中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 9 期： 3371–3387
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

会昌-寻乌地区地热成因机制：来自地震背景噪声与重力数据联合成像的约束

王向腾[1*]，谢超灵[1,2]，邓居智[1*]，李志伟[4]，严加永[5]，储日升[3]，倪四道[3]

1. 东华理工大学铀资源探采与核遥感全国重点实验室，南昌 330013
2. 安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站，中国科学技术大学，蒙城 233500
3. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院，精密大地测量与定位全国重点实验室，武汉 430077
4. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院，北京 100083
5. 中国地质科学院，北京 100037
* 通讯作者，E-mail：jzhdeng@ecut.edu.cn(邓居智)，wxt061082@ecut.edu.cn(王向腾)

2025-10-08收稿，2026-05-08修回，2026-06-02接受，2026-08-17网络版发表
国家自然科学基金项目(42130811、41904044)、东华理工大学核地学部“揭榜挂帅”项目(2024HDX07)、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-03、2025QZ-YZZ-06)、江西省自然科学基金项目(20232BAB213079、20242BAB25190、20252BAC200265)和大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金项目(SKLGED2020-4-1-E)资助

摘要 会昌-寻乌地区位于江西南部，分布着多处温泉以及高产热隐伏岩体，具有良好地热构造环境。断层展布状态以及盆地结构可为地热系统中生热系统以及热循环通道研究提供关键信息。然而，研究区固定台站较少，速度结构成像分辨率较低，难以对地热系统中关键地质构造进行准确分析。为理解断层以及盆地结构对该地区地热系统的控制作用，本文基于地震密集流动台阵和多种重力数据(地面和卫星重力)，利用联合反演方法获取了该地区浅层S波速度结构。结果显示：在空间上，速度异常分布较好地显示出地质构造特征，在浅部盆地中心区域呈现低速，山地岩体呈现高速，高低速分布特征与邵武-河源“S”型断裂带有较好的一致性，揭示了该断裂带对盆地发育的控制作用。从速度及其扰动和梯度剖面上看，会昌区域盆地厚度在2–4 km之间，沉积盖层保存完整，下伏为产热率较高的燕山晚期花岗岩，为深层干热岩提供良好储存环境；浅层地热温泉分布于张性或者张扭性断裂带附近，盆地附近断裂系统表现为相对低速，可为地热流体循环提供通道。可见，会昌-寻乌地区有良好的地热储存环境和勘探潜力，然而研究区域断裂构造复杂，地热系统成因还需要电磁以及钻探等多学科数据资料进一步约束。

关键词 会昌-寻乌地区，地热系统，联合成像，浅层速度，邵武-河源断裂带

1 引言

会昌-寻乌地区位于江西省南部，地处华南褶皱系，地质时期有多次岩浆活动，广泛出露着不同时期的花岗岩，大地热流值高(王一波等，2024)，有利于地热资源的形成。根据地热资源赋存特征，可将其划分为浅层地热和深层地热两大类(Xie等，2020)。其中，浅层地热资源主要以热水/蒸汽形式开发(汪集旸等，2015；王贵玲和蔺文静，2020)；深层地热资源则主要指埋深3–5 km以下的干热岩(Rubio-Maya等，2015； Xie等，2020)。地质资料和勘探实践表明，江西南部的①①地热资源具有重要科研、经济和生态环⑱⑲境价值，主要表现在类型丰富多样、储量大、分布广等(王安东等，2023；韩基弘等，2024)。其中，温泉有约17处(刘大任，1997)，是江西主要地热开发地区之一，水循环深度500–5570 m，断裂带构造为地热资源创造了良好的水循环条件(陈冬生和杨金华，2011)。同时，断裂带附近花岗岩分布广泛，且多为高产热隐伏岩体(伯慧等，2015；杨华泽等，2018)。地

中文引用格式：王向腾, 谢超灵, 邓居智, 李志伟, 严加永, 储日升, 倪四道. 2026. 会昌-寻乌地区地热成因机制：来自地震背景噪声与重力数据联合成像的约束. 中国科学: 地球科学, 56(9): 3371–3387, doi: 10.1360/SSTe-2025-0328
英文引用格式：Wang X, Xie C, Deng J, Li Z, Yan J, Chu R, Ni S. 2026. Geothermal genesis mechanisms in the Huichang-Xunwu area: Constraints from joint inversion of ambient seismic noise and gravity data. Science China Earth Sciences, 69(9): 3321–3337, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1986-8

© 2026《中国科学》杂志社

热系统通常具有高热流、低电阻率、低地震波速度等物性特征，地球物理方法可在地热储层勘探中发挥关键作用(Wu等，2012；李午阳等，2018；Zhou等，2025；曾昭发等，2025)。其中，地震成像可以显示出低波速异常区域，通常为岩性破碎带，对应为地热储含水构造(Cheng等，2021；Tian等，2021)。高分辨率速度结构对地热成因、开采以及后续可能面临的地震风险评估具有重要意义。

地球内部速度结构可以利用地震事件或者背景噪声源(台风或者海浪等)开展研究(Zhu和Kanamori，2000；Yang等，2008；李孟洋等，2022)。其中，地震背景噪声成像方法是一种有效的探测手段，广泛应用在多种尺度速度结构成像研究中(Shapiro等，2005；Yao等，2006；Li等，2009；Yang等，2010；Zheng等，2011；Herrmann，2013；Liang等，2023；Li D等，2024；赵盼盼等，2025)。近年来，该方法也成功应用在地热储层成像相关研究中(Obermann等，2015；Lehujeur等，2018；Martins等，2019；Planès等，2020；Cheng等，2021)。然而，对速度成像研究来说，基于不同类型数据联合反演是有效减少多解性的重要途径(郑晨等，2016；Guo等，2019；Du等，2021；Liu等，2021；Hao等，2023；李雪垒等，2023；高天扬等，2023；徐芸和吴庆举，2024；Kim等，2025；Wang和Zheng，2025)。例如，面波频散与接收函数的联合反演，以及地震与重力联合反演等，不同类型数据可以实现信息互补，能够提供相互独立的结构约束信息(Deng等，2014；Li等，2014；Chong等，2015；郭震等，2015；Chen和Niu，2016；Ai等，2021；Bao等，2021；宛家宽等，2025)。其中，重力数据是积分效应体现，具有较大的多解性。浅部异常体或者深部密度具有较大横向变化时，才会对地表观测值有足够贡献(Li和Oldenburg，1998)。地震面波为地下三维介质的综合响应，具有频散特性，可以用于反演地下速度结构信息。面波周期限制以及射线分布不均匀，会导致对速度结构的约束力降低(Huang等，2003)。地震面波与重力数据结合可在面波数据缺乏约束的区域提高反演的分辨率(Maceira和Ammon，2009)，主要体现在射线覆盖不足的地区，重力数据可优化剪切波速度的横向分辨率，而地震数据可以提高密度成像在垂向的分辨率(Deng等，2014；Ars等，2019；Carrillo等，2024；Chen等，2024；Guo等，2024)。

基于永久台站宽频带地震数据，针对大尺度速度结构，前人基于多种地震学成像方法进行深入的研究，发布了多个区域速度结构参考模型(USTClitho2.0、CSRM-1.0)(Shan等，2016；罗松等，2019；Han等，2021；He等，2021；Yang等，2010；Xiao等，2024；Xin等，2024)。近年来，研究者们在江西及邻区基于高密度地震台阵，开展了中小尺度、高分辨率地壳结构成像工作(侯爵等，2022；Gong等，2023；Teng等，2023；韩如冰等，2023；李成等，2023；Bi等，2024；Zhai等，2025)。例如，Bi等(2024)在南岭成矿带布设密集地震台阵并采用接收函数成像方法，发现北部断裂带下方存在逐渐过渡的莫霍面结构，该区域与A型花岗岩分布高度吻合，表明地幔物质沿深部构造薄弱带涌入地壳。但是对于会昌-寻乌地区来说，固定地震台站仅为3个(图1B)，基于目前成像结果分辨精度较低(Gong等，2025；吕坚等，2016)，对研究区域来说，其分辨率在50 km左右，难以对该地区地热构造环境及成因机制进行有效地分析。

为了提高研究区域速度结构测定精度，本文基于密集流动台阵，利用地震以及重力联合反演方法研究了会昌-寻乌盆地浅层速度结构。结合干热岩、温泉以及地下水地球化学资料，根据盆地速度结构特征，分析地热的热循环以及储盖系统，为会昌-寻乌盆地地热系统成因机制研究提供地震学依据。

2　地质水文构造背景

研究区地处江西省赣州市东南部，构造上位于武夷山北北东隆起带西部，为呈南北向展布并向西凸出的弧形断陷盆地。盆地总体发育形态受寻乌-石城、会昌环形断裂带、九连山-安远断裂带、全南-寻乌等断裂控制(张万良和李富梅，2014)。除了这些区域断裂外，会昌-寻乌盆地周围还密集分布各类小型断裂(图1B)，根据断裂展布方向，可分为NNE向、NE向、NEE向、NW向四个断裂系统，寻乌断裂向NW陡倾，为压扭性断裂带，伴生构造有NNW向张性兼扭性断裂、NWW向张性断裂、NEE向压性断裂(钟骏泰，2002；刘大任，1997)。压性和压扭性构造本身压密，透水性不好，但是当晚期构造与之交切使张性构造复活，并改变其方向或性质时，其透水性可以得到改善，温泉沿区域性大断裂方向呈线状泉群出露(李学礼等，1992)。

自北向南形成会昌和寻乌两个断陷盆地，共出露8个地热田(图1B)。其中，会昌环形构造控制了研究区域北部的地热分布，其性质主要为浅层热隆伸展构造。该地区地热流体主要赋存于以下两类构造地质中：其一，主干断裂破碎带(例如谢坊、安子山地热田)，主要由燕山期花岗岩或者震旦系浅变质岩与白垩系红层接触带所形成；其二，断层复合交叉部位，主要为北东向、北西向次级断裂与近南北向主干断裂相交处，如筠门岭、会昌坝背地热田。而在南部寻乌地区，寻乌断裂控制了地热

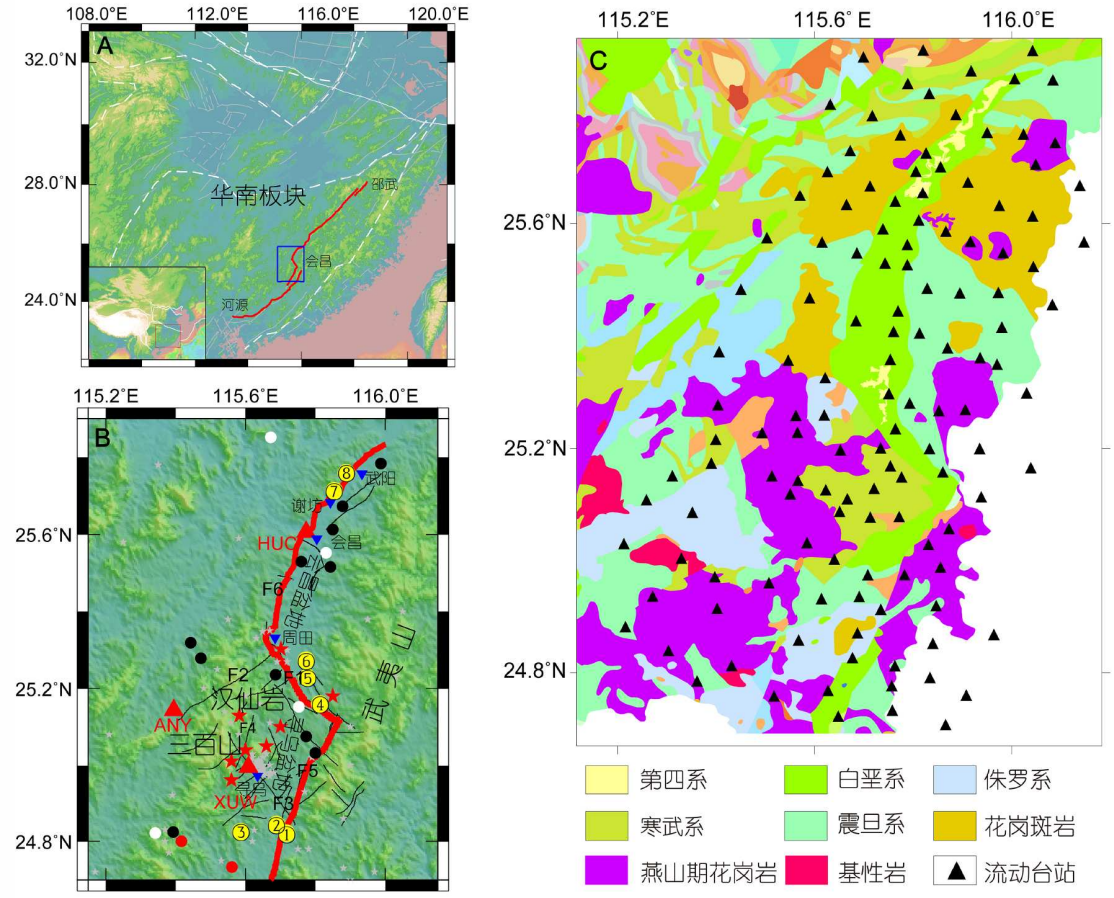


图 1 区域地质地震构造和地热及流动台站分布图。(A) 区域地质构造单元，蓝色方框为研究区域所在，邵武-河源断裂带(红色曲线)。(B) 研究区域地热及地震断层分布，红色三角为固定台网，红色五角星为1806年以来5级以上地震，灰色五角星为区域历史上1983年以来5级以下地震(来源于中国地震台网和陈祥熊等，1990)，断层由黑色曲线所示：F1–F6分别是周田-珊贝、清溪-富田、鸡笼嶂-寻乌-八尺圩、三标-菖蒲、珊贝-丘坊和会昌断层；蓝色倒三角为地名，黑色圆圈为温泉25–40 ℃热水点，白色为40–60 ℃，红色为60–90 ℃(王安东等，2023)；黄色圆圈为地热田编号：①寻乌南桥东；②寻乌南桥西；③寻乌河角；④寻乌上津；⑤会昌坝背；⑥会昌筠门岭；⑦瑞金谢坊；⑧瑞金安子山。(C) 会昌-寻乌地区地质图(根据1:50万江西省地质图修改https://igss.cgs.gov.cn:6160)和台站分布，黑色三角为流动台站

展布状态，呈现北北东向分布。该区域断裂破碎带中储存着大量地热流体，主要为北北东向断裂破碎带，或与近东西向、北西向断裂交汇部位(河角与南桥地热田)(韩基弘等，2024)。另外，断陷盆地两侧岩浆作用活跃，多期次花岗岩体广泛发育，局部伴生火山岩与火山侵入岩。主要由加里东期、印支期与燕山期等多期侵入体及岩墙、岩脉组成，其产热率普遍较高。已有研究据此圈定了江西东部干热岩有利区，其中赣州会昌、寻乌、安远等地尤为突出(伯慧等，2015；张福神等，2024)。

3 数据及方法

3.1 地震背景噪声数据

本文使用的地震背景噪声数据来自于会昌-寻乌地区以及邻区(24.7°–25.9°N，115.2°–116.1°E)135个地震台站(图1C)，台间距为5–10 km，覆盖邵武-河源断裂带会昌-寻乌段主要断层、盆地区域以及温泉点范围。该台阵于2023年6月至7月布设完成，收集了一个月连续地震波形数据，使用仪器为SmartSolo IGU-16HR 3C便携式节点地震仪(主频5 Hz)，通过挖坑浅埋的方式进行布设。该型号仪器已被应用在鲜水河、郯庐等断裂带、冰川以及金属成矿带的速度结构成像研究中(Fu等，2021；Zhao等，2023；Lu等，2024；Wu等，2025；Yang等，2024；高级等，2025)。

在满足频带需求的同时，为了提高计算效率，将波形记录的原始采样率(250 Hz)统一降采样至25 Hz。为了得到高信噪比的互相关波形，在计算之前，需将地震数据进行仪器响应去除、去均值以及去倾斜等地震噪声数据预处理流程(Bensen等，2007)。然后将连续波形切割为每段1 h，并分三个频带(0.5–1.0、1.0–5.0、5.0–10.0 s)

进行叠加，得到宽频波形数据。为提高信噪比，对分段计算互相关波形进行叠加。另外，针对仪器故障和地震事件导致的干扰信号，采用滑动绝对平均时域归一化方法以减弱其对计算结果的影响(Zhao等，2023)。

基于135个地震台站的数据，共计9000条互相关波形数据。在不同滤波条件下，互相关波形上可以观察到清晰的面波信号，其视速度约为2.78 km/s。图2显示了1787号台站与相邻台站之间互相关函数波形，可以看到明显的瑞利面波信号，且正负半轴波形存在差异，并不是完全对称。理论上讲，如果噪声源呈均匀分布，波形数据正负半轴应该具有较高的对称性，这就表明研究区域噪声源分布是不均匀的，有一定方向性。为了降低噪声源不均分布的影响，将正负半轴波形进行叠加，同时也增加了信噪比(Bensen等，2007)。基于图像分析方法(Yao等，2006，2011)提取频散曲线时，将波形信噪比设置为5，这里信噪比定义为互相关函数信号最大幅值与噪声平均绝对幅值之比，其中信号窗口为−50–50 s，噪声窗口分别为−100–−50和50–100 s。台间距大于2倍面波波长，共提取了大约5000条相速度频散曲线，周期分布在0.5–7 s之间，通过计算相速度频散标准差，再次筛选地震面波观测值在2倍标准差范围之内，使得相速度集中分布在2.4–3.4 km/s之间(图3A)，但0.5–6 s周期之间频散曲线分布较多，数量均超过1000条(图3B)。在不同周期上，射线仅在台站边缘地区分布较为稀疏，但在盆地中心地区均比较密集(图4)，可以为后续联合反演研究提供数据基础。

3.2　重力数据

在利用联合反演方法研究大尺度结构时，通常使用WGM2012卫星布格重力异常模型(Balmino等，2012；Deng等，2014)。该模型经过基于DTU10数字高程地形改正，其地形分辨率为1′(Pavlis等，2012)。但是本文研究区域较小，且处于丘陵地带，地形复杂，WGM2012模型地形改正数据精度可能比较低，其布格重力异常数据难以直接使用。GGMplus全球重力模型提供了更高精度以及分辨率的重力异常数据(Hirt等，2013)，Hirt等(2019)基于90 m分辨率地形数据计算了地形重力，并发布了SRTM2gravity模型，大幅提高了地形改正精度。SRTM2gravity模型可以清楚地显示出研究区域地形效应，与当地盆地和山脉展布高度一致。为此，本文基于研究区域GGMplus模型重力异常值(网络版附图S1A)以及SRTM2gravity模型地形重力结果(附图S1B)，得到区域布格重力异常数据(附图S1C)，本文将区域布格重力异常减采样至1 km网格进行联合反演，后续将讨论不同重力数

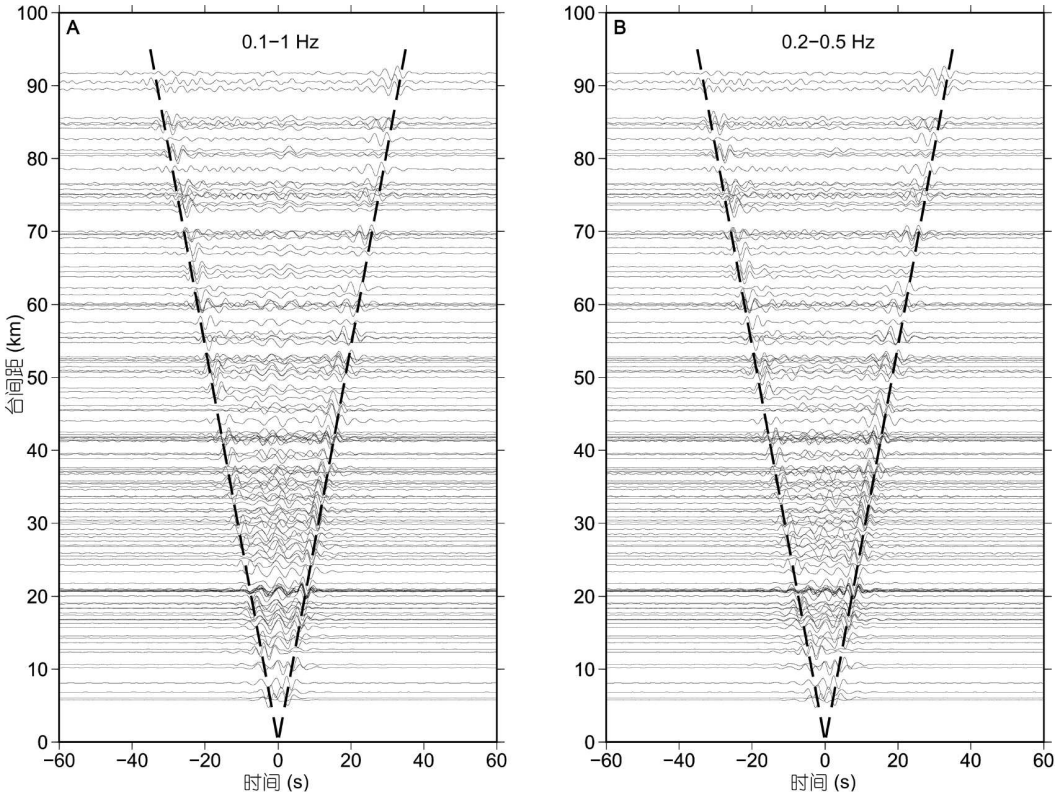


图 2　1787号台站与相邻台站间的垂直分量互相关波形剖面。(A) 0.1–1 Hz带通滤波；(B) 0.2–0.5 Hz带通滤波。虚线表示2.78 km/s的平均速度

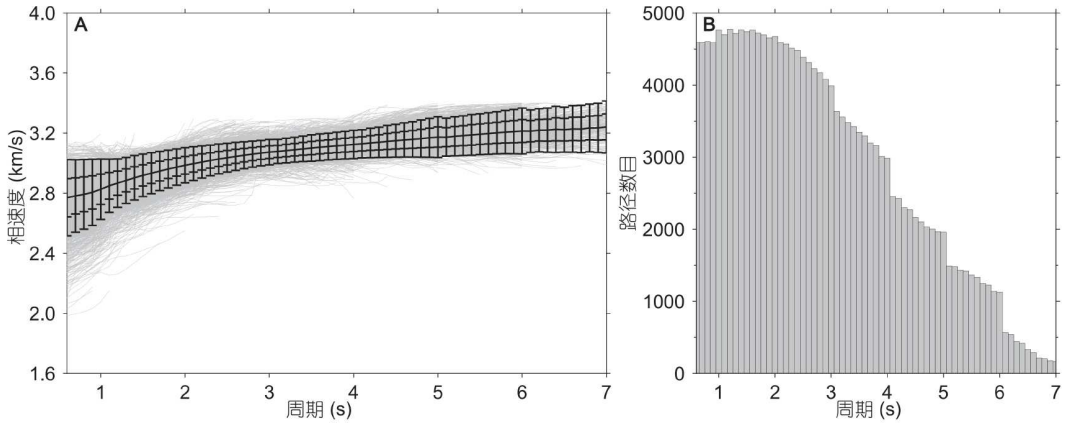


图 3 频散曲线及频散数量分布。(A) 面波相速度观测数据，黑色横线代表2倍标准差；(B) 不同周期频散曲线数目

据网格对反演结果影响。

考虑到面波数据周期较短，主要反映了地壳浅部结构信息，而布格重力异常数据反映了大尺度地幔以及地壳信息，为了更好地与面波数据相结合进行反演计算，需要对重力数据进行预处理以降低深部背景场影响。本文采用向上延拓法来分离深部重力背景场，通常以反演深度2倍左右作为最佳延拓高度(郝奥伟等，2023)。在本研究中，反演深度为5–6 km，选取向上延拓10 km来去除深部重力场影响。通过延拓获取了深部区域布格重力异常结果(图5B)，然后从初始布格重力异常(图5A)数据中减去深部区域布格重力异常，得到剩余布格重力异常(图5C)。该区域深部布格重力异常分布特征整体上与莫霍面起伏特征相吻合，区域东北与西南地区的莫霍面较深，对应于区域异常低值；西北和东南部较浅的莫霍面对应于区域异常高值结果(韩如冰等，2023)，结果显示重力异常分离的合理性。相比于初始重力异常数据，分离之后，剩余布格重力异常数据更加突出了研究区域浅部重力异常特征(图5C)。

3.3 联合反演方法

本文利用Du等(2021)发展的联合反演方法对研究区进行三维速度结构成像，将面波频散数据直接与研究区剪切波速度关联起来。其主要原理如下：

$$\delta t_i(\omega)=\sum_{j=1}^{J}\frac{\partial t_i(\omega)}{\partial c_j(\omega)}\left(\frac{\mathrm{d}c_j(\omega)}{\mathrm{d}\beta}\delta\beta\right) \tag{1}$$

其中，ω是角频率，β是S波速度，$t_i(\omega)$是特定面波周期下第i个走时，$c_j(\omega)$是第j个网格节点处的频散值，d/dβ是对S波速度的全导数。由于岩石中速度与密度之间存在经验联系(Brocher，2005)，可以将S波速度β转换为P波速度α和密度ρ，相应的转换关系分别记为F_α和F_ρ：

$$\begin{aligned}\alpha&=F_\alpha(\beta)\\ \rho&=F_\rho(\beta)\end{aligned} \tag{2}$$

构建剪切波速度与重力异常之间的关系：

$$\delta\rho=\frac{\mathrm{d}F_\rho(\beta)}{\mathrm{d}\beta}\delta\beta \tag{3}$$

将重力正演计算的网格与面波的网格设置在同一套网格点上，重力与面波正演问题表示为

$$\mathbf{Gm}=\mathbf{G}(\alpha,\beta,\rho)=d \tag{4}$$

其中，d为由面波走时数据和重力异常数据联合组成的数据向量；$\mathbf{G}$为一个计算矩阵；$\mathbf{m}$为网格节点上的模型参数。通过公式(1)和(4)，在反演过程中，可以将剪切波速度与面波走时和重力异常数据整理为一个线性方程组：

$$\begin{bmatrix}\mathbf{G}_\mathrm{s}\\ \mathbf{G}_\mathrm{g}\end{bmatrix}\delta\beta_i=\begin{bmatrix}\delta\mathbf{t}\\ \delta\mathbf{g}\end{bmatrix} \tag{5}$$

通过最优化来求解式(5)中的速度扰动值：

$$\delta\beta_i=\mathrm{argmin}\left\|\begin{bmatrix}\mathbf{W}_\mathrm{s}\mathbf{G}_\mathrm{s}\\ \mathbf{W}_\mathrm{g}\mathbf{G}_\mathrm{g}\\ \sigma\mathbf{S}\\ \gamma\mathbf{I}\end{bmatrix}\mathbf{m}-\begin{bmatrix}\mathbf{W}_\mathrm{s}\delta\mathbf{t}\\ \mathbf{W}_\mathrm{g}\delta\mathbf{g}\\ \mathbf{0}\\ \mathbf{0}\end{bmatrix}\right\|_L \tag{6}$$

其中，σ表示正则化系数，$\mathbf{S}$和γ分别为二阶导数矩阵和阻尼系数，不同类型数据的权重则通过$\mathbf{W}$对角矩阵来体现，其中，面波走时数据为$\mathbf{W}_\mathrm{s}$，重力数据为$\mathbf{W}_\mathrm{g}$，具体为

$$\mathbf{W}_\mathrm{s}=\mathrm{diag}\left\{\sqrt{\frac{p}{N_\mathrm{s}(\sigma_{si})^2}},i=1,2,3,\ldots,N_\mathrm{s}\right\} \tag{7}$$

$$\mathbf{W}_\mathrm{g}=\mathrm{diag}\left\{\sqrt{\frac{1-p}{N_\mathrm{g}(\sigma_{gi})^2}},i=1,2,3,\ldots,N_\mathrm{g}\right\} \tag{8}$$

其中，面波数据量为N_s，重力数据量为N_g，p为不同数据之间权重系数，其范围在0–1，需根据具体问题数据进行

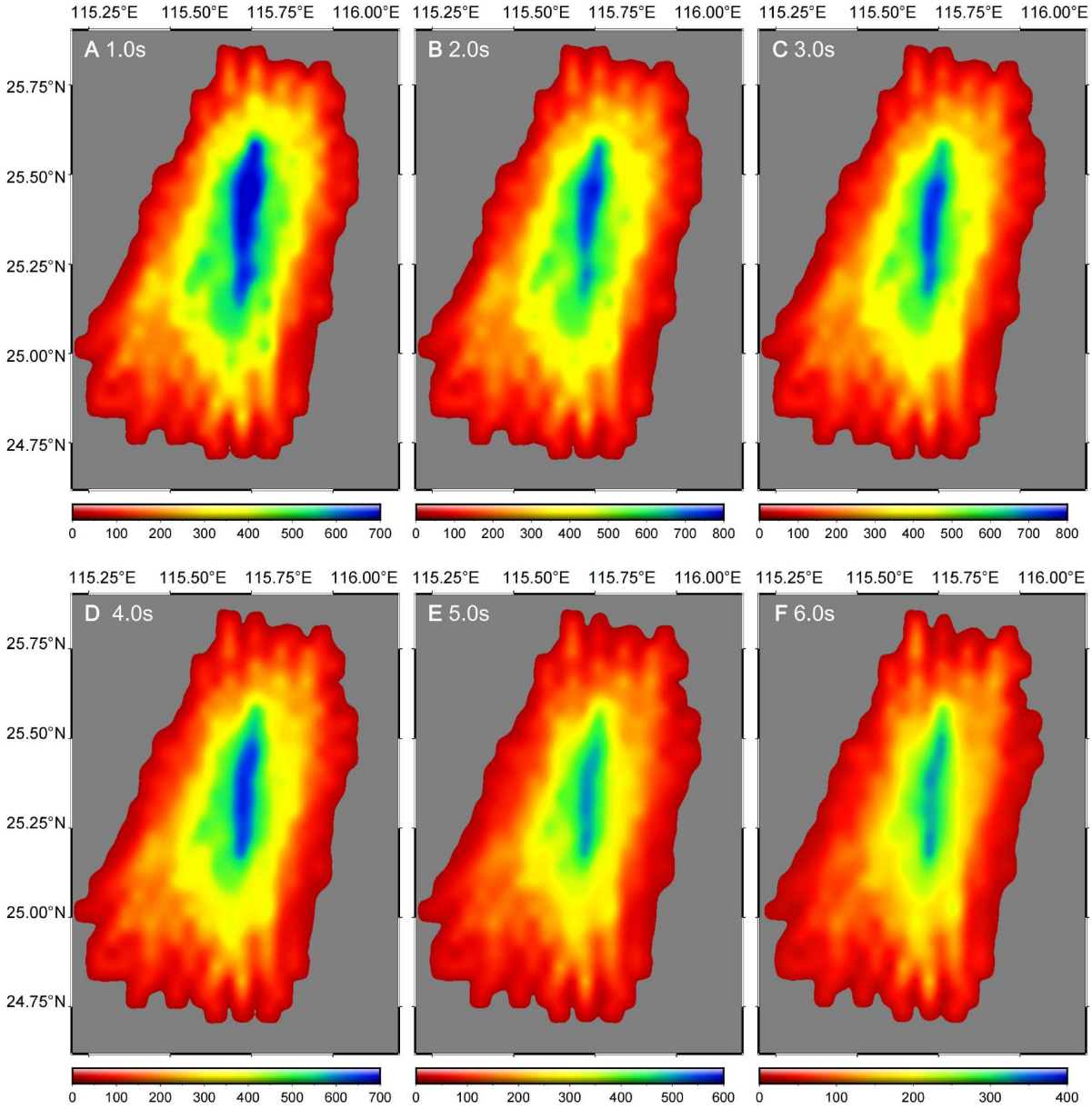


图 4　瑞利波相速度射线密度图。(A–F)分别代表1.0–6.0 s周期，图中边界由射线密度大于0的区域确定

一系列测试，以平衡不同数据之间的相互影响。

3.4　反演参数设置

合理的初始模型可以使得联合反演快速收敛，为此本文利用直接面波反演方法获取三维初始模型(Fang等，2015)。在直接面波反演时，将频散曲线进行平均，基于面波波长与敏感深度经验公式，构建一维S波速度(附图S2A)(Luo等，2021；Li M等，2023)。本文将成像网格大小设置为0.04°，后续基于该网格对检测板测试结果进行分析讨论。在反演过程中，采用了L曲线分析方法测试合适权重系数，经过一系列测试，将该数值设置为15(附图S2B)(李玲利等，2020)。迭代10次后，走时残差趋于稳定(附图S2C)，将结果作为联合反演初始模型(附图S3)。该初始模型在寻乌地区的速度，与王向腾等(2024)采用“两步法”得到的速度结果较为一致。在地震与重力数据联合反演中，同样采用了L曲线方法确定不同类型数据权重和平滑因子系数这两个关键参数。在联合反演过程中，我们进行了一系列测试，将数据权重p从0.1增加到了0.9。通过对比分析反演后的残差变化趋势，最终将权重系数p设置为0.5(如图6A所示)。这一权重分配方案有效平衡了不同类型数据在反演过程中的贡献，提高了反演结果的可靠性。另外，在保持其他参数恒定的情况下，

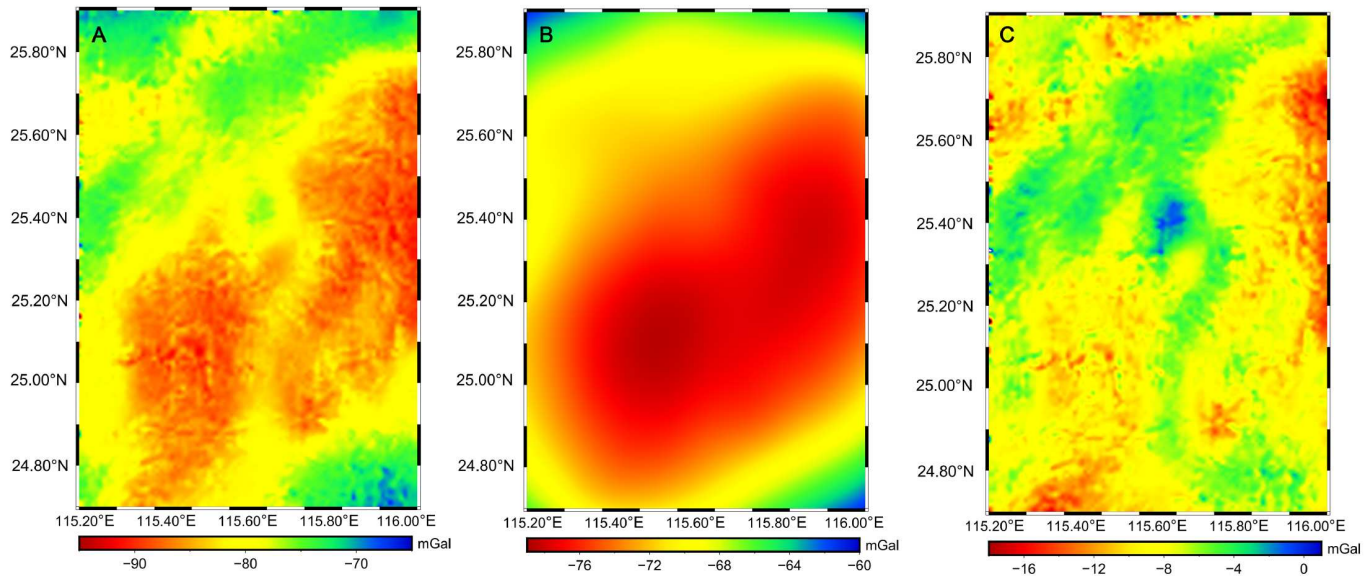


图5　重力异常数据分离处理。(A) 初始布格重力异常；(B) 区域布格重力异常；(C) 剩余布格重力异常

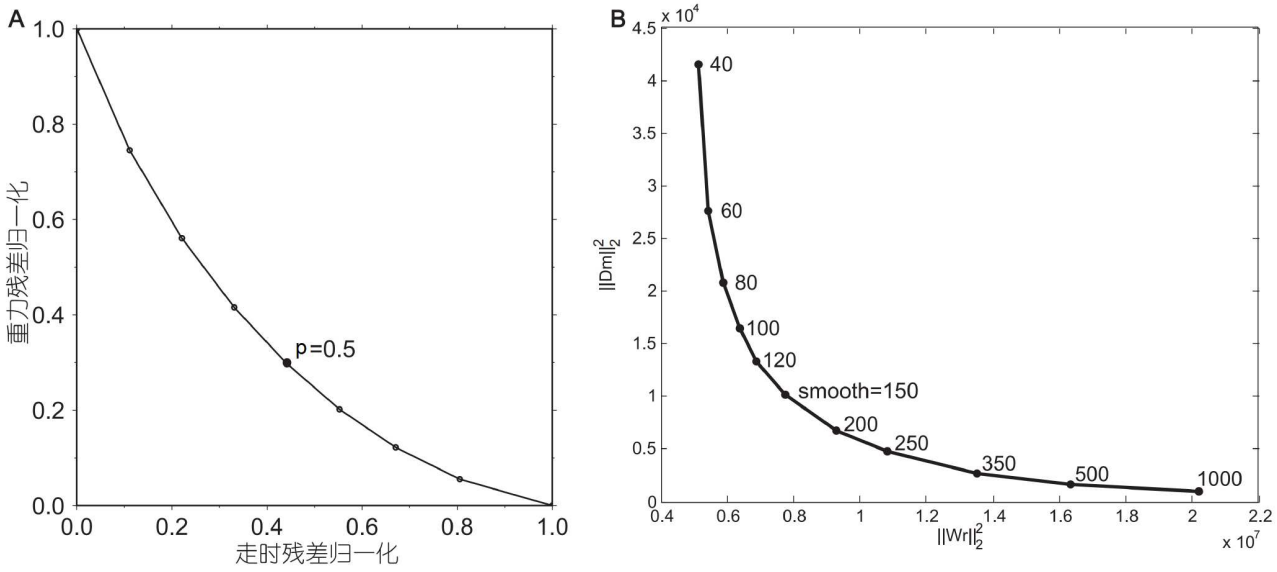


图6　反演参数选取的L曲线图。(A) 联合反演数据权重系数；(B) 平滑因子选择测试

也测试了不同平滑因子(从40增加到1000)对反演结果的影响，在后续反演过程中，将平滑因子设置为150(图6B)。

4　反演地壳S波速度

基于上述参数选择，联合反演得到不同深度上的S波速度结构(图7)。该反演结果在浅层与直接面波反演的速度分布(附图S3)特征大体一致，且可以与地质特征对应：在1.0–3.0 km深度上，会昌盆地中心区域剪切波速度相对较低，为晚白垩世红层沉积区域，而外围岩体山脉(如武夷山、三百山、汉仙岩等)地区则相对较高。在4.0–6.0 km深度，速度逐渐增加，盆地低速区逐渐过渡为高速异常区域。V_S结构异常特征勾勒出邵武-河源断裂带“S”型转弯形态(陈祥熊等，1990)。在2.0–4.0 km深度S波速度切面上，盆地中心高低速异常发生转变，与该地区第四系和白垩系沉积厚度较为一致，初步显示出会昌、寻乌断陷盆地的基本形态(肖光荣等，2013)，侧面说明了联合反演成像结果可靠性。另外，本文也获取了会昌-寻乌地区三维地壳密度模型(附图S4)，该密度结构整体上与V_S分布特征(图7)相似。密度模型显示，在浅层区

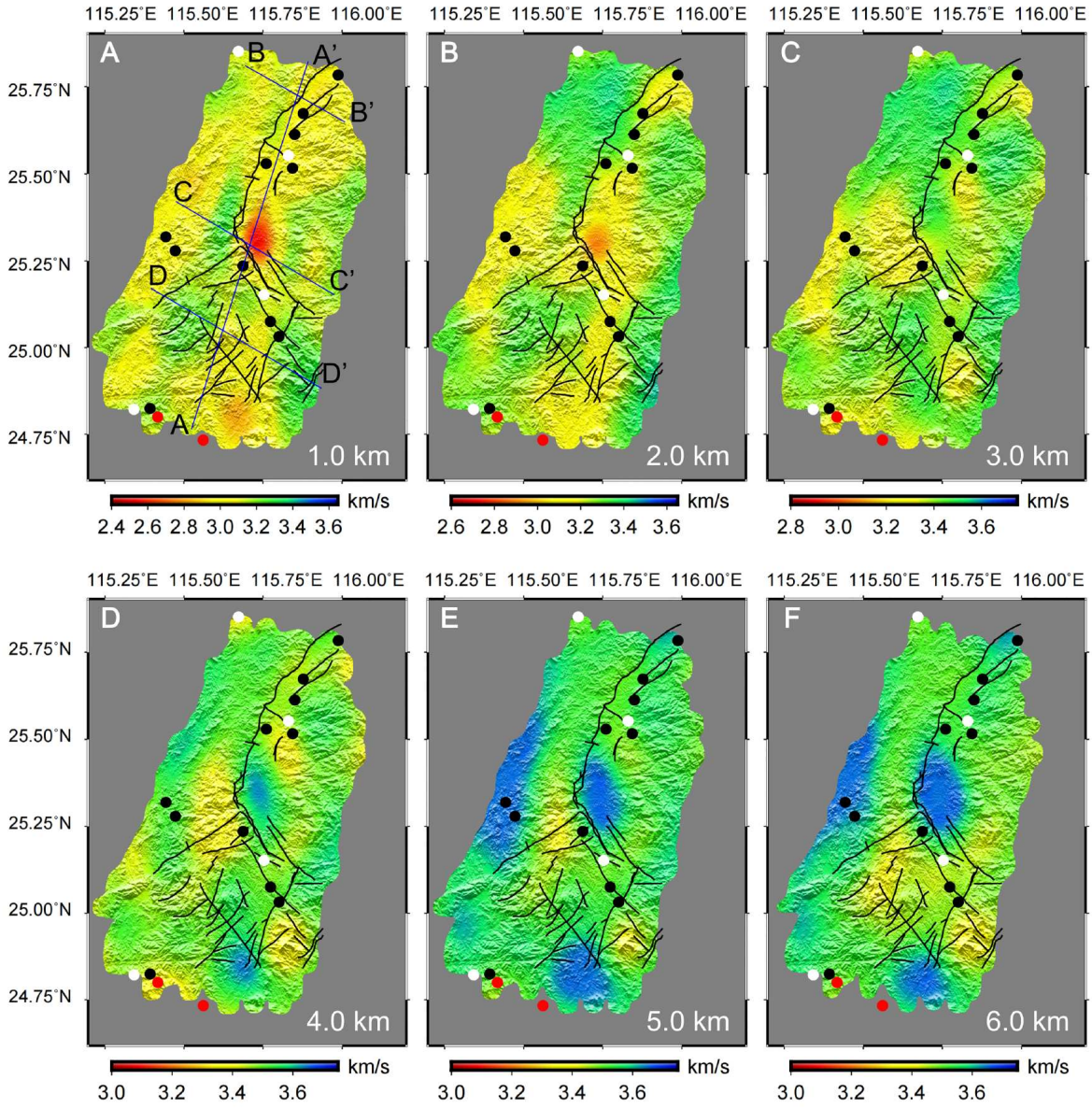


图 7　研究区域不同深度上剪切波速度分布(自联合反演结果)。黑色圆点为温泉25–40 ℃热水点，白色为40–60 ℃，红色为60–90 ℃(王安东等，2023)；黑色曲线为断层，断层名称与图1B一致。图中的成像边界由射线密度大于0的区域确定

域，盆地中心密度较低，推测为盆地沉积区域，厚度大概为2–4 km，山地密度较高。随着深度增加，密度差异逐渐减小，但在5.0–6.0 km深度区间，仍可见盆地下方明显的高密度异常区，推测为盆地花岗岩基底。

本文绘制了4条剖面(图8)，其中AA′剖面沿近似平行断层走向方向，贯穿汉仙岩和会昌盆地，较低S波速度分布在剖面中心区域，其值约为2.7 km/s，与会昌盆地地质构造相一致，揭示了会昌盆地大致深度范围；盆地两侧为高速区域，对应于盆地两侧地表岩体出露地区；BB′–DD′剖面垂直于断裂带，其中BB′剖面揭示了寻乌盆地构造特征，跨越三百山以及武夷山余脉，表现为相对高速，向下延伸至6 km深处。CC′剖面显示了中部低速区的延伸，深度约2–4 km，两侧高速区对应山地。DD′剖面刻画了会昌盆地北部垂向形态，可以明显看出中心盆地下方有一个凹陷区域，深度1 km左右，表明此处沉积层较薄。从不同模型重力数据拟合情况来看，基于单独面波结果正演重力与观测值相差较大，而联合反演模型理论重力与观测数据一致性较好，表明联合反演速度模型的可靠性。

为了更清晰地揭示V_S结构横向和纵向变化特征，计算了AA′剖面V_S扰动分布(图S5A)以及V_S垂向梯度(图S5B)。其中，V_S扰动定义为各网格点速度值相对于同一

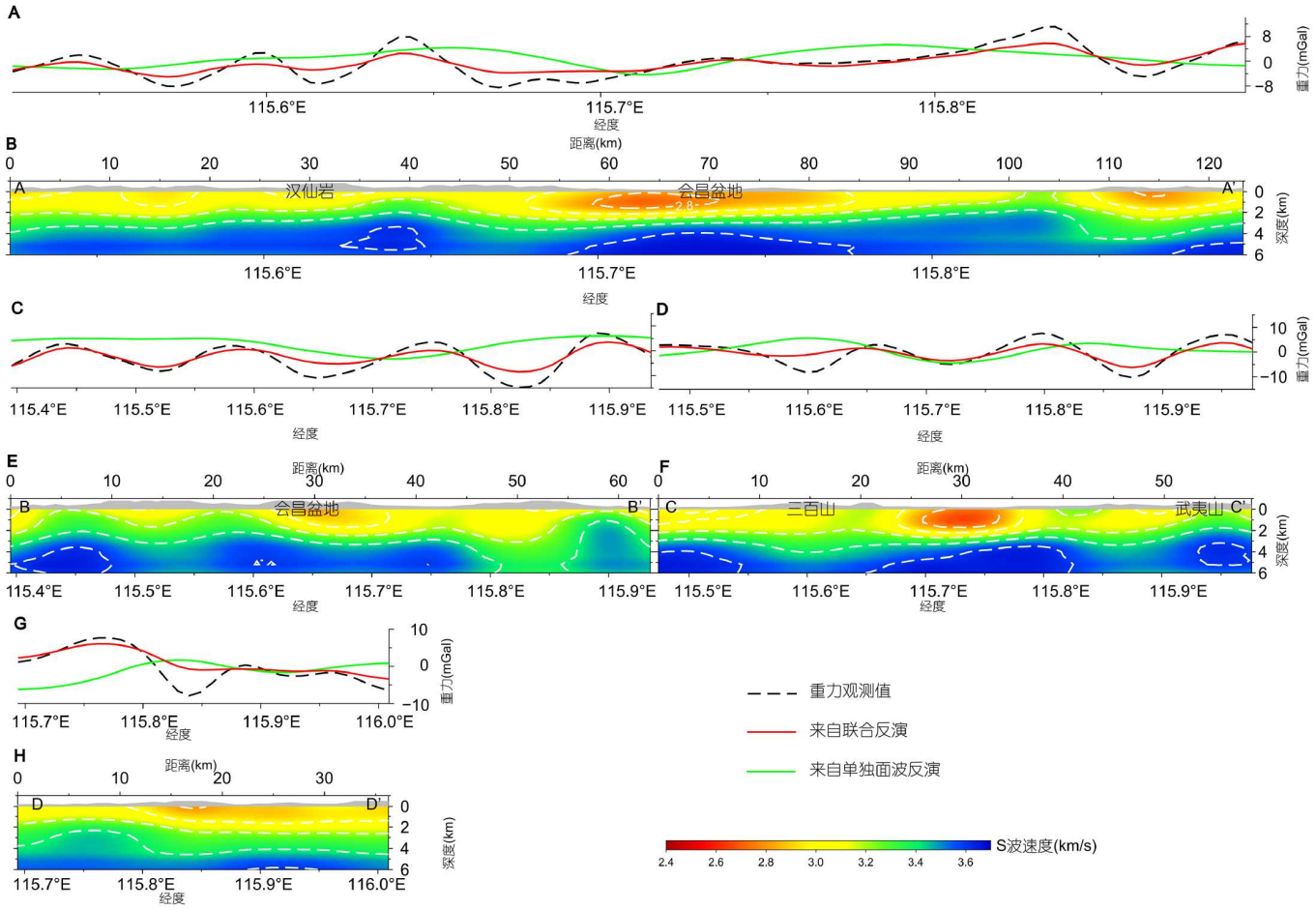


图 8 不同剖面(AA′–DD′)上地震和重力联合反演S波速度结构和重力拟合结果。(A、C、D、G)分别为AA′–DD′剖面重力拟合情况；(B、E、F、H)分别为AA′–DD′剖面联合反演S波速度结构，剖面位置见图7

深度平均值偏差(Xie等，2024)。成像结果中，会昌盆地下方2–4 km范围内存在速度负异常区，推测为沉积盆地大致范围，而在盆地下方存在高速异常区，可能为沉积盆地结晶基底，盆地深度大致为2–4 km。垂直速度梯度变化结果显示，AA′剖面在1–3 km区域速度梯度为正，为变化较大区域，与V_S结构、扰动分布以及密度分布特征一致，推测该区域可能为盆地基底界面。

5 讨论

为了评估反演结果的可信度和准确性，本研究主要对成像网格、地震及重力数据参数、模型反演残差、不同类型重力数据以及结果可靠性等方面展开讨论。基于最终速度模型，联合地热地质构造及地下水资料，着重讨论了研究区域地热成因机制。

5.1 检测板测试

为了提高反演结果的可靠性，本研究采用检测板模型来对联合反演参数设置及其空间分辨能力进行测试。在检测板测试时，输入模型异常体大小设置为2倍网格，扰动幅值为±0.4 km/s，测试参数设置与剪切波反演时保持一致。如图9所示，单独面波与联合反演在射线覆盖充分区域均可有效地恢复速度异常；在射线覆盖边缘区，联合反演也较好地恢复速度异常结果，这可能是由于射线覆盖区域外的速度异常可以借助重力异常数据进行约束。但是，单独重力反演很难恢复速度异常(附图S6)。另外，通过重力异常恢复测试(图10)情况分析，可以看出：与联合反演模型相比，在边缘地区，基于单独面波模型正演重力结果与初始重力异常存在相对较大的差异，难以恢复重力异常特征，即使在射线中心区域，正演重力异常形态特征发生改变，误差也较大(图10C)。而联合反演速度模型不管是在边缘还是在中心区域，对重力异常数据恢复程度有显著的提高。检测板对面波和重力异常测试表明，重力异常数据的加入可使反演速度模型一定程度上得到优化和改进。

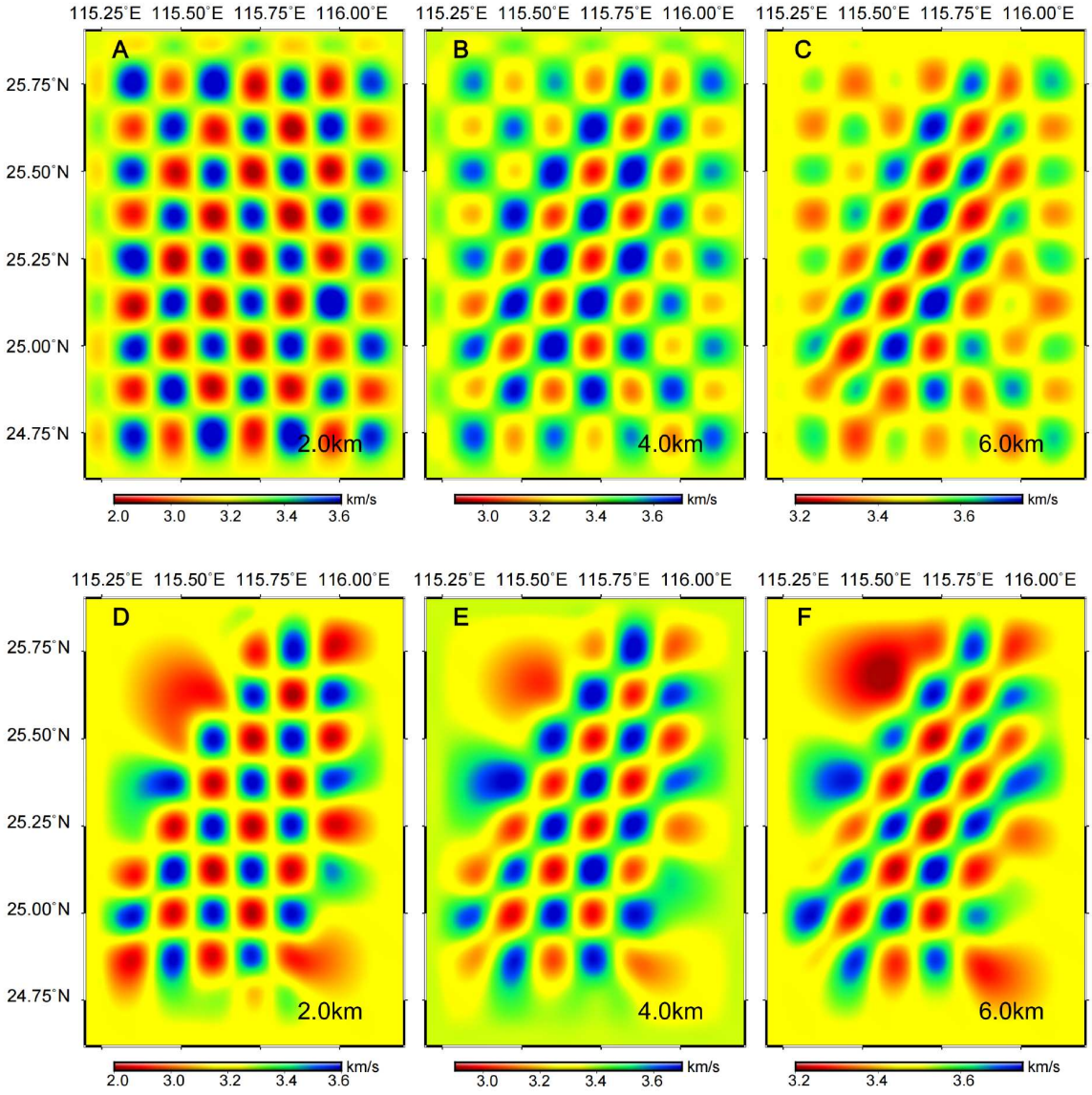


图 9　基于0.04°×0.04°网格剪切波速度各深度下的检测板分辨率测试对比。(A–C) 面波与重力联合反演结果；(D–F) 面波单独反演结果

5.2　反演结果可靠性分析

基于单独重力反演的速度模型，计算的理论走时与观测走时残差主要分布在±3 s区间内(图11A)，其均方根(RMS)为0.360 s。采用单独面波反演的走时残差则收敛至±2 s(图11C)，均方根为0.318 s，呈现近似正态分布。联合反演的走时残差均方根为0.329 s(图11B)，略高于单独面波反演，但相较于单独重力反演的结果则有明显改善。同时，我们也分析了不同速度模型重力异常残差结果(图12A)，重力模型残差均方根为0.967 mGal，面波反演残差结果较大，均方根为4.426 mGal(图12C)。相较于单独面波反演，联合反演模型的重力异常残差显著降低，其均方根为1.049 mGal(图12B)。为了更加直观地分析重力拟合情况，基于联合反演以及面波反演结果，计算了理论布格重力异常，并与测量值进行对比(附图S7)。三者相比之下，仅面波反演结果正演的重力异常与测量值差异较大，联合反演的布格重力异常结果与测量值吻合度最高，这表明单一面波数据在解释重力异常方面存在局限。相对于仅面波反演得到的模型(附图S3)，联合反演结果主要表现为盆地中心深部(4–6 km)速度幅值的增大。不同模型对应的数据残差对比分析结果表明，相较于单一数据反演，联合反演模型能够同时较好地解释面波与布格重力数据。

5.3　地震及重力数据参数讨论

本文基于短周期密集台阵进行反演工作，其低频信

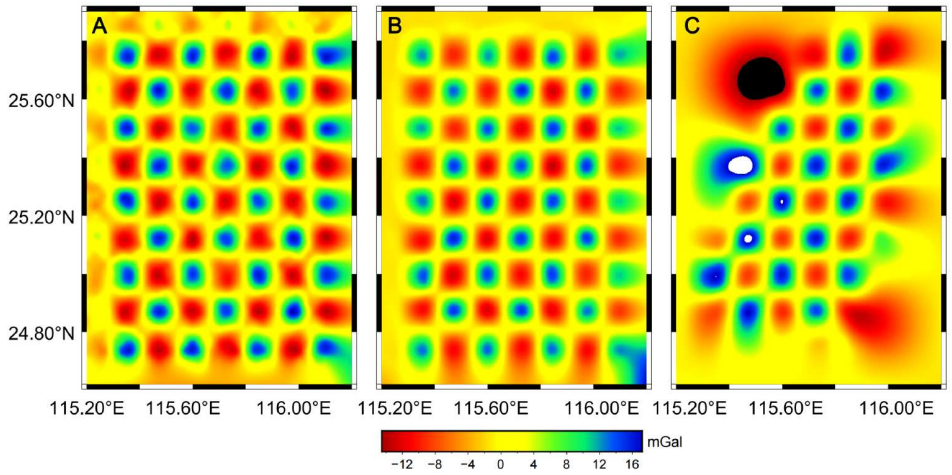


图 10 不同重力数据异常检测板恢复测试对比。(A) 初始重力异常模型；(B) 联合反演恢复的重力异常；(C) 单独面波反演恢复的重力异常

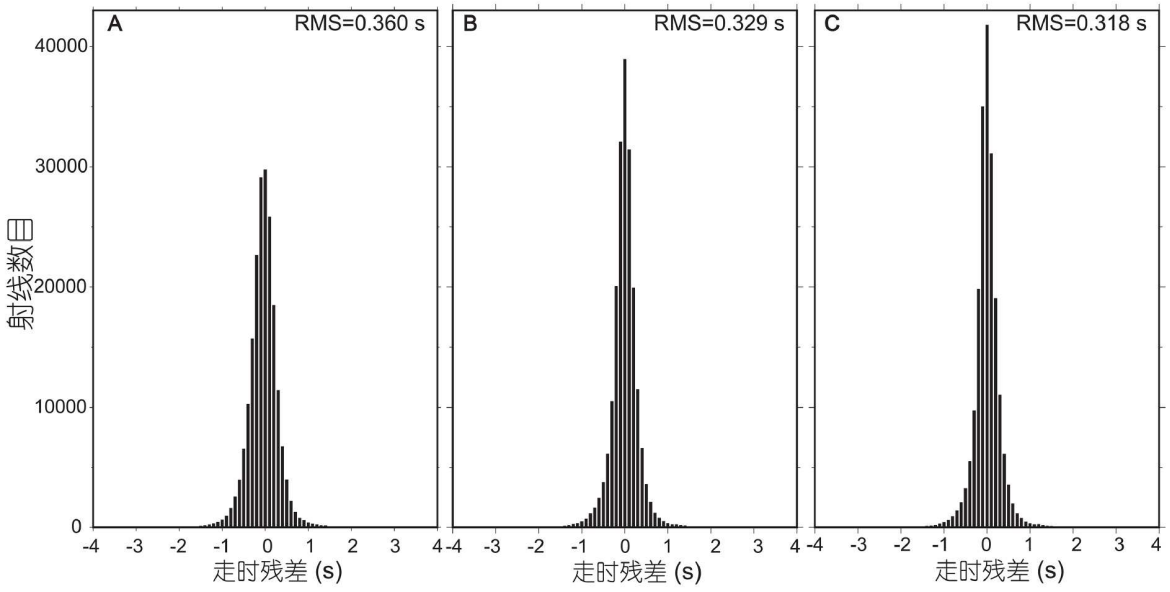


图 11 不同模型的走时残差分布直方图。(A) 单独重力反演的走时残差；(B) 联合反演的走时残差；(C) 单独面波反演的走时残差

息对反演结果的可靠性至关重要。XWU和ANY两个固定台阵与短周期流动台站相距较远(距离4 km以上)，难以通过两个台站间的噪声互相关波形进行对比验证。为了进一步验证低频数据可靠性，我们选择与固定地震台(会昌HUC)相近(几十米)的流动台(6721)，截取共同记录的地震事件(2023年7月3日广东省河源市东源县M 3.7级)，该事件属于浅源地震(徐树峰等，2025)，面波发育良好。分别对宽频和短周期台站地震波形进行0.2–0.5 Hz及0.1–0.5 Hz带通滤波，可以看出短周期台站与宽频台站地震波形较为一致(图13A、13B)，6721流动台站未能布设于HUC固定台站基岩上，而是浅埋于台站附近，导致其地震波形在高频上很难与固定台站完全对应。我们分别提取了两个台站的面波频散曲线，并进行对比分析，结果显示，由短周期与宽频带地震仪提取的频散曲线在2–6 s周期范围内一致性较好(图13C、13D)，进一步显示了短周期密集台阵低频信息的可靠性。

同时，我们测试了重力数据的网格大小以及延拓高度对反演结果的影响，本文重力数据来自卫星及地面重力数据，数据网格大小各异，联合反演过程中水平网格大小为0.04°，重力数据网格过密会增加重力矩阵的计算量从而影响反演效率，也不宜过于稀疏(Du等，2021)。为了测试不同重力数据网格对反演结果的影响，我们分别设置了0.5和2 km数据网格，按照相同的参数进行反演，结果显示重力数据网格大小对反演结果影响不大。在重

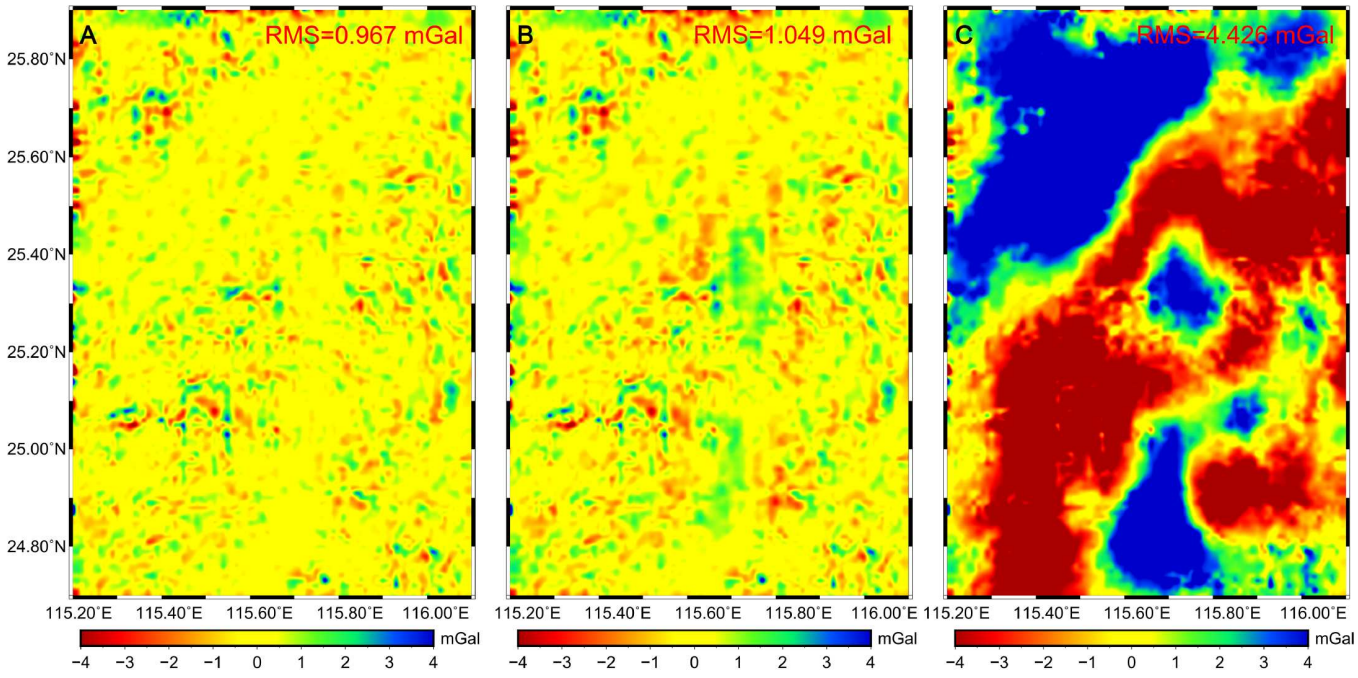


图 12　不同模型重力异常残差情况。(A) 单独重力反演结果；(B) 联合反演结果；(C) 单独面波反演结果

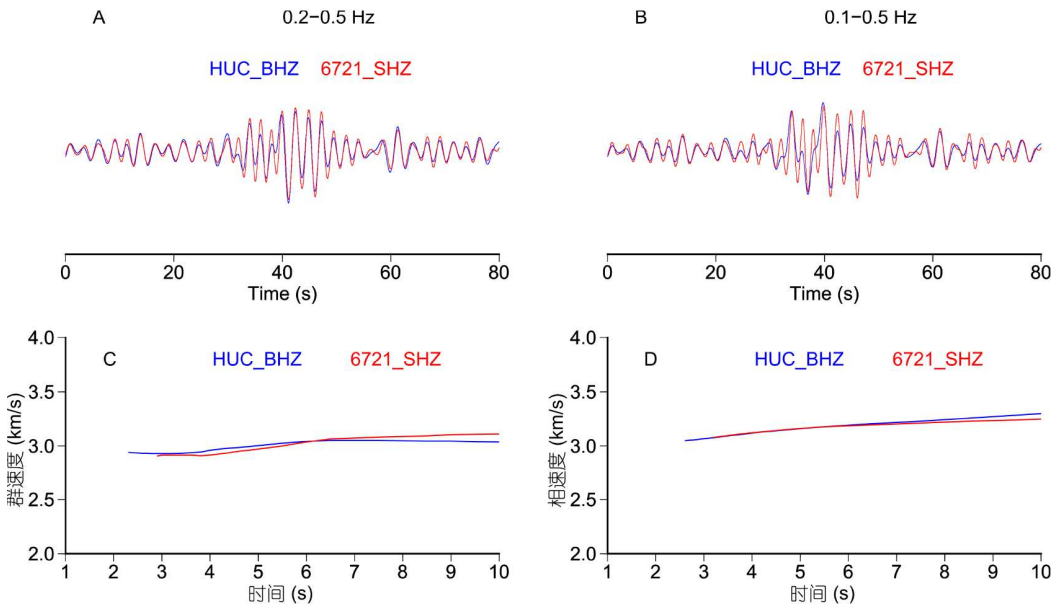


图 13　短周期设备低频信号(周期6 s)可靠性验证。(A、B)分别为2023年7月3日广东省河源市*M*3.7地震垂直分量0.2–0.5和0.1–0.5 Hz带通滤波波形图；(C、D)分别为群速度和相速度对比图

力数据预处理过程中，一般通过延拓及滤波等方式来获取剩余重力异常信息(Yang等，2023；Syracuse等，2017；陈石等，2015；Guo等，2024；Feng等，2025)，我们延拓了10–60 km高度，间隔10 km，发现剩余重力异常分布形态存在整体性差异，但是盆地中心存在相对高重力异常，在反演过程中，去除了均值影响，通过多次反演，不同延拓高度对联合反演结果影响较小。

5.4　卫星重力数据与地面重力数据对比讨论

为了分析不同类型重力数据的影响，本文收集了会昌-寻乌区域1:20万地面重力数据，其分辨率约2 km(严加永等，2019)(附图S8A)，同样向上延拓10 km，得到剩余

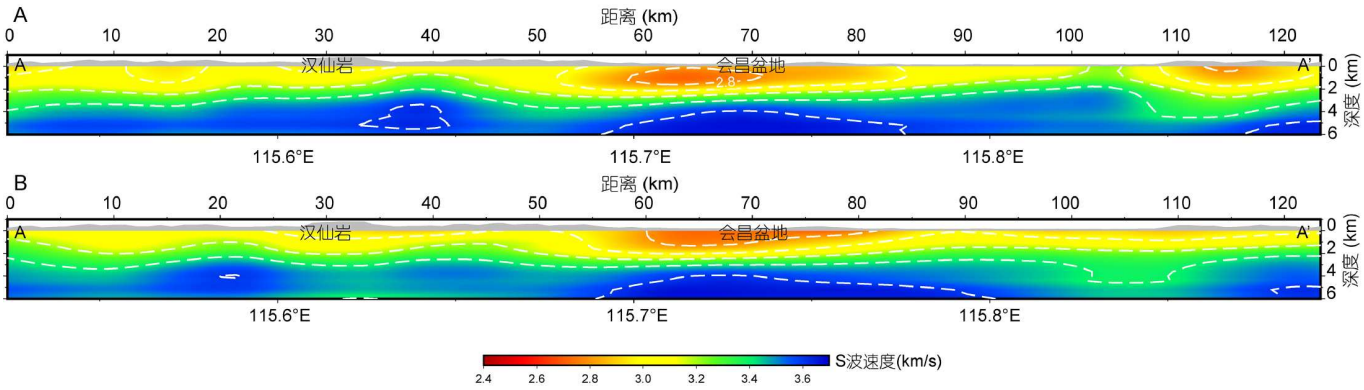


图 14　卫星重力数据(A)和地面重力数据(B)联合反演的AA′剖面结果

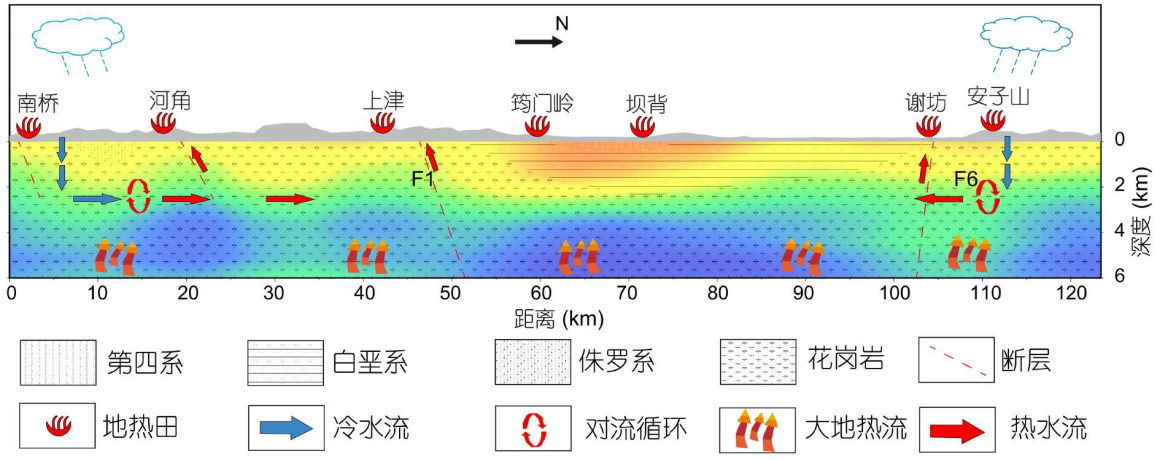


图 15　会昌-寻乌地区地热水循环模式，修改自韩基弘等(2024)

布格重力异常(附图S8B)，从图中可以看出，地面重力数据与卫星重力数据在异常区域大体上一致，如东北与西南两侧都为低异常，盆地区域都为高异常。但细节处还是略有差异，比如地面重力数据在北部延拓后出现一个高异常区域，而卫星重力数据并没有反映，地面重力具有更高的分辨率。

为了进一步评估卫星重力数据反演结果的可靠性，在保持反演参数恒定的情况下，利用地面重力数据进行联合反演，获取了1–6 km深度水平切面(附图S9)和垂直AA′剖面S波速度结构(图14)，并与卫星重力数据联合反演结果(图7和图8)进行对比分析，从水平切面可以看出两类重力数据联合反演结果在盆地中心区域相近，但地面重力数据联合反演结果在会昌北部谢坊处显示高速，可能是该区域花岗岩埋深浅所致(刘前进等，2019)，从该区域地质图(图1C)上也可以看出谢坊地区确实存在花岗岩分布，埋深较浅。从AA′剖面可以看出，两类重力数据联合反演结果均能较好地勾勒出会昌盆地形态，但地面重力数据联合反演结果能较好地反映出浅层基岩形态特征和断层展布。其余剖面结果基本一致，均可展现出研究区域浅层速度特征。综合对比分析可知，卫星和地面两类重力数据联合反演结果在异常区域大体一致，但地面重力数据更能展现出局部细节变化特征。

5.5　区域地热成因讨论

通过上述两类重力数据讨论以及前人研究，本文采用地面重力数据联合反演的AA′剖面结果来构建地热水循环模式(图15)。会昌-寻乌地区地热系统具有深层与浅层地热双重特征。其中，对于深层地热来说，其热源主要来自研究区域隐伏的花岗质岩基，具有较高的产热率(5.55±2.91 μW/m^3)(李科甫和朱传庆，2023)。在2 km深度，花岗岩温度超过了100 ℃，而在6 km深度左右，温度可达200–250 ℃(Wang等，2018)。其中，在赣州南部地区，岩石的平均产热率为3.8 μW/m^3，储热温度在60–160 ℃，会昌寻乌地区，岩石产热率为4.8–7.64 μW/m^3，大地热流值为65–70 mW/m^2(伯慧等，2015；黄长生等，2021；张福神等，2024)。速度成像结果显示，会昌盆地

发育完整，盆地中心沉积层厚度可达2–4 km。华南地热井测温显示，拥有较厚沉积层(1.5 km深度埋深)的花岗岩温度可达100 ℃，大幅高于同等深度花岗岩出露地区温度(Wang等，2018)，导热率较低沉积层对地热储存具有重要意义，有利于温度保存(Wang等，2018)，该地区干热岩模式为沉积岩盖层以及燕山期高放射性产热型隐伏花岗岩。华南大面积花岗岩主要是由于地幔岩石圈减薄，触发软流圈绝热上涌，以及后续岩石圈扩展和上覆地壳大规模熔融形成的(Zhang等，2023)。对于会昌-寻乌地区而言，燕山期花岗岩主要分布在邵武-河源断裂带两侧，侵位空间展布受北东向断裂体系控制，深部断裂可能为深部幔源物质运移通道。总体而言，深部高产热花岗岩体、断陷盆地内低导热性沉积盖层，以及较高的地壳深部热流值，共同构成了干热岩的有利地质环境。

对于浅层地热水来说，其控水以及控热构造与断裂活动情况息息相关。地震震中位置与温泉分布高度一致，且中高度温泉位于1987年M~5.5群震附近，震源深度在5–15 km，断裂带活动性越强，切割深度越深，断裂中热水循环深度和热储温度越高(欧晓斌等，2023)。其中，会昌-寻乌北段水温32–51 ℃，钻孔地温梯度2.91–5.28 ℃/(100 m)，而寻乌地区水温56–76 ℃，钻孔地温梯度5.2–9.2 ℃/(100 m)(韩基弘等，2024)，由于河源-邵武断裂以及其分支断裂的存在，会昌寻乌地区温泉水循环深度可达3–4 km(黄长生等，2021)。剪切波速度成像和密度结果(图7和附图S4)均显示：地热温泉主要分布在高低值分界区域，与断裂带保持一致。寻乌-会昌盆地西缘受留车断裂控制，该断裂呈NW向陡倾，属压扭性质。其伴生构造包括NNW向张扭性断裂、NWW向张性断裂及NEE向扭压性断裂。区域内发育的张性或张扭性断裂可为地热流体运移与循环提供有利通道(Li X等，2024)。温泉地球化学资料显示，研究区域温泉主要富集Na、Li、Sr，体现了地下热水在循环过程中与周边中酸性侵入岩发生的水-岩相互作用(欧晓斌等，2023)。基于浅层速度结构成像结果以及前人研究成果，本文总结了研究区域主要浅层地热成因模型(图15)，大气降水沿着断裂带渗入地下，经过地下热源(地热增温，燕山期花岗岩余热以及断层摩擦热)加热形成地下热水，经过深循环后，地下热水分别在有利断裂通道上涌至地表，形成了会昌-寻乌地区沿着断裂带分布的地热田。但是，该区域断裂分布较为复杂，还需利用多种地球物理方法进行研究。例如，结合大地电磁、重力等研究资料，开展光纤以及节点地震仪联合观测研究(王宝善等，2021；Lv等，2023；Wang等，2025；Li等，2025)，以提高成像分辨率，并获取区域地震震源机制解，进一步研究地热成因力学机理。

6　结论

本文基于会昌-寻乌布设的密集流动台阵，并结合区域布格重力数据，利用面波与重力联合反演方法获取了研究区域浅层6 km深度剪切波速度结构。从成像结果可以看出，盆地中心区域浅部呈现低速特征，速度扰动结果和垂向梯度结果均表明在2–4 km左右深度速度变化显著，更好地揭示了会昌盆地界面形态，说明该深度已到达盆地的基底；随着深度增加，“S”型断裂带附近区域呈现高速特征，揭示了该断裂带对盆地发育控制作用。从剖面上看，速度结构与地质特征在空间上有较好的对应，会昌盆地厚度在2–4 km之间；从拟合情况来看，联合反演模型正演的布格重力异常与重力观测数据基本一致，说明了成像结果的可靠性。结合前人地热相关研究，总结了会昌-寻乌地热系统浅层与深层的双重特征。会昌盆地沉积层厚2–4 km，下伏燕山晚期高产热花岗岩，深层干热岩勘探前景良好；浅层地热温泉分布于张性或者张扭性断裂带附近，盆地附近断裂系统整体为低波速特征，可为地热流体循环提供通道。然而，本文速度成像深度范围小于6 km，还需要利用多种地球物理观测研究方法获取深部地壳以及地幔结构，探讨区域地热资源与断裂构造、花岗岩热源及地震活动性之间的复杂关系，进而对该地区地热系统进行更加深入的分析。

致谢　中国科学技术大学姚华建教授提供了频散信息提取程序，中山大学杨萌副教授在本文重力数据处理方面提供帮助，江西省地质局水文地质大队叶海龙正高级工程师参与讨论；三位审稿人和责任编委提出了宝贵的修改意见和建议，本文大部分图件由GMT绘制完成。在此一并致谢。

补充材料　补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责，详见网络版(http://earthcn.scichina.com)。

参考文献

伯慧, 宋炉生, 王运, 等. 2015. 江西省干热岩资源有利区优选研究. 东华理工大学学报(自然科学版), 38: 407–411
曾昭发, 周帅, 李静. 2025. 超临界地热资源地球物理勘探研究进展. 地球物理学进展, 40: 318–327
陈冬生, 杨金华. 2011. 江西省地热资源成因及分布规律探讨. 江西煤炭科技, 3: 121–122
陈石, 郑秋月, 徐伟民. 2015. 南北地震带南段地壳厚度重震联合最优化反演. 地球物理学报, 58: 3941–3951
陈祥熊, 张弦, 柯龙生, 等. 1990. 1987年8月2日江西寻乌震群的近场强地面运动观测及其震源特征分析. 地震学报, 12: 223–234
高级, 张海江, 黄宇奇, 等. 2025. 背景噪声成像揭示郯庐断裂带张八岭段上地壳广泛存在北西向隐伏断裂. 中国科学: 地球科学, 55: 1929–1941
高天扬, 丁志峰, 徐小明, 等. 2023. 利用接收函数、背景噪声频散和

Rayleigh波ZH振幅比联合反演青藏高原东北缘及周边地区地壳结构. 地球物理学报, 66: 4074–4094
郭震, 陈永顺, 殷伟伟. 2015. 背景噪声面波与布格重力异常联合反演: 山西断陷带三维地壳结构. 地球物理学报, 58: 821–831
韩基弘, 唐石, 黄长生, 等. 2024. 基于水化学特征的赣东南石城-寻乌断裂带地热水成因模式. 华南地质, 40: 413–434
韩如冰, 杨顶辉, 李秋生, 等. 2023. 华南东部密集台阵接收函数成像与深部动力学机制. 中国科学: 地球科学, 53: 1295–1315
郝奥伟, 张海江, 韩守诚, 等. 2023. 接收函数和重力联合反演中国东北地区高精度莫霍面和波速比分布及地质意义. 中国科学: 地球科学, 53: 1586–1599
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: 3881–3899
黄长生, 侯保全, 易秤云, 等. 2021. 赣南地热水形成条件分析与赣县区地热水勘查靶区圈定. 华南地质, 37: 64–74
李成, 姚华建, 邓宝, 等. 2023. 基于背景噪声方法的花岗岩型稀土矿地壳浅部结构特征及构造意义: 以江西赣州安西矿区为例. 地球物理学报, 66: 4132–4148
李科甫, 朱传庆. 2023. 华夏地块花岗岩生热率特征及其对地温场的影响. 石油科学通报, 8: 259–289
李玲利, 黄显良, 姚华建, 等. 2020. 合肥市地壳浅部三维速度结构及城市沉积环境初探. 地球物理学报, 63: 3307–3323
李孟洋, 刘少林, 杨顶辉, 等. 2022. 基于程函方程的远震成像方法反演青藏高原东北缘速度和径向各向异性结构. 中国科学: 地球科学, 52: 860–881
李午阳, 张健, 唐显春, 等. 2018. 川西高温水热活动区深部热结构的地球物理分析. 地球物理学报, 61: 2926–2936
李学礼, 杨忠耀. 1992. 江西温泉形成的地质构造条件分析. 华东地质学院学报, 15: 221–228
李雪垒, 李志伟, 夏鑫, 等. 2023. 华南地壳结构与构造边界特征: 来自地震背景噪声和重力联合成像模型的约束. 科学通报, 68: 3221–3236
刘大任. 1997. 邵武-河源断裂带活动性及分段评价. 地质力学学报, 3: 54–60
刘前进, 黄迅, 董毓, 等. 2019. 江西邵武-河源断裂带会昌断裂控热机理研究. 地质调查与研究, 42: 154–160
吕坚, 谢祖军, 郑勇, 等. 2016. 华南地块及其邻区Rayleigh波相速度层析成像研究. 中国科学: 地球科学, 46: 1528–1541
罗松, 姚华建, 李秋生, 等. 2019. 长江中下游成矿带高分辨地壳三维横波速度结构及其形成的深部动力学背景. 中国科学: 地球科学, 49: 1394–1412
欧晓斌, 鲍志诚, 吕坚, 等. 2023. 全南-寻乌断裂带温泉水文地球化学特征. 地震研究, 46: 529–541
宛家宽, 罗志才, 吴云龙. 2025. 重震联合反演青藏高原岩石圈密度结构. 地球物理学报, 68: 470–482
汪集旸, 庞中和, 胡圣标, 等. 2015. 地热学及其应用. 北京: 科学出版社. 548
王安东, 孙占学, 蔺文静, 等. 2023. 江西省地热资源赋存特征及潜力评价. 中国地质, 50: 1646–1654
王宝善, 曾祥方, 宋政宏, 等. 2021. 利用城市通信光缆进行地震观测和地下结构探测. 科学通报, 66: 2590–2595
王贵玲, 蔺文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式. 地质学报, 94: 1923–1937
王向腾, 谢超灵, 邓中豪, 等. 2024. 江西寻乌地区及邻区浅层三维速度结构及其孕震构造初探. 地球物理学报, 67: 4651–4665
王一波, 刘绍文, 陈超强, 等. 2024. 中国陆域大地热流数据汇编(第五版). 地球物理学报, 67: 4233–4265
肖光荣, 姚琪, 范爱春. 2013. 江西省晚白垩世层序地层研究. 资源调查与环境, 34: 141–149
徐荟, 吴庆举. 2024. 瑞利波相速度和椭圆率与远震P波联合反演蒙古中南部地壳高分辨率S波速度结构. 地球物理学报, 67: 89–107
徐树峰, 何骁慧, 惠格格, 等. 2025. 广东新丰江库区中小地震的震源特征及发震构造探讨. 地球与行星物理论评, 56: 1–21
严加永, 罗凡, 张昆, 等. 2019. 长江中下游成矿带岩浆岩体三维空间结构: 来自重磁三维反演的证据. 地质科学, 54: 853–875
杨华泽, 郭琳, 李自敏, 等. 2018. 江西省石城-寻乌干热岩地热资源前景分析. 能源与环境, 1: 97–98
张福神, 陈艳, 龙立学, 等. 2024. 江西龙南——石城地区干热岩资源优选. 地质学刊, 48: 210–218
张万良, 李富梅. 2014. 邵武-河源断裂带会昌断裂新构造活动特征及意义. 矿产与地质, 28: 725–729
赵盼盼, 陈九辉, 刘启元, 等. 2025. 高分辨率背景噪声层析成像揭示海原-六盘山弧形构造带楔状结构及其意义. 中国科学: 地球科学, 55: 2689–2702
郑晨, 丁志峰, 宋晓东. 2016. 利用面波频散与接收函数联合反演青藏高原东南缘地壳上地幔速度结构. 地球物理学报, 59: 3223–3236
钟骏泰. 2002. 赣南区域地质构造特征与地震分布关系研究. 华南地震, 22: 45–53
Ai S, Zheng Y, Wang S, et al. 2021. Joint inversion of Rayleigh wave ellipticity and phase velocity for crustal structure in Taiwan. Tectonophysics, 814: 228946
Ars J M, Tarits P, Hautot S, et al. 2019. Joint inversion of gravity and surface wave data constrained by magnetotelluric: Application to deep geothermal exploration of crustal fault zone in felsic basement. Geothermics, 80: 56–68
Balmino G, Vales N, Bonvalot S, et al. 2012. Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies. J Geod, 86: 499–520
Bao X, Guo L, Shen Y. 2021. Compositional variation in the crust of peninsular ranges and surrounding regions, southern California, revealed by full-wave seismic and gravity joint inversion. JGR Solid Earth, 126: e2021JB022723
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. Geophys J Int, 169: 1239–1260
Bi H, Fang H, Zhang P, et al. 2024. Seismic evidence for a transcrustal magmatic pathway contributing to critical metal deposits. Geophys Res Lett, 51: e2023GL104935
Brocher T M. 2005. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust. Bull Seismol Soc Am, 95: 2081–2092
Carrillo J, Pérez-Flores M A, Calò M. 2024. Three-dimensional joint inversion of surface wave dispersion and gravity data using a petrophysical approach: An application to Los Humeros Geothermal Field. Geophys J Int, 239: 1217–1235
Chen H, Fan R, Du N, et al. 2024. The crustal structure of southeast Tibet from joint inversion of surface wave dispersion and gravity anomaly data. J Asian Earth Sci, 273: 106258
Chen Y, Niu F. 2016. Joint inversion of receiver functions and surface waves with enhanced preconditioning on densely distributed CNDSN stations: crustal and upper mantle structure beneath China. JGR Solid Earth, 121: 743–766
Cheng F, Xia J, Ajo-Franklin J B, et al. 2021. High-resolution ambient noise imaging of geothermal reservoir using 3C dense seismic nodal array and ultra-short observation. JGR Solid Earth, 126: e2021JB021827
Chong J, Ni S, Zhao L. 2015. Joint inversion of crustal structure with the Rayleigh wave phase velocity dispersion and the ZH ratio. Pure Appl Geophys, 172: 2585–2600
Deng Y, Zhang Z, Badal J, et al. 2014. 3-D density structure under South China constrained by seismic velocity and gravity data. Tectonophysics, 627: 159–170
Du N, Li Z, Hao T, et al. 2021. Joint tomographic inversion of crustal structure beneath the eastern Tibetan Plateau with ambient noise and gravity data. Geophys J Int, 227: 1961–1979
Fang H, Yao H, Zhang H, et al. 2015. Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray

tracing: Methodology and application. Geophys J Int, 201: 1251–1263
Feng M, Deng J, Yu H, et al. 2025. Volcanic-intrusive system controls on the uranium metallogenesis in the Xiangshan volcanic basin based on 3-D joint inversion of gravity and magnetic data. Geophys J Int, 243: 1–4
Fu L, Guo J, Li J, et al. 2021. Imaging the ice sheet and uppermost crustal structures with a dense linear seismic array in the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica. Seismol Res Lett, 93: 288–295
Gong M, Liu B, Deng J, et al. 2025. S-wave velocity structure beneath the eastern part of the Qinhang metallogenic belt and its adjacent areas. J Seismol, 29: 31–45
Gong M, Lv J, Zhang X, et al. 2023. High-resolution shallow crustal shear wave velocity structure of Anyuan mining area and its adjacent region in Jiangxi Province, China. Earth Planets Space, 75: 129
Guo L, Bao X, Shen Y, et al. 2024. Joint inversion of full-waveform ambient noise and gravity data for simultaneously deriving high-resolution three-dimensional crustal S-wave velocity and density models: Application to the Jingpohu volcanic area in Northeast China. Geophys J Int, 240: 1168–1180
Guo L, 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 Planet Sci Lett, 510: 142–152
Han S, Zhang H, Xin H, et al. 2021. USTClitho2.0: Updated unified seismic tomography models for continental China lithosphere from joint inversion of body-wave arrival times and surface-wave dispersion data. Seismol Res Lett, 93: 201–215
Hao A, Zhang H, Han S, et al. 2023. High-resolution lithospheric structure of continental China from joint inversion of surface wave and gravity data. Tectonophysics, 868: 230079
He L, Sun X, Li P, et al. 2021. Lithospheric structure near Jiuyishan, South China: Implications for asthenospheric upwelling and lithospheric modification. Geophys Res Lett, 48: e2021GL096572
Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. Seismol Res Lett, 84: 1081–1088
Hirt C, Claessens S, Fecher T, et al. 2013. New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field. Geophys Res Lett, 40: 4279–4283
Hirt C, Yang M, Kuhn M, et al. 2019. SRTM2gravity: An ultrahigh resolution global model of gravimetric terrain corrections. Geophys Res Lett, 46: 4618–4627
Huang Z, Su W, Peng Y, et al. 2003. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. J Geophys Res, 108: 2001JB001696
Kim H J, Lin F, Pechmann J C, et al. 2025. Seismic imaging of the Salt Lake basin using joint inversion of receiver functions and Rayleigh wave data. JGR Solid Earth, 130: e2024JB030927
Lehujeur M, Vergne J, Schmittbuhl J, et al. 2018. Reservoir imaging using ambient noise correlation from a dense seismic network. JGR Solid Earth, 123: 6671–6686
Liang X, Chu Y, Wan B, et al. 2023. Fragmentation of continental subduction is ending the Himalayan orogeny. Sci Bull, 68: 3048–3054
Li D, Tian X, Liang X, et al. 2024. Different formation modes of the north–south-trending rifts in southern Tibet: Implications from ambient noise tomography. Geophys Res Lett, 51: e2024GL108254
Li H, Su W, Wang C Y, et al. 2009. Ambient noise Rayleigh wave tomography in western Sichuan and eastern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 282: 201–211
Li J, Biondi E, Heimisson E R, et al. 2025. Minute-scale dynamics of recurrent dike intrusions in Iceland with fiber-optic geodesy. Science, 388: 1189–1193
Li M R, Fang H, Gao R. 2023. Ambient noise tomography using a nodal seismic array reveals evidence for igneous intrusion contributed to ore deposits in South China. Seismol Res Lett, 94: 2765–2774
Li X, Huang S, Hergert T, et al. 2024. Contemporary crustal kinematics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, SE China: Implications for the geothermal resource exploration. J Asian Earth Sci, 263: 106041
Li Y, Oldenburg D W. 1998. 3-D inversion of gravity data. Geophysics, 63: 109–119
Li Z, Roecker S, Kim K, et al. 2014. Moho depth variations in the Taiwan orogen from joint inversion of seismic arrival time and Bouguer gravity data. Tectonophysics, 632: 151–159
Liu Y, Yao H, Zhang H, et al. 2021. The community velocity model V.1.0 of southwest China, constructed from joint body- and surface-wave travel-time tomography. Seismol Res Lett, 92: 2972–2987
Lu W, Zhao Z, Yue H, et al. 2024. The accessible seismological dataset of a high-density 2D seismic array along Anninghe fault. Earthq Sci, 37: 67–77
Luo S, Yao H, Wang J, et al. 2021. Direct inversion of surface wave dispersion data with multiple-grid parametrizations and its application to a dense array in Chao Lake, eastern China. Geophys J Int, 225: 1432–1452
Lv H, Zeng X, Chi B, et al. 2023. Monitoring seismicity triggered by geothermal site shutdown with a surface DAS array at Brady Hot Springs. Geophys J Int, 235: 1861–1871
Maceira M, Ammon C J. 2009. Joint inversion of surface wave velocity and gravity observations and its application to central Asian basins shear velocity structure. J Geophys Res, 114: 2007JB005157
Martins J E, Ruigrok E, Draganov D, et al. 2019. Imaging Torfajökull's magmatic plumbing system with seismic interferometry and phase velocity surface wave tomography. JGR Solid Earth, 124: 2920–2940
Obermann A, Kraft T, Larose E, et al. 2015. Potential of ambient seismic noise techniques to monitor the St. Gallen geothermal site (Switzerland). JGR Solid Earth, 120: 4301–4316
Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. 2012. The development and evaluation of the earth gravitational model 2008 (EGM2008) . J Geophys Res, 117: B04406
Planès T, Obermann A, Antunes V, et al. 2020. Ambient-noise tomography of the Greater Geneva Basin in a geothermal exploration context. Geophys J Int, 220: 370–383
Rubio-Maya C, Ambríz Díaz V M, Pastor Martínez E, et al. 2015. Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources—A review. Renew Sustain Energy Rev, 52: 689–716
Shan B, Xiong X, Zhao K F, et al. 2016. Crustal and upper mantle structure of South China from Rayleigh wave tomography. Geophys J Int, 208: ggw477
Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. Science, 307: 1615–1618
Syracuse E M, Zhang H, Maceira M. 2017. Joint inversion of seismic and gravity data for imaging seismic velocity structure of the crust and upper mantle beneath Utah, United States. Tectonophysics, 718: 105–117
Teng L, Wang X, Fu C, et al. 2023. 3D S-wave velocity structure of the Ningdu basin in Jiangxi province inferred from ambient noise tomography with dense array. Earthq Res Adv, 3: 100176
Tian B, You Z, Wang G, et al. 2021. Building a geothermal formation model using microtremor array measurement. Geophysics, 87: B23–B30
Wang G, Zhang W, Ma F, et al. 2018. Overview on hydrothermal and hot dry rock researches in China. China Geol, 1: 273–285
Wang S, Song Z, Zeng X, et al. 2025. High resolution shallow structure of Ebao Basin revealed with DAS ambient noise tomography and its relation to earthquake ground motion. JGR Solid Earth, 130: e2024JB029874
Wang S X, Zheng Y. 2025. Lithospheric reworking at the western margins of the Ordos block revealed by joint inversion of phase velocities and receiver functions. J Earth Sci, doi: 10.1007/s12583-025-0242-1
Wu K, He L, Guo Z, et al. 2025. Upper crustal structure of the Xinfengjiang

reservoir from ambient noise double beamforming tomography and its implications for induced seismicity. Geophys J Int, 240: 1096–1106
Wu G, Hu X, Huo G, et al. 2012. Geophysical exploration for geothermal resources: An application of MT and CSAMT in Jiangxia, Wuhan, China. J Earth Sci, 23: 757–767
Xiao X, Cheng S, Wu J, et al. 2024. CSRM-1.0: A China seismological reference model. JGR Solid Earth, 129: e2024JB029520
Xie H, Li C, Zhou T, et al. 2020. Conceptualization and evaluation of the exploration and utilization of low/medium-temperature geothermal energy: A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Geomech Geophys Geoenerg Georesour, 6: 18
Xie T, Yang Y, Xu T, et al. 2024. 2-D sedimentary structures at the southeast margin of the Tarim Basin, China, constrained by Love wave ambient noise tomography. Geophys J Int, 239: 1775–1788
Xin H, Zhang H, Gao L, et al. 2024. Three-dimensional lithospheric V_P/V_S structure beneath Chinese continent. Seismol Res Lett, 96: 1758–1779
Yang M, Li W K, Feng W, et al. 2023. Integration of residual terrain modelling and the equivalent source layer method in gravity field synthesis for airborne gravity gradiometer test site determination. Remote Sens, 15: 5190
Yang T, Xu T, Ai Y, et al. 2024. Crustal structure and its control on gold mineralization in Wulong Goldfield, Liaodong Peninsula of China: Constraints from ambient noise tomography with a short-period dense array. Pure Appl Geophys, 181: 2973–2990
Yang Y, Zheng Y, Chen J, et al. 2010. Rayleigh wave phase velocity maps of Tibet and the surrounding regions from ambient seismic noise tomography. Geochem Geophys Geosyst, 11: Q08010
Yang Y, Ritzwoller M H, Lin F, et al. 2008. Structure of the crust and uppermost mantle beneath the western United States revealed by ambient noise and earthquake tomography. J Geophys Res, 113: 2008JB005833
Yao H, 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. Geophys J Int, 166: 732–744
Zhai B, Deng J, Yu H, et al. 2025. Shallow crustal velocity structure beneath the Xiangshan and Yuhuashan volcanic basins in South China: Implications for the metallogenic setting of the volcanic-related uranium deposit. Ore Geol Rev, 180: 106551
Zhang H, Lü Q T, Wang X L, et al. 2023. Seismically imaged lithospheric delamination and its controls on the Mesozoic magmatic province in South China. Nat Commun, 14: 2718
Zhao Y, Li J, Xu J, et al. 2023. High-resolution velocity structure and seismogenic potential of strong earthquakes in the Bamei-Kangding segment of the Xianshuihe fault zone. Sci China Earth Sci, 66: 1960–1978
Zheng Y, Shen W, Zhou L, et al. 2011. Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, northeastern China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography. J Geophys Res, 116: B12312
Zhou W, Hu X, Wei M, et al. 2025. Geothermal potential of the southern Tianyang basin, northern China, revealed by 3D inversion of magnetotelluric data. Phys Earth Planet Inter, 359: 107306
Zhu L, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. J Geophys Res, 105: 2969–2980

（责任编委：童平）