

地质学报

Acta Geologica Sinica

ISSN 0001-5717, CN 11-1951/P

《地质学报》网络首发论文

题目: 铜陵矿集区上地壳三维横波速度结构特征
作者: 赵荣涛, 冯梅, 安美建, 杨艳, 史大年, 刘沙沙, 黄什
DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025430
收稿日期: 2025-07-03
网络首发日期: 2025-12-12
引用格式: 赵荣涛, 冯梅, 安美建, 杨艳, 史大年, 刘沙沙, 黄什. 铜陵矿集区上地壳三维横波速度结构特征[J/OL]. 地质学报.
<https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025430>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

铜陵矿集区上地壳三维横波速度结构特征

赵荣涛¹⁾, 冯梅¹⁾, 安美建¹⁾, 杨艳¹⁾, 史大年¹⁾, 刘沙沙²⁾, 黄什²⁾

1) 中国地质科学院, 北京, 100037;

2) 安徽省地质矿产勘查局 321 地质队, 安徽铜陵, 244033

内容提要: 铜陵是长江中下游成矿带内极具特色的矿集区, 其浅部地壳波速结构对于揭示整个矿集区中生代的成矿过程具有重要意义, 对于开展深部找矿也大有益处。利用在铜陵东部 2022~2023 年间部署的最小台间距为 2~5 km 的 57 个宽频地震台站记录的连续地震数据, 通过背景噪声面波层析成像方法获得了铜陵矿集区高精度上地壳三维横波速度结构。结果显示, 宣南凹陷浅部横波速度显著低于铜陵隆起, 二者之间的横波速度异常分界线勾勒出丁桥-戴江断裂产状: 倾向南东, 延伸深度达 3 km。铜陵隆起 1 km 深度之下存在比宣南凹陷更高的横波速度 (~3 km/s), 可能与铜陵隆起深部存在大规模花岗岩侵入体有关。且侵入体在新桥和狮子山深部呈上隆的岩盖形态, 在南部的凤凰山地区则表现为岩床形态。研究结果对认识铜陵矿集区成矿动力学过程有重要意义, 也为长江中下游成矿带的岩浆底侵成矿模式提供了新的地震学证据。

关键词: 背景噪声面波成像; 上地壳横波速度; 铜陵矿集区; 成矿模式

最新深部找矿案例实践证明, 地下深处超过 500 m 的上地壳顶部有巨大找矿潜力, 加强深部找矿将成为我国今后矿产勘查的重要方向。长江中下游成矿带是我国东部典型的中生代多金属成矿带, 素有中国东部“矿业走廊”的美誉。铜陵矿集区位于长江中下游多金属成矿带中部, 是中国东部最具代表性的大型层控硅卡岩铜、金矿集区之一(常印佛等, 1991; 吴才来等, 2013)。

近年来, 科研人员在铜陵矿集区开展了大量地质调查和深部结构探测方面的工作, 如成矿机制研究(毛景文等, 2009; Deng Jun et al., 2011; 徐晓春等, 2012), 提出了诸如多层楼成矿模式、叠加改造复合成矿模式等。深部结构探测包括深反射地震(吕庆田等, 2003, 2015), 重磁场研究(严加永等, 2015), 大地电磁测深剖面(Tang Jingtian et al., 2013; Zhang Kun et al., 2021)和重磁三维地质建模(兰学毅等, 2015)以及宽频地震探测(Jiang Guoming et al., 2013, 2015; Shi Danian et al., 2013; 江国明等, 2014; 徐晓等, 2015; Zhang Yunpeng et al., 2020; 赵荣涛等, 2024)等。地震

波速对于岩体三维分布比较敏感, 是探测矿区三维结构的有效手段之一。远震体波层析成像揭示长江中下游成矿带从地壳到上地幔 400 km 深度的 P 波速度具有两高一低的“三明治”结构特征(Jiang Guoming et al., 2013)。接收函数成像结果显示整个长江中下游成矿带 Moho 面具有明显的“幔隆”特征(Shi Danian et al., 2013)。通过在近震走时数据中加入移动式气枪震源数据, 获得了郯庐断裂带及邻区的三维地壳结构, 对上地壳结构提供了部分约束, 提出中下扬子成矿带下方较高的 P 波和 S 波波速可能与中生代岩石圈拆沉和软流圈上涌有关(Zhang Yunpeng et al., 2020)。

与远震体波层析成像相比, 背景噪声面波成像不依赖于天然地震的发生, 提取的面波周期比远震面波相对较短, 可以对地壳浅层速度结构进行更好的约束。尽管人工地震探测在获取地壳结构方面具有更高的分辨率, 但需要高昂的经济成本和较为苛刻的施工条件。背景噪声面波层析成像是一种成本低廉、环境友好的三维横波速度结构探测方法。利用背景噪声面波和远震体波联合层析成像, 研究获

注: 本文为中国地质调查项目(编号 DD20221829, DD20243481)和国家自然科学基金项目(编号 42174068 和 42574115)联合资助的成果。

收稿日期: 2025-07-03; 改回日期: 2025-11-06; 责任编辑: 范宏瑞; 责任编辑: 蔡志慧。

作者简介: 赵荣涛, 男, 1990 年生。博士, 助理研究员, 主要从事深部探测研究。E-mail: rongtaozhao@126.com。

引用本文: 赵荣涛, 冯梅, 安美建, 杨艳, 史大年, 刘沙沙, 黄什. 2025. 铜陵矿集区上地壳三维横波速度结构特征. 地质学报, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025430.

Zhao Rongtao, Mei Feng, An Meijian, Yan Yang, Shi Danian, Liu Shasha, Huang Shi. 2025. Three-dimensional shear wave velocity tomography of the upper crust in the Tongling ore concentration area. Acta Geologica Sinica.

得了地表至 250 km 深度的三维剪切波速度模型 (Quyang Longbin et al., 2014)。然而,受到地震台站间距限制,前人研究多采用 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 以上的网格间距。虽然这些研究对铜陵矿集区都有覆盖,但解释精度偏低,仅能揭示区域大体构造格架,无法获取矿集区内部的精细地壳结构。铜陵是长江中下游成矿带内极具特色的矿集区,可能位于上地幔物质上涌中心 (Shi Danian et al., 2013),其浅部地壳波速结构对于揭示整个矿集区中生代的成矿过程具有重要意义,对于开展深部找矿也大有益处。因此,受“长江中下游铜陵矿集区深部结构及过程地质调查”项目资助,项目组从 2022 年开始,在铜陵矿集区东部先后部署了 57 个宽频地震台站 (图 1),本文利用

这些台站记录的连续波形数据,开展了背景噪声层析成像研究,获得了矿集区东部 6 km 以浅的上地壳 S 波速度结构。结果对于分析矿集区深部成矿潜力,指导深部找矿具有重要意义。

1 地质背景

铜陵矿集区位于长江中下游多金属成矿带中部,区内地层发育相对完整,除中、下泥盆统缺失外,从志留系到第四系层序地层发育齐全。铜陵矿集区内发育一系列北东向断裂,自西向东包括长江深断裂、铜陵中央逆冲断裂、丁桥-戴汇断裂 (图 1)。此外,矿集区内部一系列褶皱控制地层的产状,包括铜官山背斜、朱村向斜、永村桥-舒家店背斜和凤凰山

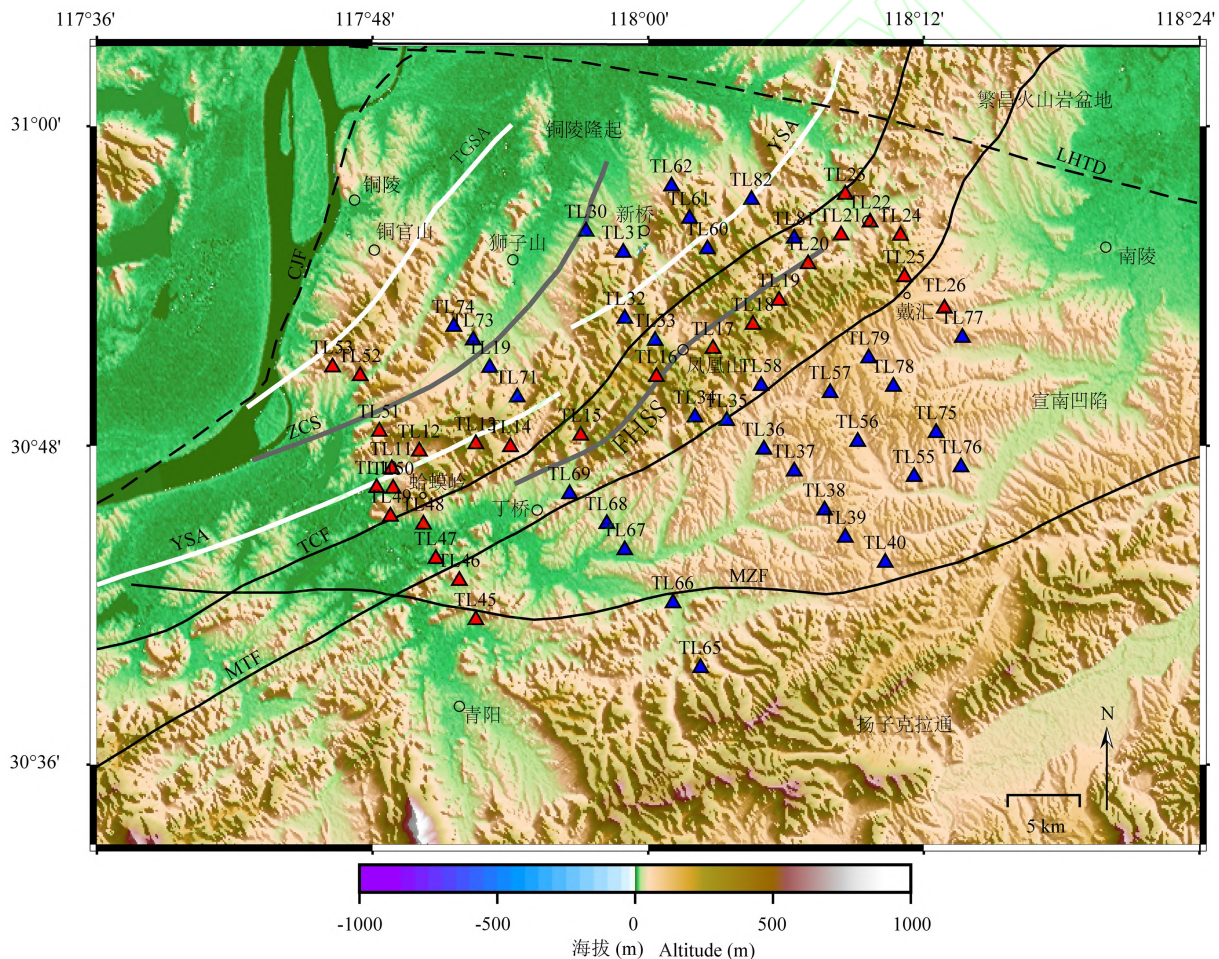


图 1 铜陵地区大地构造环境、构造分区及研究用地震台站

Fig. 1 Tectonic setting, tectonic divisions and seismic stations used in the study in the Tongling area

红色三角为 2022 年布设地震台站,蓝色三角为 2023 年布设地震台站。断裂: CJF—长江深断裂带(推测); LHTD—庐江-黄故闸-铜陵拆离断裂(推测); MTF—主逆冲断裂(丁桥-戴汇断裂); MZF—木镇断裂; TCF—铜陵中央逆冲断裂。褶皱: FHSS—凤凰山复向斜; TGSA—铜官山背斜; YSA—永村桥—舒家店背斜; ZCS—朱村向斜

The red and blue triangles indicate the seismic stations deployed in 2022 and 2023, respectively. Fault: CJF—Changjiang Fault (inferred); LHTD—Lujiang-Huangguzha-Tongling detachment (inferred); MTF—main thrust fault (Dingqiao-Daihui Fault); MZF—Muzhen Fault; TCF—Tongling Central Reverse Fault. Fold: FHSS—Fenghuangshan syncline; TGSA—Tongguanshan anticline; YSA—Yongcunqiao-Shujiadian anticline; ZCS—Zhucun syncline

复向斜(图 1)。受褶皱影响,地层强烈变形,因此矿集区所在地块亦称为铜陵隆起。北侧的庐江-黄姑闸-铜陵拆离断裂将铜陵隆起与繁昌火山岩盆地分隔。东侧以丁桥-戴汇断裂为界,与宣(城)南(陵)凹陷为邻。宣南凹陷南侧以木镇断裂为界,与扬子克拉通相邻。

2 数据

本文所使用的波形数据来自中国地质科学院分两阶段在铜陵东部部署的宽频地震台站。第一阶段 2022 年 7 月部署了 26 个宽频地震台,台站按“工”字形分布,便于覆盖铜陵东部大部地区(图 1 红三角)。第二阶段 2023 年 7 月部署的 31 个宽频地震台站,台站测线大致以近垂直于区域构造方向,即北西-南东向部署(图 1 蓝三角)。所有地震台站运行时间均不小于一年。两个阶段部署的地震台站对铜陵东部矿集区实现了很好的覆盖。宽频地震台站采用了 CMG-3ESPCD 便携式一体化三分量宽频地震仪,标准频带响应为 60 s,采样率设置为 100 Hz。由于地形和地理条件限制,台站间距在 2~5 km 之间变化。

本文使用从台站间噪声互相关函数中提取的瑞利波群速度作为观测。所以,我们首先对连续记录不少于一年的垂直分量波形进行了台站间互相关计算,提取各台站间格林函数。互相关计算之前先按照 Bensen et al. (2007)的方法进行了常规信号预处理,

即从原始波形中剔除仪器响应、去趋势和去均值;降低采样率至 0.1 sps (每秒采样点数)并按时长 4 h 截取波形;对截取波形进行时间域均一化和频率域白噪化以达到压制事件信号的目的。冯伟瑜等(2025)指出背景噪声源的分布对地震波互相关有影响,所以台站间格林函数对应于正向和反向传播时并非表现为绝对对称。台站间格林函数在时间域表现为一定的对称性,对应于面波的正向和反向传播。图 2 左图展示了台站对 TL40-TL74 之间互相关信号相位匹配滤波前(左)、后(右)的频散能量对比图。可以看出,滤波后的频散曲线有了较大改善。

然后,我们借助地震学程序包中的 do_mft 软件(Herrmann, 2013),利用多重滤波及相位匹配滤波技术从台站间格林函数中提取了瑞利波群速度频散曲线。面波频散提取采用自动处理与人工检查相结合的方式,以确保观测数据质量的可靠性。数据处理方法在以往的小区域研究中已做过详细描述(Feng Mei et al., 2021),并被验证具有可行性和可靠性。图 3a~d 显示周期为 1 s、3 s、5 s、7 s 的有效瑞利波观测路径分布,不同周期的数据覆盖存在差别。图 3e 显示不同周期观测量统计,可以看出观测群速度周期范围为 1~20 s,最小观测数量约为 50 条。本研究部署的密集地震台站为铜陵矿集区提供了优于以往的短周期数据覆盖(江国明等 2014;徐晓等, 2015),可为该区 10 km 以浅的上地壳结构提供理想的成像条件。

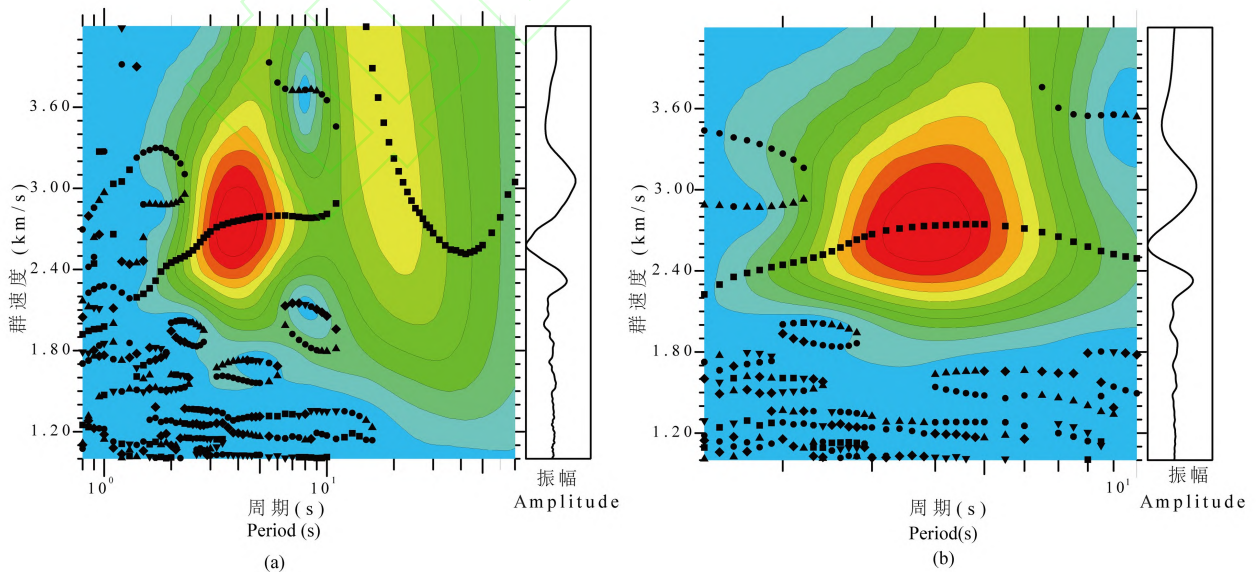


图 2 铜陵地区台站对 TL40-TL74 之间互相关信号相位匹配滤波前(a)、后(b)的频散能量对比图

Fig. 2 Comparison of dispersion energy diagrams for cross-correlation signals between stations TL40 and TL74 before (a) and after (b) phase-matched filtering in Tongling area

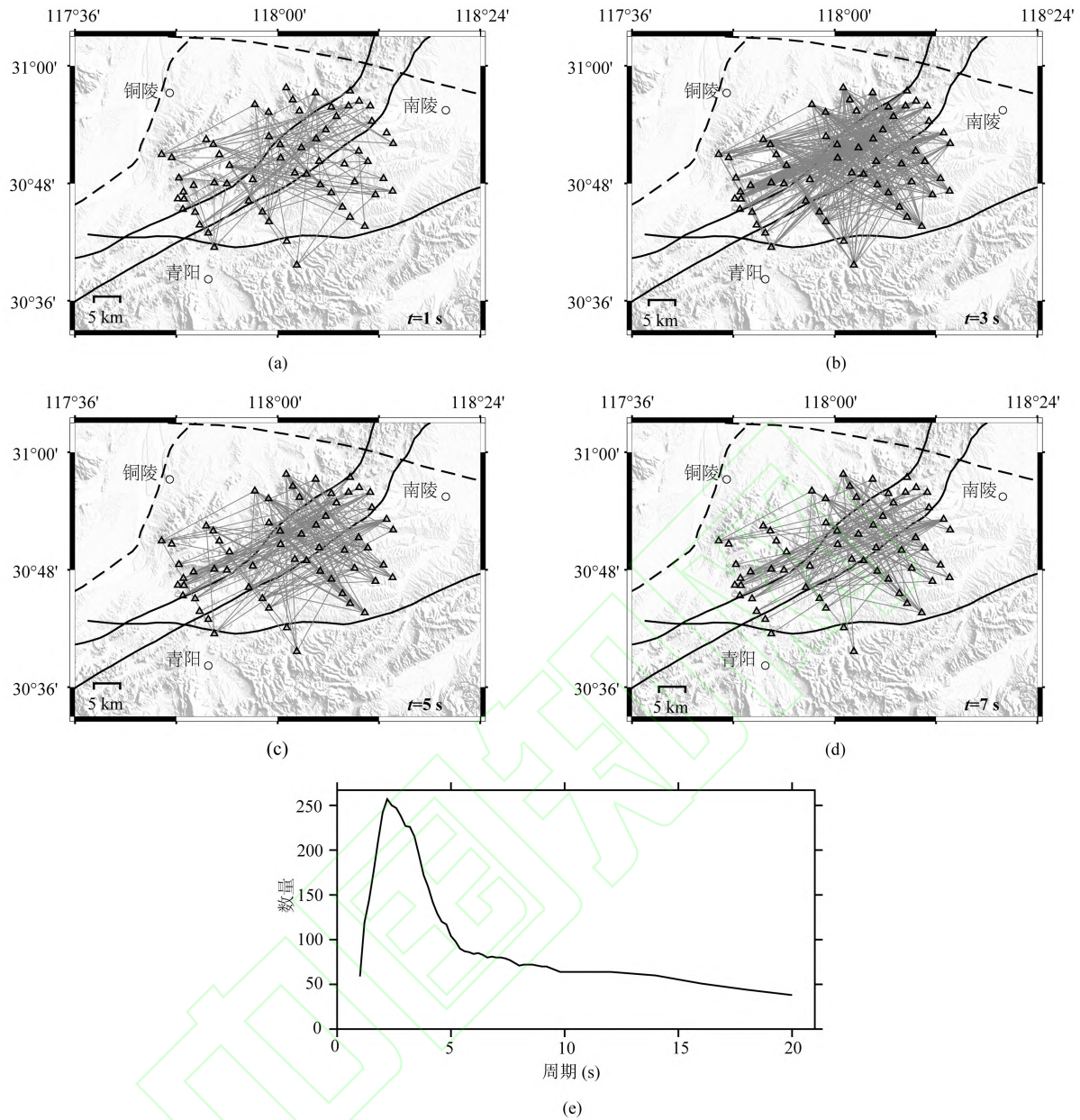


图 3 铜陵地区不同周期面波数据的地震射线分布情况

Fig. 3 Distribution of seismic rays for surface wave data at different periods in Tongling area

(a~d) 分别为周期为 $t=1$ s, 3 s, 5 s, 7 s 的面波射线分布; (e) 为周期为 1~20 s 的面波数据的地震射线数量

(a~d) are the surface wave ray path distributions for periods of $t=1$ s, 3 s, 5 s, 7 s, respectively; (e) is the number of seismic rays for surface wave data with periods of 1~20 s

3 方法

我们采用了 Feng Mei et al. (2010) 提出的三维面波层析成像方法提取研究区横波速度结构。该方法允许使用三维而非简化的一维横波速度结构作为初始模型, 而且可以同时加入横向和垂向平滑约束以获取横向和垂向相互协调的三维横波速度模型。该方法不仅在南美 (Assumpção et al., 2013)、南极 (An Meijian et al., 2015)、青藏高原 (Feng Mei et

al., 2011, 2020) 和中国东北 (Feng Mei et al., 2023) 等区域尺度研究中, 而且在南智利安第斯汇聚带 (Ramos et al., 2016)、龙门山断裂带 (Feng Mei et al., 2021) 和松辽盆地 (冯梅等, 2023) 等地方尺度研究中得到很好的应用验证。该方法的基本原理可概括为如下的线性方程组:

$$\begin{pmatrix} G \\ \lambda S \end{pmatrix} \Delta\beta = \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, G 是包含面波传播路径和面波速度 (U) 与横

波速度(β)偏微分信息($d\beta/dU$)的大型稀疏矩阵(也称敏感核)。 d 是与面波观测相关的数据矢量。 $\Delta\beta$ 是相对于三维横波速度初始模型(β_0)的扰动,即待定未知量。 S 是速度模型经向、纬向和垂向一阶梯度,即平坦正则化矩阵。 λ 是平衡模型平滑与观测拟合之间的权重系数。所以公式1中 G 和 λS 分别表示面波观测和正则化约束对反演模型 $\Delta\beta$ 的约束。对公式1进行迭代反演可以求取横波速度扰动 $\Delta\beta$ 或横波速度模型 $\beta(=\beta_0+\Delta\beta)$ 。将模型 β 作为新的初始模型,更新计算公式1包含 $d\beta/dU$ 的部分,再次反演。如此反复迭代直至观测拟合改善不再明显,即可得到最终解。

根据观测数据空间分布情况,研究区被划分为经向和纬向均为 0.04° ,垂向间距 0.5 km 的三维网格。考虑到观测数据分布最佳的周期为 3 s ,周期大于 10 s 时观测数据量骤降,所以本文将模型反演深度确定为 10 km 以浅的上地壳。本文采用 CRUST1.0

(Laske et al., 2012)地壳横波速度作为三维初始模型。但值得注意的是由于本研究区经纬度跨度范围仅为 1° 左右,相当于 CRUST1.0 模型中的一个网格,所以初始模型在整个研究区中几乎是相同的,即不随经纬度变化而变化。此外,由于 CRUST1.0 模型只包含上、中、下地壳三层,所以对于本文的模型反演深度 10 km 而言,初始模型波速在整个反演深度上均与 CRUST1.0 模型的上地壳波速相同,即不随深度变化而变化。

4 模型评估

我们采用上述方法对铜陵地区的瑞利面波群速度进行了三维横波速度反演。在展示反演结果之前,我们对模型进行了可靠性评估。图4显示初始模型(黑线)和反演模型(红线)对任意四条观测频散曲线(三角形)的拟合情况。可以看出,由于初始模型在整个研究区为同一个模型(黑线),即波速既不

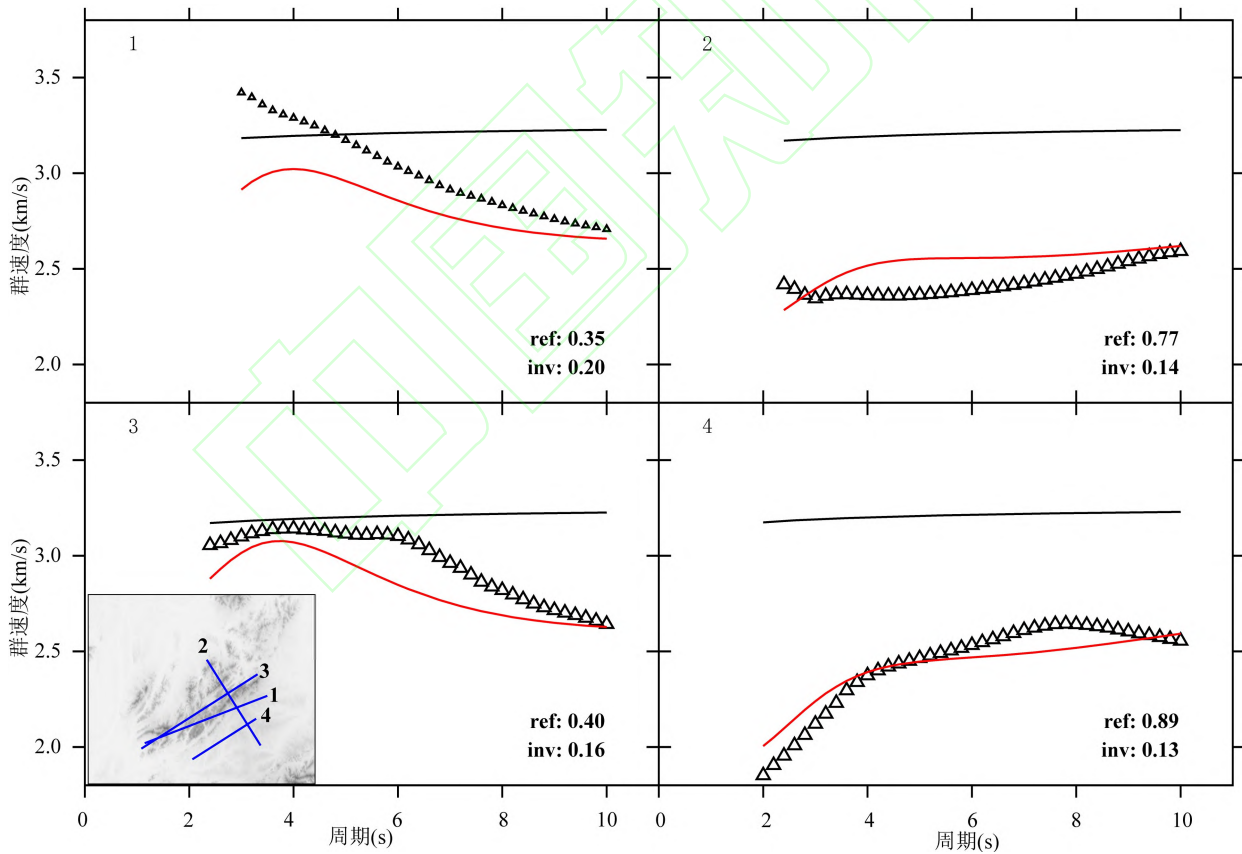


图4 铜陵地区反演模型(红色)对四条观测频散曲线(三角)的拟合实例

Fig. 4 Example of the fit between the inverted model (red) and four observed dispersion curves (triangles) in Tongling area. 左下角插图显示四条频散曲线的射线路径分布。子图中的标号与插图中的路径标号一一对应,子图右下角标注了相对于参考模型的拟合误差改善情况

The inset in the lower left corner shows the ray path distribution for the four dispersion curves. The labels in the subplots correspond to those on the paths in the inset, and the lower right corner of each subplot annotates the improvement in fitting error relative to the reference model

随经纬度变化而变化,也不随深度变化而变化,所以其预测频散曲线均为一条直线,根本无法拟合观测频散曲线(三角)。但反演模型(红线)则可以更好地拟合观测频散曲线的变化趋势。图 4 中每个子图右下角标注了所示频散曲线的平均拟合误差,可以看出反演模型(inv)拟合误差显著小于初始模型(ref),表明我们的反演模型结构相对于初始模型得到了极大改善。

为了更全面评估反演模型,我们对所有观测群速度频散曲线的均方根误差进行了统计。图 5 显示初始模型与反演模型对观测群速度的均方根拟合误差统计对比情况。可以看出,反演模型(灰线)在整个观测周期范围内的拟合误差比初始模型(黑线)均有大幅下降,意味着反演模型结构比初始模型结构有极大改善。

5 结果

图 6 展示了反演后获得的铜陵矿集区 2、3、4 和 5 km 深度的三维横波速度分布。可以看出铜陵矿集区及周边上地壳波速存在明显的横向不均匀性。

深度 2 km 的横波速度结构(图 6a)显示,以丁桥-戴汇断裂(主逆冲断裂)为分界线的铜陵隆起和宣南凹陷浅部横波速度存在明显差异。在铜陵隆起内部,地表浅层的速度结构与地表主要构造单元体

之间没有明显的对应关系。造山带地区的结晶基底具有高速异常特征,而沉积盆地内的松散沉积物则具有明显的低速异常。铜陵隆起的横波速度比东部的宣南凹陷明显更高,尤其是西南和东北部横波高速异常更加明显,东部的宣南凹陷内波速明显较低,最低仅约 1 km/s。宣南凹陷内地表主要分布第四系沉积物和白垩纪砂砾岩夹角砾岩,布格重力异常显示宣南凹陷具有明显的重力低异常(吕庆田等, 2004),凹陷内 2 km 深度的较低波速对应地表较为松散的沉积物。

当深度为 3 km 时,铜陵隆起的西南和东北部的横波速度稍有增加,而中部的横波速度变化不大,宣南凹陷内速度也稍有增加(图 6b)。当深度为 4 km 时,铜陵隆起中部波速增加到 3 km/s 左右,西南和东北部的横波速度从 2 km 深度的~3 km/s 增大到~4 km/s,宣南凹陷内横波速度增大到 2.5 km/s 左右(图 6c)。

与深度 4 km 的横波速度相比,矿集区 5 km 深度层的波速变化(图 6d)不大。铜陵隆起内部局部出现尺度较小的更高的波速,西南和东北部波速基本没有变化。宣南凹陷内的波速也未发生明显变化。根据四个不同深度的横波速度结构可以判断宣南凹陷内的沉积层厚度约为 3 km,铜陵隆起内的结晶基底深度约为 1 km。

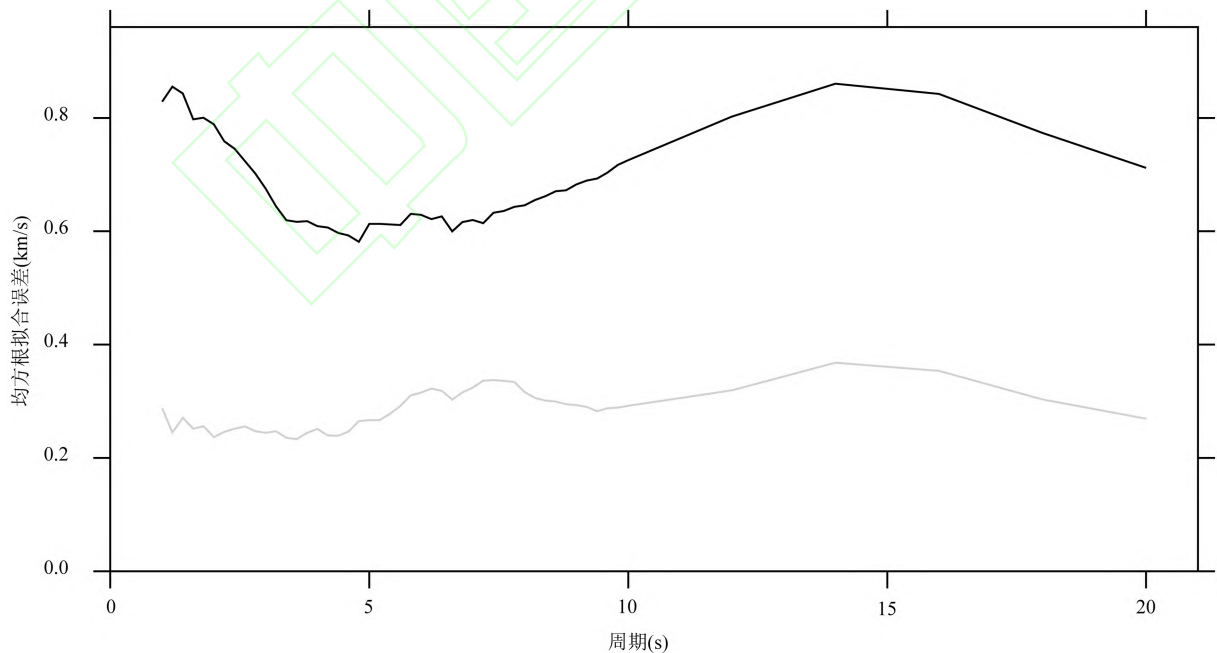


图 5 铜陵地区初始模型(黑线)与反演模型(灰线)对不同周期所有面波群速度观测的均方根拟合误差统计

Fig. 5 Statistics of the root-mean-square (RMS) fitting error between the initial model (black line) and the inverted model (gray line) to all observed surface wave group velocities at different periods in Tongling area

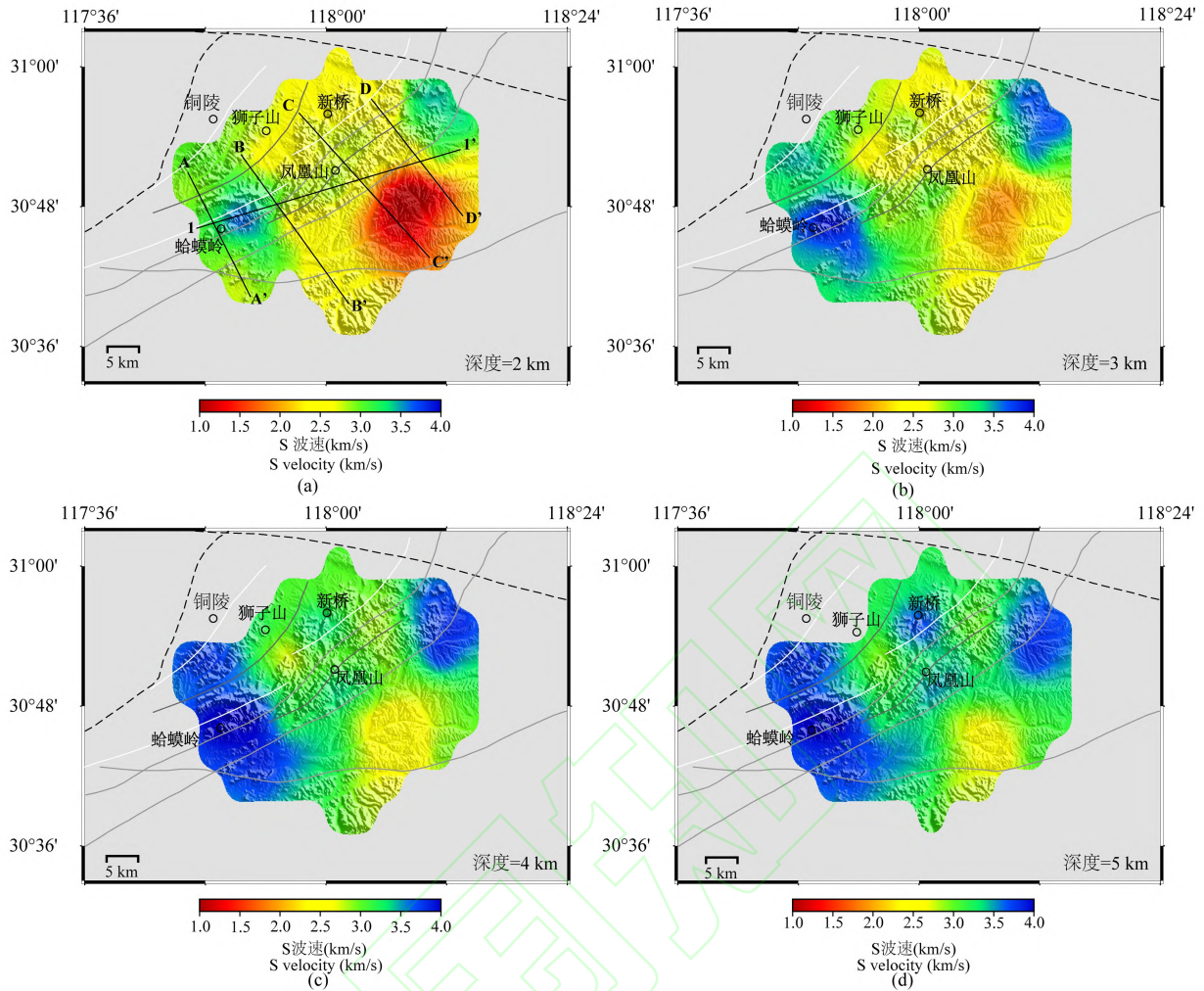


图6 铜陵地区不同深度横波速度分布

Fig. 6 S-wave velocity distribution at different depths in Tongling area

(a~d) 分别为铜陵地区 2, 3, 4 和 5 km 深度的三维横波速度分布

(a~d) show the 3D shear wave velocity distribution at depths of 2, 3, 4 and 5 km in Tongling area, respectively

图 7 为沿图 6a 所示 5 条剖面的横波速度分布。其中剖面 A—A', B—B', C—C', D—D' 近似垂直于区域主要构造走向, 剖面 1—1' 近似平行于区域主要构造走向并同时穿过铜陵隆起和宣南凹陷。从剖面图中可以看出, 区域波速结构呈现出明显的分层和分块特征。

剖面 A—A' 与 B—B' 均呈现分层结构特征, 大致可以 2.5 km/s 和 3 km/s 等速线将其分为上、中、下三层(图 7a, b)。其中, 上层与中层的分界线埋深在铜陵隆起内部约为 1 km, 在宣南凹陷逐渐加深至 2 km。中层与下层的分界面埋深约为 3 km; 下部横波速度局部高达 4 km/s, 主要局限在剖面西部的铜陵隆起内。

剖面 C—C' 和 D—D' 的波速结构相对复杂, 在铜陵隆起和宣南凹陷内的横波速度特征差别很大

(图 7c, d)。宣南凹陷内横波速度从上向下逐渐增加, C—C' 剖面浅层 3 km 以浅波速小于 2 km/s, D—D' 剖面上该层深度则减小至 2 km, 表明宣南凹陷内不同区域沉积层厚度不同。在铜陵隆起内, C—C' 剖面 1~2 km 深度出现波速高达 3.0 km/s 的透镜体, 在 D—D' 剖面对应深度的“透镜体”则与深部高速地层连成一体, C—C' 剖面的透镜体在地表对应铜陵矿集区主要矿床位置(如狮子山、凤凰山、新桥等大型矿床)(图 6a)。在 3 km 以下, 剖面 C—C' 和 D—D' 的横波速度明显低于南侧的 A—A' 和 B—B' 剖面(图 8)。从 A—A', B—B', C—C' 和 D—D' 这 4 条 NW-SE 向剖面结果(图 7a, d)可以看出, 宣南凹陷的浅部低速异常受两个地块的边界——丁桥-戴汇断裂的限制, 侧面证明丁桥-戴汇断裂是研究区内的主要断裂。

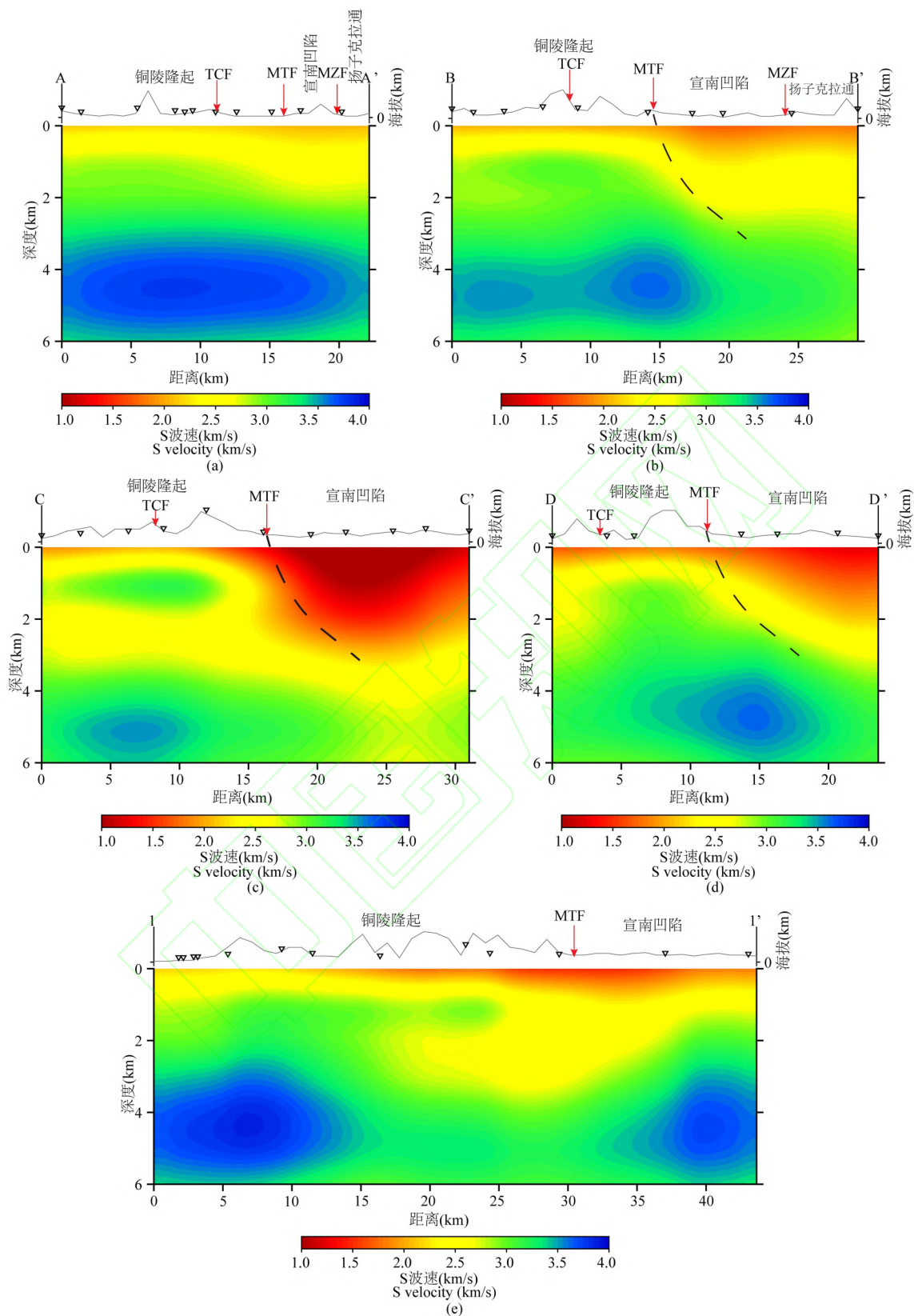


图7 铜陵地区不同剖面横波速度分布

Fig. 7 S-wave velocity distribution across different profiles in Tongling area

图7b~d中断裂MTF产状来自于吕庆田等,(2015)

The occurrence of MTF in Fig. 7b~d are from Lü Qingtian et al. (2015)

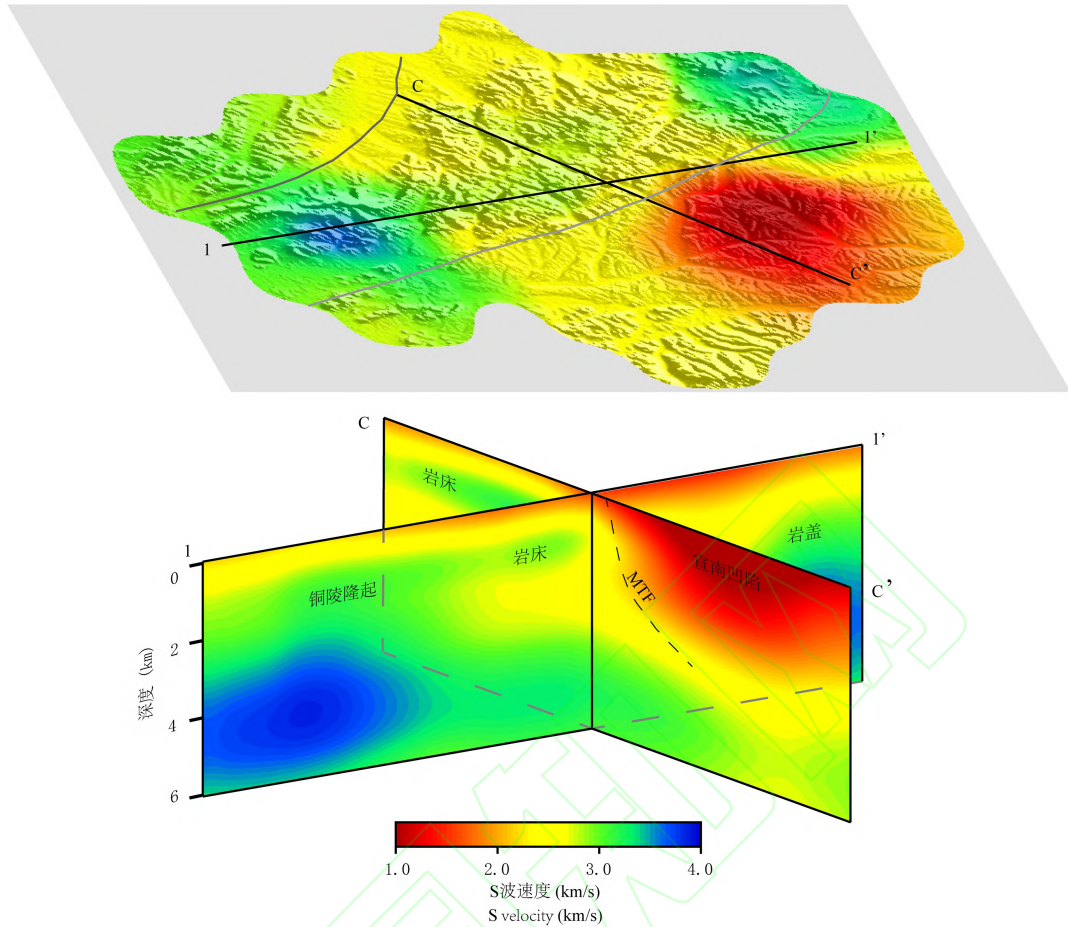


图8 铜陵地区横波速度三维立体图

Fig. 8 Three-dimensional visualization of the S-wave velocity in Tongling area

剖面1—1'为穿过铜陵隆起-宣南凹陷的SW-NE向剖面。剖面西部和东部1 km以浅波速小于2.5 km/s, 3 km以下均存在横波速度大于3.5 km/s的高速层; 剖面中部丁桥-戴汇断裂南侧1~2 km深度3.0 km/s的横波速度呈透镜体状从南侧向北水平挤入2.5 km/s的低速体内(图7e)。

6 讨论

丁桥-戴汇断裂是铜陵隆起和宣南凹陷的分界线, 这条区域断裂在本文获得的波速剖面上得到很好的反映。从四条NW-SE向剖面上可以看出, 研究区两大主要地质单元——铜陵隆起和宣南凹陷的浅部横波速度在丁桥-戴汇断裂两侧有明显的波速差异, 宣南凹陷横波速度明显低于铜陵隆起, 二者之间的波速分界线从地表向下延伸, 向凹陷内部(SE)倾斜, 最深约3 km。早期研究认为该断裂作为一条控盆断裂, 是宣城—南陵断陷的北西边界(常印佛等, 1991)。在深反射地震剖面上, 丁桥-戴汇断裂

也是一条倾向南东的深断裂(吕庆田等, 2015), 与本文波速结构反映的断裂特征基本一致。横波速度剖面显示, 宣南凹陷沉积层厚度约为3 km, 与大地电磁剖面揭示的凹陷浅部3 km厚的低阻体(Tang Jingtian et al., 2013)基本一致。

在不同深度横波速度分布图上, 本文结果显示铜陵隆起1 km深度以下普遍存在比宣南凹陷对应深度更高的横波速度, 向下延伸到6 km, 并可能继续向下延伸, 这可能是铜陵隆起下方的大型花岗岩侵入体的反映(图6)。常印佛等(1991)推测铜陵隆起下面存在巨大中酸性岩基, 但受地球物理资料缺乏限制, 难以确定岩基的准确深度及形状。深反射地震资料揭示铜陵上地壳为透明反射区(吕庆田等, 2003), 从一定程度上支持铜陵隆起下方巨型岩基的存在。此外, 航磁资料揭示铜陵地区中酸性岩体是地区磁性的主要来源(严加永等, 2009)。本文获得的横波速度结构, 可以揭示铜陵隆起下方的中酸性岩基的大致形态。总体来看, 平面上岩基范围较大,

在 3 km 深度以下,岩基遍布整个隆起;而剖面 C—C'和 D—D'揭示的岩基形态有所不同:D—D'剖面铜陵隆起 1 km 深度下方岩基呈岩盖形态(图 7d,图 8),剖面 C—C'下方的铜陵隆起 1~2 km 之间为高速体,2~3 km 之间为低速体,即呈岩床状产出(图 7c,图 8)。结合横波速度平面分布图,铜陵隆起下方 1~2 km 深度之间的高速体,应该与南北两侧对应深度的高速体相连。

铜陵地区完成的大地电磁测深剖面揭示,在铜陵隆起下方存在高阻特征,铜陵隆起南部蛤蟆岭地区 4 km 深度下方存在高阻体(Tang Jingtian et al., 2013; Zhang Kun et al., 2021),对应本文 A—A'剖面 3 km 深度下方约 4.0 km/s 的高速体。沿 B—B'和 C—C'剖面对应位置的大地电磁测深剖面 1 km 深度下方存在高阻体(Tang Jingtian et al., 2013),与本文获得的对应剖面下方的高速体相对应。三维航磁成像反演推测在铜陵隆起 1 km 深度下方存在大范围岩基(严加永等, 2009),与本文获得的铜陵隆起下方 1 km 下方的高速异常相对应。在反射地震剖面相应深度上,该深度为透明反射区(吕庆田等, 2003, 2015),结合长江中下游地区岩石物性特征,剖面下方 1 km 深度下方~3 km/s 的高速体可能与花岗岩侵入体有关。

剖面 C—C'和 D—D'两侧(图 7c、d)分布铜陵地区的重要矿床,如凤凰山、新桥和狮子山等,是铜陵地区地表岩浆岩的主要出露区(吴淦国等, 2003; 毛景文等, 2009)。岩浆岩以侵入岩为主,多数沿背斜和向斜轴部侵入,岩体则近东西向呈串珠状排列(刘文灿等, 1996; 毛景文等, 2009),自西向东分别为铜官山、狮子山、新桥、凤凰山以及沙滩脚(吴淦国等, 2003)。尽管凤凰山东部地表出露铜陵地区最大面积的火山岩,却并未勘探到像冬瓜山矿床那样的层控矽卡岩型矿床,本文结果显示凤凰山深部 1~2 km 深度是南部或北部侵入的岩床产出形态。结合大地电磁探测结果,由于南部的蛤蟆岭地区岩浆岩深度更大,因此铜陵地区深部更大范围的岩浆更可能位于凤凰山北部的狮子山或新桥等地区,这是在铜陵这些地区勘探到规模更大矿床的深部原因。

7 结论

利用中国地质科学院在铜陵东部于 2022~2023 年间部署的 57 个宽频地震台记录的一年多的连续数据,采用背景噪声面波层析成像方法反演获得了该区 6 km 以浅三维上地壳横波速度结构。结

果显示,铜陵矿集区及周边上地壳波速存在明显的横向不均匀性。铜陵隆起的横波速度高于宣南凹陷,二者之间的横波速度分界线揭示区域主控断裂丁桥—戴汇断裂的产出形态为倾向南东,延伸深度达 3 km。宣南凹陷内的沉积层厚度约为 3 km,铜陵隆起内的结晶基底深度约为 1 km。

铜陵隆起 1~3 km 深度存在~3 km/s 的高横波速度,对比大地电磁测深和深反射研究结果,认为该高速体可能是铜陵隆起深部大规模花岗岩侵入体的反映。铜陵矿集区主要矿床(如狮子山、凤凰山、新桥等大型矿床)下方的高速体普遍深度较浅,表现为不同的“侵入体”形态:在新桥和狮子山深部侵入体呈上隆的“岩盖”形态,而在南部的凤凰山地区则表现为“岩床”形态。这是在铜陵北部地区勘探到大规模矿床的深部原因。本文首次获得的高精度铜陵矿集区上地壳三维横波速度结构,对长江中下游成矿带的岩浆底侵模式提供了新的地震学证据,对深化铜陵矿集区的成矿动力学过程有重要意义。

致谢:本文图片使用 GMT 地学绘图软件绘制(Wessel and Smith, 1991)。感谢审稿专家提出的专业意见。

References

- An Meijian, Wiens D A, Zhao Yue, Feng Mei, Nyblade A, Kanao M, Li Yuansheng, Maggi A, L  v  que J. 2015. Temperature, lithosphere-asthenosphere boundary, and heat flux beneath the Antarctic plate inferred from seismic velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120: 8720~8742.
- Assump  o M, Feng Mei, Tassara A, Juli   J. 2013. Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography. *Tectonophysics*, 609: 82~96.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, Levshin A L, Lin F, Moschetti M P, Shapiro N M, Yang Y. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3): 1239~1260.
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. 1991. The copper-iron metallogenic belt in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Deng Jun, Wang Qingfei, Xiao Changhao, Yang Liqiang, Liu Huan, Gong Qingjie, Zhang Jing. 2011. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China. *International Geology Review*, 53(5~6): 449~476.
- Feng Mei, An Meijian. 2010. Lithospheric structure of the Chinese mainland determined from joint inversion of regional and teleseismic rayleigh-wave group velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B06317).
- Feng Mei, An Meijian, Zhao Wenjin, Xue Guangqi, Mechie J, Zhao Yue. 2011. Lithosphere structures of northeast Tibetan Plateau and their geodynamic implications. *Journal of Geodynamics*, 52(5): 432~442.
- Feng Mei, An Meijian, Mechie J, Zhao Wenjin, Xue Guangqi, Su Heping. 2020. Lithospheric structures of and tectonic implications for the central-east Tibetan Plateau inferred from

- joint tomography of receiver functions and surface waves. *Geophysical Journal International*, 223: 1688~1707.
- Feng Mei, Qian Hui, Mechie J, An Meijian, Li Haibing, Xue Guangqi, Su Heping, Cui Xiang. 2021. Crustal seismogenic structures and deformation styles along the Longmen Shan fault belt in the eastern Tibetan Plateau inferred from ambient noise tomography. *Tectonophysics*, 798: 228689.
- Feng Mei, An Meijian, Hou Hesheng, Fan Taoyuan, Zang Hulin. 2023. Channelised magma ascent and lithospheric zonation beneath the Songliao basin, northeast China, based on surface-wave tomography. *Tectonophysics*, 862: 229969.
- Feng Mei, An Meijian, Hou Hesheng, Zang Hulin. 2023. The Lithospheric structure of the middle Solonker-Xar Moron Suture by surface-wave tomography. *CT Theory and Applications*, 32 (1): 1~14 (in Chinese with English Abstract).
- Feng Weiyu, Shen Xuzhang, Tan Jiawei, Wang Wentian. 2025. Influence of ambient noise source distributions on cross-correlation derived seismic waveforms and dispersion curve retrieval. *CT Theory and Applications*, 34(5): 803~814 (in Chinese with English Abstract).
- Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*, 84(6): 1081~1088.
- Jiang Guoming, Zhang Guibin, Lü Qingtian, Shi Danian, Xu Yao. 2013. 3-D velocity model beneath the Middle-Lower Yangtze River and its implication to the deep geodynamics. *Tectonophysics*, 606: 36~47.
- Jiang Guoming, Zhang Guibin, Lü Qingtian, Shi Danian, Xu Yao. 2014. Deep geodynamics of mineralization beneath the Middle-Lower Reaches of Yangtze River: Evidence from teleseismic tomography. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 907~917 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Guoming, Zhang Guibin, Zhao Dapeng, Lü Qingtian, Li Hongyi, Li Xinfu. 2015. Mantle dynamics and cretaceous magmatism in east-central China: Insight from teleseismic tomograms. *Tectonophysics*, 664: 256~268.
- Lan Xueyi, Du Jianguo, Yan Jiayong, An Ming, Wan Qiu, Guo Dong, Liao Mengqi, Wang Yunyun, Tao Long, Zhang Qiyang, Zhang Shasha. 2015. 3D gravity and magnetic interactive inversion modeling based on prior information: a case study of the Tongling ore concentration area. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(12): 4436~4449 (in Chinese with English abstract).
- Laske G, Masters G, Ma Zhitu, Pasyanos M. 2012. Crust1.0: An updated global model of Earth's crust. *EGUGA*.
- Liu Wencan, Gao Dezhen, Chu Guozheng. 1996. *Tectonic Deformation Analysis and Metallogenic Prediction in Tongling Area*, Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Lü Qingtian, Hou Zengqian, Zhao Jinhua, Shi Danian, Wu Xuanchi, Chang Yinbo, Pei Rongfu. 2003. Structural morphology of the complex crust in the Tongling ore concentration area revealed by deep seismic reflection profiles. *Science in China Series D Earth Sciences*, 33(5): 442~449 (in Chinese).
- Lü Qingtian, Hou Zengqian, Yang Zhusen, Shi Danian. 2004. Underplating and kinetic evolution pattern in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River: Constraints from geophysical data. *Science in China Series D Earth Sciences*, 34(9): 783~794 (in Chinese).
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Tang Jingtian, Shi Danian, Chang Yinbo, Sino Probe-03-CJ Team. 2015. Multi-scale and integrated geophysical data revealing mineral systems and exploring for mineral deposits at depth: A synthesis from SinoProbe-03. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(12): 4319~4343 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Shao Yongjun, Xie Guiqing, Zhang Jiandong, Chen Yuchuan. 2009. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense district of Middle-Lower Yangtze valley metallogenic belt. *Mineral Deposits*, 28(2): 109~119 (in Chinese with English abstract).
- Quyang Longbin, Li Hongyi, Lü Qingtian, Yang Yingjie, Li Xinfu, Jiang Guoming, Zhang Cuibin, Shi Danian, Zheng Dan, Sun Sanjian, Tan Jing, Zhou Ming. 2014. Crustal and uppermost mantle velocity structure and its relationship with the formation of ore districts in the Middle-Lower Yangtze River region. *Earth and Planetary Science Letters*, 408: 378~389.
- Ramos C, Mechie J, Feng Mei. 2016. Shear wave velocity and Poisson's ratio models across the southern Chile convergent margin at 38°15'S. *Geophysical Journal International*, 204(3): 1620~1635.
- Shi Danian, Lü Qingtian, Xu Wenyi, Yan Jiayong, Zhao Jinhua, Dong Shuwen, Chang Yinbo. 2013. Crustal structure beneath the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt in east China: constraints from passive source seismic experiment on the Mesozoic intra-continental mineralization. *Tectonophysics*, 606: 48~59.
- Tang Jingtian, Zhou Cong, Wang Xianying, Xiao Xiao, Lü Qingtian. 2013. Deep electrical structure and geological significance of Tongling ore district. *Tectonophysics*, 606: 78~96.
- Wessel P, Smith W. 1991. Free software helps map and display data. *Eos Trans. AGU*, 72: 445~446.
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Xiangyan. 2013. *Medium-acid Intrusive Rocks from Tongling, China*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wu Ganguo, Zhang Da, Zang Wenshan. 2003. Study on structural detachment and layered mineralization characteristics in the Tongling ore concentration area. *Science in China (Series D)*, 33(4): 300~308 (in Chinese).
- Xu Xiaochun, Bai Ruyu, Xie Qiaolin, Lou Jinwei, Zhang Zanzan, Liu Qineng, Chen Liwei. 2012. Re-understanding of the geological and geochemical characteristics of the Mesozoic intrusive rocks from Tongling area of Anhui Province, and discussions on their genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3139~3169 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Meng Guixiang, Zhao Jinhua. 2009. Aeromagnetic 3D inversion imaging for intermediate-acid intrusive bodies and its indication significance of deep ore prospecting in Tongling ore concentration district. *Mineral Deposits*, 28(6): 838~849 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Lü Qingtian, Chen Mingchun, Deng Zhen, Qi Guang, Zhang Kun, Liu Zhendong, Wang Jie, Liu Yan. 2015. Identification and extraction of geological structure information based on multi-scale edge detection of gravity and magnetic fields: an example of the Tongling ore concentration area. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(12): 4450~4464 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kun, Lü Qingtian, Lan Xueyi, Guo Dong, Wang Qian, Yan Jiayong, Zhao Jinhua. 2021. Magnetotelluric evidence for crustal decoupling: Insights into tectonic controls on the magmatic mineral system in the Nanling-Xuancheng area, SE China. *Ore Geology Reviews*, 131: 104045.
- Zhang Yunpeng, Wang Baoshan, Xu Tao, Yang Wei, Wang Weitao, Xu Yihe, Li Lu. 2020. Three-dimensional crustal Vp and Vs structures beneath the southern segment of the Tan-Lu fault revealed by active source and earthquake data. *Geophysical Journal International*, 223(3): 2148~2165.
- Zhao Rongtao, Liu Shasha, Yang Yan, Huang Shi, Zheng Kai, Shi Danian. 2024. Deep crustal structure of the Tongling ore concentration area in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River: Evidence from teleseismic P-wave receiver functions. *Acta Geoscientia Sinica*, 45(6): 965~976 (in Chinese with English abstract).

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.

- 冯梅, 安美建, 侯贺晟, 范桃园, 臧虎临. 2023. 索伦-西拉木伦缝合带中段及周边区域面波层析成像. CT 理论与应用研究, 32(1): 1~14.
- 冯伟瑜, 沈旭章, 谭家伟, 王文天. 2025. 背景噪声源分布对地震波形互相关及频散曲线提取影响对比分析. CT 理论与应用研究, 34(5): 803~814.
- 江国明, 张贵宾, 吕庆田, 史大年, 徐晓. 2014. 长江中下游地区成矿深部动力学机制: 远震层析成像证据. 岩石学报, 30(4): 907~917.
- 兰学毅, 杜建国, 严加永, 安明, 万秋, 郭冬, 廖梦奇, 王云云, 陶龙, 张启燕, 张莎莎. 2015. 基于先验信息约束的重磁三维交互反演建模技术—以铜陵矿集区为例. 地球物理学报, 58(12): 4436~4449.
- 刘文灿, 高德臻, 储国正. 1996. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测. 北京: 地质出版社.
- 吕庆田, 侯增谦, 赵金花, 史大年, 吴宣志, 常印佛, 裴荣富. 2003. 深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区复杂地壳结构形态. 中国科学 D 辑: 地球科学, 33(5): 442~449.
- 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 史大年. 2004. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束. 中国科学 D 辑: 地球科学, 34(9): 783~794.
- 吕庆田, 董树文, 汤井田, 史大年, 常印佛, SinoProbe-03-CJ 项目组. 2015. 多尺度综合地球物理探测 揭示成矿系统、助力深部找矿——长江中下游深部探测(SinoProbe-03)进展. 地球物理学报, 58(12): 4319~4343.
- 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 张建东, 陈毓川. 2009. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型. 矿床地质, 28(2): 109~119.
- 吴才来, 董树文, 郭祥焱. 2013. 中国铜陵酸性侵入岩. 北京: 地质出版社.
- 吴淦国, 张达, 臧文拴. 2003. 铜陵矿集区构造滑脱与分层成矿特征研究. 中国科学(D辑), 33(4): 300~308.
- 徐晓春, 白茹玉, 谢巧勤, 楼金伟, 张赞赞, 刘启能, 陈莉薇. 2012. 安徽铜陵中生代侵入岩地质地球化学特征再认识及成因讨论. 岩石学报, 28(10): 3139~3169.
- 徐晓, 吕庆田, 张贵宾, 江国明, 张昌榕, 单希鹏, 吴强. 2015. 长江中下游成矿带三维 S 波速度结构及对深部过程的约束. 地球物理学报, 58(12): 4373~4387.
- 严加永, 吕庆田, 孟贵祥, 赵金花. 2009. 铜陵矿集区中酸性岩体航磁 3D 成像及对深部找矿方向的指示. 矿床地质, 28(6): 838~849.
- 严加永, 吕庆田, 陈明春, 邓震, 祁光, 张昆, 刘振东, 汪杰, 刘彦. 2015. 基于重磁场多尺度边缘检测的地质构造信息识别与提取——以铜陵矿集区为例. 地球物理学报, 58(12): 4450~4464.
- 赵荣涛, 刘沙沙, 杨艳, 黄什, 郑凯, 史大年. 2024. 长江中下游铜陵矿集区深部地壳结构——来自宽频地震 P 波接收函数成像的证据. 地球学报, 45(6): 965~976.

Three-dimensional shear wave velocity tomography of the upper crust in the Tongling ore concentration area

ZHAO Rongtao^{*1)}, FENG Mei¹⁾, AN Meijian¹⁾, YANG Yan¹⁾, SHI Danian¹⁾,
LIU Shasha²⁾, HUANG Shi²⁾

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2) Anhui Geological and Mineral Exploration Bureau 321 Geological Team, Tongling, Anhui 244033, China

* Corresponding author: rongtaozhao@126.com

Abstract

Located in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt, Tongling represents a unique ore concentration area. The velocity structure of its shallow crust plays a crucial role in deciphering the Mesozoic metallogenic processes of the entire ore district and holds considerable value for deep mineral exploration. During 2022~2023, we deployed 57 temporary broadband stations with a minimum inter-station distance of 2~5 km in eastern Tongling. We apply the continuous records to derive a high-resolution three-dimensional shear-wave velocity structure of the upper-crust in the study region by ambient noise surface tomography. The results show that the S-wave velocity in the shallow part of Xuannan Sag is significantly lower than that of Tongling Uplift, and the boundary of S-wave velocity anomalies delineates well the occurrence of the Dingqiao-Daihui Fault, which dips southeastward and extends to a depth of ~3 km. The S-wave velocity below 1 km depth of the Tongling uplift is higher (~3 km/s) than that of the Xuannan sag, implying possible intrusions of large-scale granities in the Tongling uplift. These intrusions display a dome-like laccolith beneath the Xinqiao and Shizishan, and a sill-like bedrock in the southern Fenghuangshan region. The results are of great significance for understanding the metallogenic dynamic process of the Tongling ore concentration area, and also provide new evidence for the magmatic underplating model of the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt.

Key words: Ambient noise surface wave tomography; upper crustal S-wave velocity; Tongling ore concentration area; metallogenic model