

潘佳铁, 吴庆举, 李永华等. 2014. 中国东北地区噪声层析成像. 地球物理学报, 57(3):812-821, doi:10.6038/cjg20140311.

Pan J T, Wu Q J, Li Y H, et al. 2014. Ambient noise tomography in northeast China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(3):812-821, doi:10.6038/cjg20140311.

# 中国东北地区噪声层析成像

潘佳铁, 吴庆举, 李永华, 余大新

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘要** 中国东北地区是中国唯一的深震孕育区, 获取该区的壳幔结构, 对于研究板块俯冲、深震以及火山活动等具有重要的科学意义. 本文利用该区 159 个固定台站 2011 年 1 月至 2012 年 6 月和 27 个流动台站 2011 年 1 月至 2011 年 6 月间的垂向波形连续记录, 计算了台站间的预估格林函数, 并采用基于连续小波变换的时频分析方法, 测量了双台路径上瑞雷波的群速度和相速度频散曲线. 通过质量控制和筛选, 最终得到了 2204 条路径上周期 5~40 s 的群/相速度频散曲线. 检测板测试表明, 反演结果可以达到  $2^\circ \times 2^\circ$  的分辨. 利用 Ditmar & Yanovskaya 反演方法, 我们得到了研究区 ( $105^\circ\text{E}—135^\circ\text{E}$ ,  $39^\circ\text{N}—52^\circ\text{N}$ ) 周期 8~30 s 的瑞雷波的群速度和相速度分布图. 不同周期的群/相速度分布图, 反映了不同深度 S 波速度的横向变化情况. 研究结果显示: 中国东北地区的地壳上地幔 S 波速度结构存在横向非均匀性. 短周期 (如 8 s) 的群/相速度分布与地表地质构造具有明显的相关性, 具体来说, 山区显示为高速, 沉积盆地显示为低速; 随着周期的增大 (如 15 s, 22 s), 地形的控制作用相对减弱; 较长周期 (如 30 s) 的群/相速度分布与地壳厚度密切相关.

**关键词** 中国东北, 噪声成像, 瑞雷波, 群速度, 相速度

doi:10.6038/cjg20140311

中图分类号 P315

收稿日期 2013-06-26, 2013-08-16 收修定稿

## Ambient noise tomography in northeast China

PAN Jia-Tie, WU Qing-Ju, LI Yong-Hua, YU Da-Xin

*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

**Abstract** Northeast China is the only one of the deep earthquake zone in China. In order to study the subduction of the west Pacific plate, the deep earthquakes and volcanic activity, it has very important scientific significance to obtain the crustal and upper mantle structure of this region. By using the vertical component of continuous data, recorded by 159 permanent stations from January 2011 to June 2012 and 27 portable stations from January 2011 to June 2011 in northeast China, we calculated the inter-station Green functions, and measured the group velocity and phase velocity dispersion curves of Rayleigh wave by using the frequency-time analysis method based on continuous wavelet transform. According to quality control and screening, we finally obtained 2204 group/phase velocity dispersion curves at periods ranging from 5 s to 40 s. Checkerboard tests show that the inversion results have a good resolution of  $2^\circ \times 2^\circ$ . By utilizing Ditmar & Yanovskaya method, we got the Rayleigh wave group velocity and phase velocity maps at periods between 8~30 s in the study area ( $105^\circ\text{E}—135^\circ\text{E}$ ,  $39^\circ\text{N}—52^\circ\text{N}$ ), which revealed the lateral changes of S-wave velocity at different depths. The results showed that the crust and upper mantle S-wave velocity structures have lateral heterogeneity. Group/phase velocity maps at

**基金项目** 中国地震局地球物理研究所基本业务费专项(DQJB11B04)、国家自然科学基金(41104029, 90814013)、中国地质调查局地质调查工作项目(1212011121072)、深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-02-03)和科技部国际合作专项(2011DFB20210)共同资助.

**作者简介** 潘佳铁, 男, 1983 年生, 中国地震局地球物理研究所助理研究员, 主要从事面波层析成像研究. E-mail: panj151@gmail.com

short period (e. g. 8 s) are well related with the geology units on the surface, with high-speed anomalies corresponding to the main mountain ranges and low-speed anomalies coinciding with the major sedimentary basins. But the effect controlled by the topography becomes weaker at the intermediate periods (e. g. 15 s, 22 s). For group/phase velocity maps at longer periods (e. g. 30 s), they are closely related with crustal thickness.

**Keywords** Northeast China, Ambient noise tomography, Rayleigh wave, Group velocity, Phase velocity

## 1 引言

中国东北地区位于中朝板块北部与西伯利亚板块过渡的复杂构造演化带,属于天山—兴蒙造山系东部(潘桂棠等,2009).这种特定的大地构造位置决定了该区岩石圈结构受两大动力学体系所控制,即前古生代西伯利亚板块与中朝板块相互作用的构造体系(古亚洲洋构造域)与古生代以来太平洋板块和亚洲板块的相互作用(环太平洋构造域).前者影响着该区前寒武纪诸地块的性质和古生代的构造、岩浆作用,后者对本区进行后期改造,影响着大陆边缘的走滑拼贴作用及造山和盆地的形成(刘财等,2009).区内分布有两条巨大岩浆岩带(大兴安岭岩浆岩带和张广才岭)和15个盆地(松辽盆地等),还有五大连池、镜泊湖和长白山等新生代火山,并伴有火山地震的发生,是近代火山集中分布的地区之一(刘若新等,1996;赵大鹏等,2004).受西太平洋板块向欧亚板块深俯冲的作用,地震活动频繁,是中国唯一的深震孕育区(张立敏和唐晓明,1983;傅维洲,1996).获取该区的壳幔结构,对于研究板块俯冲、深震以及火山活动等具有重要的科学意义.

用地震学方法研究东北地区的壳幔结构已有大量成果(卢造勋和夏怀宽,1993;杨宝俊等,1996;傅维洲等,1998;Chen et al., 2006;Niu et al., 2007;田有等,2011).地震面波层析成像是一种研究壳幔结构的经典方法(Wu and Levshin, 1994;Ritzwoller and Levshin, 1998).在中国东北以及相邻地区,前人已经开展过很多面波成像的研究工作.朱介寿等(2002)、何正勤等(2002)、朱良保等(2002)、Huang 等(2003),利用中国数字化地震台网(CDSN)等记录的垂直向资料,开展了瑞雷波层析成像,研究了中国大陆以及相邻区域的壳幔 S 波速度结构. Li 等(2012)利用双台法,测量了 700 多条台站路径上的瑞雷波群速度和相速度频散曲线,获得了中国东北地区 15~60 s 的瑞雷波群速度和相速度分布,并进一步反演了研究区的壳幔 S 波速度结构.受观测台站分布和震源分

布的限制,以上研究具有研究区域较广、空间分辨率低的特点,特别是东北地区.

与天然地震面波方法相比,环境噪声成像摆脱了对震源的依赖,可以获得任意两个台站之间的面波格林函数和较短周期的频散数据,对地球浅部结构有着良好的分辨能力,构成对天然地震面波层析成像的有益补充,已经成为研究壳幔结构的有力手段之一.近年来,环境噪声层析成像(Ambient Noise Tomography, ANT)得到了越来越广泛的应用(Shapiro et al., 2005; Yao et al., 2006; Bensen et al., 2007; Yang et al., 2007; Zheng et al., 2008; Fang et al., 2010; Pan, 2012).前人曾经利用固定台站的资料,在东北部分地区以及相邻地区开展了 ANT 的研究.比如,高东辉等(2011)选取了黑龙江、吉林以及内蒙古的部分台站共 44 个固定台站连续 2 年的地震数据,开展了噪声成像研究,获得了黑龙江地区周期 8~40 s 的瑞雷波群速度分布图像. Zheng 等(2012)利用中国地震台网、日本 F-NET 以及 IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology, 美国地震学联合研究会)全球台网的资料开展了 ANT 研究,获得了华北、东北、朝鲜半岛以及日本海地区周期 12~40 s 的瑞雷波的群速度和相速度分布图像,并进一步反演了该地区的壳幔 S 波速度结构.

“十一五”期间,中国地震局在中国东北地区布设了 100 多个固定地震观测台站(图 1),到目前为止已经积累了 3 年多的连续观测资料(郑秀芬等, 2009; Zheng et al., 2010).此外,中国地震局地球物理研究所从 2009 年开始,在东北地区架设了 120 余套宽频带流动台站(图 1 中红色圆点所连成的两条线),台站大致沿两条测线剖面分布,其中一条正好穿过松辽盆地.这些流动台站极大地丰富了东北地区的地震观测资料,为我们在研究区开展高分辨的噪声成像提供了很好的前提保障.本文利用东北地区 159 个固定台站和 27 个流动台站记录的连续观测资料,通过互相关运算计算了台站间的预估格林函数 (Estimated Green Function, EGF),并利用

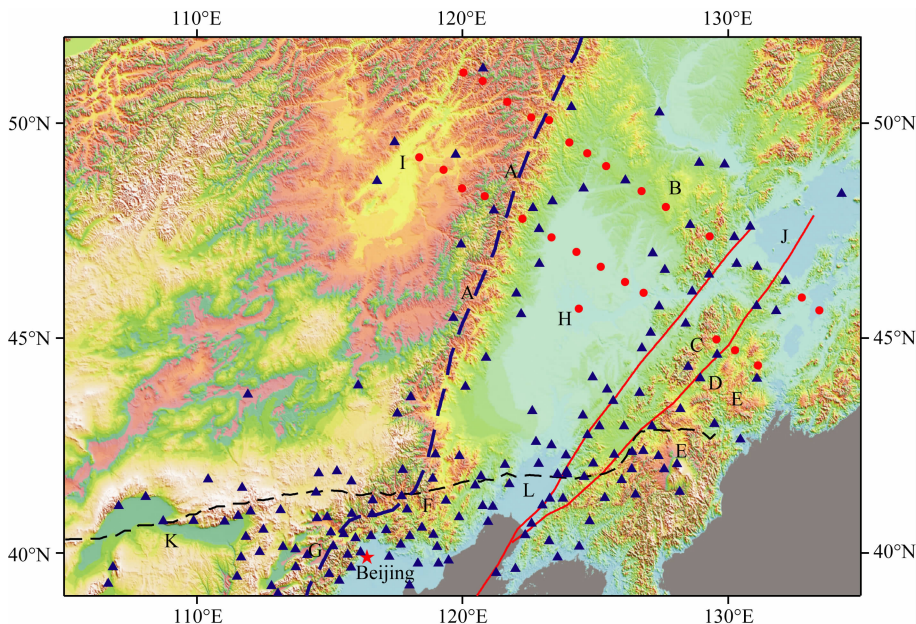


图1 研究区地质构造单元及台站位置分布图

A. 大兴安岭; B. 小兴安岭; C. 张广才岭; D. 老爷岭; E. 长白山; F. 燕山; G. 太行山; H. 松辽盆地; I. 海拉尔盆地; J. 三江盆地; K. 鄂尔多斯盆地; L. 下辽河盆地. 蓝色三角表示固定台站, 红色圆点表示流动台站, 蓝色虚线表示大兴安岭—太行山重力梯度带, 红线表示郯庐断裂, 黑色虚线表示华北地块的北部边界.

Fig. 1 The tectonic sketch map of study region and the distribution of seismic stations

A. Daxing'anling mountain; B. Xiaoxing'anling mountain; C. Zhangguangcailing mountain; D. Laoyeling mountain; E. Changbai mountain; F. Yanshan mountain; G. Taihang mountain; H. Songliao basin; I. Hailar basin; J. Sanjiang basin; K. Erdos basin; L. Xialiaohe basin. The blue triangles represent permanent broadband stations. The red dots represent portable broadband stations. The blue dashed lines represent the Daxing'anling-Taihangshan gravity gradient belt. The red lines represent the Tanlu fault. The black dashed lines represent the boundary of the northern Huabei Block.

传统的面波成像方法, 获得了中国东北地区周期 8~30 s 的瑞雷波的群速度和相速度分布图, 并结合已有地质与地球物理研究成果, 对其速度分布、横向变化及其可能存在的地质含义进行了探讨, 为下一步进行 S 波速度结构的深度反演奠定了基础.

## 2 资料和数据

选取了中国东北地区 159 个固定台站 2011 年 1 月—2012 年 6 月和 27 个流动台站 2011 年 1 月—2011 年 6 月间的垂直向连续记录. 固定台站装备的地震计有 8 种类型, 均为宽频带地震计, 频带范围最低频可至 120 s, 其他多为 60 s. 流动台站的地震计为 CMG-3ESPC, 频带范围为 0.02~60 s. 由于流动台站间距较小(20~30 km), 为了保证本研究中射线的均匀覆盖, 我们每隔 2~3 个台就保留一个, 最终从 120 余个流动台中选定了 27 个台站的连续波形记录用于下一步的噪声成像研究.

数据处理过程与 Bensen 等(2007)文中叙述的

基本一致, 对原始数据重采样到 1 s, 去均值、去倾斜、去仪器响应后, 进行 4~50 s 的带通滤波. 在时间域归一化方法上, 我们选用的是滑动绝对平均方法, 以去除地震信号、仪器畸变信号带来的干扰, 然后进行频谱白化处理, 这样可以拓宽信号的频带范围, 降低某个固定频率成分带来的影响. 在噪声互相关函数的计算中, 以天为长度单位, 对预处理后两个台站的连续记录进行互相关运算并叠加, 得到双台间的噪声互相关函数(Noise Cross-correlation Function, NCF). 每个 NCF 都有一个正的分支和一个负的分支, 分别代表了向两个相反方向传播的波. 若噪声源在空间上是均匀分布的, 两个分支记录到的信号则应该是对称的. 但在实际观测中, 由于噪声源分布不均, 经常会发现正负分支并不完全对称. 我们把正负分支反序后叠加再除以 2, 形成对称分量, 然后计算得到预估格林函数(EGF)(Lin et al., 2008), 如图 2.

$$G_{AB}(t) = -\frac{d}{dt} \left[ \frac{C_{AB}(t) + C_{AB}(-t)}{2} \right] \quad 0 \leq t < \infty. \quad (1)$$

### 3 频散曲线的测量以及质量控制

我们采用基于连续小波变换的频时分析方法(Continuous Wavelet Transformation Frequency Time Analysis),从EGF测量瑞雷波的群/相速度频散曲线.与傅里叶变换相比,小波变换既能保留谱随延迟时间的变化信息,又能在时间域和频率域得到同样好的分辨(Wu et al., 2009).频散曲线是人工拾取的,与自动测算相比,人工拾取可以将大部分虚假频散及时剔除掉,以保证频散资料的可靠性.

理论上,如果有  $n$  个台站,那么可以计算得到  $n(n-1)/2$  条路径上的 EGF,但并不是每个 EGF 都具有较高的信噪比(SNR)、较好的波形和频散特征.为了保证成像结果的可靠性,对频散曲线进行质量控制即在大量的频散曲线中挑选出优质的频散显得十分重要.我们测量了 3239 条光滑连续的周期 5~40 s 的群速度频散曲线和 2354 条相速度频散曲线,只选取同时可以测量得到群速度和相速度频散的路径 2204 条,其射线的分布见图 3.从图上可以看到,射线比较密集地覆盖了研究区.通过 SNR 大于 15、台站间距大于 3 倍波长、剔除残差大于剩余残差标

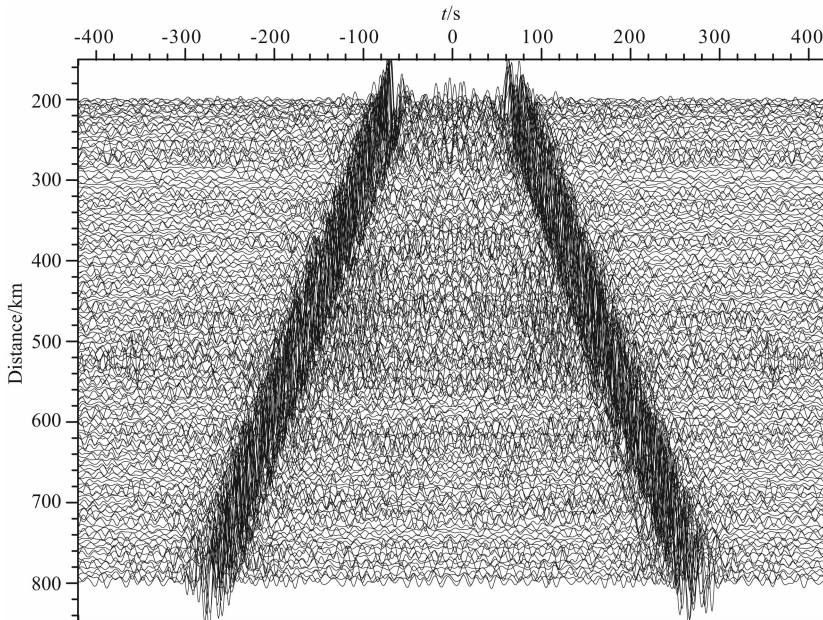


图 2 台站间的 EGF(信噪比大于 15)

Fig. 2 Interstation Estimated Green Functions (SNR > 15)

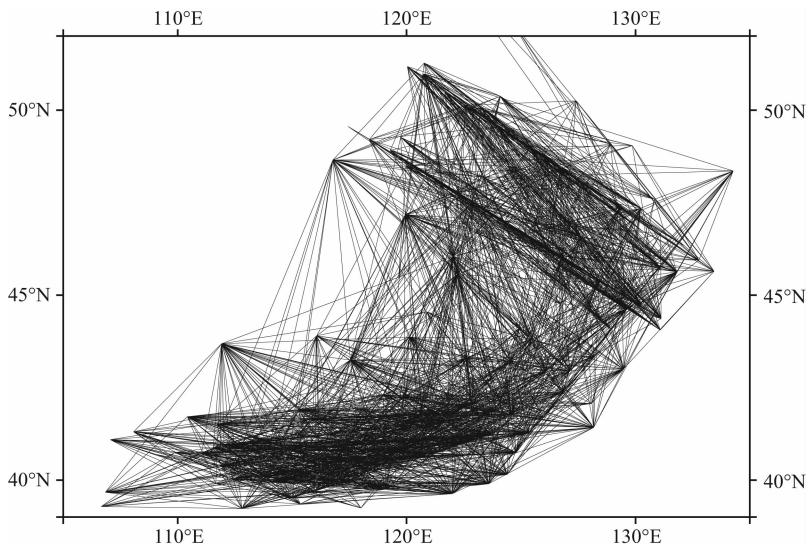


图 3 路径分布图(2204 条)

Fig. 3 The coverage of interstation ray paths (2204)

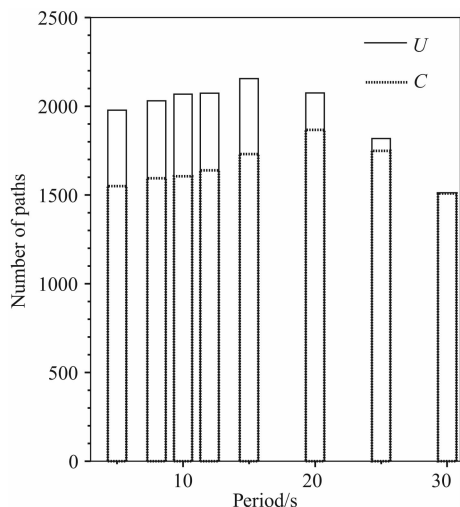


图4 各周期对应的路径数目( $U$ 为群速度, $C$ 为相速度)

Fig. 4 Number of ray paths at different periods  
( $U$  is the group velocity,  $C$  is the phase velocity)

准差3倍的频散数据等准则进一步控制频散曲线的质量,最终参与反演的各周期对应的路径数目见图4.其中剔除残差过大的频散这一准则是在反演的过程中进行的.可以看到,在8~30 s频段,路径数目最少时也超过了1400条,路径覆盖可以说是十分的密集.

## 4 瑞雷波噪声层析成像

不同周期面波的群/相速度对不同深度S波速度的敏感度存在差异,故在根据面波群/相速度分布来讨论分析S波速度结构时,通常需要给出群/相速度在深度方向上的敏感度核函数.图5是根据Li等(2012)反演得到的松辽盆地的速度结构模型计算的敏感度核函数.一般来说周期越大,瑞雷波对越深的S波速度更敏感,相同周期的群速度与相速度相比,群速度对浅部更敏感,并且敏感的深度范围更窄.

### 4.1 面波层析成像方法以及分辨率估计

本文采用Ditmar & Yanovskaya提出的面波层析成像方法(Ditmar and Yanovskaya, 1987; Yanovskaya and Ditmar, 1990),该方法是Backus Gilbert一维方法在二维情况下的推广,是面波层析成像中广泛应用的方法之一(如Wu and Levshin, 1994; Ritzwoller and Levshin, 1998; 何正勤等, 2002; Fang et al., 2010; Li et al., 2012; Pan, 2012).由于模型的基函数使用群到时的积分形式表示,因此不需要初始参数和约束条件.方法的原理以及反演参数的选择,参见文献Wu和Levshin(1994)及潘佳铁等(2011),

在此不再赘述.

为了评估数据的分辨能力,我们做了检测板测试.将研究区划分成 $2^\circ \times 2^\circ$ ,对路径数目相对较少的8 s和30 s的数据,分别做了检测板测试(图6).不同周期使用了不同的初始模型,初始模型速度参考值为该周期的平均速度,介于2.9~3.7 km/s,扰动量均为 $\pm 0.4$  km/s.由于实际的频散测量中存在误差,所以在测试时我们对理论走时加上了高斯噪声.测试结果显示,有效研究区内初始模型的速度值和扰动量均得到较好的恢复,表明成像结果中大于 $2^\circ \times 2^\circ$ 的速度异常才是比较可信的.

### 4.2 噪声成像结果和讨论

利用Yanovskaya-Ditmar方法,我们得到了研究区8~30 s的瑞雷波群速度和相速度分布(图7).从不同周期的群速度和相速度图(图7)可以看出,稍短周期的相速度图和稍长周期的群速度图的分布样式比较相近,比如8 s的相速度分布(图7b1)与15 s的群速度分布(图7a2)的样式比较相近,类似地,图7b2与图7a3、图7b3与图7a4也比较相近,这也说明,相同周期的相速度较群速度对更深的结构更为敏感.群速度和相速度的成像结果互相验证,也表明了本研究成像结果的可靠性.

本文噪声成像结果所显示的不同周期的瑞雷波群速度和相速度的横向变化,反映了中国东北地区地壳上地幔S波速度结构存在横向非均匀性.瑞雷波群速度和相速度对S波速度比较敏感,参考敏感度核函数(图5),我们可以通过对比各周期群/相速度的分布来讨论不同深度范围内S波速度的横向变化.下面将分别讨论8 s、15 s、22 s和30 s四个周期的瑞雷波群/相速度分布及其与地表地质、壳幔深部结构的相互关系.

Zheng等(2012)给出了研究区内周期12~40 s瑞雷波的群速度和相速度分布图.我们的结果与之相比,尽管选取的周期频段不尽相同,但是成像结果大体上是比较一致的.短周期( $< 12$  s)的分布图上松辽盆地呈现为明显的低速,其周边相邻地区则呈现为高速;较长周期(如30 s)的分布图上大兴安岭—太行山重力梯度带以东地区整体上速度偏高,西部则呈现为低速.但在局部地区,和他们的结果仍然存有差异.如,短周期的分布图上(图7a1、7b1)在呼和浩特西部地区、三江盆地显示为低速.

周期8 s的图主要反映了研究区浅表的S波速度变化(图7a1、7b1).群速度和相速度的高低速分布特征很相似:在大兴安岭、燕山、太行山、长白山、



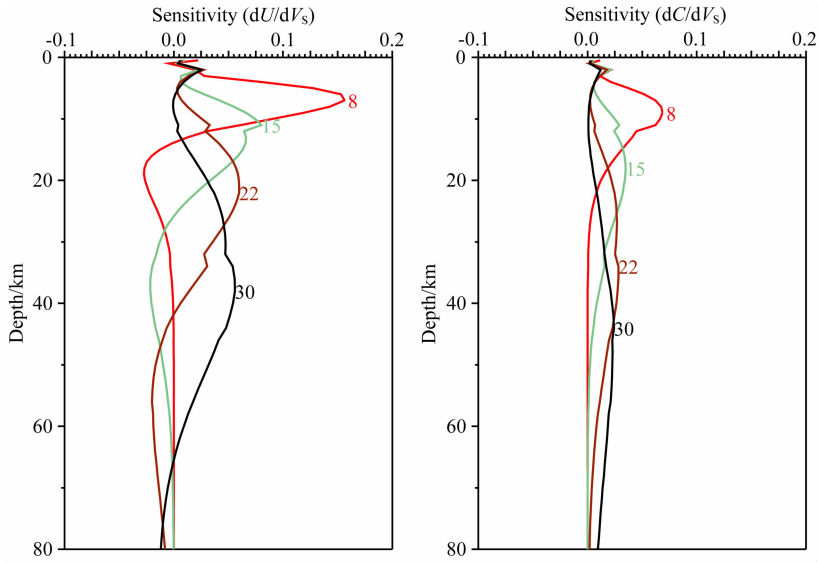


图 5 基阶瑞雷波群/相速度对 S 波速度随深度变化的敏感度

Fig. 5 Depth sensitivity kernels to shear wave velocity ( $V_s$ ) of fundamental Rayleigh wave group velocities ( $U$ ) and phase velocities ( $C$ ) at different periods

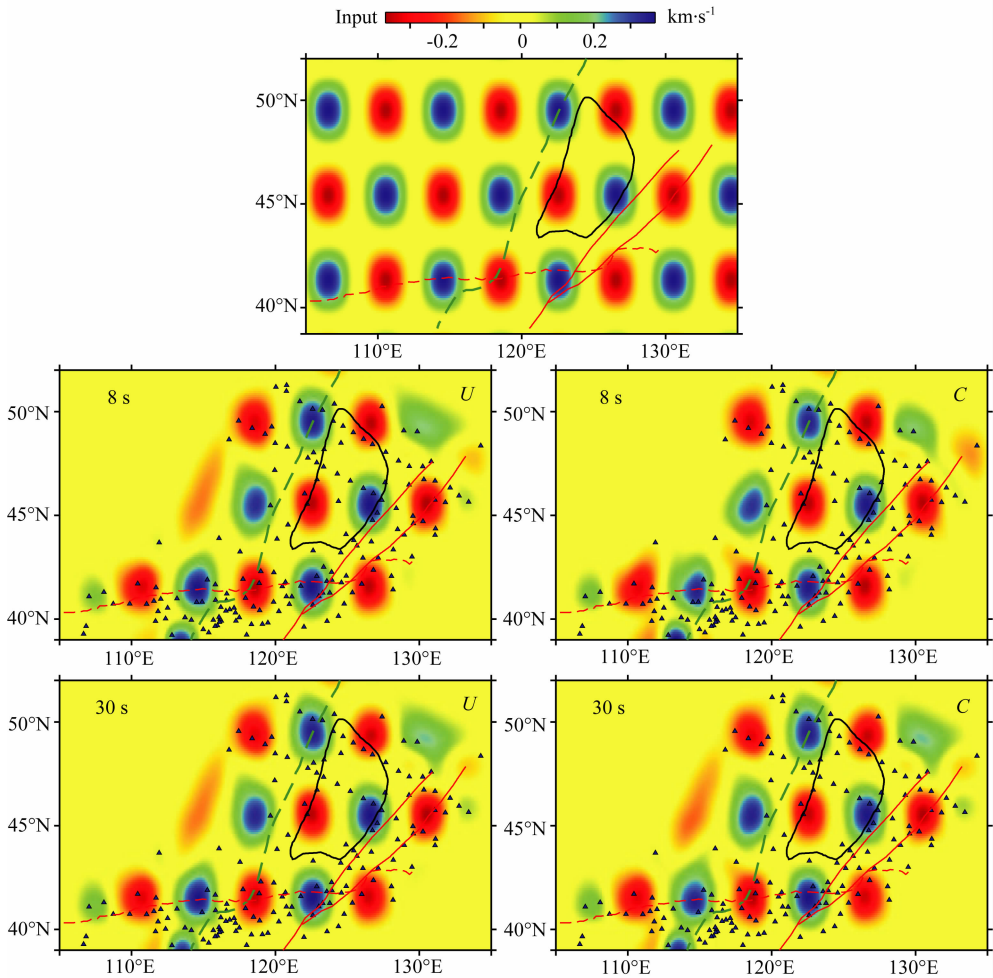


图 6 检测板测试(最上为  $2^\circ \times 2^\circ$  输入模型, 左为群速度, 右为相速度)

Fig. 6 Check board test (The input model is at the top, the group velocity tests at periods of 8 s and 30 s are on the left panel, the phase velocity tests at periods of 8 s and 30 s are on the right panel)

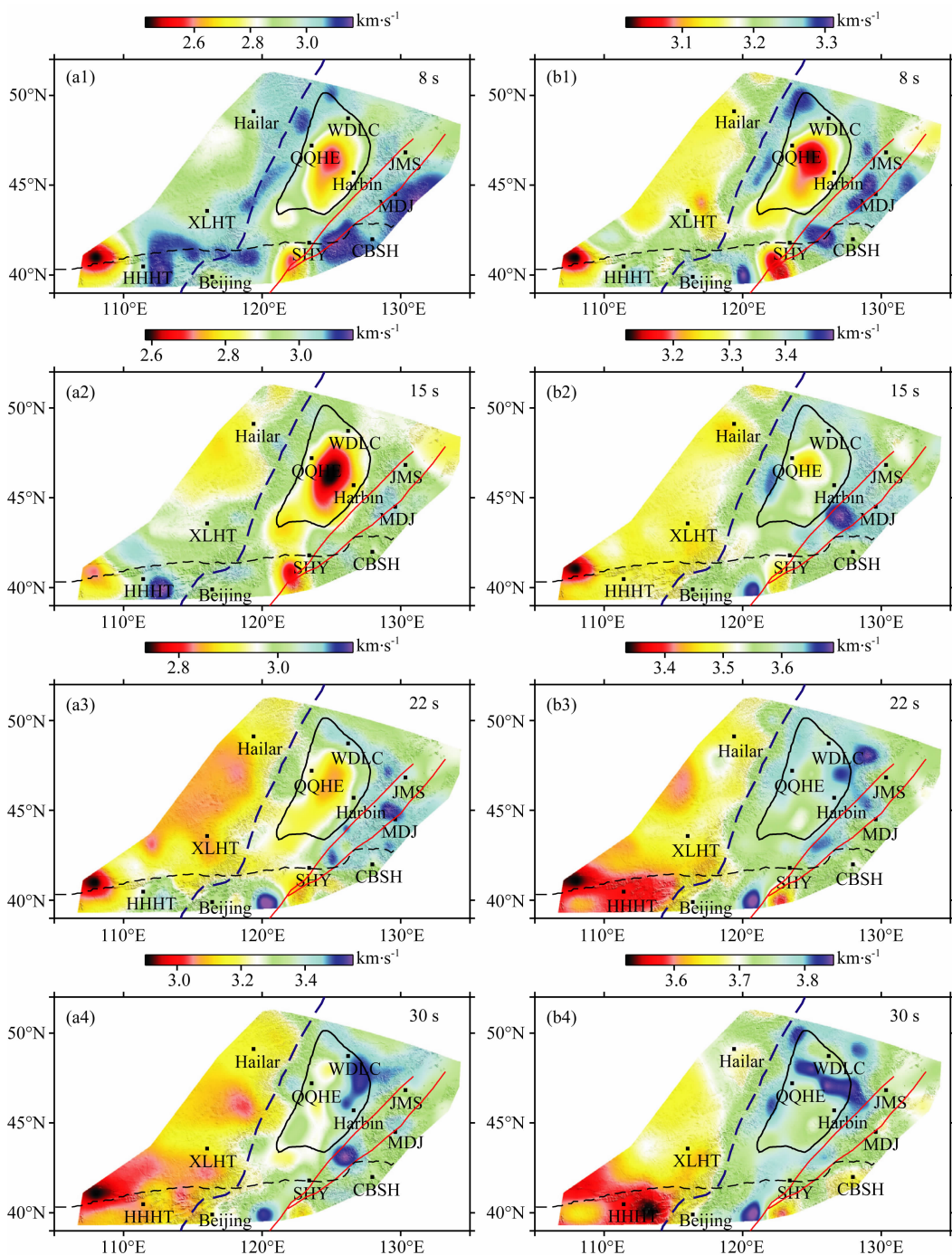


图 7 中国东北地区瑞雷波噪声成像结果, 左为群速度分布图, 右为相速度分布图

红色实线是郯庐断裂, 黑色虚线表示华北地块北缘的界线, 蓝色虚线表示大兴安岭—太行山重力梯度带, 黑色细实线表示松辽盆地的边界。

Fig. 7 Rayleigh wave group velocity (left) and phase velocity (right) maps from ambient noise tomography in Northeast China. The red lines represent Tanlu fault. The blue dashed lines represent the Daxing'anling-Taihangshan gravity gradient belt. The black dashed lines represent the boundary line of the northern Huabei Block. The black thin line represents the boundary of the Songliao basin.

老爷岭、张广才岭呈现出较明显的高速(图 7a1 更显著), 小兴安岭也表现为相对高速, 而在松辽盆地、海拉尔盆地、三江盆地、下辽河盆地、鄂尔多斯盆地呈现出较明显的低速。高低速的分布较好地勾画出研究区山盆边界的轮廓。一般来说, 山区结晶基岩埋深较浅, 盆地有沉积层覆盖, 结晶基岩埋深较深。这表

明短周期的瑞雷波群速度分布跟地表地质构造单元有明显的相关性, 具体而言, 山区对应高速, 盆地对应低速。低速区中速度越低、分布面积越大, 表明该沉积盆地沉积层越厚, 盆地的地域越大。已有地震测深研究表明(傅维洲等, 1998), 松辽盆地沉积盖层最深处位于泰康—大庆之间, 达 7~8 km, 与图

7a1、7b1 中速度最低处基本相吻合. 从图上可以看出, 松辽盆地是个比较大的盆地.

中周期(如 15 s, 22 s)的群/相速度分布大致反映了研究区中地壳以浅深度范围内 S 波平均速度的变化情况(图 7a2、7b2、7a3、7b3). 从图上可以看出群/相速度的分布仍然和山区盆地的分布有关, 依然受地表地质构造的影响, 但地形的控制作用相对短周期而言, 没那么明显. 相速度由于反映了更深的 S 波速度变化, 所以松辽盆地的低速并没有群速度图上的那么明显, 22 s 的相速度图上甚至已经看不到松辽盆地的低速.

以 15 s 的群速度分布为例, 我们将之与天然地震面波成像方法获得的结果(Li et al., 2012)进行了对比, 见图 8a. 绘图时采用了与图 7a2 相同的色标以及取值范围. 从总体上看, 噪声方法与天然地震方法获得的群速度图的高低速分布特征是基本一致的, 如松辽盆地、下辽河盆地, 海拉尔西南以及鄂尔多斯地块显示为低速, 其他地方为高速; 不同之处在于, 图 7a2 上三江盆地为低速, 但图 8a 上并无表现. 此外, 两种方法获得的群速度值的大小也不尽相同. 总体上看, 天然地震方法获得的群速度值(Event Group Velocity)比噪声方法获得的群速度值(Noise Group Velocity)要稍微偏高, EGV 减去 NGV 的分布图见图 8b, 大部分地区的速度差值介于  $\pm 0.1$  km/s 之间. 造成上述两种成像结果差异的主要原因在于: 1) 噪声源的空间不均匀分布, 导致 EGV 不准, 进而影响了频散值的准确度; 2) 面波偏离大圆弧路径传播, 以致计算得到的 EGV 稍偏高, NGV 稍偏低; 3) 面波的有限频率效应对于天然地震方法的敏感区域较噪声方法更大; 4) 反演方法可能也是其中一个因素. 无论是天然地震面波成像还是噪声成像, 其路径分布并不均匀, 采用规则、统一的网格参数化反演方法

必然导致路径分布密集地区分辨率的降低, 并在路径覆盖稀疏地区产生假象. 因此, 发展根据射线分布自动调节网格大小的、自适应的反演方法, 可能是一个解决问题的途径.

较长周期(如 30 s)的群/相速度大致反映了下地壳至上地幔顶部以浅深度范围内( $\sim 50$  km)的 S 波平均速度的变化(图 7a4、7b4). 以大兴安岭—太行山重力梯度带为界, 东部地区大体呈现较高的速度, 西部地区大体表现为低速. 表明大兴安岭—太行山重力梯度带两侧壳幔过渡带的速度结构有较明显的差异. 已有的地球物理研究结果显示, 梯度带以东的地壳厚度明显比以西地区要小, 因此呈现为较高的速度. 这表明 30 s 的群/相速度分布主要与地壳厚度有关. 已有的噪声成像结果(高东辉等, 2011)显示, 周期大于 30 s 的瑞雷波群速度图在依兰—伊通断裂北段以东区域逐渐呈现低速异常, 并且范围和强度随周期增加而增强, 但在 25 s 的图上并没有低速显示, 故此低速区不可能是由于莫霍面的变化引起的, 因此认为郯庐断裂北延部分的敦化—密山断裂和依兰—伊通断裂下方存在上地幔物质的活动(软流圈物质局部上涌). 在我们的结果中, 在该区域并无低速显示, 因此本研究结果不支持此结论, 软流圈物质上涌的深度可能并未至上地幔顶部 $\sim 50$  km.

## 5 结论

本文利用中国东北地区 159 个固定台站和 27 个流动台站记录的垂直向连续资料, 通过互相关运算计算了台站间的 EGV, 采用基于连续小波变换的频时分析方法提取了台站间的基阶瑞雷波群速度和相速度频散曲线, 并利用传统的面波成像方法, 获得了中国东北地区周期 8~30 s 的瑞雷波的群速度和

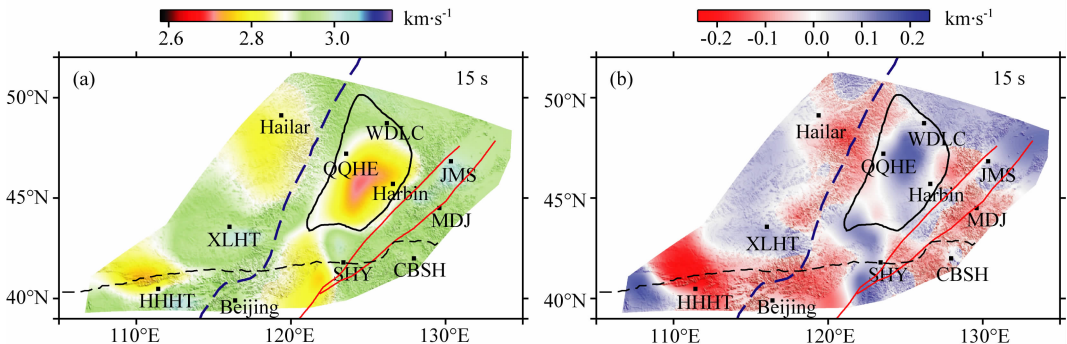


图 8 天然地震面波成像得到的 15 s 的群速度分布(Li et al., 2012)以及与本文结果的速度差

Fig. 8 Rayleigh wave group velocity maps at periods of 15 s from surface wave tomography with earthquake data (Li et al., 2012) and the differences between the group velocity obtained by Li et al. (2012) and this study



相速度分布图. 本文的主要结论如下:

(1)与前人噪声层析成像研究相比,更为丰富的流动台站资料的应用保证了路径的均匀和密集覆盖,使我们能够获取高分辨( $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ )的瑞雷波的群速度和相速度分布,并很好地揭示了研究区壳幔横波速度分布的不均一性;

(2)不同周期的基阶瑞雷波的群/相速度分布图较好地反映了不同深度范围的 S 波速度分布特征. 浅表至上地幔顶部(约 50 km 以浅)深度范围内,中国东北地区的瑞雷波群/相速度分布有明显的横向差异. 周期 8 s 的群/相速度分布图上,高速和山岭的分布对应较好,哈尔滨附近的明显低速反映了松辽盆地具有巨厚的沉积层. 周期 22~30 s 的群/相速度分布图上,以大兴安岭—太行山重力梯度带为界,速度东高西低的分布特点跟大兴安岭及以西地区的地壳厚度较东部地区大有关. 即说明:短周期(如 8 s)的群/相速度分布与地表地质构造具有明显的相关性,随着周期的增大(如 15 s),地形的控制作用相对减弱. 较长周期(如 30 s)的群/相速度分布与地壳厚度密切相关.

本文获得了研究区 8~30 s 的瑞雷波的群速度和相速度分布,为进一步通过二者的联合反演研究该地区的三维壳幔 S 波速度结构奠定了良好的基础. 此外,我们已获得该地区的天然地震面波频散资料. 将噪声和天然地震面波资料结合,探讨浅部结构和深部地球动力学过程,也是我们下一步将要开展的工作.

**致谢** 感谢俄罗斯圣彼得堡大学 T. B. Yanovskaya 教授为我们提供了面波层析成像程序,同时也感谢参与东北流动地震观测台站的遴选、布设、巡台维护和数据预处理的同志. 感谢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”为本研究提供了固定台站的地震波形数据.

## References

Bens en G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophys. J. Int.*, 169(3): 1239-1260.

Chen L, Zheng T Y, Xu W W. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. *J. Geophys. Res.*, 111, B09312, doi: 10.1029/2005JB003974.

Ditmar P G, Yanovskaya T B. 1987. A Generalization of the

Backus-Gilbert method for estimation of lateral variations of surface wave velocities. *Phys. Solid Earth, Izvestia. Acad. Sci. U. S. S. R.*, 3(6): 470-477.

Fang L H, Wu J P, Ding Z F, et al. 2010. High resolution Rayleigh wave group velocity tomography in North China from ambient seismic noise. *Geophys. J. Int.*, 181(2): 1171-1182.

Fu W Z. 1996. Deep earthquakes in Northeast China and their tectonic significance. *J. Changchun Univ. Sci. Technol.* (in Chinese), 26(3): 316-321.

Fu W Z, Yang B J, Liu C, et al. 1998. Study on the seismology in Manzhouli-Suifenhe geoscience transect of China. *J. Changchun Univ. Sci. Technol.* (in Chinese), 28(2): 206-212.

Gao D H, Chen Y S, Meng X S, et al. 2011. Crustal and uppermost mantle structure of the Heilongjiang region from ambient noise tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(4): 1043-1051, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.019.

He Z Q, Ding Z F, Ye T L, et al. 2002. 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), 24(3): 252-259.

Huang Z X, Su W, Peng Y J, et al. 2003. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. *J. Geophys. Res.*, 108(B2), 2073, doi: 10.1029/2001JB001696.

Li Y H, Wu Q J, Pan J T, et al. 2012. S-wave velocity structure of northeastern China from joint inversion of Rayleigh wave phase and group velocities. *Geophys. J. Int.*, 190(1): 105-115.

Lin F C, Moschetti M P, Ritzwoller M H. 2008. Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity maps. *Geophys. J. Int.*, 173(1): 281-298, doi: 10.1111/j1365-246X.2008.03720.x.

Liu C, Meng L S, Wu Y G, et al. 2009. Geophysical Field and Crust Evolution in the Northeastern China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.

Liu R X, Wei H Q, Tang J, et al. 1996. Progress of the study on Tianchi volcano, Changbaishan, China. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* (in Chinese), 17(4): 2-11.

Lu Z X, Xia H K. 1993. Geoscience transect from Dong Ujimqinqi, Nei Mongol, to Donggou, Liaoning, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 36(6): 765-772.

Niu F L, Bravo T, Pavlis G, et al. 2007. Receiver function study of the crustal structure of the southeastern Caribbean plate boundary and Venezuela. *J. Geophys. Res.*, 112, B11308, doi: 10.1029/2006JB004802.

Pan G T, Xiao Q H, Lu S N, et al. 2009. Subdivision of tectonic units in China. *Geology in China* (in Chinese), 36(1): 1-28.

Pan J T, Wu Q J, Li Y H, et al. 2011. Rayleigh wave tomography of the phase velocity in North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(1): 67-76.

Pan J T. 2012. High-resolution Rayleigh wave phase velocity maps from ambient noise tomography in North China. *Earthquake Sci.*, 25(3): 241-251.

- Ritzwoller M H, Levshin A L. 1998. Eurasian surface wave tomography: Group velocities. *J. Geophys. Res.*, 103(B3): 4839-4878.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307(5715): 1615-1618.
- Tian Y, Liu C, Feng X. 2011. P-wave velocity structure of crust and upper mantle in Northeast China and its control on the formation of mineral and energy. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(2): 407-414, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.017.
- Wu F T, Levshin A L. 1994. Surface-wave group velocity tomography of East Asia. *Phys. Earth. Planet. Inter.*, 84(1-4): 59-77.
- Wu Q J, Zheng X F, Pan J T, et al. 2009. Measurement of interstation phase velocity by wavelet transformation. *Earthquake Sci.*, 22(4): 425-429.
- Yang B J, Mu S M, Jin X, et al. 1996. Synthesized study on the geophysics of Manzhouli-Suifenhe geoscience transect, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 39(6): 772-782.
- Yang Y J, Ritzwoller M H, Levshin A L, et al. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophys. J. Int.*, 168(1): 259-274.
- Yanovskaya T B, Ditmar P G. 1990. Smoothness criteria in surface wave tomography. *Geophys. J. Int.*, 102(1): 63-72.
- Yao H J, Van der Hilst R D, De Hoop M V. 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis: I-Phase velocity maps. *Geophys. J. Int.*, 166(2): 732-744.
- Zhang L M, Tang X M. 1983. The underthrusting movement of the western Pacific plate and the deep focus earthquake zone of northeast China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 26(4): 331-340.
- Zhang X K, Zhang C K, Zhao J R, et al. 2002. Deep seismic sounding investigation into the deep structure of the magma system in Changbaishan Tianchi volcanic region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 24(2): 135-143.
- Zhao D P, Lei J S, Tang R Y. 2004. Origin of the Changbai intraplate volcanism in Northeast China: evidence from seismic tomography. *China Sci. Bull.*, 49(13): 1401-1408.
- Zheng S H, Sun X L, Song X D, et al. 2008. Surface wave tomography of china from ambient seismic noise correlation. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9: Q05020, doi: 10.1029/2008GC001981.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, et al. 2009. Technical system construction of Data Backup Center for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- Zheng X F, Yao Z X, Liang J H, et al. 2010. The role played and opportunities provided by IGP DMC of China National Seismic Network in Wenchuan earthquake disaster relief and researches. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(5B): 2866-2872, doi:10.1785/0120090257.
- Zheng Y, Shen W S, Zhou L Q, et al. 2011. Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, northeastern China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography. *J. Geophys. Res.*, 116: B12312, doi: 10.1029/2011JB008637.
- Zhu J S, Cao J M, Cai X L, et al. 2002. High resolution surface wave tomography in East Asia and west Pacific Marginal Seas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 45(5): 646-664.
- Zhu L B, Xu Q, Chen X F. 2002. Group velocity of Rayleigh wave in Chinese Continent and its adjacent seas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 45(4): 475-482.

## 附中文参考文献

- 傅维洲. 1996. 中国东北深震及其构造意义. 长春地质学院学报, 26(3): 316-321.
- 傅维洲, 杨宝俊, 刘财等. 1998. 中国满洲里—绥芬河地学断面地震学研究. 长春科技大学学报, 28(2): 206-212.
- 高东辉, 陈永顺, 孟宪森等. 2011. 黑龙江地区背景噪声面波群速度层析成像. 地球物理学报, 54(4): 1043-1051.
- 何正勤, 丁志峰, 叶太兰等. 2002. 中国大陆及其邻域的瑞利波群速度分布图象与地壳上地幔速度结构. 地震学报, 24(3): 252-259.
- 刘财, 孟令顺, 吴燕冈等. 2009. 东北地球物理场与地壳演化. 北京: 地质出版社.
- 刘若新, 魏海泉, 汤吉等. 1996. 长白山天池火山研究进展. 地震地磁观测与研究, 17(4): 2-11.
- 卢造勋, 夏怀宽. 1993. 内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟地学断面. 地球物理学报, 36(6): 765-772.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年等. 2009. 中国大地构造单元划分. 中国地质, 36(1): 1-28.
- 潘佳铁, 吴庆举, 李永华等. 2011. 华北地区瑞雷面波相速度层析成像. 地球物理学报, 54(1): 67-76.
- 田有, 刘财, 冯炬. 2011. 中国东北地区地壳、上地幔速度结构及其对矿产能源形成的控制作用. 地球物理学报, 54(2): 407-414, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.017.
- 杨宝俊, 穆石敏, 金旭等. 1996. 中国满洲里—绥芬河地学断面地球物理综合研究. 地球物理学报, 39(6): 772-782.
- 张立敏, 唐晓明. 1983. 西太平洋板块俯冲运动与中国东北深震带. 地球物理学报, 26(4): 331-340.
- 张先康, 张成科, 赵金仁等. 2002. 长白山天池火山区岩浆系统深部结构的深地震测深研究. 地震学报, 24(2): 135-143.
- 赵大鹏, 雷建设, 唐荣余. 2004. 中国东北长白山火山的起源: 地震层析成像证据. 科学通报, 49(14): 1439-1446.
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁等. 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. 地球物理学报, 52(5): 1412-1417, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.031.
- 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林等. 2002. 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, 45(5): 646-664.
- 朱良保, 许庆, 陈晓非. 2002. 中国大陆及邻近海域的 Rayleigh 波群速度分布. 地球物理学报, 45(4): 475-482.