

易桂喜, 姚华建, 朱介寿等. 中国大陆及邻区 Rayleigh 面波相速度分布特征. 地球物理学报, 2008, 51(2): 402~411

Yi G X, Yao H J, Zhu J S et al. Rayleigh-wave phase velocity distribution in China continent and its adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 402~411

中国大陆及邻区 Rayleigh 面波相速度分布特征

易桂喜^{1,2}, 姚华建³, 朱介寿¹, Robert D. van der Hilst³

¹ 成都理工大学, 成都 610059

² 四川省地震局, 成都 610041

³ Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA

摘 要 本文根据 102 个数字化台站记录的长周期垂直向面波资料, 利用双台互相关方法测量了 538 条独立路径的基阶 Rayleigh 面波相速度频散资料, 反演获得了中国大陆及边邻地区(70°E~140°E, 18°N~55°N) 20~120 s 周期间隔为 5 s 共 21 个周期的 Rayleigh 波相速度空间分布图像. 检测板测试结果显示中国大陆中东部地区横向分辨率可达 3°, 而西部及边邻地区大约 5°. 研究表明, 中国大陆地区的 Rayleigh 波相速度分布横向差异显著, 大致以 104°E 为界, 可分成具有不同速度结构特征的东、西两部分. 一般较短周期(20~35 s)的相速度分布受地形和地壳厚度的影响较大, 总体表现为东部速度高, 西部速度低. 塔里木盆地、青藏地块及其东缘的松潘-甘孜地块形成整个研究区内最为突出的低速异常体, 蒙古西部低速特征也较清晰; 东部的四川盆地、扬子地块、华南地块、松辽盆地、日本海及蒙古东部高速特征明显. 随着周期的增大, 青藏地块中部的低速异常体横向尺度逐渐缩小, 而喜马拉雅冲断带、塔里木盆地相速度不断升高, 意味着青藏低速区受到南、西北、东三个方向的高速区夹击, 可能导致高原中部软弱的低速物质向东南方向迁移; 同时, 东部地区由高速逐渐转变为大面积的低速分布, 反映东部地区岩石圈较薄而软流圈发育. 随着青藏地块低速特征的减弱, 印支地块北部及相邻海域、东海、东北吉林深震区、日本海、中-朝地块至蒙古东部成为 120 s 周期上突出的低速异常体, 而上扬子地块包括四川盆地高速特征依然明显, 显示出稳定的古板块特征. 南北地震带始终呈现出相对较低的速度特征, 并成为划分中国大陆具有不同岩石圈相速度特征的东部与西部的天然分界.

关键词 Rayleigh 面波, 相速度分布, 双台法, 中国大陆

文章编号 0001-5733(2008)02-0402-10 中图分类号 P315 收稿日期 2007-02-09, 2007-11-06 收修定稿

Rayleigh-wave phase velocity distribution in China continent and its adjacent regions

YI Gui-Xi^{1,2}, YAO Hua-Jian³, ZHU Jie-Shou², Robert D. van der Hilst³

¹ Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

² Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

³ Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA

Abstract Using a two-station analysis and vertical component records of Rayleigh waves from 102 seismograph stations in China and adjacent areas, we measured inter-station fundamental mode Rayleigh-wave phase velocity dispersion in the period band 20~120s for 538 independent paths. Dispersion data were then used to invert for 21 phase velocity maps from 20s to 120s with 5s interval in the continental China and its adjacent regions(70°E~140°E, 18°N~55°N). Checkerboard tests show that the lateral resolution is about 3° in central-eastern

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40234047, 49734150)资助.

作者简介 易桂喜, 1964 年生, 研究员, 成都理工大学在职博士, 主要从事地震活动性分析和地震预报方法研究以及地壳上地幔结构研究.

E-mail: yigx@mail.com, yigx@eqsc.gov.cn

China and about 5° in western China and adjacent regions. The spatial distribution of phase velocities in the study area is significantly different for the parts of China to the west and east of approximately 104°E . The phase velocity maps at shorter periods (20 ~ 35 s) are influenced by topography and crustal thickness. On these maps, the western part is characterized by low phase velocities and the eastern part shows relatively high phase velocities. The Tarim basin, the Qinghai-Tibet plateau, and its eastern margin (the Songpan-Garze block) form the most prominent low velocity structures in the study region. A large-scale low velocity anomaly also appears in western Mongolia. The Sichuan basin, the Yangtze block, the south-China block, the Songliao basin, the Sea of Japan, and eastern Mongolia are marked by relatively high phase velocities. At larger periods, the lateral size of the low velocity anomaly beneath central Qinghai-Tibet becomes smaller whereas the phase velocities increase beneath the Himalayan thrust and Tarim Basin. This implies that the Qinghai-Tibet low velocity area is surrounded by seismically fast structures to the south, northwest, and east, which may control a southeastern migration of mechanically weak, seismically slow material away from the central plateau. Meanwhile, a large area in the eastern part which appears fast at shorter periods shows relatively low phase velocity, suggesting a relatively thin lithosphere and a pronounced asthenosphere. As the low velocity anomaly beneath Qinghai-Tibet plateau becomes weaker, the northern Indo-China block and its adjacent off-shore areas, East China Sea, Northeast China's deep-earthquake region in Jilin Province, Sea of Japan, and the Sino-Korean block to eastern Mongolia are marked by prominent low phase velocity anomalies at the period 120s. However, high phase velocities appear in the upper Yangtze block (including the Sichuan Basin), which means that the ancient block is relatively stable. The North-South Seismic Belt in China has relatively low phase velocity from periods 20s to 120s, and becomes a natural boundary separating the continental China into the eastern and western parts with different lithospheric phase velocity features.

Keywords Rayleigh wave, Phase velocity distribution, Two-station method, Continental China

1 引言

中国大陆及近邻区域是晚古生代(约 250 ~ 200 Ma)以来由多个较小的板块或地块(主要包括中-朝、扬子、印度支那、塔里木、哈萨克斯坦等)快速汇聚形成的。至古新世,印度次大陆与欧亚大陆碰撞,引起地壳大规模缩短及地表急剧隆升,形成了喜马拉雅、兴都库什造山带和现今地球上最高的高原。从印度半岛经青藏高原、新疆、蒙古至贝加尔湖一带,成为全球最大的岩石圈汇聚场所^[1,2],该地区特殊的动力学背景及独特的地形地貌特征,使其成为全球地球物理学家研究的热点。该地区的地形地貌构造特征请见图 1。

地震面波频散一直是研究地壳上地幔结构的有力工具^[3-7]。利用 Rayleigh 面波群速度频散研究中国大陆及其邻近区域的速度结构已取得了大量成果^[8-27]。而利用 Rayleigh 波相速度频散资料的研究则相对较少,曾融生等^[28]最早开始利用 Rayleigh 波相速度频散研究我国的地壳结构,并且认为在研究不同地区地壳结构的相对变化时,相速度方法比群

速度方法更准确。双台法是相速度频散曲线提取的一种常用方法,该方法可以消除震源误差的影响,测量精度相对较高。冯锐等^[29]、陈国英等^[30]、徐果明等^[31]、何正勤等^[32,33]、姚华建等^[34-36]以及徐果明等^[37]先后利用双台互相关法,对中国大陆或部分区域的速度结构进行了研究。其中,冯锐等^[29]利用 15 个台站获得的 28 条双台路径上 12 ~ 40 s 周期的 Rayleigh 波相速度资料,结合群速度资料,研究了中国地壳结构;陈国英等^[30]利用 7 个台站获得的 5 条双台路径上 10 ~ 120 s 周期的 Rayleigh 波相速度,研究青藏高原深部结构的横向变化;徐果明等^[31]根据 21 个台站获得的 43 条双台路径上 10 ~ 58 s 周期的 Rayleigh 波相速度,反演得到了中国大陆东部区域地壳上地幔的三维横波速度结构图像;何正勤等^[32,33]分别利用北京台网 7 个台站获得的 5 条双台路径上 2 ~ 18 s 周期的 Rayleigh 波相速度和云南数字地震台网 23 个台站获得的 142 条双台路径上 1 ~ 18 s 周期的 Rayleigh 波平均相速度,研究了河北平原和云南地区的地壳中上部结构;姚华建等^[34,35]以及徐果明等^[37]利用 30 个台站获得 110 条双台路径上 15 ~ 120 s 周期的 Rayleigh 波相速度,反演得到了中国西部及

其邻域相速度分布结构图像. Rapine 等^[38]利用双台法对西藏地区进行了研究, 但仅获得了 20 ~ 60 s 周期的 Rayleigh 波相速度频散资料. 上述大部分研究由于台站和事件分布的限制, 获得的双台路径较少, 分辨率相对较低, 而分辨率相对较高的区域性研究^[32, 33]周期范围小, 仅能反映较浅部的结构特征. 最近 Yao 等^[39]利用青藏高原东南部边缘 25 个宽频带流动观测台站获得了 20 ~ 120 s 的 Rayleigh 面波相速度分布, 其分辨率在中短周期可达 100 km, 在中长周期约为 200 ~ 300 km. 本文利用挑选出的 365 个地震事件得到的 538 条独立双台路径 Rayleigh 波相速度频散资料, 反演得到了中国大陆及边邻地区 20 ~ 120 s 共 21 个周期的 Rayleigh 波相速度分布图像, 并用检测板模型对反演结果的分辨率进行了测试.

2 资料与计算

2.1 资料选择

波形资料来源于以下台站: 中国国家数字地震台网中心及中国数字地震台网 (CDSN) 48 个台站, IRIS 及 GEOSCOPE 分布在中国大陆周边地区的 21 个台站, 1991 ~ 1992 年印度 - 西藏实验 4 个流动台站, 2001 ~ 2002 年喜马拉雅 - 尼泊尔 - 西藏实验 (HIMNT) 15 个流动台站以及 2004 ~ 2005 年美国麻省理工学院与成都矿产研究所合作的川滇实验 14 个流动台站, 共计 102 个台站, 所用台站分布如图 1 所示.

波形资料的选取遵循以下原则: (1) 所选取的地震事件均为震源深度小于 100 km 的浅源地震, 且地震的矩震级 M_w 满足 $5.0 < M_w \leq 7.0$, 以保证激发的面波主要是基阶振型. (2) 对于选取的双台路径, 满足地震震中与双台大圆路径的偏差小于 3° . (3) 在挑选双台资料时, 要求选用的两个台站的 Rayleigh 波垂直向波形记录均较清晰, 并且经过时频分析后能观察到连续清晰的波包能量到时.

2.2 双台相速度频散提取

本文采用常用的双台窄带通滤波 - 互相关法^[29, 30, 33, 40]及基于图像分析的相速度频散曲线提取技术^[34, 39]提取 Rayleigh 面波相速度混合路径频散.

根据波形记录情况, 经过仔细筛选和计算, 最终利用 1990 年至 2006 年之间 365 个地震事件的长周期垂直向面波记录, 获得了 1223 条 (含重复路径) 双台路径上 20 ~ 120 s 周期的 Rayleigh 波相速度频散资料. 从我们所处理的资料看, 因为短周期 (小于 20 s) 面波很容易受复杂地壳结构的散射影响, 所以

仅有极少数资料可获得 20 s 前的相速度频散, 而由于大部分仪器频带宽度的限制, 也较难获得 120 s 后的可靠相速度频散资料.

将重复路径相速度频散资料进行算术平均处理, 最终获得了 538 条独立双台路径的相速度频散资料, 所获得的相速度频散资料的相对误差一般小于 1%. 双台路径分布见图 2. 从图 2 可看出, 路径较好地覆盖了中国大陆地区.

图 3 给出了 5 条双台路径的平均相速度频散曲线, 可看出, 通过不同路径的相速度存在着显著差异, 从而也反映出中国大陆各区域结构存在明显的横向差异.

3 横向分辨率测试及深度方向分辨核

本文利用 Tarantola^[41, 42]非线性反演方法, 反演获取 Rayleigh 面波相速度 (V_c) 的二维空间分布图像. Tarantola 非线性反演方法的分辨率不仅取决于路径的覆盖程度, 还取决于相关长度的选择^[26] (本文选取的是高斯型的相关函数). 相关长度太小, 会出现伪异常, 而相关长度太大, 则可能使较小尺度的异常被平滑而显现不出来. 为了正确地选择相关长度, 本文采用检测板测试方法 (checkerboard test) 确定. 测试结果显示, 根据我们目前 20 ~ 120 s 周期的路径覆盖情况, 中国大陆地区速度异常体的横向分辨率基本上可达 5° (相当于地表 550 km), 中国中、东部地区因路径覆盖较好甚至可达 3° (相当于地表 330 km). 图 4 为按 $5^\circ \times 5^\circ$ 网格划分、相关长度取 250 km 时, 40 s 周期的分辨率测试结果, 从该图可看出, 中国大陆西部局部地区 ($85^\circ \sim 95^\circ$) 以及边邻地区由于路径覆盖的原因, 分辨率相对较低, 异常形态存在侧向拉长的现象, 但高速、低速异常仍然是可分辨的. 因此, 反演时所取相关长度最终选为 250 km.

因为不同周期的相速度对不同深度范围内的横波速度结构敏感程度存在差异, 所以在将面波相速度和横波速度结构联系在一起时, 通常需要给出不同周期的相速度在深度方向上的分辨核函数, 如图 5 所示. 一般而言, 基阶 Rayleigh 面波相速度对大约 $1/3$ 波长深度附近物质的横波速度结构最为敏感. 且短周期面波相速度的最敏感深度范围比较窄, 如 25 s 时敏感深度范围约在 25 ~ 35 km 之间, 但中长周期面波相速度的敏感深度范围很宽, 如 80 s 时, 最敏感深度的范围约在 90 ~ 160 km 之间. 所以短周期面波在深度方向上 (尤其是地壳上地幔顶部) 的分

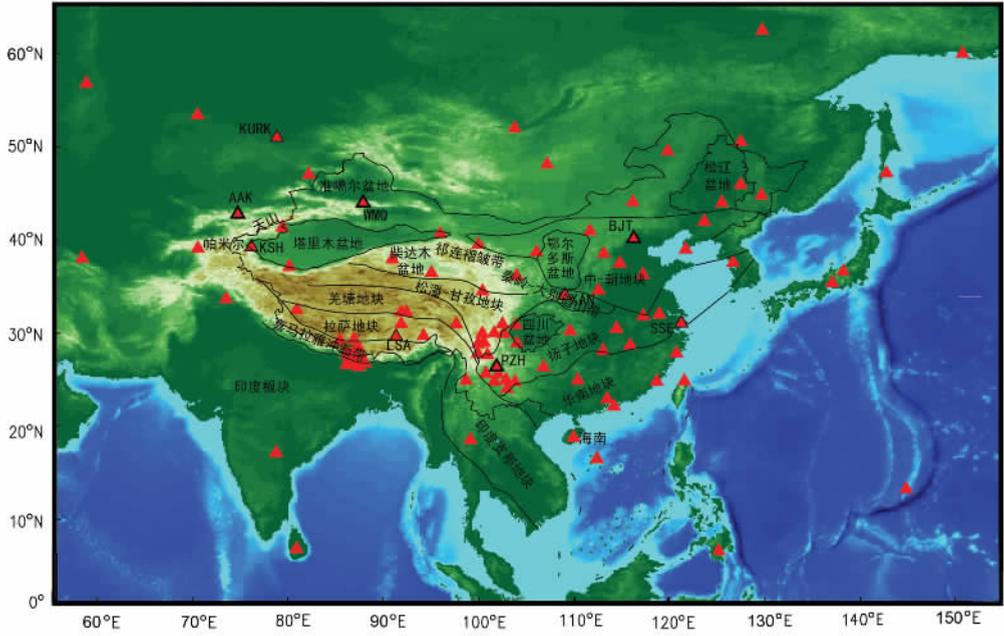


图1 中国及邻区地形地貌与构造分区图

图中红色三角形表示台站位置.

Fig.1 Topography and tectonic sketch map in China and adjacent regions

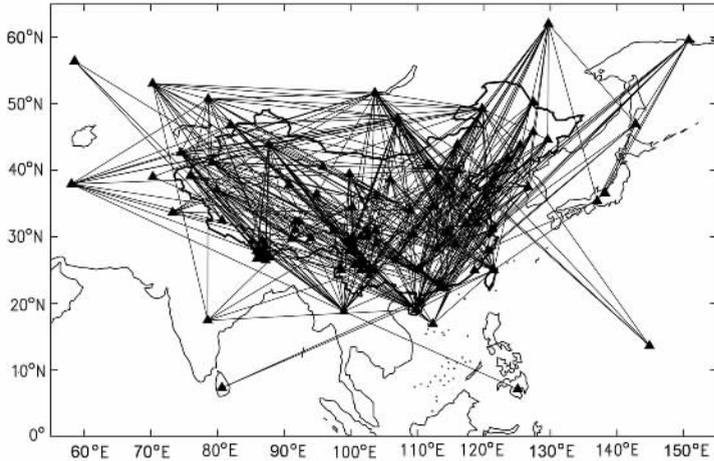


图2 双台路径分布

Fig.2 Inter-station path distribution

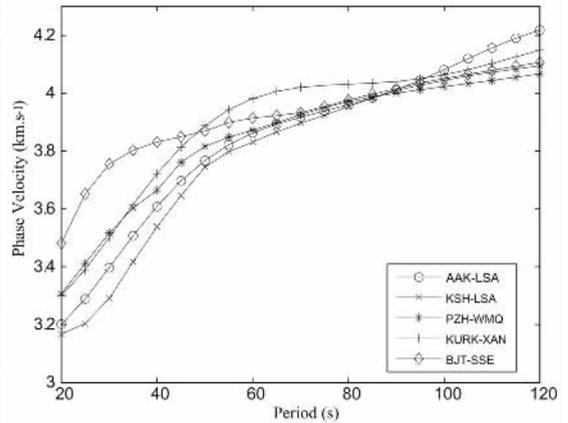


图3 5条不同双台路径上20~120s的Rayleigh波平均相速度频散曲线, 其台站位置请见图1
Fig.3 Average Rayleigh-wave phase velocity dispersion curves at periods 20~120s along 5 different inter-station paths. Please refer to Fig.1 about the location of stations illustrated here

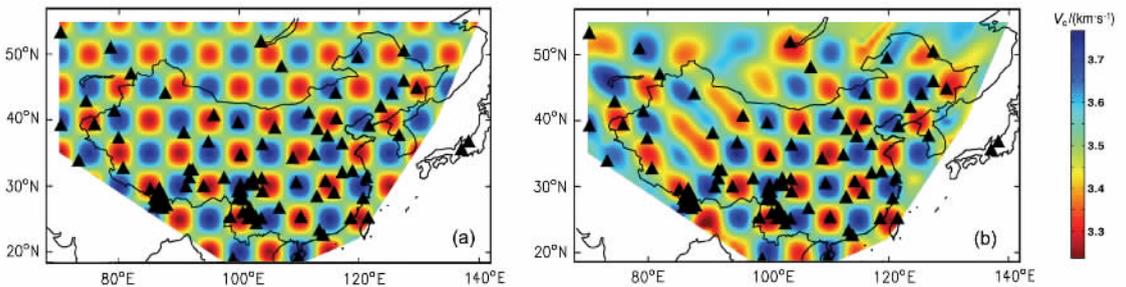


图4 40s周期时 5°x5°的检测板分辨率测试

(a) 给定速度分布; (b) 反演结果.

Fig.4 Result of 5°x5° checkerboard resolution test at period 40s

(a)The input phase velocity model; (b)The output.

分辨率很高,但中长周期的面波在深度方向上的分辨率较差,仅能反映上地幔较大深度范围内平均横波速度结构的变化情况。

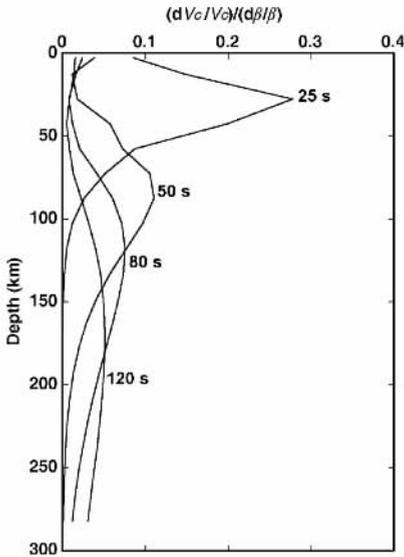


图 5 不同周期 Rayleigh 面波相速度 (V_c) 对深度方向上横波速度 (β) 的分辨核函数

Fig. 5 Depth sensitivity kernel to shear velocity (β) for Rayleigh wave phase velocities (V_c) at different periods

4 相速度空间分布特征与讨论

不同周期的相速度图像反映的是不同深度范围内结构的横向变化情况。反演结果显示,中国大陆西部(大约 104°E 以西)地区的速度分布特征不同于中国大陆东部。总体特征与目前已有的相关研究结果^[2, 15, 16, 18-27, 43-48]基本一致,但局部细节有差异。

较短周期(20~35 s)的 Rayleigh 面波相速度主要对 20~50 km 深度范围内的横波速度结构最为敏感,所以其分布图像受地形和地壳结构的影响较大,总体表现为东部(约 30~40 km 地壳厚度)相速度高,西部(约 50~75 km 地壳厚度)相速度低。以 25 s 周期的图像为例(图 6a),可以看出,除柴达木盆地表现为高速异常外,西部地区以大面积低速异常为特征,由拉萨地块和羌塘地块组成的青藏地块及其东缘的松潘-甘孜地块与塔里木盆地、准噶尔盆地南部形成一个巨大的异常低速区,该低速区甚至向东延伸进扬子地块的西部边缘地带。此外,蒙古西部高原地带低速异常也较突出。中国大陆东部地区及边缘海相速度明显高于西部,高速区呈北北东向分布,其中,华南地块及相邻海域高速异常最为突出,四川盆地、扬子地块、渤海湾至松辽盆地以及邻

区的日本海、蒙古东部高速特征明显,而内蒙中西部包括鄂尔多斯盆地的西北部分呈现低速异常,但随着周期的增大,该低速区面积缩小,鄂尔多斯盆地逐渐转变为高速区。

40~50 s 周期的 Rayleigh 面波相速度主要对 40~80 km 深度范围内物质的横波速度最为敏感,相速度分布显示,研究区内最突出的低速异常仍然在中国大陆西部,但面积随着周期的增大不断收缩。至 50 s 周期(见图 6b),青藏块体极低速异常区已收缩至块体的中东部地区,该低速异常区与滕吉文等^[49]所获得的东亚大陆具有最深 Moho 界面的区域基本一致,而西藏南部的相速度呈现出的“西高东低”的现象也印证了该地区 Moho 界面“西浅东深”^[50]的分布特征;东缘的松潘-甘孜地块的极低速异常区也已向该块体的中西部收缩;喜马拉雅冲断带中南段、塔里木盆地、准噶尔盆地以及哈萨克斯坦东部地区开始由原来的低速区转变为高速区,柴达木盆地仍然是西部最突出的高速异常区之一。东部的四川盆地、扬子地块、鄂尔多斯盆地、华南地块、松辽盆地及蒙古东部地区高速特征依然明显,但华南地块内极高速区的面积已显著收缩。

55~75 s 周期的 Rayleigh 面波相速度受上地幔顶部(约至 120 km)物质的横波速度结构影响较大。然而,对于在青藏高原内或穿过高原的路径,其相速度仍然受到巨厚地壳(大约 70~80 km)的影响。相速度结构分布显示青藏块体的中部地区及松潘-甘孜地块中西部仍然是研究区内最突出的低速异常区,帕米尔高原东部、整个喜马拉雅冲断带、塔里木盆地、北天山、准噶尔盆地与柴达木盆地以高速异常为特征,此时的青藏低速区已受到南(喜马拉雅冲断带)、西北(塔里木盆地与柴达木盆地)、东(四川盆地)三个方向的高速结构的夹击,这些高速结构可能起着阻挡软流圈流动的作用,从而导致软弱的(低速)物质向东南方向流动(或逃逸)。东部地区的速度结构横向差异小于西部,但随着周期的增大,速度分布同样出现分化,呈现出明显的空间差异性。印支地块北部及相邻海域、东海、东北吉林等地区开始出现明显的局部低速异常体,而高速异常区仅存于包括四川盆地在内的扬子地块、鄂尔多斯盆地、华南地块部分地区,表明这些地质单元的岩石圈根部已深入上地幔软流圈。东部低速区的分布与 Yanovskaya 等^[27]的研究结果基本一致。从 70 s 周期的相速度图像(见图 6c)上可发现,东部速度低、西部(除青藏块体的局部区域外)速度高的特征已经

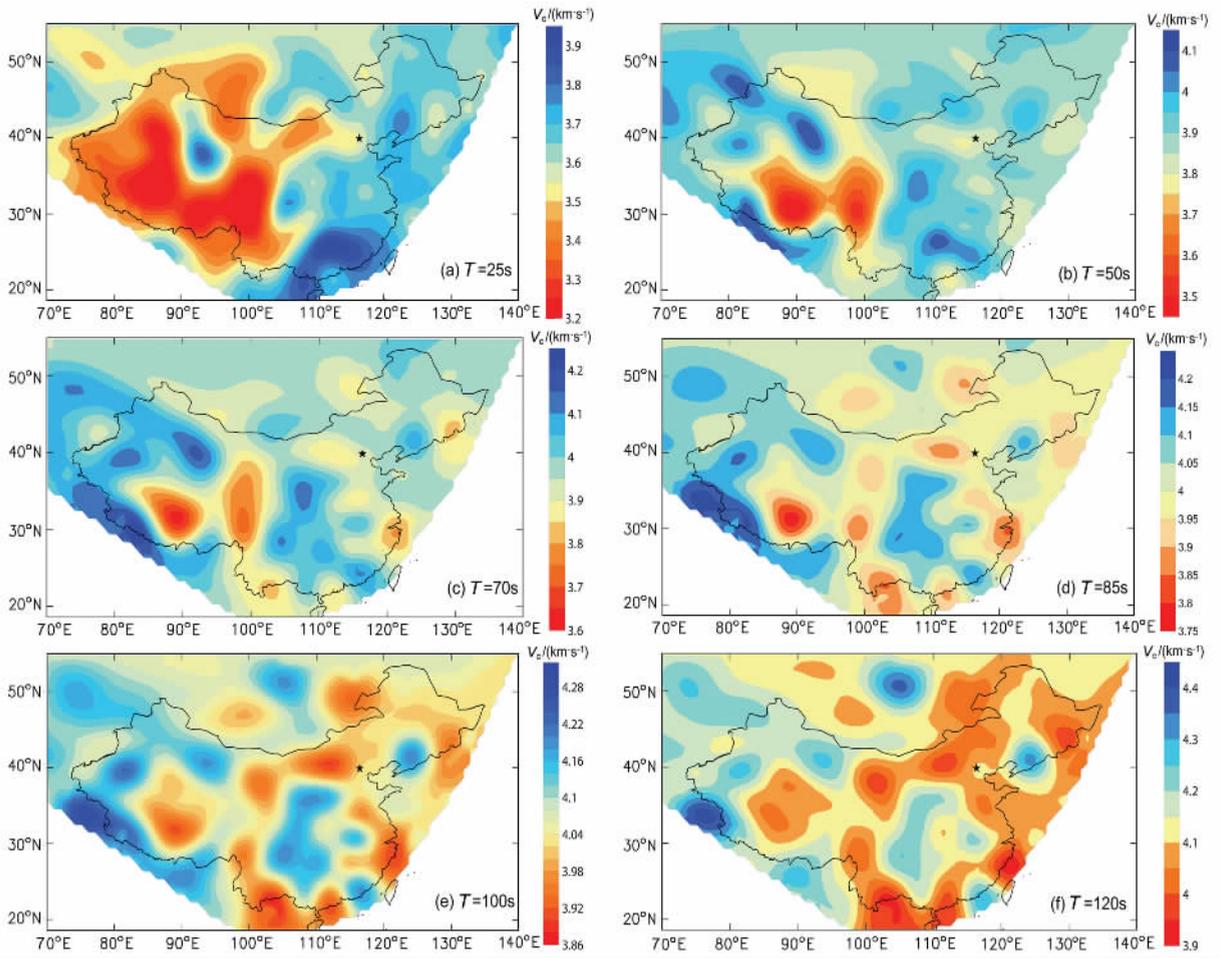
图 6 不同周期 T 的 Rayleigh 波相速度分布图像

Fig. 6 Rayleigh wave phase velocity maps at different periods

显示。

而至 80~90 s 周期(图 6d),西部极低速异常区仅存于青藏块体的中部地区,其东缘(松潘-甘孜地块)低速特征已明显减弱,而印支地块北部的异常低速区面积不断扩大;东部的中-朝地块、东海、东北吉林与相邻的日本海以及蒙古东部低速异常也越来越突出,表明这些地区在该深度范围内(约 120 km)大都进入上地幔软流圈。Lebedev 等^[43]的研究结果显示中-朝地块中部上地幔低速层始于 100 km 深度,与我们的结果大致相当。而朱介寿等^[2]的研究结果显示华北、华南、东海陆架地区及西太平洋边缘海地区由于软流圈上涌,地幔物质上升,引起岩石圈拉张减薄,其岩石圈厚度仅 50~80 km,也与我们的结果相吻合。

100~120 s 周期的 Rayleigh 面波相速度主要受上地幔约 140~220 km 深度范围内的物质横波速度结构的影响,其分布(图 6(e,f))已经显示出,尽管青藏地块中部(中心位于羌塘地块)速度仍然低于相邻

的喜马拉雅冲断带和塔里木盆地,但已不再是研究区的低速中心,其低速特征随周期的增大不断减弱,且高原内部低速区出现分化,这一特征与彭艳菊等^[46]利用 Love 波群速度所获得的研究结果基本一致。喜马拉雅冲断带、塔里木盆地、柴达木盆地高速特征依然明显,Villaseñor 等^[44]同时利用 Love 波和 Rayleigh 波的群速度和相速度反演获得的横波速度结构以及 Huang 等^[47]利用体波资料获得的速度结构也证实了此结果。而东部地区随着周期的增大逐渐转变为大范围的低速分布,反映东部地区上地幔岩石圈较薄,软流圈发育,但包括四川盆地在内的上扬子地块、鄂尔多斯盆地中南部仍表现为高速异常,反映这些区域存在较厚的稳定克拉通岩石圈。

从图 6f 可看出,印支地块北部及包括海南岛在内的相邻海域已成为 120s 周期相速度图像上最突出的低速异常区,这一结果也与已有的研究结果基本一致^[27,44~48]。Huang 等^[47]及 Lebedev 等^[43]将海南岛地区低速异常区的存在解释为因深部存在地幔热

柱所致;所不同的是,我们的结果显示,该区的低速异常并非从浅部开始,而是从 70 s 周期后逐渐显现的,70 s 前的低速特征并不明显,这一结果与李红谊等^[18]利用 Rayleigh 波群速度获得的结果相吻合。另一突出的低速异常区由中-朝地块延伸到蒙古东部。此外,中国东北吉林及相邻的日本海也存在明显的低速异常。而喜马拉雅冲断带北段与青藏块体的西北角则成为 120 s 周期相速度图像上最突出的高速异常区,这与 Li et al 等^[48]P 波层析成像在 200 km 深度的结果较为相似。在该周期相速度图上,蒙古北部与俄罗斯交界的贝加尔湖南端地区也显示出高速异常,这一结果与 Lebedev 等的结果基本一致^[51],但由于该区域已经处于研究区域的边缘,结果的可靠性尚有待进一步证实。

对比图 (a~f),不难发现,在所有周期的相速度图像上,我国著名的南北地震带(约在 97°E~104°E 区域内,见图 7)始终处于相对低速,从而成为划分东、西两大不同相速度特征区的天然分界。该带的低速成因或许与其所处的构造位置有关。同样,青藏地块在中、短周期的相速度图像上均表现出低速特征,该地块在较短周期上的低速异常可用巨厚的地壳甚至壳内可能存在低速层等来解释,但随着周期的增大,青藏地块中部仍然是南北地震带以西最突出的低速区。上地幔中推测的低速体是否可能由碰撞导致软流圈部分物质上涌进入岩石圈并与岩石圈物质混合所致?而青藏地块众多的温泉分布是否反映了印度板块与欧亚板块碰撞导致软流圈部分物质被挤入地壳而使温度升高的结果呢?这些问题均有待进一步研究。

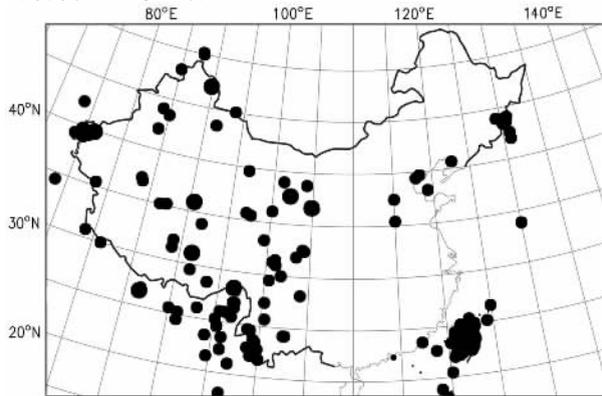


图 7 1990~2007 年间在中国陆地及其邻域发生的 $M_s \geq 7$ 级地震的震中分布情况

Fig. 7 The epicenters of earthquakes (black dots) with $M_s \geq 7$ occurred in 1990~2007 in China and its adjacent areas

5 结 论

利用 Rayleigh 波相速度频散研究了中国大陆及边邻地区的相速度分布特征,主要结果如下:

(1) 中国大陆及邻区 Rayleigh 波相速度分布横向差异显著。根据横向不均匀性特征,将中国大陆划分成东、西两部分,其分界为在所有周期上都具有较低相速度的南北地震带(大约沿 104°E 线)。

(2) 较短周期的相速度分布受地形和地壳厚度影响较大,总体表现为东部速度高、西部速度低。塔里木盆地、青藏地块及其东缘(松潘-甘孜地块)组成研究区内最为突出的低速异常体,蒙古西部低速特征也较清晰。而东部的四川盆地、扬子地块、华南地块、松辽盆地、日本海及蒙古东部高速特征明显。

(3) 在较长周期,西部低速异常的范围和幅度不断减小,收缩于青藏地块的中部。喜马拉雅冲断带、塔里木盆地以及准噶尔盆地由原来的相对低速逐步转变为高速区,青藏低速区受到南、西北、东三个方向的高速结构的夹击,这些高速结构可能阻挡软流圈流动,导致部分软弱的(低速)物质向东南方向迁移(或逃逸)。东部地区在中、长周期相对较低的相速度反映东部地区岩石圈相对较薄,软流圈发育。印支地块北部及邻区、东海、东北吉林深震区、中-朝地块包括蒙古东部成为 80~120 s 周期上突出的低速异常体,表明这些区域约在 120 km 深度已经进入软流圈。而在长周期上扬子地块(包括四川盆地)高速特征依然明显,显示存在巨厚的稳定的克拉通岩石圈。

(4) 南北地震带在 20~120 s 周期的速度分布图上始终呈现出相对较低的速度特征,可能是主要受太平洋地区(如板块俯冲和俯冲岩石圈板块的回转)构造影响的区域与主要受印度板块和亚洲板块陆陆碰撞影响的区域之间的过渡带的标志。

致谢 作者曾就相速度分布的合理性解译与成都理工大学蔡学林教授进行过有益的讨论,在此表示衷心感谢。

审图号 GS(2008)B25.

参考文献 (References)

- [1] 朱介寿,曹家敏,李显贵等. 中国及其邻区地球三维结构初始模型的建立. 地球物理学报, 1997, 40(5): 627~648
Zhu J S, Cao J M, Li X G, et al. A preliminary three-dimensional Earth's model of China and adjacent regions and its implications. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1997, 40(4): 499~518

- [2] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像. 地球物理学报, 2002, **45**(5): 646 ~ 664
Zhu J S, Cao J M, Cai X L, et al. High resolution surface wave tomography in east Asia and west Pacific Marginal Seas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(5): 646 ~ 664
- [3] Toksöz M N, Anderson D L. Phase velocity of long-period surface waves and structure of the upper mantle. *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**: 1649 ~ 1658
- [4] Kanamori H. Velocity and Q of mantle waves. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1970, **2**: 259 ~ 275
- [5] Forsyth D W. The early structural evolution and anisotropy of the oceanic upper mantle. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1975, **43**: 103 ~ 162
- [6] Zhang Y S, Lay T. Global surface wave phase velocity variations. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 8415 ~ 8436
- [7] 张禹慎, 马石庄. 全球地震面波相速度变化及其大地构造学意义. 地球物理学报, 1997, **40**(2): 181 ~ 192
Zhang Y S, Ma S Z. Global surface wave phase velocity variations and their tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1997, **40**(2): 181 ~ 192
- [8] Huang Z, Su W, Peng Y, et al. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(B2), ESE 4 - 1: 4 ~ 14
- [9] Jobert N, Journet B, Him A, Zhong S K. Deep structure of southern Tibet inferred from the dispersion of Rayleigh waves through a long-period seismic network. *Nature*, 1985, **313**: 386 ~ 388
- [10] Ritzwoller M H, Levshin A L. Eurasian surface wave tomography: Group velocities. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 4839 ~ 4878
- [11] Wu F, Levshin A L. Surface wave tomography of East Asia. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1994, **84**: 59 ~ 77
- [12] 曹小林, 张雪梅, 朱介寿. 中国及邻区的地震面波频散反演. 成都理工学院学报, 1999, **26**(5): 295 ~ 298
Cao X L, Zhang X M, Zhu J S. Surface wave dispersion inversion in China and adjacent regions. *J. Chengdu University of Technology* (in Chinese), 1999, **26**(5): 295 ~ 298
- [13] 陈国英, 宋仲和, 安昌强等. 中国北部及其邻区地壳上地幔三维速度结构. 地球物理学报, 1995, **38**(3): 321 ~ 327
Chen G Y, Song Z H, An C Q, et al. 3D S-wave velocity structure of crust and upper mantle in the northern China and its adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Seismologica Sinica*) (in Chinese), 1995, **38**(3): 321 ~ 327
- [14] 陈立华, 宋仲和, 安昌强等. 中国南北带地壳上地幔三维面波速度结构和各向异性. 地球物理学报, 1992, **35**(5): 574 ~ 583
Chen L H, Song Z H, An C Q, et al. Three dimensional shear wave velocity and anisotropy of crust and upper mantle in the China North-South Earthquake Belt. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Seismologica Sinica*) (in Chinese), 1992, **35**(5): 574 ~ 583
- [15] 何正勤, 丁志峰, 叶太兰等. 中国大陆及其邻域地壳上地幔速度结构的面波层析成像研究. 地震学报, 2001, **24**(6): 596 ~ 603
He Z Q, Ding Z F, Ye T L, et al. Surface wave tomography of the crust and upper mantle of Chinese Mainland. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **24**(6): 596 ~ 603
- [16] 何正勤, 丁志峰, 叶太兰等. 中国大陆及其邻域的瑞利波群速度分布图像与地壳上地幔速度结构. 地震学报, 2002, **24**(3): 252 ~ 259
He Z Q, Ding Z F, Ye T L, et al. The Group velocity distribution of Rayleigh waves and crustal and upper mantle velocity structure of the Chinese mainland and its vicinity. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2002, **24**(3): 252 ~ 259
- [17] 洪学海, 朱介寿, 曹家敏等. 中国大陆地壳上地幔 S 波品质因子三维层析成像. 地球物理学报, 2003, **46**(5): 642 ~ 651
Hong X H, Zhu J S, Cao J M, et al. Tomography of the 3-D S-wave quality factor of the crust and upper mantle in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(5): 642 ~ 651
- [18] 李红谊, 刘福田, 孙若昧等. 中国大陆东部及海域地壳 - 上地幔结构研究. 地震学报, 2001, **23**(5): 471 ~ 479
Li H Y, Liu F T, Sun R M, et al. A study on the crust and upper mantle structure in the east China and sea areas. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23**(5): 471 ~ 479
- [19] 宋仲和, 陈国英, 安昌强等. 中国东部及其相邻海域 S 波三维速度结构. 地球物理学报, 1992, **35**(3): 316 ~ 329
Song Z H, Chen G Y, An C Q, et al. The 3-D shear wave velocity structure beneath the Eastern China and its adjacent seas. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1992, **35**(3): 316 ~ 329
- [20] 宋仲和, 陈国英, 安昌强等. 中国大陆及其海域地壳 - 上地幔三维速度结构. 中国科学(B), 1993, **23**(2): 180 ~ 188
Song Z H, Chen G Y, An C Q, et al. The 3-D structure of crust and mantle in Continental China and adjacent seas. *Science in China* (B) (in Chinese), 1993, **23**(2): 180 ~ 188
- [21] 宋仲和, 陈国英, 安昌强等. 中国大陆及其相邻海域瑞利波群速度分布特征. 地震学报, 1993, **15**(1): 32 ~ 38
Song Z H, Chen G Y, An C Q, et al. Rayleigh wave group velocity distribution in China and adjacent seas. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1993, **15**(1): 32 ~ 38
- [22] 滕吉文, 胡家富, 张中杰. 中国西北地区岩石层瑞利波三维速度结构与沉积盆地. 地球物理学报, 1995, **38**(6): 737 ~ 749
Teng J W, Hu J F, Zhang Z J. The 3-D structure of Rayleigh wave and sedimentary basins in the northwest China. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1995, **38**(6): 737 ~ 749
- [23] 滕吉文, 张中杰, 胡家富等. 中国东南大陆及陆缘地带的瑞利波频散与剪切波三维速度结构. 地球物理学报, 2001, **44**(5): 663 ~ 677
Teng J W, Zhang Z J, Hu J F, et al. The Rayleigh wave dispersion and three dimensional velocity structure in continent and its margin of southeast China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(5): 663 ~ 677
- [24] 郑月军, 黄忠贤, 刘福田等. 中国东部海域地壳 - 上地幔瑞利波速度结构研究. 地球物理学报, 2000, **43**(4): 480 ~ 487
Zheng Y J, Huang Z X, Liu F T, et al. Rayleigh wave velocity and structure of the crust and upper mantle beneath the seas in eastern China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(4): 480 ~ 487

- [25] 周兵, 朱介寿, 秦建业. 青藏高原及邻近区域 S 波三维速度结构. 地球物理学报, 1991, **34**(4): 426 ~ 441
Zhou B, Zhu J S, Chun K Y. Three dimensional shear velocity structure beneath Qinghai - Xizang plateau and its adjacent area. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1991, **34**(4): 426 ~ 441
- [26] 朱良保, 许庆, 陈晓非. 中国大陆及其邻近海域的 Rayleigh 波群速度分布. 地球物理学报, 2002, **45**(4): 475 ~ 482
Zhu L B, Xu Q, Chen X F. Group velocity of Rayleigh wave in Chinese Continent and its adjacent seas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(4): 475 ~ 482
- [27] Yanovskaya T B, Antonova L M, Kozhevnikov V M. Lateral variations of the upper mantle structure in Eurasia from group velocities of surface waves. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2000, **122**: 19 ~ 32
- [28] 曾融生, 宋子安. 我国境内瑞利波的相速度. 地球物理学报, 1963, **12**(2): 148 ~ 165
Zeng R S, Song Z A. Phase velocity of Rayleigh waves in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1963, **12**(2): 148 ~ 165
- [29] 冯锐, 朱介寿, 丁韞玉等. 利用地震面波研究中国地壳结构. 地震学报, 1981, **3**(4): 335 ~ 350
Feng R, Zhu J S, Ding W Y, et al. A study on the crustal structure of China with surface waves. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1981, **3**(4): 335 ~ 350
- [30] 陈国英, 曾融生, 吴大铭等. 青藏高原瑞利面波相速度与深部结构的横向变化. 地震学报, 1992, **14**(增刊): 565 ~ 572
Chen G Y, Zeng R S, Wu D M, et al. The phase velocity of Rayleigh wave and the lateral variation of lithospheric structure in the Tibetan Plateau. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1992, **14**(Suppl.): 565 ~ 572
- [31] 徐果明, 李光品, 王善恩等. 用瑞利面波资料反演中国大陆东部地壳上地幔横波速度的三维构造. 地球物理学报, 2000, **43**(3): 366 ~ 375
Xu G M, Li G P, Wang S E, et al. The 3-D structure of shear waves in the crust and mantle of east continental China inverted by Rayleigh wave data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(3): 366 ~ 375
- [32] 何正勤, 张天中, 叶太兰等. 河北平原北部的短周期面波频散与地壳中上部速度结构. 地震学报, 2000, **22**(1): 82 ~ 86
He Z Q, Zhang T Z, Ye T L, et al. The upper and middle crustal velocity structure of the northern part of Hebei Plain inferred from short - period surface wave dispersion. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, **13**(1): 93 ~ 97
- [33] 何正勤, 苏伟, 叶太兰. 云南地区的短周期面波相速度层析成像研究. 地震学报, 2004, **26**(6): 583 ~ 590
He Z Q, Su W, Ye T L. Seismic tomography of Yunnan region using short-period surface wave phase velocity. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, **17**(6): 642 ~ 650
- [34] 姚华建, 徐果明, 肖翔等. 基于图像分析的双台面波相速度频散曲线快速提取方法. 地震地磁观测与研究, 2004, **25**(1): 1 ~ 8
Yao H J, Xu G M, Xiao X, et al. A quick tracing method based on image analysis technique for the determination of dual stations phase velocities dispersion curve of surface wave. *Seismol. Geomagn. Observ. Res.* (in Chinese), 2004, **25**(1): 1 ~ 8
- [35] Yao Huajian, Xu Guoming, Zhu Liangbao, et al. Mantle structure from inter-station Rayleigh wave dispersion and its tectonic implication in western China and neighboring regions. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2005, **148**: 39 ~ 54
- [36] Yao H, Beghein C, Van der Hilst R D. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis: II - Crustal and upper mantle structure. *Geophysical Journal International*, 2008, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03696.x
- [37] 徐果明, 姚华建, 朱良保等. 中国西部及其邻域地壳上地幔横波速度结构. 地球物理学报, 2007, **50**(1): 193 ~ 208
Xu G M, Yao H J, Zhu L B, et al. Shear wave velocity structure of the crust and upper mantle in western China and its adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(1): 193 ~ 208
- [38] Rapine R, Tilmann F, West M, Ni J. Crustal structure of northern and southern Tibet from surface wave dispersion analysis. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(B2), 2120, doi: 10.1029/2001JB000445
- [39] Yao H, van der Hilst R D, de Hoop M V. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis: I - Phase velocity maps. *Geophysical Journal International*, 2006, **166**, 732 - 744, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x
- [40] 朱介寿. 地震学中的计算方法. 北京: 地震出版社, 1988. 438 ~ 442
Zhu J S. Calculation Method in Seismology (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1988. 438 ~ 442
- [41] Tarantola A, Valette B. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least square criterion. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982, **20**: 219 ~ 232
- [42] Tarantola A, Nersessian A. Three-dimensional inversion without blocks. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1984, **76**: 299 ~ 306
- [43] Lebedev S, Nolet G. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(B1), 2048, doi: 10.1029/2000JB000073
- [44] Villaseñor A, Ritzwoller M H, Levshin A L, et al. Shear velocity structure of central Eurasia from inversion of surface wave velocities. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, **123**: 169 ~ 184
- [45] 曹小林, 朱介寿, 赵连锋. 南海及邻区地壳上地幔三维 S 波速度结构的面波波形反演. 地震学报, 2001, **23**(2): 113 ~ 124
Cao X L, Zhu J S, Zhao L F. Three dimensional shear wave velocity structure of crust and upper mantle in south China Sea and its adjacent regions by surface waveform inversion. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23**(2): 113 ~ 124
- [46] 彭艳菊, 苏伟, 郑月军等. 中国大陆及海域 Love 波层析成像. 地球物理学报, 2002, **45**(6): 792 ~ 801
Peng Y J, Su W, Zheng Y J, et al. Love wave seismic tomography of China and vicinal sea areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), **45**(6): 792 ~ 801
- [47] Huang Jinli, Zhao Dapeng. High-resolution mantle tomography of

- China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, B09305, doi:10.1029/2005JB004066
- [48] Li C, Van der Hilst R D, Toksoz M N. Constraining P-wave velocity variations in upper mantle beneath Southeast Asia. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2006, **154**:180~195
- [49] 滕吉文, 曾融生, 闫雅芬等. 东亚大陆及周边海域 Moho 界面深度分布和基本构造格局. *中国科学(D 辑)*, 2002, **32**(2):89~100
- Teng J W, Zeng R S, Yan Y F, et al. Depth distribution of Moho and tectonic framework in eastern Asian continent and its adjacent ocean areas. *Science in China Series D-Earth Science*, 2003, **46**(5):428~446
- [50] 张中杰, 滕吉文, 李英康等. 藏南地壳速度结构与地壳物质东西向“逃逸”-以佩枯错-普莫雍错宽角反射剖面为例. *中国科学(D 辑)*, 2002, **32**(10):793~798
- Zhang Z J, Teng J W, Li Y K, et al. Crustal structure of seismic velocity in southern Tibet and east-westward escape of the crustal material. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2004, **47**(6):500~506
- [51] Lebedev S, Meier T, van der Hilst R D. Asthenospheric flow and origin of volcanism in the Baikal Rift area. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **249**:415~424
- (本文编辑 胡素芳)