

塔里木盆地及其邻区 Love 波层析成像研究

张冰, 周铭, 谭静, 郑丹, 欧阳龙斌, 孙三健
(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塔里木盆地及其邻区进行了研究。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共74个地震台站记录的2009年1月至9月的连续地震数据,通过对台站对间的数据进行互相关处理获得Love波的经验格林函数,然后通过多次滤波分析和相位匹配处理得到每个台站对的8 s到30 s的Love波相速度频散曲线。反演所得的Love波相速度图显示出明显的横向速度不均匀性,与研究区域主要地质结构和构造单元之间具有良好的相关性。由于较厚的沉积层,塔里木和准噶尔盆地在周期8~30 s总体都表现为低速的特征,而山地区则表现为相对高速的特征。此外,塔里木盆地的东西和南北也显示出明显的横向速度不均匀性。东部的速度明显低于西部。

关键字:背景噪声成像; Love波; 塔里木盆地; 相速度

中图分类号:P315.01 文献标识码:A 文章编号:1000-0844(2013)04-893-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.893

Love Wave Tomography in the Tarim Basin and Its Adjacent Regions

ZHANG Bing, ZHOU Ming, TAN Jing, ZHENG Dan, OUYANG Long-bin, SUN San-jian
(School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, we conduct background noise seismic tomography of the Tarim Basin and adjacent regions. The Tarim Basin of northwestern China, which is the focus of the study, includes the northern edge of the Tibetan Plateau, major mountain belts (the West Kunlun Mountains, Altyn Tagh, and Tianshan), and other important oil-and gas-bearing basins (the Junggar and Qaidam basins). Due to its complex topography and geological structure, the Tarim Basin and adjacent regions have become a prime place to understand the processes of continental collision, the mechanisms of mountain building and the interaction of tectonic blocks. The data used for the study include 9 months (January to September 2009) of horizontal component continuous data recorded at 74 seismic stations of the newly updated China Provincial Digital Seismic Networks and the regional Kyrgyzstan and Kazakhstan networks. Empirical Love wave Green's functions were obtained from interstation cross-correlations. Phase velocity dispersion curves for Love waves for periods between 8 and 30 s were measured for each interstation path by applying the multiple-filter analysis method with phase-matched processing. The high-resolution phase velocity maps show clear lateral variations that correlate well with major geological structures and tectonic units in the study area. Because of the thick sedimentary layers in the basins, we can clearly see that the phase velocity for Love waves with periods be-

tween 8 and 30 s is relatively low, while the phase velocity for mountain areas is high. This significant difference in the phase velocity may be related to the sharp changes in the surface topography and terrain elevation from the basin at low altitude to the high mountain areas. It is also possible that the phase velocity is quite different because of the different seismic wave transmission mediums in the study area. The basin is filled with sedimentary rock, and the Tibetan Plateau and the mountain areas are mostly metamorphic rock. The seismic wave velocity of sediments is far lower than that of the metamorphic rock. In addition, our results reveal obvious lateral phase velocity changes in the crust beneath the Tarim Basin. In the upper crust, the eastern basin has a lower velocity than the western basin; however, the northern basin has a lower velocity than the southern basin. The Manjaer depression in the northeast has a very thick sedimentary layer (nearly 20 km), however, the Bachu uplift has a relative thin sedimentary cover, therefore the Manjaer depression in the eastern Tarim Basin has a very low velocity and the Bachu uplift in the Tarim Basin has a high velocity. These areas have been shown to be places with hydrocarbon enrichment. This is mainly affected by the terrain differences, the sedimentary differences, the thickness of sediments and the sedimentary cover, and it is possible that some velocity variations are connected with the central suture of Presinian bedrock blocks in the northern Tarim Basin. In the Tarim Basin and adjacent regions, exploring the relationship between the different phase velocities for different times and geological formations is helpful for our understanding of the deep structural characteristics and dynamics in the Tarim Basin and its adjacent areas.

Key words: background noise tomography; love wave; tarim basin; phase velocity

0 引言

通过对地面上两个地震台站记录的背景地震噪声信号在长时间内进行互相关运算,提取格林函数,从而进行地震成像获取对地下结构的认识,已成为近年来跨学科研究的热点问题之一。Shapiro 等于 2005 年对美国加州 USArray 台阵的 62 个地震台站记录到的数据成功完成了从利用地震尾波到利用背景地震噪声提取台站间的格林函数的工作^[1]。自此,关于背景噪声面波层析成像的研究也变得更加全面和细致^[2]。

本文重点研究区域为中国西北部的塔里木盆地及其

邻区,研究范围为 72.0°E~98.0°E, 36.0°N~48.0°N, 包括重要的含油气沉积盆地(塔里木盆地、准噶尔盆地和柴达木盆地)、主要造山带(西昆仑山、阿尔金山和天山)以及青藏高原北缘(图 1)。

自新元古代晚期以来,塔里木地块及周缘地区经历了古亚洲洋盆和特提斯洋盆的开启、俯冲、增生以及微陆块多次碰撞造山,发生多期的构造、岩浆及成矿作用。特别是 50~60 Ma 以来受印度/亚洲碰撞的近程效应和远程效应影响,塔里木盆地周缘发生了强烈的隆升、缩短即走滑变形,形成了现今复杂的造山系^[3]。

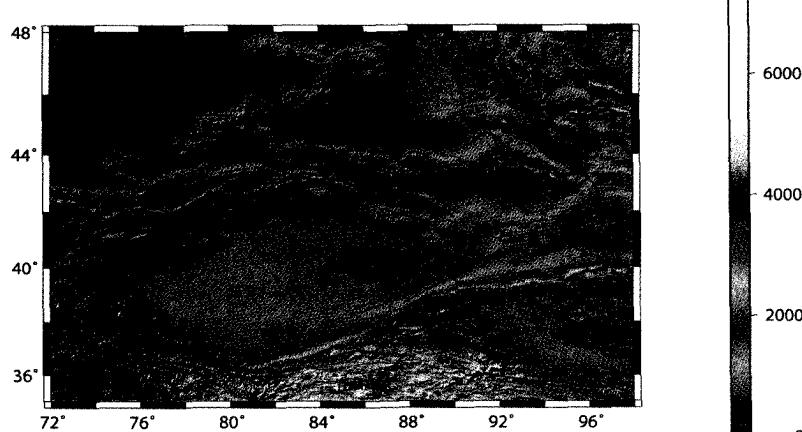


图 1 塔里木盆地及其邻区地形及台站分布图(三角形表示中国地震局数字台网布设的地震台站,星形表示吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦区域地震网络布设的地震台站)

Fig.1 Distribution of seismic stations in the Tarim basin and its adjacent regions.(Triangles represents the station of China Provincial Digital Seismic Network, and stars represents the station of regional Kyrgyzstan and Kazakhstan Seismic Networks)

塔里木盆地为环形山连环环绕, 北缘为天山弧形山链, 南缘为西昆仑-阿尔金弧形山链。这些造山带大多成形于古生代, 在中生代和新生代被激活。塔里木盆地作为一个复杂的、依山而筑的新生代前陆盆地, 是中国最大的沉积盆地, 面积约 $5.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 沉积厚度从 5 km 到 20 km 不等^[4]。准噶尔盆地位于塔里木的东北部, 其沉积盖层厚度超过 1 km^[5]。柴达木盆地北部和东北部以阿尔金-祁连造山带为界, 南部以东昆仑为界, 沉积盖层厚度约为 8~15 km^[6]。这三个盆地是中国油气资源储藏的主要沉积盆地地区。

由于复杂的地形地貌和地质构造, 塔里木及邻区已成为研究大陆碰撞过程、造山运动的机制和构造块体相互作用的重要地方。此外, 盆地内的油气积累主要受区域内板块构造框架和深部地质作用的影响, 因此该区域也逐渐成为了解含油构造控制机制的重要地方。近年来许多学者应用远震地震面波对该地区的地壳和上地幔结构进行了层析成像研究, 如高锐等通过横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面确定了西昆仑山与塔里木盆地在岩石圈尺度的耦合关系, 反映出陆内大陆-大陆的碰撞过程^[7]; Yi Xu 等利用远震 P 波到时地震层析成像描绘出了中国西北部地壳和上地幔三维速度^[8]; Ming Ni 等利用接收函数计算远震 P 波到时的方法, 得到了天山和塔里木盆地 0~80 km 深度范围的信息, 其结果显示塔里木俯冲到天山造山带之下, 造成了地壳变短和隆起的天山山脉^[9]。

在本文中, 我们采用中国地震局和吉尔吉斯斯坦以及哈萨克斯坦区域地震网络布设的共 74 个宽频地震台站采集到的地震数据水平分量, 用背景噪声互相关处理方法对该地区进行 Love 波相速度层析成像研究。以显示研究区内相速度与构造特征之间的相关性, 并通过反演得到的相速度图对地质构造含义进行讨论。

1 数据处理

本文中我们共得到研究区域内 74 个地震台站自 2009 年 1 月至 9 月采集到的连续水平分量地震数据。在数据处理和互相关运算中应用了之前 Li 相关研究中的有关程序^[10-11]。首先经窗函数处理后, 将连续记录截成了 1 小时数据文件, 并在一定程度上去除了趋势、平均值和仪器响应的影响; 之后进行了带通滤波, 使波形更加平滑, 幅值明显降低, 消除了一些异常波形记录对互相关的影响; 然后对数据进行了时间域归一化和频率域白噪化处理。将任意两个台站中的一个当做地震事件, 另一个当做接收台站, 分别将 N 向和 E 向分量旋转到径向 (R) 和切向 (T) 分量, 最后进行了互相关和叠加运算。

图 2 显示了 AAK 台站和其他台站之间的部分格林函数结果, 为 Love 波的切向-切向 ($T-T$) 互相关。如图所示, Love 波的正负相关时间滞后中同时出现了清晰信号。为了简化数据分析, 提高信噪比, 将每个互相关分成正负两个时间滞后, 然后叠加产生一个对称的互相关。然后采用多重滤波技术和相位匹配处理, 得到了相速度频散结果。为了确保反演结果的可靠性, 我们对每个频散结果都进行了人工检查, 最后舍弃了约为一半多的互相关。

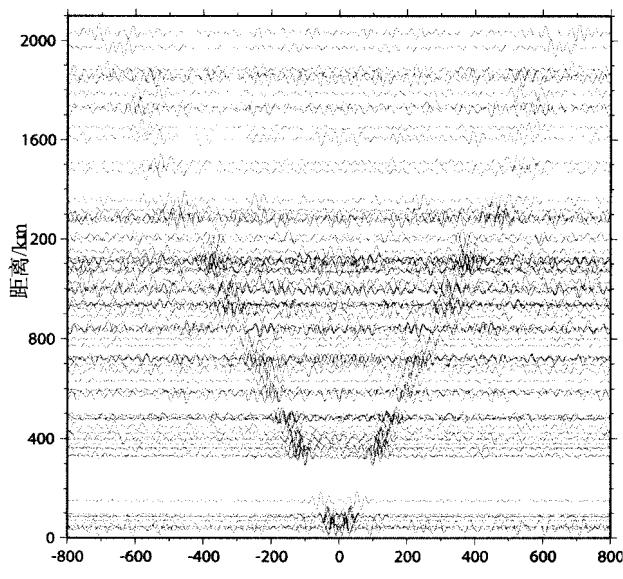


图 2 对 AAK 台站中心的切向-一切向 ($T-T$) 互相关, 进行滤波后的互相关记录剖面

Fig. 2 The filtered cross-correlation record section centered at station AAK with transverse-transverse cross-correlations

图 3 显示了不同周期的 Love 波相速度频散测量结果的个数, 可见在周期 15 s~25 s 内频散结果的数目较多。图 4 显示了从坐落于不同区域的 6 个台站对中测得的相速度曲线。不同周期的面波反映不同深度的大地构造, 通常, 短周期的面波受近地表物质的物性影响较大, 而长周期的面波更能反映地球深部的地壳结构。由图 4 可见, 在短周期内, 从山脉地区的 L4、L5 和 L6 路径得到的相速度曲线与从位于盆地中的 L1、L2 和 L3 路径得到的相比显示出高值。短周期内的相速度低值通常与地壳浅部的沉积层相关联。可见路径 L1、L2、L3 穿过了塔里木盆地和准噶尔盆地地区, 这是有很多沉积物的区域。由于研究区域内台站数量有限, 台站分布较为分散, 长周期内 Love 波的路径覆盖并不是很理想, 因此本文中 Love 波层析成像的最长周期只能大约到 30 s。

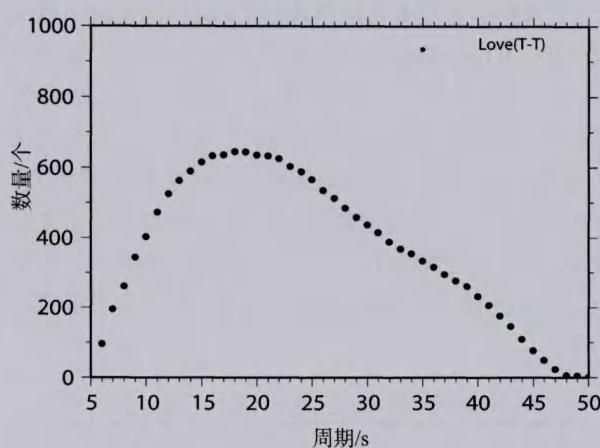
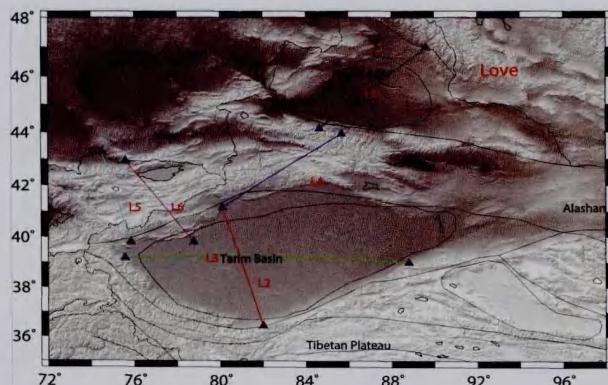


图3 不同周期的相速度频散曲线数目

Fig.3 Numbers of phase velocity dispersion measurements in different periods



(a) 相速度测量台站对路径举例

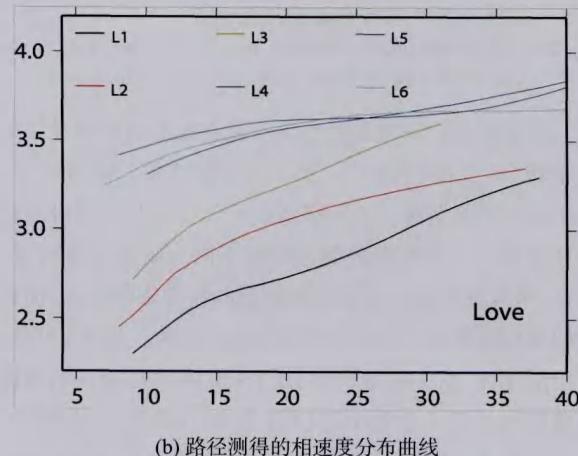


图4 6个台站对的相速度路径和分布曲线

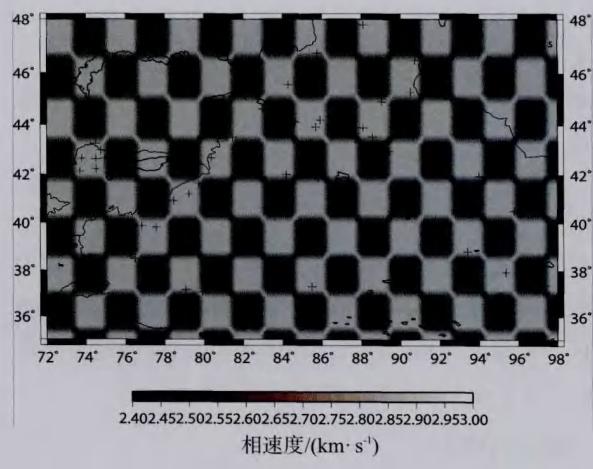
Fig.4 The interstation paths of the phase velocity measurement and the dispersion curves from six stations

2 相速度层析成像

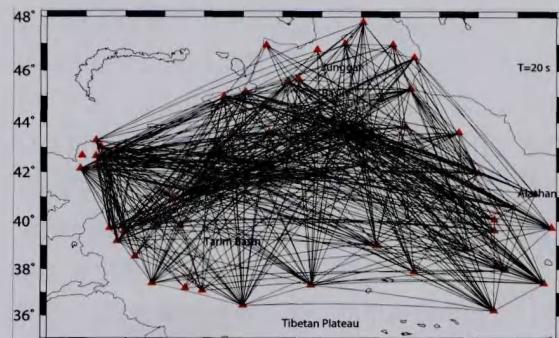
本文应用的是Occam反演方法。Constable等在大地电磁测深资料的反演中提出了在满足一定的残差条件下

求得最光滑的模型^[12]。在群速度二维反演中,黄忠贤等人将Constable的方法应用于面波网格频散反演,即本文使用的Occam反演方法^[13]。

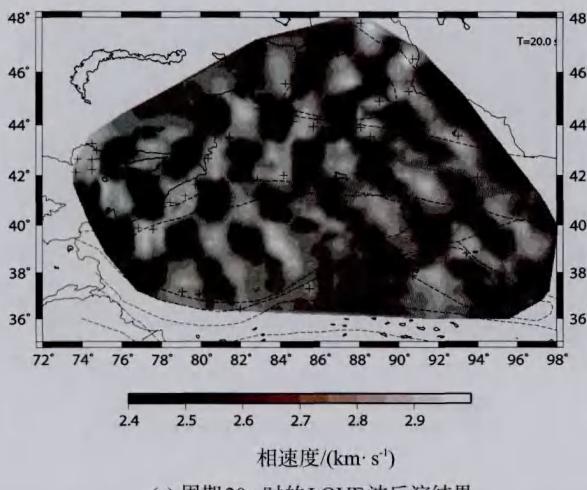
Occam反演方法用一个均匀网格结点上的面波速度来表示离散的模型,结点之间的速度通过双线性内插计算,该模型是一个分片光滑模型。反演面波相速度时,以连接震中和台站的大圆作为传播路径^[13]。本文应用该方法,将研究区域划分为 $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ 的网格,初速度为2.7 km/s,模型无先验条件。针对网格间距的不同进行检测板分辨率测试,最终将网格划分为 30×65 ,共有1950个网格数据点。图5(a)显示的输入棋盘速度模型,网格为 $1.6^\circ \times 1.6^\circ$ 模式;根据不同周期的路径覆盖率对网格进行了一系列棋盘测试,图5(b)显示了Love波周期为20 s时的路径覆盖;图5(c)显示了周期为20 s的Love波反演结果。对比反演结果与输入模型,可见在台站覆盖密集的地方能够较好地还原模型特征。本文中还测试了不同的光滑因子对反演结果的影响,随着 μ 值增大,模型的光滑程度上升,拟合误差增大,模型的分辨率降低。综合考虑模型的光滑程度和分辨率的影响,最终选择 $\mu=0.7$ 作为所有周期反演的光滑因子。



(a) 输入棋盘速度模型



(b) 周期20 s时的路径覆盖



(c) 周期 20 s 时的 LOVE 波反演结果

图 5 网格间距 1.6° 时的棋盘分辨率测试

Fig. 5 Checkerboard resolution tests with a grid spacing of 1.6.

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, 从而产生不同的到时和趋肤深度。一般周期越长面波的穿透深度越深。图 6 给出了 Love 波的径向灵敏度核函数, 由图可知 Love 波受浅层结构的影响更为明显。

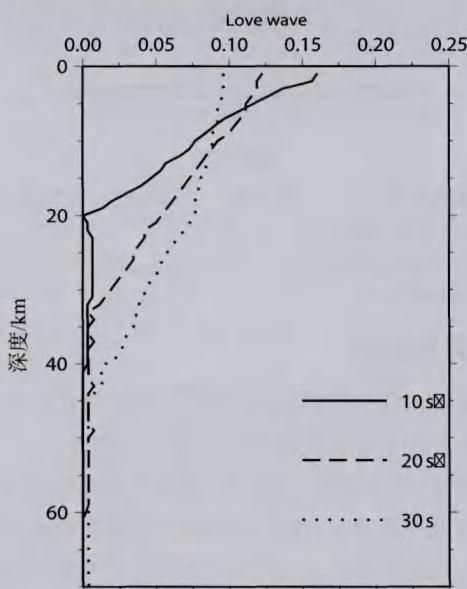
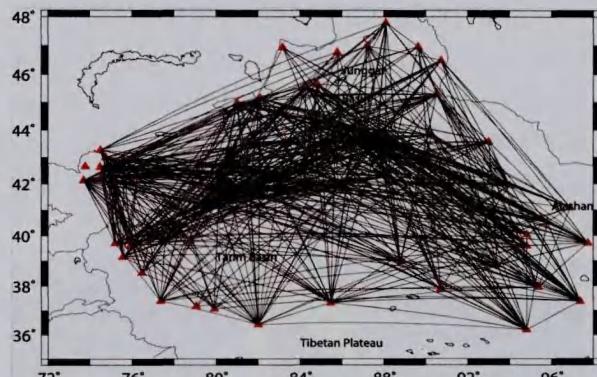


图 6 周期为 10 s、20 s 和 30 s 的 Love 波相速度的灵敏度核函数

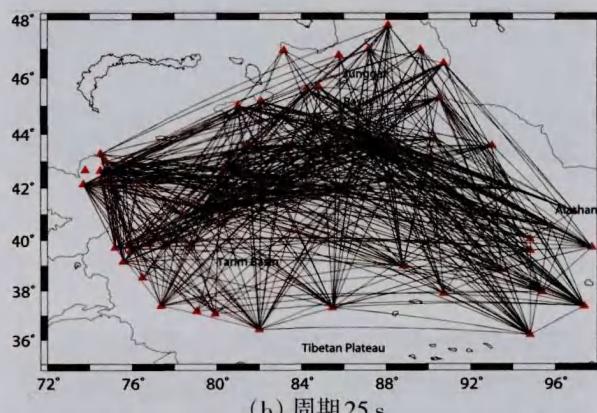
Fig. 6 Phase velocity sensitivity kernels of Love waves at periods of 10 s, 20 s and 30 s

根据提取的 963 条有效相速度频散曲线结果, 我们反演得到了周期为 8~30 s 的 Love 波相速度图。图 7 中给出了周期为 15 s、25 s 和 30 s 时的 3 幅相速度测量路径覆盖图。由图可知, 路径覆盖在 15~25 s 较好, 随着周期增大, 路径覆盖变得稀疏, 周期越长路径覆盖变得越差。另一方面, 研究区域内台站对分布不均一, 以区域的中心部分

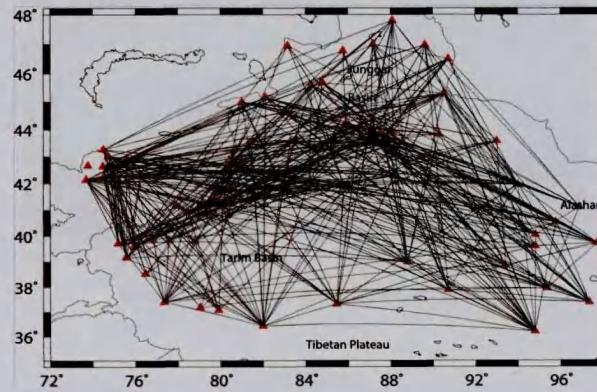
台站对分布最为密集, 向边缘地区逐渐变得稀疏。



(a) 周期 15 s



(b) 周期 25 s



(c) 周期 30 s

图 7 周期分别为 15 s、25 s 和 30 s 时的 Love 波路径覆盖图

Fig. 7 The path coverage at periods 15 s, 25 s and 30 s for Love wave.

图 8 给出了周期分别为 11 s、15 s、20 s、25 s 和 30 s 时塔里木盆地及邻区 Love 波相速度层析成像图。图上清晰显示了在研究区域内, 横向上相速度具有很强的不均匀性。在短周期(≤ 20 s)内, 从高海拔的青藏高原北缘、天山山脉到沉积盆地横向速度变化很大, 沉积盆地内为低速, 而山脉和高原边缘区域呈高速。另一方面, 塔里木盆地内部的速度也不是均一的, 东部速度明显低于西部, 最低速度集中在满加尔凹陷的下方, 在塔里木盆地西

南部巴楚隆起下方则发现了相对较高的速度。以大约 38° N东西向为界,总体上北部的速度也比南部低。在中长周期(20~30 s),随着周期的增大,满加尔凹陷对相速度的影响依然明显,30 s的Love波相速度图上清晰地显示出塔里木东南部下方存在低速异常。由于周期大于30 s时路径覆盖变得稀疏,我们并没有反演周期30 s以后的Love波相速度图。

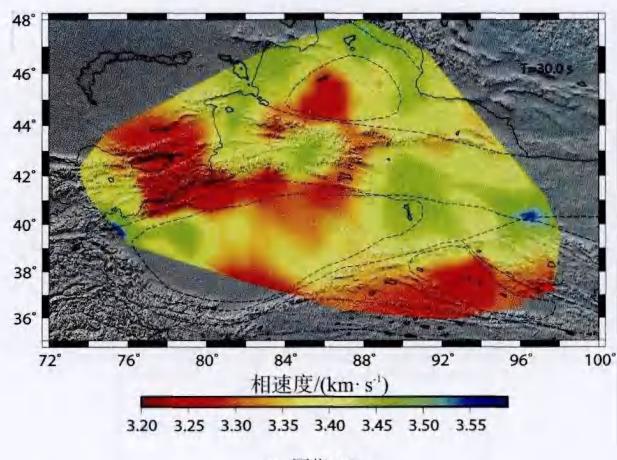
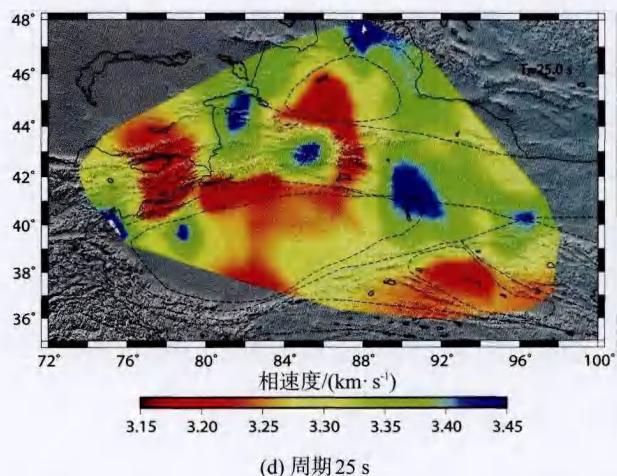
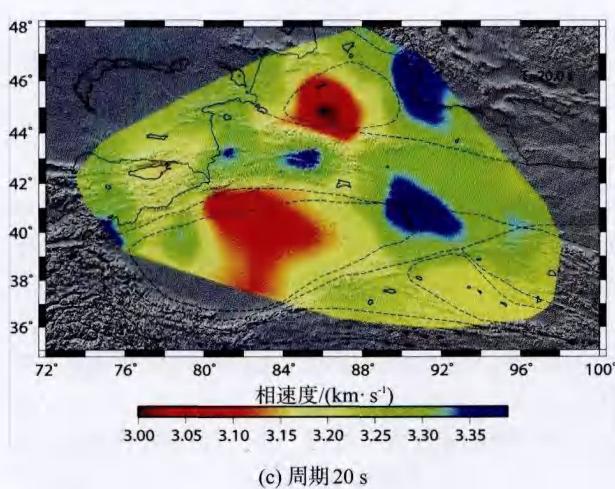
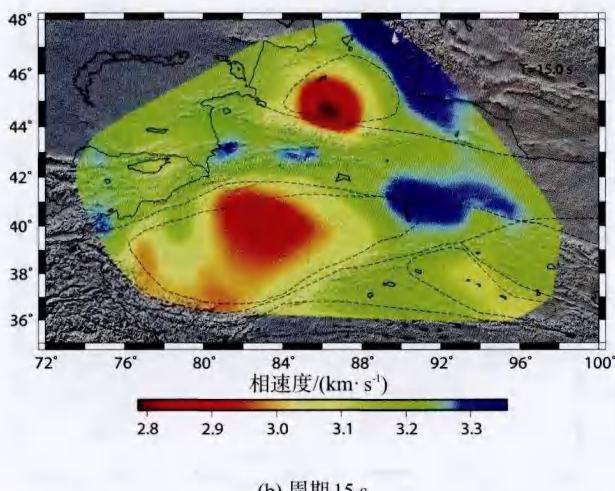
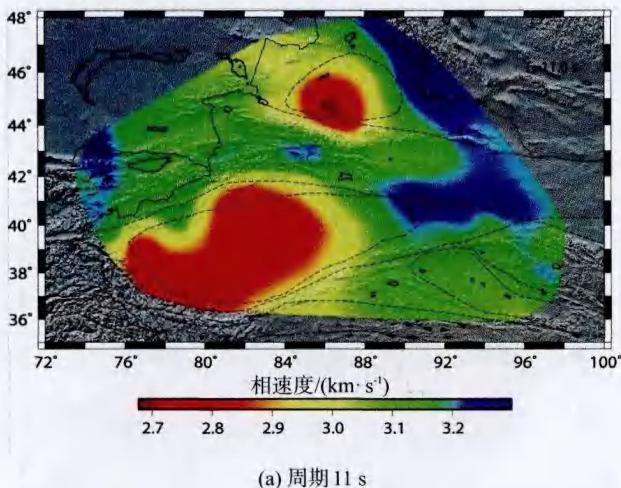


图 8 周期分别为 11 s、15 s、20 s、25 s 和 30 s 时的 Love 波相速度反演图

Fig.8 Inversion results at periods of 11 s, 15 s, 20 s, 25 s and 30 s for Love wave.

3 讨论与结论

本文中,我们得到的相速度图与研究区域内的地质地貌和主要构造单元之间具有良好的相关性。一方面,在短周期和中长周期内,塔里木、准噶尔和柴达木盆地内都表现为低速的特征,而天山山脉和青藏高原北缘地区则表现为高速的特征。这可能与地表地形从低海拔的盆地地形到高海拔的山地地形的急剧变化有关,也可能与地震波在研究区域内的传播介质有关。与盆地地区填充的沉积物不同,青藏高原和山脉地区大部分为变质岩,而沉积物中的地震波速度远低于变质岩。

另一方面,塔里木盆地内部的相速度分布也不是均匀的,这表明塔里木下方的结构不是水平均匀的。塔里木盆地西南部的巴楚隆起经历了加里东、海西、印支-燕山和喜马拉雅等多期构造运动,发生了多期的构造演化。自晚元古代巴楚隆起开始接受沉积,沉积了总厚达 5 000~10 000 m 的海相碳酸盐岩和陆相碎屑岩,已被证

明重要的油气勘探区^[14]。位于塔里木盆地东北部的满加尔凹陷,南北分别为塔中隆起和塔北隆起。该凹陷基底为前震旦系结晶变质岩系,盖层由震旦系至第四系组成,层序齐全,厚达20 000 m,该凹陷也被证明是油气生成和富集的地方^[15]。本文的研究结果表明,相速度与沉积层厚度和研究区域的其他主要特征之间具有很好的相关性,不同的速度分布与沉积厚度有关:塔里木盆地东部的速度明显低于西部,同时,北部的速度总体也比南部要低,东西向和南北向对比显示出明显的横向速度不均匀性,主要是受到满加尔凹陷下方和巴楚隆起下方沉积层厚度的明显差异的影响。

总之,通过中国地震局和相邻的吉尔吉斯斯坦及哈萨克斯坦台网在中国西北部记录的水平分量噪声数据,我们获得了高分辨率的Love波相速度图,相速度图中清晰地显示出横向不均匀性,这与研究区域内的主要地质结构和构造单元之间具有良好的相关性。同时在这次研究中,通过探讨不同周期相速度分布特征及与地质构造间的关系,帮助我们更好地理解了塔里木及邻区深部构造特征和动力学过程。

致谢:感谢中国地震台网中心为本研究提供地震波形数据。同时,非常感谢李红谊和李信富老师在研究过程中给予的指导和帮助。

参考文献(References)

- [1] Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. High-resolution Surface-wave Tomography from Ambient Seismic Noise[J]. Science, 2005, 307(5715): 1615–1618.
- [2] Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. Processing Seismic Ambient Noise Data to Obtain Reliable Broad-band Surface Wave Dispersion Measurements[J]. Geophysical Journal International, 2007, 169(3): 1239–1260.
- [3] 许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1–22.
- Xu Z Q, Li S T, Zhang J X, et al. Paleo-Asian and Tethyan Tectonic Systems with Docking the Tarim Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 1–22. (in Chinese)
- [4] 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.
- Chen H, Qin D. Unstable Cratonic and Paleozoic Basins of China[J]. Chinese Sedimentary Basins, Sediment. Basins World, 1989, 1: 7–16.
- [6] Gu S S, Di H S. Mechanism of Formation of the Qaidam Basin and Its Control on Petroleum[J]. Chinese Sedimentary Basins, Sediment. Basins World, 1989, 1: 45–51.
- [7] 高锐, 黄东定, 卢德源, 等. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面[J]. 科学通报, 2000, 45(17): 1874–1879.
- Gao R, Huang D, Lu D, et al. Co-existence of North- and South-dipping Structures Beneath the Western Tibet-Tarim Region[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(17): 1874–1879. (in Chinese)
- [8] Xu Y, Liu F, Liu J, et al. Crust and Upper Mantle Structure Beneath Western China from P Wave Travel Time Tomography [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(B10): 2220.
- [9] Mi N, Wang L, 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.
- [10] Li H, Bernardi F, Michelini A. Love Wave Tomography in Italy from Seismic Ambient Noise[J]. Earthquake Science, 2010, 23(5): 487–495.
- [11] Li H, Su W, Wang C, et al. Ambient Noise Love Wave Tomography in the Eastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 2010, 491: 194–204.
- [12] Constable S C, Parker R L, Constable C G. Occam's Inversion: A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data[J]. Geophysics, 1987, 52(3): 289–300.
- [13] 黄忠贤, 郑月军. 面波速度的 Occam 反演[G]//寸丹集——庆贺刘光鼎院士工作 50 周年学术论文集. 北京: 科学出版社, 1998.
- HUANG Z, Zheng Y. Occam Inversion of Surface Waves[G]// CunDan Set—Paper Set of Celebrating the 50th Anniversary of Academician Liu Guang-ding. Beijing :Science Press, 1998. (in Chinese)
- [14] 王清华. 塔里木盆地巴楚凸起构造特征及其对油气藏分布的控制[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3): 208–209.
- WANG Qing-hua. Structural Characteristics and Its Control on Reservoir Distribution in Bachu Arch, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3): 208–209. (in Chinese)
- [15] 周民都, 王椿镛, 曾融生. 青藏高原东北缘地壳上地幔速度结构的地震层析成像研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3): 224–233.
- ZHOU Min-du, WANG Chun-rong, ZENG Rong-sheng. Seismic Tomography of the Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle in Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 224–233. (in Chinese)
- [16] 王琼, 曲延军, 聂晓红. 新疆北部构造区带地震活动状态分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 137–142.
- WANG Qiong, QU Yan-jun, NIE Xiao-hong. Analysis on Seismicity State of Tectonic Regions in the Northern Part of Xinjiang[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(2): 137–142. (in Chinese)