

岷县漳县 $M_s6.6$ 地震震源区地壳 速度结构特征初步研究^①

李翠芹¹, 沈旭章^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:利用距离 2013 年岷县漳县地震最近的固定台站岷县台 2008—2009 年的远震接收函数, 确定了该地震震源区及临近区域的地壳厚度和波速比。结果表明:岷县台下方地壳速度结构的横向非均匀性较强, 各方位接收函数差异较大, 特别是震源区与临近区域存在明显的差别。临近区域的中下地壳存在明显的低速层, 而震源区中下地壳中存在明显的高速区; 且震源区地壳平均波速比为 1.76, 上地壳的波速比仅为 1.62。据此推断:震源区是坚硬的上地壳覆盖在较软的中下地壳之上, 岷县漳县地震破裂有可能是下地壳流的活动导致上地壳的破裂。

关键词: 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震; 破裂带; 震源区接收函数; 地壳速度结构

中图分类号: P315.25

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0448-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0448

Characteristics of Crustal Structures in Source Area of the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake

LI Cui-qin¹, SHEN Xu-zhang^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: An $M_s6.6$ earthquake occurred at the junction of Minxian and Zhangxian on July 22, 2013, at 7:45 in the northern section of the North-South seismic zone in the southeast region of Gansu Province. This area is a moderate-strong earthquake-prone region in which the Minxian $M_s5.2$ earthquake and Minxian—Zhuoni $M_s5.0$ earthquake also occurred in 2003 and 2004, respectively. In this study, we analyze teleseismic data recorded in 2008—2009 by Minxian station, which is the permanent station in closest proximity to the Minxian—Zhangxian earthquake. Receiver functions aligned by azimuth indicate obvious heterogeneity beneath the Minxian station; observed receiver functions of Minxian station vary according to azimuth. That is, receiver functions of the seismic source area and adjacent areas show obvious differences. In the seismic source area, the receiver function is clearly a positive signal of approximately 1.5 s, which indicates that a high velocity zone is present in the middle-lower crust. In the adjacent areas, the receiver function is clearly a negative signal of approximately 1.5 s, indicating the presence of a lower velocity zone in the middle-lower crust. This phenomenon shows obvious crustal structure differences between the seismic source area and adjacent areas. In addition, we used the $H-k$ stacking method

① 收稿日期:2013-08-27; 中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2013064

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2011IESLZ05); 国家自然科学基金(41274093); 甘肃省自然科学基金(1208RJZA178)

作者简介:李翠芹(1987—),女(汉族),山东嘉祥人,在读硕士研究生,主要从事地壳速度结构研究。E-mail:licuiqin12@163.com

通讯作者:沈旭章(1976—),男(汉族),甘肃张掖人,研究员,主要从事地震学及相关研究工作。E-mail:shenxzh@gmail.com

of receiver functions to determine the crustal thickness and wave velocity ratio of the two areas. The results show crustal thicknesses of 45 km and 47 km and wave velocity ratios of 1.76 and 1.69 in the source area and adjacent area, respectively. Therefore, obvious differences in crustal velocity structure appear between the two areas. In the seismic source area, the Ps, PpSs/PsPs clearly indicates crustal discontinuity. Therefore, the $H-k$ stacking method of receiver functions was used to determine the depth of the discontinuity surface and the wave ratio velocity. The $H-k$ stacking results showed an upper crustal thickness of 15 km and a wave velocity ratio of 1.62. We estimated the middle-lower crustal thickness and wave velocity ratio to be 30 km and 1.84, respectively. Therefore, the soft middle-lower crust is covered by the hard upper crust at the top in the source area. This type of small-scale material inhomogeneity may be an important part of the deep structure of the Minxian-Zhangxian earthquake background. We estimate that the rupture of the Minxian-Zhangxian earthquake may have been attributed to lower crustal flow leading to rupture of the upper crust.

Key words: Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake; rupture zone; seismic source area; receiver function; crustal structure

0 引言

甘肃省定西市岷县、漳县交界于 2013 年 7 月 22 日 7 时 45 分发生 $M_s6.6$ 地震。此次地震位于南北地震带北端的甘肃东南部(简称甘东南)地区。该地区是中强地震多发区,也是青藏高原块体、鄂尔多斯块体和阿拉善块体的交汇区。由于活动的青藏高原块体不断隆升和推挤作用,造成该区域新构造活动强烈。该地区所处的青藏高原东北缘也是中国大陆东西与南北构造结合部位和重要的构造转换区域^[1]。20 世纪 80 年代以来,在该地区开展的几次主动源深地震测深研究揭示了地壳结构的区域变化特征^[2-8]。已有很多研究者利用天然地震观测资料,对该地区地壳和上地幔进行了不同尺度的走时层析成像和接收函数反演^[9-19]。这些研究成果主要是给出了青藏高原东北缘地区地壳中地震波速度结构的特征和 Moho 面形态,而没有具体对此次震区及临近区域小范围的速度结构进行研究。因此需要利用新的观测资料针对于此次地震进一步深入开展对孕震区地壳结构研究。

距离岷县漳县地震震群最近的断裂为临潭-宕昌断裂(图 1),该断裂由多条规模不等、相互平行或斜列的次级断裂组合而成,断裂带影响宽度范围在 5~10 km,在岷县东南断裂归并为一体,延至宕昌以南。本次地震正是发生在该断裂北缘的其中一条次级断裂向东延伸的位置。2003 年岷县 5.2 级地震和 2004 年岷县-卓尼 5.0 级地震等均说明该次级断裂有新活动的特征。本研究收集了甘肃省地震台网的岷县固定地震台站的数据,利用远震体波的

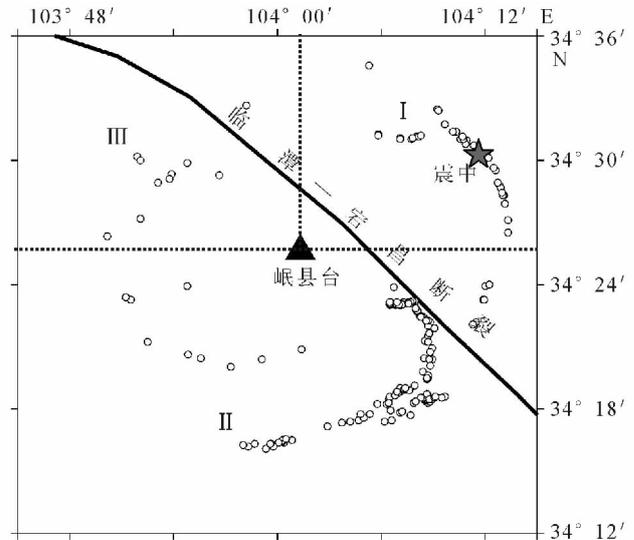


图 1 研究区和 P 波在 Moho 面上透射转化为 S 的点分布(黑线为临潭-宕昌断裂,圆圈表示透射转换点位置,红色五角星是岷县漳县地震震中位置,黑色三角为岷县台位置。整个研究区根据接收函数形态划分为三个区域(I、II 和 III))

Fig. 1 The study area and distribution of the pierce points where teleseismic P wave converts to S wave (The black solid line represents Lintan-Tanchang fault. The circles represent the pierce points, the red triangle represents the epicenter of Minxian-Zhangxian earthquake and the triangular represents the location of Minxian seismic station. The study area is divided into three regions by shape of receiver functions).

接收函数方法对各台站下方不同方位的地壳速度结构进行深入研究,以揭示岷县漳县地震破裂带下方复杂的地壳速度结构。

1 资料及观测接收函数

本研究收集了岷县台 2008—2009 年的震中距为 $30^\circ\sim 90^\circ$, 震级 $M_s > 5.5$ 的远震资料。将原始资料运用 SAC 软件去除仪器响应, 将所有的波形记录还原为地面运动位移。由于接收函数上的“尖”都是由入射到间断面上的 P 转化而来, 只有 P 比较清晰的资料才有较大的能量转化成其它震相, 因此我们对资料进行了预选, 只对原始波形初至 P 波清晰的资料进行选择。使用时间域反褶积方法计算 R 向(震中—台站连线)观测接收函数, 共得 234 条。计算中使用滤波因子 α 为 2.5 的高斯低通滤波器对信号进行了滤波。图 1 显示了 P 波在该区域 Moho 面(根据前人研究成果, 先近似取 Moho 深度为 45 km)上透射转换为 PMs 的位置分布, 其中, 在地震发生的东北区(I 区)资料有较好的覆盖。

图 2 显示了岷县台接收函数按不同震中距排列结果, 在 6 s 左右较为清晰的看到 Moho 面的投射转换震相 P_{Ms} 。为了进一步考察岷县台站下方不同方位 Moho 面的起伏及地壳结构, 我们将台站接收函数按照方位角做了排列(图 3)。由图 3 可以看出岷县台周围不同方位的接收函数有很大的差别, 特别是不同方位 PMs 的到时差别比较明显, 说明在岷县台下方地壳速度结构在不同方位的差别较大。

2 分区确定地壳厚度和波速比

为了利用大量接收函数资料确定地震台站下方的地壳厚度 H 和波速比 k , Zhu 和 Kanamori^[20] 提出了一种通过叠加单台多震接收函数上的 P_s 、 P_pP_s 和 $P_sP_s+P_pS_s$ 三个震相的波形约束地壳厚度 H 和平均波速比 k 的方法, 即 $H-k$ 叠加搜索方法。该方法因可以快速处理大量的数据而被广泛应用于地壳和上地幔结构的研究, 现已成为天然地震波资料处理的一种常规手段。但由于深度和波速比的折衷, 会导致 $H-k$ 叠加结果的不唯一性即不同的 V_p 会导致不同的地壳厚度。为了减少这种不唯一性, 本文选取了人工地震^[21] 得到的平均地壳纵波速度 6.2 km/s。

本研究利用接收函数 $H-k$ 搜索方法, 首先确定岷县台下方地壳的平均厚度和波速比。由于岷县台不同方位的接收函数差别较大, 我们将岷县台的

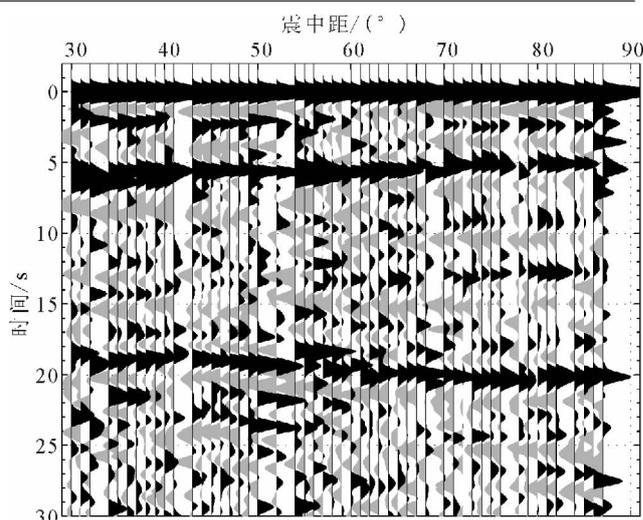


图 2 岷县台按照震中距排列的接收函数

Fig. 2 Receiver functions of MX station aligned by distance

接收函数根据 PMs 透射转换点的位置划分成三个不同区域: $0^\circ\sim 90^\circ$ 为 I 区(亦为该地震发生的区域), $90^\circ\sim 270^\circ$ 为 II 区, $270^\circ\sim 360^\circ$ 为 III 区, 分别确定了不同区域的地壳厚度和波速比。

运用接收函数 $H-k$ 方法, 对岷县漳县地震震源区近临近区域的资料进行了分区处理, 图 4(a)~(c)分别为 I、II、III 区域的地壳参数的计算结果: I 区即发震区, 地壳厚度为 45 km, 波速比为 1.76; II 区地壳厚度 47 km, 波速比为 1.69; III 区地壳厚度 47 km, 波速比为 1.72。

由图 3 可以看出在 I 区域接收函数在 1.5 s 左右存在明显的一个正信号, 该信号可能意味着该区域地壳中存在高速层。该高速间断面的多次波 P_pP_s 与可能在 Moho 反射的 P_s 波相重合, 不能清晰地识别, 但 P_s 波和 P_pS_s/P_sP_s 波能清晰地识别出。对此, 选取波形反演^[22] 得到的上地壳纵波速度 V_p 为 5.8 km/s。运用接收函数 $H-k$ 方法在地壳内部搜索速度间断面, 图 5(a)为该区域接收函数及壳内间断面处的一次波、多次波走时曲线; 图 5(b)为壳内间断面搜索结果, 上地壳厚度为 15 km, 波速比为 1.62。根据 I 区域的平均搜索结果, 地壳厚度为 45 km, 波速比为 1.76, 可以计算出中下地壳的厚度为 30 km, 波速比约为 1.84。

根据 I 区域上地壳的厚度和波速比以及该区域整个地壳的厚度和平均波速比, 构建了与 I 区域接收函数相似的模型, 该模型的地壳速度结构如图 5(d), 地壳中存在一个高速夹层, 说明在震区(I 区域)的中下地壳中存在类似的一个高速夹层。

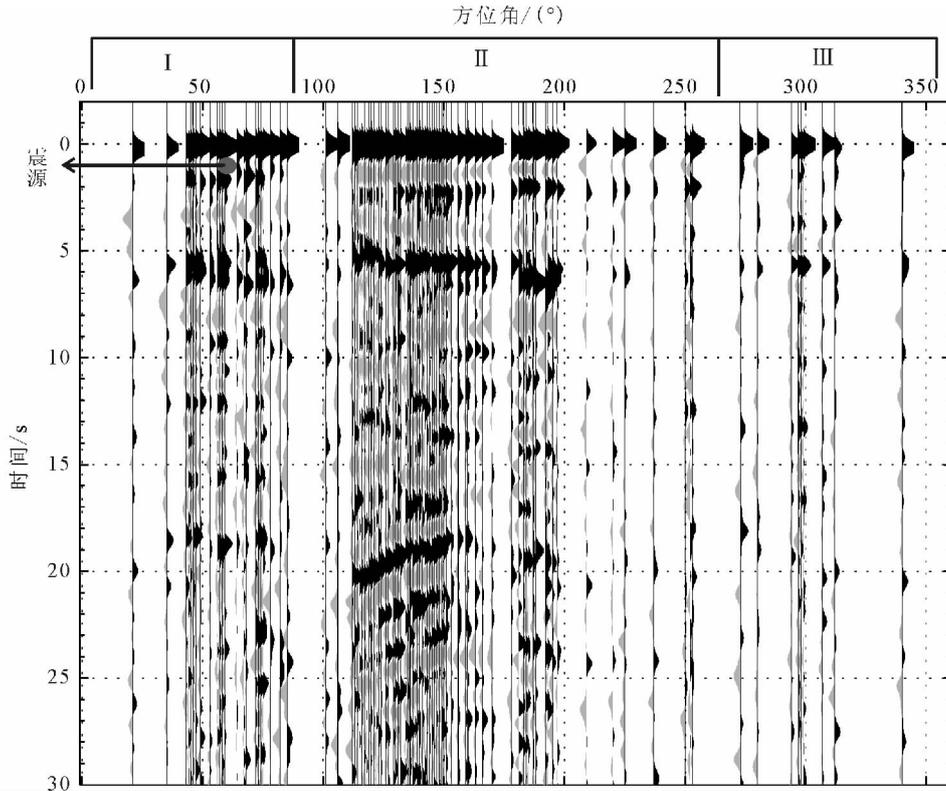


图 3 岷县台按照方位角排列的接收函数

Fig. 3 Receiver functions of MX station aligned by azimuth

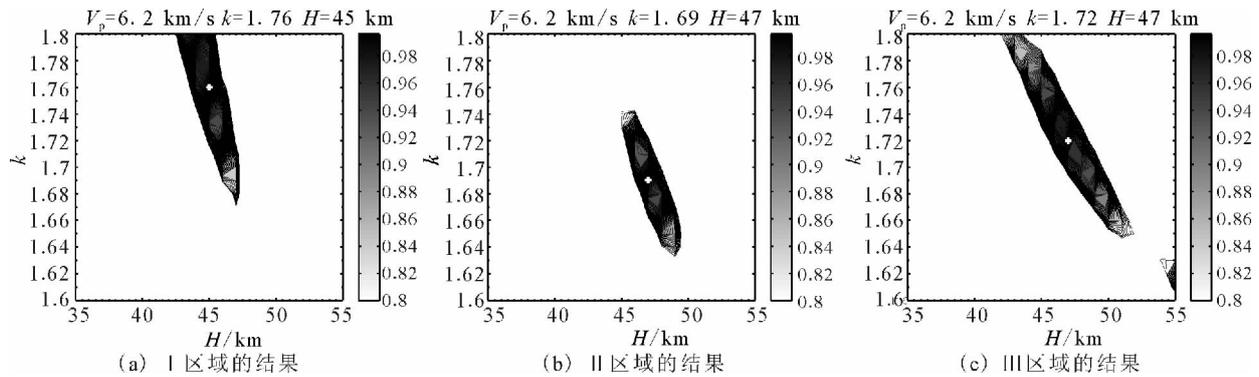


图 4 根据接收函数 $H-k$ 搜索叠加方法确定的地壳厚度和波速比(白色‘+’号表示搜索过程中得到的最优解的位置)

Fig. 4 Crustal thickness and V_p/V_s ratio under MX station determined by receiver functions(+ represents the best resolution of the $H-k$ method)

3 结果和讨论

本文利用距离岷县漳县地震最近的固定台站岷县台的远震体波资料,研究了震源区和临近区域下方地壳速度结构。根据观测资料,在岷县台的接收函数上的一次波和多次转换波呈现出了较为明显的方位性,特别是震源区(I区域)的接收函数与临近区域的有明显的区别。在 1.5 s 左右,只有震源区为正信号,临近区域均为负信号,这一现象说明震源

区与临近区域的地壳速度结构存在较大的差别。

通过接收函数和 $H-k$ 叠加搜索方法,按照不同方位分区确定了台站下方不同方位的地壳厚度、波速比。 $H-k$ 叠加搜索结果显示,震源区与临近区域的 Moho 面深度差异最大为 2 km,波速比最大差异为 0.07。震源区与 II 区接收函数上 P_{MS} 震相到时差 1 s 左右,在波速比相同的情况下,这种到时差可由 7 km 左右的 Moho 面深度差异引起,而现在由于波速比存在 0.07 的差异,最终导致的 Moho 面

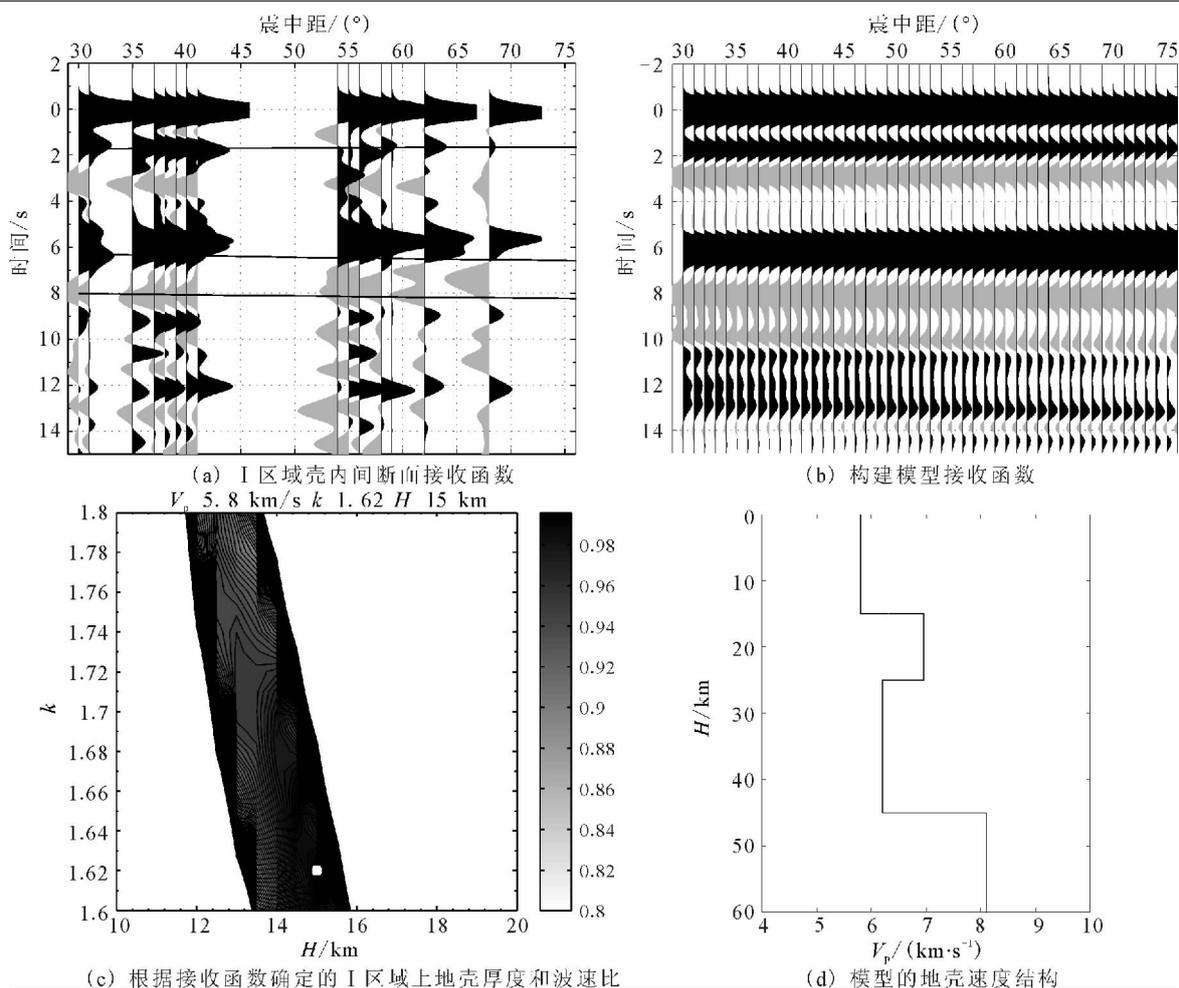


图 5 I 区(震源区)的接收函数和地壳结构模型

Fig. 5 The receiver functions and the crustal structures of model I region(seismic source area)

深度差异为 2 km。震源区的 $H-k$ 搜索结果得到平均的波速比为 1.76, 而该区域上地壳的波速比仅为 1.62。该地区地壳厚度 45 km 内波速比变化 0.14, 是一个较为值得关注的对象。且岷县台位于临潭—宕昌断裂附近, 该断裂由多条规模不等、相互平行或斜列的次级断裂组合而成, 是一个动力学背景特别复杂的区域, 这种复杂的动力作用机制可能是造成震源区下方地壳厚度、波速比与临近区域差异较大的重要原因。

接收函数结果表明, 震源区中下地壳中存在明显的高速异常, 由 $H-k$ 搜索结果可知, 该区域是坚硬的上地壳覆盖在比较软的下地壳上方, 该高速层距地面 15 km 左右, 岷县漳县地震的震源位于高速层的上方。而在其临近区存在的是低速层。这种小范围内物质的不均匀性, 可能是岷县漳县地震发生的一个重要的深部结构背景。

本研究只是在能收集到的资料的基础上对岷县漳县地震破裂带的地壳速度结构作了研究, 虽然只

有 1 个台站, 但由于单台下方表现出的这种较强的方位性, 使得该工作具有较大的意义, 随着目前该区域地震台网的加密观测, 可以对破裂带的地壳速度结构作更为细致的研究。

参考文献(References)

- [1] 张国伟, 郭安林, 姚安平. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 23-32.
ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, YAO An-ping. Western Qinling—Songpan Continental Tectonic Node in China's Continental Tectonics[J]. Earth Science Frontiers(in Chinese), 2004, 11(3): 23-32. (in Chinese)
- [2] 闵祥仪, 周民都, 郭建康, 等. 灵台—阿木去乎剖面地壳速度结构[J]. 西北地震学报, 1991, 13(增刊): 29-36.
MIN Xiang-yi, ZHOU Min-du, GUO Jian-kang, et al. The Crustal Velocity Structure in Lingtai—Amuquhu profile[J]. Northwestern Seismological Journal, 1991, 13(S1): 29-36. (in Chinese)
- [3] 李清河, 郭建康, 周民都, 等. 成县—西吉剖面地壳速度结构[J]. 西北地震学报, 1991, 13(增刊): 37-43.

- LI Qing-he, GUO Jian-kang, ZHOU Min-du, et al. The Velocity Structure of Chengxian—Xiji Profile[J]. Northwestern Seismological Journal, 1991, 13(Supp): 37-43. (in Chinese)
- [4] 李松林, 张先康, 张成科, 等. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 210-217.
LI Song-lin, ZHANG Xian-kang, ZHANG Cheng-ke, et al. A Preliminary Study on the Crustal Velocity Structure of Maqin—Lanzhou—Jingbian by Means of Deep Seismic Sounding Profile[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(2): 210-217. (in Chinese)
- [5] 张少泉, 武利钧, 郭建民, 等. 中国西部地区门源—平凉—渭南地震测深剖面资料的分析解释[J]. 地球物理学报, 1985, 28(5): 349-361.
ZHANG Shao-quan, WU Li-jun, GUO Jian-min, et al. An Interpretation of the DSS Data on Menyuan—Pingliang—Weinan Profile in West China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1985, 28(5): 349-361. (in Chinese)
- [6] 王双绪, 张希, 祝意青, 等. 南北地震带北段强震形变异常特征与预测指标研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 105-113.
WANG Shuang-xu, ZHANG Xi, ZHU Yi-qing, et al. Study on the Characteristics of Strong Earthquake Deformation Anomalies and Forecasting Index in the North Segment of the South—north Seismic Belt of China[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 105-113. (in Chinese)
- [7] 王椿镛. 中国岩石层结构研究的回顾与展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 82-109.
WANG Chun-yong. Review and Prospect on Lithospheric Structure study in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(Supp): 82-109. (in Chinese)
- [8] 张辉, 王熠熙, 冯建刚. 甘东南地区地壳介质各向异性特征[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 111-116.
ZHANG Hui, WANG Yi-xi, FENG Jian-gang. Seismic Anisotropy in the Crust in Southeastern Area of Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(2): 111-116. (in Chinese)
- [9] 丁志峰, 何正勤, 孙卫国, 等. 青藏高原东部及其边缘地区的地壳上地幔三维速度结构[J]. 地球物理学报, 1999, 42(2): 197-205.
DING Zhi-feng, HE Zheng-qin, SUN Wei-guo, et al. 3-D Crust and Upper Mantle Velocity Structure in Eastern Tibetan Plateau and Its Surrounding Areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(2): 197-205. (in Chinese)
- [10] 许忠淮, 汪素云, 裴顺平. 青藏高原东北缘地区 Pn 波速度的横向变化[J]. 地震学报, 2003, 25(1): 25-31.
XU Zhong-huai, WANG Su-yun, PEI Shun-ping. Lateral Variation of Pn Velocity Beneath Northeastern Marginal Region of Qingzang Plateau[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(1): 25-31. (in Chinese)
- [11] 张元生, 周民都, 荣代路, 等. 祁连山中东段地区三维速度结构研究[J]. 地震学报, 2004, 26(3): 247-255.
ZHANG Yuan-sheng, ZHOU Min-du, RONG Dai-lu, et al. 3-D Velocity Structure in the Central-eastern Part of Qilian Shan[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(3): 247-255. (in Chinese)
- [12] 郭颢, 刘启元, 陈九辉, 等. 青藏高原东北缘—鄂尔多斯地壳上地幔地震层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 790-797.
GUO Biao, LIU Qi-yuan, CHEN Jiu-hui, et al. Seismic Tomographic Imaging of the Crust and Upper Mantle Beneath the Northeastern Edge of the Qinghai—Xizang Plateau and the Ordos Area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(5): 790-797. (in Chinese)
- [13] 周民都, 张元生, 石雅缪, 等. 青藏高原东北缘地壳三维速度结构[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 127-134.
ZHOU Min-du, ZHANG Yuan-sheng, SHI Ya-miu, et al. Three-dimensional Crustal Velocity Structure in the Northeastern Margin of the Qinghai—Tibetan Plateau[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 127-134. (in Chinese)
- [14] 王周元. 甘肃地区分层地壳结构[J]. 西北地震学报, 1984, 6(3): 84-91.
WANG Zhou-yuan. Layered Crustal Structure in Gansu Region[J]. Northwestern Seismological Journal, 1984, 6(3): 84-91. (in Chinese)
- [15] 王周元, 范世宏, 姬凤英, 等. 甘肃地区地壳速度的非均匀分布[J]. 西北地震学报, 1996, 18(2): 18-25.
WANG Zhou-yuan, FAN Shi-hong, JI Feng-ying, et al. The Inhomogeneity of Crustal Velocity in Gansu Region [J]. Northwestern Seismological Journal, 1996, 18(2): 18-25. (in Chinese)
- [16] 陈九辉, 刘启元, 李顺成, 等. 青藏高原东北缘—鄂尔多斯地壳上地幔 S 波速度结构[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 333-342.
CHEN Jiu-hui, LIU Qi-yuan, LI Shun-cheng, et al. Crust and Upper Mantle S-wave Velocity Structure Across Northeastern Tibetan Plateau and Ordos Block[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(2): 333-342. (in Chinese)
- [17] 李永华, 吴庆举, 安张辉, 等. 青藏高原东北缘地壳 S 波速度结构与泊松比及其意义[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1359-1368.
LI Yong-hua, WU Qin-ju, AN Zhang-hui, et al. The Poisson Ratio and Crustal Structure Across the NE Tibetan Plateau Determined from Receiver Functions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1359-1368. (in Chinese)
- [18] 安张辉, 吕子岚, 杜学彬, 等. 甘肃省各数字测震台下方地壳速度结构研究[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 61-66.
AN Zhang-hui, Lü Zi-lan, DU Xue-bin, et al. The Crustal Structure Beneath Digital Seismic Stations in Gansu Province [J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(3): 61-66. (in Chinese)
- [19] SHEN Xu-zhang, MEI Xiu-ping, ZHANG Yuan-sheng. The Crustal and Upper—Mantle Structures Beneath the Northeastern Margin of Tibet[J]. Bulletin of the Seismological of America, 2011, 101(6): 2782-2795.

- [20] Zhu L P, Kanamori H. Moho Depth Variation in Southern California from Teleseismic Receiver Function [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B2):2969-2980.
- [21] 李清河. 天水地区 S 波速度结构[J]. *西北地震学报*, 1991, 13 (增刊):48-54.
LI Qing-he. The Velocity Structure of S-wave in Tianshui Area [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1991, 13 (Supp):48-54. (in Chinese)
- [22] 李少华, 王彦宾, 梁子斌, 等. 甘肃东南部地壳速度结构的区域地震波形反演[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4):1186-1197.
LI Shao-hua, WANG Yan-bin, LIANG Zi-bin, et al. Crustal Structure in Southeastern Gansu from Regional Seismic Waveform Inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(4):1186-1197. (in Chinese)