

王敏玲,陈赟,梁晓峰等. 2015. 华南及南海北部地区瑞利面波层析成像. 地球物理学报, 58(6):1963-1975, doi:10. 6038/cjg20150612.

Wang M L, Chen Y, Liang X F, et al. Surface wave tomography for South China and the northern South China Sea area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(6):1963-1975, doi:10. 6038/cjg20150612.

## 华南及南海北部地区瑞利面波层析成像

王敏玲<sup>1,2</sup>, 陈赟<sup>1\*</sup>, 梁晓峰<sup>1</sup>, 徐逸鹤<sup>1,2</sup>,  
范宇婷<sup>2,3</sup>, 徐涛<sup>1</sup>, 张忠杰<sup>1</sup>, 滕吉文<sup>1</sup>

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国海洋石油总公司, 北京 100010

**摘要** 基于华南及周边地区 106 个宽频带地震台站多年记录的  $M_s \geq 5.0$  中浅源地震事件, 开展瑞利面波层析成像和速度结构特征研究, 获得了华南大陆及南海北部地区 10~100 s 瑞利波群速度分布图像和典型剖面下方地壳上地幔速度结构, 为理解该地区构造演化和深部过程提供约束. 考虑到实际地震射线的覆盖情况以及华南地区主要构造的主体展布特征, 本文同时采用传统的规则网格剖分和平行主要构造走向的非规则网格剖分方法, 分别进行分格频散反演, 开展了不同参数化方案对反演结果影响的对比分析研究. 基于瑞利面波层析成像结果, 进行了典型剖面横波速度结构反演, 重建了华南地区由内陆至南海海域主要构造单元的壳幔横波速度结构. 研究表明, 扬子和华夏块体地壳上地幔结构特征差异显著, 扬子块体地壳和岩石圈厚度均大于华夏地块, 且扬子块体上地幔顶部速度较华夏块体低, 岩石圈厚度在雪峰山造山带下方发生过渡和转换; 南海北部陆缘和南海海盆上地幔速度较高且形态相对完整, 表现为非火山型大陆边缘和已停止扩张海盆的壳幔结构特征.

**关键词** 面波层析成像; 非规则参数化; 地壳和上地幔结构; 雪峰山造山带; 华南; 南海

doi:10. 6038/cjg20150612

中图分类号 P315

收稿日期 2015-03-15, 2015-04-08 收修定稿

## Surface wave tomography for South China and the northern South China Sea area

WANG Min-Ling<sup>1,2</sup>, CHEN Yun<sup>1\*</sup>, LIANG Xiao-Feng<sup>1</sup>, XU Yi-He<sup>1,2</sup>,  
FAN Yu-Ting<sup>2,3</sup>, XU Tao<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-Jie<sup>1</sup>, TENG Ji-Wen<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China

**Abstract** South China is located at the southeastern part of the Eurasia plate, which consists of South China Continent and South China Sea. In tectonics, it mainly includes the Yangtze and Cathaysia blocks, and the South China Sea Basin. Since the Mesoproterozoic, South China has evolved in the dynamic settings of assembly and break-up of the supercontinent, the Southern and Northern continents for a long time. During the Meso-Cenozoic, it suffered influences from the westward subduction of the Pacific plate and the uplift of the Qinghai-Tibet plateau. Due to the

**基金项目** 科技部 973 项目(2014CB440905), 国家自然科学基金(41340040, 41404051)和矿床地球化学国家重点实验室(SKLOGD-ZY125-01)共同资助.

**作者简介** 王敏玲, 女, 在读博士生, 主要从事地震面波和体波成像研究工作. E-mail: wangml0807@gmail.com

\* **通讯作者** 陈赟, 男, 副研究员, 主要从事地球壳幔结构成像与动力学研究. E-mail: yunchen@mail.iggcas.ac.cn

complicated history of its geological evolution, some fundamental questions, such as the location of the convergence boundary between Yangtze and Cathaysia blocks, the origin of the Xuefengshan Orogenic belt, and the rifting type of the northern margin of the South China Sea, etc, are still controversial. Seismic investigations can provide reliable constraints on the tectonic evolution and the deep process.

We carried out a study of surface wave tomography based on seismic waveform data, which were triggered by events of  $M_s \geq 5.0$  with a shallow or moderate focal depth, and recorded by 106 broadband digital stations in South China and surrounding areas. Rayleigh wave group velocity maps at periods from 10 s to 100 s were derived, and a typical profile of S-wave velocity structures, down to a depth of  $\sim 200$  km, was determined.

Considering the actual ray-path coverage and the major tectonic features in South China, we developed an irregular parameterization scheme with slant grid-lines paralleling to the strike of the major tectonic features based on a method of coordinate transformation, besides the traditional gridding scheme with regular grid-lines paralleling to the latitude and longitude. Using the Frequency-Time Analysis method, the group velocity dispersion was firstly measured for ray paths across the study area. And then, the pure dispersion in a grid of  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$  was obtained using a damped least-squares approach. The comparison of the group velocity maps, derived from the regular-gridding and slant-gridding schemes, demonstrates that gridding scheme has certain effects on the detailed shapes of the anomalies in the case of the ray-path coverage of this study.

We extracted the group velocity dispersion and inverted for the S-wave velocity along a typical NW-SE trending profile, which crosses the Yangtze and Cathaysia blocks, and the South China Sea Basin progressively. Both the Rayleigh wave group velocity and the S-wave velocity sections reveal distinct differences of the crust and upper mantle among the major tectonic units in South China. From the mainland to the deep sea in South China, both the crustal and lithospheric thicknesses decrease gradually along the profile, and the lithosphere-asthenosphere boundary depth is sharply changed beneath the Xuefengshan orogenic belt. The velocity at the top of the upper mantle beneath the Cathaysia Block and South China Sea Basin is higher and more intact than that of Yangtze Block, which indicates the tectonic nature of a passive non-volcanic continental margin for the northern margin of South China Sea, and an inactive marginal basin of the South China Sea Basin.

**Keywords** Surface wave tomography; Irregular parameterization; Crustal and upper mantle structure; Xuefengshan orogenic belt; South China; South China Sea

## 1 引言

华南地区位于欧亚大陆东南部,北以秦岭—苏鲁—大别造山带为界与华北克拉通分隔,南以哀牢山—松马缝合带与印支块体分隔,西以龙门山断裂与松潘—甘孜块体相邻,东南临太平洋,主体由扬子和华夏两个地块组成(张国伟等, 2013)(图 1)。新元古代早期(约 900 Ma),扬子和华夏地块完成了两个古陆的拼合,最终拼贴成现在的华南大陆(Chu et al., 2012)。华南地区在早前寒武纪多块体构造演

化的基础上,自中、新元古代以来,长期处于全球超大陆聚散与南北大陆离散拼合的交接转换地带;在现代全球板块构造演化格局中,自中生代以来该区处在全球现今三大重要板块的汇聚拼合部位,遭遇到太平洋板块西向俯冲、青藏高原形成,以及印-澳板块北向差异运动的夹持(张国伟等, 2013)。南海北部大陆边缘作为欧亚大陆向海域的延伸,历经多幕裂陷期、区域热沉降期和晚中新世以来的新构造期等构造演化阶段(Taylor and Hayes, 1983)。自琼东南至台东南发育了一系列陆缘裂陷盆地,岩石圈发生强烈拉伸,地壳厚度由大陆向海洋一侧逐渐

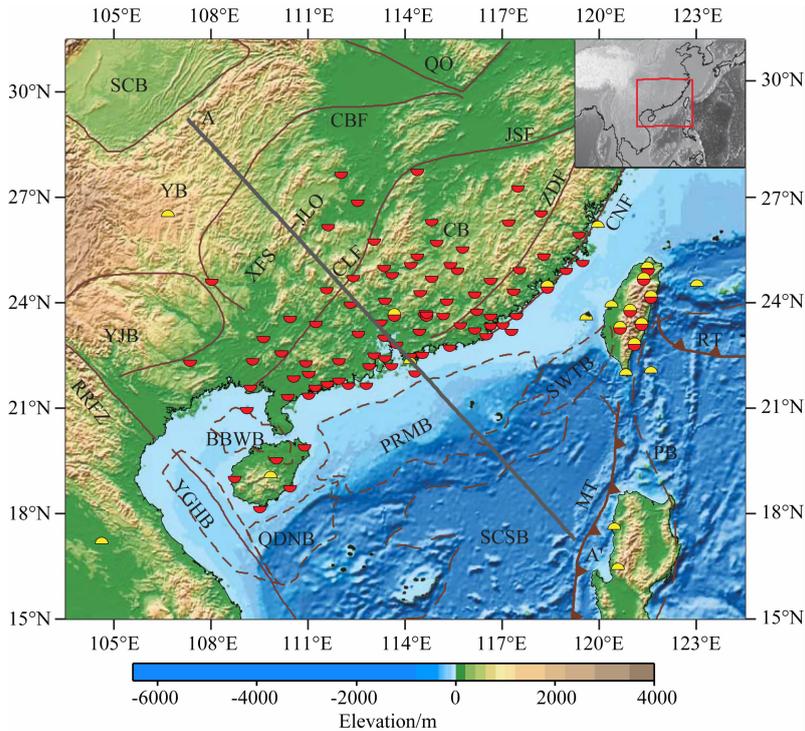


图1 研究区域大地构造背景及台站位置分布图

右上角红色方框表示研究区在东亚地区的位置.地质构造信息参考 Zhou 等(1995); Wang 等(2003); Chu 等(2012). A-A'为图9所示剖面位置.红色半圆:华南地区区域数字地震台站;黄色半圆:IRIS 固定地震台站. SCB: 四川盆地; YJB: 右江盆地; QO: 秦岭造山带; XFS-JLO: 雪峰山—九岭造山带; YB: 扬子块体; CB: 华夏块体; PB: 菲律宾海板块; MT: 马尼拉海沟; RT: 琉球海沟; JSF: 江山—绍兴断裂带; CLF: 郴州—临武断裂带; CBF: 慈利—保靖断裂; ZDF: 政和—大浦断裂带; CNF: 长乐—南澳断裂带; RRFZ: 红河断裂带; YGHB: 莺歌海盆地; BBWB: 北部湾盆地; QDNB: 琼东南盆地; PRMB: 珠江口盆地; SWTB: 台西南海盆; SCSB: 南海海盆.

Fig. 1 Topographic map showing the regional geologic features in South China and the location of the seismic stations used in this study

Geological features are from Zhou et al. (1995); Wang et al. (2003); and Chu et al. (2012). The upper-right inset is a map of the East Asia where the study area is shown by a red rectangle. Line A-A' indicates the location of the profile shown in Fig. 9. Red semicircles indicate the regional digital seismic stations, and yellow semicircles indicate the IRIS seismic stations used in this study. Abbreviations: SCB, Sichuan Basin; YJB, Youjiang Basin; QO, Qinling Orogen; XFS-JLO, Xuefengshan-Jiuling Orogen; YB, Yangtze Block; CB, Cathaysia Block; PB, Philippine Block; MT, Manila Trench; RT, Ryukyu Trench; JSF, Jiangshan-Shaoxing Fault; CLF, Chenzhou-Linwu Fault; CBF, Cili-Baojing Fault; ZDF, Zhenghe-Dapu Fault; CNF, Changle-Nan'ao Fault; RRFZ, Red River Fault Zone; YGHB, Yinggehai Basin; BBWB, Beibuwan Basin; QDNB, Qiongdongnan Basin; PRMB, Pearl River Mouth Basin; SWTB, Southwest Taiwan Basin; SCSB, South China Sea Basin.

减薄(Ru and Pigott, 1986; Hayes and Nissen, 2005; 张中杰等, 2009; 2010). 由于构造演化历史复杂, 迄今对扬子和华夏地块的西南段分界、雪峰山造山带(或江南造山带)的构造属性(Wang et al., 2003; 饶家荣等, 2012; 张国伟等, 2013; Zhao, 2015), 以及南海北部大陆边缘的张裂类型(Ru and Pigott, 1986)等尚存在较大争议, 地震学成像结果可为上述基本科学问题提供相对可靠的深部约束.

面波通常是远震记录中能量最强的部分, 其携带着丰富的地壳上地幔结构信息. 面波具有频散特性, 不同周期的面波具有不同的穿透深度; 同时, 面

波可在全球任何大陆或洋底传播, 可以有效克服高山、沙漠、海域等特殊地区布设地震台站的困难. 因此, 利用面波资料研究大陆和海域的壳幔速度和分层特征具有独特优势. 迄今为止, 已有众多学者利用面波资料重建华南地区地壳上地幔结构(刘建华等, 1996; 郑月军等, 2000; 滕吉文等, 2001; 朱良保等, 2002; Huang et al., 2003; Zhou et al., 2012), 这些研究工作促进和加深了我们对华南壳幔结构及动力学过程的认识. 但由于早期地震台站分布稀疏, 且多为模拟地震记录, 可供利用的基础数据的数量与质量有限; 另外, 基于当时条件下的数据积累程

度、科学目标和研究区范围、乃至不同研究结果之间均存在不同程度的差异. 近年来, 随着我国区域地震台网的不断建设和完善 (刘瑞丰等, 2008), 以及大量宽频带临时台阵的布设, 从根本上提高了可供利用的地震资料的数量和质量, 为进一步聚焦某些基本科学问题, 开展相应的面波成像研究提供了有利条件.

为此, 在综合利用广东、福建、台湾和南海周边 (菲律宾、越南) 固定地震台站数据的基础上, 我们开展了华南大陆及南海北部地区瑞利面波层析成像研究, 通过重建典型剖面下方地壳上地幔速度结构, 为认识和理解华南地区深部结构特征和构造演化提供地震学依据.

## 2 数据和方法

### 2.1 基本数据

本文所利用的基础数据涉及 106 个宽频带数据地震台站 (图 1), 其中包括华南地区 94 个区域数字地震台站记录的 2007 年 1 月至 2010 年 12 月的波形数据, 以及 21 个 IRIS 固定地震台站记录的 1992 年 1 月至 2012 年 4 月的波形数据.

为了获得信噪比较高、发育良好的面波信号, 经筛选的 1421 个地震事件均满足  $M_s \geq 5.0$ 、震源深度  $< 100$  km 等基本条件. 研究区射线路径覆盖密度较高, 绝大部分周期 (10~80 s) 射线路径数目超过 1200 条, 20~30 s 周期对应的射线路径数目达到 ~4500 条 (图 2), 为研究地壳上地幔结构提供了基本数据保障. 所选事件对应震中距范围为 500~3500 km, 平均射线路径长度约 2000 km, 与选定的研究区 (105°E—123°E, 16.5°N—30°N) 尺度相当 (图 3). 华南区域数字地震台网所记录到的事件, 震源参数来自中国地震台网中心 (CDSN) 发布的地震

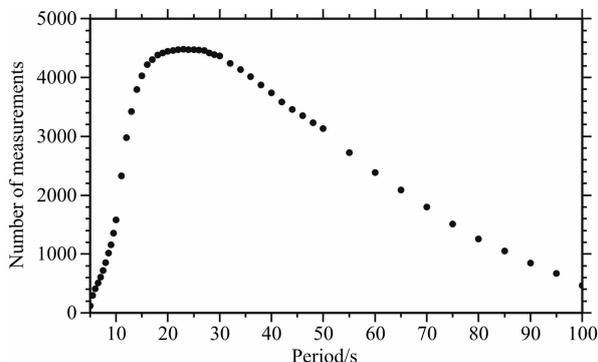


图 2 不同周期对应的射线路径数目

Fig. 2 Number of ray path for different periods

目录; 而 IRIS 台站记录到的事件, 震源参数来自美国地质调查局/国家地震信息中心 (USGS/NEIC) 发布的地震目录. 部分周期 (14 s、25 s、40 s、60 s) 对应的瑞利面波射线覆盖情况如图 3 所示.

### 2.2 混合路径频散拾取

我们采用时频分析 (FTAN) 方法获得混合路径频散曲线 (即特定射线路径对应的、不同周期面波的传播速度). 具体利用美国圣路易斯大学 Herrmann (2002) 教授开发的地震学代码 (CPS) 中包含的时频分析软件 (DO\_MFT) 逐一进行每条路径群速度频散曲线拾取. 图 4 展示的是广州台 (GZH) 记录的某个远震事件对应的基阶瑞利波群速度频散曲线.

### 2.3 纯路径频散反演

如果把研究区分成具有一定几何形状的网络单元, 则面波路径是由地震射线在一系列网络单元内的截距组成, 分格频散反演的目的就是由混合路径频散反演获得每个网络单元的频散, 即纯路径频散. 本文利用基于阻尼最小二乘算法的分格频散反演方法进行瑞利波群速度层析成像 (Chen et al., 2010). 考虑到各周期射线覆盖的总体情况, 并通过检测板测试, 选定  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$  作为网格划分的单元尺寸; 阻尼因子为 0.3 左右, 迭代收敛残差小于  $0.01 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 3 不同网格划分方法的影响

分格频散反演过程中, 一般采用平行于地球经纬线的方式将研究区划分为均匀大小的网格单元; 还可根据地震射线对不同网格单元的实际覆盖情况, 进一步对射线覆盖稀疏的相邻网格单元进行合并, 以保证网格单元内部的射线覆盖密度, 从而保证反演结果的可靠性. 平行经纬网的规则网格划分方法, 与地球经纬度坐标系保持一致, 可以带来诸多计算和处理上的方便; 但在实际数据处理过程中, 可能因为人为对研究区的大尺度均匀分格, 造成不同块体速度和结构特征差异上的人为平均. 这种参数化过程中人为引入的平均效应在重要的块体边界或块体内部主要构造分界部位影响会更加明显. 在先验地质构造信息的指导下, 采用一定形式的非规则参数化方法, 可以在一定程度上克服这种参数化过程中人为引入的平均效应, 从而有利于对块体边界或主要构造边界的辨识. 我国华南地区, 特别是华夏块体内部的主要构造形迹, 总体呈现 NNE-SSW 走向 (图 1). 为此, 本文在模型参数化过程中采用两种网

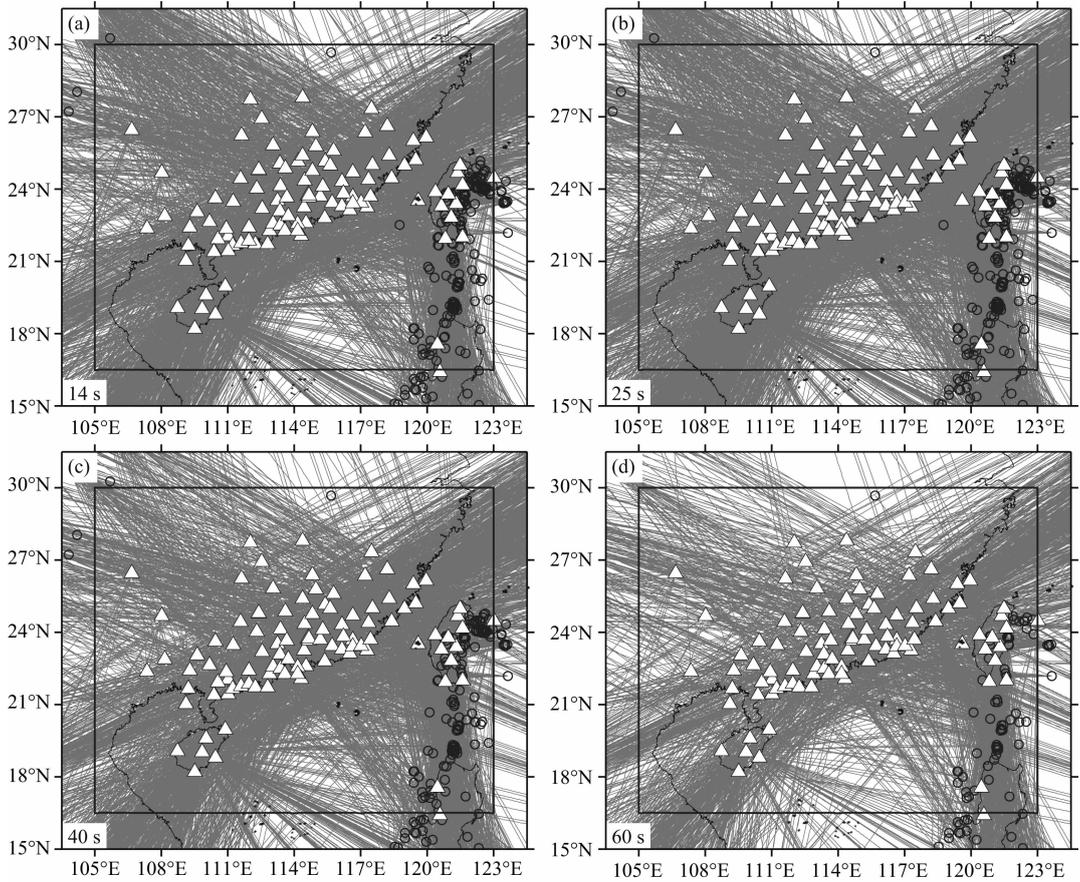


图3 部分周期对应的面波射线路径覆盖情况(白色三角代表地震台站,黑色圆圈代表地震事件)  
 (a)周期 14 s, 3846 条路径;(b)周期 25 s, 4474 条路径;(c)周期 40 s, 3737 条路径;(d)周期 60 s, 2388 条路径。

Fig. 3 Ray-path coverage at several periods

(a) 3846 paths at period of 14 s; (b) 4474 paths at period of 25 s; (c) 3737 paths at period of 40 s; (d) 2388 paths at period 60 s.

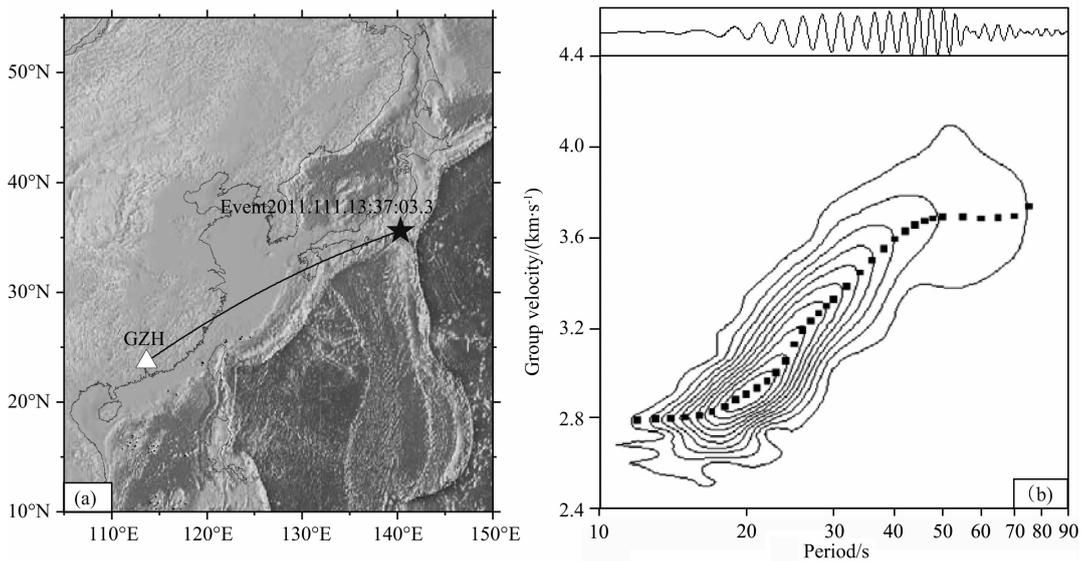


图4 广州台(GZH)记录到的某个远震事件对应的瑞利波频散(基阶)  
 (a)台站-震源位置(震源位于东经 140.305°E,北纬 35.579°N,震源深度为 43 km,发震时间为国际标准时间 2011 年 4 月 21 日 13 h:37 m:03.300,震中距为 2886 km);(b)基阶瑞利波群速度频散曲线。

Fig. 4 An example of the fundamental mode Rayleigh-wave group velocity measurement

(a) Station-epicenter location (The earthquake location is 35.579°N, 140.305°E, and the focal depth is 43 km. The epicentral distance is 2886 km. The earthquake initiated at 13 h:37 m:03.300 s GMT on 21 April 2011); (b) Relative energy contour map as derived from the spectral amplitude-display obtained by the multiple filter technique. The vertical-component waveform recorded at station GZH is shown at the top.

格剖分方案,即传统的平行经纬网的规则网格、平行于 NNE-SSW 向主要构造线走向的非规则网格(斜网格),分别对研究区进行网格剖分;在此基础上,进行了不同周期的分格频散反演,最终获得不同参数化方案下的瑞利波群速度图像。

### 3.1 非规则网格参数化方法

考虑到华南地区主要构造的展布特征,我们采用平行于主构造走向的模型参数化方案.为计算方便起见,只需采用坐标变换的方法,将经纬度坐标系下的非规则网格(斜网格)变换为新坐标系下的规则网格,在新坐标系下进行规则网格反演,之后再每个网格节点反变换回原坐标系即可。

坐标变换步骤如下:

#### (1) 球坐标系变换为直角坐标系

假定  $A$  为原球坐标系下某倾斜网格的中心点,  $(r, \theta, \varphi)$ 、 $(x, y, z)$  分别是  $A$  点的球坐标和直角坐标表示,利用公式(1)将球坐标系转换为直角坐标系:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \theta \cos \varphi \\ r \sin \theta \sin \varphi \\ r \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (1)$$

#### (2) 直角坐标系下的坐标轴旋转

首先是绕  $z$  轴的旋转,即

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

然后是绕  $y$  轴的旋转,公式如下:

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_0 & 0 & -\sin \theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_0 & 0 & \cos \theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos \theta_0 & 0 & -\sin \theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_0 & 0 & \cos \theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (3)$$

#### (3) 直角坐标系反变换为球坐标系

将旋转后的直角坐标系,再变换为新的球坐标,公式如下:

$$\begin{pmatrix} r'' \\ \theta'' \\ \varphi'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(x''^2 + y''^2 + z''^2)} \\ \arccos\left(\frac{z''}{r''}\right) \\ \arctan\left(\frac{y''}{x''}\right) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中  $A''$  是  $A$  变换到新球坐标系的点,  $(r'', \theta'', \varphi'')$ 、 $(x'', y'', z'')$  分别是  $A''$  的球坐标、直角坐标表示.假设原坐标系下的北极点为  $N_1(r_0, 0, 90)$ , 经过上述

两次坐标旋转,得到了以  $N_2(r_0, \theta_0, \varphi_0)$  为北极点的新的球坐标系,在新坐标系下原来的非规则网格已退化为规则网格。

### 3.2 不同网格参数化方法的影响

理论上,在射线覆盖密度足够密集、方位足够均匀的情况下,只要网格单元大小合适,反演的结果并不会依赖于网格剖分的规则性.但在实际研究工作中,射线覆盖往往不够密集、射线方位也远不够均匀;这种情况下,不同的网格剖分方案不仅会在形式上表现出网格单元内部射线覆盖密度的变化,而且也会影响到数据对模型的分辨能力。

根据地震射线对研究区的实际覆盖情况,以及研究区本身的几何尺度、射线路径的长度(陈赞, 2007),采用  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$  网格大小对研究区进行剖分.为了检验基于当前射线覆盖条件下,基本数据和反演方法对模型的分辨能力,进行了相应的检测板测试。

图 5 展示了两种不同网格划分方案对应的部分周期瑞利波射线路径在网格单元内部的覆盖情况.从图中可以直观看出,华南陆缘地带射线覆盖密度相对较高(25 s 周期单个网格单元覆盖次数可平均达到  $\sim 700$  次,50 s 周期单个网格单元覆盖次数可平均达到  $\sim 500$  次);且两种不同的网格剖分方案,对单个网格单元射线覆盖次数的影响并不明显,间接反映了本文所选用网格单元尺寸的适用性。

图 6 给出了两种不同网格划分方案对应的检测板测试结果(周期为 40 s).所给理论模型的平均速度为  $3.45 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,异常幅度范围为  $\pm 7\%$ .从图中可以直观看出,无论采用哪种网格划分方案,整个研究区均能得到较好的分辨;但采用非规则划分方案反演所得到的结果,在东南陆缘地带的分辨能力更强,且具较高分辨能力的网格分布面积更大,基本涵盖了整个华南陆缘地带.上述测试结果,不仅进一步说明了本文所选用网格单元尺寸的适用性,也说明了采用平行主构造线走向的网格划分方案,在减小参数化过程中人为引入的平均效应、提高主要构造边界分辨能力方面具有一定的实际效果。

## 4 华南地区群速度图像

本文利用分格频散反演方法计算获得每个网格单元的纯路径频散后,对同一周期面波频散在不同网格单元的群速度进行插值,最终得到研究区不同周期的群速度图像(图 7).纯路径频散是基于混合

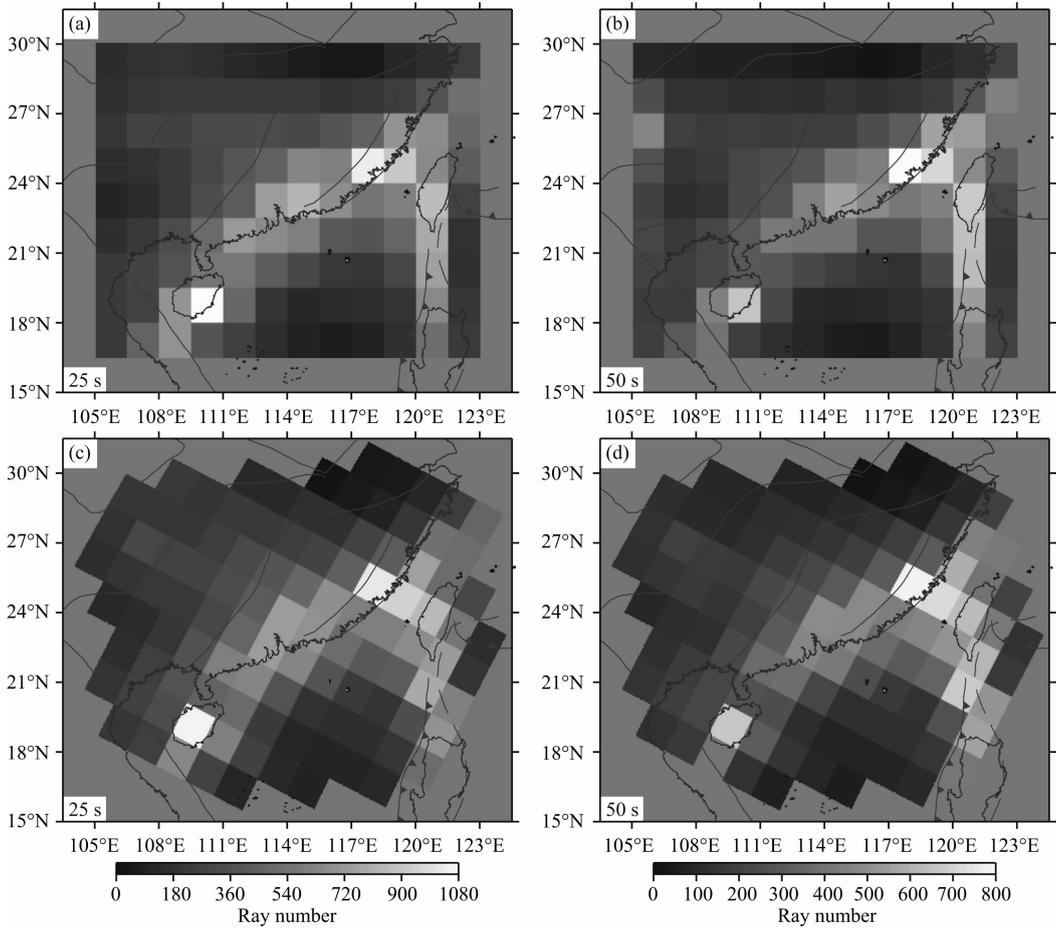


图 5 周期为 25 s、50 s 的射线覆盖密度(a, b 对应规则网格, c, d 对应非规则网格)

Fig. 5 Ray coverage at periods of 25 s and 50 s for Rayleigh waves propagating along the great-circle paths across the study area. At the top, maps show the hit-counts of the ray paths at periods of 25 s (a) and 50 s (b) within regular cells with size of  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ . At the bottom, maps show the hit-counts at period of 25 s (c) and 50 s (d) within irregular cells.

路径频散直接反演得到的结果, 是利用面波资料重建地球壳幔结构的首要环节; 相对后续的速度结构反演而言, 是所谓“二步法”反演中的第一步, 因而具有较高的可靠性(朱良保等, 2002). 某一周期的群速度图像反映的是某一深度范围内地球介质物性(主要包括波速、密度)和结构(主要包括界面)的横向变化响应, 它所呈现的横向不均匀性以及随周期变化所呈现的纵向变化特征, 对主要构造边界分布和块体深部结构构造研究有着重要的参考价值.

#### 4.1 敏感核函数的计算

某一周期的群速度所对应物性与结构变化响应的深度范围, 可以通过计算该地区的敏感核函数(sensitivity kernel)得到评估. 基于华南地区的平均速度模型(图 8a 所示)(黄忠贤和胥颐, 2011), 本文计算了基阶瑞利面波的群速度敏感核函数(如图 8b 所示). 由图 8b 可知, 不同周期面波群速度频散对不同深度范围的横波速度结构反应敏感. 就本文所利

用的周期范围(10~100 s)而言, 小于 40 s 周期频散即可保证对于整个地壳的良好分辨; 最长周期 100 s 的敏感范围可达到 200 km 深度, 可靠分辨接近 180 km 深度, 从而总体上可保证对华南地区地壳和岩石圈尺度结构的较好分辨.

#### 4.2 不同网格化方法对群速度图像的影响

对比两种不同网格化方法所对应的群速度图像(图 7), 可以发现不同的网格化方法对最终的反演结果产生了一定的影响. 特别是中短周期图像所对应的海陆过渡部位, 通过对比 14 s 周期图像(图 7a, f)中的低速异常形态, 以及 25 s 周期图像(图 7b, g)中的高速异常的形态, 可以发现两种网格化方法反演的结果之间存在较明显的差异. 其中, 倾斜网格划分对应的反演图像异常的形态相对连续, 且与浅表地质构造形态较为一致. 因此, 对比结果表明: 一方面, 在本文所能利用的射线覆盖条件下, 采用平行主要构造走向的网格划分方法对反演结果能够起到

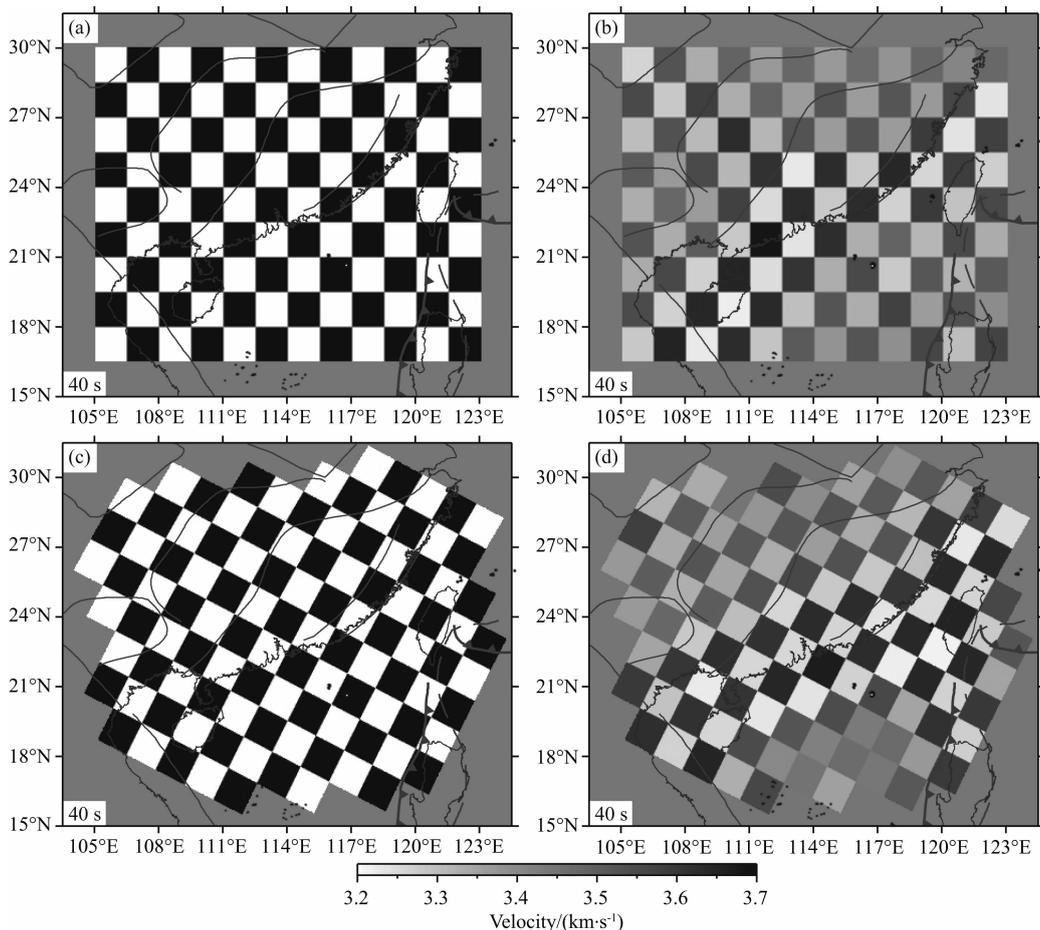


图6 周期 40 s 射线覆盖条件下的检测板试验结果(左侧为输入模型,右侧为反演结果; a, b 对应规则网格, c, d 对应非规则网格. 理论模型的平均速度为  $3.45 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 异常幅度范围为  $\pm 7\%$ )

Fig. 6 Checkerboard tests performed for ray paths crossing the study area. The model is gridded by  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ -size cells with  $\pm 7\%$  velocity perturbations based on a mean velocity  $3.45 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  for 40 s Rayleigh waves. At the left, maps show the initial models for regular (a) and irregular (c) cells. At the right, maps show the inverted models for regular (b) and irregular (d) cells

一定的改善作用;另一方面,在射线覆盖不尽理想、网格划分尺寸较大的情况下,应当注意不同的模型参数化方案对反演结果可能带来的潜在影响,关于异常体形态的讨论需谨慎对待。

#### 4.3 群速度分布特征

短周期(14 s)瑞利波群速度图像(图 7a, f)主要受中上地壳,尤其是沉积层的影响,反映的主要是地壳浅部的速度结构特征。南海北部陆缘盆地(如莺歌海盆地、北部湾盆地、珠江口盆地等)均表现为明显的低速异常,四川盆地南缘也显示为低速异常,而位于扬子块体西南缘的右江盆地却没有明显异常显示,意味着上述显示为明显低速异常的陆缘盆地和陆内盆地沉积层厚度很大,而右江盆地的沉积层厚度要远远小于这些显示低速异常的盆地。除上述陆缘盆地外,整个陆缘地带也整体显示较低速度,而扬

子块体和南海海盆对应明显的高速异常。

中等周期(25 s)的群速度图像(图 7b, g)主要受中下地壳横波速度和地壳厚度的影响,其主要特征表现为扬子块体低速、华夏块体速度中等、陆缘地带及南海海盆高速;扬子块体内部,西侧较东侧速度低。总体上体现了自北西向东南由内陆向深海区过渡,不同构造单元地壳厚度对中等周期群速度的影响特征(Huang et al., 2003; Zhou et al., 2012)。

40 s 周期的群速度图像(图 7c, h),主要受下地壳和上地幔顶部速度的影响,图中的扬子块体西南缘仍显示明显的低速,指示扬子块体西南缘地壳厚度相对较厚,群速度响应仍主要局限于中下地壳层次;而南海北部高速区不断向北延伸,意味着该周期群速度响应已来自上地幔顶部。

大于 60 s 周期的群速度图像,主要受岩石圈地

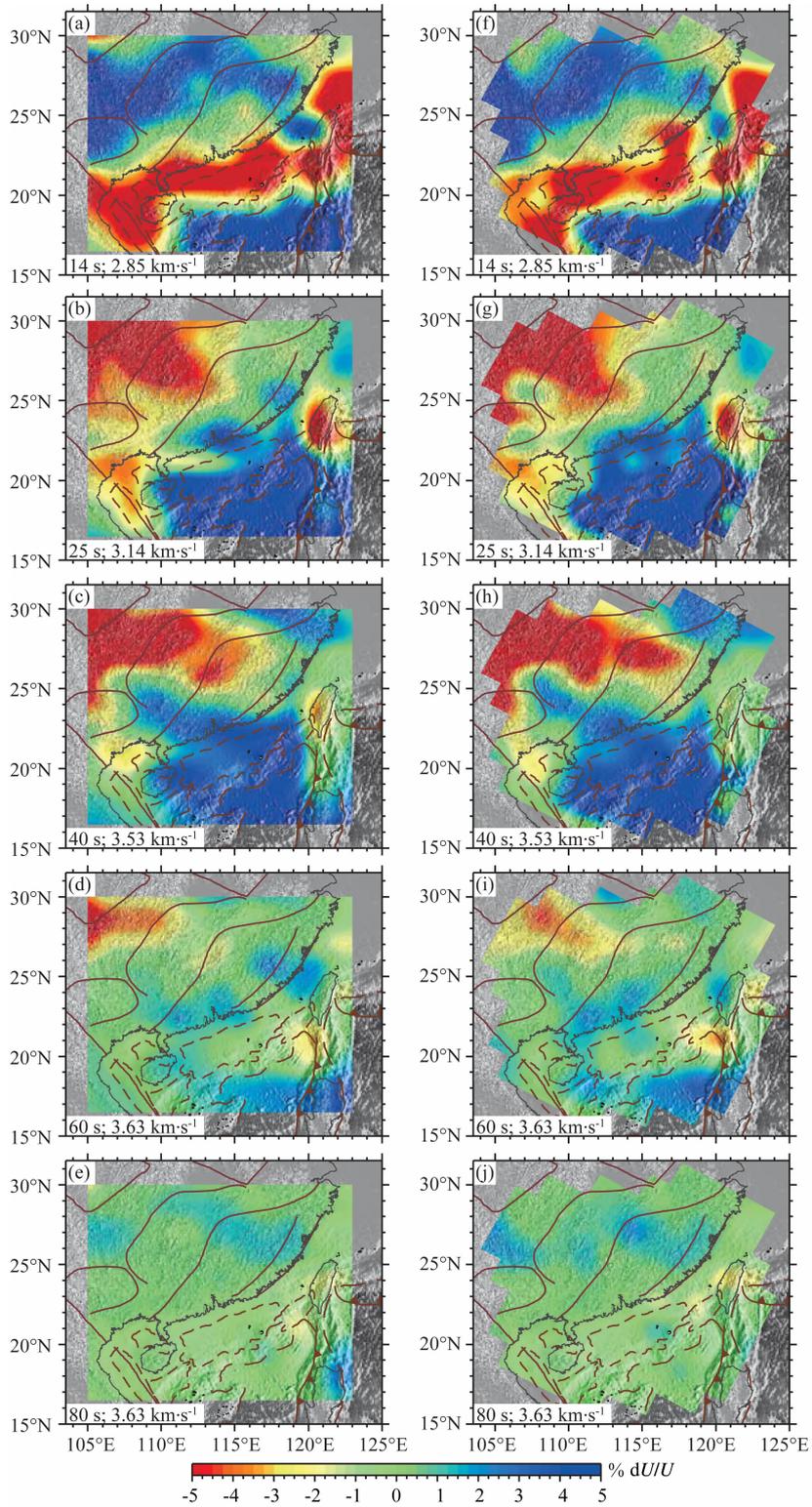


图 7 两种不同参数化方案对应的瑞利波群速度分布图像(左列对应规则网格,右列对应倾斜网格)

Fig. 7 Rayleigh wave group velocity maps at several periods. In all cases the reference period and the mean velocity are given in the bottom-left corner of each plot. At the left, maps indicate the group velocity inverted with regular cells. At the right, maps indicate that with irregular cells

慢速度的影响。其中,60 s 周期的图像(图 7d, i),大部分地区均显示高速,尤其是南海海盆的高速仍清

晰可辨;但 80 s 周期的图像(图 7e, j),仅扬子和华夏部分地区显示高速,意味着显示高速的地区岩石

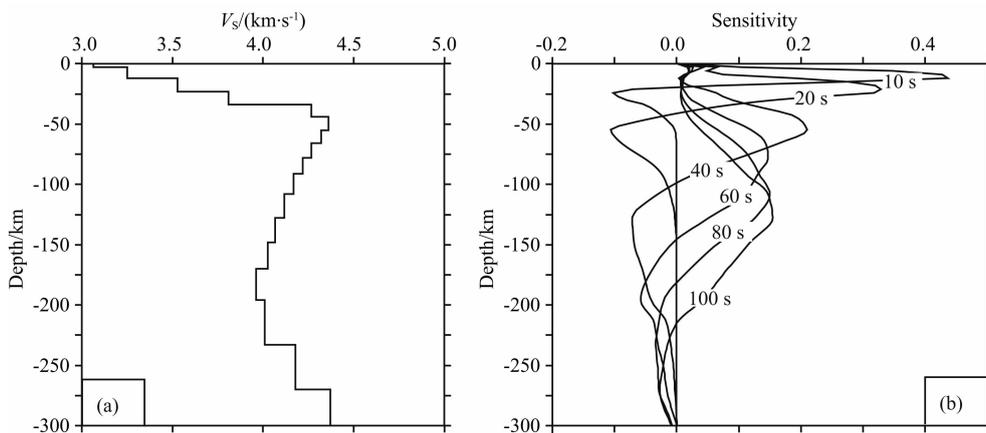


图 8 华南地区基阶瑞利面波群速度敏感核函数 (图 a 为华南地区平均速度模型, 图 b 为敏感核函数)

Fig. 8 Sensitivity kernels (b) of Rayleigh-wave group velocity based on the averaged velocity model (a) for South China

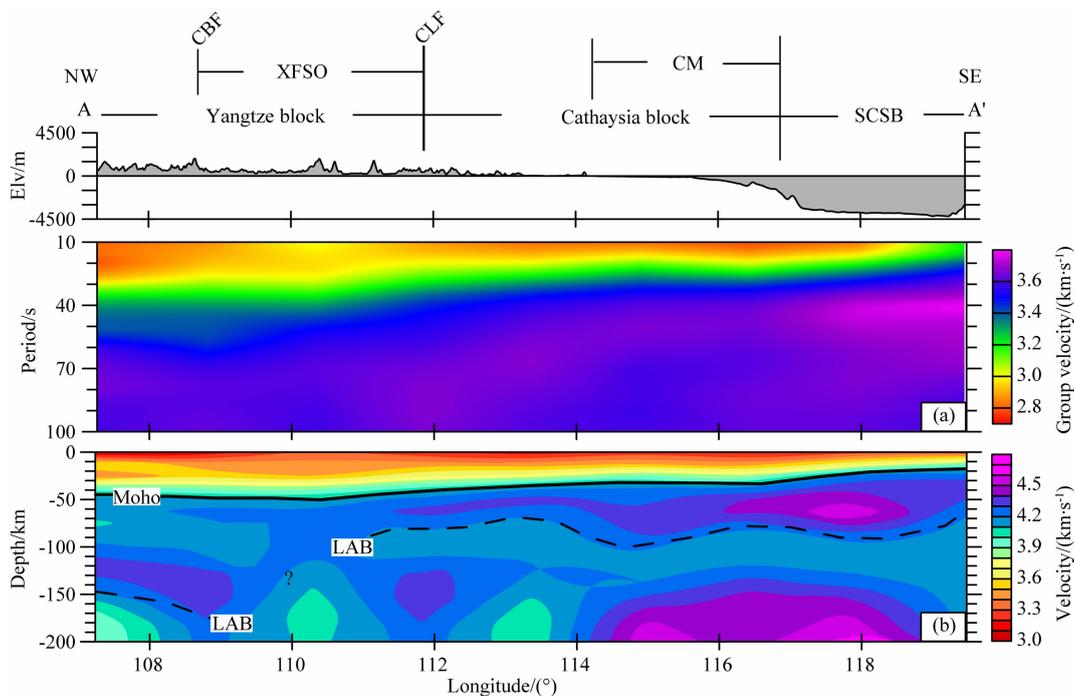


图 9 华南地区内陆至海域地壳上地幔结构特征

(a) 群速度; (b) 横波速度结构. 其中, A 点坐标为 (107.25°E, 29.25°N); A' 点坐标为 (119.25°E, 17.25°N), 具体剖面位置参见图 1. CBF: 慈利-保靖断裂; CLF: 郴州-临武断裂; XFSO: 雪峰山造山带; CM: 南海北部大陆边缘; SCSB: 南海海盆.

Moho: 壳幔边界; LAB: 岩石层-软流层边界.

Fig. 9 The crustal and upper mantle structure along the profile A-A' in South China

(a) Group velocity; (b) Shear wave velocity. The location of the profile A-A' is shown in Fig. 1. Abbreviations: CBF, Cili-Baojing Fault; CLF, Chenzhou-Linwu Fault; XFSO, Xuefengshan orogenic belt; CM, Continental margin of South China Sea; SCSB, South China Sea Basin; Moho, Crust-Mantle boundary; LAB, Lithosphere-Asthenosphere boundary.

圈厚度相对较厚.

## 5 华南地区壳幔结构特征

为便于系统揭示华南地区内陆-大陆边缘-南海海盆的地壳上地幔结构特征, 本文在研究区主体部位沿北西-南东向 (A-A', 如图 1 所示), 依次跨扬子、

华夏地块及南海海盆截取群速度剖面 (如图 9a 所示); 基于迭代最小二乘反演方法 (Herrmann, 2002; Chen et al., 2010) 进行了速度结构反演, 获得了沿剖面地壳上地幔横波速度结构 (如图 9b 所示). 在具体反演过程中, 参考 CRUST 1.0 (Laske et al., 2013) 给定地壳初始速度模型; 而上地幔初始速度模型, 则参考 PREM 模型 (Dziewonski and Anderson, 1981)

给出。

沿 A-A' 剖面, 群速度分布呈现明显的层次性(如图 9a 所示)。自北西至南东, 较低速度( $<3.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )持续的周期长度逐渐减小, 扬子块体内部对应 50 s, 华夏块体内部对应约 30 s, 南海海盆对应约 10 s。较高速度( $>3.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )持续的周期长度却呈现相反的变化趋势, 扬子块体内部对应 60~80 s, 华夏块体内部对应 40~70 s, 而在南海海盆对应 30~80 s。总体上, 南海海盆对应的群速度最高, 华夏块体次之, 扬子块体对应的群速度最低。

与群速度分布特征相适应, 横波速度结构进一步揭示了不同块体壳幔结构特征之间的差异性。考虑到本文所拾取的群速度频散的周期范围以及分辨核函数所揭示的相应分辨能力(图 8b 所示), 本文显示速度结构剖面深度仅至 200 km, 且主要讨论 ~180 km 以浅的主要速度结构特征, 并依此勾勒出沿剖面地壳和岩石圈厚度变化(如图 9b 所示)。自北西至南东, 由内陆向深海区过渡, 主要特征如下:

(1) 地壳厚度减薄: 扬子块体近 50 km—华夏块体约 30 km—南海海盆约 15 km。

(2) 岩石圈-软流层边界(LAB)的深度总体变浅: 扬子块体大于 150 km—华夏块体 80~100 km—南海海盆 90~50 km。在雪峰山造山带(XFSO)下方, 岩石圈厚度发生过渡和转换。

(3) 扬子块体上地幔顶部速度较低, 华夏块体上地幔速度较高, 南海海盆上地幔速度最高。

扬子和华夏地块是构成华南大陆主体的一级构造单元。Zhao(2015)认为, 新元古代早期(825~750 Ma), 在扬子和华夏古板块碰撞和拼合过程中, 两个古板块之间的大洋板块发生双向离散俯冲, 最终形成雪峰山造山带(江南造山带)。张国伟等(2013)认为, 华南大陆构造中最为引人注目特征之一是早古生代华南大陆东部的陆内造山和西部克拉通的并行演化体制, 而雪峰山造山带恰恰位于这两种体制发生过渡和转换的关键部位。扬子和华夏块体的地壳上地幔结构特征, 特别是岩石圈/软流层边界(LAB)在雪峰山造山带下方发生过渡和转换, 正是上述两种演化体制相互作用的结果。

此外, 南海北部陆缘盆地和南海海盆下方上地幔顶部速度较高, 且异常形态相对完整, 说明上述陆缘裂陷盆地下方不存在深部物质上涌的迹象, 张裂作用仅限于地壳浅部, 体现了非火山型大陆边缘和已停止扩张的洋盆的特点(Taylor and Hayes, 1983; 胥颐等, 2007; Li et al., 2009)。

值得说明的是, 尽管在华夏块体及南海海盆下方还存在较明显的高速区域, 但由于本文资料对该深度结构分辨能力有限, 为避免过度解释, 故对该特征及可能的动力学意义不做解读。

## 6 结论

本文基于华南及周边地区宽频带数字地震台站, 开展了面波层析成像和壳幔速度结构特征研究。根据华南地区主要构造的走向特征, 提出了一种平行主要构造走向的模型参数化方案。对比基于两种不同网格化方案获得的华南地区瑞利波群速度成像结果, 表明在本文所利用的射线覆盖条件下, 不同的模型参数化方案对总体的速度异常分布特征影响不大, 但是对异常的具体形态会有影响。因此, 在射线覆盖有限、网格剖分尺寸较大的情况下, 针对某些异常体形态的讨论过程中, 需考虑到不同模型参数化方案对反演结果带来的潜在影响。

瑞利波群速度图像及横波速度结构反演结果揭示了扬子、华夏、南海北部陆缘及南海海盆等典型构造部位壳幔速度结构与分层特征之间的差异。扬子和华夏块体壳幔结构特征差异显著, 扬子块体地壳和岩石圈厚度均大于华夏地块, 扬子地块上地幔顶部速度较低, 且在雪峰山造山带下方岩石圈厚度发生过渡和转换; 南海北部陆缘地带和南海海盆上地幔速度较高且形态相对完整, 表现为非火山型大陆边缘和已停止扩张海盆的壳幔结构特征。

**致谢** 感谢云南大学胡家富教授、广东省地震局, 以及 IRIS 数据中心在基本数据收集、整理方面提供的帮助, 以及褚杨博士在华南区域地质构造背景方面提供的支持和讨论。感谢两位匿名评审专家提供的建设性修改意见。

## References

- Chen Y, Badal J, Hu J F. 2010. Love and rayleigh wave tomography of the Qinghai-Tibet Plateau and surrounding areas. *Pure and Applied Geophysics*, 167(10): 1171-1203. doi: 10.1007/s00024-009-0040-1.
- Chen Y. 2007. Shear-wave velocity and anisotropy structure beneath Qinghai-Tibet Plateau and its imprint for the deformation of the crust and upper mantle [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Chinese Academy of Sciences.
- Chu Y, Faure M, Lin W, et al. 2012. Early Mesozoic tectonics of the South China block: Insights from the Xuefengshan intracontinental orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61:

- 199-220, doi: 10.1016/j.jseaes.2012.09.029.
- Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4): 297-356, doi: 10.1016/0031-9201(81)90046-7.
- Hayes D E, Nissen S S. 2005. The South China Sea margins: Implications for rifting contrasts. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3-4): 601-616, doi: 10.1016/j.epsl.2005.06.017. T
- Herrmann R B. 2002. Computer Programs in Seismology (version 3.30). Missouri: St. Louis University.
- Huang Z X, Su W, Peng Y J, et al. 2003. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 108(B2), doi: 10.1029/2001jb001696.
- Huang Z X, Xu Y. 2011. S-wave velocity structure of south China Sea and surrounding regions from surface wave tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(12): 3089-3097, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.010.
- Laske G, Masters G, Ma Z, et al. 2013. Update on CRUST1.0-A 1-degree global model of Earth's crust. *Geophysical Research Abstracts*, 15, Abstract EGU 2013-2658.
- Li Z W, Xu Y, Hao T Y, et al. 2009. P wave velocity structure in the crust and upper mantle beneath northeastern South China Sea and surrounding regions. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 252-260.
- Liu J H, Wu H, Liu F T. 1996. Features of 3-D velocity distribution and lithosphere structure in south China and its contiguous sea area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 39(4): 483-492, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.1996.04.006.
- Liu R F, Gao J C, Chen Y T, et al. 2008. Construction and development of digital seismograph networks in China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 30(5): 533-539, doi: 10.3321/j.issn:0253-3782.2008.05.012.
- Rao J R, Xiao H Y, Liu Y R, et al. 2012. Location of the Yangtze-Cathaysia plate convergence zone in Hunan. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 55(2): 484-502, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.012.
- Ru K, Pigott J D. 1986. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin-American Association of Petroleum Geologists*, 70(9): 1136-1155.
- Taylor B, Hayes D E. 1983. Origin and history of the South China Sea basin. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*, Part 2: 23-56, doi: 10.1029/GM027p0023.
- Teng J W, Zhang Z J, Hu J F, et al. 2001. The rayleigh wave dispersion and three dimensional velocity structure in continent and its margin of Southeast China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 44(5): 663-677, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2001.05.010.
- Wang Y J, Fan W M, Guo F, et al. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China; Implications for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks. *International Geology Review*, 45(3): 263-286, doi: 10.2747/0020-6814.45.3.263.
- Xu Y, Li Z W, Hao T Y, et al. 2007. Pn wave velocity and anisotropy in the northeastern South China Sea and adjacent region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 50(5): 1473-1479, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2007.05.023.
- Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, et al. 2013. Tectonics of South China continent and its implications. *Science China: Earth Sciences*, 56(11): 1804-1828, doi: 10.1007/s11430-013-4679-1.
- Zhang Z J, Liu Y F, Zhang S F, et al. 2009. Crustal P-wave velocity structure and layering beneath Zhujiangkou-Qiongdongnan basins, the northern continental margin of South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(10): 2461-2471, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.005.
- Zhang Z J, Liu Y F, Zhang S F, et al. 2010. The depth-dependence of crustal extension beneath Qiongdongnan basin area and its tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(1): 57-66, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.007.
- Zhao G C. 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction. *Gondwana Research*, 27(3): 1173-1180, doi: 10.1016/j.gr.2014.09.004.
- Zheng Y J, Huang Z X, Liu F T, et al. 2000. Rayleigh wave velocity and structure of the crust and upper mantle beneath the seas in Eastern China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 43(4): 480-487, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2000.04.008.
- Zhou D, Ru K, Chen H Z. 1995. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. *Tectonophysics*, 251(1-4): 161-177, doi: 10.1016/0040-1951(95)00018-6.
- Zhou L Q, Xie J Y, Shen W S, et al. 2012. The structure of the crust and uppermost mantle beneath South China from ambient noise and earthquake tomography. *Geophysical Journal International*, 189(3): 1565-1583, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05423.x.
- 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, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2002.04.005.

## 附中文参考文献

- 陈赞. 2007. 青藏高原横波速度与各向异性结构及其壳幔形变印迹 [博士论文]. 北京: 中国科学院研究生院.
- 黄忠贤, 胥颐. 2011. 南海及邻近地区面波层析成像和 S 波速度结构. *地球物理学报*, 54(12): 3089-3097, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.010.
- 刘建华, 吴华, 刘福田. 1996. 华南及其海域三维速度分布特征与岩石层结构. *地球物理学报*, 39(4): 483-492, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.1996.04.006.
- 刘瑞丰, 高景春, 陈运泰等. 2008. 中国数字地震台网的建设与发

- 展. 地震学报, 30(5): 533-539, doi: 10.3321/j.issn:0253-3782.2008.05.012.
- 饶家荣, 肖海云, 刘耀荣等. 2012. 扬子、华夏古板块会聚带在湖南的位置. 地球物理学报, 55(2): 484-502, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.012.
- 滕吉文, 张中杰, 胡家富等. 2001. 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, 44(5): 663-677, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2001.05.010.
- 胥颐, 李志伟, 郝天珧等. 2007. 南海东北部及其邻近地区的 Pn 波速度结构与各向异性. 地球物理学报, 50(5): 1473-1479, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2007.05.023.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军等. 2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1553-1582.
- 张中杰, 刘一峰, 张素芳等. 2009. 南海北部珠江口—琼东南盆地地壳速度结构与几何分层. 地球物理学报, 52(10): 2461-2471, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.005.
- 张中杰, 刘一峰, 张素芳等. 2010. 琼东南盆地地壳伸展深度依赖性及其动力学意义. 地球物理学报, 53(1): 57-66, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.007.
- 郑月军, 黄忠贤, 刘福田等. 2000. 中国东部海域地壳—上地幔瑞得波速度结构研究. 地球物理学报, 43(4): 480-487, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2000.04.008.
- 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, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2002.04.005.

(本文编辑 胡素芳)