

侯爵, 徐涛, 吕庆田等. 2022. 双聚束噪声成像揭示钦杭与武夷山成矿带上地壳精细结构. 地球物理学报, 65(10):3881-3899, doi:10.6038/cjg2022Q0152.

Hou J, Xu T, Lü Q T, et al. 2022. The fine upper crustal structure below the Qin-Hang and Wuyishan metallogenic belts revealed by double beamforming ambient noise tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(10):3881-3899, doi:10.6038/cjg2022Q0152.

# 双聚束噪声成像揭示钦杭与武夷山成矿带上地壳精细结构

侯爵<sup>1,2,3</sup>, 徐涛<sup>1,4\*</sup>, 吕庆田<sup>5</sup>, 郑孟杰<sup>1,3</sup>, 白志明<sup>1,4</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 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

5 中国地质科学院, 北京 100037

**摘要** 华南地区是全球重要的钨锡等多金属矿集区之一, 是我国东部中生代成矿最具代表性区域. 然而该区主要成矿带的矿床类型和成矿特征却存在一定差异. 为了加深对区域成矿背景的认识和厘清控制成矿差异的因素, 我们基于主动源和被动源联合探测“万载—永春”剖面所记录的环境噪声数据, 开展了双聚束噪声成像, 获得了剖面下方的 S 波速度结构. 主要认识如下: (1) S 波速度模型异常特征刻画了研究区域内不同类型的断裂及其深部展布形态和速度特征. 钦杭成矿带内的江山—绍兴断裂具有逆冲性质, 西北倾向, 深切地壳, 控制中生代斑岩岩浆系统; 武夷山成矿带内的走滑断裂几乎均以高角度切穿上地壳, 与其相伴发育的铲式断层控制了大量的走滑拉分盆地和火山断陷盆地的发育. (2) 剖面下方的速度结构在横向上具有强烈的速度异常变化, 且武夷山成矿带内的平均 S 波速度略高于钦杭成矿带, 反映了武夷山成矿带上地壳以壳源花岗岩和酸性火山岩为主体, 而钦杭成矿带上地壳以巨厚的元古宙变质火山—沉积岩系为特征. (3) 综合证据表明, 中下地壳物质组成差异是导致两个成矿带具有不同成矿金属组合的根本原因. 在钦杭成矿带, 尽管浅部地壳平均 S 波速度低, 但下地壳高速异常显著, 反映其下部地壳偏镁铁质; 武夷山成矿带浅部地壳平均 S 波速度高, 但下地壳相对低速, 反映下部地壳为偏长英质古老地壳.

**关键词** 钦杭成矿带; 武夷山成矿带; 双聚束分析; 噪声成像; 上地壳 S 波速度结构

doi:10.6038/cjg2022Q0152

中图分类号 P315, P541

收稿日期 2022-03-06, 2022-08-04 收修定稿

## The fine upper crustal structure below the Qin-Hang and Wuyishan metallogenic belts revealed by double beamforming ambient noise tomography

HOU Jue<sup>1,2,3</sup>, XU Tao<sup>1,4\*</sup>, LÜ QingTian<sup>5</sup>, ZHENG MengJie<sup>1,3</sup>, BAI ZhiMing<sup>1,4</sup>

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

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

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

4 Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

5 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract** The South China region, as one of the significant Wu-Sn polymetallic metallogenic

**基金项目** 国家重点研发计划项目(2019YFA0708602, 2016YFC0600201)和国家自然科学基金(42130807, 41974048, 42074099)联合资助.

**第一作者简介** 侯爵, 男, 1989 年生, 助理研究员, 主要研究方向为地震学. E-mail: houjue@cea-igp.ac.cn

**\* 通讯作者** 徐涛, 男, 1978 年生, 研究员, 主要研究方向为地震学. E-mail: xutao@mail.iggcas.ac.cn

provinces in the world, is the most representative area in Mesozoic mineralization in eastern China. However, there are some differences in type and origin of the mineral deposits among the major metallogenic belts in this province. To better understand the regional metallogenic setting and determine the factors controlling the metallogenic differences, using the seismic ambient noise data recorded by “Wanzai-Yongchun” joint active- and passive-sourced seismic experiment, we performed the double beamforming ambient noise tomography and resolved the S-wave velocity model beneath the survey profile. Combined the available results, we draw the following conclusions: (1) The upper crustal S-wave model maps the known faults with different types and depth extent based on different seismic velocity features. The Jiangshan-Shaoxing Fault in the Qin-Hang belt, with the nature of reverse thrust, dipping north-west and running through the crust, had controlled the porphyry magma system in Mesozoic. The strike-slip faults in the Wuyishan belt, almost running through the upper crust with a dip angle, as well as with the neighboring listric faults, have controlled the occurrence and development of the strike slip pull apart basins and volcano graben basins. (2) There are strong lateral S-wave velocity variations across the survey profile, and the bulk S-wave velocity in the Wuyishan belt is slightly higher than that of the Qin-Hang belt, reflecting that the upper crustal compositional structure in the Qin-Hang belt is mainly crust-source granites and acid volcanic rocks, whereas the Wuyishan belt is composed of huge thick Proterozoic metamorphic volcanic-sedimentary rocks. (3) Comprehensive analysis confirms that the differences in middle-lower crustal compositional structure are the essential factors contributing the different types and origin of the mineral deposits between the Qin-Hang and Wuyishan metallogenic belts. Although the shallow bulk S-wave velocity in the Wuyishan belt is slightly higher than that of the Qin-Hang belt, the high-velocity anomalies exist significantly in the lower crust in the Qin-Hang belt, which implies that its lower crust possesses more mafic components; the lower crust of the Wuyishan belt exhibits a relatively low seismic velocity, which reflects the nature of paleo-felsic ancient crust.

**Keywords** Qin-Hang Metallogenic Belt; Wuyishan Metallogenic Belt; Double beamforming; Ambient noise tomography; S-wave velocity

## 0 引言

华南陆块地处欧亚大陆东南部, 濒临西太平洋, 由扬子地块与华夏地块碰撞拼贴而成(图 1)。新元古代扬子地块与华夏地块碰撞拼贴形成江南造山带(舒良树, 2012; Wang et al., 2013; Zhang and Zheng, 2013), 构成了统一的华南陆块。三叠纪华南陆块与华北碰撞拼合形成秦岭—大别碰撞造山带(Wu and Zheng, 2013; 张国伟等, 2013), 与特提斯印支陆块碰撞拼贴, 形成三江造山带(Carter et al., 2001)。进入中生代, 在太平洋板块俯冲(Isozaki, 1997; Zhou et al., 2006)以及周缘块体汇聚作用下(董树文等, 2007), 华南在中生代期间经历由 EW 向特提斯构造域向 NE 向西太平洋构造域的体制转换(任纪舜, 1984; 李三忠等, 2017), 伴随着复杂的

陆内造山作用(Wang et al., 2013; 张国伟等, 2013), 形成大规模的面状构造变形(张岳桥等, 2009)、北东向延伸的大规模走滑断裂系统(李三忠等, 2017)(图 1)、大面积的火成岩省(Zhou et al., 2006; 毛建仁等, 2014)及大规模多金属矿床(华仁民和毛景文, 1999)。华南陆块是全球罕见的世界级多金属成矿省, 成矿潜力巨大。迄今在华南陆块探明的钨、锡、铋、铋储量居世界第一, 铜、铀、钒、钛、汞、稀有金属储量居全国第一, 铅、锌、金、银、铂族元素等矿种的储量也名列全国前茅(胡瑞忠等, 2015)。这些矿床的成矿时代主要集中在中生代, 集中产于 5 条世界级成矿带。这些矿带自北而南依次为: 长江铜金铁成带(常印佛等, 1991; 周涛发等, 2008; 吕庆田等, 2014)、江南钨矿带(项新葵等, 2012; 陈国华等, 2015; 毛景文等, 2020)、钦杭铜多金属成矿带(杨明桂等, 2009; 倪培和王国光,

2017)、武夷山钨铀金银多金属成矿带(徐德明等, 2012)和南岭钨锡钼铍成矿带(陈毓川等, 1989; 陈骏等, 2008).

钦杭成矿带位于扬子与华夏地块在新元古代形

成的拼贴带内(图 1). 东起浙江杭州湾, 经湘东和赣中, 向广西钦州湾延伸, 全长近 2000 km, 宽 100~150 km(杨明桂和梅勇文, 1997). 北东段大型超大型矿床密集产出, 主要与燕山早期(180~160 Ma)

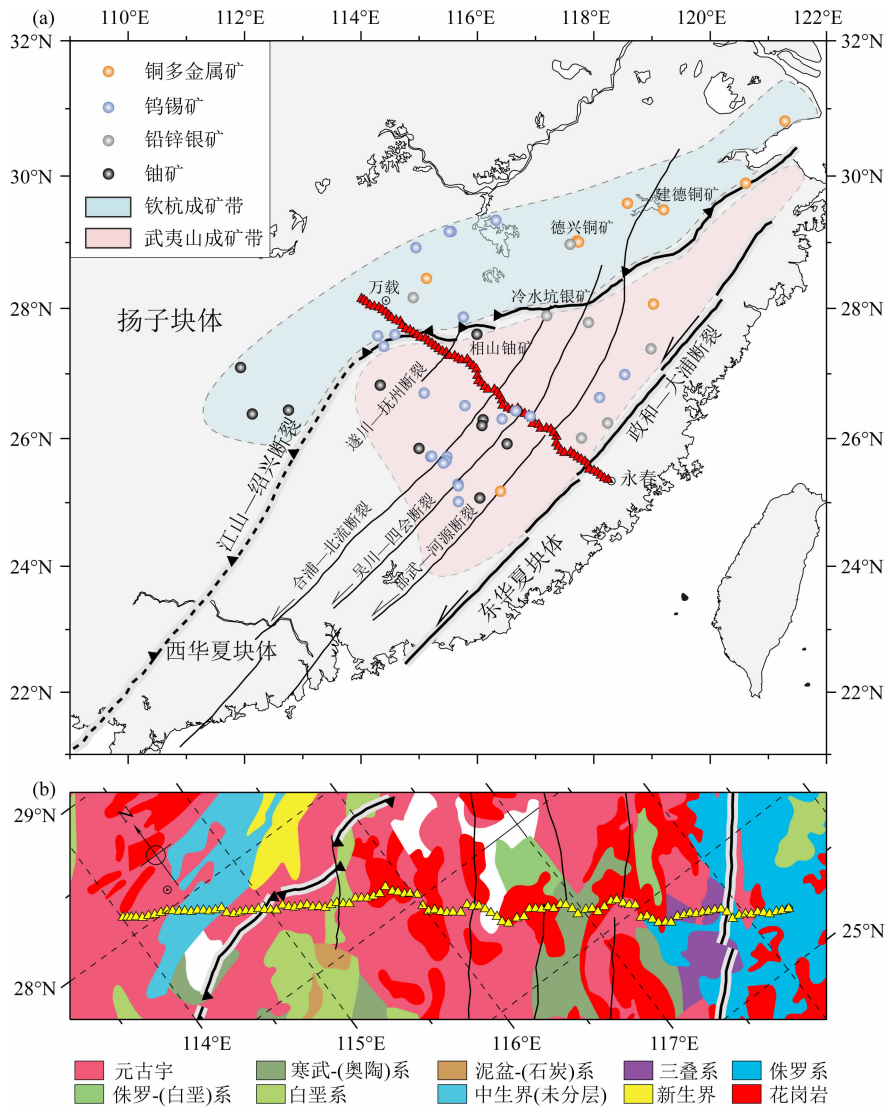


图 1 研究区域位置及地震台站分布

“万载—永春”剖面跨越钦杭成矿带、武夷山成矿带及东南沿海火山岩带。红色三角形表示本研究中所使用的短周期地震台站(以一定的间隔(~50 km)绘制, 并未绘制出所有的地震台站)。青蓝色和粉红色区域代表了钦杭成矿带和武夷山成矿带的大致范围。(a) 华南地块构造格架(据李三忠等, 2017, 略修改), 反映区内发育扬子克拉通(地块)、江南造山带和华夏地块等构造单元和 NE 向主要走滑断裂。主要断裂系统包括: 江山—绍兴断裂、合浦—北流断裂、吴川—四会断裂、邵武—河源断裂及政和—大浦断裂。代表性的中生代大型矿床(如德兴、建德和冷水坑等)被显示。(b) 研究区地质简图(据叶天竺等, 2017), 反映剖面沿线主要地层与岩浆岩分布。

Fig. 1 Research region and the location of seismic stations

Wanzai-Yongchun seismic profile spans the Qin-Hang Metallogenic Belt, the Wuyishan Metallogenic Belt and the Southeastern Coast volcanic plutonic belt. The red triangles represent the short-period seismic stations used in this study (not all stations are shown in the illustration, only including stations that maintain a specific spacing about 50 km). The cyan and pink areas represent the approximate spatial range of the Qin-Hang and Wuyishan metallogenic belts. (a) Tectonic frame in the South China Block (Modified from Li et al., 2017), including the Yangtze Craton, the Jiangnan Orogenic Belt and the Cathaysian Block, as well as the NE strike-slip fault system: the Jiangshan-Shaoxing Fault, Hefu-Beiliu Fault, Wuchuan-Sihui Fault, Shaowu-Heyuan Fault, and Zhenghe-Dapu Fault. Mesozoic representative ore deposits (e.g., Dexing, Jiande, Lengshuikeng and so on) are shown. (b) Simplified geological map in research region (Ye et al., 2017), including the distribution of the strata and magmatic rocks across the survey line.

小体积侵位的埃达克质斑岩有关,主要成矿类型为斑岩型和矽卡岩型,矿化以铜金为主,成矿年龄集中于 175~160 Ma(倪培和王国光, 2017). 典型矿床包括德兴超大型斑岩铜矿,其辉钼矿 Re-Os 年龄为 171 Ma(Wang et al., 2015). 类似矿床包括银山铜金多金属矿床(170 Ma; Wang et al., 2012)和建德铜矿(161 Ma; Chen et al., 2017)等(图 1).

武夷山成矿带北以江南—绍兴断裂带为界,与北侧的钦杭成矿带相邻,南以政和—大浦断裂为界,与东南沿海火山带相隔(图 1). 江南—绍兴断裂带是扬子地块与华夏地块的拼合边界,政和—大浦深大断裂控制着东南沿海大面积(近 10 万  $\text{km}^2$ )巨厚(平均 5000 m)的中生代火山岩系. 邵武—河源深大断裂与 NW 向断裂总体上控制了 301 多个孤立的火山断陷盆地的形成与分布,相伴产出长约 400 km 的武夷山成矿带(杨明德和姚金炎, 2008). 该成矿带迄今已探明大中型矿床 180 余处,尤以 W、Sn、U、Ag、Pb-Zn 等重要矿种最具优势(丁建华等, 2016). 根据构造-岩浆控矿特征及主要矿床空间分布,成矿带大致可分为三条亚带. 北亚带大致在江绍断裂与武夷隆起带北缘之间区域发育,成矿作用与中生代火山断陷盆地内中心式超浅成侵位的火山-岩浆系统有关,矿化以次火山(斑岩)和隐爆角砾岩型 U-Pb-Zn 和 Ag-Pb-Zn 为主. 代表性矿床包括冷水坑大型银铅锌矿(162 Ma; 孟祥金等, 2009)、相山大型铀-铅矿等(115 Ma; 陈正乐等, 2012); 南亚带沿邵武—河源深大断裂带及其两侧分布,银铅锌矿主要产于中生代火山-沉积盆地外侧及边缘,如福建龙溪梅仙铅锌矿床、浙江龙泉乌岙铅锌矿床、浙江遂昌冶岭头等(杨明德和姚金炎, 2008). 铀矿化显示分段发育、集中成群特点(唐湘生等, 2011). 中亚带成矿主要与中生代黑云母花岗岩体、二云母花岗岩及白云母有关,矿化以钨锡为主,矿床主要产于北东向深大断裂及其与近东向断裂交汇部位,代表性矿床包括行洛坑钨矿(153 Ma)、岩背锡矿床(125 Ma)、游坑(150 Ma)和金溪钨钼矿(152 Ma)等(毛景文等, 2008; 杨明德和姚金炎, 2008).

中酸性岩浆的形成发育及相关的成矿作用是三维岩石圈演化的物质响应. 地壳作为直接被活化改造的对象,忠实地记录了构造活动的过程和结果. 与中酸性岩浆有关的金属矿床,尽管初始形成深度不尽相同,但多数位于地壳浅部 0.5~10 km 范围. 因此,揭示成矿带地壳结构,特别是成矿系统所根植的浅部地壳的精细结构,对理解成矿系统的形成发育、

成岩成矿机理以及区域成矿预测等具有重要意义.

在华南地区,前人针对上述相关问题已进行了一系列研究并取得了重要进展. 例如,远震 P 波和 S 波接收函数研究显示,华夏地块岩石圈厚度约 60~70 km,南岭—武夷交汇区地壳平均厚度为 31.2 km,泊松比值为 0.23,总体呈薄地壳、低泊松比的特点(Li et al., 2013; 叶卓等, 2013; Zheng et al., 2014; 徐涛等, 2014; 韩如冰等, 2019). 钦杭成矿带地壳平均厚度约 34 km,以高波速比( $V_p/V_s$ )为特征,反映地壳富含铁镁质组分(Zhang et al., 2021a, b). 电性结构研究表明,东南沿海火山岩区和武夷隆起带岩石圈存在明显的电性结构差异(胡祥云等, 2017). 大尺度卫星重磁场揭示,钦杭成矿带两侧存在具有不同的物质组成和基底特征(林吉焱等, 2020). 卫星重力数据结果表明,钦杭成矿带(东段)处于莫霍面隆起区域,反映幔源物质对成矿作用有较大的影响,而武夷山成矿带位于莫霍面隆-陷交替区域,成矿作用可能与壳幔相互作用关系更为密切(罗凡等, 2019). 总体上,前人对钦杭和武夷成矿带的地壳结构探测与研究积累了不少资料,但目前仍缺乏高分辨率的地壳速度模型,对成矿带壳幔相互作用和岩浆活动的表现形态和影响范围等问题仍缺乏关键性证据;同时,跨越不同成矿带的综合研究还相对较少,仍难以对区域成矿差异性的内在原因和控制因素做出深刻揭示.

为了进一步增进对区域成矿背景和深部过程的认识,查明控制成矿差异性的根本因素,同时探索主动源和被动源联合探测的可行性,我们利用短周期密集台阵,开展了跨钦杭和武夷山成矿带的“万载—永春”剖面主动源和被动源联合探测(林吉焱等, 2020; Lin et al., 2021; Huang et al., 2022; Zheng et al., 2022). 在本次研究中,我们利用该剖面记录的连续波形数据,开展了双聚束噪声成像研究,获得了剖面下方的 S 波速度结构. 本文结合已有的研究成果,对研究区的地壳精细结构及其对区域成矿差异性的控制作用进行了深入讨论.

## 1 数据与方法

我们使用了中国科学院地质与地球物理研究所于 2018 年 11 月在中国东南部布设的“万载—永春”剖面所记录的近 1 个月的环境噪声数据. 该剖面呈北西-南东向,横跨新元古江南造山带、武夷山隆起带和东海沿海岩浆带等三大构造单元,穿

越钦杭成矿带和武夷山成矿带,全长约 530 km,台间距约为 1 km,共包括了 436 台 EPS-2 型短周期地震仪(图 1)。

### 1.1 噪声互相关函数

本文采用了 Bensen 等(2007)提出的经典环境噪声数据处理流程计算站之间的噪声互相关函数。首先将各个站所记录的连续波形数据截取为 1 h 的数据文件,并重采样至 20 Hz,然后对数据进行去均值、去线性趋势、去仪器响应、带通滤波(0.3~10 s)、时域归一化和频谱白化等处理。在此基础上,计算了所有站对相同时段内(小时)数据的互相关函数。对于单个站对,使用了 Li 等(2018)发展的相位加权技术,对所有按小时计算的互相关函数进行叠加,得到了站对之间最终的噪声互相关函数。在本研究中,我们仅使用了站的 Z 分量数据。

本文所计算的所有噪声互相关函数的接收站均位于源站的东南侧。图 2a 展示了 1141 站与其他所有站之间的噪声互相关函数,可以看到 Rayleigh 波信号仅出现在互相关函数的负支,而正支则几乎没有信号,这表明噪声源的能量主要来自于研究区域东南侧的海洋。故此,我们只使用了噪声

互相关函数的负支部分。图 2c 对 1141-1343 站对(图 2a 中的红线)的互相关波形(图 2b)进行了时频分析,结果显示信号的能量主要集中在 2~5 s。

### 1.2 双聚束噪声成像

地震学中聚束分析,其基本思想是估计在地震台阵上传播的地震波的相干部分,并确定其传播性质(Krüger et al., 1993; Rost and Thomas, 2002)。这一思想被广泛用于识别地震波的类型和入射角(Nakata et al., 2019)。通过将密集台阵划分为若干个子台阵,对单个子台阵进行聚束分析时,称为单聚束分析。而当两个子台阵满足一定的要求时(如:远场假设),根据平面波假设,可以假定存在地震波从一个子台阵(源阵列)传播到另一个子台阵(接收阵列)。在此情况下,对源台阵和接收台阵同时开展聚束分析,便称为双聚束分析(图 3)。作为一种台阵分析技术(Boué et al., 2013),双聚束方法在地震学中得到广泛应用,如:识别全球尺度的反射震相(Krüger et al., 1993; Poli et al., 2015)、研究局部和实验室尺度的地震波传播(De Cacqueray et al., 2011; Nakata et al., 2016)、开展多路径浅水层析成像(Roux et al., 2008, 2011)和面波成像(Boué et al.,

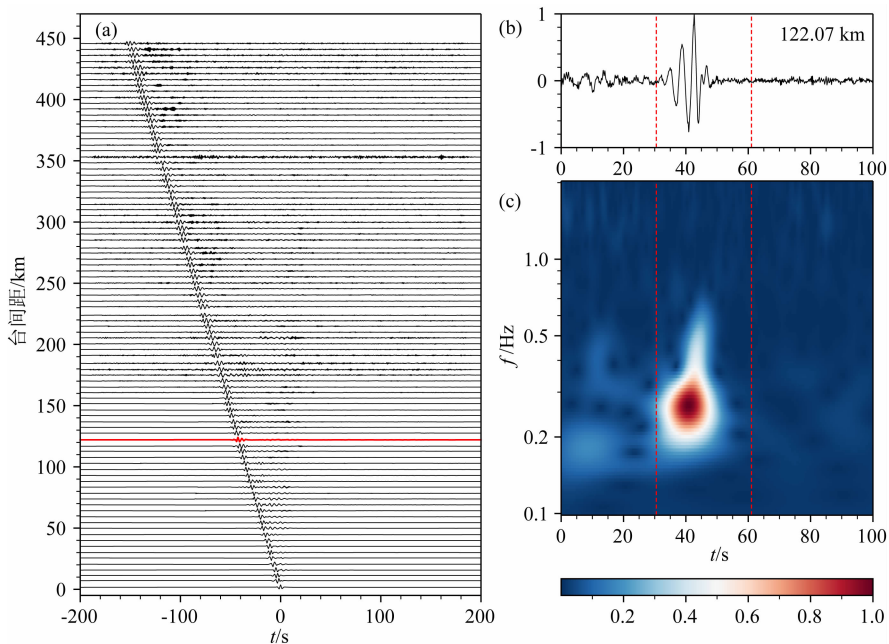


图 2 按台站间距排列的噪声互相关函数及对噪声互相关波形的时频分析

(a) 1141 站与其他所有站之间的噪声互相关函数; (b) 经过对称翻转和归一化处理后的 1141-1343 站对((a)中的红色实线)噪声互相关函数的负支,红色虚线表示  $2.0\sim 4.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度窗口; (c) 为(b)中噪声互相关波形的时频分析结果。

Fig. 2 Noise cross-correlations against inter distance and the time-frequency analysis

of the noise cross-correlation waveform

(a) Noise cross-correlations between station 1141 and other stations. (b) The negative branch of noise cross-correlations of station pair 1141-1343 (red line in (a)), after flipping symmetrically and normalizing. The red dash lines denote the velocity window  $2.0\sim 4.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . (c) Time-frequency analysis result of the noise cross-correlation waveform in (b).

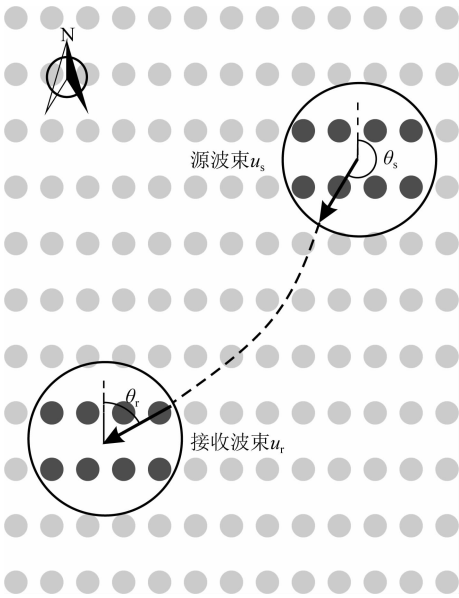


图3 双聚束分析原理示意图

修改自 Nakata 等(2019)的图 8.3. 浅灰色圆形表示台站的位置, 深灰色圆形表示双聚束所使用的台站. 黑色圆圈表示源/接收波束的大小, 黑色箭头代表叠加波形的出射角度  $\theta_s$  和入射角度  $\theta_r$ , 虚线指示了源波束和接收波束之间波传播的最短路径.  $u_s$  和  $u_r$  分别为源波束和接收波束内的慢度.

Fig. 3 Illustration of double beamforming

Modified from the Figure 8.3 of Nakata et al. (2019). The light gray dots show the location of stations, and the dark gray dots represent the stations used for double beamforming analyses. The black circle represents the source and receiver beam width (size). The black arrows denote the outgoing ( $\theta_s$ ) and incoming angles ( $\theta_r$ ) of the stacking waveforms, and the dashed line indicates the shortest path for wave propagation between the source and receiver beam.  $u_s$  and  $u_r$  are the slowness in the source and receiver beam, respectively.

2014; Roux et al., 2016; Wang et al., 2019a)等.

本研究所使用的方法,是最近新发展的针对 1D 线性台阵的双聚束噪声面波成像方法(Wang et al., 2019a). 其原理是,当源波束和接收波束满足远场假设时,基于面波传播的平面波假设,通过给予合适的慢度搜索空间,对源波束和接收波束同时开展聚束分析,从而直接估计能够代表波束内的最优速(慢)度. 时域内表示如下:

$$Z(u_s, u_r, t) = \frac{1}{N_s N_r} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_r} z(s_i, r_j, t - \tau_s + \tau_r), \quad (1)$$

其中  $Z$  表示叠加的波形,  $z$  为各个台站对的噪声互相关波形,  $u_s$  和  $u_r$  分别为源波束和接收波束的 Rayleigh 波慢度,  $t$  为 Rayleigh 波到时,  $N_s$  和  $N_r$  分别为源端和接收端内台站的个数. 相应的, 频域(Wang et al., 2019b)内双聚束分析表示如下:

$$F(u_s, u_r, \omega) = \frac{1}{N_s N_r} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_r} f(s_i, r_j, \omega) e^{-i\omega(\tau_{s_i} + \tau_{r_j})} \quad (2)$$

与常规的双聚束分析(如: Nakata et al., 2016)不同, Wang 等(2019a)针对 1D 台阵进行一定的简化, 即忽略了波传播的方位角  $\theta_s$  和  $\theta_r$ (图 3), 相应的  $\tau_s$  和  $\tau_r$  定义如下:

$$\begin{cases} \tau_s = (\mathbf{X}_{s_i} - \mathbf{X}_{s_c})u_s, \\ \tau_r = (\mathbf{X}_{r_j} - \mathbf{X}_{r_c})u_r, \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{X}_{s_i}$  和  $\mathbf{X}_{r_j}$  分别表示源台站和接收台站的位置,  $\mathbf{X}_{s_c}$  和  $\mathbf{X}_{r_c}$  分别表示源阵列和接收阵列中心的位置.

相比较传统的噪声成像方法,基于 1D 台阵的双聚束噪声成像(Wang et al., 2019a, b)方法提供了一种直接测量相速度的途径,规避了常规的相速度反演步骤,能够有效避免对速度异常的错误估计. 此外,该方法可通过在不同的源-接收波束之间进行重复测量,能够有效地估计所测量局部相速度的不确定性.

为了利用双聚束方法得到单个波束内不同周期的相速度,我们使用了高斯窄带滤波器(Bensen et al., 2007; Nakata et al., 2019)对计算的噪声互相关波形进行了窄带滤波,图 4a—d 分别展示了中心周期为 1.0、3.0、5.0 和 7.0 s 的结果. 由图 4a 中可见,1.0 s 的 Rayleigh 波在视觉上仅存在于 150 km 范围以内,150 km 以外几乎不存在有效信号. 值得注意的是,大约在 100~150 km 范围内,中心周期为 1.0 s 的噪声互相关波形存在两组连续可追踪的波形,除了基阶 Rayleigh 波外,我们推测另外一组信号可能为高阶面波或是体波信号(Zhan et al., 2010). 3.0 s 和 5.0 s 的 Rayleigh 波(图 4b, c)信号连续且信噪比良好,7.0 s 的 Rayleigh 波(图 4d)的信噪比明显降低,应该与仪器的频带范围有关.

在进行双聚束分析之前,首先需要根据观测系统的几何形状和台站间距的特点,确定波束中心的位置,即以简单且规则的方式对研究区域进行空间采样. 我们使用分段线性函数对剖面台站位置进行拟合,并将波束中心的沿经度方向间距设置为 2 km,最终获得共计 240 个波束中心,波束中心和台站的位置如图 5 所示.

然后,需要确定与成像横向分辨率有关的波束宽度. 射线理论(Wang and Dahlen, 1995)要求每个周期对应的波束宽度至少需要大于 1/2 倍的波长. 我们根据研究区域周期和相速度的经验关系(1.0~3.0 s 周期范围的参考相速度值为  $3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 3.0~



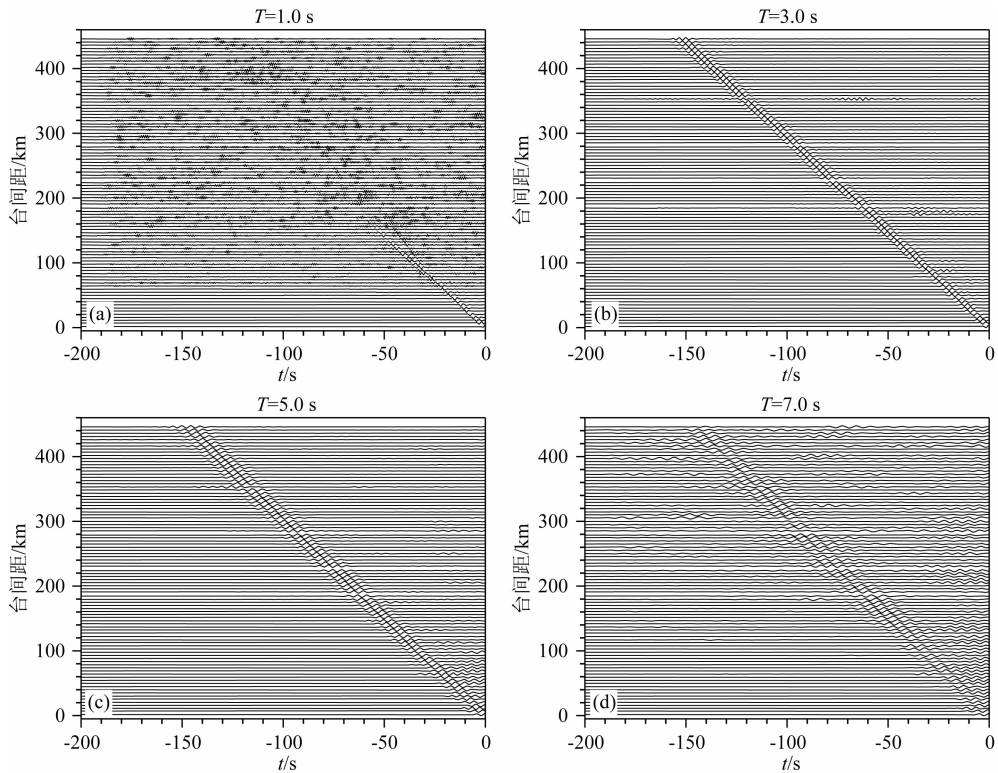


图4 窄带滤波处理后的噪声互相关函数

1141 台站与其他所有台站之间的经窄带滤波处理后的噪声互相关函数,这里仅显示了存在面波信号的负支。

(a)一(d)对应的周期分别 1.0、3.0、5.0 和 7.0 s。

Fig. 4 The narrow-band filtered noise cross-correlations

The narrow-band filtered noise cross-correlations between station 1141 and other stations, only negative branches that include the surface wave signals are shown. (a)一(d) are at 1.0, 3.0, 5.0 and 7.0 s period.

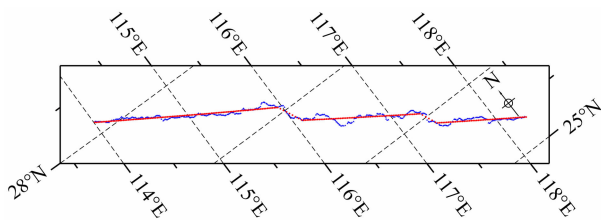


图5 台站与波束中心位置

蓝色三角形表示地震台站,红色圆形表示波束中心。

Fig. 5 Seismic stations and beam center

The blue triangles and red circles denote the location of the seismic stations and beam center, respectively.

7.0 s 为  $3.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 估计了各个周期 Rayleigh 波的波长范围,同时综合考虑波束内的有效台站(经验上单个波束内至少需要有 3 个台站才能够获得稳定可靠的测量结果)等因素,最终选择了 20 km 作为进行双聚束分析的波束宽度。此外,我们移除 1.5 倍波长范围以内的波束对,以满足远场假设要求(Yao et al., 2006; Yang et al., 2007, 2012; Luo et al., 2015)。

遵循 Wang 等(2019a)的处理流程,在进行双聚束分析之前,我们对噪声互相关波形进行了截断(速度窗口  $4.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )和平滑衰减处理,以减弱高阶面波和前驱到时可能带来的影响。通过采取不同的源慢度( $u_s$ )和接收慢度( $u_r$ )组合,对波束内的台站与源/接收波束中心的距离进行校正,进而在频域(Wang et al., 2019b)进行波形的倾斜叠加。在此过程中,采用了 2D 网格搜索的策略,以叠加后波形包络的最大振幅为评价标准,确定源/接收波束下方的最优慢度(图 6)。

在完成所有波束对测量后,对于单个波束中心,存在由不同源-接收波束测量所获得的慢度。在去除两倍标准差以外的极端测量值后,以剩余慢度的平均值作为该波束中心的最优慢度,而波束慢度的测量误差被定义为有效测量值的标准差除以独立测量数(即非重叠波束的个数)的平方根(Wang et al., 2019a)。此外,叠加波形的信噪比也作为测量慢度取舍的评价标准,本文仅保留了信噪比大于 20 的测量值(表 1)。

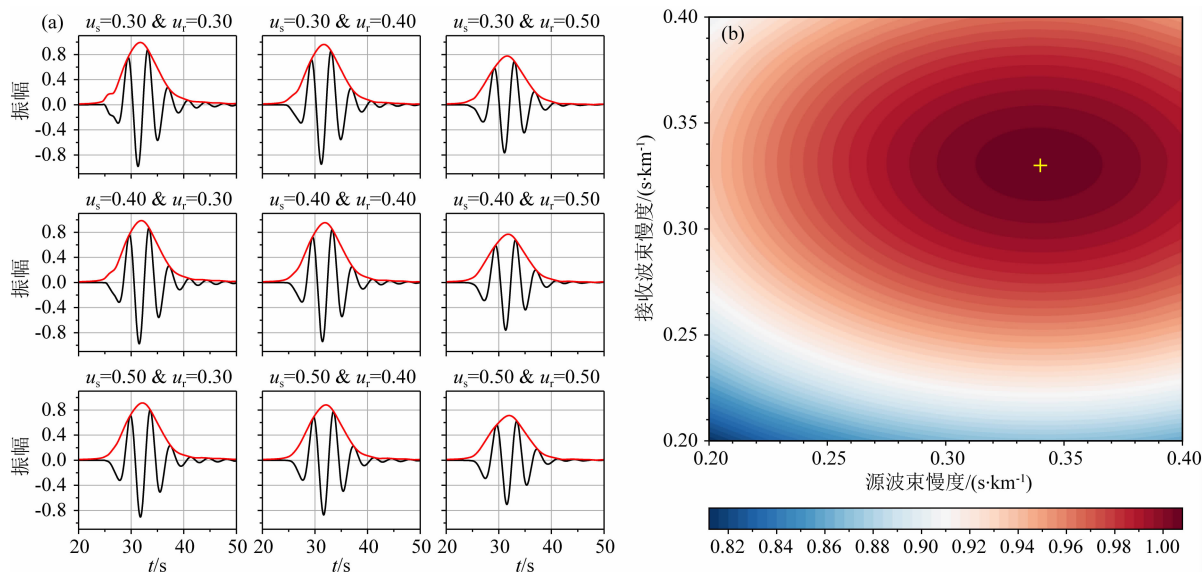


图6 2D网格搜索最佳慢度示例

(a) 采取不同的源/接收波束慢度组合时所叠加的波形. 黑色实线为实际的叠加波形, 红色实线根据叠加波形所计算的包络;

(b) 叠加波形包络的最大振幅随源波束慢度和接收波束慢度变化的分布情况. 黄十字表示最大振幅的位置.

Fig. 6 Example of determining the best slowness by 2D grid search

(a) Stacked waveforms with different source beam slowness and receiver beam slowness. The black line is the stacked waveforms, and the red line is the envelope waveforms of the stacked waveforms; (b) The maximum envelope amplitude of the stacked waveforms with respect to the source side slowness and receiver side slowness. The yellow cross marks the location with the maximum amplitude.

表1 叠加波形信噪比统计

Table 1 SNR (Signal-to-Noise Ratio) statistics of the stacked waveforms

周期(s)	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	平均值	最小值	阈值
1.0	17.70	20.86	24.11	21.73	10.73	
1.5	21.66	24.67	28.46	25.04	11.82	
2.0	22.76	26.4	29.65	26.7	13.12	
2.5	23.67	26.75	29.64	27.22	15.92	
3.0	24.17	26.72	29.09	27.35	17.94	
3.5	24.35	26.49	28.58	27.40	17.93	
4.0	24.12	26.03	27.96	27.19	18.08	20
4.5	23.57	25.34	27.15	26.62	17.98	
5.0	22.86	24.47	26.21	25.94	18.32	
5.5	22.00	23.47	25.16	25.14	18.12	
6.0	21.02	22.34	23.9	24.14	17.18	
6.5	19.88	20.99	22.4	22.84	15.79	
7.0	18.34	19.50	20.73	21.28	14.38	

注: Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> 和 Q<sub>3</sub> 分别代表第一四分位数, 第二四分位数(中位数)和第三四分位数.

Note: Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> and Q<sub>3</sub> represent the first quartile, second quartile (median) and third quartile, respectively.

图7a—d分别以1.0、3.0、5.0和7.0 s周期为例, 展示了沿剖面相速度的测量结果. 各个周期结果对比表明, 1.0和7.0 s的测量误差明显大于3.0和

5.0 s, 这与不同周期噪声互相关波形的信噪比有关(图4). 短周期信号受制于研究区域噪声源能量的频带范围(图2c), 而长周期则受地震仪器频带范围和观测时间的限制. 这一点在不同周期的叠加波形的信噪比上也有所体现(表1). 在空间范围的分布上, 周期为1.0 s时剖面两端的测量误差明显大于中间部分, 这应该与1.0 s的Rayleigh波信号强度有关. 图4a显示, 1.0 s的Rayleigh波信号仅存在于有限的台站间距范围内, 因此相比较于其他周期, 可用于进行波形叠加的台站对较少, 尤其是对于测线两端的部分. 对于绝大部分周期而言, 存在一定空间范围内(如: 116.0°~116.5°)的测量误差较大, 这应该与该范围内波束中心周围可用台站较少有关(图5).

进而, 我们将所有周期和波束中心的测量结果进行组合, 得到了距离-周期的2D相速度(图8a)和测量误差(图8b)剖面. 整体上, 测量误差较大的区域一般是由于波束中心周围没有足够的台站(图5). 此外, 较短周期范围( $\leq 1.5$  s)的测量误差普遍较大. 以测量误差模型(图8b)为参考, 便可对所获得的相速度模型进行初步评价, 有助于识别和剔除虚假的速度异常, 如横向200~350 km范围内存在一系列狭小的条带状异常, 这很有可能是因为该范围内波束中心附近可用台站不足, 测量结果不稳定



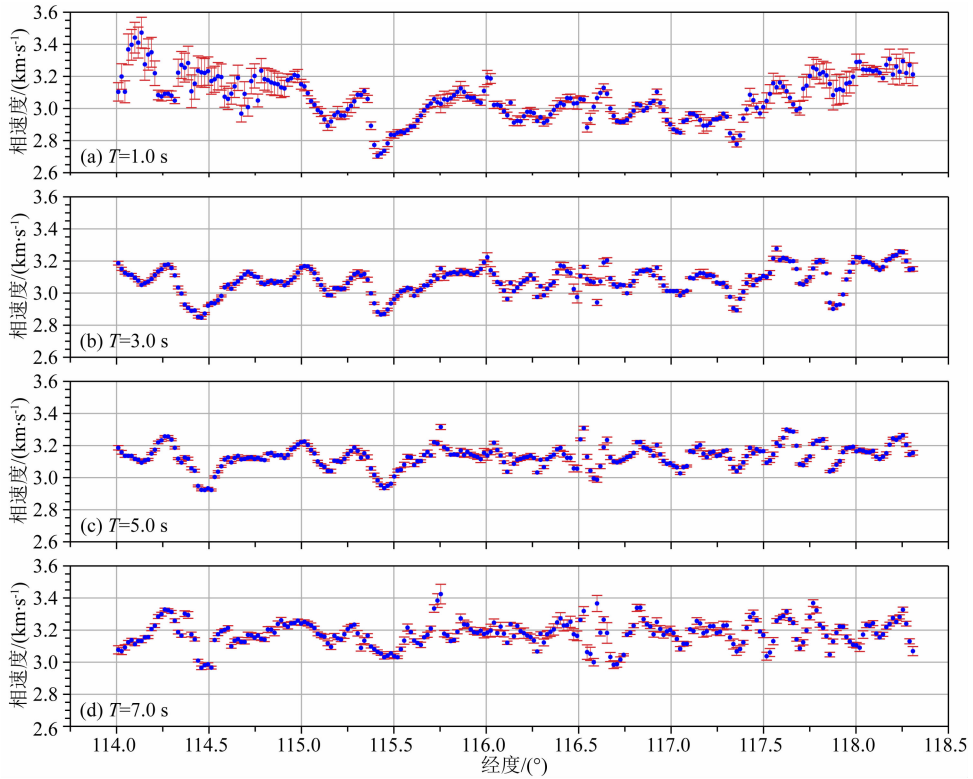


图 7 沿地震剖面的慢度测量结果

(a)—(d) 分别为 1.0、3.0、5.0 和 7.0 s 的瑞雷波相速度测量结果,误差棒表示测量值的误差.

Fig. 7 Slowness measurements along the seismic survey profile

(a)—(d) are the Rayleigh wave phase-velocity measurements at 1.0, 3.0, 5.0 and 7.0 s period, error bars represent the measuring uncertainties.

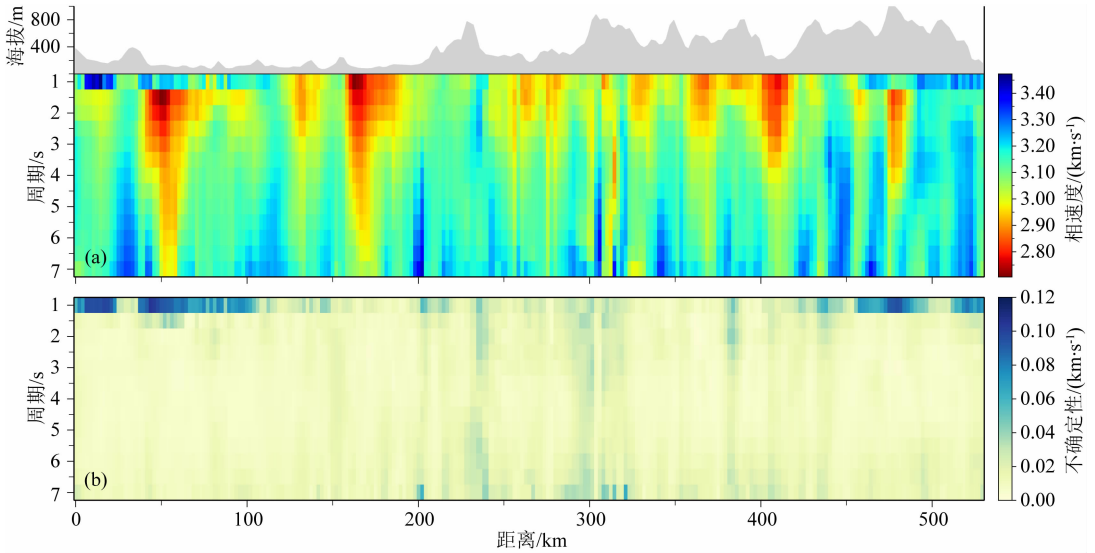


图 8 (a) 2D 相速度剖面; (b) 2D 测量误差剖面

Fig. 8 (a) 2D phase velocity cross-section. (b) 2D cross-section of the measuring uncertainties

导致的.

### 1.3 S 波速度结构反演

为了获得剖面下方的 S 波速度结构,我们使用 Rayleigh 波相速度频散数据(图 8a)进行了迭代最小二乘 1D 反演(Herrmann, 2013). 在 S 波速度反

演之前,我们对频散数据进行了质量控制,实际使用的 Rayleigh 波相速度频散剖面如图 9 所示.一方面,我们舍弃了测量误差(图 8b)较大的频散数据. Gkogkas 等(2021)曾尝试过类似的做法,用以减少因非均匀噪声源对相速度测量所带来的影响. 本文以 3.0

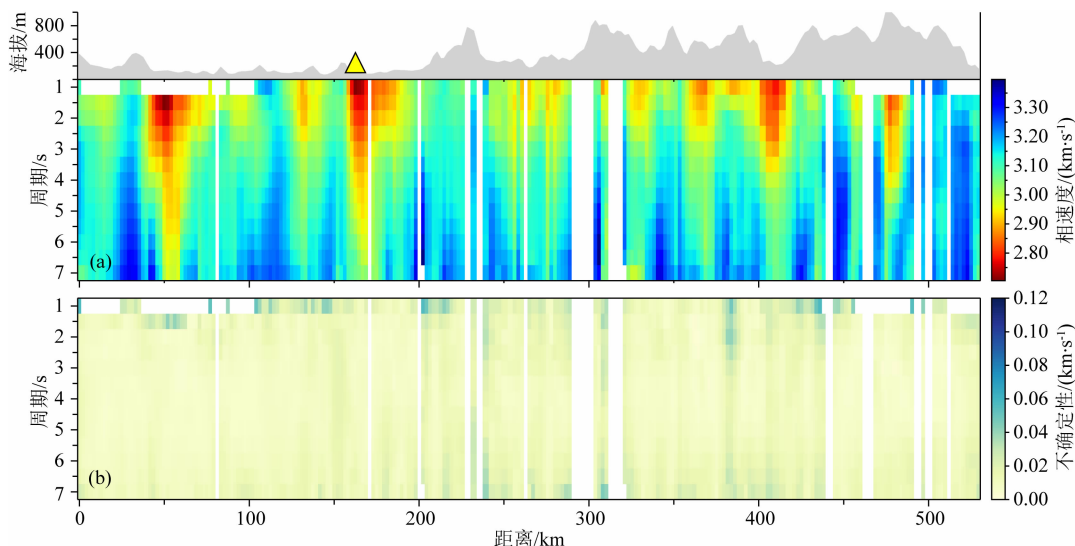


图9 (a) 用于S波反演的2D相速度频散剖面;(b) 测量误差剖面  
白色空白位置为舍弃的频散数据,黄色三角形标注了图10频散数据对应的位置。

Fig. 9 (a) 2D phase velocity cross-section used for S-wave inversion. (b) The cross-section of the measuring uncertainties  
The white blank represents the discarded dispersion data, the yellow triangle represents the corresponding location of dispersion data in Fig. 10.

$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 为参考速度,去除了测量误差大于2%参考速度的频散数据,这一过程主要去除了周期为1.0 s和7.0 s的部分测量误差较大的频散数据(图9)。另一方面,我们以反演后的结果作为参考,舍弃了部分测量频散和理论频散拟合程度较差的数据。我们对反演后测量频散和理论频散的标准误差进行了统计,仅保留了标准误差小于 $0.02 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的频散数据(约占总数的90%)。由此过程去除的频散数据不仅具有相对较高的测量误差,而且表现出空间上的聚集性,所在的区域正是推测可能出现虚假相速度异常的位置(图8)。正如前文所提到的,这可能是由于波束中心附近可用台站不足,使得测量结果不稳定,可靠性较低。

在反演每个波束中心的Rayleigh波频散时,我们采用了不随深度变化的恒值初始模型,设定S波速度为 $3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,P波速度为 $5.25 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,密度为 $2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,地层厚度为0.5 km,最大反演深度为20 km。在迭代反演S波速度的过程中,波速比( $=1.75$ )保持不变,密度则由与P波速度有关的经验关系进行更新(Brocher, 2005)。同时,为了避免过小阻尼值可能会导致数据的过拟合,我们首先采用较大的阻尼值( $=10$ )进行初次反演,然后使用较小的阻尼值( $=0.5$ )进行了20次迭代反演,获得了该波束中心下方的S波速度结构。

图10展示了遂川—抚州盆地内的一个波束中心(图9a的黄色三角形)频散数据反演结果。图10a

为反演前后速度模型的变化,图10b是根据反演的速度模型计算了不同周期(1.0、3.0、5.0和7.0 s)的深度敏感核,图10c展示了测量的相速度频散与根据反演速度模型计算的理论频散的拟合情况。我们以最长周期( $=7.0 \text{ s}$ )的深度敏感核(图10b红色实线)为参考,选择了10 km作为速度模型的截断深度,用以组成测线下方的2D横波速度剖面。同时,使用了局部多项式插值算法对反演结果进行了网格化和空间平滑,最终得到的2D横波速度剖面如图11a所示。基于林吉焱等(2020)所获得的P波速度模型(图11b),我们计算得到了剖面下方0~6 km的波速比模型(图11c)。

#### 1.4 噪声源分布对成像结果的影响

正如Wang等(2019a)所提到的,在面对非均匀分布噪声源的应用场景时,基于1D台阵的双聚束噪声成像在速度测量的过程中会产生潜在偏差。前人的研究表明,当噪声源的方向不平行于测线时,与均匀分布的噪声源的情况相比,从噪声互相关中获得的的面波速度会偏大(Lin et al., 2008; Yao and Van Der Hilst, 2009);且对于较短台间距的台站对来说,不均匀的噪声源在长周期带来的测量偏差会进一步增大(Snieder, 2004)。

本文所使用的位于中国东南部的短周期密集台阵数据观测时间较短,剖面整体成北西-南东向,因此所使用的环境噪声数据的噪声源分布具有强烈的非均匀性。为了应对非均匀噪声源可能带来的影响,正

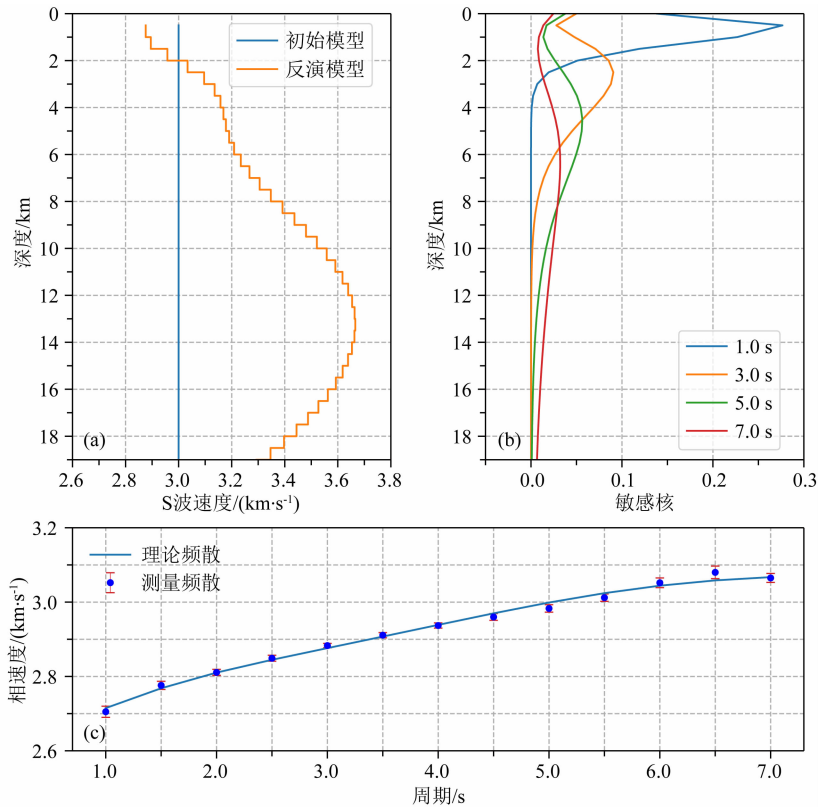


图 10 单个波束中心频散反演示例

(a) 1D 初始速度模型和反演结果, 对应于图 9a 黄色三角形所标识位置的数据; (b) 1.0、3.0、5.0 和 7.0 s 瑞雷波相速度对横波速度的敏感核; (c) 测量频散和由反演结果计算的理论频散。

Fig. 10 Example of S-wave inversion at a single beam center

(a) 1D initial S-wave velocity model and inversion result, corresponding to the data at the location denoted by yellow triangle in Fig. 9a; (b) Sensitivity kernels of Rayleigh wave phase velocities to shear-wave velocities at 1.0, 3.0, 5.0 and 7.0 s; (c) The measuring dispersion and theoretical dispersion that is calculated by the inversion result.

如前文所述,一方面我们参考了 Gkogkas 等(2021)的做法,通过对测量误差进行限制以减弱非均匀噪声源的影响.另一方面,受益于主动源和被动源的联合观测,我们比较了所获得 S 波速度模型和主动源成像所获得的 P 波速度模型(林吉焱等, 2020).二者在速度结构特征上的一致性证明了所获得模型的可靠性.

## 2 讨论

S 波速度模型揭示了研究区浅部地壳横向上具有强烈的速度异常变化(图 11).对于浅层地壳速度结构而言,这些速度异常通常与多种因素有关,包括物质成分、孔隙度、水分含量和断裂构造等.我们将以钦杭成矿带和武夷山成矿带内的速度异常为对象,讨论其可能形成的原因及其对区域成矿规律和深部动力学背景的启示.

### 2.1 S 波速度模型结构与主要断裂系统

S 波速度模型显示,以北部江山—绍兴断裂和

南部政和—大浦断裂为边界,浅部地壳的速度异常具有一定的分块特征(图 11).江山—绍兴断裂两侧的速度结构存在显著差异,这与前人的 P 波和 S 波速异常结构相一致(Zhang et al., 2008; Zhao et al., 2013; 林吉焱等, 2020),反映该断裂是一条区域性的深大断裂.地质观察表明,该断裂作为一条岩石圈尺度的边界断裂,标志着扬子和华夏块体沿此带碰撞缝合(He et al., 2013; Guo and Gao, 2018; Guo et al., 2019).根据 S 波速度结构及低速异常空间延伸,我们推测该断裂属大型逆冲断裂,倾向西北,切割上地壳,向下延伸至 10 km(图 11).在江山—绍兴断裂北侧的江南造山带或钦杭成矿带,上地壳发育区内最大规模的低速异常(图 11).根据江南造山带地质记录,该区除发育中生代地层外,大量发育华南最连续、面积最大的元古宙浅变质火山沉积岩系,如双桥山群/梵净山群/四堡群/冷家溪群/上溪群陆缘碎屑沉积(879~823 Ma, 倪培和王国光, 2017).我们推测,这一速度异常可能与钦杭成

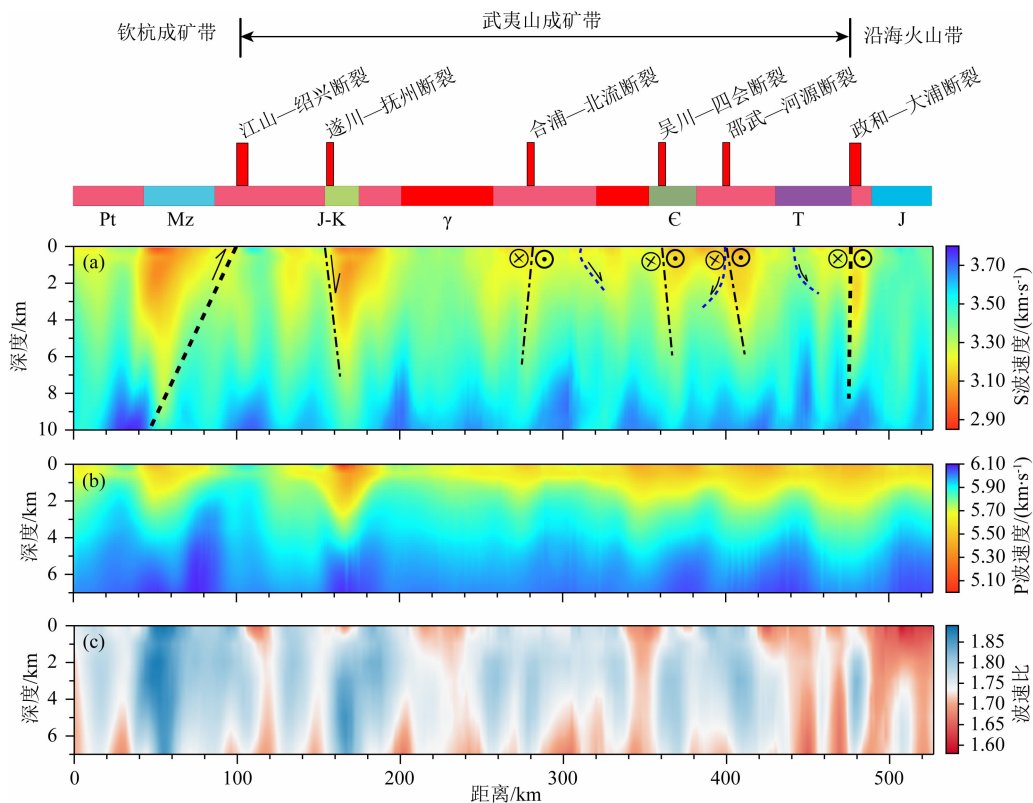


图 11 “万载—永春”剖面上地壳速度结构

地层符号: Pt, 元古宇; Mz, 中生界(未分层); J-K, 侏罗-白垩系;  $\gamma$ : 中生代花岗岩;  $\epsilon$ : 寒武系; T, 三叠系; J, 侏罗系. 数据来源: 叶天竺等, 2017. (a) S 波速度结构, 黑色和蓝色虚线标识了区域内断裂在深部可能的展布形态; (b) P 波速度结构 (林吉焱等, 2020); (c)  $V_P/V_S$  波速比结构.

Fig. 11 The upper crustal seismic velocity structure beneath the “Wanzai-Yongchun” survey profile

Acronyms for stratum: Pt, Proterozoic; Mz, Mesozoic (undivided); J-K, Jurassic-Cretaceous;  $\gamma$ , Mesozoic granites;  $\epsilon$ , Cambrian; T, Triassic; J, Jurassic. Data source: Ye et al., 2017. (a) S-wave velocity structure. The black and blue dash lines denote the potential deep extending patterns of regional faults. (b) P-wave velocity structure (Lin et al., 2020). (c)  $V_P/V_S$  ratio structure.

矿带内元古代浅变质火山沉积岩系及上覆盖层相对应.

我们的 S 波速度模型清楚地显示, 政和一大浦断裂附近发育明显的低速异常, 虽然其横向延展不大, 但垂直延伸至 7 km 深度 (图 11). 断裂两侧具有明显不同的波速结构: 南侧的东南沿海火山带明显大于北侧的武夷成矿带, 反映断裂两侧具有不同地壳物质结构 (图 11). 前人利用地壳内部反射和 Moho 面反射等多震相联合约束的地壳 P 波速度结构也显示, 政和一大浦断裂带两侧的下地壳具有明显不同的 P 波和 S 波速度结构, 东南侧的速度明显高于西侧 (Cai et al., 2015; 李培等, 2015). 这些结果表明, 政和一大浦断裂是一条近于直立的或向南陡倾的张扭性深大断裂, 其形成发育控制了东南侧广泛发育晚中生代火山岩系和北西侧出露的前寒武纪古老基底变质岩系.

发育于江山—绍兴断裂南侧的遂川—抚州断裂, 被认为是一条长期活动的控岩控盆控矿断裂 (张

万良等, 2015). 该断裂两侧的浅部地壳内 (0~6 km) 发育大小不一、强度不等的低速异常, 其中, 东南侧低速异常规模大, 向下延伸至 5 km 处, 与抚州—永丰掀斜盆地相对应; 西北侧低速异常规模小, 延伸浅 (<3 km), 也与小型盆地相对应. P 波速度模型中也存在类似的低速特征 (林吉焱等, 2020), MT 反演显示该低速异常与视电阻率低异常区相对应 (周忠平, 2018). 地质研究表明, 该断裂上陡下缓倾向东南, 其南侧火山沉积盆地内部发育壳源火山—次火山岩及类磨拉石陆相沉积 (张万良等, 2015). 我们的 S 波速度模型反映, 遂川—抚州断裂是向东南陡倾的张性断裂, 作为主要的盆缘断裂, 控制了两侧火山—沉积盆地的形成与发育. 位于武夷山成矿带内的断裂系统, 例如, 邵武—河源断裂、吴川—四会断裂和合浦—北流断裂等 (图 1), 被认为是古太平洋俯冲和构造体制转换形成的一系列大型走滑断层, 控制了数以百计的走滑拉分盆地或火山—沉积盆地的形成发育 (李三忠等, 2017). P 波速度模型显示,



这些断裂下方的速度负异常区和正异常区交替出现,且近乎直立(林吉焱等,2020).我们的S波速度模型显示,这些断裂下方的速度结构表现为相对低速,且大多在深部近乎直立,具有陡峭的倾斜角度,与地表观测得出的走滑性质相吻合(刘成忠等,2009;李三忠等,2017).

值得注意的是,除上述三条近直立(邵武—河源断裂、吴川—四会断裂和合浦—北流断裂)的走滑断裂及其相应的低速异常外,在这些断裂旁侧或夹持区域,浅部地壳均出现规模不大但相对独立的低速异常,如吴川—四会断裂和合浦—北流断裂之间的低速异常、邵武—河源断裂北侧和政和—大浦断裂北侧的低速异常(图11).这些低速异常的上方或边缘,往往出露大规模的花岗岩体或岩基,暗示低速异常可能与岩体边缘的断裂构造或高渗透性有关.与万载—咏春剖面附近的深反射地震剖面结果(吕庆田,个人通讯)对比发现:对应于这些浅部地壳小规模低速异常,浅部地壳发育拆离断裂或铲式正断层,表明浅部地壳强烈伸展;中上地壳发育弧形地震反射,反映存在隐伏的大型岩基并显示侵入结构特征.这种对应关系表明,我们的S波速度模型所揭示的浅部地壳小规模低速异常,可能由拆离断层或铲式断层引起.在青藏高原,中新世S型淡色花岗岩岩体沿着藏南拆离系(STDs)大量侵位与发育及相应的低速异常(Hou et al., 2012; 高利娥等, 2017),也印证了这种可能性.

综上所述,我们的S波速度模型清晰地刻画了四类断裂构造的发育特征和空间展布.一是逆冲断裂(江山—绍兴断裂),代表扬子与华夏地块的缝合边界;二是张性或张扭性断裂(如政和—大浦断裂、遂川—抚州断裂),发育于华夏地块内部的长期活动的深大断裂;三是走滑断裂(如邵武—河源断裂、吴川—四会断裂和合浦—北流断裂等),控制中生代走滑拉分盆地及火山-沉积盆地发育;四是拆离断裂或铲式断层,控制了花岗岩体侵位.

## 2.2 断裂活动与成矿控制

钦杭成矿带发育在江南—绍兴逆冲断裂带北侧,成矿带内所有的矿床均产于逆冲断裂带上盘(图1a),反映逆冲断裂与钦杭成矿带密切相关.该逆冲断裂带的发育标志着钦杭成矿带自新元古至中侏罗世(180~160 Ma)长期处于挤压环境.这一挤压环境为斑岩岩浆的多级侵位、岩浆房稳定发育、岩浆充分分异和流体大量出溶提供了最为有利的环境(Richards, 2009, 2011; Sillitoe, 2010),从

而导致德兴等大型斑岩铜矿形成(Hou et al., 2011, 2013).

遂川—抚州断裂为代表的张性或张扭性断裂,控制了一系列火山-沉积盆地及U、Pb-Zn-Ag矿的形成发育.相山铀矿是典型的与超浅成侵位的次火山岩(115 Ma)有关的大型铀矿,产于大型塌陷式火山盆地内部(张万良等, 2015),赋存于NE向构造和环状火山塌陷构造复合部位,产于次火山岩体内及其外接触带(范洪海等, 2003; 陈正乐等, 2012).冷水坑大型铅锌银矿床是产于月凤山火山盆地边缘、与偏碱性花岗斑岩(162.8 Ma, 孟祥金等, 2009)有关的斑岩型矿床.成矿斑岩或次火山岩在上侏罗统火山岩地层内超浅成侵位,边部伴有大量的隐爆角砾发育.矿化发生在斑岩体内以及接触带中,蚀变类型有别于钦杭带的德兴式斑岩铜矿,缺少钾交代作用,发育大量铁锰碳酸盐蚀变(孟祥金等, 2009).

邵武—河源断裂以及吴川—四会断裂和合浦—北流断裂,是区内最具代表性的走滑断裂(徐嘉炜等, 1985),其启动于侏罗纪,在白垩纪(135~100 Ma)再度强烈活动,主要表现为右旋走滑作用(李三忠等, 2017).受这些走滑断层控制和约束,华夏地块上发育一系列拉分盆地和裂陷盆地(李三忠等, 2017).这些拉分盆地和火山裂陷盆地,作为区域应力由压扭到张扭转的标志产物,控制了武夷山成矿带,特别是南亚带铀金铅锌成矿作用,大量矿床主要沿邵武—河源断裂带集中产出(杨明德和姚金炎, 2008).

我们的S波速度模型揭示,与上述一系列大型NE-NNE向的走滑断层相伴,华夏地块还相应地发育正断层或铲式断层(图11),导致巨量花岗岩岩浆侵位和大规模伸展断陷盆地的形成,形成所谓的以伸展断陷盆地为盆和以花岗岩带为岭的典型盆岭构造(舒良树等, 2004; 杨明桂等, 2009; 舒良树, 2012).这些花岗岩以壳融花岗岩为主,主体分布于南岭及武夷山(杨明桂等, 2009).它们沿深部拆离构造大规模侵位,形成花岗岩基,顺浅部铲式断层小体积侵位,形成花岗岩岩株或岩瘤,伴生大量的花岗岩钨锡矿床(毛景文等, 2008).

总之,我们的S波速度模型揭示:不同的断裂记录了不同的地质演化过程,控制了区域构造-岩浆-成矿作用.逆冲断裂活动提供了一个挤压扭动状态和较为封闭的构造环境,利于岩浆充分分异和流体出熔汇聚,促进了钦杭带斑岩铜矿的形成发育;走滑



断裂活动导致了走滑拉分盆地和火山断陷盆地发育,岩浆沿盆地中心超浅成侵位,控制了武夷山浅成地温热液活动和次火山岩(类斑岩)铀金铅锌矿的形成发育;拆离断层发育导致大型花岗岩基或小型岩体侵位,促进了武夷山和南岭等壳融花岗岩有关的钨锡妮姐等矿床形成。

### 2.3 成矿金属组合与深部结构控制

我们的反演模型结果显示:武夷山成矿带的平均 S 波速度略高于钦杭成矿带.这在直接测量得到不同周期的相速度结果中也有体现(图 7).林吉焱等(2020)也发现武夷山成矿带的重力异常相对于钦杭成矿带明显偏低,推测武夷山成矿带内部的短波长重力异常可能受到了走滑断裂和岩浆岩分布的影响.我们认为,这种整体性质的差异,实际上是上地壳乃至整个地壳物质组成与结构差异的综合结果,并可能被现今地球物理观测到的结构与物性参数(地壳厚度、速度、波速比等)以及岩浆地球化学示踪反演的源区物质变化所记录。

Liu 等(2021)利用 5244 个化探样品(含 75 种元素),根据元素相关性聚类分析计算结果,发现大致以江山—绍兴断裂为界,北侧的钦杭成矿带与南侧的武夷山成矿带具有显著不同的元素组合分布.钦杭成矿带显示  $\text{CaO-MgO-Sr-Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  组合聚类特征,反映偏中基性的地壳组成特征,而武夷山成矿带显示  $\text{K}_2\text{O-Sn-Hf-Zr-Ta-Th}$  组合聚类特征,反映偏中酸性富 W-Sn-Nb-Ta-Zr-Hf 的地壳组成特点.这一结果大致与华南地区地壳  $V_P/V_S$  变化相吻合(Zhang et al., 2021a, b; Huang et al., 2022).  $V_P/V_S$  在钦杭成矿带变化较大(Zhang et al., 2021a, b),反映其地壳物质的不均一性,这与江南造山带局部残留新元古洋壳残片和弧玄武岩相一致;武夷山成矿带  $V_P/V_S$  总体较低,但向东南沿海逐渐增高,反映武夷山地壳偏酸性,但向海方向镁铁质增多. P 波速度结构也显示,钦杭成矿带下地壳具有高速特征(徐涛等, 2014; Lin et al., 2021),武夷成矿带下地壳速度降低,但在政和—大浦断裂附近下地壳异常高速(Lin et al., 2021),反映钦杭成矿带因洋壳堆叠和岩浆底侵而具有镁铁质新生下地壳特征(侯爵等, 2022),政和—大浦断裂下地壳发生强烈的岩浆底侵(Lin et al., 2021),而武夷山成矿带下地壳仍以古老地壳为特征.这一推断也得到了区域岩浆岩锆石 Hf 同位素填图结果所佐证.初步的 Hf 同位素填图(张智宇, 个人通讯)表明,钦杭成矿带岩浆岩以高  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值、低模式年龄( $T_{\text{DM}}^\circ$ )为特

征,反映其下地壳主要为新生的镁铁质组分,相反,武夷山成矿带岩浆岩以低  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值、高模式年龄( $T_{\text{DM}}^\circ$ )为特征,指示其地壳以古老地壳为特征。

然而,我们观测到武夷山成矿带浅部地壳平均 S 波速度略高于钦杭成矿带,与相应的下地壳速度结构及波速比变化正好相反.一个可能的解释是,上地壳的物质组分控制了 S 波速度变化.武夷山成矿带被大量的花岗岩侵入,部分区域被长英质火山岩覆盖,而钦杭成矿带内虽然也发育小体积侵位的花岗岩和斑岩体,但其规模和强度远逊于武夷山成矿带.由于花岗岩相较于沉积岩通常具有更高的 S 波速度,因此,武夷山成矿带内的平均 S 波速度高于钦杭成矿带。

综上所述,我们认为,研究区地壳具有明显的侧向不均一性和垂向差异性,武夷山成矿带浅部地壳平均 S 波速度高,以大量的花岗岩和火山岩发育为特征,下地壳以相对低速为特征,主体为古老地壳,相应的成矿组合以亲地壳的 W-Sn-U-Pb-Zn-Ag 组合为主.相反,钦杭成矿带浅部地壳平均 S 波速度较低,以古老基底出露为特征,下地壳则为镁铁质的新生物质,有较多的幔源组分卷入,相应的成矿组合以亲地幔的 Cu-Au 组合为主.正是这种不同的地壳物质组分及不同的断裂系统,控制了两大成矿带形成发育和各具特色的金属矿化组合。

## 3 结论

(1)“万载—永春”剖面 S 波速度模型清晰刻画了华南地块四种不同类型的区域断裂及其向深部的展布形态和速度特征.武夷山成矿带内的走滑断裂几乎均以高角度切穿上地壳,它们与相伴发育的铲式断层控制了大量的走滑拉分盆地和火山断陷盆地的发育;钦杭成矿带的江山—绍兴断裂显示逆冲性质,西北倾向,深切地壳,控制中生代斑岩岩浆系统。

(2)“万载—永春”剖面的浅部地壳在横向上具有强烈的速度异常变化,且武夷山成矿带内的平均 S 波速度略高于钦杭成矿带.这种速度差异反映,武夷山成矿带上地壳以壳源花岗岩和酸性火山岩为主体,而钦杭成矿带上地壳以巨厚的元古宙变质火山—沉积岩系为特征。

(3)综合分析表明,在钦杭成矿带,尽管浅部地壳平均 S 波速度低,但下地壳高速异常显著,反映其下部地壳偏镁铁质;武夷山成矿带浅部地壳平均 S 波速度高,但下地壳相对低速,反映下部地壳为偏长

英质古老地壳。下部地壳物质组成差异是导致两个成矿带具有不同成矿金属组合的根本原因。

**致谢** 感谢中国地震局地球物理勘探中心的野外数据采集工作。感谢 Wang Yadong 博士提供的代码和在数据处理过程中的悉心指导。感谢南方科技大学杨英杰教授、中国科学院地质与地球物理研究所苗来成研究员、中国地质科学院严加永研究员和张永谦副研究员、桂林理工大学俞贵平博士有益的建议和帮助。

## References

- Bensen 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. *Geophysical Journal International*, 169(3): 1239-1260.
- Boué P, Roux P, Campillo M, et al. 2013. Double beamforming processing in a seismic prospecting context. *Geophysics*, 78(3): V101-V108.
- Boué P, Roux P, Campillo M, et al. 2014. Phase velocity tomography of surface waves using ambient noise cross correlation and array processing. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(1): 519-529.
- Brocher T M. 2005. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6): 2081-2092.
- Cai H T, Hao K C, Jin X, et al. 2015. A three-dimensional  $V_P$ ,  $V_S$ , and  $V_P/V_S$  crustal structure in Fujian, Southeast China, from active- and passive-source experiments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 517-527, doi: 10.1016/j.jseaeas.2015.06.014.
- Carter A, Roques D, Bristow C, et al. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia; Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29(3): 211-214.
- Chang Y F, Liu X P, Wu Y C. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House. 71-76.
- Chen G H, Shu L S, Shu L M, et al. 2016. Geological characteristics and mineralization setting of the Zhuxi tungsten (copper) polymetallic deposit in the Eastern Jiangnan Orogen. *Science China: Earth Sciences*, 59(4): 803-823, doi: 10.1007/s11430-015-5200-9.
- Chen H, Ni P, Wang G G, et al. 2017. Petrogenesis of ore-related granodiorite porphyry in the Jiande Copper deposit, SE China; implications for the tectonic setting and mineralization. *Resource Geology*, 67(2): 117-138.
- Chen J, Lu J J, Chen W F, et al. 2008. W-Sn-Nb-Ta-bearing granites in the Nanling Range and their relationship to metallogenesis. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 14(4): 459-473.
- Chen Y C, Pei R F, Zhang H L, et al. 1989. Nonferrous and Rare Metal Deposits Related to Granite in Nanling Area (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.
- Chen Z L, Han F B, Yang N, et al. 2012. Topographic erosive diversities of the Xiangshan uranium ore-field, Jiangxi province and its implications for ore-preservation: evidences from fission track dating of apatite. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(7): 2371-2384, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.022.
- De Cacqueray B, Roux P, Campillo M, et al. 2011. Elastic-wave identification and extraction through array processing: An experimental investigation at the laboratory scale. *Journal of Applied Geophysics*, 74(2-3): 81-88.
- Ding J H, Fan J F, Yin J N, et al. 2016. Geological characteristics and mineral resource potential of the Wuyishan Cu-Pb-Zn polymetallic metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 90(7): 1537-1550.
- Dong S W, Zhang Y Q, Long C X, et al. 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 81(11): 1449-1461.
- Fan H H, Ling H F, Wang D Z, et al. 2003. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan Uranium ore-field. *Uranium Geology* (in Chinese), 19(4): 208-213.
- Gao L E, Gao J H, Zhao L H, et al. 2017. The Miocene leucogranite in the Nariyongcuo Gneiss Dome, southern Tibet: Products from melting metapelite and fractional crystallization. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 33(8): 2395-2411.
- Gkogkas K, Lin F C, Allam A A, et al. 2021. Shallow damage zone structure of the Wasatch fault in Salt Lake City from ambient-noise double beamforming with a temporary linear array. *Seismological Research Letters*, 92(4): 2453-2463.
- Guo L H, Gao R. 2018. Potential-field evidence for the tectonic boundaries of the central and western Jiangnan belt in South China. *Precambrian Research*, 309: 45-55.
- Guo L H, Gao R, Shi L, et al. 2019. Crustal thickness and Poisson's ratios of South China revealed from joint inversion of receiver function and gravity data. *Earth and Planetary Science Letters*, 510: 142-152.
- Han R B, Li Q S, Xu Y X, et al. 2019. Deep structure background and Poisson's ration beneath the intersection zone of Nanling and Wuyi. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 62(7): 2477-2489, doi: 10.6038/cjg2019M0207.
- He C S, Dong S W, Santosh M, et al. 2013. Seismic evidence for a geosuture between the Yangtze and Cathaysia Blocks, South China. *Scientific Reports*, 3(1): 2200, doi: 10.1038/srep02200.
- Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: an evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*, 84(6): 1081-1088.
- Hou J, Xu T, Lü Q T, et al. 2022. Deep background of large-scale Mesozoic Cu-Au-W mineralization in northeastern South China: constraints from Yingshan-Changshan wide-angle seismic data. *Science China Earth Sciences*, doi: 10.1007/s11430-022-9973-4.
- Hou Z Q, Zhang H R, Pan X F, et al. 2011. Porphyry Cu (-Mo-

- Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: Examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, 39(1-2): 21-45.
- Hou Z Q, Zheng Y C, Zeng L S, et al. 2012. Eocene-Oligocene granitoids in southern Tibet: constraints on crustal anatexis and tectonic evolution of the Himalayan orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 349-350: 38-52.
- Hou Z Q, Pan X F, Li Q Y, et al. 2013. The giant Dexing porphyry Cu-Mo-Au deposit in east China: product of melting of juvenile lower crust in an intracontinental setting. *Mineralium Deposita*, 48(8): 1019-1045.
- Hu R Z, Mao J W, Hua R M, et al. 2015. Intracontinental Mineralization of the South China Block (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Hu X Y, Bi B T, Liu G X, et al. 2017. The lithospheric electrical structure of Ji'an-Fuzhou profile in the east part of South China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(7): 2756-2766, doi: 10.6038/cjg20170721.
- Hua R M, Mao J W. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in east China. *Mineral Deposits* (in Chinese), 18(4): 300-308.
- Huang M F, Xu T, Lü Q T, et al. 2022. Crustal structure along the Wanzai-Yongchun profile in the Cathaysia Block, Southeast China, constrained by a joint active- and passive-source seismic experiment. *Geophysical Journal International*, 231: 384-393, doi: 10.1093/gji/ggac198.
- Isozaki Y. 1997. Jurassic accretion tectonics of Japan. *The Island Arc*, 6(1): 25-51.
- Krüger F, Weber M, Scherbaum F, et al. 1993. Double beam analysis of anomalies in the core-mantle boundary region. *Geophysical Research Letters*, 20(14): 1475-1478.
- Li G L, Niu F L, Yang Y J, et al. 2018. An investigation of time-frequency domain phase-weighted stacking and its application to phase-velocity extraction from ambient noise's empirical Green's functions. *Geophysical Journal International*, 212(2): 1143-1156.
- Li P, Jin X, Wang S X, et al. 2015. Crustal velocity structure of the Shaowu-Nanping-Pingtang transect through Fujian from deep seismic sounding-tectonic implications. *Science China Earth Sciences*, 58(12): 2188-2199.
- Li Q S, Gao R, Wu F T, et al. 2013. Seismic structure in the southeastern China using teleseismic receiver functions. *Tectonophysics*, 606: 24-35.
- Li S Z, Zang Y B, Wang P C, et al. 2017. Mesozoic tectonic transition in South China and initiation of Palaeo-Pacific subduction. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 24(4): 213-225.
- 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. *Geophysical Journal International*, 173(1): 281-298.
- Lin J Y, Tang G B, Xu T, et al. 2020. P-wave velocity structure in upper crust and crystalline basement of the Qinhang and Wuyishan metallogenic belts; constraint from the Wanzai-Hui'an deep seismic sounding profile. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(12): 4396-4409, doi: 10.6038/cjg202000158.
- Lin J Y, Xu T, Cai H T, et al. 2021. Crustal velocity structure of Cathaysia Block from an active-source seismic profile between Wanzai and Hui'an in SE China. *Tectonophysics*, 811: 228874.
- Liu C Z, Yin W Q, Zhang J, et al. 2009. Ore-controlling factors and prospecting prediction criteria of the Sn-Cu polymetallic deposit in Wuyishan metallogenic zone. *Mineral Resources and Geology* (in Chinese), 23(2): 124-128.
- Liu W Q, Lü Q T, Cheng Z Z, et al. 2021. Multi-element geochemical data mining: Implications for block boundaries and deposit distributions in South China. *Ore Geology Reviews*, 133: 104063.
- Luo F, Yan J Y, Fu G M, et al. 2019. Crust thickness and its apocalyptic of mineralization in South China: Constraint from Satellite Gravity data. *Geology in China* (in Chinese), 46(4): 759-774, doi: 10.12029/gc20190407.
- Luo Y H, Yang Y J, Xu Y X, et al. 2015. On the limitations of interstation distances in ambient noise tomography. *Geophysical Journal International*, 201(2): 652-661.
- Lü Q T, Dong S W, Shi D N, et al. 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of middle and lower reaches of Yangtze metallogenic belt: a review from SinoProbe. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 30(4): 889-906.
- Mao J R, Li Z L, Ye H M. 2014. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: retrospect and prospect. *Science China Earth Sciences*, 57(12): 2853-2877.
- Mao J W, Xie G Q, Guo C L, et al. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 14(4): 510-526.
- Mao J W, Wu S H, Song S W, et al. 2020. The world-class Jiangnan tungsten belt: Geological characteristics, metallogeny, and ore deposit model. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 65(33): 3746-3762, doi: 10.1360/TB-2020-0370.
- Meng X J, Hou Z Q, Dong G Y, et al. 2009. Geological characteristics and mineralization timing of the Lengshuikeng porphyry Pb-Zn-Ag deposit, Jiangxi province. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 83(12): 1951-1967.
- Nakata N, Boué P, Brenguier F, et al. 2016. Body and surface wave reconstruction from seismic noise correlations between arrays at Piton de la Fournaise volcano. *Geophysical Research Letters*, 43(3): 1047-1054.
- Nakata N, Gualtieri L, Fichtner A. 2019. Seismic Ambient Noise. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ni P, Wang G G. 2017. Multiple episodes of Cu-Au mineralization in the northeastern section of the Qin-Hang metallogenic belt induced by reworking of continental crust. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 33(11): 3373-3394.
- Poli P, Thomas C, Campillo M, et al. 2015. Imaging the D' reflector with noise correlations. *Geophysical Research Letters*, 42(1): 60-65.
- Ren J S. 1984. The Indosinian orogeny and its significance in the tectonic evolution of China. *Bulletin of the Chinese Academy*

- of *Geological Sciences* (in Chinese), 9: 31-44.
- Richards J P. 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: products of remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology*, 37(3): 247-250.
- Richards J P. 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo ±Au deposits: Just add water. *Economic Geology*, 106(7): 1075-1081.
- Rost S, Thomas C. 2002. Array seismology: Methods and applications. *Reviews of Geophysics*, 40(3): 2-1-2-27.
- Roux P, Cornuelle B D, Kuperman W A, et al. 2008. The structure of raylike arrivals in a shallow-water waveguide. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6): 3430-3439.
- Roux P, Iturbe I, Nicolas B, et al. 2011. Travel-time tomography in shallow water: Experimental demonstration at an ultrasonic scale. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(3): 1232-1241.
- Roux P, Moreau L, Lecointre A, et al. 2016. A methodological approach towards high-resolution surface wave imaging of the San Jacinto Fault Zone using ambient-noise recordings at a spatially dense array. *Geophysical Journal International*, 206(2): 980-992.
- Shu L S, Zhou X M, Deng P, et al. 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 23(9-10): 876-884.
- Shu L S. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 31(7): 1035-1053.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3-41.
- Snieder R. 2004. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, 69(4): 046610, doi: 10.1103/PhysRevE.69.046610.
- Tang X S, Nie B, Li J. 2011. Uranium metallogenic characteristics and exploration direction of Wuyishan metallogenic belt. *Uranium Geology* (in Chinese), 27(2): 69-73.
- Wang G G, Ni P, Zhao K D, et al. 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China: Implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 150: 135-154.
- Wang G G, Ni P, Wang R C, et al. 2013. Geological, fluid inclusion and isotopic studies of the Yinshan Cu-Au-Pb-Zn-Ag deposit, South China: Implications for ore genesis and exploration. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 343-360.
- Wang G G, Ni P, Yao J, et al. 2015. The link between subduction-modified lithosphere and the giant Dexing porphyry copper deposit, South China: Constraints from high-Mg adakitic rocks. *Ore Geology Reviews*, 67: 109-126.
- Wang Y D, Lin F C, Ward K M. 2019a. Ambient noise tomography across the Cascadia subduction zone using dense linear seismic arrays and double beamforming. *Geophysical Journal International*, 217(3): 1668-1680.
- Wang Y D, Allam A, Lin F C. 2019b. Imaging the fault damage zone of the San Jacinto fault near Anza with ambient noise tomography using a dense nodal array. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 12938-12948.
- Wang Z, Dahlen F A. 1995. Validity of surface-wave ray theory on a laterally heterogeneous earth. *Geophysical Journal International*, 123(3): 757-773.
- Wu Y B, Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China. *Gondwana Research*, 23(4): 1402-1428.
- Xiang X K, Liu X M, Zhan G N. 2012. Discovery of Shimensi super-large tungsten deposit and its prospecting significance in Dahutang area, Jiangxi province. *Resources Survey & Environment* (in Chinese), 33(3): 141-151.
- Xu D M, Lin Z Y, Long W G, et al. 2012. Research history and current situation of Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt, South China. *Geology and Mineral Resources of South China* (in Chinese), 28(4): 277-289.
- Xu J W, Cui K R, Liu Q, et al. 1985. Mesozoic sinistral transcurrent faulting along the continent margin in East Asia. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 5(2): 51-64.
- Xu T, Zhang Z J, Tian X B, et al. 2014. Crustal structure beneath the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: constraints from active source seismic experiment along the Lixin to Yixing profile in East China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 30(4): 918-930.
- Yang M D, Yao J Y. 2008. Prospecting evaluation of the W, Sn, Cu, Au, Ag metallogenic belt in Wuyishan area. *Mineral Resources and Geology* (in Chinese), 22(1): 33-35.
- Yang M G, Mei Y W. 1997. Characteristics of geology and metallization in the Qinzhou-Hangzhou paleoplate juncture. *Geology and Mineral Resources of South China* (in Chinese), (3): 52-59.
- Yang M G, Huang S B, Lou F S, et al. 2009. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in Southeast China continental area. *Geology in China* (in Chinese), 36(3): 528-543.
- Yang Y J, Ritzwoller M H, Levshin A L, et al. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophysical Journal International*, 168(1): 259-274.
- Yang Y J, Ritzwoller M H, Zheng Y, et al. 2012. A synoptic view of the distribution and connectivity of the mid-crustal low velocity zone beneath Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4): B04303, doi: 10.1029/2011JB008810.
- 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. *Geophysical Journal International*, 166(2): 732-744.
- Yao H J, Van Der Hilst R D. 2009. Analysis of ambient noise energy distribution and phase velocity bias in ambient noise tomography, with application to SE Tibet. *Geophysical Journal International*, 179(2): 1113-1132.
- Ye T Z, Huang C K, Deng Z Q. 2017. Spatial database of 1:2500000 digital geologic map of People's Republic of China. *Geology in China*

- (in Chinese), 44(S1): 19-24, 139-146.
- Ye Z, Li Q S, Gao R, et al. 2013. Seismic receiver functions revealing crust and upper mantle structure beneath the continental margin of southeastern China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(9): 2947-2958, doi: 10.6038/cjg20130909.
- Zhan Z W, Ni S D, Helmberger D V, et al. 2010. Retrieval of Moho-reflected shear wave arrivals from ambient seismic noise. *Geophysical Journal International*, 182(1): 408-420.
- 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.
- Zhang S B, Zheng Y F. 2013. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China. *Gondwana Research*, 23(4): 1241-1260.
- Zhang W L, Li Z Y, Liu D Z, et al. 2015. The neotectonic activity trail of Fuzhou-Yongfeng fault and its significance to uranium ore exploration in central Jiangxi province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research* (in Chinese), 30(1): 23-29.
- Zhang Y Q, Xu X B, Jia D, et al. 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 16(1): 234-247.
- Zhang Y Q, Shi D N, Lü Q T, et al. 2021a. A fine crustal structure and geodynamics revealed by receiver functions along the Guangchang-Putian line in the Cathaysia Block, South China. *Tectonophysics*, 815: 229007, doi: 10.1016/j.tecto.2021.229007.
- Zhang Y Q, Shi D N, Lü Q T, et al. 2021b. The crustal thickness and composition in the eastern South China Block constrained by receiver functions: implications for the geological setting and metallogenesis. *Ore Geology Reviews*, 130: 103988, doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.103988.
- Zhang Z J, Teng J W, Badal J, et al. 2008. Construction of regional and local seismic anisotropic structures from wide-angle seismic data: crustal deformation in the southeast of China. *Journal of Seismology*, 13(2): 241-252.
- Zhao B, Bai Z M, Xu T, et al. 2013. Lithological model of the South China crust based on integrated geophysical data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 10(2): 025005, doi: 10.1088/1742-2132/10/2/025005.
- Zheng M J, Xu T, Lü Q T, et al. 2022. Upper crustal structure beneath the Qin-Hang and Wuyishan metallogenic belts in Southeast China as revealed by a joint active and passive seismic experiment. *Geophysical Journal International*, 232(1): 190-200.
- Zheng T Y, Zhao L, He Y M, et al. 2014. Seismic imaging of crustal reworking and lithospheric modification in eastern China. *Geophysical Journal International*, 196(2): 656-670.
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the middle and lower reaches of the Yangtze River area. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 24(8): 1665-1678.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26-33.
- Zhou Z P. 2018. New understanding of Fuzhou-Yongfeng fault structure using magnetotelluric. *West-China Exploration Engineering* (in Chinese), 30(10): 171-173, 176.

## 附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 71-76.
- 陈国华, 舒良树, 舒立旻等. 2015. 江南东段朱溪钨(铜)多金属矿床的地质特征与成矿背景. 中国科学: 地球科学, 45(12): 1799-1818.
- 陈骏, 陆建军, 陈卫锋等. 2008. 南岭地区钨锡钽钽花岗岩及其成矿作用. 高校地质学报, 14(4): 459-473.
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良等. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质. 北京: 地质出版社.
- 陈正乐, 韩凤彬, 杨农等. 2012. 江西相山铀矿田地貌剥蚀特征及其控矿意义——磷灰石裂变径迹证据. 地球物理学报, 55(7): 2371-2384, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.022.
- 丁建华, 范建福, 阴江宁等. 2016. 武夷山 Cu-Pb-Zn 多金属成矿带主要成矿地质特征及潜力分析. 地质学报, 90(7): 1537-1550.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴等. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81(11): 1449-1461.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋等. 2003. 相山铀矿田成矿机理研究. 铀矿地质, 19(4): 208-213.
- 高利娥, 高家昊, 赵令浩等. 2017. 藏南拿日雍错片麻岩穹窿中新世淡色花岗岩的形成过程: 变泥质岩部分熔融与分离结晶作用. 岩石学报, 33(8): 2395-2411.
- 韩如冰, 李秋生, 徐义贤等. 2019. 南岭—武夷交汇区的深部背景及地壳泊松比. 地球物理学报, 62(7): 2477-2489, doi: 10.6038/cjg2019M0207.
- 侯爵, 徐涛, 吕庆田等. 2022. 华南东北部中生代铜金钨大规模成矿的深部背景: 来自英山—常山宽角地震资料的约束. 中国科学: 地球科学, doi: 10.1360/SSTe-2022-0045.
- 胡瑞忠, 毛景文, 华仁民等. 2015. 华南陆块陆内成矿作用. 北京: 科学出版社.
- 胡祥云, 毕奔腾, 刘国兴等. 2017. 华南东部吉安—福州剖面岩石圈电性结构研究. 地球物理学报, 60(7): 2756-2766, doi: 10.6038/cjg20170721.
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. 矿床地质, 18(4): 300-308.
- 李培, 金星, 王善雄等. 2015. 福建邵武—南平—平潭深地震测深剖面的地壳速度结构及其构造意义. 中国科学: 地球科学, 45(11): 1757-1767.
- 李三忠, 臧艺博, 王鹏程等. 2017. 华南中生代构造转换和古太平洋俯冲启动. 地学前缘, 24(4): 213-225.
- 林吉焱, 唐国彬, 徐涛等. 2020. 钦杭—武夷山成矿带上地壳速度结构与基底特征: 万载—惠安宽角反射/折射地震剖面约束. 地球物理学报, 63(12): 4396-4409, doi: 10.6038/cjg2020O0158.
- 刘成忠, 尹维青, 张婧等. 2009. 武夷山成矿带锡铜多金属矿床控



- 矿条件和找矿预测标志. 矿产与地质, 23(2): 124-128.
- 罗凡, 严加永, 付光明等. 2019. 华南地区地壳厚度变化及对成矿类型的制约: 来自卫星重力数据的约束. 中国地质, 46(4): 759-774, doi: 10.12029/gc20190407.
- 吕庆田, 董树文, 史大年等. 2014. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型——深部探测(SinoProbe)综述. 岩石学报, 30(4): 889-906.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景. 中国科学: 地球科学, 44(12): 2593-2617.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽等. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510-526.
- 毛景文, 吴胜华, 宋世伟等. 2020. 江南世界级钨矿带: 地质特征、成矿规律和矿床模型. 科学通报, 65(33): 3746-3762, doi: 10.1360/TB-2020-0370.
- 孟祥金, 侯增谦, 董光裕等. 2009. 江西冷水坑斑岩型铅锌银矿床地质特征、热液蚀变与成矿时限. 地质学报, 83(12): 1951-1967.
- 倪培, 王国光. 2017. 大陆再造与钦杭带北东段多期铜金成矿作用. 岩石学报, 33(11): 3373-3394.
- 任纪舜. 1984. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义. 中国地质科学院院报, 9: 31-44.
- 舒良树, 周新民, 邓平等. 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化. 地质通报, 23(9-10): 876-884.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035-1053.
- 唐湘生, 聂斌, 李嘉. 2011. 武夷山成矿带铀成矿特征与找矿方向. 铀矿地质, 27(2): 69-73.
- 项新葵, 刘显沐, 詹国年. 2012. 江西省大湖塘石门寺矿区超大型钨矿的发现及找矿意义. 资源调查与环境, 33(3): 141-151.
- 徐德明, 蒯志永, 龙文国等. 2012. 钦杭成矿带的研究历史和现状. 华南地质与矿产, 28(4): 277-289.
- 徐嘉炜, 崔可锐, 刘庆等. 1985. 东亚大陆边缘中生代的左行平移断裂作用. 海洋地质与第四纪地质, 5(2): 51-64.
- 徐涛, 张忠杰, 田小波等. 2014. 长江中下游成矿带及邻区地壳速度结构: 来自利辛-宜兴宽角地震资料的约束. 岩石学报, 30(4): 918-930.
- 杨明德, 姚金炎. 2008. 武夷山地区钨锡铜金银成矿区带找矿评价. 矿产与地质, 22(1): 33-35.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征. 华南地质与矿产, (3): 52-59.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生等. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用. 中国地质, 36(3): 528-543.
- 叶天竺, 黄崇轲, 邓志奇. 2017. 1:250万中华人民共和国数字地质图空间数据库. 中国地质, 44(S1): 19-24, 139-146.
- 叶卓, 李秋生, 高锐等. 2013. 中国大陆东南缘地震接收函数与地壳和上地幔结构. 地球物理学报, 56(9): 2947-2958, doi: 10.6038/cjg20130909.
- 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.
- 张万良, 李子颖, 刘德长等. 2015. 赣中抚州—永丰断裂新构造活动踪迹及其找矿意义. 地质找矿论丛, 30(1): 23-29.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东等. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录. 地学前缘, 16(1): 234-247.
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665-1678.
- 周忠平. 2018. 利用MT对抚州—永丰断裂构造的新认识. 西部探矿工程, 30(10): 171-173, 176.

(本文编辑 何燕)