2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2395-2409

地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn

ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

吴璇,李红星,汪舒妍.2026.基于地震背景噪声成像的盛源与天华山火山盆地上地壳三维 S 波速度结构分析.地球物理学进展,41(5):2395-2409,doi:10.6038/pg2026JJ0511.

WU Xuan,LI HongXing,WANG ShuYan. 2026. Three-dimensional upper-crustal shear-wave velocity structure beneath the Shengyuan and Tianhuashan volcanic basins from seismic ambient noise imaging. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2395-2409,doi:10.6038/pg2026JJ0511.

基于地震背景噪声成像的盛源与天华山火山盆地上地壳三维 S 波速度结构分析

Three-dimensional upper-crustal shear-wave velocity structure beneath the Shengyuan and Tianhuashan volcanic basins from seismic ambient noise imaging

吴璇,李红星*,汪舒妍

WU Xuan,LI HongXing*,WANG ShuYan

东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌 330000

State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330000,*China*

摘 要 盛源火山盆地与天华山火山盆地相邻,但分别位于钦杭成矿带东段和北武夷成矿带,具有重要的地球科学意义.本研究在该地区布设短周期密集台阵,利用地震背景噪声成像方法,构建了 5 km 以浅上地壳三维 S 波速度结构.结果显示:赣杭构造带与北武夷成矿带 S 波速度呈现显著分异,前者整体表现为低速特征,后者整体表现为高速特征;随深度增加,赣杭构造带南界整体向北偏移,为江山—绍兴断裂在研究区浅部具有北倾逆冲构造属性提供了速度结构约束;5 km 深度处,赣杭构造带与北武夷成矿带之间的 S 波速度差异减小,表明两构造单元的浅部速度分异随深度增加而减弱.结合区域构造背景,该特征可能与扬子地块和华夏地块新元古代拼合后共同经历的加里东期挤压改造,以及燕山期古太平洋板块向 NW 俯冲背景下的伸展-岩浆活动有关.

关键词 火山盆地;地震背景噪声;S 波速度结构;面波直接反演;成矿带

中图分类号 P315

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0511

CSTR:32085.14.pg2026JJ0511

Abstract The Shengyuan volcanic basin and the Tianhuashan volcanic basin are adjacent to each other, but they are located in the eastern segment of the Qin-Hang metallogenic belt and the North Wuyi metallogenic belt, respectively, and therefore have important geoscientific significance. In this study, a short-period dense seismic array was deployed in the region, and seismic ambient noise imaging was used to construct a three-dimensional shear-wave velocity structure of the upper crust shallower than 5 km. The results show that the Gan-Hang tectonic belt and the North Wuyi metallogenic belt exhibit significant shear-wave velocity differences: the former is generally characterized by low velocities, whereas the latter is dominated by high velocities. With increasing depth, the southern boundary of the Gan-Hang tectonic belt shifts northward as a whole, providing velocity-structure constraints on the shallow north-dipping thrust geometry of the Jiangshan—Shaoxing fault in the study area. At a depth of 5 km, the shear-wave velocity contrast between the Gan-Hang tectonic belt and the North Wuyi metallogenic belt decreases, indicating that the shallow velocity differentiation between the two tectonic units weakens with depth. In combination with the regional tectonic background, this feature may be related to the Caledonian compressional reworking after the Neoproterozoic amalgamation of the Yangtze and Cathaysia blocks, as well as the Yanshanian extension and magmatism associated with the NW-directed subduction of the Paleo-Pacific plate.

Keywords Volcanic basin; Seismic ambient noise; Shear-wave velocity structure; Direct surface-wave inversion; Metallogenic belt

收稿日期 2026-01-09; **修回日期** 2026-06-29. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 江西省主要学科学术和技术带头人培养项目-领军人才(学术类)(20243BCE51012)、铀资源探采与核遥感全国重点实验室(东华理工大学)自主部署项目(2025QZ-YZZ-06,2024QZ-TD-12)、国家自然科学基金(42474197)和江西省自然科学基金重点项目(20242BAB26049)联合资助.

第一作者简介 吴璇,男,2001 年生,硕士研究生,主要从事地震波背景噪声成像研究. E-mail:772934710@qq.com

***通讯作者** 李红星,男,1981 年生,博士,教授,主要从事地下空间地震学成像方法及孔隙介质波传播理论及其应用研究. E-mail:lihongxingniran@163.com

0 引 言

华南地区作为我国东部大陆构造成矿系统的核心交汇区,其内部钦杭成矿带与北武夷成矿带的耦合关系,一直是揭示中生代板块动力学与矿产富集规律的关键纽带(毛景文等,2011).其中,钦杭成矿带东段的盛源火山盆地,并非简单的普通火山沉积单元,作为我国南方火山岩型铀矿的重要远景区(图1),该盆地内侏罗纪打鼓顶组火山碎屑岩经多期热液活动改造,形成了独特的"火山岩-断裂-铀矿化"空间组合(陈国梁等,1987),但目前对控制铀元素富集的深部储矿空间(如变质基底埋深、热液通道形态)仍缺乏直接地球物理证据.与之毗邻的天华山火山盆地,则因孕育了冷水坑超大型斑岩型铅锌银矿床(郭恒飞等,2020)而备受关注,该矿床的花岗斑岩体侵位深度、成矿流体运移的深部通道,此前仅通过地表钻探与岩石地球化学分析推测,尚未通过地壳速度结构得到量化验证.

从构造背景(图2)看,两大盆地虽仅相距约50 km,却分属扬子板块与华夏板块拼合带的不同次级构造单元,盛源盆地受赣杭构造带控制,基底为元古代浅变质岩系,盖层发育巨厚火山沉积序列.天华山盆地则隶属于北武夷成矿带,基底为新元古代高绿片岩相变质岩,盖层以侏罗—白垩纪侵入岩与火山岩为主(舒良树,2012).这种地表岩性与构造属性的差异,是否源于深部地壳结构的分异,以及江绍断裂作为扬子与华夏板块的重要拼合边界,其在研究区的垂向延伸深度、倾伏方向,和对两盆地深部物质交换的控制作用目前仍存在争议.通过宽角反射地震推测其切入地壳深部,但缺乏浅地壳精细速度结构的直接佐证.方吉琦等(2022)的大地电磁研究虽揭示了断裂带的电性异常,却无法区分异常是由流体还是岩性差异引起.

现有研究手段在解析该区域深部结构时面临显著局限:传统地表地质填图受火山岩风化覆盖与构造叠加影响,难以识别地下1 km以深的沉积层、基底界面(余心起等,2006).重力、磁法等间接地球物理方法,虽能圈定宏观密度、磁性异常区(Guo and Gao,2018;罗凡等,2019;严加永等,2019),却无法直接量化地壳速度参数,而速度结构恰恰是判断岩性、断裂破碎带的关键指标.区域尺度的深地震测深、接收函数、重磁和面波研究已揭示华南地壳厚度、速度结构和构造边界的一阶特征(Xiong *et al.*,2002;Zhang *et al.*,2005;Li *et al.*,2013;Deng *et al.*,2014;Huang *et al.*,2015;Zhou *et al.*,2012;邓阳凡等,2011;杨晓瑜和李永华,2021;郑孟杰等,2021),但仍难以直接分辨盛源与天华山两盆地0~5 km浅部结构.即便前人开展的背景噪声成像研究(如侯爵等,2022),也因台阵间距较大、分辨率较低,未能精细刻画两盆地内部的小尺度结构.

地震背景噪声成像为浅部地壳精细结构研究提供了有效技术途径.该方法利用连续噪声记录的互相关函数重建台站对之间的经验格林函数,并从中提取面波频散信息,可在缺少人工震源或天然地震分布受限的地区开展无源成像(Aki,1957;Claerbout,1968;Shapiro *et al.*,2005;Bensen *et al.*,2007;Yao *et al.*,2006).已有综述指出,背景噪声成像已从区域地壳结构研究拓展到浅地表探测和介质时变监测等方向,但成像分辨率仍受台阵孔径、噪声源分布和有效频散周期范围等因素制约(张文文等,2022).近年来,基于短周期密集台阵的背景噪声面波成像已被用于火山岩区、活动断裂带和城市浅部结构研究,并显示出刻画浅部沉积层、断裂破碎带和岩性差异的能力(李昱等,2010;易桂喜等,2008;郑现等,2012;徐志萍等,2023;敬嘉良等,2024;方捷等,2024,2025;高占永等,2024;李蒙亚等,2024;孟亚锋等,2019;王娟娟等,2018).针对盛源—天华山火山盆地区域,目前仍缺少由高密度短周期台阵约束的0~5 km三维S波速度模型,限制了对两盆地浅部速度分异、江绍断裂浅部几何形态及速度异常与成矿构造关系的认识.

鉴于此,本研究在盛源—天华山火山盆地及邻区布设短周期密集台阵,利用背景噪声瑞雷面波频散资料开展三维S波速度结构反演,重点刻画0~5 km上地壳速度异常、约束主要断裂的浅部速度响应,并讨论两盆地速度分异与成矿构造之间的关系.

1 数据处理

本研究在盛源火山盆地(赣杭构造带东段)与天华山火山盆地(北武夷成矿带西北部)及邻区开展短周期密集台阵观测.台阵位于北纬27°36′—28°36′、东经116°36′—117°36′范围内,共布设154台Smartsolo IGU-16HR短周期三分量节点仪.主体台阵平均台间距约为3.0~3.3 km,冷水坑矿区局部加密至约390 m;该布设方式兼顾区域尺度覆盖和重点矿区浅部结构分辨率.台阵覆盖约450 km^2区域(图3),主要覆盖盛源火山盆地、天华山火山盆地及江山—绍兴断裂、鹰潭—安远断裂等构造单元.

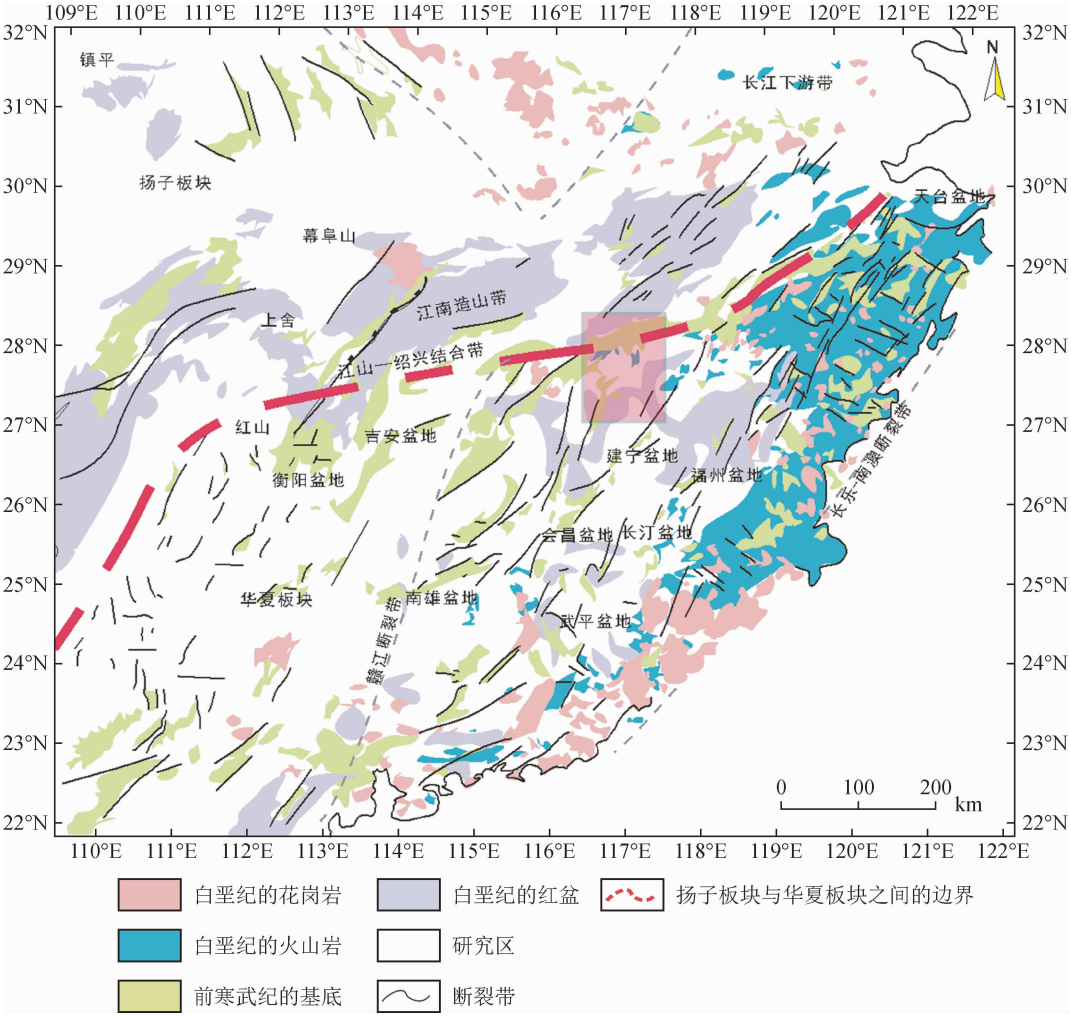


图 1　华南地区的简化地质图

Fig. 1　Simplified geological map of South China Region

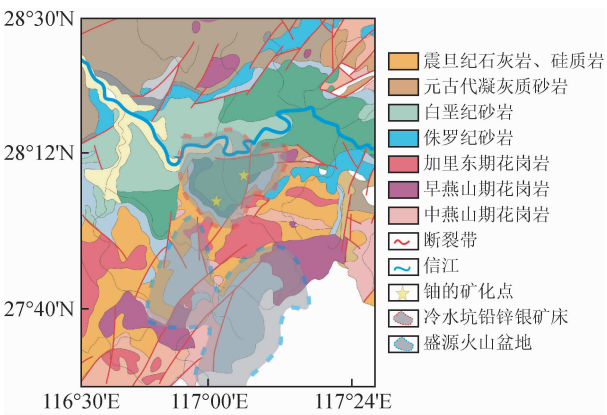


图 2　盛源火山盆地和天华山火山盆地地质简图

Fig. 2　Geological diagram of Shengyuan Volcanic Basin and Tianhua Mountain Volcanic Basin

数据采集时间为 2021 年 11 月 18 日至 12 月 25 日,连续记录约一个月的三分量背景噪声数据. 台站布设优先覆盖典型地质单元、主要断裂及横向岩性变化明显区域,以增强不同构造单元之间的路径覆盖.

数据预处理主要参考 Bensen 等(2007)的背景噪声处理流程. 原始波形导出后,依次进行去均值、去线性趋势、去尖峰、仪器响应校正、重采样、时间域归一化和谱白化等处理,以降低仪器响应、直流漂移、地震事件及其他非平稳高振幅信号对互相关函数的影响,提高面波信号的稳定性.

考虑到研究关注周期 $T>0.5$ s 的瑞雷面波信号,将原始 250 Hz 采样率降至 5 Hz,以减少计算量并保留目标频段信息. 时间域归一化采用分频段滑动平均振幅归一化策略,分别在 0.5 ~ 2 s、2 ~ 5 s、5 ~ 10 s 和 10 ~ 20 s 频段估计振幅权重,用于削弱非平稳强振幅信号对互相关的主导作用. 互相关函数采用 0 ~ 50 s 时间窗进行分析;在最大台间距约

70 km、面波视速度约 1.5 ~ 3.7 km/s 的条件下,主要瑞雷面波到时约为 19 ~ 47 s,故该时间窗能够覆盖研究所需的基阶瑞雷面波信号. 经 0.1 ~ 2 Hz 滤波后,将有效频段用于后续频散测量,154 个台站理论上形成 11781 条台站对互相关函数.

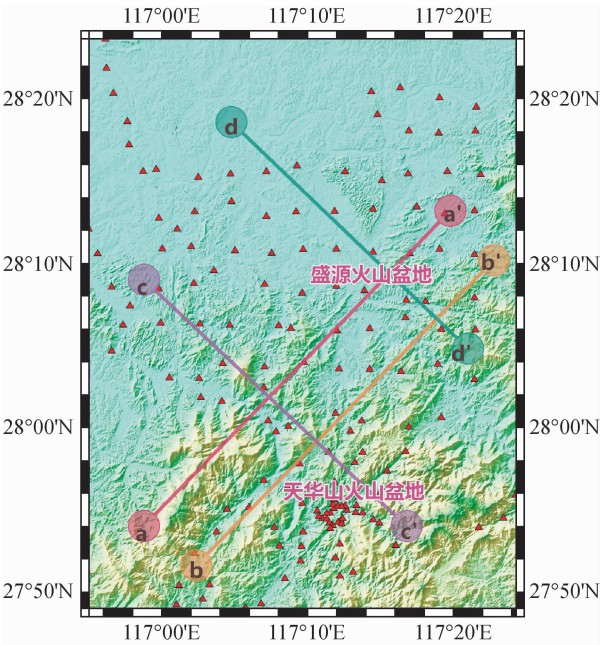


图 3 研究区短周期密集台阵分布图

红色三角形表示 Smartsolo 短周期节点仪位置. 台阵共 154 个台站,主体台阵最近邻间距主要集中在 2 ~ 4 km,最近邻间距中位数约 2.66 km;局部加密区最小台间距约 0.30 km.

Fig. 3 Distribution of the short-period dense array in the study area

Red triangles denote Smartsolo short-period nodal stations. The array consists of 154 stations. The nearest-neighbor station spacing of the main array is mainly concentrated between 2 and 4 km, with a median value of approximately 2.66 km. The minimum station spacing in the locally densified area is approximately 0.30 km.

频散曲线提取采用姚华建等(2004)提出的 EGFAnalysisTimeFreq 图像分析方法. 该方法将台站对互相关振幅矩阵由周期-时移域转换为周期-相速度域,并沿能量峰值追踪瑞雷面波频散曲线. 质量控制标准包括:信噪比 SNR > 5、相速度搜索范围 1 ~ 5 km/s、周期搜索范围 0.5 ~ 5 s,以及台间距大于约 2 倍波长的远场近似约束. 受不同台站对间距差异影响,单条频散曲线的有效周期范围会有所不同;例如,部分台站对在远场近似约束下保留的有效周期约为 2 ~ 3.88 s. 真实反演采用全区通过质量控制的 0.5 ~ 5 s 频散数据. 对于跳变明显、连续性不足 1 s 或与相邻台站对频散趋势明显不一致的曲线段,在

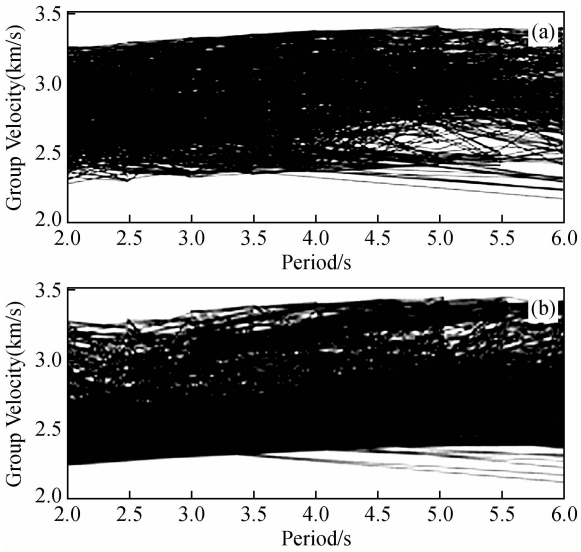


图 4 台站集合(a)(35 台)与集合(b)(43 台)重复提取的瑞雷面波频散曲线对比

Fig. 4 Comparison of Rayleigh-wave dispersion curves extracted from station set(a)(35 stations) and station set(b)(43 stations)

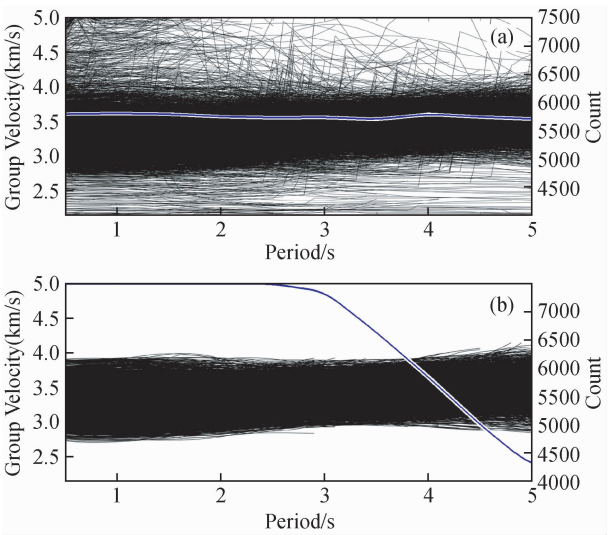


图 5 频散曲线质量控制前后的周期覆盖与曲线数量对比

Fig. 5 Period coverage and data amount before and after dispersion-curve quality control

质量控制过程中予以剔除. 为检验频散提取的空间稳定性,选取相邻区域 35 个和 43 个台站组成集合 a、b,采用相同参数重新提取集合内部频散曲线,结果如图 4 所示,两个集合的主趋势和平均相速度范围基本一致.

154 个台站两两互相关理论上可获得 11781 条台站对记录,经上述质量控制后,最终保留 7484 条瑞雷面波频散曲线用于反演. 图 5 给出了质量控制

前后的频散曲线覆盖情况. 结果显示,0.5 ~ 5 s 周期范围内频散数据覆盖较连续;在 5 s 附近曲线数量相对较少,但仍约有 4300 条可用测量,可为 0 ~ 5 km 深度范围内的面波反演提供数据约束.

2　面波反演流程

2.1　反演模型

本研究采用 Fang 等(2016)提出的面波直接反演方法(一步法)开展三维 S 波速度结构反演. 与常规两步法不同,该方法直接利用不同周期、不同路径的面波频散走时约束三维速度模型,并在迭代过程中通过快速行进法(Rawlinson and Sambridge, 2004)重新计算面波传播路径和走时,从而考虑复杂介质中射线路径弯曲对成像结果的影响. 该方法适用于浅部结构横向非均匀性较强的小尺度研究区.

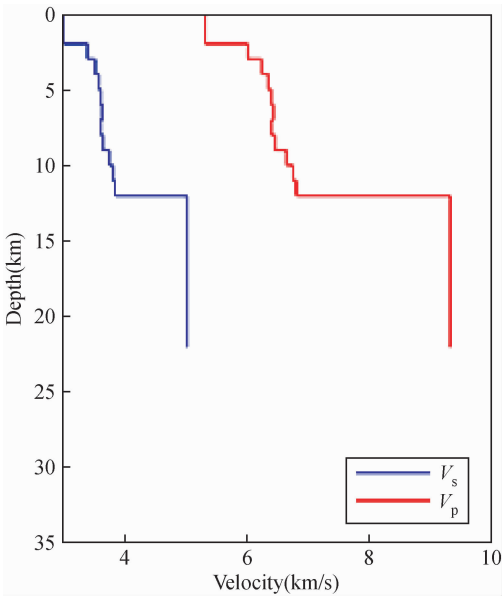


图 6　速度-深度模型图

Fig. 6　Velocity-depth model figure

根据通过质量控制的周期-相速度能量峰值曲线,计算研究区平均瑞雷面波相速度,并构建区域平均一维 S 波速度参考模型(图 6). 该参考模型用于敏感核计算和直接反演初始模型设置. 瑞雷面波频散主要对 S 波速度敏感,P 波速度和密度在本文中仅依据经验关系由 V_s 换算,用于敏感核计算.

2.2　敏感核测试

面波相速度对地下介质的敏感深度随周期增加而增大. 为评估本文频散数据的深度约束能力,以图 5 所示区域平均一维 S 波速度模型为基础,依据 Brocher(2005)的经验关系由 V_s 换算 V_p 和密度,并计算 2 s、4 s 和 6 s 周期基阶瑞雷面波相速度敏感核(图 7). 敏感核结果表明,本文主要频散数据对 0 ~ 5 km 上地壳结构具有较好的约束能力;考虑到有效频散周期、检测板恢复结果和射线覆盖条件,后续地质解释主要限定在 0 ~ 5 km 深度范围内.

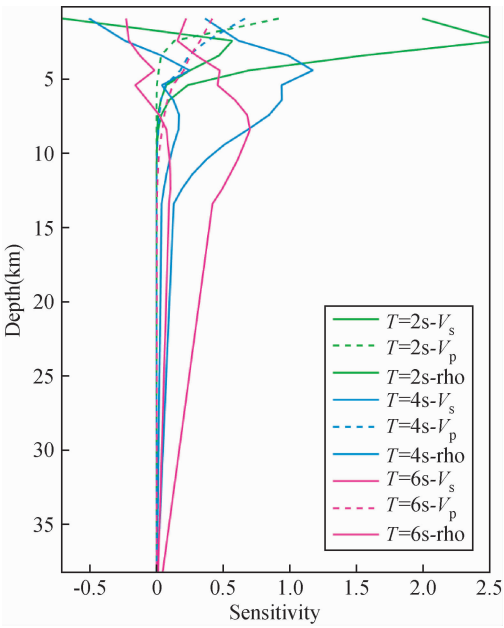


图 7　不同周期基阶瑞利面波相速度的深度敏感核曲线

Fig. 7　Sensitive kernel curves at different depths of phase velocity of the fundamental Rayleigh surface waves with different periods

2.3　检测板测试

为评价反演结果的空间分辨率和可解释深度,本研究开展检测板测试. 测试采用棋盘状速度异常模型,并添加 2% 随机噪声模拟实际数据扰动;随后使用真实台站几何和射线路径进行反演,通过理论异常的恢复程度评估不同网格划分和不同深度处的成像能力. 测试设置 18 × 18、25 × 25、35 × 35 和 45 × 45 四种横向网格划分,对应网格尺寸分别约为 0.05° × 0.05°、0.04° × 0.04°、0.03° × 0.03°和 0.02° × 0.02°(纬度方向 × 经度方向). 检测深度包括 0.2 km、1.0 km、2.0 km、3.5 km、5.0 km 和 7.0 km,深度选取遵循浅层加密、深层适当放宽的原则;初始 S 波速度上下限设为 1.0 ~ 3.7 km/s,以覆盖研究区浅部火山沉积层、变质基底和侵入岩的速度范围.

正则化参数采用 L 曲线方法确定. 分别测试 0.5、1、3、3.2、3.5、4、5、6、8、10 和 40 等光滑参数,比较数据拟合项与模型粗糙度项之间的折中关系(图

8).L 曲线拐点对应 $\lambda=4.0$,表明该参数能够在拟合观测频散数据和保持模型平滑性之间取得较合理平衡.随后在 $\lambda=4.0$ 条件下开展检测板恢复测试.结果显示,45×45 网格(0.02°×0.02°)在 0.2~5.0 km 范围内恢复效果较好,研究区中部和东南部恢复程度优于边缘区域;7.0 km 深度恢复效果明显下降.因此,本文最终采用 45×45 横向网格和 9 个 1 km 深度网格开展 0~5 km 范围内的真实数据反演.

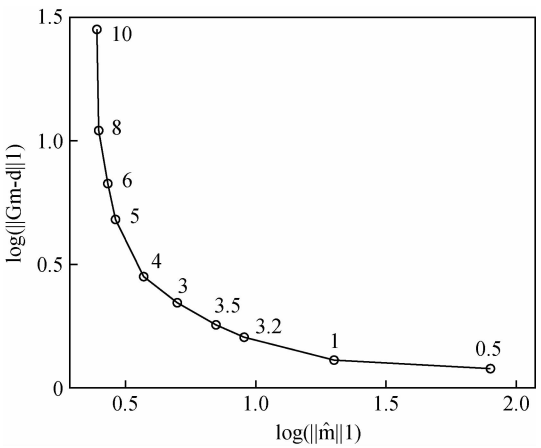


图 8 L-curve 分析结果

Fig.8 L-curve analysis results

3 三维 S 波速度结构分析

盛源与天华山火山盆地上地壳(0~5 km)S 波速度结构显示,整体呈现明显横向非均匀性.速度分布与赣杭构造带、北武夷成矿带以及江山—绍兴断裂、邵武—河源断裂等主要构造单元具有较好的空间对应关系,反映研究区浅部岩性组成、断裂破碎程度和构造单元差异对 S 波速度结构的共同影响.

0.4 km 深度处,南部北武夷成矿带虽受表层覆盖层或风化层影响表现为相对低速,但整体速度仍高于北部赣杭构造带.该特征与两大构造单元浅表岩性差异相一致:北武夷成矿带以花岗质侵入岩、陆相火山岩和变质基底为主,岩石致密性较高(舒良树,2012;郭恒飞等,2020);赣杭构造带东段及盛源盆地发育火山碎屑岩和火山沉积建造,浅表松散程度较高(陈国梁等,1987;余心起等,2005;Shu *et al.*,2017),因而表现为较低 S 波速度.

1 km 深度以下,研究区南北部速度分异更加清晰:北部赣杭构造带 S 波速度多低于 3.0 km/s,南部北武夷成矿带多高于 3.0 km/s.高低速界限与赣杭构造带南界大体对应,并随深度增加出现向北偏移.结合侯爵等(2022)对钦杭—武夷山成矿带上地壳结构的研究,该偏移可作为江山—绍兴断裂在研究区浅部具有北倾和逆冲性质的速度结构约束.成像结果中发育的 NE 向低速条带,与华南东部 NE-NNE 向断裂系统发育的构造背景一致(李三忠等,2017);结合地理位置和已有深地震测深资料(李培等,2015),其中较长低速条带可解释为邵武—河源断裂或其影响带的浅部速度响应.对于吴川—四会断裂和政和—海丰断裂等区域断裂,本文仅依据 0~5 km 速度模型难以作唯一判定,需结合更大尺度资料进一步约束.

5 km 深度处赣杭构造带与北武夷成矿带的 V_S 差异减小(差异多小于 0.2 km/s),说明研究区浅部速度分异在接近本文模型下限时趋于减弱.该现象可与华南板块长期构造演化背景联系起来讨论,例如扬子与华夏地块拼合及后期多期构造改造可能使区域基底具有一定共同性(陈建书等,2020;张国伟等,2013;张岳桥等,2009,2012;Li *et al.*,2014;Dong *et al.*,2015;Wang *et al.*,2003;杨明桂等,2012).由于本文数据主要约束 0~5 km 上地壳结构,本文将该现象表述为浅部速度结构趋同,并将中下地壳尺度结构连续性作为后续深部探测需要进一步检验的问题.

此外,0.4~1.0 km 深度 S 波速度快速增高,指示浅表覆盖层、火山碎屑岩与下伏较致密基底之间存在明显速度差异.盛源火山盆地浅部低速层可能对应火山碎屑岩和火山沉积层,其下伏速度增高与元古代变质结晶基底或较致密火山岩有关(陈国梁等,1987;Shu *et al.*,2017).天华山火山盆地浅部相对低速则可能与风化层、裂隙化侵入岩及冷水坑矿区岩浆-热液活动有关(郭恒飞等,2020;苏慧敏等,2013).

为进一步揭示速度结构的垂向变化与构造关联,选取 4 条关键测线(图 9)开展垂向剖面分析,遵循“横穿主控断裂、覆盖主要地质单元、避开台阵稀疏区”原则,速度剖面如图 10 所示.

a-a′剖面(N45°走向,全长约 55 km)横穿北武夷成矿带与天华山火山盆地,并与江山—绍兴断裂相交.剖面约 18 km 处及约 4 km 埋深附近出现明显 V_s 突变,断裂两侧速度由约 3.5 km/s 降至约 2.8 km/s;剖面约 2/3 处存在 V_s 约 2.4 km/s 的局部低速体,将连续高速区分隔,可能反映断裂破碎带或次级构造影响.b-b′剖面(N45°走向,全长约 42 km)经过江山—绍兴断裂,但未明显穿越邵武—河源断裂.

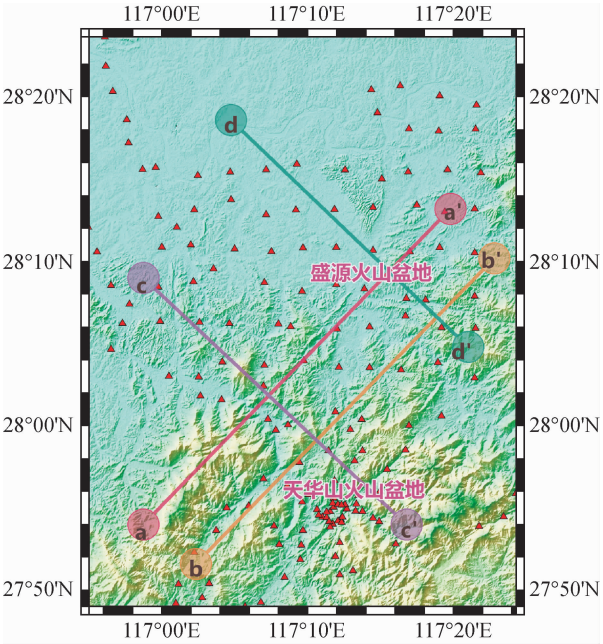


图 9　四条测线的具体分布位置

Fig. 9　Specific distribution locations of four profiles

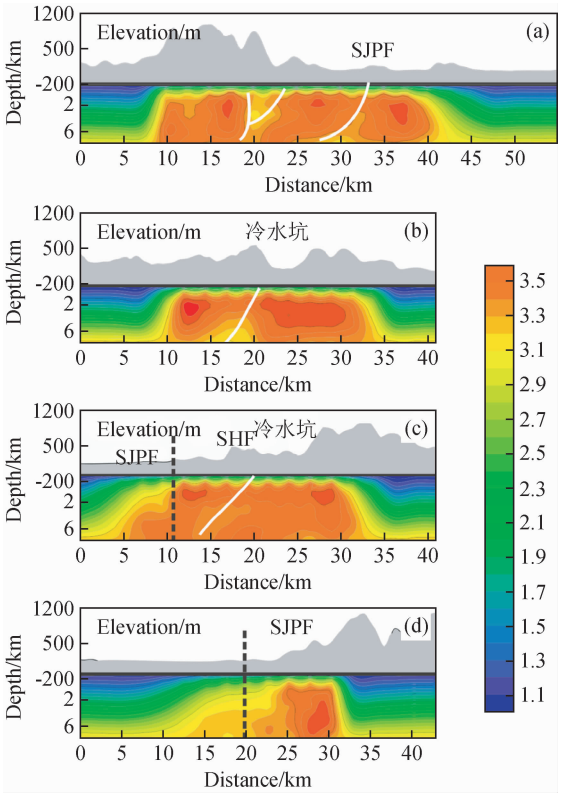


图 10　4 条测线位置处 S 波速度剖面

Fig. 10　S-wave velocity profiles along the four selected profile lines

对比 a-a′与 b-b′两条 SW-NE 向剖面(图 11),浅层 V_s 整体变化幅度有限,高速区向东侧逐渐收缩,显示研究区浅部速度结构存在一定横向变化. 由于剖面走向与江山—绍兴断裂局部走向接近,断裂错断特征在该方向上的显示相对较弱.

c-c′剖面(N135°走向,全长约 40 km)覆盖台站较多,并经过天华山火山盆地、盛源火山盆地、江山—绍兴断裂及邵武—河源断裂邻区,是本文重点分析剖面. 距剖面起点约 5 ~ 10 km 处出现 V_s 约 3.2 ~ 3.4 km/s 的高速体,可能与冷水坑矿区较致密的花岗斑岩或相关侵入体有关;距剖面起点约 30 ~ 35 km 处出现 V_s 约 2.7 ~ 2.9 km/s 的低速条带,可解释为邵武—河源断裂或其破碎影响带的浅部响应.

d-d′剖面(N135°走向,全长约 43 km)经过高速异常体和地形起伏较大区域,以约 25 km 处为界,北侧赣杭构造带 V_s 多低于 2.9 km/s,南侧北武夷成矿带 V_s 多高于 3.0 km/s. 沿 NW-SE 方向观察 c-c′与 d-d′剖面(图 12),V_s 呈现“低速-高速-低速”的三段式变化,反映不同构造单元及断裂影响带的浅部速度差异. 该特征可解释为浅部岩性、裂隙发育程度和断裂破碎作用的综合响应. 为进一步展示浅部速度界面的空间起伏,绘制了 V_s = 1.4 km/s 和 V_s = 3.0 km/s 等值面(图 13). V_s = 1.4 km/s 等值面在盛源火山盆地下方呈相对下凹形态,可能反映低速覆盖层或火山沉积层厚度变化;V_s = 3.0 km/s 等值面在同一区域相对上凸,表明较致密岩体或基底界面埋深存在横向差异. 在 V_s = 3.0 km/s 等值面中,天华山火山盆地高速体埋深普遍小于约 1.5 km,盛源火山盆地多大于约 2.0 km,显示两盆地浅部速度界面起伏具有明显差异.

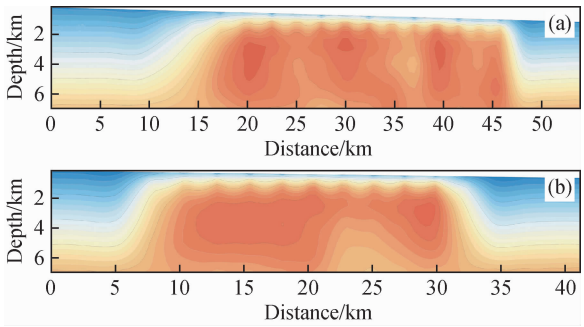


图 11　三维空间中 SW-NE 方向 a-a′与 b-b′剖面速度结构对比

Fig. 11　Three-dimensional view of the SW-NE profiles a-a′ and b-b′

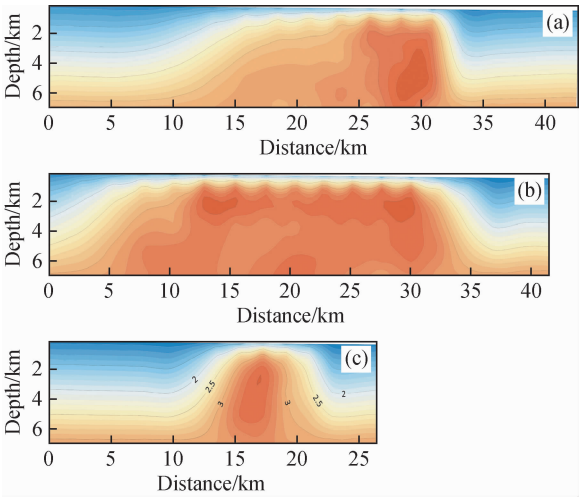


图 12 三维空间中 NW-SE 方向 c-c′与 d-d′剖面速度结构对比

Fig. 12 Three-dimensional view of the NW-SE profiles c-c′ and d-d′

4 讨 论

4.1 盛源与天华山火山盆地上地壳速度分异的构造成因

盛源与天华山火山盆地上地壳的 V_S 分异,主要反映赣杭构造带与北武夷成矿带浅部物质组成、岩性致密程度和断裂破碎程度的差异(图 14 和图 15).赣杭构造带东段及盛源火山盆地发育侏罗纪火山碎屑岩和火山沉积建造,局部受断裂和热液活动改造(陈国梁等,1987;杨明桂和梅勇文,1997;徐德明等,2012;周永章等,2015,2017;Shu *et al.*,2017),浅部低速特征较明显.北武夷成矿带及天华山盆地则发育花岗质侵入岩、火山岩和变质基底,冷水坑矿田还与燕山期岩浆-热液活动密切相关(郭恒飞等,2020;苏慧敏等,2013;刘涛等,2021),因此在 1~5 km 深度范围内整体表现为相对高速.

从垂向演化来看,0.4~1.0 km 深度 V_S 的快速增幅(盛源盆地约 0.5 km/s、天华山盆地约 0.4 km/s)反映浅表覆盖层、风化层与下伏较致密岩体之间的速度差异.盛源盆地低速层及其下方速度增高,可与火山碎屑岩-变质基底界面相联系;天华山盆地局部低速异常则可能与侵入体裂隙带、热液蚀变和断裂破碎作用有关.研究区 1~4 km 深度出现的 NE 向低速条带,与华南东部 NE-NNE 向断裂系统发育的构造背景一致(李三忠等,2017),但本文仅依据速度异常不能唯一确定每条断裂的精确归属,仍需与地质填图、重磁电资料和深地震剖面联合验证.

4.2 江山—绍兴深大断裂的倾向与逆冲性质验证

成像结果中"赣杭构造带南界随深度增加向北偏移"的特征(1~5 km 深度约 0.2°)为江山—绍兴断裂在研究区浅部具有北倾和逆冲性质提供了速度结构证据(图 15),与侯爵等(2022)通过双聚束噪声成像提出的江绍断裂逆冲性质和西北倾向认识相一致.速度剖面显示,江绍断裂附近存在较清晰的 V_S 突变带,1 km 深度突变带宽度约 4 km,5 km 深度约 2 km,断裂两侧 V_S 差值约 0.4~0.5 km/s,说明该断裂或其影响带在 0~5 km 范围内具有较明显的浅部速度响应.需要指出的是,本文模型深度有限,尚不能单独约束断裂向中下地壳的延伸深度;关于其深大断裂属性和成矿通道作用,应结合宽角反射/折射、重磁电和区域地质资料综合讨论(林吉焱等,2020;谭桂丽等,2008).

4.3 5 km 深度速度趋同及其构造含义

5 km 深度处赣杭构造带与北武夷成矿带的 V_S

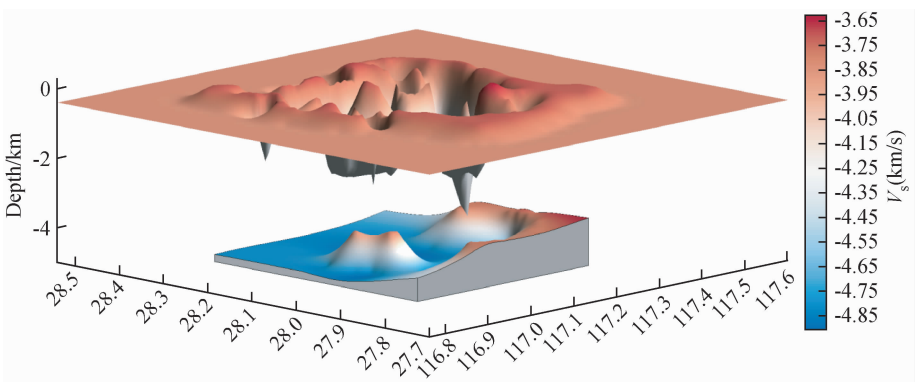


图 13 同一速度在地壳中的分布

上层为 1.4 km/s 速度在地层中的分布,下层为 3.0 km/s 速度在地层中的分布.

Fig. 13 Distribution of the same velocity in the earth's crust

The distribution of velocity in the upper layer is 1.4 km/s, and the distribution of velocity in the lower layer is 3.0 km/s.

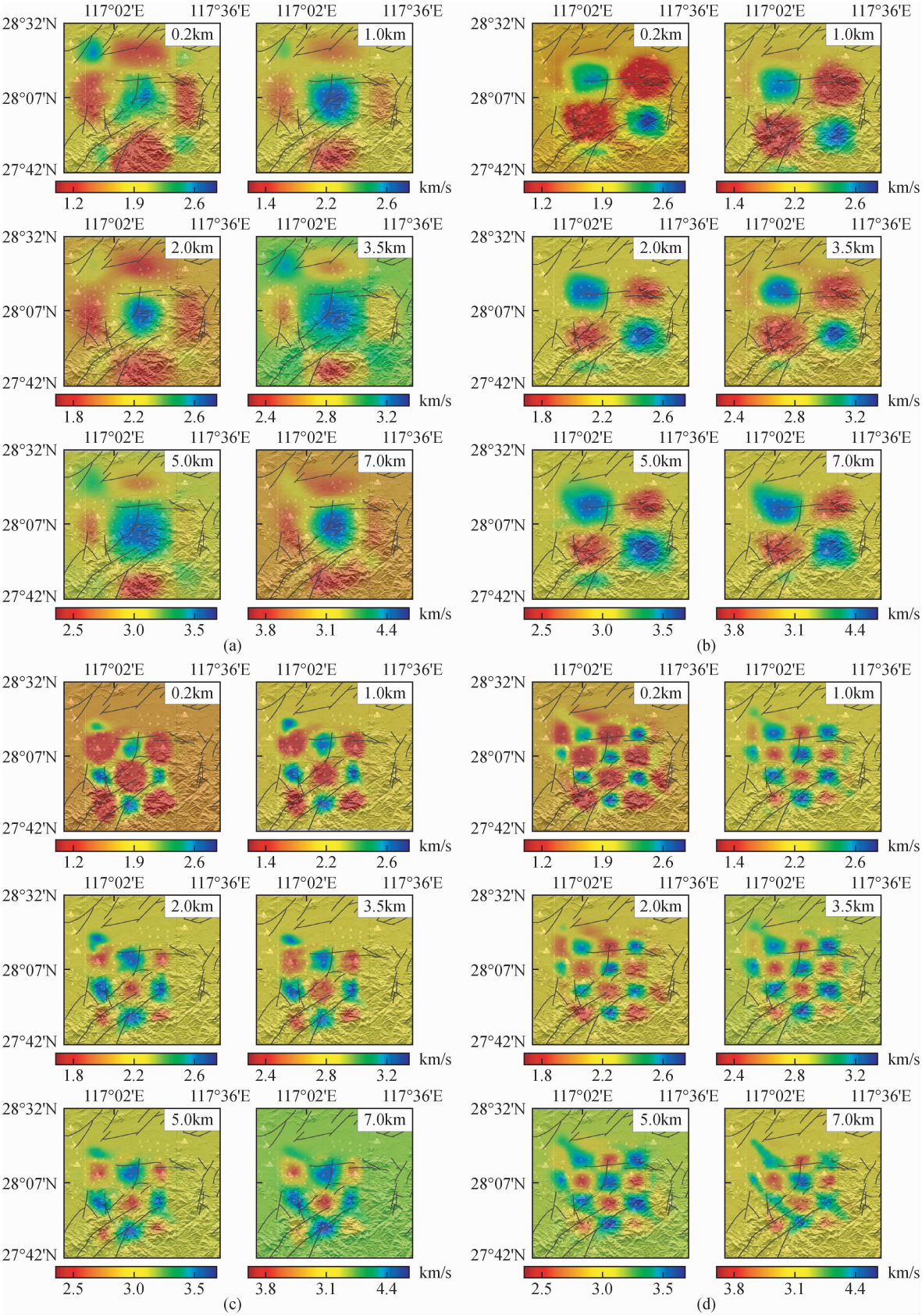


图 14　不同分辨率检测板

(a) 18×18; (b) 25×25; (c) 35×35; (d) 45×45.

Fig. 14　Different resolution detection boards

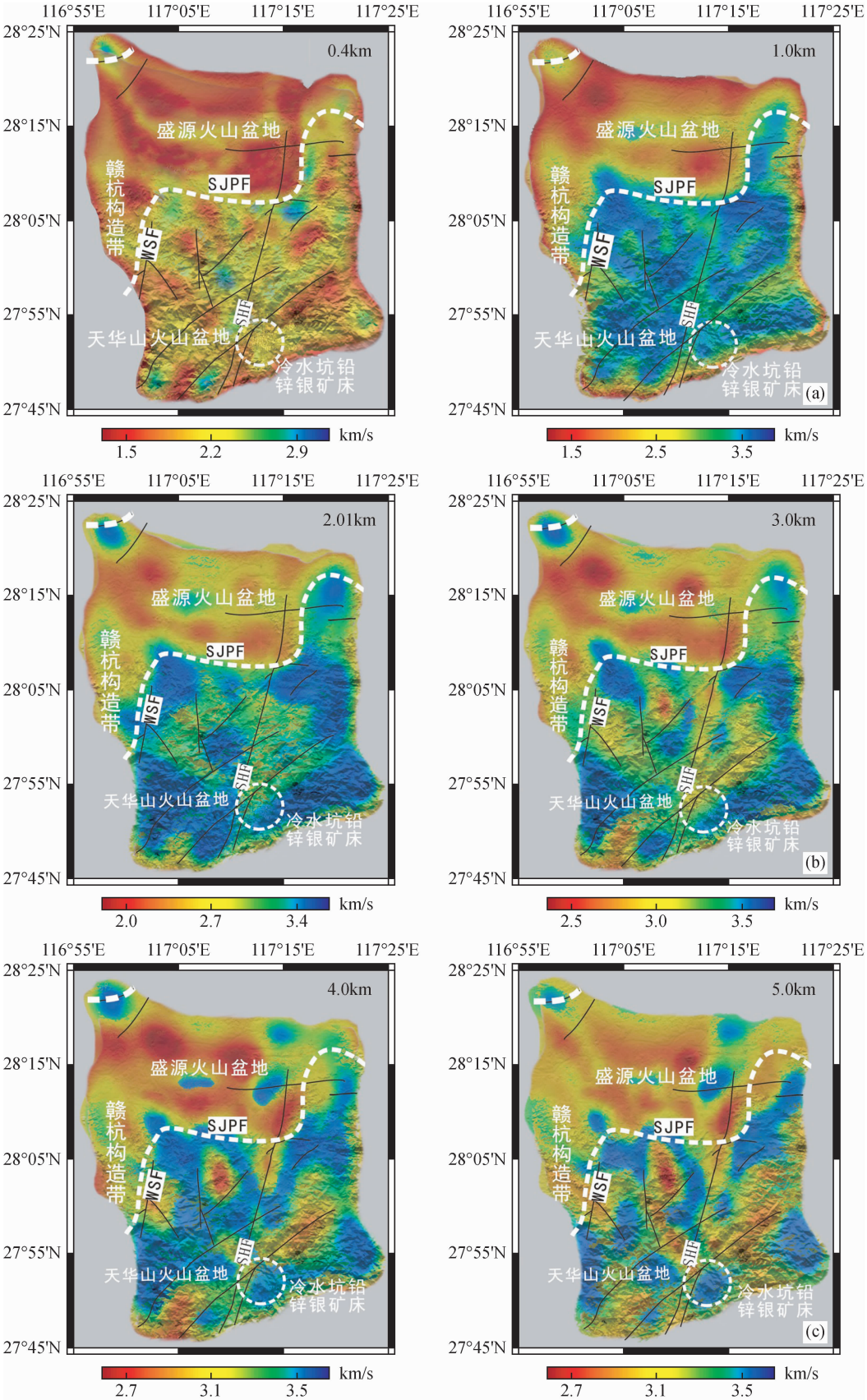


图 15 成像结果解释

主要断裂:SJPF:绍兴—江山断裂;WSF:吴川—四会断裂;SHF:邵武—河源断裂.

Fig. 15 Interpretation of imaging results

Main Fault: SJPF: Shaoxing Jiangshan Fault; WSF: Wuchuan Sihui Fault; SHF: Shaowu Heyuan Fault.

差异减小(差异多小于 0.2 km/s),说明研究区浅部速度分异在接近本文模型下限时趋于减弱. 该现象可与华南板块长期构造演化背景联系起来讨论,例如扬子与华夏地块拼合及后期多期构造改造可能使区域基底具有一定共同性(张国伟等,2013;张耀阳等,2019). 由于本文数据主要约束 0 ~ 5 km 上地壳结构,本文将该现象表述为浅部速度结构趋同,并将中下地壳尺度结构连续性作为后续深部探测需要进一步检验的问题.

4.4　速度结构对深部找矿的指导价值

盛源与天华山火山盆地上地壳的 V_S 结构,为两大盆地的深部找矿提供了明确的地球物理标志,可从"靶区圈定"与"成矿环境约束"两方面提供指导.

对于盛源火山盆地(铀矿靶区),0.4 ~ 1.0 km 深度 V_S 由约 2.1 ~ 2.4 km/s 增至约 2.6 ~ 2.8 km/s 的速度突变带,可作为识别浅表火山碎屑岩、火山沉积层与下伏较致密基底界面的地球物理标志. 江山—绍兴断裂附近 NE 向低速条带(V_S 约 2.7 ~ 2.8 km/s)可能反映断裂破碎或裂隙发育部位,可作为铀矿化有利空间的优先关注区(刘德长等,1989;刘秋德,2003;金和海等,2007;谭桂丽等,2008;朱建林等,2019;郑师雄等,2020). 盛源盆地中心 NW 向相对低速凹陷(较周边低约 0.1 ~ 0.2 km/s,延伸至约 3 km 深度)提示该区可能存在较厚火山沉积层或构造凹陷,应结合钻探、放射性测量和地球化学资料进一步验证.

对于天华山火山盆地(铅锌银矿靶区),冷水坑矿区 1 ~ 3 km 深度的局部低速异常(V_S 约 2.8 ~ 2.9 km/s)可能对应侵入体裂隙带、热液蚀变带或断裂破碎带,与冷水坑矿田岩浆-热液成矿背景相符(苏慧敏等,2013;邱骏挺等,2013;郭恒飞等,2020). 该低速异常沿邵武—河源断裂邻区展布,说明断裂可能控制岩浆侵入和热液运移通道. 找矿应用上,可将 V_S < 3.0 km/s 的局部低速异常与已知断裂、岩体和地球化学异常叠合分析,作为靶区优选线索;但单独的速度异常不能直接等同于矿体,需要多源地质和地球物理证据联合约束.

5　结　论

本文通过研究区三维横波速度结构,得到以下新的发现:

(1)短周期密集台阵的布设与数据基础:本研究在盛源与天华山火山盆地及邻区布设 154 台短周期节点仪,获得 2021 年 11 月 18 日至 12 月 25 日连续背景噪声记录. 经互相关和质量控制,从 11781 条台站对记录中保留 7484 条瑞雷面波频散曲线,反演获得研究区 0 ~ 5 km 三维 S 波速度结构.

(2)赣杭与北武夷成矿带的浅部速度差异:研究区北部赣杭构造带整体表现为相对低速,南部北武夷成矿带整体表现为相对高速. 0.4 km 深度处北武夷成矿带虽受风化层或覆盖层影响表现为局部低速,但仍整体高于赣杭构造带;1 ~ 5 km 深度范围内,两带速度差异更加清晰.

(3)赣杭构造带南界偏移与江山—绍兴断裂:随深度增加,赣杭构造带南界向北偏移,结合剖面速度突变特征和已有研究成果,说明江山—绍兴断裂在研究区 0 ~ 5 km 范围内具有北倾和逆冲性质的浅部速度结构响应.

(4)盛源火山盆地浅部低速凹陷:V_S = 1.4 km/s 等值面在盛源火山盆地下方呈相对下凹形态,V_S = 3.0 km/s 等值面表现为埋深差异,提示浅表低速层厚度和基底界面存在横向变化. 该认识可为铀矿靶区优选提供浅部结构约束.

(5)速度趋同现象及其解释范围:5 km 深度处赣杭构造带与北武夷成矿带的 V_S 差异减小,表明浅部速度分异随深度增加而减弱. 本文将该认识限定在 0 ~ 5 km 上地壳范围内,更深部构造意义有待结合长周期面波和深部地球物理资料进一步约束.

尽管本文采用地震背景噪声面波成像方法获得了研究区 0 ~ 5 km 三维 S 波速度结构,但受台阵孔径、频散周期范围和射线覆盖限制,模型对 5 km 以下结构的约束不足,边缘区域分辨率也低于台阵中部. 后续研究应结合更长周期面波、主动源/天然地震资料、重磁电和钻探资料,对断裂深部延伸、速度异常成因及成矿意义进行联合验证.

致　谢　感谢审稿人对本文提出的宝贵修改意见和建议,感谢中国科学技术大学姚华建教授团队提供的背景噪声程序和面波直接反演程序,感谢李红星教授以及汪舒妍的帮助.

References

Aki K. 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 35(3): 415-456.

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, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.

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, doi: 10.1785/0120050077.

Chen G L, Yao D Q, Cui Z K, *et al*. 1987. The uranium deposit in Shengyuan volcanic subsidence Basin in relation to regional geochemical anomalies and the characteristics of satellite photographic interpretation. Uranium Geology (in Chinese), 3(5): 302-306.

Chen J S, Dai Y R, Tang F, *et al*. 2020. Discussion on the Mesoproterozoic and Neoproterozoic major tectonic events in marginal area of the Yangtze Block. Geological Review (in Chinese), 66(3): 533-554.

Claerbout J F. 1968. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. Geophysics, 33(2): 264-269, doi: 10.1190/1.1439927.

Deng Y F, Li S L, Fan W M, *et al*. 2011. Crustal structure beneath South China revealed by deep seismic soundings and its dynamics implications. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 54(10): 2560-2574, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.013.

Deng Y F, Zhang Z J, Badal J, *et al*. 2014. 3-D density structure under South China constrained by seismic velocity and gravity data. Tectonophysics, 627: 159-170.

Dong S W, Zhang Y Q, Zhang F Q, *et al*. 2015. Late Jurassic-Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: a synthesis of the Yanshan Revolution. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 750-770.

Fang H J, Zhang H J, Yao H J, *et al*. 2016. A new algorithm for three-dimensional joint inversion of body wave and surface wave data and its application to the Southern California plate boundary region. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(5): 3557-3569.

Fang J, Yao H J, Wang J X, *et al*. 2024. Ambient noise surface wave imaging reveals the shallow crustal three-dimensional S-wave velocity structure in the Dali region, Yunnan. //Proceedings of the 2024 Annual Meeting of Chinese Geoscience Union: Seismic Wave Propagation and Imaging, Seismic Surface Waves, Ambient Noise and Coda Interferometry Imaging and Monitoring (in Chinese). Beijing: Beijing Botong Electronic Publishing House, 125-127, doi: 10.26914/c.cnkihy.2024.085217.

Fang J, Yao H J, Li J, *et al*. 2025. Short-period planar dense array reveals 3-D shallow crustal velocity structure and deformation characteristics in the Anhui Xuancheng Region. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 68(8): 2995-3010, doi: 10.6038/cjg2025T0092.

Fang J Q, Deng J Z, Chen H, *et al*. 2022. Study on the lithospheric electrical structure of beneath the central segment of the Gan-Hang Tectonic Belt. Geological Journal of China Universities (in Chinese), 28(3): 440-450, doi: 10.16108/j.issn1006-7493.2020227.

Gao Z Y, Ye X W, Lin J Y, *et al*. 2024. The high-resolution 3D S-wave velocity structure in the shallow crust of Guangzhou-Foshan area based on short-period dense array. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(4): 1454-1470, doi: 10.6038/cjg2023Q0607.

Guo H F, Wu J H, Guo G L, *et al*. 2020. SHRIMP U-Pb ages of the zircons from rhyolite in the Lengshuikeng Pb—Zn—Ag orefield, northeastern Jiangxi Province and their geological implications. Geological Review (in Chinese), 66(2): 337-349.

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.

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 Journal of Geophysics (in Chinese), 65(10): 3881-3899, doi: 10.6038/cjg2022Q0152.

Huang R, Xu Y X, Zhu L P, *et al*. 2015. Detailed Moho geometry beneath southeastern China and its implications on thinning of continental crust. Journal of Asian Earth Sciences, 112: 42-48.

Jin H H, Zhang H, Liu Q D. 2007. Analysis of prospecting effect of polonium survey and geoelectric survey extracted uranium and molybdenum in the south of Shengyuan volcanic basin. Uranium Geology (in Chinese), 23(2): 101-108, 128.

Jing J L, Chen G X, Cheng F, *et al*. 2024. Application of ultra-short-time linear array ambient noise imaging technology to detect shallow geological structures. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(1): 63-76, doi: 10.6038/pg2024HH0167.

Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, *et al*. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: a preliminary synthesis. Earth-Science Reviews, 134: 98-136.

Li M Y, Zeng X W, Yao H J, *et al*. 2024. Three-dimensional crustal velocity structure and tectonic implication of the Haiyuan-Liupan Mountain area based on ambient noise tomography. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(12): 4666-4680, doi: 10.6038/cjg2024R0804.

Li P, Jin X, Wang S X, *et al*. 2015. Crustal velocity structure of the Shaowu-Nanping-Pingtan 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.

Li Y, Yao H J, Liu Q Y, *et al*. 2010. Phase velocity array tomography of Rayleigh waves in western Sichuan from ambient seismic noise. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 53(4): 842-852, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.009.

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/cjg2020O0158.

Liu D C, Zou J K, Sun M R, *et al*. 1989. Digital image integration technique of multiple geoscience information system & its application on Shengyuan Basin. Remote Sensing for Natural Resources (in Chinese), 1(2): 29-37, 57.

Liu Q D. 2003. Prospecting significance of Bouguer gravity anomalies in the Shengyuan Basin. World Nuclear Geoscience (in Chinese), 20(2): 97-100, 84, doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2003.02.007.

Liu T, Xiang M, Tian S H. 2021. Geochronology of the Yanshanian magmatic rocks in Wuyishan Metallogenic Belt: a case study of ages of Ehuling Formation and Daguding Formation in Tianhuashan Basin. Journal of East China University of Technology (Natural Science) (in Chinese), 44(5): 443-450.

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.

Mao J W, Chen M H, Yuan S D, *et al*. 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 85(5): 636-658.

Meng Y F, Yao H J, Wang X Z, *et al*. 2019. Crustal velocity structure and deformation features in the central-southern segment of Tanlu fault zone and its adjacent area from ambient noise tomography. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 62(7): 2490-2509, doi: 10.6038/cjg2019M0189.

Qiu J T, Yu X Q, Wu G G, *et al*. 2013. Geochronology of igneous rocks and nappe structures in Lengshuikeng deposit, Jiangxi Province, China. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 29(3): 812-826.

Rawlinson N, Sambridge M. 2004. Wave front evolution in strongly heterogeneous layered media using the fast marching method. Geophysical Journal International, 156(3): 631-647, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02153.x.

Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, *et al*. 2005. High-resolution

surface-wave tomography from ambient seismic noise. Science, 307(5715): 1615-1618.

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.

Shu X, Yang S Y, Jiang S Y, *et al*. 2017. Petrogenesis and geodynamic setting of Early Cretaceous felsic rocks in the Gan-Hang Belt, Southeast China: constraints from geochronology and geochemistry of the tuffs and trachyandesitic rocks in Shengyuan volcanic Basin. Lithos, 284-285: 691-708.

Su H M, Mao J W, He X R, *et al*. 2013. Timing of the formation of the Tianhuashan Basin in northern Wuyi as constrained by geochronology of volcanic and plutonic rocks. Science China Earth Sciences (in Chinese), 56(6): 940-955.

Tan G L, Wu J Q, Ling H F, *et al*. 2008. Mineralogy evidence of shoshonite rock series from Shengyuan Basin and it's adjacent area. Uranium Geology (in Chinese), 24(4): 208-213.

Wang J J, Yao H J, Wang W T, *et al*. 2018. Study of the near-surface velocity structure of the Hutubi gas storage area in Xinjiang from ambient noise tomography. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 61(11): 4436-4447, doi: 10.6038/cjg2018M0025.

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.

Xiong S B, Liu H B, Wang Y X, *et al*. 2002. A study on velocity distribution in upper crust and tectonics of basement and cover in South China. Chinese Journal of Geophysics, 45(6): 831-841.

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, doi: 10.3969/j.issn.1007-3701.2012.04.001.

Xu Z P, Liu Q X, Duan Y H, *et al*. 2023. Three-dimensional shear-wave velocity structure in the shallow stratum of the Hongze Lake, with a short-period dense seismic array. Progress in Geophysics (in Chinese), 38(3): 1035-1046, doi: 10.6038/pg2023GG0366.

Yan J Y, Lü Q T, Luo F, *et al*. 2019. Where is Qinzhou-Hangzhou juncture belt? Evidence from integrated geophysical exploration. Geology in China (in Chinese), 46(4): 690-703.

Yang M G, Mei Y W. 1997. Characteristics of geology and metatllization in the Qinzhou-Hangzhou Paleoplate juncture. Geology and Mineral Resources of South China (in Chinese), 14(3): 52-59.

Yang M G, Zhu P J, Xiong Q H, *et al*. 2012. Framework and evolution of the Neoproterozoic-Early Paleozoic South-China rift system. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 86(9): 1367-1375.

Yang X Y, Li Y H. 2021. Crustal thicknesses and V_p/V_s ratios beneath South China estimated from receiver function analysis and their geological implications. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 64(1): 146-156, doi: 10.6038/cjg2021N0320.

Yao H J, Xu G M, Xiao X, *et al*. 2004. A quick tracing method based on image analysis technique for the determination of dual stations phase velocities dispersion curve of surface wave. Seismological and Geomagnetic Observation and Research (in Chinese), 25(1): 1-8, doi: 10.3969/j.issn.1003-3246.2004.01.001.

Yao H J, Van der Hilst R D, De Hoop M V. 2006. Surface-wave array tomography in SE Xizang from ambient seismic noise and two-station analysis-I. Phase velocity maps. Geophysical Journal International, 166(2): 732-744, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x.

Yi G X, Yao H J, Zhu J S, *et al*. 2008. A quick tracing method based on image analysis technique for the determination of dual stations phase velocities dispersion curve of surface wave. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51(2): 402-411.

Yu X Q, Shu L S, Yan T Z, *et al*. 2005. Prototype and sedimentation of red basins along the Ganhang tectonic belt. Acta Sedimentologica Sinica (in Chinese), 23(1): 12-20.

Yu X Q, Wu G G, Shu L S, *et al*. 2006. The cretaceous tectonism of the Gan-Hang tectonic belt, southeastern China. Earth Science Frontiers (in Chinese), 13(3): 31-43.

Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, *et al*. 2013. Tectonics of South China continent and its implications. Science China Earth Sciences (in Chinese), 56(11): 1804-1828.

Zhang W W, Zhang Y Q, Huang Y P, *et al*. 2022. Research progress and prospect of seismic ambient noise tomography. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(1): 125-141, doi: 10.6038/pg2022FF0241.

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, Dong S W, Li J H, *et al*. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China. Acta Geoscientica Sinica (in Chinese), 33(3): 257-279.

Zhang Y Y, Fang H, Qiu G G, *et al*. 2019. The lithospheric structure of the lower Yangtze Craton and its adjacent regions by S receiver function imaging. Geology in China (in Chinese), 46(4): 786-794.

Zhang Z J, Badal J, Li Y K, *et al*. 2005. Crust-upper mantle seismic velocity structure across Southeastern China. Tectonophysics, 395(1-2): 137-157.

Zheng S X, Zhu J L, Zan F, *et al*. 2020. Geochemical characteristics of volcanic rocks in the middle of Ganhang uranium metallogenic belt and their relation to uranium mineralization. Uranium Geology (in Chinese), 36(6): 510-519, doi: 10.3969/j.issn.1000-0658.2020.06.004.

Zheng X, Zhao C P, Zhou L Q, *et al*. 2012. Rayleigh wave tomography from ambient noise in central and eastern Chinese. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55(6): 1919-1928, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.013.

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.

Zhou Y Z, Zheng Y, Zeng C Y, *et al*. 2015. On the understanding of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt, South China. Earth Science Frontiers (in Chinese), 22(2): 1-6, doi: 10.13745/j.esf.2015.02.001.

Zhou Y Z, Li X Y, Zheng Y, *et al*. 2017. Geological settings and metallogenesis of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay orogenic juncture belt, South China. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 33(3): 667-681.

Zhu J L, Jiang P, Zou J. 2019. Geological structure of the Shengyuan volcanic basin in Jiangxi Province and its controlling for uranium mineralization. East China Geology (in Chinese), 40(1): 43-50, doi: 10.16788/j.hddz.32-1865/p.2019.01.006.

附中文参考文献

陈国梁, 姚达泉, 崔振奎, 等. 1987. 盛源火山沉陷盆地铀矿床与区域地球化学异常及卫片解译特征. 铀矿地质, 3(5): 302-306.

陈建书, 代雅然, 唐烽, 等. 2020. 扬子地块周缘中元古代末 - 新元古代主要构造运动梳理与探讨. 地质论评, 66(3): 533-554.

邓阳凡, 李守林, 范蔚茗, 等. 2011. 深地震测深揭示的华南地区地壳结构及其动力学意义. 地球物理学报, 54(10): 2560-2574, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.013.

方吉琦, 邓居智, 陈辉, 等. 2022. 赣杭构造带中段岩石圈电性结构研究. 高校地质学报, 28(3): 440-450, doi: 10.16108/j.issn1006-7493.2020227.

方捷, 姚华建, 王景熙, 等. 2024. 背景噪声面波成像揭示云南大理地区浅部地壳三维横波速度结构. //2024 年中国地球科学联合学术年会论文集--专题九 地震波传播与成像、专题十 地震面波、背景噪声及尾波干涉地下结构成像及介质变化监测. 北京:

北京伯通电子出版社, 125-127, doi: 10.26914/c.cnkihy.2024.085217.

方捷, 姚华建, 李杰, 等. 2025. 短周期面状密集台阵揭示安徽宣城地区浅部地壳三维速度结构及变形特征. 地球物理学报, 68(8): 2995-3010, doi: 10.6038/cjg2025T0092.

高占永, 叶秀薇, 林吉焱, 等. 2024. 基于短周期密集台阵的广州-佛山地区地壳浅部三维S波速度结构研究. 地球物理学报, 67(4): 1454-1470, doi: 10.6038/cjg2023Q0607.

郭恒飞, 巫建华, 郭国林, 等. 2020. 赣东北冷水坑铅锌银矿田流纹岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及地质意义. 地质论评, 66(2): 337-349.

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.

金和海, 张鸿, 刘秋德. 2007. 盛源火山盆地南部钋法-地电提取铀、钼方法找矿效果分析. 铀矿地质, 23(2): 101-108, 128.

敬嘉良, 陈国雄, 程飞, 等. 2024. 超短时线性台阵背景噪声成像技术在浅层地质结构探测中的应用. 地球物理学进展, 39(1): 63-76, doi: 10.6038/pg2024HH0167.

李蒙亚, 曾宪伟, 姚华建, 等. 2024. 基于背景噪声成像研究海原-六盘山地区地壳三维速度结构及其构造意义. 地球物理学报, 67(12): 4666-4680, doi: 10.6038/cjg2024R0804.

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.

李昱, 姚华建, 刘启元, 等. 2010. 川西地区台阵环境噪声瑞利波相速度层析成像. 地球物理学报, 53(4): 842-852, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.009.

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.

刘德长, 邹景轲, 孙茂荣, 等. 1989. 多源地学信息数字图像综合技术及在盛源盆地的应用研究. 国土资源遥感, 1(2): 29-37, 57.

刘秋德. 2003. 布伽重力异常在盛源盆地的找矿意义. 世界核地质科学, 20(2): 97-100, 84, doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2003.02.007.

刘涛, 向蜜, 田世洪. 2021. 武夷山成矿带燕山期岩浆岩地质年代学研究——以天华山盆地鹅湖岭组及打鼓顶组年龄为例. 东华理工大学学报(自然科学版), 44(5): 443-450.

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.

毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, 85(5): 636-658.

孟亚锋, 姚华建, 王行舟, 等. 2019. 基于背景噪声成像方法研究郯庐断裂带中南段及邻区地壳速度结构与变形特征. 地球物理学报, 62(7): 2490-2509, doi: 10.6038/cjg2019M0189.

邱骏挺, 余心起, 吴淦国, 等. 2013. 江西冷水坑矿区构造-岩浆活动的年代学约束. 岩石学报, 29(3): 812-826.

舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035-1053.

苏慧敏, 毛景文, 何细荣, 等. 2013. 北武夷天华山盆地形成时限的约束: 来自火山岩-侵入岩的年代学证据. 中国科学: 地球科学, 43(5): 745-759.

谭桂丽, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2008. 盛源盆地及邻区橄榄玄粗岩系列火山岩的矿物学证据及成因探讨. 铀矿地质, 24(4): 208-213.

王娟娟, 姚华建, 王伟涛, 等. 2018. 基于背景噪声成像方法的新疆呼图壁储气库地区近地表速度结构研究. 地球物理学报, 61(11): 4436-4447, doi: 10.6038/cjg2018M0025.

徐德明, 蔺志永, 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, doi: 10.3969/j.issn.1007-3701.2012.04.001.

徐志萍, 刘巧霞, 段永红, 等. 2023. 利用短周期密集台阵噪声成像研究洪泽湖浅部三维横波速度结构. 地球物理学进展, 38(3): 1035-1046, doi: 10.6038/pg2023GG0366.

严加永, 吕庆田, 罗凡, 等. 2019. 钦杭何在? 来自综合地球物理探测的认识. 中国地质, 46(4): 690-703.

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, 14(3): 52-59.

杨明桂, 祝平俊, 熊清华, 等. 2012. 新元古代-早古生代华南裂谷系的格局及其演化. 地质学报, 86(9): 1367-1375.

杨晓瑜, 李永华. 2021. 中国华南地区地壳厚度与波速比分布特征及其地质意义. 地球物理学报, 64(1): 146-156, doi: 10.6038/cjg2021N0320.

姚华建, 徐果明, 肖翔, 等. 2004. 基于图像分析的双台面波相速度频散曲线快速提取方法. 地震地磁观测与研究, 25(1): 1-8, doi: 10.3969/j.issn.1003-3246.2004.01.001.

易桂喜, 姚华建, 朱介寿, 等. 2008. 中国大陆及邻区Rayleigh面波相速度分布特征. 地球物理学报, 51(2): 402-411.

余心起, 舒良树, 颜铁增, 等. 2005. 赣杭构造带红层盆地原型及其沉积作用. 沉积学报, 23(1): 12-20.

余心起, 吴淦国, 舒良树, 等. 2006. 白垩纪时期赣杭构造带的伸展作用. 地学前缘, 13(3): 31-43.

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.

张文文, 张永谦, 黄跃鹏, 等. 2022. 地震背景噪声成像技术研究进展与展望. 地球物理学进展, 37(1): 125-141, doi: 10.6038/pg2022FF0241.

张耀阳, 方慧, 仇根根, 等. 2019. 利用S波接收函数研究下扬子及其邻区的岩石圈结构. 中国地质, 46(4): 786-794.

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.

张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33(3): 257-279.

郑孟杰, 徐涛, 吕庆田, 等. 2021. 基于万载-永春主动源和被动源联合观测研究钦杭-武夷山成矿带上地壳S波速度结构. //2021年中国地球科学联合学术年会论文集(十八)-专题五十二 地球重力场及其地学应用、专题五十三 地幔和地核: 结构、动力过程、物质组成及和浅部的相互作用、专题五十四 岩石圈构造与大陆动力学 (in Chinese). 1, doi: 10.26914/c.cnkihy.2021.

072557.

郑师雄, 朱建林, 昝芳, 等. 2020. 赣杭铀成矿带中段火山岩地球化学特征及其与铀成矿关系. 铀矿地质, 36(6): 510-519, doi: 10.3969/j.issn.1000-0658.2020.06.004.

郑现, 赵翠萍, 周连庆, 等. 2012. 中国大陆中东部地区基于背景噪声的瑞利波层析成像. 地球物理学报, 55(6): 1919-1928, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.013.

周永章, 郑义, 曾长育, 等. 2015. 关于钦-杭成矿带的若干认识. 地学前缘, 22(2): 1-6, doi: 10.13745/j.esf.2015.02.001.

周永章, 李兴远, 郑义, 等. 2017. 钦杭结合带成矿地质背景及成矿规律. 岩石学报, 33(3): 667-681.

朱建林, 姜平, 邹静. 2019. 江西盛源火山盆地构造对铀成矿的控制. 华东地质, 40(1): 43-50, doi: 10.16788/j.hddz.32-1865/p.2019.01.006.