山前断裂带.

Fig. 1 Map illustrating the present study area and the distribution of Shanxi digital seismic stations used in this study

Triangles show the station positions, the LNF is the code of station and 39.7 km is the crustal thickness at the station. The black thick dotted line represents the tectonic belt. The black thin dotted line represents the fault (the position of the fault mainly based on the Refs[1, 2]). ① Lishi fault, ② Kouquan fault, ③ Jiaocheng fault, ④ Jinhua fault, ⑤ the piedmont fault zone of Taihang Mountain.

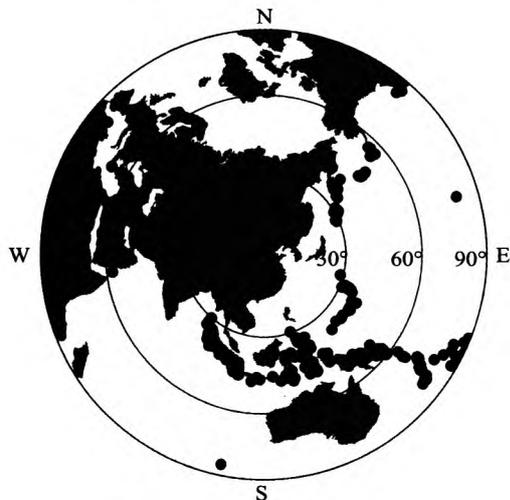


图 2 所选用的远震震中分布  
Fig. 2 Epicentral distribution of teleseismic events (black dots) used in this study

波平均速度  $V_p$  为 6.4 km/s,搜索结果得到 18 个台站下方的地壳厚度、波速比和泊松比(表 1). 图 3 为其中 3 个台站按上述方法叠加后的接收函数和  $H-k$  搜索结果,图中交叉处对应的  $H$  和  $k$  值即是所要求取的各地震台站下方的地壳厚度和波速比.

在  $H-k$  搜索过程中,定襄台(DNX)和岢岚台(KEL)出现多解. 另一个解的地壳厚度和波速比,前者为 30 km,2.185,后者为 31.5 km,2.101,均因地壳厚度太小,波速比太大,不合理而未被采用.

表 1 山西地区台站下方的地壳厚度和泊松比  
Table 1 Crustal thickness and Poisson's ratios under the stations in Shanxi

台站名及代码	地壳厚度 $H$ (km)	波速比 $\kappa$	泊松比 $\delta$	接收函数个数
安泽(ANZ)	37.5±1.4	1.843±0.065	0.291	41
保德(BOD)	43.5±1.4	1.699±0.062	0.235	56
代县(DAX)	44.0±1.5	1.731±0.075	0.250	9
定襄(DNX)	44.8±1.8	1.784±0.085	0.271	62
东山(DOS)	41.7±1.3	1.727±0.054	0.248	40
恒山(HSH)	42.0±1.0	1.851±0.055	0.294	106
介休(JIX)	37.5±2.8	1.780±0.124	0.269	68
岢岚(KEL)	44.9±2.0	1.760±0.063	0.262	27
离石(LIS)	42.9±1.6	1.728±0.059	0.248	70
临汾(LNF)	39.7±2.1	1.791±0.100	0.274	9
灵丘(LNQ)	41.0±1.3	1.783±0.062	0.271	49
山自皂(SZZ)	42.0±1.8	1.720±0.063	0.245	104
夏县(XAX)	36.7±1.8	1.930±0.112	0.317	15
昔阳(XIY)	39.3±1.2	1.751±0.066	0.258	74
阳城(YAC)	40.0±1.8	1.751±0.076	0.258	18
阳泉(YAQ)	41.0±1.7	1.751±0.077	0.258	88
阳原(YAY)	41.7±1.3	1.737±0.059	0.252	118
镇川(ZCH)	43.8±1.1	1.751±0.048	0.258	55

将各台站下方的地壳厚度标注于图 1 中,不难发现,山西地区南北方向地壳厚度变化较大,具体表现为南部安泽及周边地区地壳厚度约 38 km,北部五台山地区及对应同一纬度方向的吕梁山地区地壳厚度接近 45 km,北部大同盆地及周边地区地壳厚度约 42 km. 尽管因现有观测台站数量较少且分布不均,各台站的地壳厚度值也有一定误差,但仍可看出山西地区地壳厚度南薄北厚的总体趋势. 以往地球物理研究结果<sup>[12,13]</sup>显示,山西地区地壳厚度最深处位于五台山地区,其南、北两侧较浅,与本文结果基本一致.

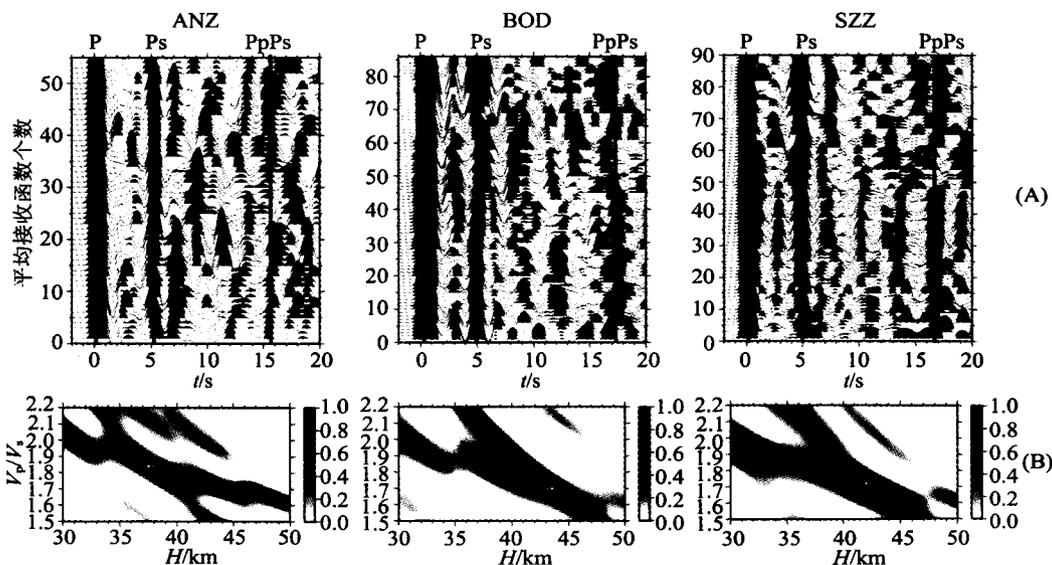


图3 平均接收函数及其  $H-k$  搜索结果

台站位置见图1。(A)为平均接收函数;图(B)背景色深浅对应目标函数  $s$  的大小,十字叉处对应目标函数  $s$  最大值。

Fig. 3 Receiver functions listed after stacking and the result of  $H-k$  search

The station positions are shown in Fig 1. Part(A) shows the mean receiver function. The gray scale in Part(B) reflects the value of target function  $s$ , cross symbol represents the maximum of target function  $s$ .

上述  $H-k$  搜索结果是在各台站的  $V_p$  均取 6.4 km/s 情况下得到的。由于研究区内局部地区存在壳内低速体<sup>[11,12]</sup>,故各台站下方的  $V_p$  实际上可能并不相同,由此产生的地壳厚度的估算误差是否会影响上述结果的可靠性? 对此我们进行了估算。根据宽角反射/折射剖面资料<sup>[11,12]</sup>,山西地区壳内低速体的厚度一般在 5 km 左右,与围岩的 P 波速度差约 0.2 km/s。在这种情况下,壳内低速体引起  $V_p$  的降幅小于 0.1 km/s。 $H-k$  搜索结果表明,由此引起地壳厚度  $H$  的增加值仅约 0.7 km 左右。可见,山西地区地壳厚度的南北差异与壳内有无低速体无关。另外,我们用不同  $V_p$  (取值在 6.35~6.70 km/s 之间)进行  $H-k$  搜索,尽管获得的地壳厚度值有所不同,但仍可以得出地壳厚度南薄北厚的总体趋势。

这一地区的泊松比基本在  $0.26 \pm 0.1$  范围。但最南边位于中条山北麓的夏县台(XAX)泊松比高达 0.317,位于鄂尔多斯盆地的保德台(BOD)泊松比仅 0.235,恒山台(HSH)泊松比为 0.294,安泽台(ANZ)泊松比为 0.291,反映了这一地区地壳物质组成的复杂性。

#### 4 讨论

山西地区地壳厚度表现出南北方向的差异性,南部地壳厚度 37~40 km,北部 41~45 km。因台站

少,单个台站的地壳厚度尚有一定误差,所以,要确定地壳厚度南北差异转变带的确切位置是困难的。但通过数值测试发现,当  $V_p$  在 6.35~6.70 km/s 之间变化时,离石台(LIS)和介休台(JIX)、昔阳台(XIY)和定襄台(DNX)的地壳厚度差值均达 5~6 km,这两个台之间的区域地壳厚度渐变, Moho 面由浅变深形成坡折带。所以,把坡折带的西段定在离石台和介休台之间,东段定在昔阳台和定襄台之间是合理的。综合考虑其他因素(如地质界线等),地壳厚度坡折部位大致定在太原南部、沿平遥盆地北缘的文水—晋中沿线一带,基本呈 NEE 向延伸,本文称之为“晋中坡折带”(Jinzhong transition belt,简称 JZTB)。基于下面几点原因,我们认为该带为保存至今的早前寒武纪基底构造,大致代表晋北地区总体呈 NE 向延伸的活动带的南缘,并继承性地叠加了新生代时期发育的汾渭地堑系的张扭性断裂,平遥盆地也叠置其上。

(1)太行山以东的华北克拉通东部地区地壳厚度仅 28~36 km<sup>[14,15]</sup>,以西的山西地区明显薄,表明中、新生代以来东部地区的地壳减薄并未越过南北重力梯度带。换言之,山西中部的 JZTB 与华北克拉通东部中、新生代岩石圈、地壳减薄事件无关。

(2)沁水盆地显生宙盖层保存相对完整,而山西北部为基底普遍出露的地盾区,应该遭受更多剥蚀。然而,JZTB 以北地区地壳厚度比以南地区厚,这只

能说明 NNE 向延伸的汾渭地堑并没有明显改变晋北地区的地壳厚度,即 JZTB 与新生代汾渭地堑的形成无关,与平遥盆地的发育也无关系。相反,平遥盆地南北边界的发育很可能在张扭过程中继承了早期的古老边界,这可能正是平遥盆地的部分边界与古老的地壳厚度坡折带在空间上重叠的重要原因。

(3)JZTB 北侧是吕梁山—阜平地块,具有新太古代高角闪岩相片麻岩地体特征,其北为总体呈 NE 向延伸的绿片岩相-角闪岩相的五台山绿岩带和恒山片麻岩地体,再向北为古元古代麻粒岩相的桑干片麻岩/孔兹岩系地体,区域性片理、片麻理所限定的基底构造线走向均为 NE 向。因此,JZTB 大致与晋北早前寒武纪活动带平行,是晋北地区总体呈 NE 向延伸的活动带的南缘,这也暗示其成因与基底构造有关。

(4)从华北区域航磁特征<sup>[3]</sup>来看,JZTB 对应着一条磁异常带,并且这一异常带向西南延伸到鄂尔多斯地块(盆地)的南部,向东未越过太行山重力梯度带。

在 JZTB 以北的晋北—冀西北地区,从大同向太行山,地壳厚度逐渐从镇川的 43.8 km 到灵丘的 41 km,以及沿 JZTB 北侧从吕梁山向太行山,地壳厚度从离石的 42.9 km 到阳泉的 41 km,都清晰显示出地壳厚度从西向东有较弱的变薄趋势,这种变化可能与中、新生代以来地壳由西向东的减薄有关。而 JZTB 以南地区,地壳厚度东西向变化并不明显,对此,我们并不能排除局部因素造成的地壳厚度改变。汾渭地堑的形成可能使地壳发生一定程度的掀斜,并可能局部改变地壳的厚度。即便如此,也没有“抹平”JZTB 南北两侧地壳厚度的差异,从而可排除 JZTB 与地壳掀斜等地壳厚度局部变化的成因联系。

早前寒武纪基底构造仍保存至今并以地壳厚度坡折带得以体现,理论意义无疑是重大的。最近 Zheng 等<sup>[16]</sup>报道了在华北中北部地盾区和冀西北部地壳中存在两条早前寒武纪古俯冲带。我们推测,JZTB 很可能与这二条古俯冲带中的东带相对应。倘若如此,本文作者认为,Zhao 等<sup>[17]</sup>提出的关于华北中央造山带在山西地区近南北向的延伸趋势可能要做出重大修正,中、新生代形成的近南北向的山西地块,并不能代表 NEE 向基底构造带的延伸趋势。

以上讨论使我们得出两个相关的重要认识:

(1)NEE 向延伸的 JZTB 是早前寒武纪基底构造带的显示,应是华北克拉通内部的重要构造边界。

(2)太行山以西的山西地区,地壳未明显减薄,其基底构造未遭到明显改造。

**致谢** 山西省地震局数字地震台网中心提供远震数据,并在数据处理方面给予大力支持与帮助。许卫卫博士提供了接收函数源程序并就有关技术问题给予帮助指导。徐强博士给了作者很多建议。二位匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见及建议,在此一并致谢!

#### 参考文献 (References)

- [1] 山西省地质矿产局. 山西省区域地质志. 北京:地质出版社, 1989. 605~612  
Shanxi Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Shanxi Province(in Chinese). Beijing: Geological Publishing House,1989. 605~612
- [2] 徐杰,高战武,宋长青等. 太行山山前断裂带的构造特征. 地震地质,2000,22(2):111~122  
Xu J, Gao Z W, Song C Q, et al. The structural characters of the piedmont fault zone of the Taihang mountain. *Seismology and Geology*(in Chinese), 2000,22(2):111~122
- [3] 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学地图集. 北京:中国地图出版社,1989  
Ma X Y. Lithospheric Dynamics Atlas of China (in Chinese). Beijing: China Cartographic Publishing House,1989
- [4] 杨巍然,孙继源,纪克诚等. 大陆裂谷对比:汾渭裂谷系与贝加尔裂谷系例析. 武汉:中国地质大学出版社,1995  
Yang W R, Sun J Y, Ji K C, et al. Comparison for Contiental Rifts; Analysis of the Fenwei and Baikal Rift Systems (in Chinese). Wuhan: China University of Geoscience Press, 1995
- [5] Zhu L P, Kanamori H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2000, 105(B2): 2969~2980
- [6] 许卫卫,郑天愉. 渤海湾盆地北西盆地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
- [7] Kumar M R, Raju P S, Devi E U, et al. Crustal structure variations in northeast India from converted phases. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31, L17605, doi:10.1029/2004GL020576
- [8] 吴庆举,田小波,张乃铃等. 计算台站接收函数的最大熵谱反褶积方法. 地震学报, 2003, 25(4): 382~389  
Wu Q J, Tian X B, Zhang N L, et al. Receiver function estimated by maximum entropy deconvolution. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, 25(4): 382~389
- [9] Owens T J, Crosson R S. Shallow structure effects on broadband teleseismic P-waveforms. *Bulletin of the Seismological*

- Society of American*, 1988, **78**(1): 96~108
- [10] 祝治平, 张建狮, 张成科等. 山西中南部壳幔结构的研究. 地震学报, 1999, **21**(1): 42~49  
Zhu Z P, Zhang J S, Zhang C K, et al. Study on the crust and mantle structure in the central and southern parts of Shanxi. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1999, **21**(1): 42~49
- [11] 张建狮, 祝治平, 张先康等. 山西高原北部地壳上地幔地震波速结构与深部构造. 地震地质, 1997, **19**(3): 220~226  
Zhang J S, Zhu Z P, Zhang X K, et al. The seismic velocity structure of crust and upper mantle and deep structure feature in North Shanxi plateau. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1997, **19**(3): 220~226
- [12] 赵金仁, 张先康, 张成科等. 山西五台山地区地壳深部结构特征研究. 地球物理学报, 2006, **49**(1): 123~129  
Zhao J R, Zhang X K, Zhang C K, et al. Features of deep crustal structure beneath the Wutai mountain area of Shanxi province. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(1): 123~129
- [13] 魏文博, 叶高峰, 金 胜等. 华北地区地壳 P 波三维速度结构. 地球科学—中国地质大学学报, 2007, **32**(4): 441~452  
Wei W B, Ye G F, Jin S, et al. Three dimensional P-wave velocity structure of the crust of North China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2007, **32**(4): 441~452
- [14] 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. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(3): 611~620
- [15] Xu P F, Zhao D P. Upper-mantle velocity structure beneath the North China Craton: Implications for lithospheric thinning. *Geophys. J. Int.*, 2009, **177**(3): 1279~1283
- [16] Zheng T Y, Zhao L, Zhu R X. New evidence from seismic imaging for subduction during assembly of the North China craton. *Geology*, 2009, **37**(5): 395~398
- [17] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res.*, 2001, **107**(1-2): 45~73

(本文编辑 汪海英)