

利用 H-Kappa 方法反演宁夏地区的地壳厚度^{*}

谢晓峰¹, 崇加军², 刘渊源², 姚琳¹

(1. 宁夏回族自治区地震局, 银川 750001; 2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026)

摘要: 利用宁夏区域数字地震台网记录到的远震提取接收函数, 用 H-Kappa 叠加方法反演得到宁夏区域数字地震台网子台下方的地壳厚度和波速比。结果显示, 宁夏地区地壳平均厚度约为 46 km, 并且由西南向东北逐渐减薄, 南北两端地壳厚度差异达 15 km, 东西两端地壳厚度差异达 8 km。泊松比计算结果显示, 宁夏北部和中南部的泊松比值较高, 中北部泊松比值较低。

关键词: 接收函数; 地壳厚度; 泊松比; 宁夏地区

中图分类号: P315.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2010)03-0308-06

0 引言

宁夏处于华北和青藏两大块体的交汇地区, 强震密集的南北地震带北段从该区通过, 并发育有一系列规模较大的活动断裂, 区域地质构造复杂, 地震活动频繁。前人用不同的方法对这一区域进行了研究和探索。上世纪 80 年代出版的《中国地壳上地幔地球物理勘探成果》一书(中国地震局, 1986), 总结了用人工源地震测深、大地电磁测深方法和重力资料反演解释等方法获得宁夏地区的地壳厚度的工作, 认为银川往北至平罗一带地壳变薄, 西海固地区地壳为西南厚东北薄(杨明芝等, 2007; 中国地震局, 1986)。李清河等(1999)利用人工地震和天然地震联合反演获得了鄂尔多斯西缘和西南缘地壳厚度图, 认为宁夏地区的地壳厚度变化是西厚东薄, 南厚北薄, 中间局部起伏较大。吴立辛(2005)用小波方法反演重力资料得到了宁夏及邻区地壳莫霍面深度分布情况, 认为该地区总体上莫霍面埋深呈东浅西深、北浅南深的趋势。虽然已经有多位学者给出了宁夏地区地壳厚度的变化, 但这些结果都只给出一个较大区域的地壳厚度平均值, 没有具体某一点的地壳厚度值。

鉴于宁夏地区地质构造和地下结构的复杂性, 笔者用接收函数方法计算宁夏地区各地震台站下

方的地壳厚度和泊松比, 对其变化规律进行初步分析和研究, 以期对详细了解宁夏地区地下构造有所裨益。

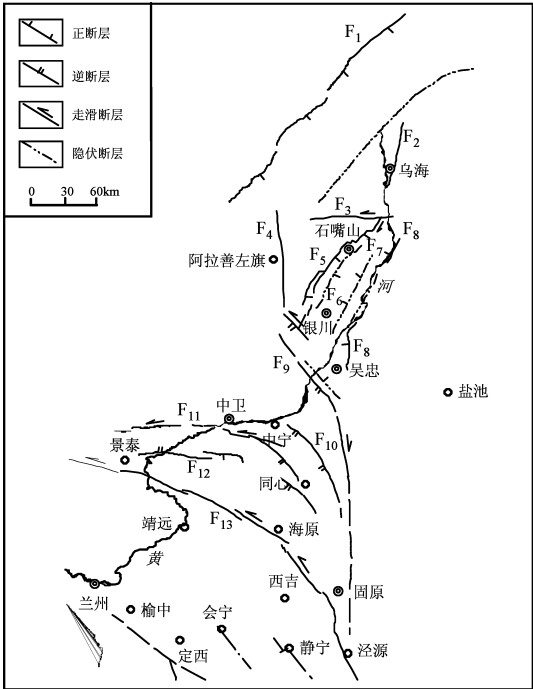
接收函数最早由 Phinney(1964)提出, 目的是用远震体波来研究台站下方的地壳及上地幔的结构。Langston(1977, 1979)给出了源等效假定, 从长周期远震体波中分离出接收函数。Owens等(1984)将此方法扩展到宽频带地震数据的处理, 并发展了接收函数的线性反演方法。近年来, 随着数字化观测台站和流动观测台站的出现和增多, 用接收函数计算地壳厚度的方法日趋成熟和完善。Zhu等(1995, 2000)提出在 H-Kappa 域内对多个接收函数进行叠加的方法, 并计算得到了中国青藏高原地区及美国洛杉矶盆地的地壳厚度和泊松比。高星等(2005)利用转换函数及快速模拟退火方法计算得到了中国及邻区的地壳结构; 许卫卫和郑天愉(2005)利用 H-Kappa 叠加搜索方法得到了渤海湾盆地的地壳厚度和泊松比分布; 罗艳等(2008)用 H-Kappa 叠加方法得到了首都圈台站下方的地壳厚度和泊松比。

本文的研究思路是: 对宁夏区域台网记录到的远震 P 波信号, 用频率域反卷积计算得到相应的接收函数值, 再用波形叠加的方法(H-Kappa)反演得到各台站下方的地壳厚度值 H 纵横波速比 Kappa 值和台站下方的地壳平均泊松比。这对研究该区域地壳结构、岩石性质及大陆构造变动都具有十分重要的意义。

* 收稿日期: 2009-07-22

1 区域构造

宁夏及邻区地处鄂尔多斯台地的西缘，在经历了多期构造运动之后，这一区域的活动构造呈现多样化。现今的活动断裂存在明显的分区性，以三关口—牛首山—固原深大断裂为界，宁夏北部和东部属于华北断块区，该区域内的活动构造呈 NNE 走向；西南部属于青藏断块区，该区域的活动构造呈弧形，是青藏块体东北缘的重要组形成部分（鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组，1988；李清河等，1999；杨明芝等，2007）。宁夏地区历史和现今地震活动都非常活跃，图 1 给出了该地区的主要活动断裂分布状况。



F₁: 狼山、巴音乌拉山东麓断裂; F₂: 桌子山断裂; F₃: 正谊关断裂;
F₄: 阿拉善左旗断裂; F₅: 贺兰山东麓断裂; F₆: 芦花台隐伏断裂;
F₇: 银川平原隐伏断裂; F₈: 黄河断裂带; F₉: 三关口—牛首山—固原断裂; F₁₀: 烟洞山断裂; F₁₁: 中卫—同心断裂;
F₁₂: 五佛寺—窑洞水断裂; F₁₃: 海原断裂;

图 1 宁夏及邻区活动构造分布图 (杨明芝等, 2007)
Fig 1 Active structure of Ningxia and its neighboring region (Yang et al 2007)

2 接收函数和 H-Kappa 叠加方法

远震 P 波从一系列水平分层或倾斜分层的底部入射，到达地表产生的位移响应在时间域内可

表示为仪器响应、有效震源时间函数和介质结构脉冲响应的褶积形式 (Lanston, 1979):

$$\begin{cases} D_V(t) = I(t) * S(t) * E_V(t) \\ D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t) \\ D_T(t) = I(t) * S(t) * E_T(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $D_V(t)$, $D_R(t)$, $D_T(t)$ 分别是远震 P 波波形记录的垂直向、径向和切向分量， t 是时间， $I(t)$ 是仪器的脉冲响应， $S(t)$ 是入射平面波的有效震源时间函数， $E_V(t)$, $E_R(t)$ 和 $E_T(t)$ 分别表示介质结构脉冲响应的垂向、径向和切向分量， $*$ 表示褶积。理论计算和实际观测结果均表明， $E_V(t)$ 可近似为 Dirac 函数或单位脉冲，可令

$$E_V(t) = \delta(t) \quad (2)$$

因此，垂向分量可近似表示为

$$D_V(t) \approx I(t) * S(t) \quad (3)$$

如果三分量仪器的脉冲响应都一致，将 (3) 式代入 (1) 式得

$$\begin{cases} D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t) \\ \approx D_V(t) * E_R(t) \\ D_T(t) = I(t) * S(t) * E_T(t) \\ \approx D_V(t) * E_T(t) \end{cases}$$

经反褶积在频率域可表示为

$$\begin{cases} E_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)}{I(\omega) * S(\omega)} \approx \frac{D_R(\omega)}{D_V(\omega)} \\ E_T(\omega) = \frac{D_T(\omega)}{I(\omega) * S(\omega)} \approx \frac{D_T(\omega)}{D_V(\omega)} \end{cases} \quad (4)$$

计算过程中引入“水准量”对近零值频谱进行压制，以确保频率域除法运算的稳定。

在实际反演中，采用频率域相除的方法计算接收函数：

$$R(t) = (1 + \gamma) \int \frac{R(\omega) Z(\omega)}{|Z(\omega)|^2 + \epsilon_0^2} e^{i\omega t} d\omega \quad (5)$$

其中 $\frac{\omega_0^2}{\epsilon_0^2}$ 是高斯低通滤波器去除高频噪音， ϵ_0^2 是水准量，使反褶积更稳定， $(1 + \gamma)$ 项恢复引入水准量带来的振幅减弱 (Zhu et al 1995)。

当给定地壳平均速度，由 P_s 相对 P 波的到时差就可以求得地壳厚度 H 。然而，地壳平均速度和地壳厚度之间有个折衷关系。Zhu等（1995）提出在 H - K 域内对多个接收函数叠加的方法，同时使用转换震相 P_s 和地壳内多次反射震相 PPP_s 、 PP_s 和 PPS 对地壳厚度 H 和波速比 K 进行约束，解决了单独使用 P_s 震相对 H - K 存在折中的问题：

$$S(H,K)=\omega_1R(t_{ps})+\omega_2R(t_{ppps})+\omega_3R(t_{pps+pps}).$$

(6)

其中， $R(t)$ 是径向接收函数， t_{ps} 、 t_{ppps} 、 $t_{pps+pps}$ 分别是预测得到的 P_s 、 PPP_s 、 PP_s 、 PPS 震相到时， ω_i 是权重， $\sum \omega_i=1$ ， ω_i 依次分别取 0.7、0.2 和 0.1。当 H - K 对应真实地壳厚度和泊松比时， $S(H,K)$ 达到极大值，即得到该台站下方地壳厚度和 V_p/V_s 值。该方法无需识别震相，可以大批量处理地震数据。由于是对不同震中距和方位角的接收函数进行叠加，因此抑制了横向不均匀性的影响，可以很好地获得间断面深度等信息。

3 数据选取和计算

选取 2003~2006 年宁夏区域数字地震台网记录到的远震事件，共计 117 个地震，震中距在 30°

$\sim 90^\circ$ 之间，震级大于 6.0 级，这样选取地震是为了保证有不同方位角和不同震中距分布。图 2 为宁夏区域数字台网子台分布图，图 3 为所选地震的震中分布图。

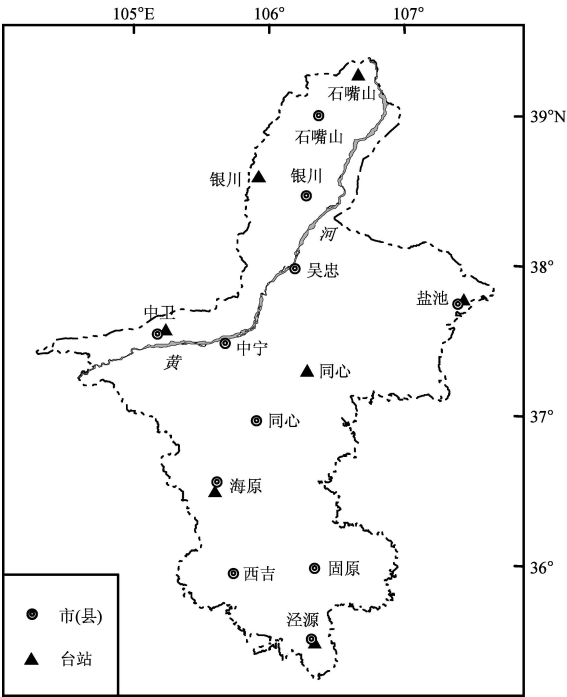


图 2 宁夏区域数字地震台网正台分布
Fig.2 Distribution of the digital stations in Ningxia

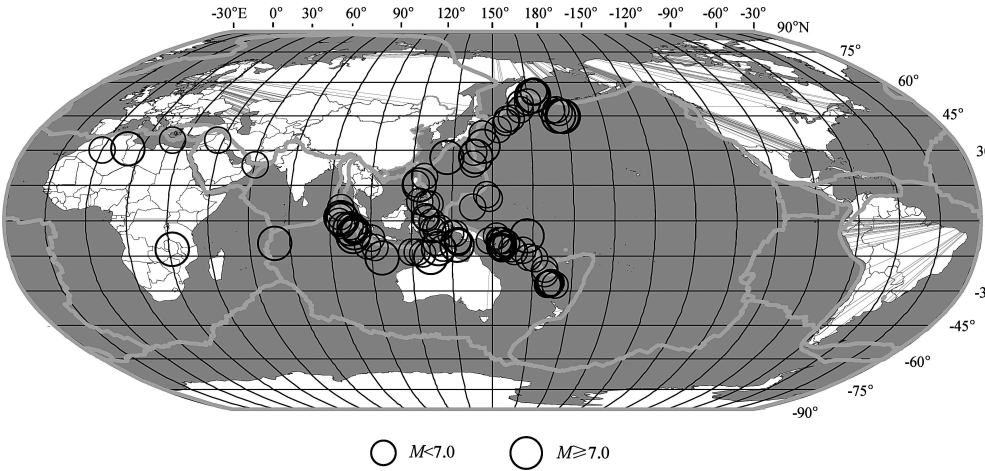


图 3 所选地震的震中分布
Fig.3 Epicentral distribution of the selected earthquakes

挑选信噪比高的地震事件，截取 P 波前 30 s 至 P 波后 90 s 的波形，做去均值、去倾斜和坐标旋转等基本处理，然后在时间域将东西和南北水平分量旋转到径向和切向，根据（5）式用垂向分

量分别对径向和切向分量反褶积得到径向和切向方向的接收函数。通过对远震 P 波记录做大批量的解析，提取各台站下方接收函数，然后挑选接收函数波形较好的记录做 H - K 叠加。 P 波平均

速度参照该区域人工地震测深结果给定（表 1）。取地壳厚度变化范围为 30~60 km，纵横波波速比变化范围为 1.5~2.0，扫描 H-K 域，由公式（6）计算每一对 H-K 对应的 $S(H,K)$ 值，读到的最大值即为所求地壳厚度 H 和纵横波波速比 K 。为保证计算结果，每个台站都至少有 30 多个地震事件数据（表 2）。P 波接收函数叠加结果见图 4，H-K 叠加结果见图 5。表 1 给出各台站地壳厚度、纵横波波速比和泊松比值。

4 结果和讨论

经过计算得到宁夏区域数字地震台网 7 个子台下方的地壳厚度和泊松比。结果显示，宁夏区域地壳结构的形态是西南高，东北低，地壳厚度变

表 1 各正台下方地壳厚度和泊松比
Tab 1 Results of crustal thickness Poisson ratio under each sub-station

台站名	H/km	V_p/V_s	σ
石嘴山	38.6	1.9	0.31
银川	45.9	1.73	0.25
中卫	48.0	1.71	0.24
盐池	40.2	1.74	0.25
同心	45.8	1.85	0.29
海原	48.6	1.9	0.31
泾源	53.1	1.78	0.27

化剧烈，从西南部的 53 km 逐渐向东北减至 39 km，南北两端台站下方地壳厚度差异达 15 km，东西两端台站下方地壳厚度差异达 8 km。这主要是由于宁夏南部处于青藏高原东北缘向地台区过渡的地

表 2 各子台给定 P 波平均速度和地震事件个数
Tab 2 Average velocity and number of earthquakes

台站名	石嘴山	银川	中卫	盐池	同心	海原	泾源
P 波速度平均值 ($km \cdot s^{-1}$)	6.1	6.04	6.19	6.1	6.22	6.25	6.25
地震事件个数	39	38	44	33	36	36	38

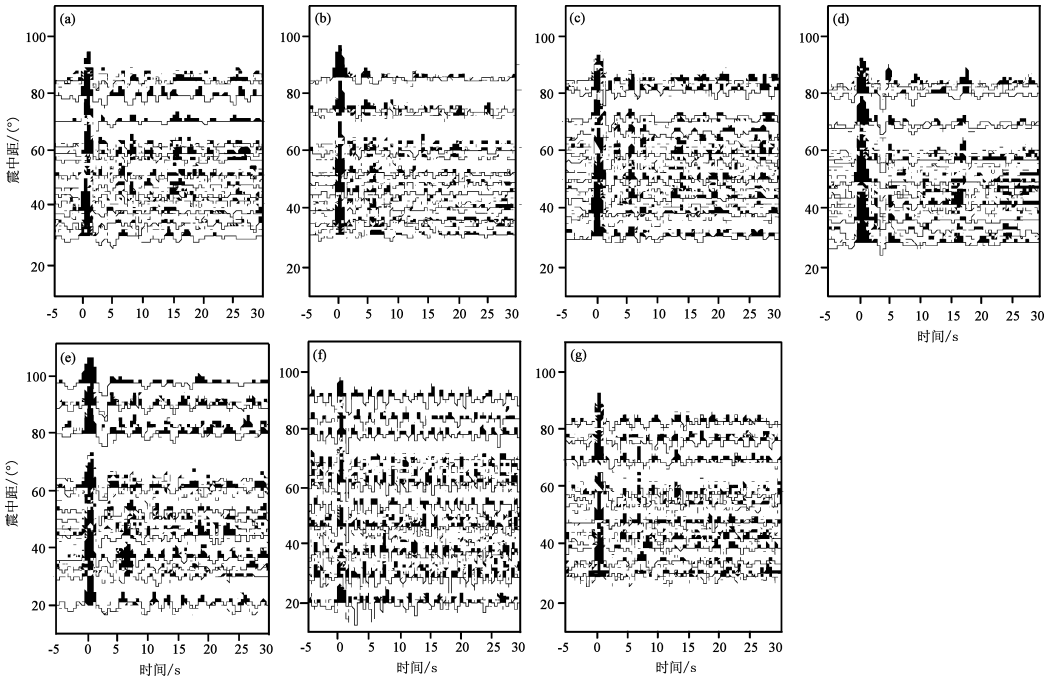


图 4 各子台径向接收函数波形图
(a) 石嘴山台；(b) 银川台；(c) 中卫台；(d) 盐池台；(e) 同心台；(f) 海原台；(g) 泾源台

Fig 4 Radial waves of Receive Function of each sub-station
(a) Shizuishan station (b) Yinchuan station (c) Zhongwei station (d) Yanchi station
(e) Tongxin station (f) Haiyuan station (g) Jingyuan station

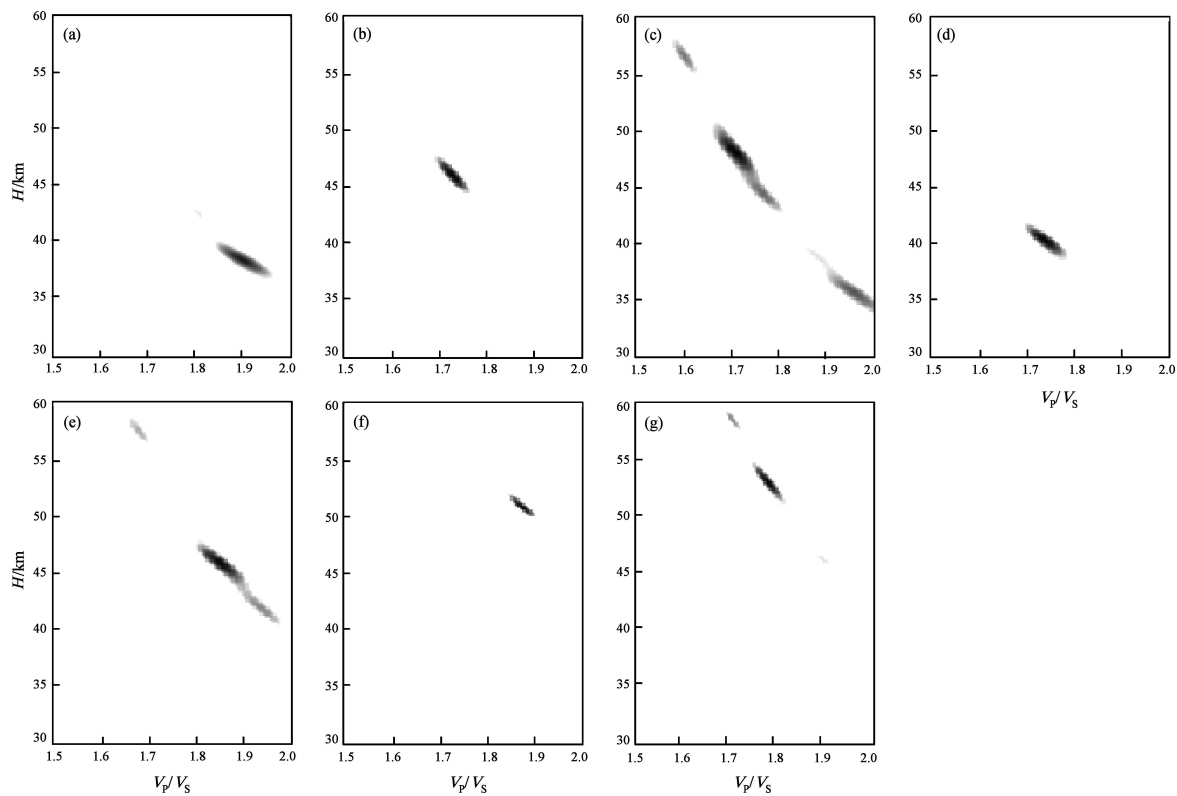


图 5 各子台接收函数 H-Kappa 叠加结果

(a) 石嘴山台; (b) 银川台; (c) 中卫台; (d) 盐池台; (e) 同心台; (f) 海原台; (g) 泾源台

Fig 5 Results of H-Kappa at each sub station

(a) Shizuishan station; (b) Yinchuan station; (c) Zhongwei station; (d) Yanchi station;

(e) Tongxin station; (f) Haiyuan station; (g) Jinyuan station

带造成地壳厚度较大差异。这一结果与人工测深探测结果基本一致。高星等 (2005) 用转换函数和快速模拟退火算法得到中国及邻区 61 个地震台站下方的地壳厚度分布, 其中银川台下方的地壳厚度为 46 km, 这一结果与本文计算结果基本一致。

泊松比与岩石的组分之间有着密切的关系, 泊松比低可能表明地下介质以长英质成分为主, 泊松比高则与岩石较丰富的铁镁质成分及活动构造有关。研究表明, 泊松比值对地壳岩石成分变化的影响明显。二氧化硅含量高则泊松比值偏低, 铁镁质含量高则泊松比值增高。泊松比在 0.26~0.28 之间时岩石为中性岩, 小于 0.26 为酸性岩, 大于 0.28 则为富含铁镁质的基性或超基性岩 (Zandt & Ammon, 1995)。地幔中富含铁镁质, 地幔物质的入侵导致地壳增厚, 这个过程常伴随着泊松比的增大, 较小的泊松比则和后期地壳运动改造有关。本次计算结果显示, 银川台、中卫

台和盐池台下方的泊松比值小于 0.26, 石嘴山台、同心台和海原台下方的泊松比值大于 0.28, 泾源台下方的泊松比值介于 0.26~0.28 之间 (表 1)。泊松比值低的区域地表出露有大面积的花岗岩或花岗闪长岩, 泊松比值大于 0.28 的区域地表分布有基性火山岩。本次高泊松比值所在区域均分布有活动构造带。泾源台所在区域有砂岩出露, 属长英质岩。

本文用 H-Kappa 方法计算得到宁夏区域数字地震台网 7 个子台下方一定范围内不同方位角上的平均地壳厚度、波速比和泊松比。但是由于所采用的方法只能得到较好的波速比值 (Kappa), 对于绝对速度、更为精细的宁夏地区地壳速度结构以及地壳各向异性等方面的研究还需要其他方法提供必要约束。例如, 将接收函数与面波或重力数据进行联合反演, 可以得到更为可靠、准确的地壳厚度。我们以后将反演接收函数波形或结合面波反演获得台站下详细的速度结构。

中国科学技术大学地球和空间科学学院的倪四道教授为本研究提供了帮助和指导, 史进良先生和李时灿先生在本研究中提供了许多方便和帮助, 在此深表谢意。

参考文献:

- 鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组. 1988. 鄂尔多斯活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社.
- 高星, 王卫民, 姚振兴. 2005. 中国及邻近地区地壳结构 [J]. 地球物理学报, 48(3): 591—610.
- 李清河, 郭守年, 吕德徽. 1999. 鄂尔多斯西缘与西南缘深部结构与构造 [M]. 北京: 地震出版社.
- 罗艳, 崇加军, 倪四道, 等. 2008. 首都圈地区莫霍面起伏及沉积层厚度 [J]. 地球物理学报, 51(4): 1135—1145.
- 王小平, 朱元清, 于海英. 2006. 用远震接收函数反演上海及其邻区地壳速度结构 [J]. 地震研究, 29(3): 239—244.
- 吴立辛. 2005. 利用重力资料探讨青藏块体东北缘地壳结构特征 [D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 夏静瑜, 杨海燕, 胡家富. 2008. 用接收函数叠加技术研究滇西上地幔间断面埋深 [J]. 地震研究, 31(3): 244—249.
- 许卫卫, 郑天愉. 2005. 渤海湾盆地北西盆山边界地区泊松比分布 [J]. 地球物理学报, 48(5): 1077—1084.

- 杨明芝, 马禾青, 廖玉华. 2007. 宁夏地震活动与研究 [M]. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局. 1986. 中国地壳上地幔地球物理勘探成果 [M]. 北京: 地震出版社.
- Langston C A. 1977. The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter [J]. BSSA 67: 1029—1050.
- Langston C A. 1979. Structure under mountain in Washington inferred from teleseismic body waves [J]. JGR 84: 4749—4762.
- Owens T J Zandt G Taylor S R. 1984. Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P wave forms [J]. JGR 89: 7783—7795.
- Phinney 1964. Structure of the Earth's crust from spectral behavior of long period body waves [J]. JGR 69: 2997—3017.
- Wiggins R A Helmberger D V. 1973. Upper mantle structure of the western United States [J]. JGR 78(11): 1870—1880.
- Zandt G Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio [J]. Nature 374: 152—154.
- Zhu L P. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions [J]. JGR 105(B2): 2969—2980.
- Zhu L P Owens T J Randall G E. 1995. Lateral variation in crustal structure of the northern Tibetan Plateau inferred from teleseismic receiver function [J]. BSSA 85: 1531—1540.

Inversing the Crustal Thickness in Ningxia Area by H-Kappa Method

XIE Xiao-feng, CHONG Jia-jun, LU Yuan-yuan, YAO Li-d

(1. Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

(2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract

Receiver functions were calculated by using teleseismic records of Ningxia Digital Seismic Network and crustal thickness in Ningxia area is obtained by stacking receiver functions with H-Kappa technique. The results reveal that the average crustal thickness in Ningxia is about 46 km and the crust becomes thinner from Southwest to Northeast. The crust in the South is 15 km thicker than that in the North while the one in the West is 8 km thicker than that in the East. The Poisson ratio in the North and the middle South has a higher value while in the middle North it is relatively low. These results will be valuable for understanding the velocity structure and the contents of the crust in the Ningxia area.

Key words: receiver function; crustal thickness; Poisson ratio; Ningxia area