

姚志祥, 王椿镛, 曾融生, 楼海, 周民都. 2014. 利用接收函数方法研究西秦岭构造带及其邻区地壳结构. 地震学报, 36(1): 1-19. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.01.001.

Yao Z X, Wang C Y, Zeng R S, Lou H, Zhou M D. 2014. Crustal structure in western Qinling tectonic belt and its adjacent regions deduced from receiver functions. *Acta Seismologica Sinica*, 36(1): 1-19. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.01.001

## 利用接收函数方法研究西秦岭构造带 及其邻区地壳结构<sup>\*</sup>

姚志祥<sup>1),\*</sup> 王椿镛<sup>1)</sup> 曾融生<sup>1)</sup> 楼海<sup>1)</sup> 周民都<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

**摘要** 根据西秦岭构造带及其周边地区 117 个宽频带地震台站的高质量波形数据, 利用远震 P 波接收函数的  $H-k$  叠加方法, 求得地壳厚度和平均波速比. 通过分析地壳厚度、波速比及其关系和接收函数 CCP 叠加剖面, 研究了该区域的地壳结构特征. 结果表明, 研究区域内地壳结构差异大, 呈过渡带特征. 地壳厚度总体上呈北北西向分布, 自西南向东北逐渐减小. 羌塘块体地壳厚度为 72 km, 渭河盆地附近为 39 km. 西秦岭构造带的地壳厚度为 42—56 km, 南北向莫霍界面平坦. 研究区域 P 波与 S 波波速比平均为 1.74, 其中西秦岭构造带平均为 1.72. 较低的波速比主要分布在西秦岭构造带、祁连山块体、松潘—甘孜地块北部以及香山—天景山断裂区域, 这可能是由于含长英质酸性岩组分的上地壳叠置增厚而导致的. 该区域缺少超高波速比, 表明这一区域发生岩浆底侵或上地壳熔融的可能性很小. 综合分析表明, 西秦岭构造带及邻区的地壳结构主要是由于青藏高原隆升并在向东北向扩张中受到周边块体的阻挡而引起地壳构造变形所致. 西秦岭构造带的莫霍界面变化和波速比分布与该构造带经历碰撞地壳增厚后的伸展走滑运动有关.

**关键词** 西秦岭构造带 接收函数 地壳厚度 波速比 青藏高原

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.01.001

中图分类号: P315.3<sup>+</sup>1

文献标志码: A

## Crustal structure in western Qinling tectonic belt and its adjacent regions deduced from receiver functions

Yao Zhixiang<sup>1),\*</sup> Wang Chunyong<sup>1)</sup> Zeng Rongsheng<sup>1)</sup>  
Lou Hai<sup>1)</sup> Zhou Mindu<sup>2)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** Seismic waveform data from 117 broadband seismic stations in the western Qinling tectonic belt and its adjacent regions were used to compute

<sup>\*</sup> 基金项目 国家自然科学基金项目(90914005)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(DQJB09B05)和国家科技专项“深部探测技术试验与集成(SinoProbe-2)”共同资助.

收稿日期 2012-09-10 收到初稿, 2012-11-09 决定采用修改稿.

<sup>+</sup> 通讯作者 e-mail: qdocyao@126.com

crustal thickness and velocity ratio ( $v_p/v_s$ ) by the  $H-k$  stacking method of receiver functions. Crustal structures were studied by analyzing the crustal thicknesses, velocity ratios and their relationship, as well as the receiver function images calculated with the common conversion point stacking method. The results show strong lateral variations and transitional features of crustal structures in this area. The crust thins from southwest to northeast. The crustal thickness varies from 72 km in the Qiangtang block to 39 km near the Weihe basin. The crustal thickness in western Qinling tectonic belt is 42–56 km, and NS-trending Moho depth shows little change. The average velocity ratio  $v_p/v_s$  is 1.74 in the study area and 1.72 in western Qinling tectonic belt. Lower velocity ratios mainly distribute in western Qinling tectonic belt, Qilian block, northern Songpan–Garze block and Xiangshan–Tianjingshan fault zone. Lower velocity ratios in this area are probably due to the thickened upper crust of the felsic acid rock composition. The lack of ultrahigh velocity ratios indicates that there is little possibility of magma underplating beneath the lower crust and significant partial melting in the upper crust. Crustal structures in the western Qinling tectonic belt and its adjacent regions are mainly caused by the crustal tectonic deformation occurred during continuous uplifting and northeastward spreading of the Tibetan Plateau as blocked by surrounding terrane. The characteristics of Moho interfaces and velocity ratios in the western Qinling tectonic belt are correlated with underwent extension and strike-slip movement after the collision orogeny and crustal thickening.

**Key words:** western Qinling tectonic belt; receiver function; crustal thickness; velocity ratio; Tibetan Plateau

## 引言

自印度-亚洲大陆碰撞以来,青藏高原内部及边缘发生了强烈的构造变形,在青藏高原周缘地区形成了挤压转换造山带和侧向挤出地体群. 青藏高原东北缘就是具有这种构造转换特征的典型地区之一(许志琴等, 2011). 青藏高原东北缘是碰撞作用由近南北方向向东和北东方向转换的重要场所. 该区处在活动块体边界地带, 构造复杂, 地震活动频繁(邓起东等, 2002; 张培震等, 2005). 西秦岭构造带是秦岭构造带的西延部分, 是青藏块体、阿拉善块体和鄂尔多斯块体的结合部位. 西秦岭构造带是中国东部和西部、南部和北部的地壳结构、地壳厚度和地球物理场的转换带或重大梯度带. 其岩石圈结构与深部构造关系记录了青藏高原东北缘板块碰撞的深部过程以及高原向东和东北向发展演化的深部信息, 但这个转换带的深部动力学机制目前仍不清楚. 因此, 西秦岭构造带一直是地质学、地球化学、地球物理学等众多学科研究的热点地区之一, 深入研究西秦岭构造带对理解青藏高原东北缘构造演化及其深部动力学背景具有重要意义(姜晓玮等, 2003; 张国伟等, 2004; 高锐等, 2006; 王志才等, 2006; 张季生等, 2007; 陈岳龙等, 2008; 嘉世旭, 张先康, 2008; 张先康等, 2008; 陈虹等, 2010).

基于宽频带数字资料的远震接收函数方法是研究地下深部结构的有效途径之一, 它可以利用接收台站下方速度界面产生的 PS 转换波来研究地壳内部结构和重要间断面的起伏

形态及其物性特征(Zandt, Ammon, 1995; 吴庆举, 曾融生, 1998; Zhu, Kanamori, 2000; 王椿镛等, 2008). 本文试图利用西秦岭构造带及其附近地区的宽频带地震台站记录, 确定台站下方的地壳厚度和平均波速比, 分析地壳厚度与波速比的横向变化特征及其区域的地壳结构差异, 探讨青藏高原东北缘地壳隆升形变及动力学过程.

1 区域地质背景

西秦岭构造带的范围大致是指西秦岭北缘断裂以南、宝鸡—成县以西、玛沁—略阳断裂以北、柴达木地块以东的区域. 西秦岭构造带在松潘—甘孜地块、柴达木地块、祁连山地块、阿拉善地块、鄂尔多斯地块和华南地块的环绕之下, 处于构造结合部位. 西秦岭构造带内分布着临潭—宕昌断裂、光盖山—迭山断裂等断裂带, 内部以一系列近东西向延伸指向南的弧形逆冲推覆构造为主. 勉略—阿尼玛卿构造带把西秦岭与松潘—甘孜地块分开, 西秦岭总体上呈现为一系列沿勉略构造带向松潘地块逆冲推覆的巨型构造. 而松潘地块向北俯冲其下, 由于周边块体阻挡, 西秦岭构造带以一系列弧形构造向南运动(张国伟等, 2004)(图 1). 西秦岭构造带及邻区处于活动地块的边界带上, 地震活动强烈, 强震频发. 据有记载的历史资料, 西秦岭构造带内发生过两次  $M8.0$  大地震, 邻近区域内还发生过多  $M \geq 8.0$  强震, 如 2008 年四川汶川大地震. 除  $M \geq 8.0$  强震频发外, 1500 年以来发生过  $M7.0-8.0$  强震 20 多次,  $M6.0-7.0$  地震 70 多次(图 2). 这些大地震都发生在活动块体的边界带上, 因此该区一直受到地震学家的广泛关注.

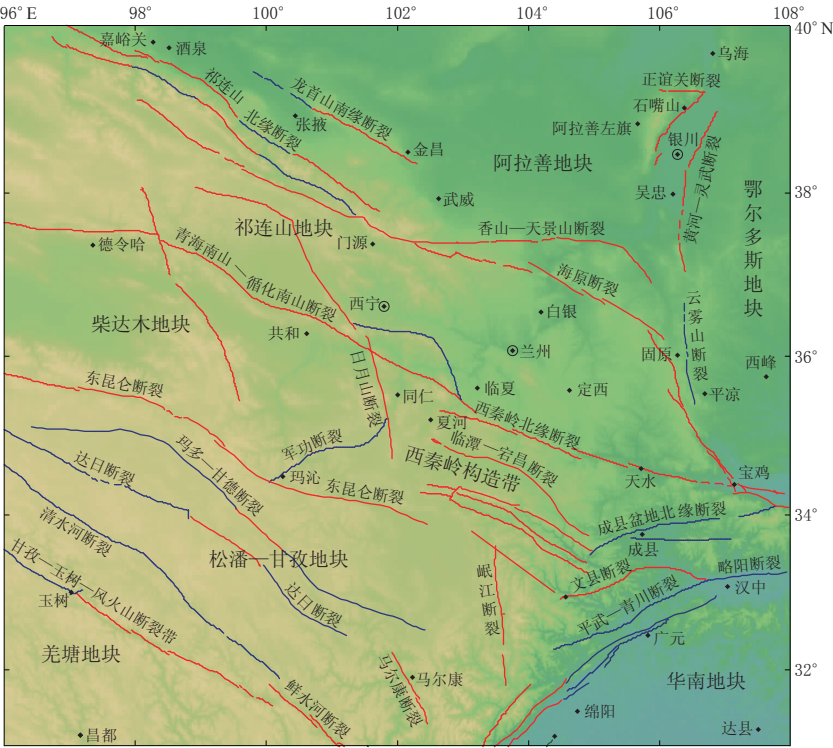
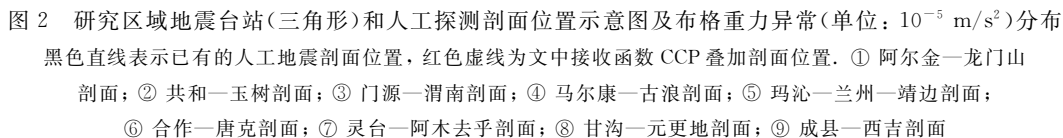


图 1 研究区域地质构造背景图

Fig.1 Tectonic sketch map for study area



Black thick lines represent the previous DSS profiles, and the red dashed line represents the location for receiver function CCP image in this paper. ① Altun–Longmenshan profile; ② Gonghe–Yushu profile; ③ Menyuan–Weinan profile; ④ Barkam–Gulang profile; ⑤ Maqen–Lanzhou–Jingbian profile; ⑥ Hezuo–Tangke profile; ⑦ Lingtai–Amqog profile; ⑧ Gangou–Yuangengdi profile; ⑨ Chengxian–Xiji profile.

为了研究该区深部构造,在西秦岭及其附近实施了一系列深部结构探测和研究计划(图2)。深地震测深剖面有阿尔金—龙门山剖面(王有学等,2005)、穿过西秦岭的共和—玉树剖面(王有学,钱辉,2000)、门源—渭南剖面(张少泉等,1985;王椿镛等,1995)、马尔康—古浪剖面(嘉世旭,张先康,2008;张先康等,2008)、玛沁—兰州—靖边剖面(李松林等,2002;赵金仁等,2005)、合作—唐克深地震反射剖面(高锐等,2006)、成县—西吉剖面(李清河,郭建康,1991)以及天水地区灵台—阿木去乎(闵祥仪等,1991)、甘沟—元更地等测深剖面(闵祥仪,1991)。除人工地震测深,沿测线还布设了流动地震台站进行观测,如玛沁—榆林剖面(陈九辉等,2005)、红原—武威剖面(段永红等,2007)以及通过地震层析成像、接收函数等方法对该区域进行的地壳结构研究(许忠淮等,2003;郭颢等,

2004; 李永华等, 2006; 周民都等, 2006). 另外, 还开展了大地电磁测深的探测与研究(赵国泽等, 2004; 汤吉等, 2005; 张季生等, 2007). 大量研究表明, 该区不同块体的地壳结构差异较大. 玛沁—兰州—靖边剖面的地壳结构显示自东北—西南地壳逐渐变厚. 地壳厚度的变化主要由下地壳厚度的变化所引起, 不同构造单元的地壳结构存在明显的差异(李松林等, 2002; 赵金仁等, 2005). 穿过西秦岭的地震剖面研究表明, 西秦岭构造带内部与两侧壳内及 Moho 界面较为平缓、起伏不大(高锐等, 2006; 张先康等, 2008). 层析成像、接收函数及其它地球物理方法研究也表明, 该区域地壳结构复杂, 不同块体之间差异较大(许忠淮等, 2003; 郭飏等, 2004; 赵国泽等, 2004; 汤吉等, 2005; 李永华等, 2006; 周民都等, 2006; Pan, Niu, 2011). 这些研究对认识西秦岭构造带的构造特征及其与周边构造的关系非常重要. 由于受观测资料限制, 对该区域整体研究仍不够充分, 对深部结构的认识也颇受限制. 随着地震台站的增加和观测数据的积累及质量的提高, 使我们对该区域的整体地壳结构特征进行分析成为可能, 这对进一步认识该区的深部孕震环境及青藏高原的动力学具有重要意义.

## 2 宽频带地震资料与解释方法

基于宽频带数字资料的远震接收函数方法是反演地下深部结构的有效途径之一. Langston(1979)提出基于等效震源条件下从远震 P 波波形提取台站下方介质响应的接收函数方法, 通过去除远震体波震源和传播路径上的响应来研究地球介质特性. Zandt 和 Ammon(1995)利用莫霍界面转换波 Ps 和多次转换波 PpPs 来研究地壳厚度和波速比, 而波速比对地壳组分所提供的约束, 要比仅用 P 波或 S 波速度提供的约束强得多, 因而取得了很好的结果. Zhu 和 Kanamori(2000)发展了接收函数的  $H$ - $k$  叠加方法, 提高了获取地壳厚度和波速比的可靠性. 地壳泊松比和地壳厚度是描述地壳结构和介质性质的两个重要参数(Christensen, 1996). P, S 波的波速比  $k = v_p/v_s$  与泊松比  $\nu = 0.5[1 - 1/(k^2 - 1)]$  密切相关, 因而波速比在约束地壳组分方面具有潜在重要性. 接收函数的  $H$ - $k$  叠加方法成为近年来进行地壳结构研究的一种常用的可靠方法. 通过远震体波波形中含有的莫霍界面的转换震相 Ps 以及两个后至震相 PpPs 和 PpSs+PsPs 的共同约束, 在设定地壳平均 P 波速度情况下求得地壳厚度  $H$  和波速比  $k$ . 地壳厚度  $H$ , 波速  $v_p$  和  $v_s$ , 入射波射线参数  $p$  具有如下关系:

$$\left\{ \begin{array}{l} H = \frac{t_{Ps}}{\sqrt{\frac{1}{v_s^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{v_p^2} - p^2}} \\ H = \frac{t_{PpPs}}{\sqrt{\frac{1}{v_s^2} - p^2} + \sqrt{\frac{1}{v_p^2} - p^2}} \\ H = \frac{t_{PpSs+PsPs}}{2\sqrt{\frac{1}{v_s^2} - p^2}} \end{array} \right. \quad (1)$$

Zhu 和 Kanamori (2000)提出地壳厚度  $H$  和波速比  $k$  可以由下式得到:

$$s(H, k) = \omega_1 r(t_{Ps}) + \omega_2 r(t_{PpPs}) - \omega_3 r(t_{PpSs+PsPs}), \quad (2)$$

式中,  $r(t)$  为径向接收函数,  $\omega_i$  为权重系数,  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ . 当具有正确地壳厚度和波速

比时, Ps, PpPs 和 PpSs+PsPs 这 3 个震相叠加相交,  $s(H, k)$  达到最大. 其最大值、地壳厚度和波速比可由网格搜索方法得到,  $\sigma_s$  为  $s(H, k)$  的估计方差. 地壳厚度  $H$  和波速比  $k$  的方差  $\sigma_H$  和  $\sigma_k$  可由下式估算出 (Zhu, Kanamori, 2000):

$$\begin{cases} \sigma_H^2 = \frac{2\sigma_s}{\partial^2 s / \partial H^2} \\ \sigma_k^2 = \frac{2\sigma_s}{\partial^2 s / \partial k^2} \end{cases} \quad (3)$$

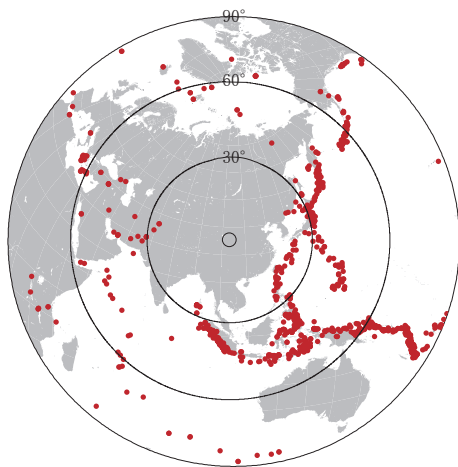


图 3 用于接收函数计算的  
远震事件分布图

Fig. 3 Locations of the teleseismic  
events used in this study

本文的研究区域为  $31^\circ\text{--}40^\circ\text{N}$ ,  $96^\circ\text{--}108^\circ\text{E}$ , 包括西秦岭地区及周边区域内的 117 个固定台站. 这些宽频带数字台站大部分为“九五”和“十五”期间建设的台站, 大部分位于基岩上, 观测条件良好. 本文选用 2006 年 7 月—2010 年 8 月的远震事件数据, 部分台站数据增加至 2011 年 4 月. 这些远震事件大部分来自西北和西南太平洋海域以及印度尼西亚地区, 中心圆为研究区域位置 (图 3). 大批高质量的观测数据为本研究奠定了基础 (郑秀芬等, 2009). 我们通过人工波形选取, 选出震中距在  $30^\circ\text{--}90^\circ$ 、震级  $M > 5.5$ 、信噪比较高的约 1400 个远震事件, 计算相应的

径向和切向接收函数. 通过对计算获得的接收函数逐个作检验, 挑选出具有清晰初至震相的接收函数用于本研究.

### 3 地壳厚度和波速比计算结果

对研究区域内 117 个台站提取远震 P 波接收函数. 接收函数的提取采用时间域的最大熵谱反褶积方法 (吴庆举等, 2003). 这种方法具有计算稳定、接收函数波形清晰的优点. 为了压制波形数据中噪音的影响, 使用系数  $\alpha$  为 2.0 的高斯滤波器计算接收函数. 参考西秦岭及邻区人工地震探测的相关成果 (李松林等, 2002; 王有学等, 2005; 高锐等, 2006; 张先康等, 2008), 选取地壳平均速度  $v_p = 6.20 \text{ km/s}$  作为叠加分析 P 波速度, Ps, PpPs 和 PpSs+PsPs 这 3 个震相的权重系数分别采用 0.7, 0.2 和 0.1, 用  $H$ - $k$  叠加分析方法 (Zhu, Kanamori, 2000) 求取各台站下方的地壳厚度  $H$  和波速比  $k$  及其误差. 受台站记录质量、场地条件、地下结构等多种因素的影响, 个别台站震相不清晰, 因此我们把结果按照质量分为  $a, b, c$  3 个级别: 把 Ps, PpPs 和 PpSs+PsPs 震相都比较清晰且与理论走时吻合较好的定为  $a$  级; 经仔细挑选后能比较清楚识别转换震相且具有足够接收函数条目的定为  $b$  级; 转换震相不清晰或接收函数条数太少而无法获得扫描结果的定为  $c$  级, 此种情况下不予采用. 表 1 为利用各台站接收函数求得的地壳厚度、波速比、误差、接收函数条数及质量分级. 从表 1 可以看出大部分台站的接收函数条数较多, 保证了结果的可靠性.

图 4 为位于西秦岭构造带内 4 个台站的  $H$ - $k$  叠加结果. 图中  $H$  与  $k$  的估计值由叠加函数灰度图中误差椭圆的中心点给出, 误差椭圆的大小表示估计值的离散程度. 灰度图下方给出了按照射线参数排列的用于  $H$ - $k$  叠加计算的接收函数, 并标出了预测的 Ps, PpPs



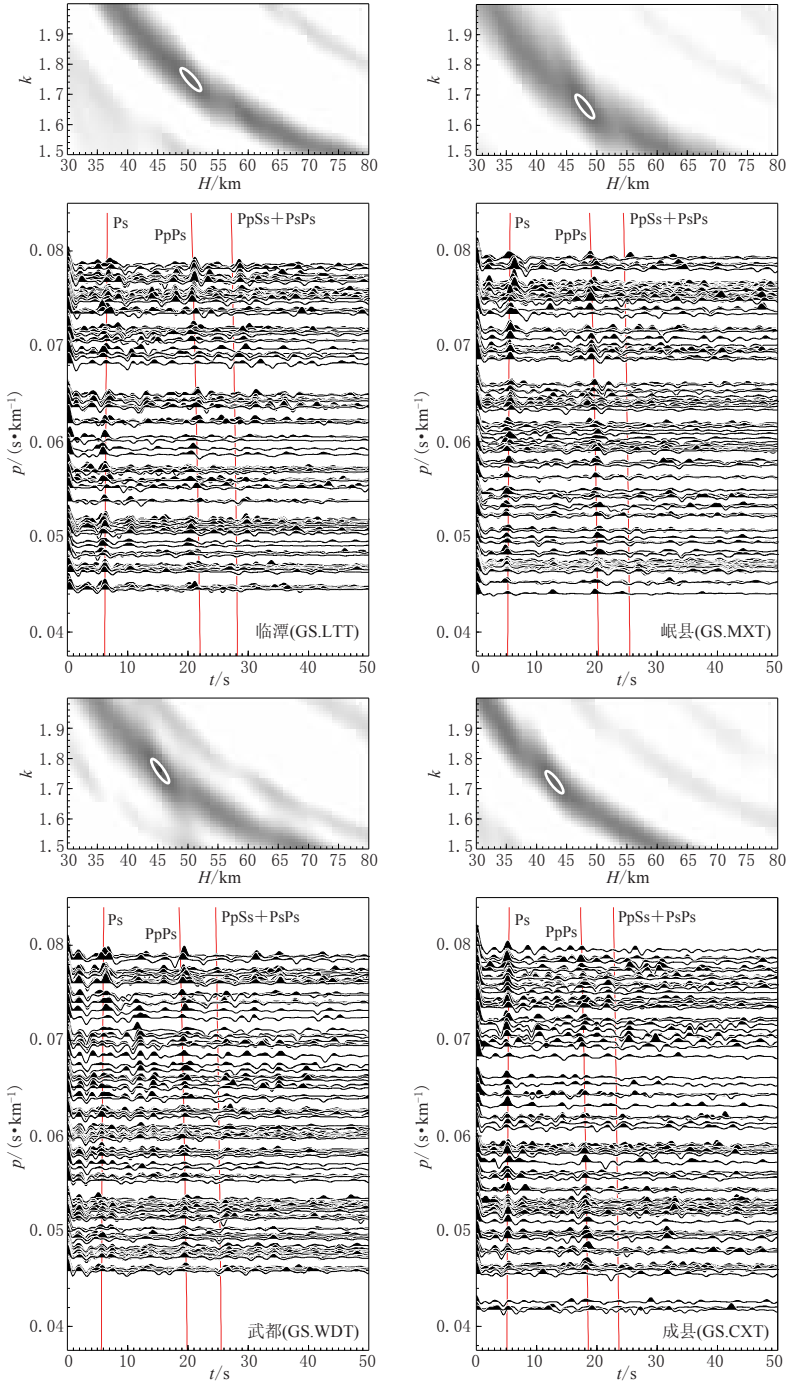


图 4 临潭、岷县、武都、成县 4 个台站  $H$ - $k$  叠加结果。图中显示了预测的走时曲线 (Ps, PpPs, PpSs+PsPs) 的位置和不确定性分析的误差椭圆

Fig. 4 Results of the  $H$ - $k$  stacking analysis at four stations GS. LTT, GS. MXT, GS. WDT, and GS. CXT. Radial receiver functions as a function of the ray parameters with predicted travel times of Ps, PpPs, and PpSs+PsPs from the optimum solution ( $H$ ,  $k$ ) and the uncertainties are given by the ellipse

表 1 研究区域内地震台站下方的地壳厚度和波速比  
Table 1 Crustal thickness  $H$  and  $v_p/v_s$  ratio  $k$  beneath the stations in the study area

序号	台站代码	台站名称	地壳厚度 $H/\text{km}$	波速比 $k$	条数	级别
1	GS. ANT	安宁	$51.9\pm2.50$	$1.76\pm0.07$	64	<i>a</i>
2	GS. AXX	安西	$49.9\pm2.27$	$1.77\pm0.04$	88	<i>a</i>
3	GS. BYT	白银	$50.5\pm1.77$	$1.70\pm0.04$	88	<i>a</i>
4	GS. CXT	成县	$43.0\pm1.75$	$1.72\pm0.04$	86	<i>b</i>
5	GS. DBT	迭部	$49.1\pm2.62$	$1.69\pm0.06$	72	<i>a</i>
6	GS. DXT	定西	$54.6\pm3.00$	$1.67\pm0.06$	97	<i>c</i>
7	GS. GTA	高台	$52.9\pm2.75$	$1.68\pm0.04$	112	<i>a</i>
8	GS. HJT	铧尖	$52.4\pm2.94$	$1.68\pm0.05$	88	<i>b</i>
9	GS. HNT	会宁	$46.1\pm1.91$	$1.77\pm0.05$	85	<i>b</i>
10	GS. HXP	河西堡	$49.1\pm3.01$	$1.74\pm0.05$	131	<i>a</i>
11	GS. HXT	环县	$47.6\pm2.72$	$1.84\pm0.07$	40	<i>c</i>
12	GS. HYQ	湟源	$59.2\pm2.71$	$1.69\pm0.05$	95	<i>a</i>
13	GS. HYS	红崖山	$46.0\pm2.24$	$1.73\pm0.05$	134	<i>a</i>
14	GS. HZT	合作	$51.7\pm1.66$	$1.71\pm0.03$	126	<i>a</i>
15	GS. JFS	金佛寺	$53.5\pm2.38$	$1.72\pm0.08$	107	<i>c</i>
16	GS. JNT	静宁	$50.5\pm2.08$	$1.75\pm0.05$	61	<i>b</i>
17	GS. JTA	景泰	$50.4\pm1.99$	$1.73\pm0.05$	75	<i>b</i>
18	GS. JYG	嘉峪关	$51.4\pm3.70$	$1.76\pm0.08$	80	<i>b</i>
19	GS. LTT	临潭	$50.5\pm2.54$	$1.74\pm0.05$	120	<i>a</i>
20	GS. LXA	临夏	$49.8\pm2.47$	$1.73\pm0.04$	131	<i>a</i>
21	GS. LZH	兰州	$51.5\pm2.58$	$1.76\pm0.05$	63	<i>b</i>
22	GS. MIQ	民勤	$51.1\pm3.20$	$1.75\pm0.06$	48	<i>b</i>
23	GS. MQT	玛曲	$54.0\pm2.64$	$1.77\pm0.05$	59	<i>b</i>
24	GS. MXT	岷县	$48.0\pm2.42$	$1.66\pm0.06$	157	<i>a</i>
25	GS. NXT	宁县	$45.1\pm2.26$	$1.76\pm0.07$	92	<i>a</i>
26	GS. PLT	平凉	$40.6\pm3.67$	$1.78\pm0.10$	151	<i>c</i>
27	GS. QLT	祁连东	$49.0\pm3.62$	$1.70\pm0.09$	148	<i>c</i>
28	GS. QTS	青头山	$54.1\pm2.63$	$1.72\pm0.06$	68	<i>b</i>
29	GS. SBC	石包城	$59.4\pm2.95$	$1.79\pm0.05$	61	<i>b</i>
30	GS. SDT	山丹	$52.9\pm2.23$	$1.72\pm0.04$	129	<i>b</i>
31	GS. SGS	四个山	$48.4\pm2.60$	$1.72\pm0.06$	78	<i>b</i>
32	GS. SGT	石岗	$46.6\pm2.71$	$1.75\pm0.06$	138	<i>b</i>
33	GS. SNT	肃南	$52.6\pm3.04$	$1.73\pm0.07$	76	<i>a</i>
34	GS. TSS	天水	$43.5\pm2.00$	$1.75\pm0.05$	120	<i>a</i>
35	GS. WDT	武都	$45.4\pm2.33$	$1.76\pm0.06$	129	<i>a</i>
36	GS. WSH	武山	$42.5\pm1.84$	$1.71\pm0.04$	66	<i>b</i>
37	GS. WXT	文县	$49.0\pm2.50$	$1.62\pm0.05$	94	<i>a</i>
38	GS. WYT	渭源	$48.8\pm2.08$	$1.73\pm0.05$	75	<i>b</i>
39	GS. YDT	永登	$50.5\pm2.58$	$1.77\pm0.05$	131	<i>b</i>
40	GS. ZHC	张家川	$44.5\pm2.57$	$1.74\pm0.06$	69	<i>b</i>
41	GS. ZHQ	舟曲	$47.9\pm2.56$	$1.72\pm0.06$	74	<i>b-</i>
42	GS. ZHY	张掖	$53.4\pm2.41$	$1.72\pm0.05$	94	<i>a</i>
43	NM. BYT	巴彦浩特	$49.0\pm2.61$	$1.72\pm0.07$	138	<i>b</i>
44	NM. WUH	乌海	$38.5\pm2.96$	$1.82\pm0.09$	142	<i>a</i>
45	NX. GYU	固原	$54.0\pm2.16$	$1.94\pm0.07$	146	<i>c</i>
46	NX. HYU	海原	$54.0\pm3.70$	$1.78\pm0.08$	72	<i>c</i>
47	NX. JYU	泾源	$49.9\pm2.36$	$1.85\pm0.06$	89	<i>b</i>



表 1 (续)

序号	台站代码	台站名称	地壳厚度 $H/\text{km}$	波速比 $k$	条数	级别
48	NX. LWU	灵武	$49.9 \pm 2.35$	$1.74 \pm 0.06$	68	<i>b</i>
49	NX. NSS	牛首山	$44.4 \pm 2.97$	$1.60 \pm 0.07$	75	<i>c</i>
50	NX. SZS	石嘴山	$42.9 \pm 3.33$	$1.82 \pm 0.07$	140	<i>b</i>
51	NX. TLE	陶乐	$41.9 \pm 2.85$	$1.75 \pm 0.06$	68	<i>b</i>
52	NX. TXN	同心	$46.0 \pm 1.56$	$1.82 \pm 0.05$	60	<i>b</i>
53	NX. XJI	西吉	$52.4 \pm 1.98$	$1.81 \pm 0.05$	55	<i>b</i>
54	NX. XSH	香山	$50.1 \pm 2.44$	$1.65 \pm 0.05$	128	<i>a</i>
55	CC. YCH	银川	$47.5 \pm 2.80$	$1.72 \pm 0.07$	95	<i>a</i>
56	NX. YCI	盐池	$40.1 \pm 1.83$	$1.77 \pm 0.07$	185	<i>a</i>
57	NX. ZHW	中卫	$48.9 \pm 1.86$	$1.69 \pm 0.05$	127	<i>a</i>
58	QH. BAM	班玛	$60.0 \pm 2.53$	$1.74 \pm 0.05$	73	<i>b</i>
59	QH. DAT	大通	$48.6 \pm 1.81$	$1.89 \pm 0.05$	50	<i>c</i>
60	QH. DAW	大武	$59.9 \pm 2.74$	$1.82 \pm 0.05$	66	<i>b</i>
61	QH. DLH	德令哈	$56.5 \pm 3.09$	$1.77 \pm 0.04$	93	<i>b</i>
62	QH. DUL	都兰	$57.5 \pm 2.68$	$1.71 \pm 0.04$	94	<i>b</i>
63	QH. GLC	甘都	$42.4 \pm 1.54$	$1.81 \pm 0.06$	30	<i>c</i>
64	QH. HUL	化隆	$57.0 \pm 2.60$	$1.67 \pm 0.06$	50	<i>c</i>
65	QH. HUY	湟源	$59.5 \pm 2.58$	$1.66 \pm 0.05$	91	<i>a</i>
66	QH. LED	乐都	$56.1 \pm 3.59$	$1.72 \pm 0.09$	77	<i>b</i>
67	QH. LJS	拉脊山	$54.0 \pm 3.02$	$1.80 \pm 0.06$	29	<i>c</i>
68	QH. LJX	李家峡	$50.5 \pm 2.53$	$1.76 \pm 0.05$	52	<i>c</i>
69	QH. LWS	龙王山	$56.0 \pm 2.22$	$1.76 \pm 0.07$	61	<i>a</i>
70	QH. LYX	龙羊峡	$54.4 \pm 2.53$	$1.69 \pm 0.06$	62	<i>b</i>
71	QH. MAD	玛多	$67.9 \pm 2.60$	$1.73 \pm 0.05$	155	<i>b</i>
72	QH. MEY	门源	$58.5 \pm 2.75$	$1.72 \pm 0.06$	102	<i>a</i>
73	QH. MIH	民和	$55.8 \pm 2.42$	$1.64 \pm 0.05$	91	<i>b</i>
74	QH. QIL	祁连	$60.5 \pm 2.54$	$1.72 \pm 0.04$	135	<i>b</i>
75	QH. QML	曲麻莱	$65.1 \pm 2.96$	$1.82 \pm 0.06$	71	<i>b</i>
76	QH. QSS	青沙山	$56.9 \pm 2.34$	$1.77 \pm 0.05$	63	<i>c</i>
77	QH. TOR	同仁	$53.0 \pm 2.91$	$1.74 \pm 0.06$	77	<i>b</i>
78	QH. TIJ	天峻	$58.0 \pm 2.87$	$1.68 \pm 0.06$	104	<i>b</i>
79	QH. WYS	共和南	$58.4 \pm 2.60$	$1.66 \pm 0.04$	60	<i>c</i>
80	QH. XIH	兴海	$53.0 \pm 2.99$	$1.76 \pm 0.06$	95	<i>c</i>
81	QH. XIN	西宁	$55.0 \pm 2.38$	$1.75 \pm 0.05$	66	<i>b</i>
82	QH. XJW	尖扎	$61.8 \pm 2.30$	$1.60 \pm 0.04$	60	<i>c</i>
83	QH. XUH	循化	$52.1 \pm 1.78$	$1.75 \pm 0.06$	107	<i>a</i>
84	QH. YUS	玉树	$68.9 \pm 2.68$	$1.81 \pm 0.05$	120	<i>b</i>
85	SC. AXI	安县	$42.6 \pm 2.09$	$1.72 \pm 0.04$	136	<i>a</i>
86	SC. BZH	巴中	$47.0 \pm 2.71$	$1.70 \pm 0.05$	106	<i>a</i>
87	SC. CD2	成都	$42.5 \pm 2.18$	$1.80 \pm 0.03$	81	<i>b</i>
88	SC. DFU	道孚	$59.1 \pm 2.44$	$1.79 \pm 0.05$	154	<i>b</i>
89	SC. GZI	甘孜	$61.6 \pm 3.18$	$1.78 \pm 0.05$	176	<i>b</i>
90	SC. HSH	黑水	$54.1 \pm 4.26$	$1.71 \pm 0.07$	157	<i>b</i>
91	SC. JJS	中江	$41.0 \pm 2.15$	$1.80 \pm 0.05$	235	<i>a</i>
92	SC. JMG	剑门关	$42.0 \pm 2.21$	$1.76 \pm 0.06$	160	<i>a</i>
93	SC. MEK	马尔康	$55.6 \pm 2.31$	$1.71 \pm 0.04$	173	<i>a</i>
94	SC. MXI	茂县	$46.4 \pm 2.70$	$1.70 \pm 0.07$	120	<i>b</i>
95	SC. PWU	平武	$42.5 \pm 2.38$	$1.67 \pm 0.08$	61	<i>b</i>

表 1 (续)

序号	台站代码	台站名称	地壳厚度 $H/\text{km}$	波速比 $k$	条数	级别
96	SC. QCH	青川	$43.5\pm2.27$	$1.69\pm0.05$	66	<i>b</i>
97	SC. REG	若尔盖	$52.0\pm2.75$	$1.73\pm0.07$	100	<i>a</i>
98	SC. RTA	壤塘	$59.1\pm3.27$	$1.78\pm0.06$	82	<i>b</i>
99	SC. SPA	松潘	$48.0\pm2.37$	$1.78\pm0.05$	48	<i>c</i>
100	SC. WCH	汶川	$52.6\pm1.97$	$1.70\pm0.05$	58	<i>c</i>
101	SC. XCO	西充	$44.5\pm1.79$	$1.78\pm0.05$	119	<i>a</i>
102	SC. XHA	宣汉	$47.9\pm2.60$	$1.75\pm0.06$	110	<i>a</i>
103	SC. XJI	小金	$57.4\pm2.88$	$1.82\pm0.05$	79	<i>b</i>
104	SC. YZP	都江堰	$40.9\pm2.72$	$1.87\pm0.07$	155	<i>b</i>
105	SC. ZJG	江油	$40.1\pm2.03$	$1.74\pm0.06$	103	<i>a</i>
106	SN. BIXT	彬县	$43.0\pm2.54$	$1.73\pm0.07$	80	<i>a</i>
107	SN. HZHT	汉中	$47.0\pm3.01$	$1.80\pm0.07$	61	<i>b</i>
108	SN. LIYO	麟游	$44.5\pm2.01$	$1.70\pm0.06$	117	<i>b</i>
109	SN. LOXT	陇县	$47.4\pm1.80$	$1.75\pm0.05$	118	<i>a</i>
110	SN. LUYA	略阳	$44.4\pm1.76$	$1.74\pm0.04$	50	<i>b</i>
111	SN. MEIX	眉县	$39.1\pm2.26$	$1.76\pm0.06$	54	<i>b</i>
112	SN. MIAx	勉县	$47.4\pm2.60$	$1.73\pm0.06$	42	<i>b</i>
113	SN. SHWA	上王	$40.9\pm2.54$	$1.80\pm0.06$	81	<i>b</i>
114	SN. SUDE	绥德	$40.5\pm2.13$	$1.78\pm0.06$	250	<i>a</i>
115	SN. TABT	太白	$40.9\pm2.33$	$1.75\pm0.06$	66	<i>b</i>
116	SN. XIXI	西乡	$45.5\pm4.73$	$1.80\pm0.14$	49	<i>c</i>
117	XZ. CAD	昌都	$71.8\pm3.19$	$1.72\pm0.04$	56	<i>b</i>

和 PpPs+PpSs 震相的走时曲线. 所选台站多次震相清晰, 接收函数质量均为 *a* 或 *b* 级, 结果可靠. 其中, 位于西秦岭构造带西部的临潭台下方的地壳厚度为 50.5 km, 相对较厚. 地壳厚度依次向东逐渐减薄, 如岷县台为 48.0 km, 武都台为 45.4 km. 位于西秦岭构造带东边缘附近的成县台地壳厚度相对最薄, 为 43.0 km. 临潭、岷县、武都和成县等 4 个台站下方的平均波速比分别为 1.74, 1.66, 1.76 和 1.72, 低于全球大陆地壳平均值 1.78.

4 地壳厚度和波速比  $v_p/v_s$  的分布特征

由于台站分布不均匀, 对不同构造块体的地壳结构反映程度也不完全相同. 在研究区域的西部, 如羌塘地块、松潘—甘孜地块西部、柴达木地块及阿拉善地块, 台站稀疏, 研究结果仅能反映该区域的大体趋势. 而西秦岭构造带及松潘—甘孜地块东部、祁连山地块东部及鄂尔多斯块体西缘地区, 台站相对密集, 研究结果可靠性较高.

4.1 地壳厚度分布特征

从地壳厚度分布图(图 5a)可以看出, 研究区域内不同地块地壳结构存在明显差异, 羌塘地块最厚约 72 km, 渭河盆地附近最薄约 39 km. 该区域地壳厚度整体上呈北北西向分布, 由西南向东北渐减减小. 穿过西秦岭构造带的地壳厚度南北方向变化较小, 这与该区域布格重力异常由西向东变化大, 以北北西和近南北走向展布具有相似的特征.

研究区内羌塘地块地壳最厚, 平均大于 70 km. 羌塘地块向北东方向到松潘—甘孜地块地壳变薄, 羌塘地块与松潘—甘孜地块的地壳厚度差异明显. 这一特征与共和—玉树测深结果一致(王有学, 钱辉, 2000). 松潘—甘孜地块内部地壳厚度也存在差异, 由西向东

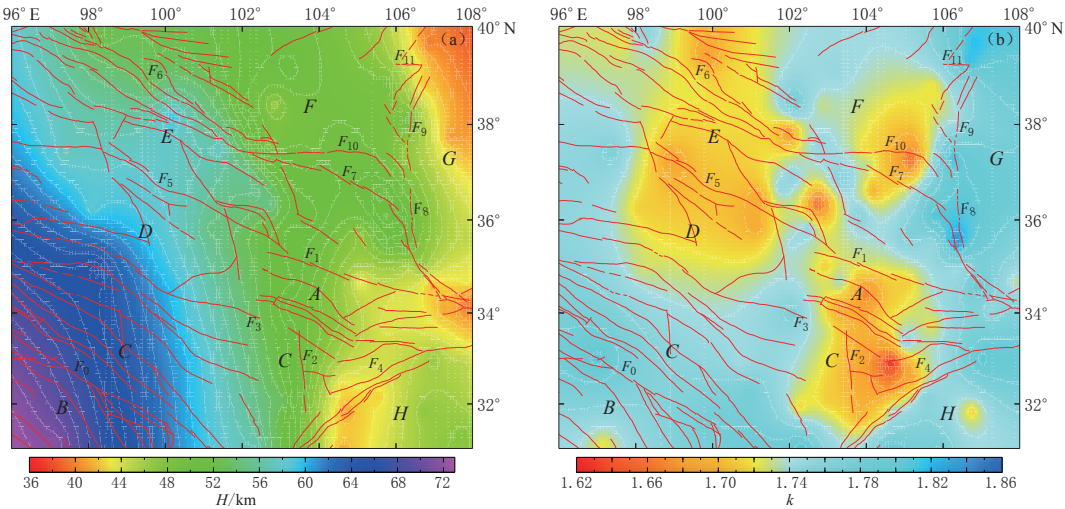


图 5 接收函数  $H-k$  叠加获得的地壳厚度  $H$  分布(a)和地壳平均波速比  $k$  分布(b)

A: 西秦岭构造带; B: 羌塘地块; C: 松潘—甘孜地块; D: 柴达木地块; E: 祁连山地块; F: 阿拉善地块;  
G: 鄂尔多斯地块; H: 华南地块.  $F_0$ : 甘孜—玉树断裂;  $F_1$ : 西秦岭北缘断裂;  $F_2$ : 岷江断裂;  
 $F_3$ : 东昆仑断裂;  $F_4$ : 平武—青川断裂;  $F_5$ : 青海南山断裂;  $F_6$ : 祁连山北缘断裂;  $F_7$ : 海原断裂;  
 $F_8$ : 云雾山断裂;  $F_9$ : 黄河—灵武断裂;  $F_{10}$ : 香山—天景山断裂;  $F_{11}$ : 正谊关断裂

Fig. 5 Variation of crustal thickness (a) and  $v_p/v_s$  ratio (b) in the study area estimated from the  $H-k$  stacking analysis

A: Western Qinling tectonic belt; B: Qiangtang block; C: Songpan–Garze block; D: Qaidam block; E: Qilianshan block; F: Alxa block; G: Ordos block; H: South China block.  $F_0$ : Garze–Yushu fault,  $F_1$ : Northern fringe fault of western Qinling;  $F_2$ : Minjiang fault;  $F_3$ : Eastern Kunlun fault;  $F_4$ : Pingwu–Qingchuan fault;  $F_5$ : Nanshan fault in Qinghai;  $F_6$ : Northern fringe fault of Qilianshan;  $F_7$ : Haiyuan fault;  $F_8$ : Yunwushan fault;  $F_9$ : Huanghe–Lingwu fault;  $F_{10}$ : Xiangshan–Tianjingshan fault;  $F_{11}$ : Zhengyiguan fault

地壳逐渐减薄(王椿镛等, 2003; 楼海等, 2008). 在甘孜—玉树断裂到东昆仑断裂之间地壳较厚, 为 60—69 km; 东北部的马尔康、松潘、若尔盖区域地壳相对较薄, 地壳厚度平均为 53 km; 平武—青川断裂附近的地壳厚度约 44 km.

西秦岭构造带内地壳厚度平均为 48 km, 其西部较厚, 如合作台为 51.7 km; 东部较薄, 如成县台为 43.0 km. 西秦岭构造带内南北向地壳厚度变化不大. 从松潘—甘孜地块的马尔康、松潘经西秦岭构造带、兰州地区至海原断裂带这一南北条带内, 表现为南北向地壳厚度变化不大的特征, 趋势与布格重力异常走向一致, 地壳平均厚度约为 50 km. 马尔康—古浪深地震测深剖面和合作—唐克深地震反射剖面结果也显示由松潘—甘孜地块向西秦岭南北方向上莫霍界面平缓、起伏不大(高锐等, 2006; 张先康等, 2007, 2008).

位于东昆仑断裂带北侧的柴达木地块地壳平均厚度约为 57 km, 南部靠近东昆仑断裂带较厚, 向北至青海南山—循化南山断裂地壳变薄. 由柴达木地块向北进入祁连山地块地壳厚度又呈增厚趋势, 在门源台和祁连台地壳厚度分别增至 58.5 km 和 60.5 km. 经祁连山构造带向阿拉善地块过渡, 地壳厚度开始急剧减薄, 靠近祁连山北缘断裂北侧台站地壳厚度平均为 53 km, 如张掖台地壳厚度为 53.4 km. 这与人得到的该区域地壳厚度变化特征(吴宣志, 吴春玲, 1995; 李清河等, 1998; 王有学, 钱辉, 2000; 王有学等, 2005; 李永华等, 2006; 周民都等, 2006)相一致.

区域内阿拉善地块地壳厚度平均为 47 km, 鄂尔多斯地块地壳厚度平均为 43 km, 两块体内部地壳厚度变化不大. 在两块体交界及向西秦岭构造带过渡的海原断裂、云雾山断裂、黄河—灵武断裂一带地壳厚度变化较大, 地壳结构复杂, 人工地震测深结果也显示这一区域地壳结构呈强烈的横向变化特征(李松林等, 2002; 张先康等, 2003; 陈九辉等, 2005; 赵金仁等, 2005).

4.2 波速比分布特征

图 5b 为研究区域的波速比分布. 总体而言, 该区地壳平均波速比较低, 为 1.74, 略低于全球大陆地壳平均波速比 1.78(Zandt, Ammon, 1995). 这一结果与 Pan 和 Niu (2011) 及李永华等(2006)的结果相一致. 西秦岭构造带内波速比在 1.66—1.76 之间, 平均为 1.72. 从西秦岭北缘断裂中部经临潭—宕昌断裂向南, 一直延伸到平武—青川断裂一带, 显示出较低的波速比异常, 波速比在 1.62—1.72 之间; 其中位于文县断裂上的文县台波速比最低, 为 1.62. 在东昆仑断裂带以南、岷江断裂以西的松潘—甘孜地块波速比相对较高(楼海等, 2008; 王椿镛等, 2008), 为 1.74—1.78, 与西秦岭构造带差异明显. 在柴达木地块北部、祁连山地块内部、松潘—甘孜地块北部及香山—天景山断裂带区域, 也显示出相对较低的波速比分布, 波速比大部分在 1.68—1.74 之间. 阿拉善地块、鄂尔多斯地块及华南地块在整个区域具有相对较高的波速比, 阿拉善地块波速比为 1.74—1.80, 华南地块为 1.70—1.74, 鄂尔多斯地块波速比大部分在 1.76—1.80 之间; 其中位于鄂尔多斯块体边界的云雾山断裂及黄河—灵武断裂到正谊关断裂一带波速比最高, 如云雾山断裂附近的涇源台为 1.85, 正谊关断裂附近的石嘴山台为 1.82.

5 西秦岭构造带接收函数 CCP 叠加剖面

为探讨西秦岭构造带地壳结构的横向变化, 我们用接收函数共转换点 (CCP) 叠加方法 (Zhu, 2000) 建构横跨构造带剖面(图 2 红色虚线)的地下结构图像. 图 6 显示了从若尔盖穿过西秦岭构造带和海原断裂带的地壳结构变化情况. 由于剖面上的台站分布不均匀, 部

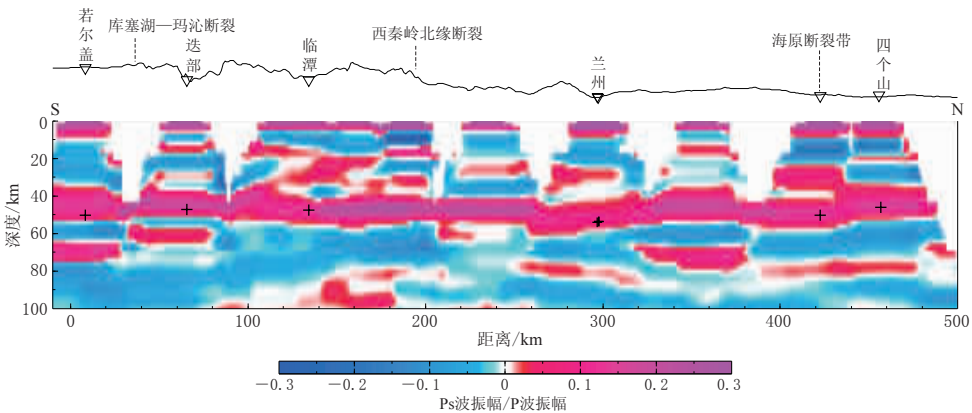


图 6 远震接收函数 CCP 叠加方法获得的二维地壳剖面

图中“+”表示台站下方接收函数  $H-k$  叠加获得的地壳厚度

Fig. 6 Receiver function CCP images along the profile denoted by the red dashed line in Fig. 2  
The symbol “+” indicates crustal thickness at corresponding station deduced from the  $H-k$  stacking analysis

分台站的间距过大, 故偏移叠加得到的地壳结构图像是粗略的. 从叠加剖面上看, 从若尔盖向西秦岭构造带过渡的库塞湖—玛沁断裂带, 莫霍界面略有向北下插趋势. 高锐等(2006)通过人工探测剖面发现了以北倾为主的强反射特征, 认为是由若尔盖盆地地下地壳整体向西秦岭构造带俯冲所致, 如此造成的上地壳加厚能很好地解释西秦岭构造带的低波速比分布. 西秦岭构造带内莫霍界面相对比较平坦, 这与人工探测结果一致(高锐等, 2006; 张先康等, 2008). 从地壳厚度变化趋势看, 西秦岭构造带地壳厚度在南北方向上变化很小, 莫霍界面平坦, 在东西方向上变化稍大, 这与近东西向延伸指向南的弧形构造走向并不完全一致. 东秦岭深地震反射剖面也显示平坦的莫霍反射面特征(袁学诚等, 1994). 对造山带内平坦的莫霍界面的一种解释是在挤压造山地壳增厚以后经历了强烈伸展的结果(高锐等, 2006; 张先康等, 2008). 从西秦岭北缘断裂向北, 在靠近兰州莫霍界面显示出变深趋势(陈九辉等, 2005), 而海原断裂带附近, 地壳结构表现出复杂的结构特征(李松林等, 2002).

## 6 讨论

实验室测试表明, 波速比的变化主要是由  $\text{SiO}_2$  含量的变化所引起的, 而与温度和压力关系不大. 较多铁镁质地壳对应着较高波速比, 长英质地壳对应着较低波速比(Christensen, 1996), 无论是斜长石含量的增加或  $\text{SiO}_2$  含量的减少都可以导致波速比的增加. 高孔隙度和流体或熔体的存在也能使岩石波速比提高. 大陆地壳主要由酸性岩( $v \leq 0.26$ )、中性岩( $0.26 < v \leq 0.28$ )和铁镁质基性岩( $0.28 < v \leq 0.30$ ) 3 个组分按照一定比例复合而成. 按照关系式, 泊松比  $\nu$  为 0.26, 0.28, 0.30, 分别对应着波速比  $k$  为 1.76, 1.81, 1.87, 泊松比大于 0.30—0.31 的可归因于部分熔融或破碎带(Christensen, 1996; 嵇少丞等, 2009). 在地壳温度和压力条件下对岩石的实验室测定得到, 波速比从上地壳的 1.74 变化到下地壳底部的 1.81, 全球平均地壳波速比为 1.78(Christensen, Mooney, 1995; Zandt, Ammon, 1995; Christensen, 1996). 同时地壳厚度、地形与波速比的关系隐含了大陆地壳形成和构造演化的重要信息(王椿镛等, 2008; 嵇少丞等, 2009).

西秦岭构造带及邻区大部分波速比低于或接近 1.76, 可以认为这种较低波速比主要由长英质酸性岩造成(嵇少丞等, 2009), 同时暗示该区铁镁质下地壳的减薄或缺失. 阿拉善地块和鄂尔多斯地块的较高波速比可能反映出中性岩的地壳组成. 接收函数反演结果不存在波速比大于 1.87 的台站. 在具有较高波速比的鄂尔多斯块体边界云雾山断裂—正谊关断裂一带最高波速比为 1.85. 根据波速比判断, 该区域内存在岩浆底侵或上地壳熔融的可能性很小. 在人工探测、层析成像等研究中发现的较大规模地壳低速层可能是由地壳构造运动所引起(闵祥仪等, 1991; 周民都等, 2006; 段永红等, 2007; 张先康等, 2008). 波速比分布图(图 5b)显示出, 在西秦岭构造带、松潘—甘孜地块东北部、柴达木地块北部、祁连山地块及香山—天景山断裂带具有较低的波速比分布. 从该区地壳结构看, 影响波速比的最主要因素是地壳物质组分. 这可能是在青藏高原隆升向东北挤压的过程中, 由于周边块体阻挡造成长英质上地壳叠置增厚引起的地壳组分变化, 从而造成波速比较低.

西秦岭构造带及邻区地壳厚度从西向东快速减薄, 地壳厚度变化趋势与该区域布格重力异常由西向东增大, 以北北西和近南北走向展布具有相似特征. 由松潘—甘孜向北经过西秦岭构造带, 一直到祁连山构造带和鄂尔多斯地块边缘, 地壳厚度变化趋势与青藏高原

东北缘的布格重力异常梯度带吻合, 布格重力异常由  $-400 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  快速增加到  $-200 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  (图 2), 与地壳厚度和地形的剧烈变化相符(马宗晋等, 2006). 按照重力均衡理论, 地形起伏以山根或反山根进行补偿, 均衡情况下地形起伏与地壳厚度具有很好的相关性(楼海等, 2008). 通过拟合计算, 结果表明该区域地壳厚度与海拔高度的总体相关性很好(图 7a). 由拟合曲线计算的理论均衡地壳厚度与反演得到的地壳厚度的偏差大多在 6 km 以内, 羌塘块体及附近的昌都、玉树等台站差值较大(张赤军, 2003), 因此可认为该区域基本处于均衡或弱均衡状态(王谦身等, 2009). 拟合线的斜率为 5.89, 斜率较低, 与青藏高原东部相似(Wang *et al.*, 2010). 按照 Airy 的重力均衡理论, 斜率  $t = \rho_0 / (\rho_1 - \rho_0)$ , 其中  $\rho_0$ ,  $\rho_1$  分别为地壳平均密度和地幔平均密度. 在假定地幔密度为全球平均密度情况下, 较低斜率表示地壳平均密度较低, 可能与地壳组分有关, 这与该区域平均为 1.74 的偏低波速比相一致.

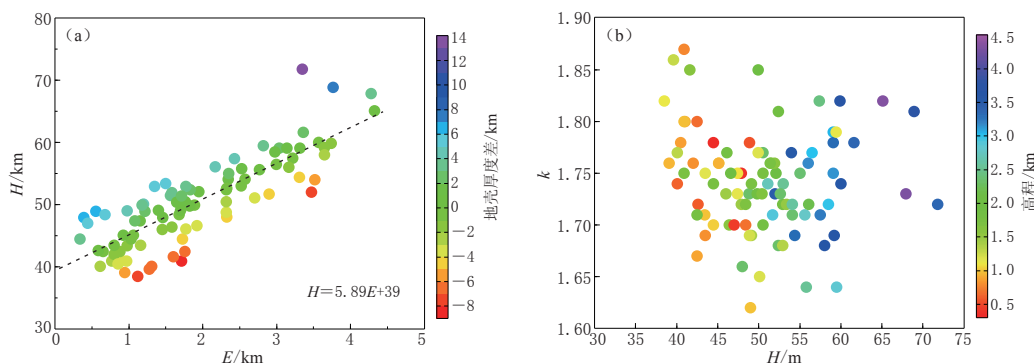


图 7 (a) 台站下方地壳厚度  $H$  与台站高程  $E$  关系图(不同颜色表示接收函数反演的地壳厚度与由拟合公式计算的地壳厚度差); (b)  $v_p/v_s$  波速比  $k$  与地壳厚度  $H$  关系图

Fig. 7 (a) Correlation of crustal thickness  $H$  with elevation  $E$ . Color scale bar shows the error between crustal thicknesses from the  $H-k$  stacking analysis and that calculated by the fit formula.

(b) Correlation of  $v_p/v_s$  ratio with crustal thickness  $H$

在构造挤压地壳缩短过程中, 特别是长英质上地壳更容易形成褶皱和推覆构造, 其结果会造成波速比随地壳厚度的增加而减小, 如青藏高原造山带(Ji *et al.*, 2009). 另外, 地壳整体拉伸或基性岩浆底侵也会造成波速比与地壳厚度呈负消长关系(嵇少丞等, 2009). 该区域构造特征和低波速比可能不支持这种情况. 为此我们计算了波速比与地壳厚度的关系图(图 7b). 总体来看, 其规律性关系不明显, 这可能与该区域不同块体经历的构造演化过程不同有关.

图 2 显示出该区域的强震主要分布在祁连山构造带、海原断裂带、西秦岭构造带东部及龙门山断裂带. 这一带波速比较低, 而邻近的阿拉善块体、鄂尔多斯块体及华南块体波速比相对较高, 波速比差异比较明显. 这种强震分布可能与青藏高原的挤压和周缘地块的阻挡引起的地壳构造运动有关.

## 7 结论

利用西秦岭构造带及邻区 117 个固定台站的高质量地震观测数据, 通过质量筛选和远震接收函数反演, 获得台站下方的地壳厚度和波速比, 并分析了地壳厚度和波速比分布特



征、地壳厚度与波速比的关系以及接收函数叠加剖面。结果表明:

1) 西秦岭构造及其邻区地壳结构复杂, 不同地块存在明显差异。地壳厚度整体上呈北北西向分布, 自西南向东北逐渐减小, 穿过西秦岭构造带的南北方向变化较小, 与该区域布格重力异常呈北北西和近南北走向展布相似, 表现出青藏高原东北缘过渡带的特征。羌塘地块地壳厚度最厚, 约 72 km; 渭河盆地附近最薄, 约 39 km。地壳平均波速比为 1.74, 低于 1.78 的全球大陆地壳平均波速比。在西秦岭构造带、松潘—甘孜地块东北部、柴达木地块北部、祁连山地块及香山—天景山断裂带具有较低的波速比分布, 阿拉善块体、鄂尔多斯块体和云雾山断裂、黄河—灵武断裂到正谊关断裂一带波速比较高, 不存在大于 1.87 的高或超高波速比分布。

2) 西秦岭构造带内平均地壳厚度为 48 km, 波速比在 1.66—1.76 之间, 平均为 1.72, 相对具有较低波速比, 呈过渡带特征。西秦岭构造带内莫霍界面呈南北向平坦变化趋势, 与西秦岭构造带后期经历了强烈的伸展有关; 与近东西向延伸指向南的弧形构造走向不一致可能是西秦岭构造带向南运动的反映。接收函数叠加剖面大致反映的若尔盖盆地下地壳向西秦岭构造带俯冲, 可能是造成西秦岭构造带地壳增厚的原因。

3) 西秦岭构造带地壳厚度、地形高程和波速比关系反映了该区域地壳的低密度特征。较低波速比主要由长英质酸性岩造成, 反映了地壳增厚可能是由上地壳叠置而造成, 无高或超高波速比分布说明存在岩浆底侵或上地壳熔融的可能性很小。综合分析, 青藏高原向东北方向的挤压和周边块体的阻挡是造成该区域复杂地壳结构的主要原因。

朱露培教授提供接收函数计算程序, 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和甘肃省监测中心提供地震波形数据, 审稿专家提出中肯的修改意见, 在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 陈虹, 胡健民, 武国利, 高卫. 2010. 西秦岭勉略带陆内构造变形研究[J]. 岩石学报, **26**(4): 1277–1288.
- Chen H, Hu J M, Wu G L, Gao W. 2010. Study on the intracontinental deformation of the Mian-Lue suture belt, western Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, **26**(4): 1277–1288 (in Chinese).
- 陈九辉, 刘启元, 李顺成, 郭飘, 赖院根. 2005. 青藏高原东北缘—鄂尔多斯地块地壳上地幔 S 波速度结构[J]. 地球物理学报, **48**(2): 333–342.
- Chen J H, Liu Q Y, Li S C, Guo B, Lai Y G. 2005. Crust and upper mantle S-wave velocity structure across northeastern Tibetan Plateau and Ordos block[J]. *Chinese J Geophys*, **48**(2): 333–342 (in Chinese).
- 陈岳龙, 李大鹏, 周建, 张宏飞, 刘飞, 聂兰仕, 蒋丽婷, 柳小明. 2008. 中国西秦岭碎屑锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地学前缘, **15**(4): 88–107.
- Chen Y L, Li D P, Zhou J, Zhang H F, Liu F, Nie L S, Jiang L T, Liu X M. 2008. U-Pb ages of zircons in western Qinling Mountain, China, and their tectonic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, **15**(4): 88–107 (in Chinese).
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: D 辑, **32**(12): 1020–1030.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, Yang X P, Min W, Chu Q Z. 2002. Basic feature of China active structures[J]. *Science in China: Series D*, **32**(12): 1020–1030 (in Chinese).
- 段永红, 张先康, 刘志, 徐朝繁, 王夫运, 潘纪顺, 梁国经. 2007. 阿尼玛卿缝合带东段地壳结构的接收函数研究[J]. 地震学报, **29**(5): 483–491.
- Duan Y H, Zhang X K, Liu Z, Xu Z F, Wang F Y, Pan J S, Liang G J. 2007. Crustal structure using receiver function

- in the east part of A'nyemaqen suture belt[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(5): 483–491 (in Chinese).
- 高锐, 马永生, 李秋生, 朱铨, 张季生, 王海燕, 李鹏武, 卢占武, 管烨. 2006. 松潘地块与西秦岭造山带下地壳的性质和关系: 深地震反射剖面的揭露[J]. *地质通报*, **25**(12): 1361–1367.
- Gao R, Ma Y S, Li Q S, Zhu X, Zhang J S, Wang H Y, Li P W, Lu Z W, Guan Y. 2006. Structure of the lower crust beneath the Songpan block and West Qinling orogen and their relation as revealed by deep seismic reflection profiling[J]. *Geological Bulletin of China*, **25**(12): 1361–1367 (in Chinese).
- 郭飏, 刘启元, 陈九辉, 赵大鹏, 李顺成, 赖院根. 2004. 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*, **47**(5): 790–797.
- Guo B, Liu Q Y, Chen J H, Zhao D P, Li S C, Lai Y G. 2004. Seismic tomographic imaging of the crust and upper mantle beneath the northeastern edge of the Qinghai-Xizang Plateau and the Ordos area[J]. *Chinese J Geophys*, **47**(5): 790–797 (in Chinese).
- 嵇少丞, 王茜, 杨文采. 2009. 华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义[J]. *地质学报*, **83**(3): 324–330.
- Ji S C, Wang Q, Yang W C. 2009. Correlation between crustal thickness and Poisson's ratio in the North China Craton and its implication for lithospheric thinning[J]. *Acta Geologica Sinica*, **83**(3): 324–330 (in Chinese).
- 嘉世旭, 张先康. 2008. 青藏高原东北缘深地震测深震相研究与地壳细结构[J]. *地球物理学报*, **51**(5): 1431–1443.
- Jia S X, Zhang X K. 2008. Study on the crust phases of deep seismic sounding experiments and fine crust structures in the northeast margin of Tibetan Plateau[J]. *Chinese J Geophys*, **51**(5): 1431–1443 (in Chinese).
- 姜晓玮, 王江海, 张会化. 2003. 西秦岭断裂走滑与盆地的耦合: 西秦岭—松甘块体新生代向东走滑挤出的证据[J]. *地学前缘*, **10**(3): 201–208.
- Jiang X W, Wang J H, Zhang H H. 2003. Coupling between strike-slip faults and basins: The evidence for Cenozoic eastward extrusion of the west Qinling-Songgan block[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(3): 201–208 (in Chinese).
- 李清河, 郭建康, 周民都, 魏德晴, 范冰, 侯晓钰. 1991. 成县—西吉剖面地壳速度结构[J]. *西北地震学报*, **13**(S1): 37–43.
- Li Q H, Guo J K, Zhou M D, Wei D Q, Fan B, Hou X Y. 1991. The velocity structure of Chengxian-Xiji profile[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **13**(S1): 37–43 (in Chinese).
- 李清河, 张元生, 涂毅敏, 范兵. 1998. 祁连山—河西走廊地壳速度结构及速度与电性的联合解释[J]. *地球物理学报*, **41**(2): 197–209.
- Li Q H, Zhang Y S, Tu Y M, Fan B. 1998. The combined interpretation of crustal velocity and electrical resistivity in Qilianshan mountain-Hexi corridor region[J]. *Chinese J Geophys*, **41**(2): 197–210 (in Chinese).
- 李松林, 张先康, 张成科, 赵金仁, 成双喜. 2002. 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*, **45**(2): 210–217.
- Li S L, Zhang X K, Zhang C K, Zhao J R, Cheng S X. 2002. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqen-Lanzhou-Jingbian by means of deep seismic sounding profile[J]. *Chinese J Geophys*, **45**(2): 210–217 (in Chinese).
- 李永华, 吴庆举, 安张辉, 田小波, 曾融生, 张瑞青, 李红光. 2006. 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*, **49**(5): 1359–1368.
- Li Y H, Wu Q J, An Z H, Tian X B, Zeng R S, Zhang R Q, Li H G. 2006. The Poisson ratio and crustal structure across the NE Tibetan Plateau determined from receiver functions[J]. *Chinese J Geophys*, **49**(5): 1359–1368 (in Chinese).
- 楼海, 王椿镛, 吕智勇, 姚志祥, 戴仕贵, 尤惠川. 2008. 2008 年汶川  $M_{\text{s}}8.0$  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 H, Wang C Y, Lü Z Y, Yao Z X, Dai S G, You H C. 2008. Deep tectonic setting of the 2008 Wenchuan  $M_{\text{s}}8.0$  earthquake in southwestern China[J]. *Science in China: Series D*, **38**(10): 1207–1220 (in Chinese).
- 马宗晋, 高祥林, 宋正范. 2006. 中国布格重力异常水平梯度图的判读和构造解释[J]. *地球物理学报*, **49**(1): 106–114.
- Ma Z J, Gao X L, Song Z F. 2006. Analysis and tectonic interpretation to the horizontal-gradient map calculated from Bouguer gravity data in the China Mainland[J]. *Chinese J Geophys*, **49**(1): 106–114 (in Chinese).

- 闵祥仪. 1991. 天水地震区人工地震测深观测系统与观测资料[J]. 西北地震学报, **13**(S1): 7-15.
- Min X Y. 1991. The observation system and the data of DSS in Tianshui earthquake area[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **13**(S1): 7-15 (in Chinese).
- 闵祥仪, 周民都, 郭建康, 魏德晴, 张元生, 侯晓钰, 宋杰. 1991. 灵台—阿木去乎剖面地壳速度结构[J]. 西北地震学报, **13**(S1): 29-36.
- Min X Y, Zhou M D, Guo J K, Wei D Q, Zhang Y S, Hou X Y, Song J. 1991. The crustal velocity structure in Lingtai-Amuquhu profile[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **13**(S1): 29-36 (in Chinese).
- 汤吉, 詹艳, 赵国泽, 邓前辉, 王继军, 陈小斌, 赵俊猛, 宣飞. 2005. 青藏高原东北缘玛沁—兰州—靖边剖面地壳上地幔电性结构研究[J]. 地球物理学报, **48**(5): 1205-1216.
- Tang J, Zhan Y, Zhao G Z, Deng Q H, Wang J J, Chen X B, Zhao J M, Xuan F. 2005. Electrical conductivity structure of the crust and upper mantle in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau along the profile Maqen-Lanzhou-Jingbian[J]. *Chinese J Geophys*, **48**(5): 1205-1216 (in Chinese).
- 王椿镭, 韩渭宾, 吴建平, 楼海, 白志明. 2003. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构[J]. 地震学报, **25**(3): 229-241.
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, Lou H, Bai Z M. 2003. Crustal structure beneath the Songpan-Garze orogenic belt[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **25**(3): 229-241 (in Chinese).
- 王椿镭, 林中洋, 陈学波. 1995. 青海门源—福建宁德地学断面综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, **38**(5): 590-598.
- Wang C Y, Lin Z Y, Chen X B. 1995. Comprehensive study of geophysics on geoscience transect from Menyuan, Qinghai Province, to Ningde, Fujian Province, China[J]. *Chinese J Geophys*, **38**(5): 590-598 (in Chinese).
- 王椿镭, 楼海, 吕智勇, 吴建平, 常利军, 戴仕贵, 尤惠川, 唐方头, Zhu L P, Silver P. 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 C Y, Lou H, Lü Z Y, Wu J P, Chang L J, Dai S G, You H C, Tang F T, Zhu L P, Silver P. 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: Series D*, **51**(2): 263-274.
- 王谦身, 滕吉文, 张永谦, 张雪梅, 杨辉. 2009. 四川中西部地区地壳结构与重力均衡[J]. 地球物理学报, **52**(2): 579-583.
- Wang Q S, Teng J W, Zhang Y Q, Zhang X M, Yang H. 2009. The crustal structure and gravity isostasy in the middle western Sichuan area[J]. *Chinese J Geophys*, **52**(2): 579-583 (in Chinese).
- 王有学, 钱辉. 2000. 青海东部地壳速度结构特征研究[J]. 地学前缘, **7**(4): 568-579.
- Wang Y X, Qian H. 2000. Study of crustal velocity structure in east Qinghai[J]. *Earth Science Frontiers*, **7**(4): 568-579 (in Chinese).
- 王有学, Mooney W D, 韩果花, 袁学诚, 姜枚. 2005. 台湾—阿尔泰地学断面阿尔金—龙门山剖面的地壳纵波速度结构[J]. 地球物理学报, **48**(1): 98-106.
- Wang Y X, Mooney W D, Han G H, Yuan X C, Jiang M. 2005. Crustal P-wave velocity structure from Altyn Tagh to Longmen mountains along the Taiwan: Altay geoscience transect[J]. *Chinese J Geophys*, **48**(1): 98-106 (in Chinese).
- 王志才, 张培震, 张广良, 李传友, 郑德文, 袁道阳. 2006. 西秦岭北缘构造带的新生代构造活动: 兼论对青藏高原东北缘形成过程的指示意义[J]. 地学前缘, **13**(4): 119-135.
- Wang Z C, Zhang P Z, Zhang G L, Li C Y, Zheng D W, Yuan D Y. 2006. Tertiary tectonic activities of the north frontal fault zone of the west Qinling mountains: Implications for the growth of the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, **13**(4): 119-135 (in Chinese).
- 吴庆举, 田小波, 张乃铃, 李卫平, 曾融生. 2003. 计算台站接收函数的最大熵谱反褶积方法[J]. 地震学报, **25**(4): 382-389.
- Wu Q J, Tian X B, Zhang N L, Li W P, Zeng R S. 2003. Receiver function estimated by maximum entropy deconvolution[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **25**(4): 382-389 (in Chinese).
- 吴庆举, 曾融生. 1998. 用宽频带远震接收函数研究青藏高原的地壳结构[J]. 地球物理学报, **41**(5): 669-679.
- Wu Q J, Zeng R S. 1998. The crustal structure of Qinghai-Xizang Plateau inferred from broadband teleseismic waveform[J].

- Chinese J Geophys*, **41**(5): 669–679 (in Chinese).
- 吴宣志, 吴春玲, 卢杰, 吴杰. 1995. 利用深地震反射剖面研究北祁连—河西走廊地壳细结构[J]. *地球物理学报*, **38**(S2): 29–35.
- Wu X Z, Wu C L, Lu J, Wu J. 1995. Research on the fine crustal structure of the northern Qilian–Hexi corridor by deep seismic reflection[J]. *Chinese J Geophys*, **38**(S2): 29–35 (in Chinese).
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 嵇少丞, 张泽明, 刘焰. 2011. 印度—亚洲碰撞大地构造[J]. *地质学报*, **85**(1): 1–33.
- Xu Z Q, Yang J S, Li H B, Ji S C, Zhang Z M, Liu Y. 2011. On the tectonics of the India–Asia collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, **85**(1): 1–33 (in Chinese).
- 许忠淮, 汪素云, 裴顺平. 2003. 青藏高原东北缘地区 Pn 波速度的横向变化[J]. *地震学报*, **25**(1): 24–31.
- Xu Z H, Wang S Y, Pei S P. 2003. Lateral variation of Pn velocity beneath northeastern marginal region of Qingzang Plateau[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **25**(1): 24–31 (in Chinese).
- 袁学诚, 徐明才, 唐文榜, 王庆海. 1994. 东秦岭陆壳深地震反射剖面[J]. *地球物理学报*, **37**(6): 749–758.
- Yuan X C, Xu M C, Tang W B, Wang Q H. 1994. Eastern Qinling seismic reflection profiling[J]. *Chinese J Geophys*, **37**(6): 749–758 (in Chinese).
- 张赤军. 2003. 地壳对不同波长地形在重力场中的响应[J]. *地球物理学进展*, **18**(2): 342–347.
- Zhang C J. 2003. The gravity response in crust on different wavelength topography[J]. *Progress in Geophysics*, **18**(2): 342–347 (in Chinese).
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. *地学前缘*, **11**(3): 23–32.
- Zhang G W, Guo A L, Yao A P. 2004. Western Qinling–Songpan continental tectonic node[J]. *Earth Science Frontiers*, **11**(3): 23–32 (in Chinese).
- 张季生, 高锐, 李秋生, 王海燕, 朱海华. 2007. 松潘—甘孜和西秦岭造山带地球物理特征及基底构造研究[J]. *地质论评*, **53**(2): 261–266.
- Zhang J S, Gao R, Li Q S, Wang H Y, Zhu H H. 2007. A study on geophysical characteristic and basement in the Songpan–Garze and western Qinling orogenic belt[J]. *Geological Review*, **53**(2): 261–266 (in Chinese).
- 张培震, 甘卫军, 沈正康, 王敏. 2005. 中国大陆现今构造作用的地块运动和连续变形耦合模型[J]. *地质学报*, **79**(6): 748–756.
- Zhang P Z, Gan W J, Shen Z K, Wang M. 2005. A coupling model of rigid-block movement and continuous deformation: Patterns of the present-day deformation of China’s continent and its vicinity[J]. *Acta Geologica Sinica*, **79**(6): 748–756 (in Chinese).
- 张少泉, 武利均, 郭建明, 陈学波, 赵静娴, 丁韞玉, 黄长林, 张诚, 陈志泰. 1985. 中国西部门源—平凉—渭南剖面深地震测深剖面的解释[J]. *地球物理学报*, **28**(5): 460–472.
- Zhang S Q, Wu L J, Guo J M, Chen X B, Zhao J X, Ding W Y, Huang C L, Zhang C, Chen Z T. 1985. An interpretation of the DSS data on Menyuan–Pingliang–Weinan profile in west China[J]. *Chinese J Geophys*, **28**(5): 460–472 (in Chinese).
- 张先康, 李松林, 王夫运, 嘉世旭, 方盛明. 2003. 青藏高原东北缘、鄂尔多斯和华北唐山震区的地壳结构差异: 深地震测深的结果[J]. *地震地质*, **25**(1): 52–59.
- Zhang X K, Li S L, Wang F Y, Jia S X, Fang S M. 2003. Differences of crustal structures in northeastern edge of Tibet Plateau, Ordos and Tangshan earthquake region in North China: Results of deep seismic sounding[J]. *Seismology and Geology*, **25**(1): 52–59 (in Chinese).
- 张先康, 杨卓欣, 徐朝繁, 潘纪顺, 刘志, 王夫运, 嘉世旭, 赵金仁, 张成科, 孙国伟. 2007. 阿尼玛卿缝合带东段上地壳结构: 马尔康—碌曲—古浪深地震测深剖面结果[J]. *地震学报*, **29**(6): 592–604.
- Zhang X K, Yang Z X, Xu Z F, Pan J S, Liu Z, Wang F Y, Jia S X, Zhao J R, Zhang C K, Shun G W. 2007. Upper crust structure of eastern A’nyemaqen suture zone: Results of Barkam–Luqu–Gulang deep seismic sounding profile[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(6): 592–604 (in Chinese).
- 张先康, 嘉世旭, 赵金仁, 张成科, 杨健, 王夫运, 张建狮, 刘宝峰, 孙国伟, 潘素珍. 2008. 西秦岭—东昆仑及邻近地区地壳结构: 深地震宽角反射/折射剖面结果[J]. *地球物理学报*, **51**(2): 439–450.

- Zhang X K, Jia S X, Zhao J R, Zhang C K, Yang J, Wang F Y, Zhang J S, Liu B F, Sun G W, Pan S Z. 2008. Crustal structures beneath West Qinling–East Kunlun orogen and its adjacent area: Results of wide-angle seismic reflection and refraction experiment[J]. *Chinese J Geophys*, **51**(2): 439–450 (in Chinese).
- 赵国泽, 汤吉, 詹艳, 陈小斌, 卓贤军, 王继军, 宣飞, 邓前辉, 赵俊猛. 2004. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究[J]. 中国科学: D 辑, **34**(10): 908–918.
- Zhao G Z, Tang J, Zhan Y, Chen X B, Zhuo X J, Wang J J, Xuan F, Deng Q H, Zhao J M. 2004. Relation between electricity structure of the crust and deformation of crustal blocks on the northeastern margin of Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Science in China: Series D*, **34**(10): 908–918 (in Chinese).
- 赵金仁, 李松林, 张先康, 杨卓欣, 张成科, 刘宝峰, 张建狮, 潘素珍. 2005. 青藏高原东北缘莫霍界面的三维空间构造特征[J]. 地球物理学报, **48**(1): 78–85.
- Zhao J R, Li S L, Zhang X K, Yang Z X, Zhang C K, Liu B F, Zhang J S, Pan S Z. 2005. Three dimensional Moho geometry beneath the northeast edge of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Chinese J Geophys*, **48**(1): 78–85 (in Chinese).
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 姚志祥, 梁建宏, 郑洁. 2009. “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[J]. 地球物理学报, **52**(5): 1412–1417.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, Yao Z X, Liang J H, Zheng J. 2009. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese J Geophys*, **52**(5): 1412–1417 (in Chinese).
- 周民都, 张元生, 石雅镠, 张树勋, 范兵. 2006. 青藏高原东北缘地壳三维速度结构[J]. 地球物理学进展, **21**(1): 127–134.
- Zhou M D, Zhang Y S, Shi Y L, Zhang S X, Fan B. 2006. Three-dimensional crustal velocity structure in the northeastern margin of the Qinghai–Tibetan Plateau[J]. *Progress in Geophysics*, **21**(1): 127–134 (in Chinese).
- Christensen N I. 1996. Poisson’s ratio and crustal seismology[J]. *J Geophys Res*, **101**(B2): 3139–3156.
- Christensen N I, Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view [J]. *J Geophys Res*, **100**(B6): 9761–9788.
- Ji S C, Wang Q, Salisbury M H. 2009. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson’s ratio[J]. *Tectonophysics*, **463**(1/2/3/4): 15–30.
- Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves[J]. *J Geophys Res*, **84**(B9): 4749–4762.
- Pan S Z, Niu F L. 2011. Large contrasts in crustal structure and composition between the Ordos Plateau and the NE Tibetan Plateau from receiver function analysis[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **303**(3/4): 291–298.
- Wang C Y, Zhu L P, Lou H, Huang B C, Yao Z X, Luo X H. 2010. Crustal thickness and Poisson’s ratios in the eastern Tibetan Plateau and their tectonic implications[J]. *J Geophys Res*, **115**: B011301. doi:10.1029/2010JB007527.
- Zandt G, Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson’s ratio[J]. *Nature*, **374**(6518): 152–154.
- Zhu L P. 2000. Crustal structure across the San Andreas fault, southern California from teleseismic converted waves[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **179**(1): 183–190.
- Zhu L P, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. *J Geophys Res*, **105**(B2): 2969–2980.