

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2009.02.012

利用远震接收函数反演陕西 地震台站下方的地壳厚度

刘 春^{1,2)} 崇加军¹⁾ 倪四道¹⁾ 李少睿²⁾

1) 中国科学技术大学, 合肥 230026

2) 陕西省地震局, 西安 710068

摘 要 文中利用陕西数字地震遥测台网 14 个遥测子台记录的远震波形资料, 用频率域反褶积方法提取接收函数, 由 H-Kappa 叠加方法反演得到各台站下方的地壳厚度和泊松比。在此基础上结合相关地震构造文献, 对陕西地区的地壳特征进行了分析, 并讨论了陕西地震活动与地壳结构、地质构造之间的关系。研究表明: 1) 陕西地区的地壳总体趋势是东薄西厚, 陕西南部 and 北部地区地壳较厚 ($\geq 40\text{km}$), 位于陕西中部的渭河盆地地壳较薄 ($34 \sim 40\text{km}$); 14 个台站中, 渭河盆地东部与山西交界的华阴台下方地壳厚度最薄 (34km), 而盆地西北端的陇县台位于六盘山余脉上, 地壳厚度最厚 (48km)。2) 陕西地区泊松比值总体变化不大 ($0.24 \sim 0.29$), 可能表明这一地区的岩石组成以中度组分为主; 以渭河盆地界, 向北靠近地台一侧泊松比值相对较高, 向南靠近秦岭山脉一侧则比值相对较低。3) 地震活动与地质构造之间存在内在的联系。渭河盆地处于几个构造体系的复合部位, 属于强地震的多发区; 陕西南部地区的地震活动相对较弱, 主要发生在汉中盆地和安康盆地, 受陕南几条主要断裂控制; 陕西北部地区地质构造相对稳定, 地震活动最弱。泊松比反映了地球内部的物质构成, 分析认为其与地震活动存在一定的关系, 即泊松比较高区域的地震活动性要高于较低的区域。

关键词 接收函数 地壳结构 地震活动 陕西

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2009)02-0313-08

0 引言

远震 P 波波形数据中包含了大量地震台站下方地壳和上地幔速度间断面所产生的 PS 转换波及其多次反射波的信息, 接收函数方法是反演台站下方地壳结构的有效手段。近年来, 随着数字化观测技术及流动台站观测的迅速发展, 接收函数及其反演方法迅速获得广泛的应用与不断的改进 (许卫卫等, 2002; 贺传松等, 2003; 安张辉等, 2004; 王小平等, 2005; 李华等, 2008; 田宝峰等, 2008; 王椿镛等, 2008; 楼海等, 2008; 李永华等, 2009)。

陕西省是中国历史地震活跃地区之一, 自有史记载以来, 全省境内发生了数百次有感地震, 其中 4 $\frac{3}{4}$ 级以上的破坏性地震 60 余次, 6 级以上强震有 9 次。破坏最严重的地震为 1556 年发生在陕西关中地区的华县 8 级大地震。1704 年陇县地震以来, 陕西境内没有 6 级以上地震发生,

〔收稿日期〕 2008-05-12 收稿, 2009-04-05 改回。

〔基金项目〕 西安市政府十一五项目“西安地区地震活动特征研究”、陕西省地震局青年科研基金 (200701) 和中国地震局地震预测研究所项目 (0908600703) 共同资助。

最近的一次 5 级以上地震是 1959 年的旬阳 5 级地震。近 50 年来地震活动虽然较弱,但平均每 4 年仍有一次 4~5 级地震发生。地震是地壳运动的产物,地震活动与地质构造有着内在的联系,尤其是在活动断裂带区域。1998 年 1 月 5 日泾阳 $M_L5.2$ 地震的震中位于渭河断裂和泾河-灞河断裂的交会部位(王卫东,2002),2004 年 4 月 26 日石泉 $M_L4.9$ 地震的宏观震中位于栗子坝-迎丰-铁佛寺断裂之上(冯希杰等,2004)。通过远震接收函数获得陕西地区的地壳厚度分布及泊松比,是进一步研究该地区地震活动性及发震构造的基础环节,这将为深入研究陕西及周边地区岩石圈物质流动提供重要的地球物理学证据。

1 资料与方法

陕西数字地震遥测台网(以下简称陕西台网)从 20 世纪 90 年代开始建设,经过国家“八五”、“九五”和“十五”建设后,目前由 1 个台网中心和 31 个遥测子台组成,子台东起商南县,西至略阳县;北起榆林市,南至安康市,横跨陕西北部、中部、南部 3 个区域。鉴于“十五”新建子台运行时间较短,本文选取的资料来自“九五”建成的 14 个遥测子台(台站分布见图 1)。这 14 个遥测子台是从 2001 年开始投入观测的,使用 FBS-3(A)宽频带地震仪(频带宽度 0.05~20Hz,采样率 50 次/s)、EDAS-24 IP 型地震数据采集器,采用 SDH 光纤、DDN 和无线方式实时将观测数据传回台网中心(陕西省地震局,2005)。本文所用的数字地震波形资料全部来自陕西台网,选取的远震事件时间为 2002 年 2 月至 2006 年 12 月,震中距 $30^{\circ}\sim95^{\circ}$,震级 ≥ 6.0

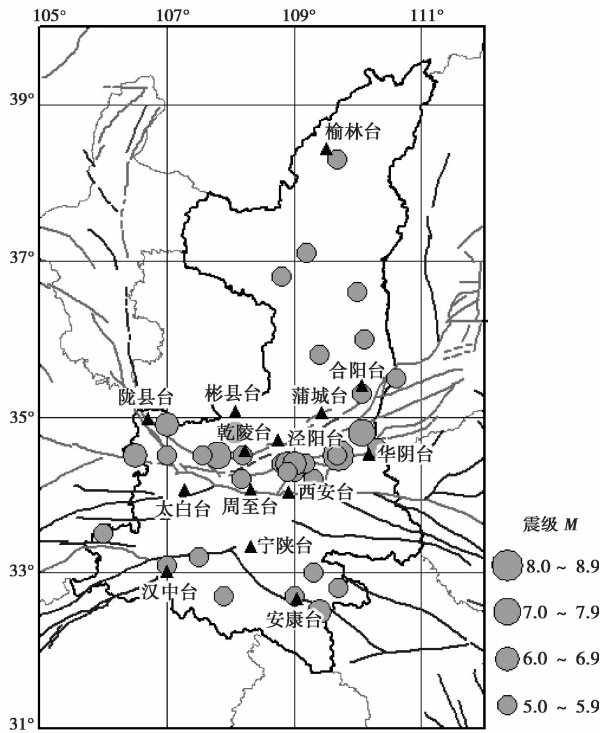


图 1 陕西数字地震遥测台网与陕西历史中强地震分布图(图中各线条表示断裂带)
Fig. 1 Stations distribution of Seismic Network in Shaanxi Province and epicenter distribution of strong shocks in Shaanxi Province(solid lines indicate active tectonic faults).

(图 2)。

本文采用频率域反褶积方法获得各台站的接收函数 (Langston, 1979; Zhu *et al.*, 2000), 并用 H - Kappa 叠加方法 (Zhu *et al.*, 2000) 来反演各台站下方的地壳厚度和泊松比。H - Kappa 方法 (H 为地壳厚度, Kappa 为纵横波速比) 将多个地震事件的接收函数进行叠加来提高信噪比, 其优点在于可以批量处理大量的远震波形数据, 无须标注不同转换震相的到时, 通过叠加不同震中距和方位角的接收函数, 地壳结构横向变化的影响将会被压制, 从而获得一个平均地壳模型。

2 计算结果

我们根据选取的 80 个远震事件 3 360 条地震记录, 经过分析筛选, 共得到 701 个接收函数, 再用 H - Kappa 方法反演得到各台站下方的地壳厚度和泊松比 (表 1, 图 4; 安康台的反演结果不够理想, 没有在表中列出), 图 3 是西安台的接收函数和反演的结果。我们注意到西安台下方可能存在界面的倾斜, 但是我们将不同方位角和震中距的接收函数进行叠加, 可以压制接收函数因界面起伏引起的随方位角的变化, 进而获得一个平均的地壳模型 (Zhu *et al.*, 2000)。

对反演结果, 我们有以下几点认识:

(1) 陕西地区地壳总体趋势是东部地区较薄, 西部地区较厚; 渭河盆地地壳较薄 (34 ~ 40km), 陕西南部 and 北部地区地壳相对较厚 ($\geq 40\text{km}$); 渭河盆地东部与山西交界的华阴地壳厚度最薄 (34km), 而盆地西北端的陇县处于六盘山余脉上, 地壳厚度最厚 (48km)。这与前人的研究成果 (姜家兰等, 1986; 宋立胜等, 1989) 相比, 总体上相一致, 数值上大概相差 2 ~ 3km。

(2) 就渭河盆地而言, 地壳厚度呈现东薄西厚、北薄南厚的特点。地质上 (孔繁宗, 1991), 渭河 (断陷) 盆地为复杂的箕状地堑式断块凹陷, 被北山山前大断裂与秦岭山前大断裂围限。断陷长期发育在地台与地槽构造单元的衔接地带, 即深部断裂活动地带, 主体偏落在地壳较薄的地台一侧, 深部对应于上地幔隆起南缘的斜坡带上, 这里地壳厚 41km, 比陕北与秦岭地壳薄。从现有的研究成果来看 (姜家兰等, 1986; 宋立胜等, 1989), 盆地中部的地壳厚度均小于盆地两侧。由于目前的台站基本分布于盆地的两

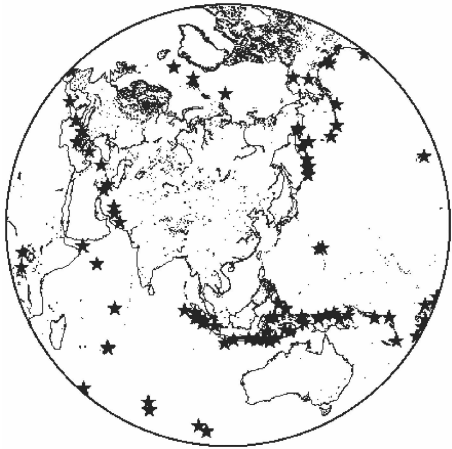


图 2 本文选取的 80 个远震事件震中分布图
Fig. 2 Epicenter distribution of 80 distant earthquakes in use.

表 1 陕西地震台站下方的地壳厚度和泊松比

Table 1 The thickness and Poisson ratio in crust beneath stations of seismic network in Shaanxi Province

台站	波速比	地壳厚度/km	泊松比
西安台	1.70 ± 0.01	39.0 ± 0.4	0.24
乾陵台	1.74 ± 0.01	35.6 ± 0.4	0.25
榆林台	1.72 ± 0.01	41.8 ± 0.4	0.24
周至台	1.73 ± 0.01	39.2 ± 0.3	0.25
泾阳台	1.81 ± 0.02	36.6 ± 0.5	0.28
宁陕台	1.72 ± 0.01	44.5 ± 0.3	0.24
汉中台	1.82 ± 0.01	47.1 ± 0.4	0.28
彬县台	1.85 ± 0.01	38.2 ± 0.3	0.29
蒲城台	1.77 ± 0.01	36.7 ± 0.5	0.26
合阳台	1.77 ± 0.01	39.0 ± 0.3	0.26
华阴台	1.75 ± 0.01	34.0 ± 0.4	0.26
太白台	1.74 ± 0.02	42.2 ± 0.6	0.25
陇县台	1.76 ± 0.01	48.1 ± 0.3	0.26

由于目前的台站基本分布于盆地的两

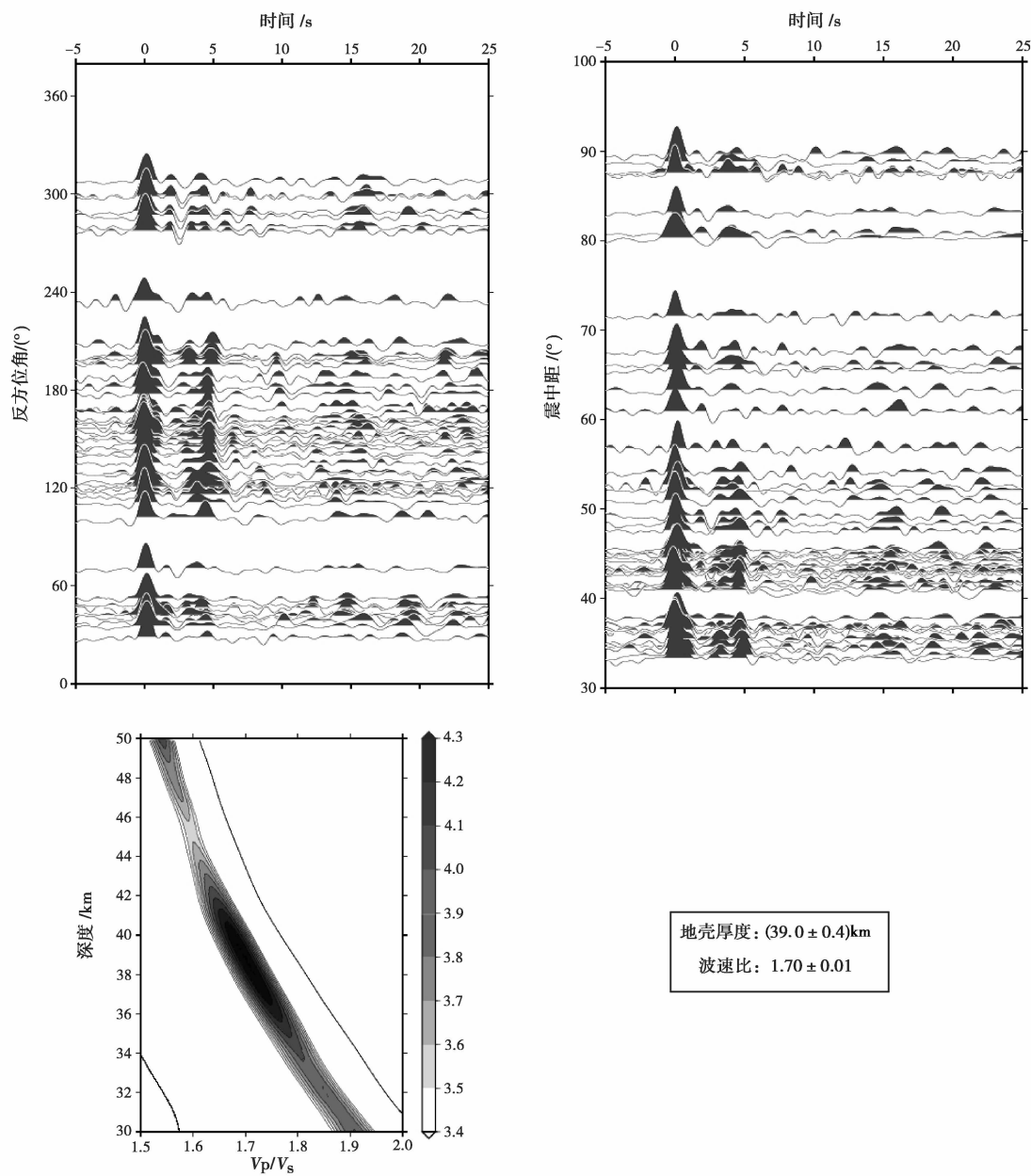


图 3 西安台接收函数及 H - Kappa 反演结果

Fig. 3 The receiver functions in Xi'an station and the inversion results.

侧,无法具体地获得盆地中部的地壳厚度情况。

(3)陕西地区泊松比值总体变化不大,取值范围为 0.24 ~ 0.29,可能表明这一地区岩石组成以中度组分为主,长英质和铁镁质成分大体相当;以渭河盆地 为界,向北靠近地台一侧泊松比值相对较高,向南靠近秦岭山脉一侧则比值相对较低。

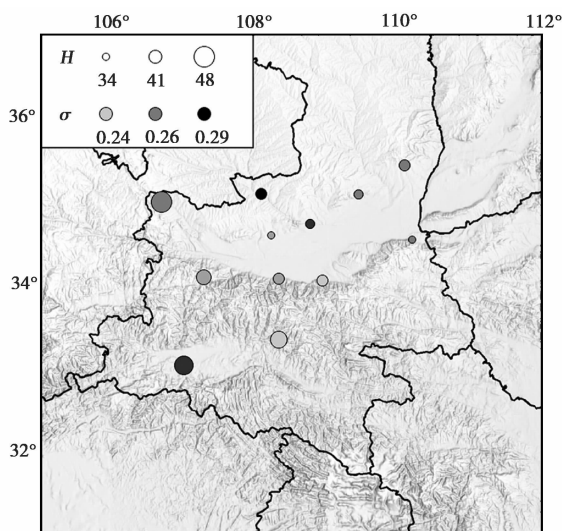


图 4 陕西地震台站下方的地壳厚度(H/km)和泊松比(σ)分布图

Fig. 4 Distribution of the thickness and Poisson ratio in crust beneath stations of seismic network in Shaanxi Province.

3 分析与讨论

陕西历史上是中强地震多发的地区(图 1)。地震主要发生在陕西中部的渭河盆地,陕西南部地区次之,陕西北部地区最少,断裂带也存在同样的分布特征。

(1)陕西北部地区地震较少,这一地区属于鄂尔多斯断块,从断块沉积来看,除边缘部分外,地层几乎没有褶皱,几乎没有火成岩侵入,地质构造相对稳定。本文得到的榆林台下方地壳厚度为 41.8 km,泊松比 0.24,可能表明地下介质的长英质成分较多。

(2)渭河盆地处于几个构造体系的复合部位,属于强地震的多发区,历史上曾发生 6 级以上地震 8 次,其中 7 级地震 2 次,8 级地震 1 次。由于两侧的秦岭断块与鄂尔多斯断块长期推压和拉张,渭河盆地是两侧断裂长期活动的产物,是经历喜马拉雅构造期活动发展形成的现代断陷,盆地内有 EW 向、NE 向及 NW 向多组活动断裂,构造比较复杂。这一区域的台站正好分布于盆地的南北两侧,北侧台站下方的地壳厚度低于南侧,泊松比则是北侧台站相对较高。其中,华阴台是距离 1556 年华县 8 级地震震中最近的台站,其反演的地壳厚度最薄,张学民等(2005)的结果显示该台下方 20~30 km P 波存在明显的低速层,反映了上地幔物质的隆起上侵特征。此外,从现有的反演结果来看,盆地中东部地壳厚度变化不大,为 35~39 km;从周至以西,地壳出现明显增厚的迹象,至盆地西北角的陇县地壳厚度已达 48 km。这一区域发育有岐山-马召断裂、岐山-乾县断裂、渭河断裂(西段)等多条断裂,历史上和近期都属于地震多发地区。

(3)秦岭一大巴山区虽有地震活动,但并不十分强烈,历史上仅有 1 次 6 级地震。秦岭为横贯陕西中部的 EW 向弧形山脉,是中国南、北方的天然分界线,为元古宙末期吕梁运动以来长期隆起的地带,并经历了从加里东期、印支-海西期至喜马拉雅运动期的多期构造变动。大巴山区在大地构造上属扬子断块部分。这一区域分布的台站有太白、汉中、宁陕和安康,地壳厚度均

>42km,泊松比存在较大的差异,其中汉中台泊松比最大(0.28),太白、宁陕台较小,从这一点来看,泊松比较高区域的地震活动要高于较低的区域。由于这一区域地势起伏较大,地质构造较为复杂,对现有的反演结果还难以进行详细的分析。

地震活动与地质构造有着内在的联系,我们的结果为以上的分析提供了一些基本的参考数据。不过由于受到台站分布的影响,据所获得的地壳厚度和泊松比还不能详细地描述陕西地区的地壳结构。下一步的工作可以利用面波频散和接收函数联合反演陕西地区的壳幔速度结构,用以弥补本文的不足之处。

参 考 文 献

- 安张辉,周民都,吴庆举,等. 2004. 接收函数方法研究进展 [J]. 西北地震学报,26(4): 362—364.
- AN Zhang-hui,ZHOU Min-dou,WU Qing-ju,*et al.* 2004. New progress in research of receiver function method [J]. Northwestern Seismological Journal,26(4): 362—364 (in Chinese).
- 冯希杰,杜文和,袁志祥,等. 2004. 陕西石泉 2003 年 4 月 24 日 M_L 4.9 地震及其烈度衰减 [J]. 西北地震学报,26(4): 365—367.
- FENG Xi-jie,DU Wen-he,YUAN Zhi-xiang,*et al.* 2004. Shiquan M_L 4.9 earthquake in Shaanxi Province on April 24, 2003, and its intensity attenuation [J]. Northwestern Seismological Journal,26(4): 365—367 (in Chinese).
- 贺传松,王椿镛,吴庆举. 2003. 接收函数方法及其新的进展 [J]. 地球物理学进展,18(2): 224—228.
- HE Chuan-song,WANG Chun-yong,WU Qing-ju. 2003. The receiver function method and its new progress [J]. Progress in Geophysics,18(2): 224—228 (in Chinese).
- 姜家兰,黄长林. 1986. 陕西地区地壳厚度初探 [J]. 西北地震学报,8(4): 43—51.
- JIANG Jia-lan,HUANG Chang-lin. 1986. A preliminary study on the crustal thickness in Shaanxi region [J]. Northwestern Seismological Journal,8(4): 43—51 (in Chinese).
- 孔繁宗. 1991. 陕西新构造活动概要 [J]. 中国区域地质,10(1): 10—16.
- KONG Fan-zong. 1991. A brief account of the neotectonic activity in Shaanxi [J]. Regional Geology of China,10(1): 10—16 (in Chinese).
- 李华,王良书,李成,等. 2008. 大别造山带西段宽频带数字地震台阵观测与地壳上地幔结构 [J]. 中国科学(D 辑),38(7): 862—871.
- LI Hua,WANG Liang-shu,LI Cheng,*et al.* 2008. Structure of the crust and uppermost mantle from broadband seismic array in the western Dabie Mountains, east central China [J]. Science in China(Ser D),38(7): 862—871 (in Chinese).
- 李永华,吴庆举,田小波,等. 2009. 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构 [J]. 地球物理学报,52(1): 67—80.
- LI Yong-hua,WU Qing-ju,TIAN Xiao-bo,*et al.* 2009. Crustal structure in the Yunnan region determined by modeling receiver functions [J]. Chinese Journal of Geophysics,52(1): 67—80 (in Chinese).
- 楼海,王椿镛,吕智勇,等. 2008. 2008 年汶川 M_s 8.0 级地震的深部构造环境: 远震 P 波接收函数和布格重力异常的联合解释 [J]. 中国科学(D 辑),38(10): 1207—1220.
- LOU Hai,WANG Chun-yong,LÜ Zhi-yong,*et al.* 2008. Deep tectonic setting of the 2008 Wenchuan M_s 8.0 earthquake in southwestern China-Joint analysis of teleseismic P-wave receiver functions and Bouguer gravity anomalies [J]. Science in China(Ser D),38(10): 1207—1220 (in Chinese).
- 陕西省地震局. 2005. 陕西省地震监测志 [M]. 北京: 地震出版社.

- Earthquake Administration of Shaanxi Province. 2005. Seismic Monitoring Records of Shaanxi Province [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 宋立胜. 1989. 陕西省志: 地震志 [M]. 北京: 地震出版社.
- SONG Li-sheng. 1989. Shaanxi Provincial Annals; Earthquake [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 田宝峰, 李娟, 王卫民, 等. 2008. 华北太行山区地壳各向异性的接收函数证据 [J]. 地球物理学报, 51(5): 1459—1467.
- TIAN Bao-feng, LI Juan, WANG Wei-min, *et al.* 2008. Crust anisotropy of Taihangshan mountain range in North China inferred from receiver functions [J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(5): 1459—1467 (in Chinese).
- 王椿镛, 楼海, 吕智勇, 等. 2008. 青藏高原东部地壳上地幔 S 波速度结构: 下地壳流的深部环境 [J]. 中国科学 (D 辑), 38(1): 22—32.
- WANG Chun-yong, LOU Hai, LÜ Zhi-yong, *et al.* 2008. S-wave crustal and upper mantle's velocity structure in the eastern Tibetan Plateau-deep environment of lower crustal flow [J]. Science in China (Ser D), 38(1): 22—32 (in Chinese).
- 王小平, 宋秀青, 秦浩文. 2005. 接收函数方法应用的现状及其发展 [J]. 地球物理学进展, 20(2): 545—549.
- WANG Xiao-ping, SONG Xiu-qing, QIN Hao-wen. 2005. The development and status of the receiver function application [J]. Progress in Geophysics, 20(2): 545—549 (in Chinese).
- 王卫东. 2002. 泾阳 4.8 级地震的构造背景 [J]. 西北地震学报, 24(2): 145—149.
- WANG Wei-dong. 2002. Tectonic background of Jingyang M_s 4.8 earthquake [J]. Northwestern Seismological Journal, 24(2): 145—149 (in Chinese).
- 许卫卫, 郑天愉. 2002. 接收函数方法及研究进展 [J]. 地球物理学进展, 17(4): 605—613.
- XU Wei-wei, ZHENG Tian-yu. 2002. The receiver function method and its progress [J]. Progress in Geophysics, 17(4): 605—613 (in Chinese).
- 张学民, 刁桂苓, 王为民, 等. 2005. 陕西省数字地震台下方壳幔速度结构研究 [J]. 华北地震科学, 23(2): 1—9.
- ZHANG Xue-min, DIAO Gui-ling, WANG Wei-min, *et al.* 2005. Study on the velocity structure of crust and upper-mantle beneath the digital seismic stations in Shaanxi Province [J]. North China Earthquake Sciences, 23(2): 1—9 (in Chinese).
- Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainer, Washington, inferred from teleseismic body waves [J]. Journal of Geophysical Research, 84(B9): 4749—4762.
- Zhu L, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions [J]. Journal of Geophysical Research, 105(B2): 2969—2980.

STUDY ON THE CRUSTAL THICKNESS BENEATH STATIONS OF SEISMIC NETWORK IN SHAANXI PROVINCE BY TELESEISMIC RECEIVER FUNCTION

LIU Chun^{1,2)} CHONG Jia-jun¹⁾ NI Si-dao¹⁾ LI Shao-rui²⁾

1) *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

2) *Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China*

Abstract

In this paper, we calculate receiver functions of body wave under the 14 stations in Shaanxi Province from 3-component digital waveform data of teleseismic earthquake events and obtain the thickness and Poisson ratio in crust of this area through H-kappa stacking. Through analysing the characteristics of crustal structure in Shaanxi Province, we discuss the relationship between seismic activity, crustal structure and geological structure in Shaanxi Province.

The results show that (1) Crustal thickness in western Shaanxi is thicker than that in the east. Crustal thickness in the south and north of Shaanxi ($\geq 40\text{km}$) is larger than that in Weihe Basin, middle Shaanxi (about $34 \sim 40\text{km}$). Among 14 stations, the crust beneath Huayin station is the thinnest (34km), which locates on the boundary between eastern Weihe Basin and Shanxi Province, and the biggest thickness (48km) appears beneath Longxian station at the northwestern end of Weihe Basin. (2) Poisson ratio in Shaanxi Province is about $0.24 \sim 0.29$, which may be related to rock compositions. Poisson ratio in the north of Weihe Basin has higher values than those in the south. (3) There exist some relations between seismic activity and geological structure. The Weihe Basin with frequent earthquakes locates in a compound position of several tectonic systems. The Hanzhong Basin and Ankang Basin in the south of Shaanxi are controlled by several major faults, where the seismicity is relatively low. Seismic activity in northern Shaanxi is the lowest because of stable geological structure. Poisson ratio reflects material composition of earth interior. Our analysis suggests that seismic activity in the region with high Poisson ratio is higher than that with low Poisson ratio.

Key words receiver function, crustal structure, seismic activity, Shaanxi

〔作者简介〕 刘春,男,1976年生,1999年毕业于云南大学地球物理专业,2008年在中国科学技术大学获固体地球物理专业硕士学位,工程师,主要从事地震分析预报工作,电话:029-88465330, E-mail: liuchun1976@foxmail.com。