

叶庆东, 丁志峰, 郑晨, 吕苗苗, 吴萍萍, 陈浩朋. 2014. 大别-苏鲁及其邻近地区基于背景噪声的勒夫波群速度成像. 地震学报, 36(5): 810-825. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.006.

Ye Q D, Ding Z F, Zheng C, Lü M M, Wu P P, Chen H P. 2014. Love wave group velocity tomography in Dabie-Sulu and its adjacent areas from seismic ambient noise. *Acta Seismologica Sinica*, 36(5): 810-825. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.006.

# 大别-苏鲁及其邻近地区基于背景 噪声的勒夫波群速度成像<sup>\*</sup>

叶庆东<sup>1)</sup><sup>\*</sup> 丁志峰<sup>1)</sup> 郑 晨<sup>1)</sup>  
吕苗苗<sup>1)</sup> 吴萍萍<sup>2)</sup> 陈浩朋<sup>3)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国河北三河 065201 防灾科技学院

3) 中国武汉 430079 武汉大学测绘学院地球物理系

**摘要** 大别-苏鲁造山带是中国大陆东部地区最重要的构造之一。为了研究该地区的地壳上地幔速度结构, 本文收集了国家数字地震台网和中国区域地震台网的山东、河南、安徽、江苏和湖北等省的 144 个宽频带地震台连续两年(2009 年 5 月—2011 年 5 月)的水平向地震记录(E 分量和 N 分量)数据, 首先对台站对之间 E-E, E-N, N-N 和 N-E 分量进行互相关, 然后分别对这 4 个互相关分量采用相位权重叠加法进行叠加, 最后旋转到横向分量(T-T)获得勒夫波经验格林函数(EGF); 用频时分析(FTAN)方法获得 4000 余条勒夫波群速度频散曲线, 并进一步反演得到了周期为 6—40 s 的勒夫波群速度分布图。结果表明, 周期为 6—10 s 的勒夫波群速度分布与地表构造特征相吻合。大别造山带、苏鲁造山带、湖北西部隆起均表现为高速; 华北盆地发育, 表现为大面积的低速; 江汉盆地、南襄盆地、合肥盆地等因其规模不同而显示不同程度的低速。在周期为 6—30 s 的勒夫波群速度分布图上, 大别和苏鲁地区均显示高速, 已有的研究结果中地壳的低速并没有得到反映。其原因一方面可能与勒夫波群速度纵向分辨不高有关, 另一方面高压变质岩深度分布可能比已有研究结果给出的要深。6—30 s 的分布图上郯庐断裂带及其邻近地区表现为不同程度的高速, 可能与该地区白垩纪以来处于拉张构造体制, 地幔物质受到扰动, 造成物质上涌有关。

**关键词** 背景噪声 勒夫波 群速度 互相关函数 大别-苏鲁造山带

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.006 中图分类号: P315.3<sup>+</sup>1 文献标志码: A

## Love wave group velocity tomography in Dabie-Sulu and its adjacent areas from seismic ambient noise

Ye Qingdong<sup>1)</sup><sup>\*</sup> Ding Zhifeng<sup>1)</sup> Zheng Chen<sup>1)</sup>  
Lü Miaomiao<sup>1)</sup> Wu Pingping<sup>2)</sup> Chen Haopeng<sup>3)</sup>

\* 基金项目 国家自然基金(90915012)、地震行业专项(201008001)和科技部支撑项目“汶川地震断裂带科学钻探”资助。

收稿日期 2013-11-28 收到初稿, 2014-02-20 决定采用修改稿。

<sup>†</sup> 通讯作者 e-mail: yeqingdongg@126.com

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

2) Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China

3) Department of Geophysics, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** The Dabie-Sulu orogenic belt is one of the major tectonic zones in eastern China Continent. In order to obtain the velocity structure of the crust and upper mantle, we collected the continuous horizontal components seismograms recorded by Shandong, Henan, Anhui, Jiangsu, Hubei seismography networks and China Broadband Digital Seismography Network during May 2009 through May 2011. Firstly, component cross-correlations (E-E, E-N, N-N, N-E) for every station pairs were performed; secondly the four component cross-correlation functions were stacked by using the phase-weight stacking method; thirdly the components (E-E, E-N, N-N, N-E) were rotated into the radial (R) and transverse (T) components to obtain empirical Green's functions of Love waves; finally more than 4 000 Love wave group velocity dispersion curves are got by frequency-time analysis (FTAN), and the Love wave group velocity maps in the period of 6—40 s were reconstructed. The group velocity maps from 6 s to 10 s are well consistent with surface geological features. The results reveal high velocity anomalies in Dabie orogenic belt, Sulu orogenic belt and western Hubei uplift. North China exhibits low velocity due to its basin structure; Jianghan, Nanxiang and Hefei basins also show low velocity structures. The Love wave group velocity maps at the period of 6—30 s indicate that there are high velocity anomalies in Dabie and Sulu orogenic belts, while the low velocity anomalies in the middle crust in the previous studies cannot be found in this study. On one hand, it may be due to poor depth resolution of Love waves group velocity; on the other hand, this is probably because the metamorphic rock zone extends deeper than that in the previous studies. High velocity anomalies appear in Tanlu fault zone and its adjacent regions at the group velocity maps in the periods of 6—30 s, which may be caused by the upwelling of the mantle material and the mass exchange between the lower crust and upper mantle in the state of extension since the Cretaceous.

**Key words:** ambient noise; Love wave; group velocity; cross-correlation function; Dabie-Sulu orogenic belt

## 引言

大别-苏鲁造山带位于我国东部，横跨山东、河南、安徽、江苏和湖北等5省，是扬子与华北地块间的陆-陆造山带(王清晨等, 1989; Okay *et al*, 1993)。在燕山时期，由于郯庐断裂带大规模的由西南向东北方向的左旋走滑运动，形成两侧地块相对旋转，将苏鲁造山带和大别造山带错开，分别位于郯庐断裂带两侧(王清晨等, 1998)。自20世纪80年代研究人员在该造山带的榴辉岩中发现柯石英和金刚包体，确认这里是世界上规模最大、出露最好的高压变质带后，该造山带成为研究陆-陆碰撞、超高压作用以及大陆动力学的重要现场(Xu *et al*, 1998; 徐佩芳等, 2000; 徐纪人等, 2003)，吸引着地学家的目光。对该地区的研究已经包括岩石学(Zheng *et al*, 2005a)、矿物学(Okay *et al*, 1989; Liu *et al*, 2007)、构

造地质(Stuart, 1999; 朱光等, 2006)、地球化学(Zheng *et al*, 2005b)、年代学(Wang, 2006)、天然地震(徐佩芳等, 2000; 徐纪人等, 2003; 赵志新等, 2004; Chen *et al*, 2006; 吴萍萍等, 2012)、人工地震(杨文采, 2003; 赵志新, 徐纪人, 2009)、大地电磁(吴其反等, 2004; 肖骑彬等, 2008)等方面, 取得了很多有意义的成果。在地震面波研究方面, 虽然很多人的研究区域已经包括了这一区域(徐果明等, 2000; 朱介寿等, 2002), 但是由于他们的研究区域比较大, 受到分辨率的限制, 这种局部地区内的差异性在其结果中大多被平滑掉了。背景噪声研究方面, 郑现等(2012)对整个东部周期为 8—40 s 的瑞雷波群速度进行成像, 由于研究区域较大, 没有突出大别-苏鲁地区的特点; Luo 等(2011, 2013)利用大别及其邻近地区国家台网的 40 个宽频带 20 余个月的数据, 对周期为 8—35 s 的瑞雷波和勒夫波相速度进行成像, 并反演了该地区地壳和上地幔底部的 S 波速度结构, 在此基础上还讨论了大别地区的径向各向异性, 但其研究区域主要是大别地区, 没能比较与苏鲁地区速度结构的异同。

背景噪声层析成像是近年来发展起来的一种被动成像方法。该方法的主要特点是通过对相当长一段时间的连续地震记录进行互相关运算得到经验格林函数, 然后利用与传统面波成像相类似的方法获取面波群(相)速度分布(Shapiro *et al*, 2005; Yao *et al*, 2006; Yang *et al*, 2007)。与传统的面波方法相比(Levshin *et al*, 1992; 徐果明等, 2000; Yao *et al*, 2005), 该方法利用的是地震背景噪声记录, 不需要等待地震发生。而传统的面波双台法则要求地震与两个台站近似在同一圆路径上, 受地震方位的限制, 射线密度不会太大, 进而影响结果的分辨。背景噪声方法中任意两个台站的记录都可以互相关, 射线更加密集, 分辨更高。另外, 由于面波固有的衰减和散射, 很难得到地壳浅层的结构(李皎皎等, 2012), 而背景噪声能够提取更高频的信息, 相对于面波可以分辨更次级的构造单元, 在研究诸如大别-苏鲁造山带这种区域地壳层析成像中具有独特的优势。本文选用山东、河南、安徽、江苏和湖北等 5 省的 144 个台站近两年的连续记录, 在传统的噪声成像处理中作了一定的改进, 计算了周期为 6—40 s 的勒夫波群速度分布, 并结合研究区域的构造现象, 对速度分布可能的地质含义进行了探讨。

## 1 数据

研究区域位于  $109^{\circ}\text{--}122^{\circ}\text{E}$ ,  $30^{\circ}\text{--}38^{\circ}\text{N}$ 。本文收集了国家数字地震台网和中国区域地震数据台网 5 省(山东、河南、安徽、江苏和湖北)共 144 个宽频带地震台 2009 年 5 月—2011 年 5 月近两年的连续记录数据(郑秀芬等, 2009)。图 1 给出了该区域内的台站分布和主要构造背景, 可以看出台站基本覆盖了大别-苏鲁造山带, 衔接了华北与扬子块体。

## 2 方法

Lobkis 和 Weaver (2001)的实验为背景噪声成像提供了实验基础。此后很多学者(Derode *et al*, 2003; Lobkis, Weaver, 2001; Weaver, Lobkis, 2004; Shapiro, Campillo, 2004; Snieder, 2004)根据不同的假设, 从理论上证明了背景噪声成像的可行性。在数据处理上, Bensen 等(2007)详细讨论了该方法的处理细节并给出了一个一般性流程, 尽管不同的人处理方法略有不同, 但基本都没有脱离 Bensen 的一般性流程。本文的处理主要包括以下 4 个步骤: ① 数据预处理; ② 获取经验格林函数; ③ 勒夫波群速度频散测量; ④ 群速

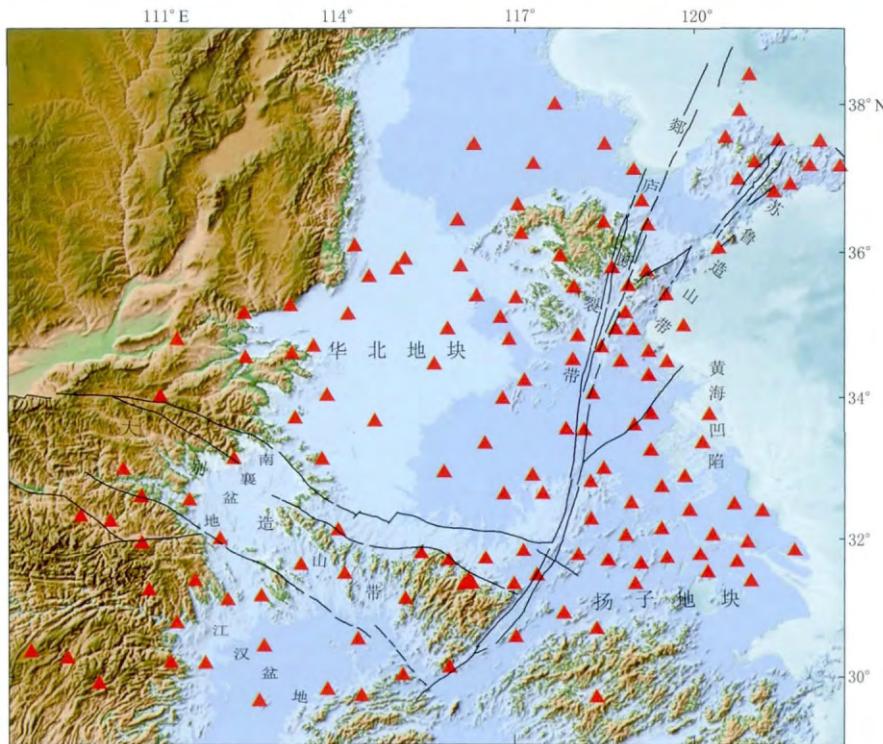


图1 研究区域的主要构造背景和台站(红色三角形)分布

Fig. 1 Regional tectonic settings of the study region and distribution of seismic stations (red triangles) used in this study

度分布计算.

## 2.1 数据预处理

首先将每个台站记录的 N 分量和 E 分量进行去线性趋势、去均值、去仪器响应, 接着对数据进行 1 Hz 的降采样及 4—50 s 的带通滤波; 然后以“天”为单位截取数据. 若中间出现间断且间断不是很长(不超过每天记录的 8%)则补零, 若间断太长(超过 8%)则予以去除. 为了消除地震的影响, 还必须对记录进行时间域内归一化和频率域内的谱白化. 时间域内的归一化和频率域内的谱白化均采用滑动绝对平均法(Bensen *et al*, 2007; 房立华等, 2009)进行.

## 2.2 获取经验格林函数

勒夫波是 T 分量的记录. 如果对每一天的记录均由 N、E 分量旋转到 R、T 分量, 则会因为旋转次数过多导致误差较大. Lin 等(2008)认为, 可以通过 A 台站的 N 分量和 E 分量分别与 B 台站的 N 分量和 E 分量相关, 即得到 NN, NE, EN, EE 互相关分量, 然后以“天”为单位进行叠加. 以往的噪声叠加方法都采用线性叠加方法, 该方法对于每一条互相关记录给予同样的权重, 本文采用 Schimmel 和 Paulssen(1997)提出的相位权重方法(phase-weight stacks)进行叠加. 该方法的主要思想是将原始信号进行希尔伯特变换获得解析信号, 即

$$S(t) = s(t) + iH[s(t)] = A(t)\exp[i\Phi(t)], \quad (1)$$

式中,  $s(t)$  为原始的互相关记录,  $H[s(t)]$  为记录  $s(t)$  的希尔伯特变换,  $S(t)$  是由原始信号与其希尔伯特变换构成的解析信号,  $A(t)$  为该解析信号的包络,  $\Phi(t)$  为瞬时相位,  $i$  为虚数单位。与通常的等权叠加不同, 相位权重叠加方法中的每一条互相关记录的权重均与其自身的瞬时相位有关, 即

$$g(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j(t) \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \exp[i\Phi_k(t)] \right|^{\nu}, \quad (2)$$

式中:  $N$  为台站对互相关记录的总数;  $\nu$  取适当的值能突出相干信号, 抑制噪声。显然, 当  $\nu$  取 0 时就是通常的线性叠加。图 2 给出了  $\nu$  取不同值时 YDU 台与 ANQ 台(图 5a)互相关叠加(已旋转到 TT 分量)的信号。可以看出,  $\nu$  的取值越大, 波形越“干净”, 波包越突出。考虑到时间分辨与频率分辨此消彼长的关系(朱良保, 熊安丽, 2007),  $\nu$  不能取得太大。本文取  $\nu$  为 0.5。

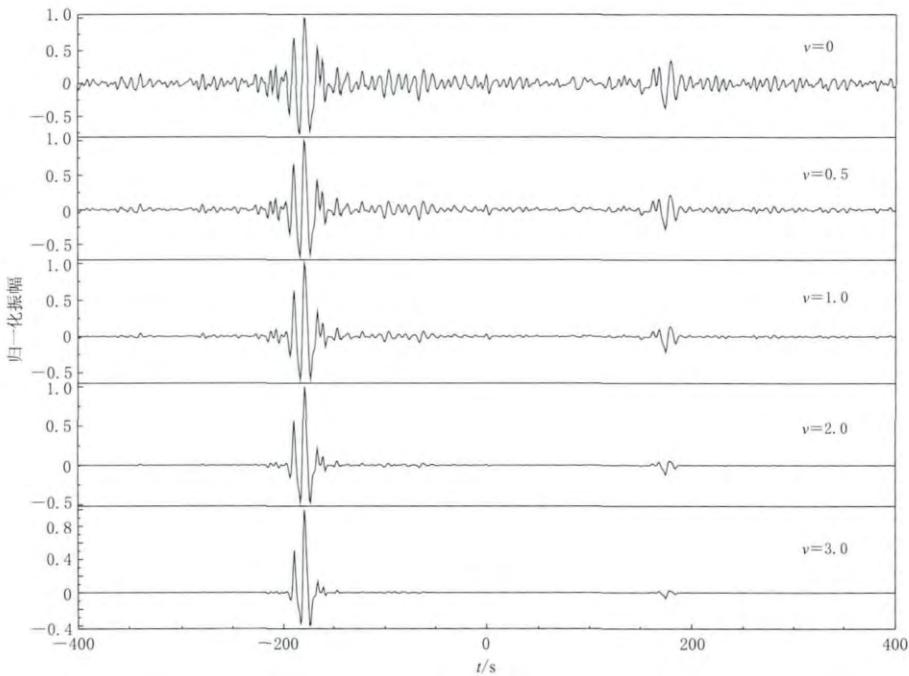


图 2  $\nu$  取不同值时背景噪声互相关函数叠加结果

Fig. 2 Results of phase-weight stacks for the ambient noise cross-correlation functions with different exponent  $\nu$  in formula (2)

叠加后, 两个台站之间有 NN, NE, EN, EE 互相关分量, 它们与台站间 T 分量的互相关函数有以下关系:

$$\begin{bmatrix} TT \\ RR \\ TR \\ RT \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta\sin\psi & \sin\theta\cos\psi \\ -\sin\theta\sin\psi & -\sin\theta\cos\psi & -\cos\theta\cos\psi & -\cos\theta\sin\psi \\ -\cos\theta\sin\psi & -\cos\theta\cos\psi & \sin\theta\cos\psi & \sin\theta\sin\psi \\ -\sin\theta\cos\psi & \sin\theta\sin\psi & \cos\theta\sin\psi & -\cos\theta\cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} EE \\ EN \\ NN \\ NE \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为方位角,  $\psi$  为后方位角, 二者均由两个台站之间的位置决定; TT 代表最终得到的 T 分量的互相关函数, 它是 EE, EN, NN 和 NE 的线性组合; 其余类同。利用上述方

法, 图 3 给出了以 LAY 台(图 5a)为中心的部分互相关函数.

尽管现有研究已表明, 长时间尺度的噪声源可近似为均匀分布(Lin *et al*, 2008; 鲁来玉等, 2009), 但经验格林函数正负分支仍然是不对称的(图 3). 根据格林函数空间的互异性, 本文将互相关函数的正负分支进行反序叠加, 获得“对称”的经验格林函数. Lin 等(2007)研究表明, 对称分量各个周期的信噪比都有一定的提高.

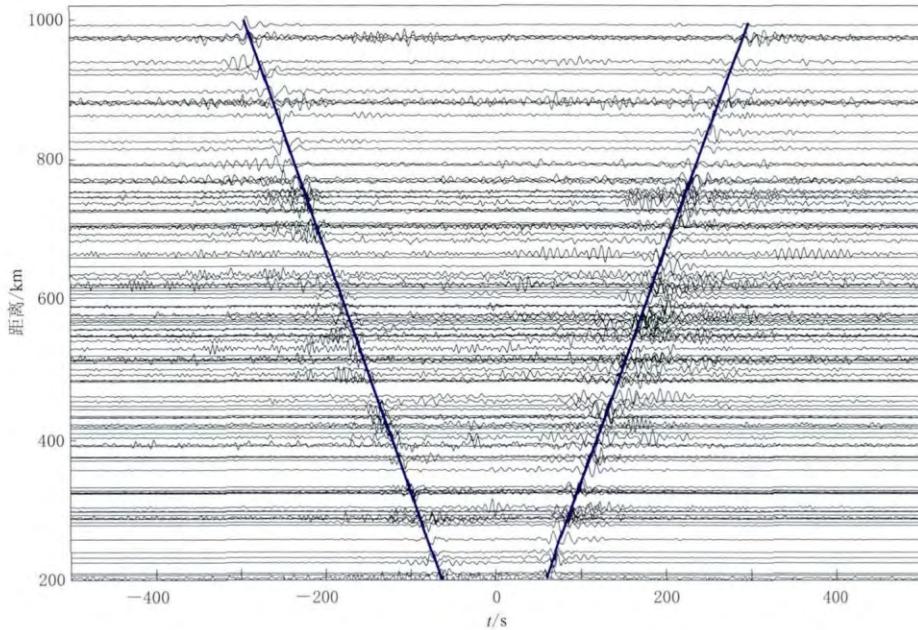


图 3 LAY 台与其余部分台的互相关函数(10—50 s 的带通滤波)

Fig. 3 Cross-correlation functions between the station LAY and some other stations after 10—50 s bandpass filtering

### 2.3 频散测量

理论上, 互相关函数与经验格林函数存在  $\pi/2$  的相位差, 但这不会对群速度的测量产生影响. 为了确保频散测量的可靠性, 本文首先采用信噪比来进行控制. 对于反序叠加后的互相关波形, 选取一个信号窗口和一个噪声窗口, 分别计算信号窗口内的最大振幅与噪声窗口内的均方差, 两者的比值即为信噪比. 信噪比大于 10 的保留, 小于 10 的舍弃. 然后, 对于信噪比大于 10 的互相关波形, 利用 Herrmann 和 Ammon(2002)软件包 CPS3.30 (computer program in seismology)中的群速度提取交互式界面, 手动提取频散曲线, 以确保频散的可靠性. 关于提取频散曲线的方法, Dziewonski 等(1969)、Levshin 等(1992)以及 Herrmann 和 Ammon(2002)均作了比较详尽的讨论, 此处不再赘述. 图 4 给出了最终获得的不同周期的射线统计及射线分布; 图 5 给出了典型的频散曲线.

### 2.4 群速度分布反演

利用观测到的各个周期的群速度值, 采用 Tarantola 和 Valette (1982)、Tarantola 和 Nercessian (1984)及朱良保等(2002)发展的无网格反演计算群速度分布的方法, 反演目标函数如下:

$$\Phi(s) = (t - t_{\text{obs}})^T \mathbf{C}_{dd}^{-1} (t - t_{\text{obs}}) + (s - s_p)^T \mathbf{C}_{mm}^{-1} (s - s_p), \quad (4)$$

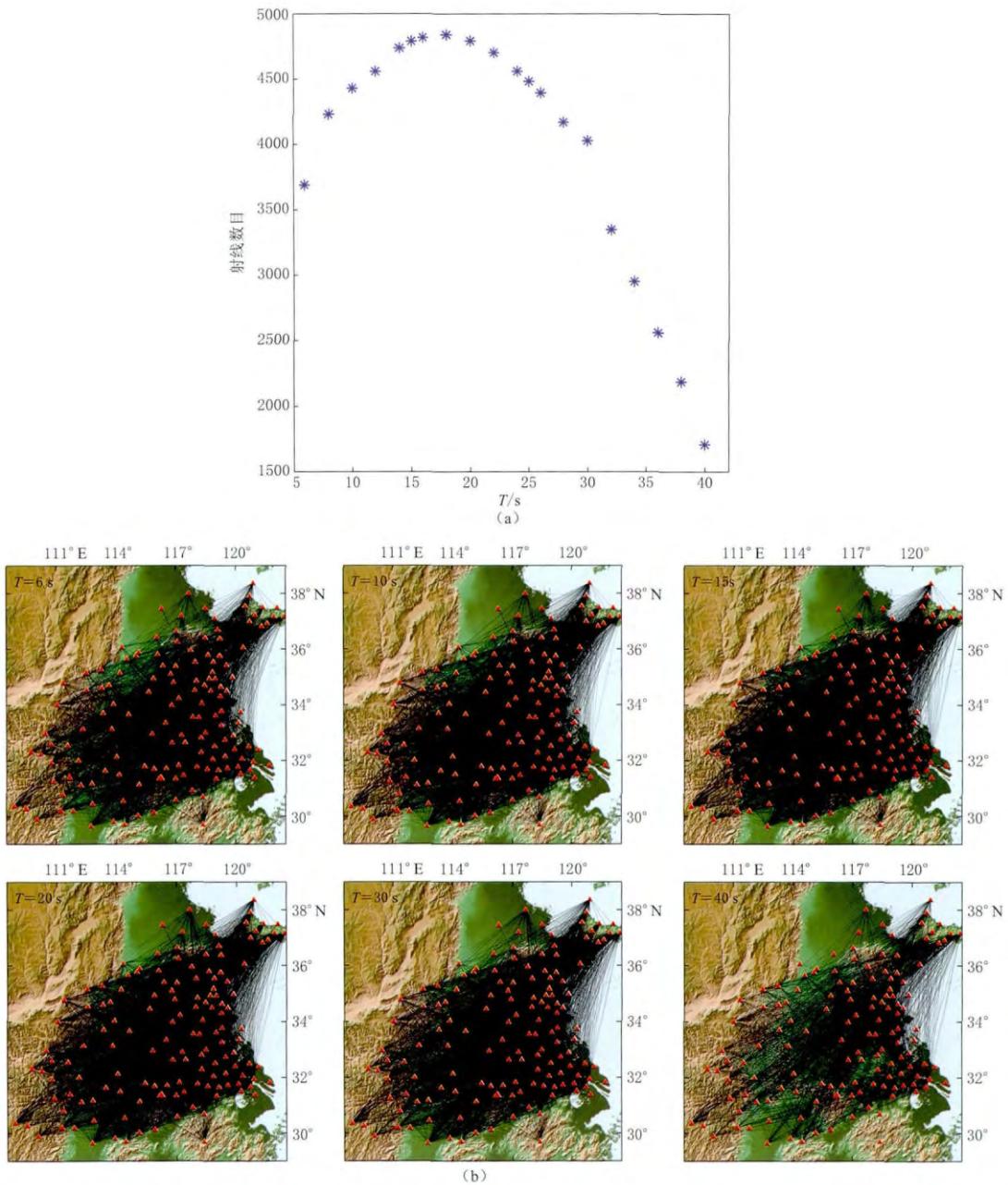


图 4 不同周期的勒夫波射线路径统计(a)和射线分布(b)

Fig. 4 Numbers of the ray paths of Love wave (a) and ray-path coverage for the Love group velocity (b) at different periods

式中,  $t$  和  $s$  分别表示群速度的走时和慢度,  $t_{\text{obs}}$  为观测走时,  $s_p$  为先验慢度值.  $C_{dd}$  为数据的协方差矩阵,  $C_{mm}$  为模型的协方差矩阵. 模型空间的协方差为

$$C_{mm}(r_1, r_2) = \sigma_s^2 \exp \left[ -\frac{(r_1 - r_2)^2}{2L^2} \right], \quad (5)$$

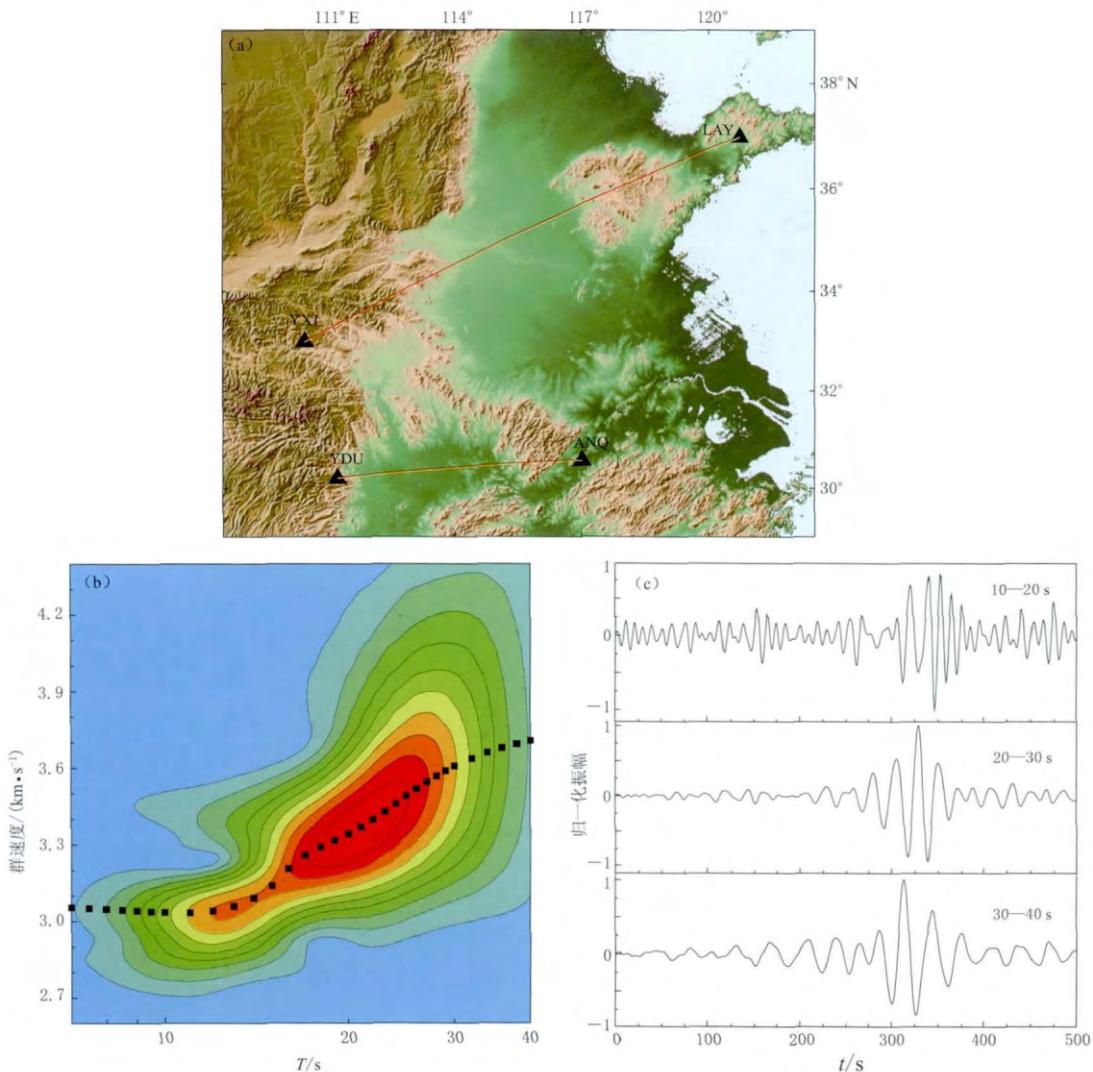


图 5 台站对分布示意图(a)、YXI 台与 LAY 台之间的勒夫波群速度  
频散曲线(b)和带通滤波后的互相关函数(c)

Fig. 5 (a) Distribution of the station-pairs YDU-ANQ (Anhui) and YXI-LAY; (b) Love wave group velocity dispersion curve between the station YXI (Hubei) and LAY (Shandong); (c) Bandpass filtered noise cross-correlation function between the stations YXI and LAY

式中： $\sigma_s$  表示慢度的不确定性，决定分辨框架，本文中当射线较多时取  $0.03 \text{ s/km}$ ，射线较少时取  $0.04 \text{ s/km}$ ； $L$  为相关长度，决定群速度反演结果的平滑程度，李昱等(2009)取  $L = c_0 T/2$ ， $c_0$  为某一周期下的平均群速度， $T$  为周期。然而 Montagner(1986)认为  $L$  的取值不应该小于一个波长。本文中为了避免短周期出现奇异点和长周期过于平滑，当  $T \leq 20$  时， $L=30$ ； $20 < T \leq 30$  时， $L=40$ ； $T > 30$  时， $L=60$ 。 $C_{dd}$  除了与频散测量的精确度有关外，还与台间距有关。考虑到本区域优势台间距大约在  $300\text{--}400 \text{ km}$ ，假定频散测量的误差为  $3\%$ ，因此走时误差主要集中在  $1 \text{ s}$  左右。先将  $C_{dd}$  取为单位矩阵，然后计算一个群速度分布；根据这个速度分布计算出理论走时并将其与观测走时相减；最后再将这个差作为  $C_{dd}$

的元素进行第二次反演。结果表明，通过第二次反演后能够得到更可靠的结果。

### 3 结果

由于研究区域大部分属于华东地区，经济发达，人文噪声干扰比较大，很难获取足够数量的周期为 6 s 以下的频散，而长周期的信噪比较低，频散测量的误差较大(Bensen *et al.*, 2008; Yao *et al.*, 2010)，所以本文仅仅反演了周期为 6—40 s 的群速度分布。图 6 给出了 6, 10, 15, 20, 30 s 和 40 s 的群速度分布。研究表明(Bensen *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2008)，瑞雷波群速度主要对  $1/3$ — $1/2$  波长处深度的 S 波速度比较敏感，而勒夫波敏感深度更浅一些，且周期越长，纵向分辨率越低(图 6b)。从图 6a 中可以得到以下认识：

1) 6—10 s 的勒夫波群速度分布基本可以勾勒出研究区域的地质构造单元。大别和苏鲁地区呈现出明显的高速，其中大别地区的高速被南襄盆地的低速截为两段。在大别与郯庐断裂带的交汇处，合肥盆地隐约可见。鄂西隆起、胶北和鲁西等山区呈现出高速特征。华北平原、江汉平原、苏北、南黄海凹陷都呈现出低速特征。从 6—15 s 开始，郯庐断裂带及其周边地区的高速特征逐渐明显。

2) 在 15—20 s 的勒夫波群速度分布图上，大别-苏鲁造山带依然显示出高速特征，但是相对于 15 s 的群速度分布，20 s 群速度分布图上的大别-苏鲁地区高速的幅度开始减弱。华北平原、江汉盆地、南襄盆地低速规模变小，合肥盆地低速已经全部消失。郯庐断裂带及其周边地区显示出大规模的高速特征，苏北、南黄海凹陷依然显示出低速特征。

3) 在 30—40 s 的勒夫波群速度分布图上，华北地区低速幅度减小，并且呈现出高低速交错的分布特征。鄂西隆起已经逐渐显示低速特征，江汉盆地的低速又有增加的趋势。从 30 s 的群速度分布图上可以看出，大别和苏鲁地区依然显示出一定程度的高速，但是在 40 s 的群速度分布图上该地区的高速几乎完全消失。郯庐断裂带的高速也逐渐减弱，但是在郯城依然显示出高速，1668 年郯城 8.5 级地震发生在此处。黄海凹陷整体的低速似乎没有改变。

综上，从 6—15 s 的勒夫波群速度分布来看，大别地区、苏鲁地区、郯庐断裂带高速呈现出增加的趋势；而 20—40 s 的勒夫波群速度分布，高速呈现出减弱的趋势；到 40 s 时，大别地区、苏鲁地区的高速几乎消失，而郯庐断裂带在郯城附近显示出零星的高速。总体来看，从 6—40 s 的勒夫波群速度分布可以看出，华北地区总体上的低速幅度逐渐降低，并且存在比较明显的非均匀性；随着周期的增大，鄂西北从高速过渡到低速；而南黄海则一直表现为低速。

### 4 讨论与结论

#### 4.1 可靠性

本文采用检测板的方法来检验结果的可靠性。限于篇幅，以 6 s 和 40 s 的勒夫波为例，首先给定区域的平均群速度，然后给相邻网格分别以 10% 和 -10% 的速度扰动作为“真”模型，再求出每条射线的平均走时，最后利用前面的反演方法，选取同样的参数，看是否能恢复“真”模型。本文仅以 6 s 和 40 s 为例，是因为 6 s 和 40 s 时射线较少，如果在射线较少的情况下可以分辨，由于射线路径差别不大，且扰动的幅度变化不大，所以射线相对较多的区域一般也能分辨。由图 7 可以看出，在 6 s 和 40 s 的射线覆盖下，可以达到  $1^\circ \times 1^\circ$  的分

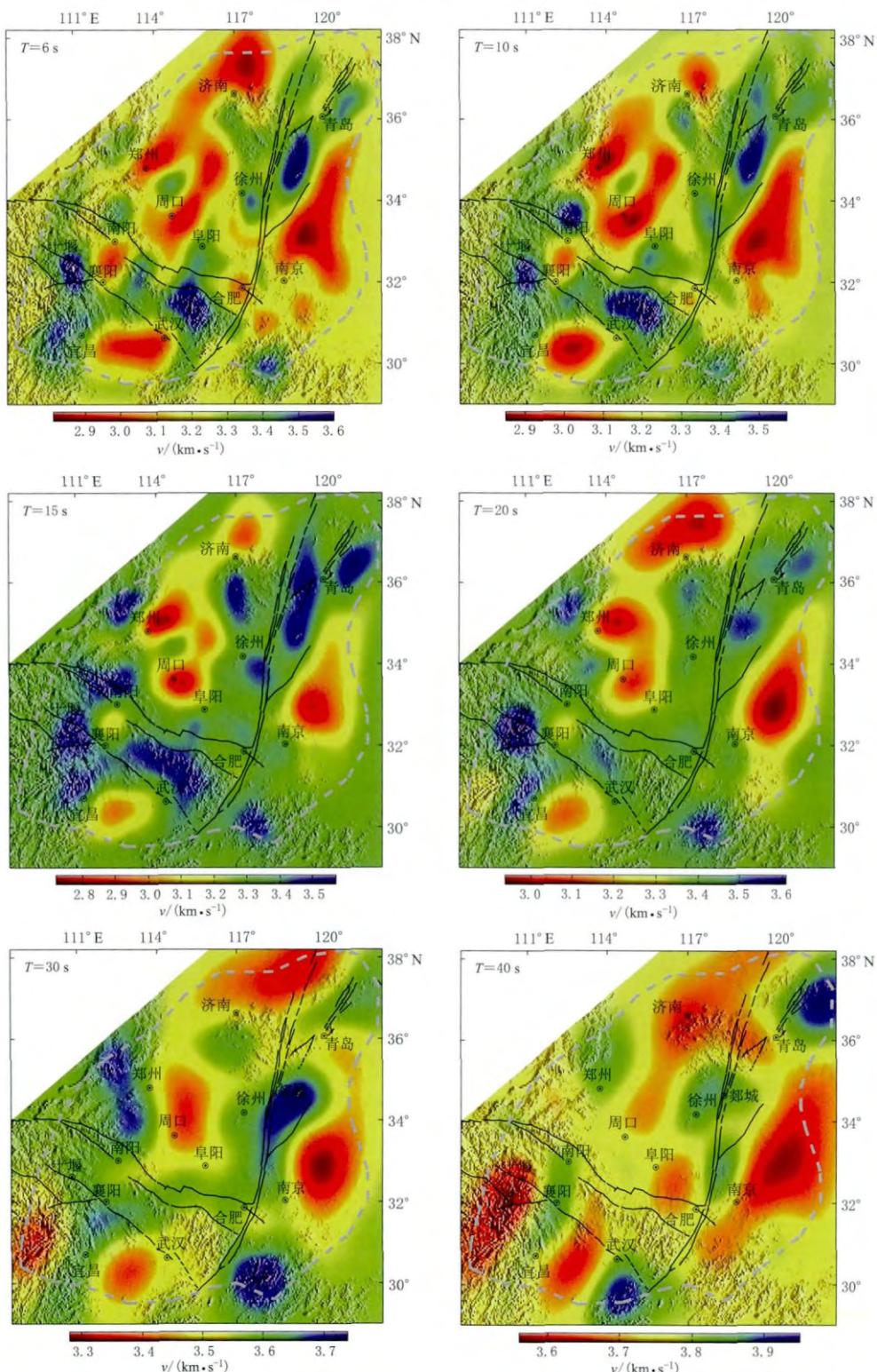


图 6 (a) 不同期的勒夫波群速度分布图

Fig. 6 (a) Love wave group velocity maps at different periods

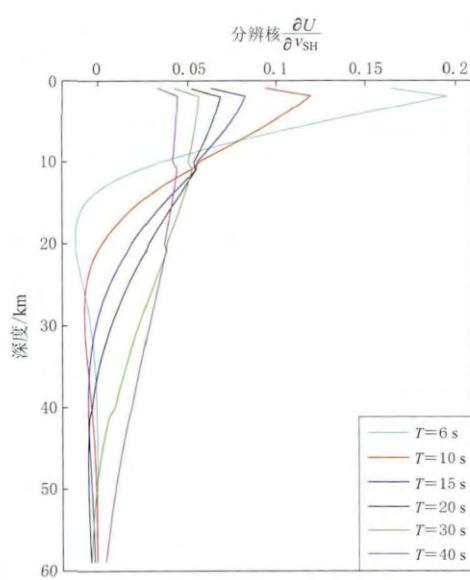


图 6 (b) AK135 模型(Kennett *et al.*, 1995)

不同周期的勒夫波群速度敏感核

Fig. 6 (b) Depth sensitive kernels to shear velocity for Love wave group velocity based on the AK135 model (Kennett *et al.*, 1995) at periods 6, 10, 15, 20, 30, 40 s

分辨率。在研究区域的边缘,由于射线稀疏,且射线交叉不多,分辨较差。

#### 4.2 结果

结合图 6a、b 可知,6—10 s 的勒夫波群速度主要反映了上地壳的 S 波速度结构。在上地壳,速度分布主要受到地表地质构造单元的影响。大别造山带、苏鲁造山带、湖北西部隆起都表现为高速;华北盆地发育,表现为大面积的低速;江汉盆地、南襄盆地、合肥盆地等因其规模不同而显示不同程度的低速。15—20 s 的勒夫波群速度分布主要反映了中上地壳的 S 波速度分布。江汉盆地、南襄盆地低速的规模减小,合肥盆地的低速几乎全部消失,表明地表地质构造的影响不大;大别-苏鲁地区依然主要表现为高速。徐佩芳等(2000)和黄耕等(2011)在大别地区的中地壳(20—25 km)发现了低速区,并认为高压变质带的影响仅存在于上地壳。赵志新和徐纪人(2009)利用人工地震广角反射在大别地区 30 km 处也发现了部分低速,并且同样认为高压变质带的影响主要存在

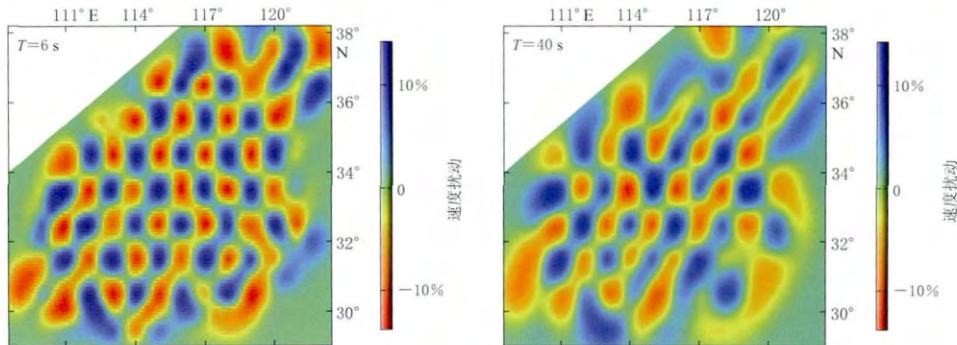


图 7  $1^\circ \times 1^\circ$  检测板测试结果(周期为 6 s 和 40 s)

Fig. 7  $1^\circ \times 1^\circ$  checkerboard resolution tests for periods 6 s and 40 s

于上地壳。Luo 等(2011)利用背景噪声瑞雷波相速度分布反演了大别地区的 S 波速度,在大别东南段的中地壳也发现大面积的低速区域;同时,他们还发现在北大别地区(约 31°—32°N, 104.5°—106.5°E)高速明显。这一结果在本文的研究中也得到了反映。Luo 等认为该高速区域与扬子板块和华北板块碰撞后岩石圈拆沉以及随后的岩浆作用有关。30—40 s 的勒夫波群速度对横波速度结构的敏感深度已经到达下地壳和上地幔顶部,在 30 s 时大别-苏鲁地区依然有一定程度的高速,而在 40 s 时高速几乎完全消失,表明高压变质岩的影响作用几乎完全消失。大别-苏鲁地区在 15—30 s 的勒夫波群速度分布图上没有出现低速的原因可能是:①从图 6b 的敏感核可以看出,勒夫波群速度纵向分辨率较差,是对一

定深度内 S 波速度的综合反映,使得低速层在频散分布图上得不到明显的反映;②高压变质岩深度分布是否比已有研究给出的要深?这需要进一步的研究。

王小凤等(2000)认为,自白垩纪以来,郯庐断裂带处于拉张构造环境中,地幔物质受到扰动,物质上涌,在地表形成裂谷玄武岩和大陆溢流玄武岩。郯庐断裂带及其周边地区的高速证明了这一观点。

苏北、南黄海凹陷在 6—40 s 一直表现为低速,这是一个值得商榷的结果。由于这一地区的地壳较薄,40 s 的群速度分布主要反映上地幔的 S 波速度结构,相对于西部仍然受到地壳 S 波速度结构的控制,应该表现为高速。郑现等(2012)利用中国大陆中东部地区 494 个台站及中国周边地区 IRIS 的 7 个台站约 600 天的数据,获得了中国中东部瑞雷波 8—40 s 的群速度分布,在瑞雷波 25 s 的群速度分布图上,苏北、南黄海显示为低速,但是到了 30 s 的时候表现出高速。黄忠贤等(2009)通过天然面波层析成像的结果也显示出与郑现等(2012)类似的特征。但是,朱介寿等(2005)利用面波反演 S 波速度结构,在 40 km 的切片上南黄海地区仍然表现为低速。造成上述反演结果不同的原因主要是该地区虽然有射线覆盖,但主要是南北方向的射线,缺乏东西方向的射线,射线交叉少,约束不够,因此选取不同的资料可能得到的结果不同。

大别-苏鲁地区作为东部的重要构造之一,对该地区的研究已经积累了大量的资料。背景噪声作为一种新型的成像技术,因其可以获得高分辨率的地壳上地幔速度结构,对其它方面的研究具有一定的参考意义和约束作用。

中国地震局地球物理研究所“国家数字测震台网数据备份中心”和中国数字地震台网为本文研究提供了波形数据。在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 房立华, 吴建平, 吕作勇. 2009. 华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像[J]. 地球物理学报, 52(3): 663—671.  
Fang L H, Wu J P, Lü Z Y. 2009. Rayleigh wave group velocity tomography from ambient noise in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(3): 663—671 (in Chinese).
- 黄耕, 李清河, 张元生, 孙业君, 毕雪梅, 金淑梅, 王俊. 2011. 郊庐断裂带鲁苏皖段及邻区地壳速度结构[J]. 地球物理学报, 54(10): 2549—2559.  
Huang G, Li Q H, Zhang Y S, Sun Y J, Bi X M, Jin S M, Wang J. 2011. Crustal velocity structure beneath the Shandong-Jiangsu-Anhui segment of the Tancheng-Lujiang fault zone and adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(10): 2549—2559 (in Chinese).
- 黄忠贤, 肖颐, 郝天珧, 彭艳菊, 郑月军. 2009. 中国东部海域岩石圈结构面波层析成像[J]. 地球物理学报, 52(3): 653—662.  
Huang Z X, Xu Y, Hao T Y, Peng Y J, Zheng Y J. 2009. Surface wave tomography of lithospheric structure in the seas of east China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(3): 653—662 (in Chinese).
- 李昱, 姚华建, 刘启元, 陈九辉, van der Hilst R D, 李顺成, 黄慧, 郭飙, 王峻, 齐少华. 2010. 川西地区台阵环境噪声瑞利波相速度层析成像[J]. 地球物理学报, 53(4): 842—852.  
Li Y, Yao H J, Liu Q Y, Chen J H, van der Hilst R D, Li S C, Huang H, Guo B, Wang J, Qi S H. 2010. Phase velocity array tomography of Rayleigh waves in western Sichuan from ambient seismic noise[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(4): 842—852 (in Chinese).
- 李皎皎, 黄金莉, 刘志坤. 2012. 用背景噪声和地震面波反演东北地区岩石圈速度结构[J]. 地震, 32(4): 22—32.

- Li J J, Huang J L, Liu Z K. 2012. Lithosphere velocity structure of Northeast China from ambient noise and surface wave tomography[J]. *Earthquake*, **32**(4): 22–32 (in Chinese).
- 鲁来玉, 何正勤, 丁志峰, 姚志祥. 2009. 华北科学探测台阵背景噪声特征分析[J]. 地球物理学报, **52**(10): 2566–2572.
- Lu L Y, He Z Q, Ding Z F, Yao Z X. 2009. Investigation of ambient noise source in North China array[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(10): 2566–2572 (in Chinese).
- 王清晨, 孙枢, 李继亮, 周达, 许靖华, 张国伟. 1989. 秦岭的大地构造演化[J]. 地质科学, (2): 129–142.
- Wang Q C, Sun S, Li J L, Zhou D, Xu J H, Zhang G W. 1989. The tectonic evolution of the Qinling Mountain belt[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (2): 129–142 (in Chinese).
- 王清晨, 从柏林, 朱日祥. 1998. 大别山超高压变质岩带形成的地球动力学[M]. 北京: 科学出版社: 568–579.
- Wang Q C, Cong B L, Zhu R X. 1998. *Geodynamics in Formation of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks from the Dabie Mountain*[M]. Beijing: Science Press: 568–579 (in Chinese).
- 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 陈宣华, 董树文, 张青. 2000. 鄱庐断裂带[M]. 北京: 地质出版社: 204–214.
- Wang X F, Li Z J, Chen B L, Chen X H, Dong S W, Zhang Q. 2000. *Tanlu Fault Zone*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 204–214 (in Chinese).
- 吴萍萍, 王椿镛, 丁志峰, 常利军, 李振. 2012. 大别-苏鲁及邻区上地幔的各向异性[J]. 地球物理学报, **55**(8): 2539–2550.
- Wu P P, Wang C Y, Ding Z F, Chang L J, Li Z. 2012. Seismic anisotropy of upper mantle beneath the Dabie-Sulu and its adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(8): 2539–2550 (in Chinese).
- 吴其反, 路凤香, 王懋基, 程建平, 刘桂林. 2004. 中国东部新编重磁异常图及构造解释研究[J]. 地球学报, **25**(1): 83–88.
- Wu Q F, Lu F X, Wang M J, Cheng J P, Liu G L. 2004. The new magnetic and gravity maps of eastern China and their interpretation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, **25**(1): 83–88 (in Chinese).
- 肖骑彬, 赵国泽, 王继军, 詹艳, 陈小斌, 汤吉, 蔡军涛, 万战生, 王立凤, 马为, 张继红. 2008. 苏鲁造山带及邻区深部电性结构研究[J]. 中国科学:D辑, **38**(10): 1258–1267.
- Xiao Q B, Zhao G Z, Wang J J, Zhan Y, Chen X B, Tang J, Cai J T, Wan Z S, Wang L F, Ma W, Zhang J H. 2008. The electrical structure of Sulu-Dabie and their adjacent areas[J]. *Science in China: Series D*, **38**(10): 1258–1267 (in Chinese).
- 徐果明, 李光品, 王善恩, 陈虹, 周虎顺. 2000. 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[J]. 地球物理学报, **43**(3): 366–376.
- Xu G M, Li G P, Wang S E, Chen H, Zhou H S. 2000. The 3-D structure of shear waves in the crust and mantle of east continental China inverted by Rayleigh wave data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **43**(3): 366–376 (in Chinese).
- 徐纪人, 杨文采, 赵志新, 程振炎. 2003. 苏鲁大别造山带岩石圈三维P波速度结构特征[J]. 地质学报, **77**(4): 577–582.
- Xu J R, Yang W C, Zhao Z X, Cheng Z Y. 2003. Three-dimensional velocity structure of the Sulu-Dabie orogen belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, **77**(4): 577–582 (in Chinese).
- 徐佩芳, 刘福田, 王清晨, 从柏林, 陈辉, 孙若昧. 2000. 大别-苏鲁碰撞造山带的地震层析成像研究: 岩石圈三维速度结构[J]. 地球物理学报, **43**(3): 377–385.
- Xu P F, Liu F T, Wang Q C, Cong B L, Chen H, Sun R M. 2000. Seismic tomography beneath the Dabie-Sulu collision orogen: 3-D velocity structure of lithosphere[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **43**(3): 377–385 (in Chinese).
- 杨文采. 2003. 大别苏鲁地区层状地幔反射体及其解释[J]. 地球物理学报, **46**(2): 191–196.
- Yang W C. 2003. Layered mantle reflectors in Dabie-Sulu areas and their interpretation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **46**(2): 191–196 (in Chinese).
- 赵志新, 徐纪人, 许志琴. 2004. 上地幔三维S波速度结构与大别苏鲁超高压变质带俯冲折返机制探讨[J]. 岩石学报, **20**(1): 157–164.

- Zhao Z X, Xu J R, Xu Z Q. 2004. 3-D velocity structure in the upper mantle and the mechanism investigation for the ultrahigh-pressure metamorphosed belt in the Dabie-Sulu region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, **20**(1): 157–164 (in Chinese).
- 赵志新, 徐纪人. 2009. 广角反射地震探测得到的中国东部地壳三维 P 波速度结构[J]. 科学通报, **54**(7): 931–937.
- Zhao Z X, Xu J R. 2009. Three-dimensional crustal velocity structure of P-wave in east China from wide-angle refraction survey[J]. *Chinese Science Bulletin*, **54**(8): 1389–1397.
- 郑现, 赵翠萍, 周连庆, 郑斯华. 2012. 中国大陆中东部地区基于背景噪声的瑞利波层析成像[J]. 地球物理学报, **55**(6): 1919–1928.
- Zheng X, Zhao C P, Zhou L Q, Zheng S H. 2012. Rayleigh wave tomography from ambient noise in central and eastern Chinese mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(6): 1919–1928 (in Chinese).
- 郑秀芬, 欧阳飚, 张东宁, 姚志祥, 梁建宏, 郑洁. 2009. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. 地球物理学报, **52**(5): 1412–1417.
- Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, Yao Z X, Liang J H, Zheng J. 2009. Technical system construction of data backup centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(5): 1412–1417 (in Chinese).
- 朱光, 徐佑德, 刘国生, 王勇生, 谢成龙. 2006. 鄱庐断裂带中-南段走滑构造特征与变形规律[J]. 地质科学, **41**(2): 568–579.
- Zhu G, Xu Y D, Liu G S, Wang Y S, Xie C L. 2006. Structural and deformational characteristics of strike-slippings along the middle-southern sector of the Tanlu fault zone[J]. *Chinese Journal of Geology*, **41**(2): 568–579 (in Chinese).
- 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 严忠琼, 曹小林. 2002. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, **45**(5): 646–663.
- Zhu J S, Cao J M, Cai X L, Yan Z Q, Cao X L. 2002. High resolution surface wave tomography in east Asia and west Pacific marginal seas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **45**(5): 646–663 (in Chinese).
- 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 高德章, 赵风清, 杜杨松, 汪洋. 2005. 中国岩石圈三维结构之七: 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京: 地质出版社: 68–86.
- Zhu J S, Cai X L, Cao J M, Gao D Z, Zhao F Q, Du Y S, Wang Y. 2005. *Series 7 of Monography on the Three-Dimensional Structure of Lithosphere in China: The Three-Dimensional Structure of Lithosphere and Its Evolution in South China and East China Seas*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 68–86 (in Chinese).
- 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[J]. 地球物理学报, **45**(4): 475–482.
- Zhu L B, Xu Q, Chen X F. 2002. Group velocity of Rayleigh wave in Chinese continent and its adjacent seas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **45**(4): 475–482 (in Chinese).
- 朱良保, 熊安丽. 2007. 面波频散测量的频时分析法[J]. 地震地磁观测与研究, **28**(1): 1–13.
- Zhu L B, Xiong A L. 2007. The frequency-time analysis method for surface wave dispersion measurement[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **28**(1): 1–13 (in Chinese).
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, Levinsh A L, Lin F C, Moschetti M P, Shapiro N M, Yang Y J. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. *Geophys J Int*, **169**(3): 1239–1260.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Shapiro N M. 2008. Broadband ambient noise surface wave tomography across the United States[J]. *J Geophys Res*, **113**: B05306. doi:10.1029/2007JB005248.
- 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]. *J Geophys Res*, **111**(B9). doi:10.1029/2005JB003974.
- Derode A, Larose E, Campillo M, Fink M. 2003. How to estimate the Green's function of heterogeneous medium between two passive sensors? Application to acoustic waves[J]. *Appl Phys Lett*, **83**(15): 3054–3056. doi:10.1063/1.1617373.
- Dziewonski A, Bloch S, Landisman M. 1969. A technique for the analysis of transient seismic signals[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **59**(4): 1031–1044.

- Soc Am*, **59**(1): 427–444.
- Gilder S A, Leloup P H, Courtillot V, Chen Y, Coe R S, Zhao X X, Xiao W J, Halim N, Cogné J P, Zhu R X. 1999. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data [J]. *J Geophys Res*, **104**(B7): 15365–15390.
- Herrmann R B, Ammon C J. 2002. *Computer Programs in Seismology*[CP]. St Louis: Department of Earth and Atmospheric Science, St Louis University.
- Kennet B L N, Engdahl E R, Buland R. 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes[J]. *Geophys J Int*, **122**(1): 108–124.
- Levshin A L, Ratnikova L, Berger J. 1992. Peculiarities of surface-wave propagation across central Eurasia[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **82**(6): 2464–2493.
- Lin F C, Ritzwoller M H, Townend J, Bannister S, Savage M K. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand[J]. *Geophys J Int*, **170**(2): 649–666.
- 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[J]. *Geophys J Int*, **173**(1): 281–298. doi:10.1111/j.1365–246X.2008.03720.x.
- Liu X W, Jin Z M, Green H W. 2007. Clinoenstatite exsolution in diopsidic augite of Dabieshan: Garnet peridotite from depth of 300 km[J]. *Am Minera*, **92**(4): 546–552.
- Lobkis O I, Weaver R L. 2001. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field[J]. *J Acoust Soc Am*, **110**(6): 3011–3017. doi:10.1121/1.1417528.
- Luo Y, Xu Y, Yang Y. 2011. Crustal structure beneath the Dabie orogenic belt from ambient noise tomography[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **313**: 12–22.
- Luo Y, Xu Y, Yang Y. 2013. Crustal radial anisotropy beneath the Dabie orogenic belt from ambient noise tomography [J]. *Geophys J Int*, **195**(2): 1149–1164.
- Montagner J P. 1986. Regional three-dimensional structures using long-period surface waves[J]. *Ann Geophys*, **4**(B3): 283–294.
- Okay A I, Xu S T, Sengor A M C. 1989. Geosite from the Dabie Shan eclogites, central China[J]. *Eur J Mineral*, **1**(4): 595–598.
- Okay A I, Sengor A M C, Satn M. 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: The Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China[J]. *Tectonics*, **12**(6): 1320–1334.
- Schimmel M, Paulsen H. 1997. Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weight stacks [J]. *Geophys J Int*, **130**(2): 497–505.
- Shapiro N M, Campillo M. 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlation of the ambient noise[J]. *Geophys Res Lett*, **31**(7): L07614. doi:10.1029/2004GL019491.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, Ritzwoller M H. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise[J]. *Science*, **307**(5715): 1615–1618.
- Snieder R. 2004. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase[J]. *Phys Rev E*, **69**(4). doi:10.1103/PhysRevE.69.046610.
- Tarantola A, Valette B. 1982. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion[J]. *Rev Geophys Space Phys*, **20**(2): 219–232.
- Tarantola A, Nercessian A. 1984. Three-dimensional inversion without blocks[J]. *Geophys J R astr Soc*, **76**(2): 299–306.
- Wang Y. 2006. The onset of the Tan-lu fault movement in eastern China: Constraints from zircon (SHRIMP) and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating[J]. *Terra Nova*, **18**(6): 423–431.
- Weaver R L, Lobkis O I. 2001. Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlation at MHz frequencies[J]. *Phys Rev Lett*, **87**(13): 134301.
- Weaver R L, Lobkis O I. 2004. Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function[J]. *J Acoust*

- Soc Am*, **116**(5): 2731–2734.
- Xu Z Q, Yang W C, Ceng R L. 1998. *Drilling Operations in the Dabie-Sulu UHPM Belts, East China*[R]. Potsdam, Germany: A Proposal to ICDP: 1–68.
- Yang Y J, Ritzwoller M H, Levshin A L, Shapiro N M. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe [J]. *Geophys J Int*, **168**(1): 259–274.
- Yao H J, Xu G M, Zhu L B, Xiao X. 2005. Mantle structure from inter-station Rayleigh wave dispersion and its tectonic implication in western China and neighboring regions[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **148**(1): 39–54.
- Yao H J, van der Hilst R D, de Hoop M. 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis: I. Phase velocity maps[J]. *Geophys J Int*, **166**(2): 732–744. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x.
- Yao H J, van der Hilst R D, Montagner J P. 2010. Heterogeneity and anisotropy of the lithosphere of SE Tibet from surface wave array tomography[J]. *J Geophys Res*, **115**: B12307. doi:10.1029/2009JB007142.
- Zheng Y F, Zhou J B, Wu Y B, Xie Z. 2005a. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: A passive margin accretionary wedge deformed during continent subduction[J]. *Int Geol Rev*, **47**(8): 851–871.
- Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Zhang S B, Xu P, Wu F Y. 2005b. Metamorphic effect on zircon Lu-Hf and U-Pb isotope systems in ultrahigh-pressure eclogite-facies metagranite and metabasite[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **240**(2): 378–400.

## 作者简介



金明培 中国地震局滇西地震预报实验场高级工程师。2007年云南大学固体地球物理专业毕业，获理学硕士学位。长期从事地震监测、预报、实验研究工作；现主要从事接收函数、震源新参数和震源滑动模型等数字地震学方面的研究工作。中国地震学会和云南省地球物理学会会员。



赵旭 中国地震台网中心助理研究员，中国科学院地质与地球物理研究所读博生。2007年中国地震局地震研究所防震减灾与防护工程专业毕业，获硕士学位。曾从事地震波形数据快速处理、地震精定位方法研究以及地球三维速度结构反演方面的研究。现主要从事数字地震学方面的研究工作。美国地球物理学会会员。



刘琦 中国地震局地震预测研究所助理研究员，中国地震局地质研究所构造地质专业在读博士。2007年吉林大学应用地球物理专业毕业，获工学学士学位；2009年吉林大学地球探测与信息技术专业毕业，获工学硕士学位。曾从事应用地球物理学和地震勘探学方面的研究，现主要从事地应变观测与地震关系等方面的研究。欧洲地球科学联合会、中国地震学会和中国地球物理学会会员。



叶庆东 成都理工大学地球探测与信息技术专业博士后。2011年武汉大学固体地球物理专业毕业，获硕士学位；2014年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业，获博士学位。目前主要从事面波成像与微地震定位方面的研究。



张小涛 中国地震台网中心助理研究员。2006年青岛科技大学信息科学技术学院计算机专业毕业，获工学学士学位；2009年中国地震局地震预测研究所固体地球物理专业毕业，获理学硕士学位。现主要从事地震预测新方法的研究。



沈玉松 广东省地震局工程师。2001年中国科学技术大学地球与空间科学学院地球物理专业毕业，获理学学士学位；2012年中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理专业毕业，获博士学位。主要从事地震监测和数字地震资料的分析处理工作，现从事地震震源机制分析、三维区域地震震相走时表及地震定位精度评价等方面的研究。