

# 新疆地区地壳 S 波速度结构及径向各向异性研究<sup>①</sup>

周 铭<sup>1,2</sup>, 李红谊<sup>1,3</sup>, 李信富<sup>1,3</sup>, 谭 静<sup>3</sup>, 孙三健<sup>3</sup>, 欧阳龙斌<sup>3</sup>, 郑 丹<sup>3</sup>

(1.“地下信息探测技术与仪器”教育部重点实验室(中国地质大学,北京),北京 100083;

2.中国地震局地球物理勘探中心,河南 郑州 450002; 3.中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083)

**摘要:**应用背景噪声层析成像方法对新疆地区地壳 S 波速度结构以及径向各向异性进行了研究。利用中国地震局数字地震台网和吉尔吉斯斯坦及哈萨克斯坦台网记录的 2009 年 1 月至 9 月的连续三分量背景噪声数据,对所有台站对之间进行互相关计算,通过时频分析和相位匹配技术得到了每个台站对 8 s 到 50 s 的群速度和相速度频散曲线,显示出明显的横向不均匀性,与研究区主要地质结构和构造单元具有良好的相关性。通过反演纯路径频散数据得到了地壳和上地幔顶部的 S 波速度结构和径向各向异性的结果;根据 SH 波和 SV 波速度结构差异得到研究区内的径向各向异性的分布特征;讨论了各向异性产生的机理。

**关键词:**新疆地区;塔里木盆地;背景噪声层析成像;群速度;相速度;径向各向异性

中图分类号: P315.31

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1047-12

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1047

## Crustal S-wave Velocity Structure and Radial Anisotropy in Xinjiang Region

ZHOU Ming<sup>1,2</sup>, LI Hong-yi<sup>1,3</sup>, LI Xin-fu<sup>1,3</sup>, TAN Jing<sup>3</sup>,  
SUN San-jian<sup>3</sup>, OUYANG Long-bin<sup>3</sup>, ZHENG Dan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China;

2. Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou, Henan 450002, China;

3. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing) 100083, China)

**Abstract:** Northwest China is an ideal site for studying the effects of mountain-basin coupling due to its complex topography and tectonic structure. In this study, we construct crustal shear wave velocity structure and radial anisotropy in the crust and uppermost mantle in the Xinjiang region by ambient noise seismic tomography. The data include 9 months (2009 January to 2009 September) of three-component continuous data recorded at 74 seismic stations of the China Provincial Digital Seismic Networks and regional Kyrgyzstan and Kazakhstan Networks. Empirical Rayleigh and Love wave Green's functions are obtained from interstation cross-correlations. Group velocity and phase velocity dispersion curves between 8 s and 50 s periods are measured for each interstation path by applying the time-frequency analysis method with phase-matched processing. The group velocity and phase velocity maps show clear lateral variations that correlate well with major geological structures and tectonic units in the study regions. At short periods (<20 s), the basins show low group velocity and phase velocity, and the eastern part of Tarim Basin displays relatively lower velocities than the western part. A small patch of high velocity is observed in the northwest part of Tarim Basin, indicating that the structure beneath Tarim Basin is not horizontally

① 收稿日期: 2014-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(40804007, 41174050); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 周 铭(1987-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事背景噪声层析成像的研究. E-mail: zmplay1234@163.com

homogeneous. The orogenic belt shows high velocity. As the period increases, the imprint of the sedimentary layers diminish. At long periods ( $>30$  s), surface wave velocities are strongly influenced by crust thickness and shear velocities in the lower crust and uppermost mantle. High velocity is observed beneath the basins. In contrast, the Tianshan orogenic belt stands out as a low-velocity region.

SV and SH wave velocity structures of the crust and upper mantle are inverted from Rayleigh and Love wave dispersion maps. Because of thick sedimentation in the basins, S-wave velocities of the Tarim and Junggar basins are relatively low at shallow depth, whereas S-wave velocities of the mountain area are high due to the widely appearance of magmatic rocks. In the middle and lower crust, the basins show clear features with high velocities, whereas the Tianshan orogenic belt shows those with low velocity. In addition, we compute the radial anisotropy by measuring the differences between SH wave and SV wave velocity. The Tianshan orogenic belt shows negative radial anisotropy, which reflects dominant vertical movement of the deep crustal materials during the process of crustal shortening and thickening beneath this belt. Western Tianshan displays stronger anisotropy than eastern Tianshan, which may be related to different blocking effects due to the Tarim Block. Positive radial anisotropy is a major characteristic of the Tarim Basin in the upper crust, and the velocity of the SH wave of horizontal polarization is faster than the SV wave of vertical polarization mainly due to the effects of the sedimentary layer. In the stable block, the radial anisotropy represents fossil anisotropy left in the latest large-scale tectonic movement. Because movement in the entire Tarim block resulted in mineral crystal arrangement dominated in the horizontal direction, the middle crust of the Tarim Basin shows positive radial anisotropy.

**Key words:** Xingjian region; ambient noise tomography; group velocity; phase velocity; radial anisotropy.

## 0 引言

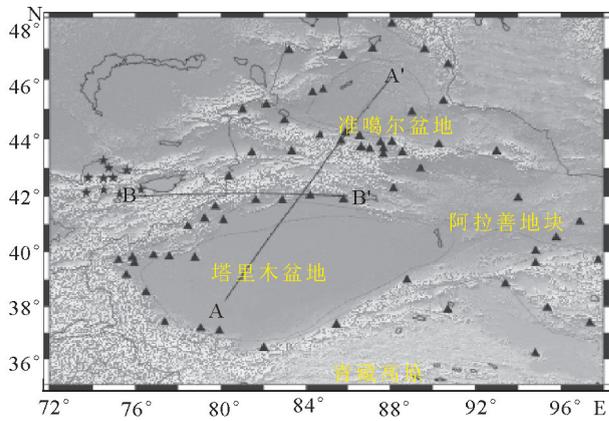
地球介质的各向异性反映了地球内部物质的形变特征,被称为反映地球内部物质形变机制的化石。地震波是研究地球介质各向异性的重要手段。大量的地震学观测和研究表明,地球内部从地壳到上地幔乃至核幔边界均存在着不同程度的各向异性,反映了地球内部不同层次的形变特征。地震波各向异性研究可为大陆动力学研究提供地球内部最为直接的、不可或缺的形变信息,进而为了解岩石圈结构和演化提供约束<sup>[1]</sup>。

引起地震波各向异性的原因多种多样,其中产生地壳和上地幔各向异性的两大主要成因是矿物固有的各向异性和岩石中矿物的裂隙等产生的各向异性。地壳中广泛存在着大量的含有流体的微裂隙,这些微裂隙近直立的近似平行排列,在穿过存在这种各向异性结构时剪切波传播会产生分裂。这种裂隙通常存在于地壳 10 km 以上深度<sup>[2]</sup>。在沉积盆地中可能也与周期性循环沉积过程的有关。随着深度的增加以及压力的增大,裂隙逐渐闭合,引起各向异性的主要原因是矿物晶格的优势排列和 EDA 裂

隙。在上地幔中,地幔物质形变导致其主要成分橄榄岩中晶格的优势取向和地幔物质流动引起的各向异性。

本文研究的区域为中国西北部的塔里木盆地及其邻区( $72.0^{\circ}\sim 98.0^{\circ}\text{E}$ ,  $36.0^{\circ}\sim 48.0^{\circ}\text{N}$ ),主要由塔里木盆地、准噶尔盆地和天山造山带组成(图 1)。塔里木盆地主体是陆壳克拉通,具有相对稳定的特点,后又经历了多次沉积过程,存在巨厚沉积盖层,形成了中国最大的沉积盆地;准噶尔盆地位于塔里木和天山东北部,为沉积盖层较薄的沉积盆地。在这两个盆地均发现了大型油气资源。天山造山带是由陆陆汇聚导致最显著的陆内活动山系之一,拥有复杂的地质构造。天山造山带包括两期造山,其中海西运动早期许多大陆板块、洋岛和增生楔汇聚拼合造就了天山造山带,其后在新生代由于印度板块同欧亚板块碰撞的远程效应,导致了天山造山带的再一次隆升<sup>[3]</sup>。

新生代印度—亚欧大陆碰撞不仅仅形成了喜马拉雅山脉和青藏高原,也影响了亚洲大陆内部的造山活动<sup>[4]</sup>。由于复杂的地形地貌和地质构造,塔里



(▲代表中国地震台网★代表吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦地震台网)

图 1 新疆木及其邻区地震台站分布以及剖面 AA' 和 BB' 的位置。

Fig.1 Distribution of seismic stations in Xinjiang and its surrounding regions and locations of the profiles of AA' and BB'

木及邻区已成为研究大陆碰撞过程、造山运动机制、构造块体相互作用的重要地方。盆地具有的复杂叠加地质结构,制约着油气聚集与分布的基本特点<sup>[5]</sup>。该区域也逐渐成为了解含油构造控制机制的重要地方<sup>[6]</sup>。同时塔里木盆地及其邻域是研究陆陆碰撞以及陆内造山作用最理想的天然实验场。

近年来利用背景噪声层析成像研究中国西北部的 S 波速度结构<sup>[7-9]</sup>,利用远震 P 波到时数据对中国西北部的研究<sup>[10-13]</sup>,以及人工地震对于新疆地区的研究<sup>[3,14-15]</sup>结果显示:在研究区域内近地表低速异常主要出现在具有较厚沉积层的盆地地区,天山造山带表现了较高的速度结构。由于塔里木盆地是一个又冷又硬的块体,所以在中下地壳显示了高速的特征。在青藏高原和天山造山带周围的主要盆地的中下地壳和上地幔顶部存在较硬的物质,在限制青藏高原变形起到了重要作用。在中下地壳,天山造山带下方存在一个明显的低速区。地壳中部东西天山之间存在低速边界。而且在地壳中天山造山带具有明显的横向分块结构,且造山带的南、北边缘显示了比较强烈的变形特征。塔里木地块莫霍面比较平缓,基本没有形变,地壳具有较高的平均速度,所以塔里木块体是一个近于刚性的地块。准噶尔岩石圈向南俯冲,塔里木岩石圈向北俯冲,因此天山隆升的主要动力有可能是其构成的双向挤压。

80 年代横波分裂现象取得了突破性的成果,90 年代以来横波分裂现象的发现使得各向异性研究迈

入了一个繁荣的时期,地球物理学家对中国大尺度及其区域范围的各向异性开展了广泛的研究<sup>[16-21]</sup>。随着噪声成像的应用,利用背景噪声提取 Rayleigh 波和 Love 频散得到径向各向异性结果的研究也越来越多<sup>[22-28]</sup>。横波分裂方法仅能利用于有台站分布的区域,无法得到缺乏台站布设的盆地内部的各向异性。

本文利用新疆地区背景噪声数据进行互相关分析,提取中短周期的瑞利面波和勒夫面波频散,然后通过反演获得三维地壳速度结构,并分析壳内径向各向异性的分布特征,以期为研究区域壳幔结构变形机制提供一些地震学证据。

## 1 数据处理

利用国家数字台网 64 个台站和吉尔吉斯及哈萨克斯坦地震台网 10 个台站从 2009 年 1 月到 9 月连续记录的长度为一小时的三分量数据,首先进行去仪器响应、宽频滤波(0.01~0.2 Hz)、去均值等预处理;其次为了使波形更加平滑,幅值降低,进行了带通滤波,消除了一些异常波形记录对互相关的影响计算;再次对数据进行了时间域归一化,去除了一些峰值和起伏,减少了非平稳噪声源信号对互相关的影响。计算互相关函数时首先要对每个台站对 N 向和 E 向分量旋转为 R 和 T 分量、频谱白噪声化、通过对台站对进行互相关计算得到台站之间的格林经验函数。为了突出信噪比和简单计算对互相关结果进行叠加,将互相关的函数翻转相叠加。

利用时频分析方法获取群速度和相速度混合路径频散数据,且在获取频散信息之一后利用相关台站的信噪比检查频散曲线以确保数据的可靠性。这个过程中我们舍弃了 Rayleigh 波将近一半的数据和 Love 波三分之二的的数据。图 2 中,我们利用位于西天山的高密度台站同距离较远的台站之间的信息进行频散结果的评测。由于它们具有相似的路径,通过对比这些台站对之间的频散信息,可以看出这些群速度和相速度的频散信息具有较好的相似性,也说明我们的频散数据比较可靠。

图 3 显示的是不同区域之间的混合路径频散曲线,可以看出不同区域存在差别,穿过盆地的路径频散曲线在短周期呈现低速,造山带之间的频散曲线则在短周期表现了高速。

图 4 显示了存在沉积层和不存在沉积层的模型合成的 Rayleigh 波和 Love 波频散曲线。短周期中存在沉积层的模型频散曲线显示了低速的特征。

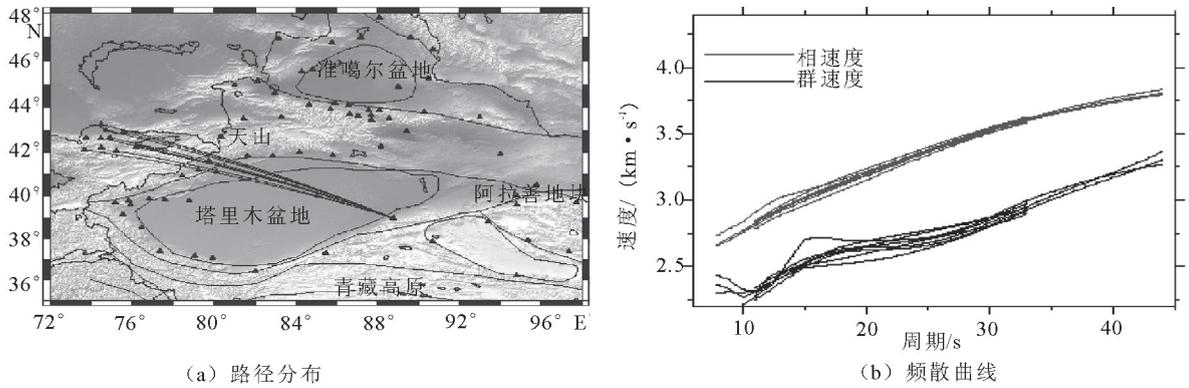


图2 相似路径的群速度和相速度混合频散曲线。

Fig.2 The group velocity and phase velocity dispersion curves of the similar path

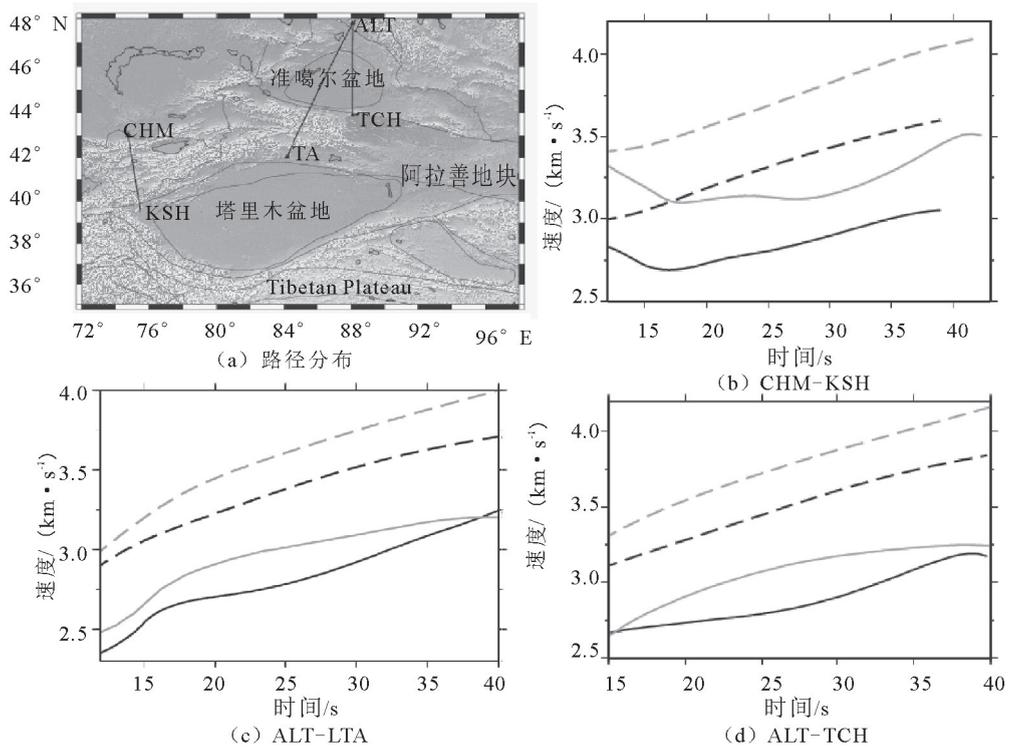


图3 不同构造单元台站的群速度和相速度混合频散曲线(黑色实线为 Rayleigh 波群速度,黑色虚线为 Rayleigh 波相速度;灰色实线为 Love 波群速度,灰色虚线为 Love 波相速度)

Fig.3 Group velocity and phase velocity dispersion curves measured from station-pairs located in different tectonic units (Solid black lines denote Rayleigh wave group velocity dispersion curves, solid gray lines are Love wave group velocity dispersion curves, dashed black lines denote Rayleigh wave phase velocity dispersion curves, and dashed gray lines are Love wave phase velocity dispersion curves)

由于 Rayleigh 波的信噪比高于 Love 波信噪比, Rayleigh 波频散路径测量数目要多于 Love 波的频散路径测量数目(图 5); Rayleigh 波在 20 s 左右的覆盖路径测量数目最多, Love 波在 15 s 左右覆盖路径最好, 随着周期的增长路径覆盖数目逐渐减少。利用面波频散研究地壳上地幔顶部三维 S 波速度结构和径向各向异性通常分为两步: 首先使用混合

路径频散数据根据 Occam 反演方法求取面波速度在水平面内的分布; 其次根据纯路径频散利用 Herrmann & Ammon 的线性程序<sup>[25]</sup>反演网格点介质速度沿深部的分布; 最后得到一维 S 波速度结构, 从而得到三维 S 波速度结构和径向各向异性结果。

## 2 群速度和相速度层析成像

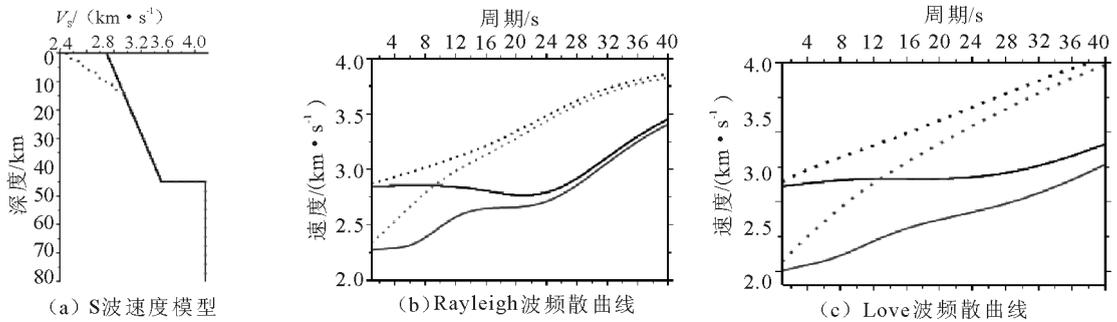


图 4 不同沉积层的 Rayleigh 波和 Love 波频散曲线

Fig.4 Rayleigh wave and Love wave dispersion curves computed from different sediment layer thicks ((b) and (c): the dotted lines represent phase velocity dispersion curves, the solid lines represent group velocity dispersion curves; black lines are the dispersion curves computed from the model with the thin sediments layers show in (a), gray lines are the dispersion curves computed from the model with the thick sediments layers)

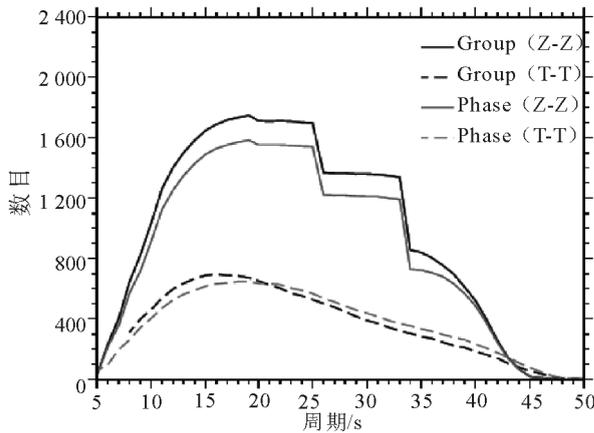


图 5 不同周期的群速度和相速度测量数目

Fig.5 Numbers of group velocity and phase velocity dispersion measurement at different periods

根据群速度和相速度的混合路径频散利用 Occam 反演来得到面波群速度和相速度值,反演的目标是尽量减少观测数据的拟合误差,且在目前的反演中波沿大圆路径传播,反演的目标是满足一定残差条件下寻求的最光滑的模型。首先利用棋盘格测试确定研究区域的网格划分和分辨率。本文利用初始平均速度为 2.7 km/s,没有先验信息的模型,对不同周期数据进行检测板测试。最终研究区域网格划分为  $0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$ ; Rayleigh 波最终选用  $1.2^{\circ} \times 1.2^{\circ}$  分辨率; Love 波由于射线路径覆盖数目较少,所以分辨率选择  $1.6^{\circ} \times 1.6^{\circ}$  (图 6)。根据我们的路径覆盖数据得到的结果显示在天山造山带、准噶尔盆地及塔里木北部地区有较好的分辨率。最后我们得到了 Rayleigh 波 8~40 s、Love 波 8~30 s 的群速度和相速度结果。

地震波的传播速度随波的频率而变化的现象称

为波的频散,即不同频率的波以不同的速度传播。不同周期的面波对不同深度的地球结构敏感。一般来说,短周期倾向于反映近地表物质的速度结构,而长周期则与地球的深部结构更加密切相关。图 7 显示了 Rayleigh 波和 Love 波不同周期对于地球深部构造的敏感内核变化, Rayleigh 波对波长的三分之一的深部敏感, Love 波对浅部的信息敏感。

图 8 显示了 Rayleigh 波在 11 s、40 s 的群速度和相速度层析成像结果。周期为 11 s 的 Rayleigh 波群速度横向分布图中,塔里木盆地和准噶尔盆地显示了低速的特征,且塔里木盆地的北部较盆地的其它地区的速度低,塔里木盆地中的巴楚隆起速度高于盆地其它地区;天山造山带和盆地边缘地区显示了高速的特征。同群速度相比具有相同周期的相速度横向分布图中盆地同样显示了低速的特征,盆地周围地区显示了高速的特征。周期为 40 s 时,群速度和相速度主要受地壳的厚度和莫霍深度的影响。塔里木盆地和准噶尔盆地因为具有较薄的地壳显示为高速区,天山因为较厚的地壳显示了低速的特征且西天山速度低于东天山速度,这与我们在短周期中观察到的结果相反。

图 9 中,周期为 11 s 时 Love 波群速度和相速度结果同 Rayleigh 波在相同周期的结果相一致,低速区存在于塔里木盆地和准噶尔盆地区域,高速区出现在天山造山带。由于 Love 在浅层受剪切波速度的影响大于 Rayleigh 波(图 7),所以在周期为 30 s 时受到浅层信息的影响塔里木盆地和准噶尔盆地依旧显示了低速的特征,而且满加尔凹陷具有研究区域内最低的速度。天山造山带为高速区,且西天山速度比东天山速度低,且速度分布具有明显的分块特征。由

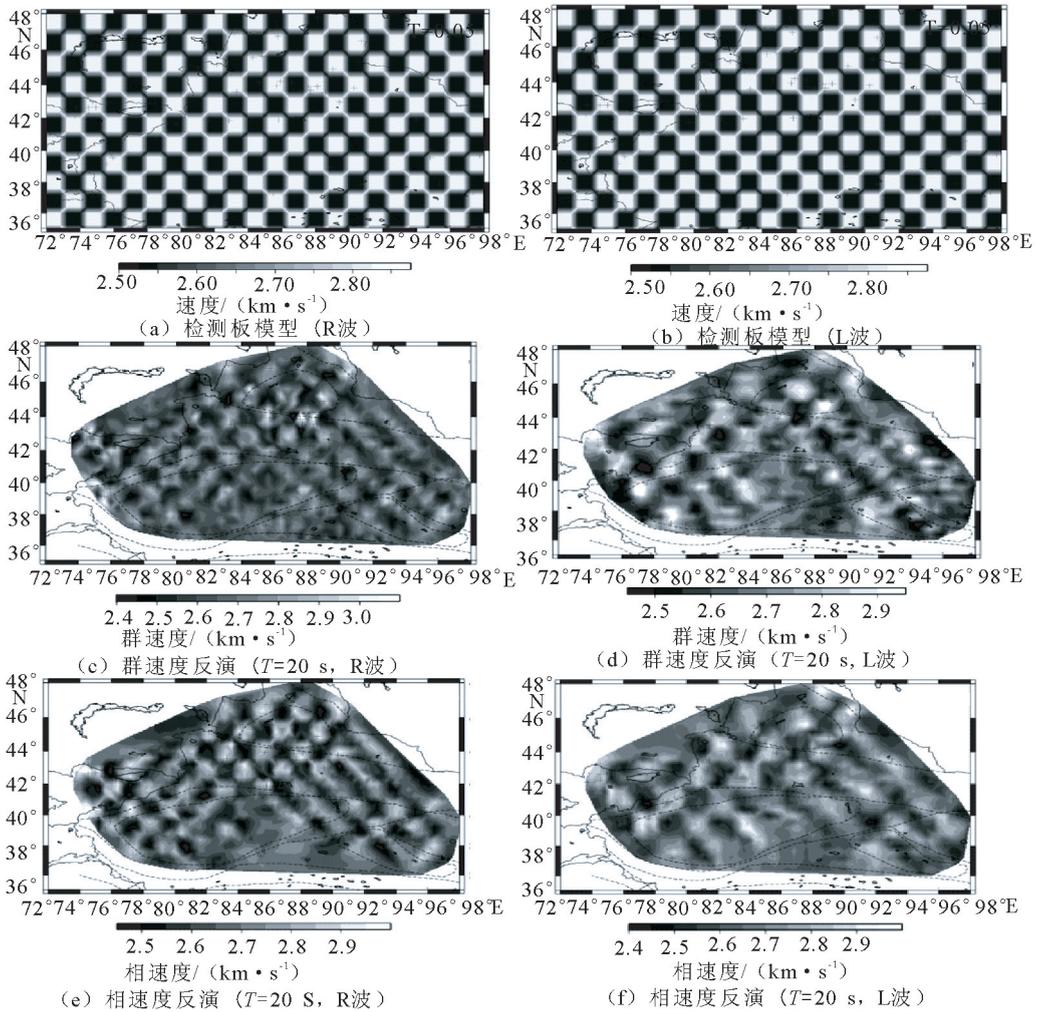


图6 群速度和相速度检测板测试结果

Fig.6 Test results of group velocity and phase velocity using checkboard

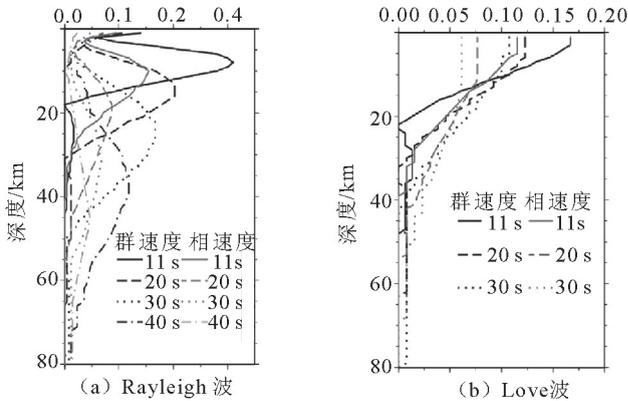


图7 Rayleigh波和Love的波群速度、相速度深度敏感核

Fig.7 Group velocity and phase velocity sensitivity kernels of Rayleigh and Love waves at different periods

于长周期的射线路径覆盖稀疏,所以我们没有反演周期大于30s的Love波群速度和相速度。

### 3 S波速度结构和径向各向异性

不同周期的面波受不同深度范围横波的影响。因此,在不同的深度范围内它们在制约剪切波速度结构和横向变化方面提供了有用的信息。面波在不同周期对于不同深度的剪切波速度的敏感度不同,如图7显示Rayleigh波对大约为三分之一波长的深度较为敏感,Love波对浅层的S波较为敏感。根据从群速度和相速度提取的每个 $0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$ 网格点纯路径频散曲线,用Herrmann & Ammon<sup>[29]</sup>开发出的线性程序来反演一维的S波速度,从而得到三维的S波速度结构。因为面波频散对S波速度更为敏感,所以我们仅仅反演S波速度结构, $V_p/V_s$ 采用了刘文学等<sup>[30]</sup>得到的平均值1.76,密度根据Nikolas等<sup>[31]</sup>的结果来确定。根据构造的不同我们把研究区域划分为不同的单元,对不同单元使用不同的模型来进行S波反演。每一个单元我们使用了多

个模型通过对其莫霍深度和层厚度扰动。最后对其进行平均计算,得到 S 波的分布结果。莫霍面的深

度我们参考了接收函数得到的结果<sup>[3,30,32]</sup>的结果。

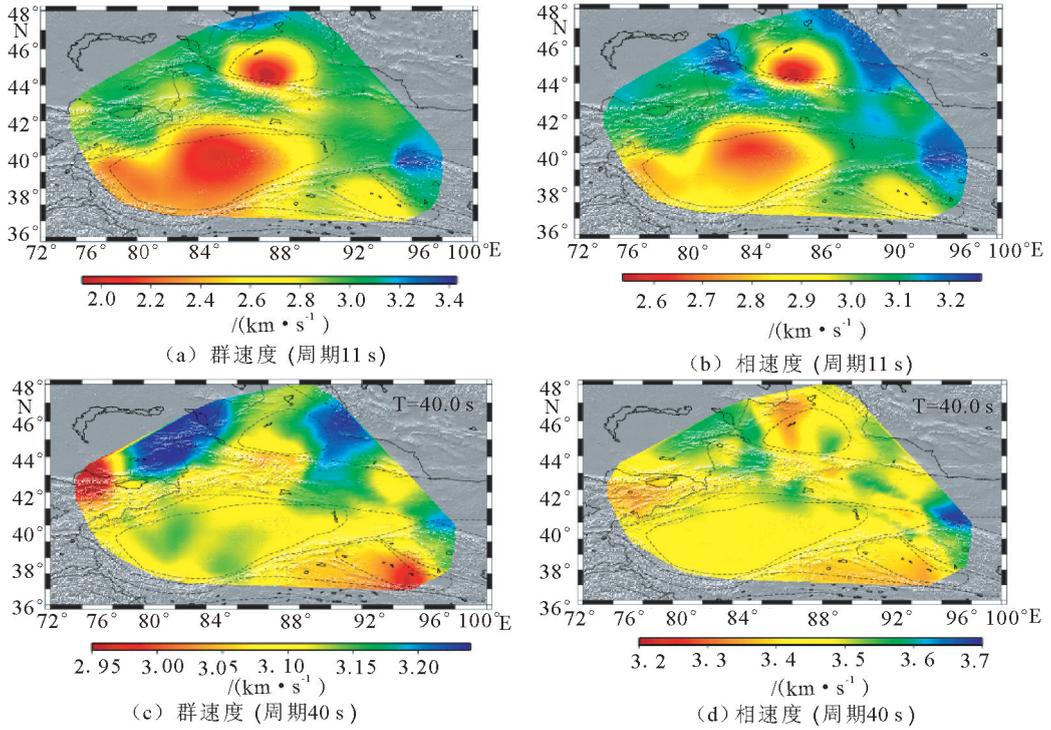


图 8 周期为 11 s 和 40 s 的 Rayleigh 波群速度和相速度

Fig.8 Inversion results of group velocity and phase velocity of Rayleigh wave at periods of 11 s and 40 s

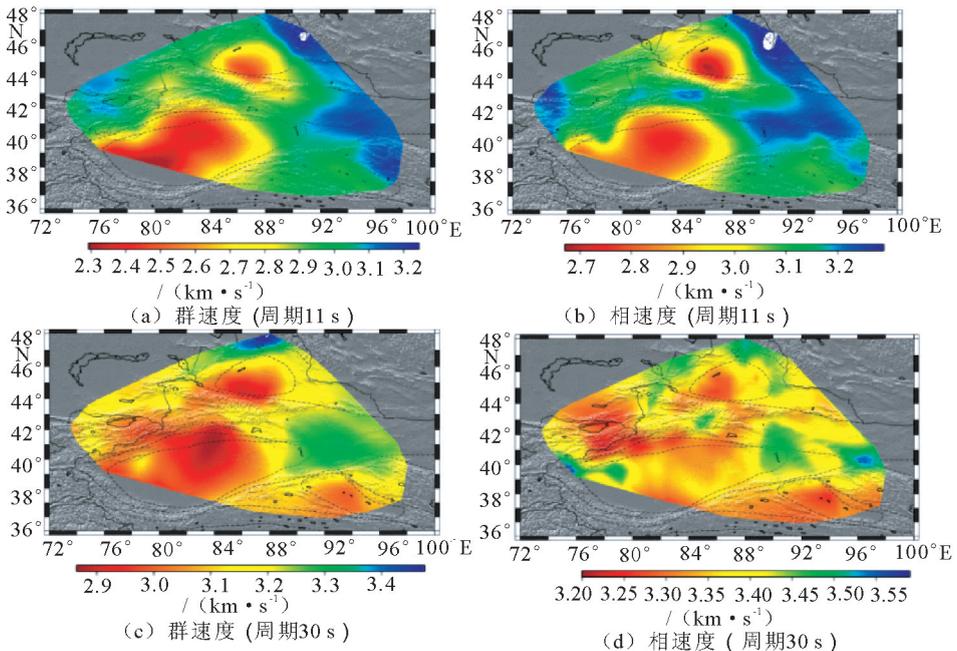


图 9 周期为 11 s 和 30 s 的 Love 波群速度和相速度

Fig.9 Inversion results of group velocity and phase velocity of Love wave at periods of 11 s and 30 s

同时反演 Rayleigh 波和 Love 波群速度和相速度我们得到了平均 S 波速度结构(图 10)。深度 1~20 km 的平均 S 波速度结果:塔里木盆地和准噶尔

盆地为低速区,且满加尔凹陷和准噶尔盆地显示了最低的速度;天山造山带显示了高速的特征。深度为 21~40 km 的平均速度结果显示了与深度 1~20

km 相反的结果,塔里木盆地和准噶尔盆地表现了高速的特征,天山显示了低速的特征。深度为 41~60 km 的平均 S 波速度在塔里木盆地和准噶尔盆地表现了高速的特征,而天山存在低速区。且相同构造区域存在明显的横向不均匀性,东天山的速度高于西天山的速度。塔里木盆地明显存在为北部速度高于南部速度。

由  $V_{sv}$  模型(Rayleigh 波频散反演得到)计算合成的 Love 频散与实际观测的 Love 波频散存在差异,暗示研究区域存在径向各向异性。如图 11 显示

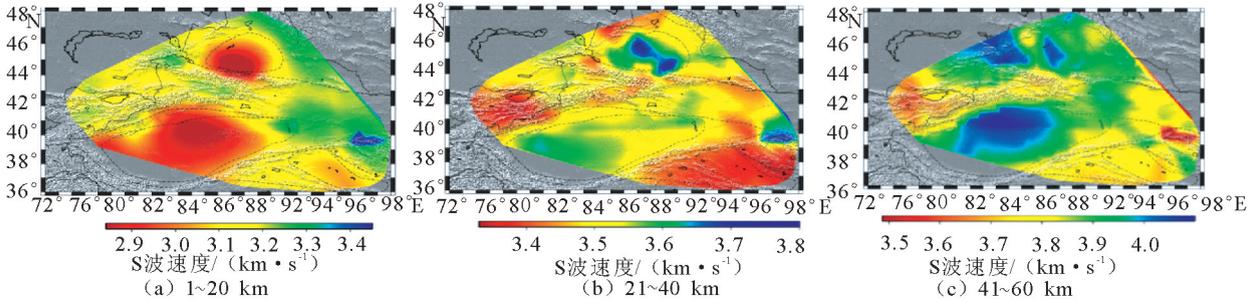


图 10 不同深度的平均 S 波速度分布图

Fig.10 Results of average S wave velocity in defferent depths

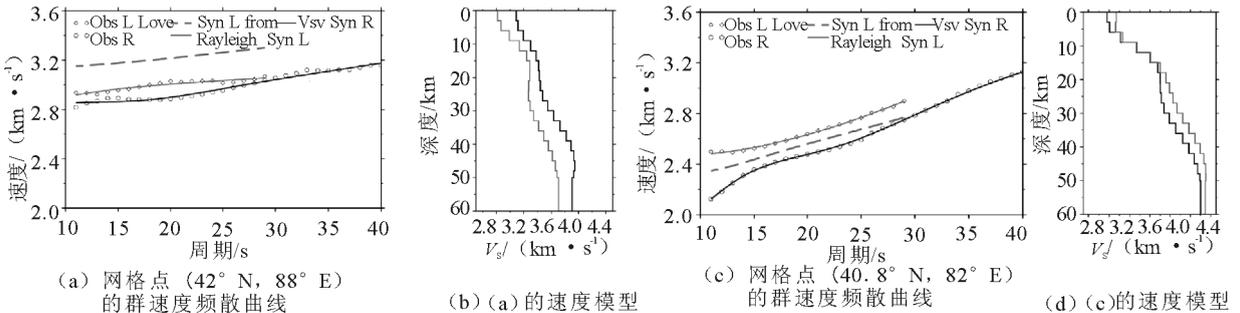


图 11 2 个网格点的纯路径群速度频散曲线和反演得到 S 波速度模型(图(a)和(c)中○、◇分别代表实际观测的 Rayleigh 波和 Love 波的频散;黑色实线和灰色实线代表的是反演拟合 Rayleigh 波和 Love 波的频散曲线;灰色虚线是利用(b),(d)中  $V_{sv}$ (黑色)速度模型计算得到的 Love 波的频散曲线。)

Fig.11 The observed and synthetic group velocity dispersions of Rayleigh and Love wave velocity curves with inverted shear wave velocity models under two blocks( In (a) and (c),○ and ◇ indicate observed Rayleigh and Love wave group velocity dispersions, respectively;solid black and solid gray lines represent Rayleigh and Love wave group velocity computed from the synthetic  $V_{sv}$  models in (b) and (d),Dashed gray lines represent Love wave group velocity dispersion curves synthesized from the  $V_{sv}$  in (b) and (d),which is inverted from Rayleigh wave dispersion curves)

分别反演 Rayleigh 波和 Love 波纯路径频散,同时根据公式(1)计算得到了不同深度径向各向异性分布图(图 12)。深度为 8 km 时,塔里木盆地和准噶尔盆地中心表现了正的径向各向异性;天山造山带表现了负的径向各向异性。30 km 深度结果显

(42°N,88°E)由  $V_{sv}$  模型计算合成的 Love 波频散(灰色虚线)均大于观测的 Love 波频散,但是观测的 Love 波频散和合成的频散曲线( $V_{SH}$  模型得到的)相一致。径向各向异性可以采用公式来确定:

$$\xi = 2(V_{SH} - V_{SV}) / (V_{SH} + V_{SV}) \quad (1)$$

一般认为,当  $\xi > 0$ ,即  $V_{SH} > V_{SV}$ 时,表明物质的水平向流动对介质各向异性的形成起主导作用;而当  $\xi < 0$ ,即  $V_{SH} < V_{SV}$ 时,表明物质的垂向运动对各向异性的形成起主导作用。因此,通过径向各向异性的分析,可以为壳幔结构的形成和演化提供约束。

示盆地主要显示了正的径向各向异性,西天山主要显示了负的径向各向异性。

同时,我们得到了图 1 中的两条剖面 AA'、BB'的 S 波速度结构及径向各向异性(图 13)。AA' 穿过塔里木盆地、东天山和准噶尔盆地。在浅层塔

里木和准噶尔盆地为低速区,东天山为高速区。中下地壳中塔里木盆地和准噶尔盆地显示了高速的特征,东天山存在低速区。塔里木盆地和准噶尔盆地主要表现为正的径向各向异性,且在中地壳出现较大强度的径向各向异性;天山则表现为负的径向各

向异性。BB'穿过西天山到达东天山,西天山下地壳出现低速,东天山低速不明显,径向各向异性在天山整体显示了负值,同时西天山的径向各向异性明显大于东天山的径向各向异性。

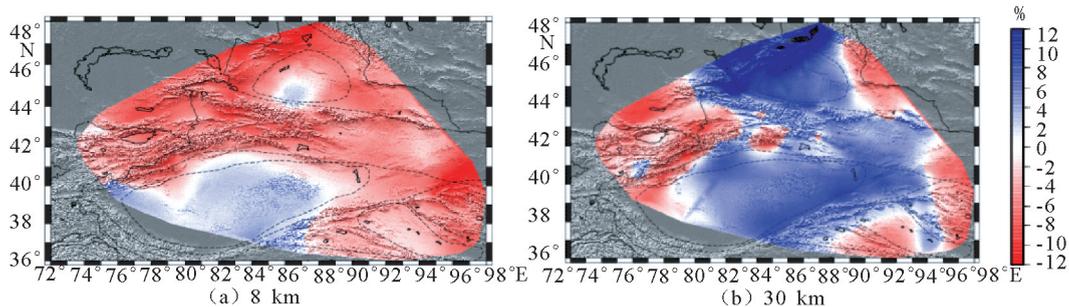


图 12 8 km 和 30 km 深度的径向各向异性分布图。

Fig.12 Results of radial anisotropy at 8 km and 30 km depths

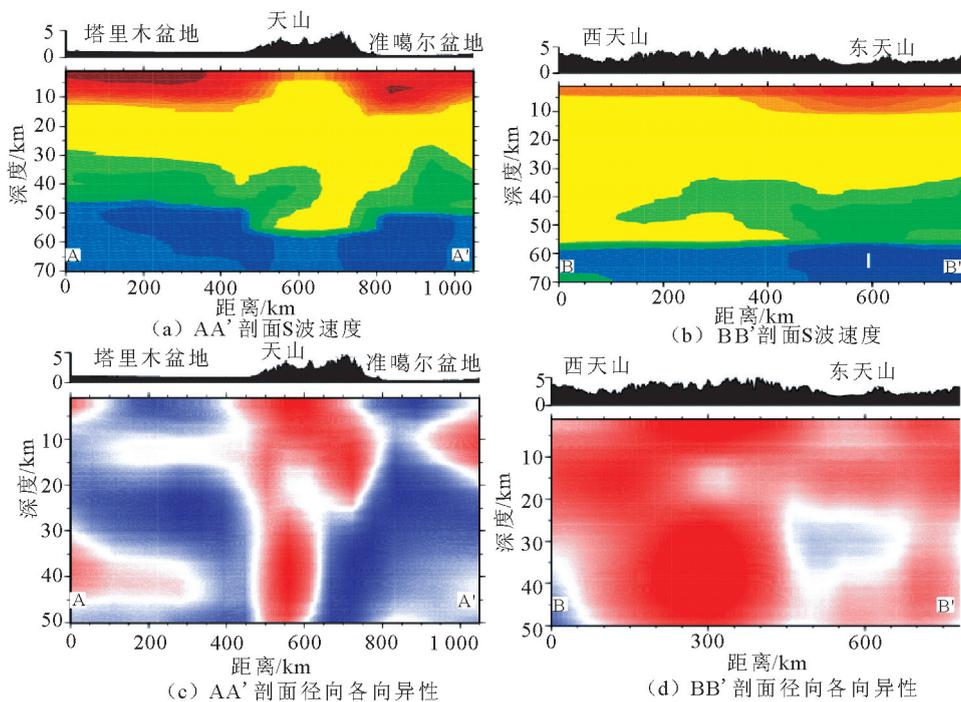


图 13 图 1 中 AA' 和 BB' 剖面的 S 波速度结构和径向各向异性

Fig.13 S wave velocity structure and radial anisotropy of two profiles AA' and BB'

### 4 讨论和结论

图 10 和图 13 显示了研究区域 S 波速度结构存在着明显的垂向和横向的不均匀性。横向的不均匀性表现在盆地和造山带的差别,垂向上表现为上地壳和中下地壳的不同。在上地壳,塔里木盆地和准噶尔盆地显示了低速的特征,而天山造山带显示了高速的特征,且塔里木盆地中巴楚隆起的速度高于满加尔凹陷。天山造山带广泛出露岩浆岩<sup>[11]</sup>,而盆地地区多为中新世沉积层,因此不同区域存在不

同的岩性是造成不同构造单元速度高低差异的主要原因;在塔里木盆地西南巴楚隆起一带发现有前寒武至奥陶纪的地层出露,导致巴楚隆起沉积层较薄,因而具有较高的速度。满加尔凹陷具有塔里木最厚的沉积层,所以在塔里木盆地速度最低值出现在满加尔凹陷。因为塔里木盆地的主体是位于十分古老的前寒武纪基底之上的古生代克拉通盆地<sup>[33]</sup>,所以塔里木盆地内部构造具有相对稳定和高速的特点,准噶尔地块也是一个刚性古老地块。所以中下地壳

中盆地表现为高速区,而天山造山带则表现为低速区,这可能是造山带在隆升中引起了地幔物质上涌。图 13 中 AA'剖面可以看到塔里木块体和准噶尔块体与天山边缘存在较大角度的速度变化,人工地震<sup>[3]</sup>的结果也显示塔里木和准噶尔块体同时向天山造山带俯冲,双向挤压可能是天山造山带新生代以来再次隆升的机制。

天山造山带呈现为负的径向各向异性,可能是由于在地壳缩短增厚的垂向运动中矿物优先垂直排列导致的。同时观测到西天山的径向各向异性明显强于东天山,说明西天山的造山作用比东天山强烈。而天山造山带在新生代的隆升作用主要是受到板块碰撞的远程效应影响,所以西天山可能是因为受到印度板块—欧亚板块碰撞的远程效应更强一些,由于塔里木块体的阻挡作用,导致东天山受到的碰撞挤压没有西段强烈。并且在天山的下地壳存在低速,可能说明天山造山带的再次隆升作用是由于塔里木块体向北的俯冲与上涌的地幔物质相互作用的结果。

塔里木盆地和准噶尔盆地在浅层呈现弱的正的径向各向异性,沉积盆地由于具有多层平行的沉积结构,认为可能是因为塔里木盆地沉积盖层中存在多个沉积体系<sup>[33]</sup>,不同时期的沉积,所以造成了垂向上物质分布的不均匀性,导致了垂直偏振的剪切波传播速度小于水平偏振的剪切波速。但彭艳菊等<sup>[22]</sup>研究结果显示在上地壳塔里木盆地的径向各向异性显示为负,他们将这种现象解释为是由于存在巨厚的沉积层,所以在水平压力作用下垂直排列的裂隙发生了闭合和张开,使得  $V_{SV} > V_{SH}$ 。但我们也注意到,他们的研究区域范围大,网格划分粗,分辨率较低,同时天然地震面波层析成像对于短周期的分辨率有限。

盆地中下地壳表现为强的正径向各向异性,我们的结果同彭艳菊等<sup>[22]</sup>和 Chen 等<sup>[34]</sup>的结果一致,盆地内部没有明显的低速层存在,说明盆地内部并没有出现明显的形变,仅在塔里木南缘和北缘有较为强烈的构造变形<sup>[3]</sup>;同时地震面波和体波层析成像研究结果显示,塔里木和准噶尔块体都具有高速的岩石圈根,这与天山造山带不同。暗示其自前寒武形成以来并没有经历过强烈的变形作用。所以塔里木盆地和准噶尔盆地是一个相对稳定的块体,对于稳定的大陆地区,各向异性被认为是其所经历的最后一次大规模构造运动遗留在岩石圈中的具有记忆性的“化石”各向异性<sup>[35]</sup>。所以我们分析塔里木

块体的水平向的径向各向异性可能是早古生代板块漂移过程中作为整体运动遗留的痕迹。

我们通过利用背景噪声层析成像技术分析处理 74 个台站记录的三分量连续背景噪声数据,得到了新疆地区 S 波速度结构和径向各向异性分布特征。结果表明,新疆地区速度结构的明显差异表明出研究区域强烈的非均匀性和构造复杂性。S 波速度结构显示天山造山带在上地壳一般是高速区;塔里木和准噶尔盆地在浅层显示了低速的特征,并且盆地内部速度的分布也存在横向不均匀性,满加尔凹陷呈现了比较低的速度,巴楚隆起显示了高速的特征。中下地壳速度分布与浅层的结果相反,盆地普遍为高速区,具有明显的分层特点,界面产状较平缓,中下地壳显示了高速的特征,未见明显低速层存在;而造山带则表现为低速区,与上涌的地幔物质有关,塔里木盆地及其邻域速度结构的差异表明研究区域强烈的非均匀性和构造复杂性。

天山造山带负的径向各向异性,是由于在地壳缩短增厚的垂向运动中引起了矿物优先垂直排列,同时由于塔里木块体的阻挡作用不同导致了西天山的各向异性强于东天山。盆地的径向各向异性在浅层主要是受到了沉积结构的影响,塔里木盆地中地壳各向异性主要是塔里木块体作为整体运动或旋转导致了晶体排列以水平方向占主导。所以本研究显示了塔里木盆地在受到印度板块—欧亚板块碰撞之后内部变形不明显,仅在南缘和北缘有较强烈的构造运动。塔里木和准噶尔块体同时向天山造山带俯冲,双向挤压可能是天山造山带新生代以来再次隆升的机制,准噶尔块体的俯冲已经停止,所以新生代以来塔里木板块俯冲导致了天山隆升,主要的动力来源是印度板块—欧亚板块碰撞的远程效应。

致谢:感谢中国地震台网中心为本研究提供地震波形数据。本文研究得到国家自然科学基金项目(40804007,41174050)和中央高校基本科研业务费专项资金的共同资助,特此致谢。

## 参考文献(References)

- [1] 李永华,吴庆举,张瑞青,等.用面波方法研究上扬子克拉通壳幔速度结构[J].地球物理学报,2009,52(7):1759-1767.  
Li Y H, Wu Q J, Zhang R Q, et al. The Lithospheric S-velocity Structure of the Western Yangtze Craton Inferred from Surface Waves Inversion[J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(7): 1759-1767. (in Chinese)
- [2] 吴国忱.各向异性介质地震波传播与成像[M].东营:中国石油大学出版社,2006:1-16.

- Wu G C. Seismic Wave Propagation and Imaging in Anisotropic Media[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006, 1-16. (in Chinese)
- [3] 熊小松, 高锐, 李秋生, 等. 深地震探测揭示的西北地区莫霍面深度[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 23-31.  
Xiong X S, Gao R, Li Q S, et al. The Moho Depth of Northwest China Revealed by Seismic Detection[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31(1): 23-31. (in Chinese)
- [4] Mi N, Wang L S, Li H, et al. Velocity Structure of the Crust and Uppermost Mantle in the Boundary Area of the Tianshan Mountains and the Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(3): 270-275.
- [5] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 64-77.  
He D F, Jia C Z, Li D S, et al. Formation and Evolution of Polycyclic Superimposed Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 64-77. (in Chinese)
- [6] 张冰, 周铭, 谭静, 等. 塔里木盆地及邻区 Love 波层析成像研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(4): 893-900.  
ZHANG Bin, ZHOU Ming, TAN Jing, et al. Love Wave Tomography in the Tarim Basin and Its Adjacent Regions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 893-900. (in Chinese)
- [7] 苏伟, 彭艳菊, 郑月军, 等. 青藏高原及其邻域地壳上地幔 S 波速度结构[J]. 地球学报, 2002, 23(3): 1993-2000.  
Su W, Peng Y J, Zheng Y J, et al. Crust and Upper Mantle Shear Velocity Structure Beneath the Tibetan Plateau and Adjacent Areas[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(3): 1993-2000. (in Chinese)
- [8] Sun X L, Song X D, Zheng S H, et al. Upper Mantle Beneath China from Ambient Noise Surface Wave Tomography[J]. Earthquake Science, 2010, 23: 449-463.
- [9] Li H, Li S, Song X D, et al. Crustal and Uppermost Mantle Velocity Structure Beneath Northwestern China from Seismic Ambient Noise Tomography[J]. Geophysical Journal International, 2012, 188(1): 131-143.
- [10] 李强, 刘瑞丰, 杜安陆, 等. 新疆及其毗邻地区地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 311-319.  
Li Q, Liu R F, Du A L, et al. Seismic Tomography of Xinjiang and its Adjacent Areas[J]. Chinese J Geophys, 1994, 37(2): 311-319. (in Chinese)
- [11] 胥颐, 刘福田, 刘建华, 等. 中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地震层析成像[J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(2): 113-122.  
Xu Y, Liu F T, Liu H J, et al. Seismic Tomography of Orogenic Belt and its Adjacent Basins of Northwest China[J]. Science China: D, 2000, 30(2): 113-122. (in Chinese)
- [12] XU Yi, LIU Fu-tian, LIU Jian-hua, et al. Crust and Upper Mantle Structure Beneath Western China from P wave Travel Time Tomography [J]. Geophysical Research, 2002, 107(10): 2220.
- [13] 郭彪, 刘启元, 陈九辉, 等. 中国境内天山地壳上地幔结构的地震层析成像[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1693-1700.  
Guo B, Liu Q Y, Chen J H, et al. Seismic Tomography of the Crust and Upper Mantle Structure Underneath the Chinese Tianshan[J]. Chinese J Geophys, 2006, 49(6): 1673-1700. (in Chinese)
- [14] 李秋生, 卢德源, 高锐, 等. 新疆地学断面(泉水沟—独山子)深地震测深成果综合研究[J]. 地球学报, 2001, 22(6): 534-540.  
Li Q S, Lu D Y, Gao R, et al. An Integrated of Deep Seismic Sounding Profiling Along Xingjiang Global Geosciences Transect (Quanshuigou-Dushanzi) [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(6): 534-540. (in Chinese)
- [15] 高锐, 肖序常, 高弘, 等. 西昆仑—塔里木—天山岩石圈深地震探测综述[J]. 地质通报, 2002, 21(1): 11-18.  
Gao R, Xiao X C, Gao H, et al. Deep Lithospheric Seismic Exploration of West Kunlun—Tarim—Tianshan[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(1): 11-18. (in Chinese)
- [16] 高原, 藤吉文. 中国大陆地壳与上地幔地震各向异性研究[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 180-185.  
Gao Y, Teng J W. Studies on Seismic Anisotropy in the Crust and Mantle on Chinese Mainland[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 180-185. (in Chinese)
- [17] 张丽芬, 姚云生, 廖武林, 等. 湖北地区上地幔各向异性及其动力学意义[J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 35-43.  
Zhang L F, Yao Y S, Liao W L, et al. Research on the Upper Mantle Seismic Anisotropy Beneath Hubei and its Geodynamic Implication[J]. Chinese J Geophys, 2011, 54(1): 35-43. (in Chinese)
- [18] 冯强强, 吴庆举, 李永华, 等. 新疆地区 S 波分裂研究[J]. 地震学报, 2012, 34(3): 296-307.  
FENG Q Q, WU Q J, Li Y H, et al. Shear Wave Splitting in Xinjiang Region[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(3): 296-307. (in Chinese)
- [19] 吴萍萍, 王椿镛, 丁志峰, 等. 大别—苏鲁及邻区上地幔的各向异性[J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2539-2550.  
Wu P P, WANG C Y, Ding Z F, et al. Seismic Anisotropy of Upper Mantle Beneath the Dabie-Sulu and its Adjacent areas [J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(8): 2539-2550. (in Chinese)
- [20] 常利军, 王椿镛, 丁志峰, 等. 青藏高原东北缘上地幔各向异性研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 431-438.  
CHANG L J, WANG C Y, DING Z F, et al. Seismic Anisotropy of Upper Mantle in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese J Geophys, 2008, 51(2): 431-438. (in Chinese)
- [21] 王琼, 高原, 石玉涛, 等. 青藏高原东北缘上地幔地震各向异性: 来自 SKS、PKS 和 SKKS 震相分裂的证据[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 892-905.  
Wang Q, Gao Y, Shi Y T, et al. Seismic Anisotropy in the Uppermost Mantle Beneath the Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from Shear wave Splitting of SKS, PKS and SKKS[J]. Chinese J Geophys, 2013, 56(3): 892-905. (in Chinese)
- [22] 彭艳菊, 黄忠贤, 苏伟, 等. 中国大陆及邻区海域地壳上地幔各向异性研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 752-759.

- Peng Y J, Huang Z X, Su W, et al. Anisotropy in Crust and Upper Mantle Beneath China Continent and its Adjacent Seas [J]. *Chinese J Geophys*, 2007, 50(3): 752-759. (in Chinese)
- [23] Li H Y, Su W, Wang C Y, et al. Ambient Noise Love Wave Tomography in the Eastern Margin of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonophysics*, 2010, 491: 194-204.
- [24] Cheng C, Chen L, Yao H, et al. Distinct Variations of Crustal Shear Wave Velocity Structure and Radial Anisotropy Beneath the North China Craton and Tectonic Implications [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(1): 25-38.
- [25] Huang H, Yao H, van der Hilst R D. Radial Anisotropy in the Crust of SE Tibet and SW China from Ambient Noise Interferometry [J]. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2010GL044981.
- [26] Yao H, van der Hilst R D, Montagner J P. Heterogeneity and Anisotropy of the Lithosphere of SE Tibet from surface wave Array analysis [J]. *J Geophys Res*, 2010, doi: 10.1029/2009JB007142.
- [27] Lin F C, Michale H Ritzwoller, Yang Y J, et al. Complex and Variable Crustal and Uppermost Mantle Seismic Anisotropy in the Western United States [J]. *Nature Geosciences*, 2011, 4: 55-61.
- [28] Luo Y, Xu Y, Yang Y. Crustal radial Anisotropy Beneath the Dabie Orogenic Belt from Ambient Noise Tomography [J]. *Geophys J Int*, 2013, 195: 1149-1164.
- [29] Herrmann R B, Ammon C J. Surface Waves, Receiver Functions and Crustal Structure, in Computer Programs in Seismology, Version 3.30, Saint Louis University. 2004. Available at: <http://www.eas.slu.edu/People/RBHerrmann/CPS330.html>.
- [30] 刘文学, 刘贵忠, 周刚, 等. 新疆和周边地区地壳厚度和  $V_p/V_s$  比值变化的接收函数约束 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(8): 2034-2041.
- Liu W X, Liu G Z, Zhou G, et al. Crustal Thickness and  $V_p/V_s$  Ratio variations of Xinjiang and Surrounding Regions Constrained by Receiver Function Stacking [J]. *Chinese J Geophys*, 2011, 54(8): 2034-2041. (in Chinese)
- [31] Nikolas I, Christensen. Seismic Velocity Structure and Composition of the Continental Crust [J]. *A global View Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B7): 9761-9788.
- [32] 李煜, 刘启元, 陈九辉, 等. 天山地区地壳上地幔的 S 波速度结构 [J]. *地球科学*, 2007, 37(3): 344-352.
- Li Y, Liu Q Y, Chen J H, et al. S Wave Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle of the Tianshan [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 37(3): 344-352. (in Chinese)
- [33] 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律 [J]. *新疆石油地质*, 1999, 20(3): 1-12.
- Jia C Z. Characteristics of Oil and Gas Accumulation in Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1999, 20(3): 1-12. (in Chinese)
- [34] Chen Y, Badal Jose, Zhang Z J. Radial Anisotropy in the Crust and Upper Mantle Beneath the Qinghai-Tibet Plateau and Surrounding Regions Journal of Asian [J]. *Earth Sciences*, 2009, 36: 289-302.
- [35] 易桂喜, 姚华建, 朱介寿, 等. 用 Rayleigh 面波方位各向异性研究中国大陆岩石圈形变特征 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(2): 256-268.
- Yi G X, Yao H J, Zhu J S, et al. Lithospheric Deformation of Continent China from Rayleigh Wave Azimuthal Anisotropy [J]. *Chinese J Geophys*, 2010, 53(2): 256-268. (in Chinese)
- [36] 陈贵美, 杨选, 何璟琳, 等. 广东地区地壳地震波速不均匀性研究 [J]. *华南地震*, 2012, 32(3): 41-52.
- CHEN Gui-mei, YANG Xuan, HE Jing-lin, et al. A Study on the Inhomogeneity of Crustal Seismic Wave Velocity in Guangdong [J]. *South China Journal of Seismology*, 2012, 32(3): 41-52. (in Chinese)