

阿曼东部“幽灵”地幔柱诱发的板内微震活动

胡昊^{1,2,3}, 徐星^{1,3*}, 牛雄伟^{2*}, 阮爱国², 于志腾², 卫小冬², 陈安霞^{1,3}, Simone Pilia⁴

1. 浙江水利水电学院, 应用地质与地球物理前沿研究所, 杭州 310018

2. 自然资源部第二海洋研究所, 海底科学与划界全国重点实验室, 杭州 310012

3. 浙江水利水电学院, 建筑工程学院, 杭州 310018

4. College of Petroleum Engineering and Geosciences, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia

* 联系人, E-mail: xuxing@zuwe.edu.cn; xwniu@sio.org.cn

2026-01-13 收稿, 2026-03-03 修回, 2026-04-13 接受, 2026-04-14 网络版发表

海底科学与划界全国重点实验室开放课题(sglkft2025-2)、国家自然科学基金(42106068, 42376052, 42422603)和浙江省自然科学基金(LDQ24D060001)资助

摘要 经过近几十年对地幔柱的研究, 地幔柱上涌导致岩石圈变形和破坏、板内热点的火山地震活动机制、规律和特点等方面获得了较大的进展. 近期, 在阿拉伯东部通过地震走时成像结果和其他多学科证据发现丹尼地幔柱(Dani Plume)而提出的“幽灵”地幔柱概念, 是一个崭新的值得关注的科学发现, 需要更多的科学研究去丰富对它的认识. “幽灵”地幔柱隐藏在岩石圈之下, 地表缺乏传统地幔柱所表现的板内热点火山活动, 其行为机制研究还不够透彻, 而“幽灵”地幔柱对岩石圈的作用机制就是其中一个关键科学问题. 本研究利用布设在阿曼-阿联酋的107台宽频带地震仪记录的三分量连续波形数据研究阿拉伯板块东部的地震活动, 以揭示丹尼地幔柱对岩石圈变形的作用. 首先, 利用PhaseNet深度学习从连续三分量波形数据中拾取大量微震到时, 并使用基于高斯混合模型的GaMMa程序对微震到时进行关联. 然后, 利用NonLinLoc对关联后的走时数据做定位反演, 获得724个微震事件. 最后, 使用GrowClust对这些地震进行重定位, 最终获得了281个高质量微震事件. 微震空间分布展示出2个非常明显的地震群, 第一个是在穆桑代姆半岛(Musandam Peninsula)南部, 可能与仰冲特提斯洋岩石圈边界和碰撞推挤相关. 另一个位于层析成像识别出的丹尼地幔柱顶部地壳内, 推测是由地幔柱抬升岩石圈造成地壳形变而产生的微震. 后者揭示出, 虽然“幽灵”地幔柱隐伏在大陆岩石圈之下, 没有地表火山痕迹, 但是其上升高温地幔流依然会造成岩石圈形变从而产生板内微震活动.

关键词 “幽灵”地幔柱, 岩石圈变形, 微震活动, 深度学习, 地震定位

地幔柱概念由Jason Morgan于20世纪70年代提出, 用以解释远离板块边界的板内热点火山活动^[1,2], 它与板块构造理论一同构建起地球内部动力学框架. 大量研究表明, 经典地幔柱形态呈蘑菇状, 宽大的蘑菇头通过细长管状尾巴连接起源于核幔边界的异常热源区^[3-8], 来自核幔边界的热物质在上升过程中带走地核热量, 从而冷却地球^[9,10]. 目前, 已知的地幔柱大部分位于大洋中, 并且均有明显的地表火山作用痕迹以及对

应的地球物理和地球化学特征^[10,11]. 近期, Pilia等人^[12]通过地震成像、接收函数、动态剩余地形、运动学模拟和同位素地球化学等多学科交叉研究, 在阿曼东部首次发现了一个隐藏在阿拉伯被动大陆边缘下方且没有地表火山作用的丹尼地幔柱(Dani Plume; 图1). 由于被岩石圈覆盖, 并且没有明显的火山作用, 因此称之为“幽灵”地幔柱(Ghost Plume). 该研究认为, 由于研究区岩石圈厚度超过100 km, 即使该地幔柱的温度超出背

引用格式: 胡昊, 徐星, 牛雄伟, 等. 阿曼东部“幽灵”地幔柱诱发的板内微震活动. 科学通报, 2026, 71: 3531–3542

Hu H, Xu X, Niu X, et al. Micro-earthquake activities induced by a “ghost” plume in Eastern Oman (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3531–3542, doi: 10.1360/CSB-2026-0057

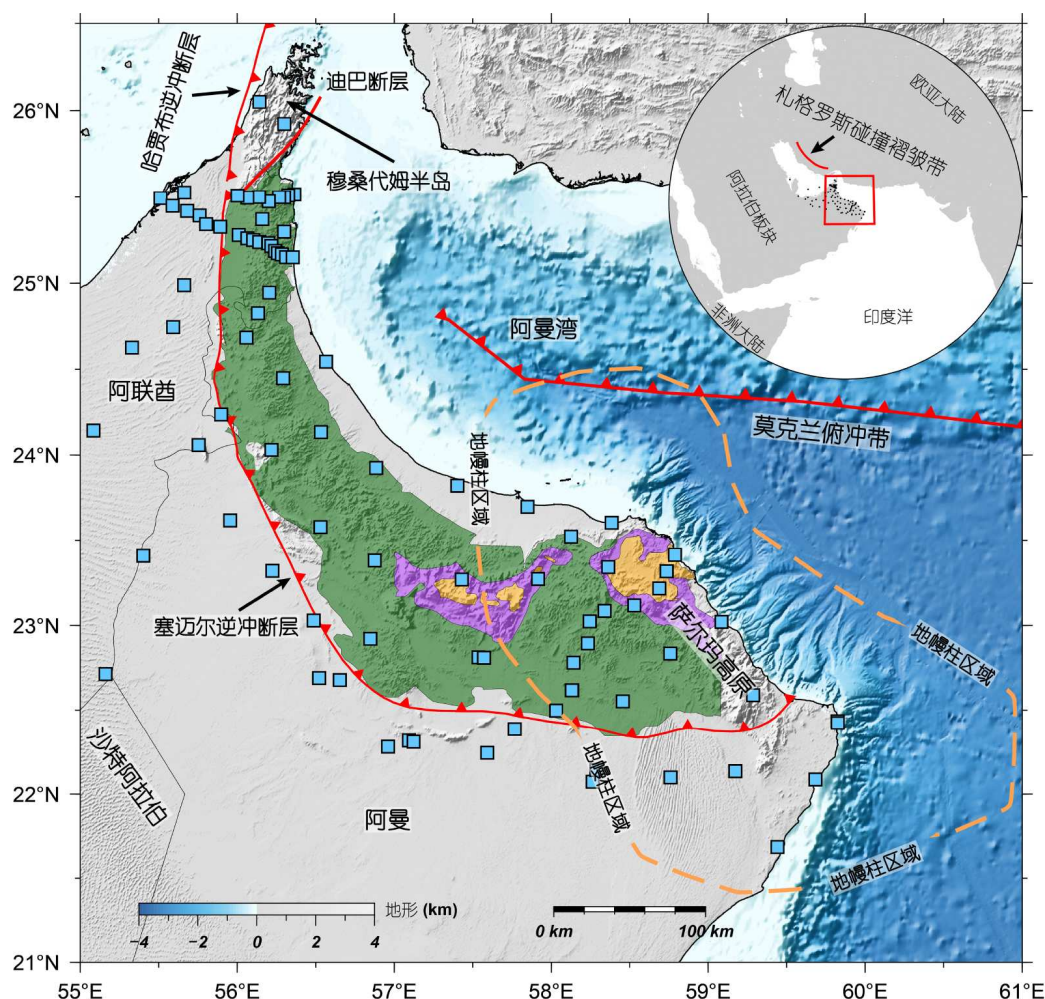


图1 阿曼东部及周边的简要构造和地震台站分布图. 右上角插图中的红色方框标示的区域为研究区位置, 红色线段和黑色小点分别表示札格罗斯碰撞褶皱带和研究中使用的所有地震台站位置. 浅蓝色方框表示阿曼山脉附近的宽频带地震仪布设位置. 深绿色区域为阿曼塞迈尔蛇绿岩带(Semail ophiolites)^[17], 紫色区域为二叠纪至白垩纪岩石露头, 黄色区域为前寒武至古生代岩石露头^[18]. 红色锯齿状实线表示哈贾布逆冲断层(Hagab thrust)、塞迈尔逆冲断层(Semail thrust)和莫克兰俯冲带(Makran subduction zone), 红色实线表示迪巴断层(Dibba fault). 橙色虚线范围表示用层析成像结果识别的地幔柱区域^[12]

Figure 1 Simplified tectonic map of eastern Oman and its surroundings, and distribution of seismic stations. The red box in the top-right inset map shows the study area, in which the red line and black dots exhibit the Zagros fold-thrust belt and all seismic stations used in this study, respectively. Light blue squares indicate the locations of seismic stations around the Oman mountains. The dark green domain represents the oceanic sequence of the Semail ophiolites^[17]. The purple and yellow domains denote the outcrops of exhumed Permian to Cretaceous, and Precambrian to Palaeozoic formations, respectively^[18]. The red jagged lines indicate the Hagab thrust fault, Semail thrust fault and Makran subduction zone. The red solid line indicates the Dibba fault. The domain marked by the orange dashed line is the plume zone identified by tomographic results^[12]

景地幔150~250℃, 也难以让高温岩浆穿透岩石圈形成有效的减压熔融而产生地表火山. 岩石圈像一个坚硬的盖子, 抑制来源于地球深部的岩浆活动. 丹尼地幔柱的发现表明, 在看似平静的地表区域并不代表其下方地幔活动就消停了. 虽然, 上述研究从地表缺失火山作用、持续的地表抬升和地幔柱造成印度板块的偏离等证据阐述了丹尼地幔柱与板块的相互作用, 但是地幔柱对阿曼东部岩石圈或地壳内部的破坏并没有进一

步说明^[12]. 而微震活动研究有助于认识这个问题. 因为, 地幔柱上涌会抬升岩石圈导致地壳或岩石圈应力改变引发地震. 此外, 地幔柱岩浆侵入破坏地壳等也会伴随相应的微震活动, 如夏威夷、留尼旺和冰岛等热点^[13~16].

微震活动的时空分布特征与岩浆喷发、岩浆运移通道以及岩石圈破坏特征息息相关, 研究地幔柱诱发的微震活动有助于进一步了解地幔柱-板块系统的相

互作用机制,特别是隐藏在岩石圈下方的“幽灵”地幔柱所诱发的地震活动。本研究利用布设在阿曼-阿联酋区域的107台宽频带地震仪(图1)记录的三分量连续地震波形数据,通过人工智能方式拾取微震到时并定位,进而开展微震活动研究,以期厘清因丹尼地幔柱造成的岩石圈变形和地壳破坏。

1 区域构造背景

研究区位于阿拉伯板块东部边缘的阿联酋和阿曼境内,其东部紧邻莫克兰俯冲带,北部为札格罗斯碰撞褶皱带(图1)。阿拉伯板块下方的岩石圈主要以地磁特征划分为西部阿拉伯地盾和东部阿拉伯地台两个主要构造单元^[17,19]。西部的阿拉伯地盾区域具有广泛的新元古代基底露头^[20],有利于开展构造地貌学分析、地球化学采样和地球物理学观测^[17],构造认识更加清晰。与之形成鲜明对比的是,东部阿拉伯地台被巨厚的寒武纪至全新世火山沉积物所覆盖,其厚度在某些区域甚至超过10 km^[19]。巨厚沉积物严重阻碍了研究人员对该区进行野外观测和采样,从而难以对该区的地质构造历史作出更可靠的推断^[17]。板块重建分析表明,从新元古代到晚泥盆纪(约610~364 Ma),阿拉伯板块位于冈瓦纳大陆内部,期间发育了众多克拉通内凹陷盆地^[21]。随后,从石炭纪晚期到二叠纪中期,阿拉伯板块一直处于弧后环境^[21]。而二叠纪中期到塞诺曼阶,阿拉伯板块的东北部为特提斯洋的边缘,经历了稳定的陆架碳酸盐岩沉积,在最北端的穆桑代姆半岛(Musandam Peninsula)可以直接观察到其露头^[22~24]。阿拉伯被动大陆边缘稳定沉积条件持续了近160 Ma,当约15 km厚的洋壳和上地幔(图1所示塞迈尔蛇绿岩,即Semail Ophiolites)仰冲到阿拉伯大陆边缘时,沉积环境才最终结束^[22,25,26]。虽然出露的蛇绿岩受到广泛关注和研究,但是其深部认识在近年的地震探测之前几乎处于空白^[12,17,18,27~30]。地震学研究从速度结构^[12,17,28]、莫霍面深度^[28]、各向异性^[30]等特征推测了研究区演化过程^[12,18,29],特别是丹尼“幽灵”地幔柱的发现^[12]。虽然研究区构造复杂,但是从构造历史和环境来看,研究区外围构造活动强烈,内部却相对稳定。前人研究认为,研究区内的地震活动成因为大洋岩石圈仰冲相关的塞迈尔逆冲断层(Semail Thrust)、哈贾布逆冲断层(Hagab Thrust)、迪巴断层(Dibba Fault)等引起(图1),即使许多地震事件远离断层^[31]。然而,丹尼地幔柱的发现可能改变研究区内部的地震活动成因的解释。

2 数据和方法

2.1 地震数据

本研究所使用的地震波形数据主要来源COOL (Crust of the Oman Ophiolite and its Lithosphere)项目^[32]和部分临时地震台网^[17]。2013年10月~2016年2月德国基尔大学在阿曼山脉部署了由波茨坦地球物理仪器库(Geophysical Instrument Pool Potsdam)提供的40台宽频带地震仪,开展COOL项目的野外长期天然地震观测,其目标是研究世界上最大且保存最完好的阿曼仰冲塞迈尔蛇绿岩及其下伏大陆岩石圈的几何形态和特征^[32]。观测仪器包含30台Güralp CMG-3ESP Compact、6台Trillium 120 PA和4台STS-2地震仪。为了保证地震台站均匀且合理分布,COOL项目在40台宽频带地震仪的基础上,还加入了阿曼地震监测中心部署的9台永久观测台站。除上述COOL地震台站外,本研究还使用了阿联酋国家气象中心维护的22个永久地震台站、全球地震观测网的1个永久地震台站和阿布扎比石油研究所布设的35个临时地震台站,以增强微震活动的监测能力,总计107个台站,记录时间为2013年10月~2016年12月^[12,17]。在震相到时拾取前,对记录的连续地震波形数据先做了去仪器响应、均值和线性趋势处理,接着使用拐角频率为0.04~500 s的带通滤波器进行了滤波处理。

2.2 震相到时拾取和关联

由于107个台站记录的连续波形数据量比较大,为了提高微震到时拾取的效率同时保证足够的拾取精度,本研究使用基于深度学习的PhaseNet程序对P波和S波的到时进行了精确拾取。在初步拾取到时的基础上,进一步对拾取的数据集进行质量控制,仅保留探测阈值大于0.6的到时数据用于后续研究,以保证结果有足够的可靠性。相较传统人工拾取方法,深度学习具有较高的拾取精度,并且不需人工监督,能减少人工拾取时因经验和水平不同而产生的人为误差^[33,34]。对于拾取的到时,我们使用基于贝叶斯高斯混合模型的GaMMA程序进行关联,该程序利用高斯混合模型可初步计算出震源位置、发震时间和震级^[35]。最后,通过到时数据关联,得到了1497个区域地震事件的初步信息(图2)。

2.3 微震定位和重定位

上述计算获得的地震信息是相对比较粗糙的,仍

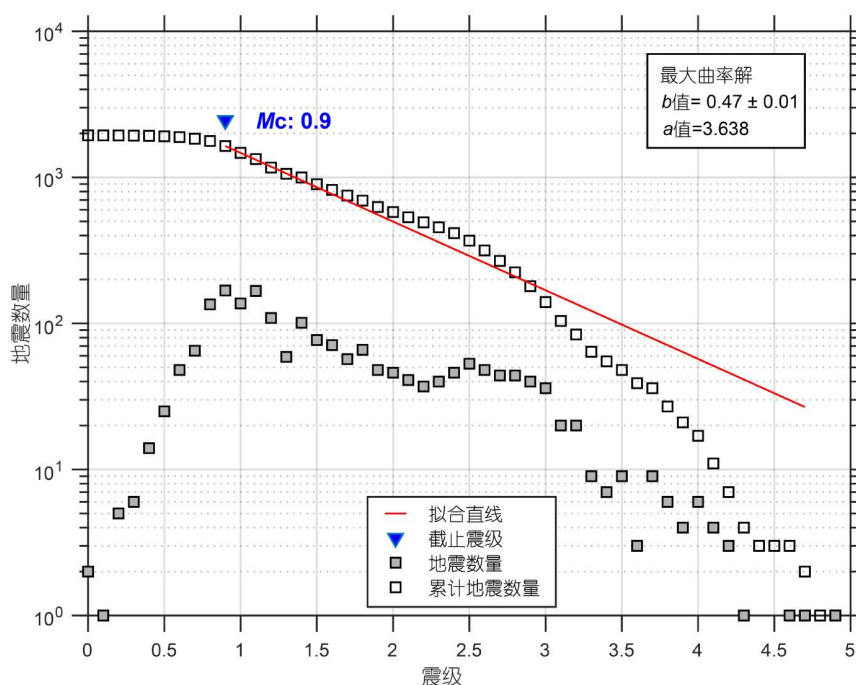


图2 通过GaMMA计算获得的微震震级直方统计图和相应的 b 值结果

Figure 2 Histogram of micro-earthquake magnitudes calculated by the GaMMA and the corresponding b -value

需要进一步优化,以获得更加可靠的结果.本研究使用NonLinLoc非线性反演程序^[36]对关联后的地震目录进行定位,并根据后验密度函数样本的分布来估算68%置信度的三维误差椭球体,以获得更高精度的地震目录.与其他基于蒙特卡罗的反演算法类似可实现非线性全局反演^[37],但NonLinLoc采用八叉树重要性抽样方法(otc-tree importance sampling method)和等效差分时间似然函数(equal differential time likelihood function),既提高了采样效率,又能保证最优解和抵抗异常观测值的影响^[36].由于在GaMMA中使用的速度模型为地壳平均P波速度6.0 km/s和波速比1.75进行关联,该速度模型缺少分层信息.因此,在定位过程中,使用Wiesenberg等人^[27]通过背景噪声成像获得的S波速度模型计算的一维平均速度,对应的一维P波速度和密度模型使用弹性波与密度的经验关系计算获得^[38].由于S波速度只覆盖至39 km深,超出部分使用模型底部速度(图3).考虑到本研究重点关注阿曼东部丹尼地幔柱诱发的微震,因此平均一维速度模型由丹尼地幔柱附近(图1黄色虚线范围)的三维速度计算获得(图3紫色实线),以减小因速度的横向变化带来的不确定性.通过NonLinLoc进行定位后,共获得1306个微震事件.为了保证微震事件的质量,我们对结果进行了筛选,仅保留均方根残差小于

0.5 s、定位不确定性小于20 km、至少被6个地震台站记录且至少有1个S波到时约束、方位角覆盖间隙小于270°的地震事件.经过筛选后获得了724个高质量微震事件用于后续的重定位研究.

通过获得的NonLinLoc定位结果,本研究使用基于双差定位(double difference)的GrowClust程序^[39]对微震进行了重定位,并获得了更高精度的定位结果.双差定位是一种利用距离相对较近的地震簇之间在同一台站记录的相对走时差异进行定位的方法^[40].由于地震簇内的事件之间距离较近,射线在近地表几乎重合,可忽略近地表速度不均一造成的影响(特别是沉积层的影响),从而消除由近地表地震波速度不确定带来的误差,并且在定位中所使用的关键信息为相对走时差异,因此该相对定位方法具有比绝对定位方法更高的精度和可靠性^[39-41].通过微震重定位,最终获得了281个高质量事件.

3 结果

3.1 微震到时和关联结果

通过PhaseNet深度学习方法自动拾取P波和S波到时,共获得了4681233个P波和4902436个S波到时.为了

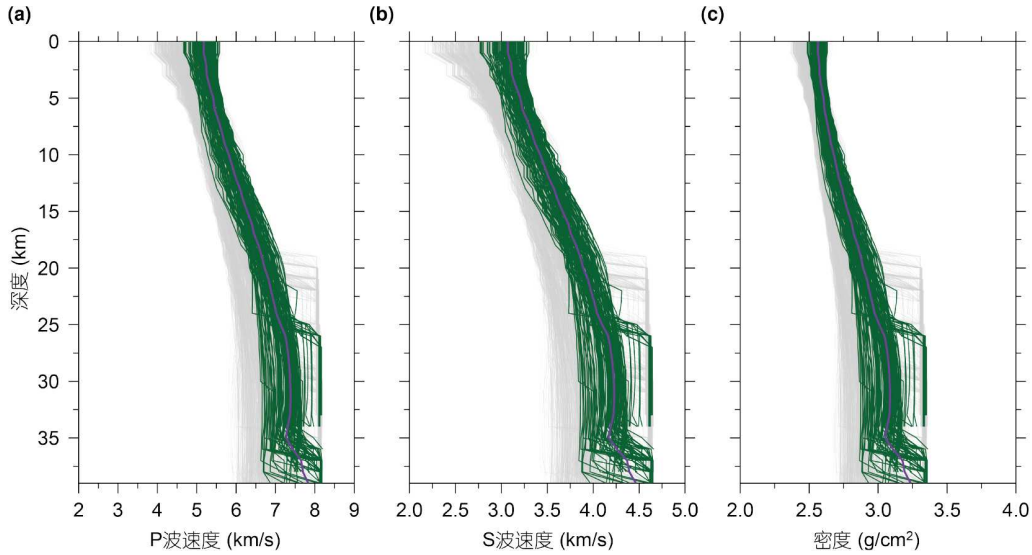


图 3 微震定位中使用的一维参考模型。(a~c)分别展示的是P波速度模型、S波速度模型和密度模型。其中灰色实线表示Wiesenberg等人^[27]反演的研究区所有网格点的一维S波速度(b)以及转换的P波速度(a)和密度(c)。绿色实线表示从丹尼地幔柱周边区域提取的S速度以及转换的P波速度和密度。紫色实线表示丹尼地幔柱周边区域的一维平均S波速度以及转换的P波速度和密度

Figure 3 The one-dimensional (1-D) reference model used in micro-earthquake location. (a~c) P-wave velocity, S-wave velocity and density models, respectively. Grey solid lines are the 1-D S-wave velocities (b) inverted by Wiesenberg et al.^[27] and the corresponding P-wave velocities (a) and densities (c) converted by the empirical relations between elastic wave velocities and density. Green solid lines indicate the 1-D S-wave velocities, converted P-wave velocities and densities extracted from the area around the Dani plume. Purple solid lines represent the averaged 1-D P- and S-wave velocity and density models of the area around the Dani plume

保证拾取数据集的可靠性, 在进行质量控制后, 最终获得了3039677个P波和3109610个S波到时。通过对这些到时进行关联, 计算得到1940个事件, 剔除震源深度大于60 km的事件后获得1497个有效微震事件, 为后续定位和重定位研究提供了基础。这些地震震级主要分布在1级附近, 少部分事件震级大于2级, 其 b 值为 0.47 ± 0.01 , 对应的截止震级为0.9级(图2)。关联后的震源分布如图4所示, 主要可以看到两个比较集中的地震群, 一个位于穆桑代姆半岛南边, 另一个则位于阿曼东部丹尼地幔柱上方, 震源最深达60 km。除了两个主要的地震群外, 还有零星分布的浅层地震。从震源深度来看, 相对较深的地震主要分布在札格罗斯碰撞褶皱带-莫克兰俯冲带上和阿联酋-阿曼境内(图4中绿色圆圈)。从关联后的初步结果可以看到, 无论是位于穆桑代姆半岛南边的地震群还是阿曼东部丹尼地幔柱上方的地震群都是呈现出垂直的向下延伸趋势(图4(b, c))。相较于穆桑代姆半岛地震群而言, 丹尼地幔柱上方的地震群更加紧凑, 横向分布范围更集中并且更加垂直, 微震数量相对也更少。

将1497个有效微震事件的8615个P波和7014个S波走时分别与对应震中距和地震射线长度进行线性拟合

可以看出, 距离较近时部分走时与震中距的分布离拟合的直线较远(图5(a)), 而走时与射线路径长度的分布与拟合的直线更为一致(图5(b)), 这样的差异主要来源于计算中是否考虑震源深度。通过拟合直线斜率估算出的平均P波和S波速度分别为6.0和3.4 km/s (即 V_p/V_s 值为1.76), 这与我们在地震走时关联中所设置的参数非常接近, 表明关联的结果可靠。

3.2 定位和重定位结果

在关联后获得的1497个微震事件初步信息的基础上, 利用NonLinLoc程序进行了进一步定位处理, 经过数据质量控制后得到了724个微震事件的位置, 其分布如图6所示。相较于关联获得的微震, 筛选后的微震位置主要分布在地震台站覆盖范围内, 排除了大量可能由于方位角覆盖不好而约束较差的微震事件。与关联得到的结果相似, 经NonLinLoc定位后的事件也主要集中在穆桑代姆半岛南部和阿曼东部丹尼地幔柱上方, 分别有582和38个事件, 呈垂直线性分布且最深的地震震源接近50 km, 其余的地震零星分布在阿曼东部靠海区域(图6)。由于双差相对定位方法需要计算距离较近的地震对之间的走时差以消除因速度模型带来的误差,

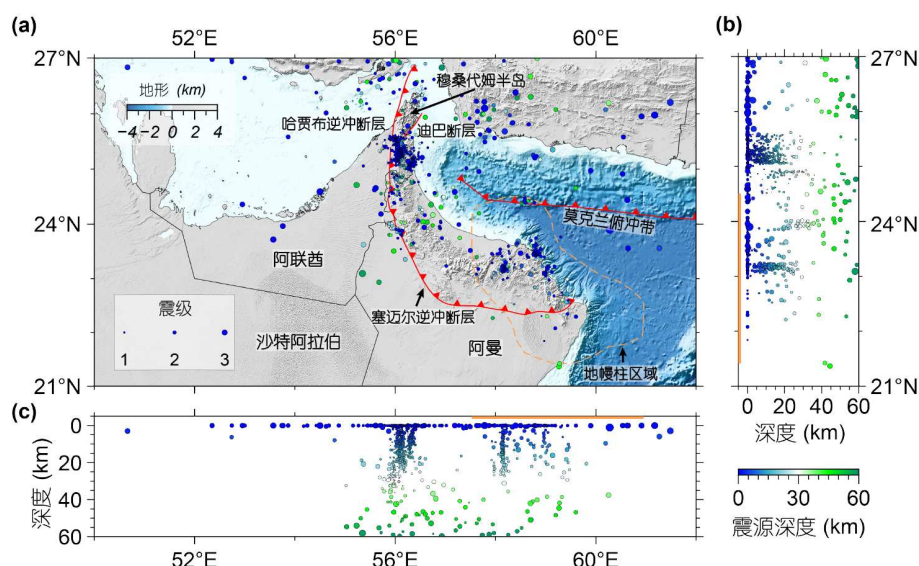


图4 通过GaMMa程序关联获得的微震分布。(a) 微震分布的平面图, 其中橙色虚线标示的范围为层析成像识别的地幔柱区域; (b, c) 分别为微震沿纬线和经线方向的垂直剖面投影, 橙色线段表示地幔柱范围

Figure 4 The micro-earthquake distribution obtained by the arrival time association of GaMMa. (a) Map view of the micro-earthquakes. The domain marked by the orange dashed line is the plume zone identified by tomographic results. (b, c) The vertical sections of the micro-earthquakes along the directions of latitude and longitude, respectively. The orange lines denote the plume range

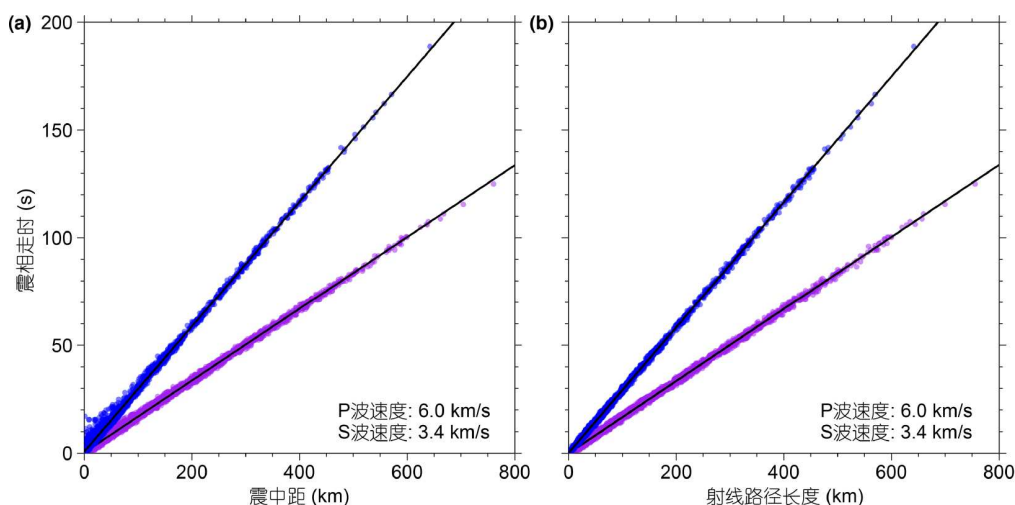


图5 微震走时与震中距(a)和沿射线距离(b)的对比。紫色和蓝色圆圈分别表示P波和S波走时和距离的对比。黑色实线表示对应的圆圈值拟合的直线, 其斜率倒数则是对应的波速

Figure 5 Travel times of micro-earthquakes versus epicentre distances (a) and the distances along their raypaths (b). Purple and blue circles represent the P- and S-wave travel times versus distances, respectively. The black solid lines represent the fitted lines of the corresponding circles, and the reciprocals of their slopes are the corresponding wave velocities

对数据的约束更加严格。因此, 反演获得的地震会更少, 但是结果更可靠。由于区域的地震震级小, 为了尽可能得到可靠的结果, 我们在双差定位中进行了非常严格的约束。对比定位结果(图6)和重定位结果(图7), 重定位后已经将大量不满足要求的地震剔除, 反演结果只

保留281个非常可靠的微震事件。重定位后的微震事件在双走时差异的约束下, 水平和垂直定位的不确定性分别为 0.673 ± 0.217 和 0.668 ± 0.205 km, 发震时间的不确定性为 101 ± 41 ms(如图7(a)所示)。该定位结果的精度已经足够满足探测地壳内部发生脆性破坏的确切位置。

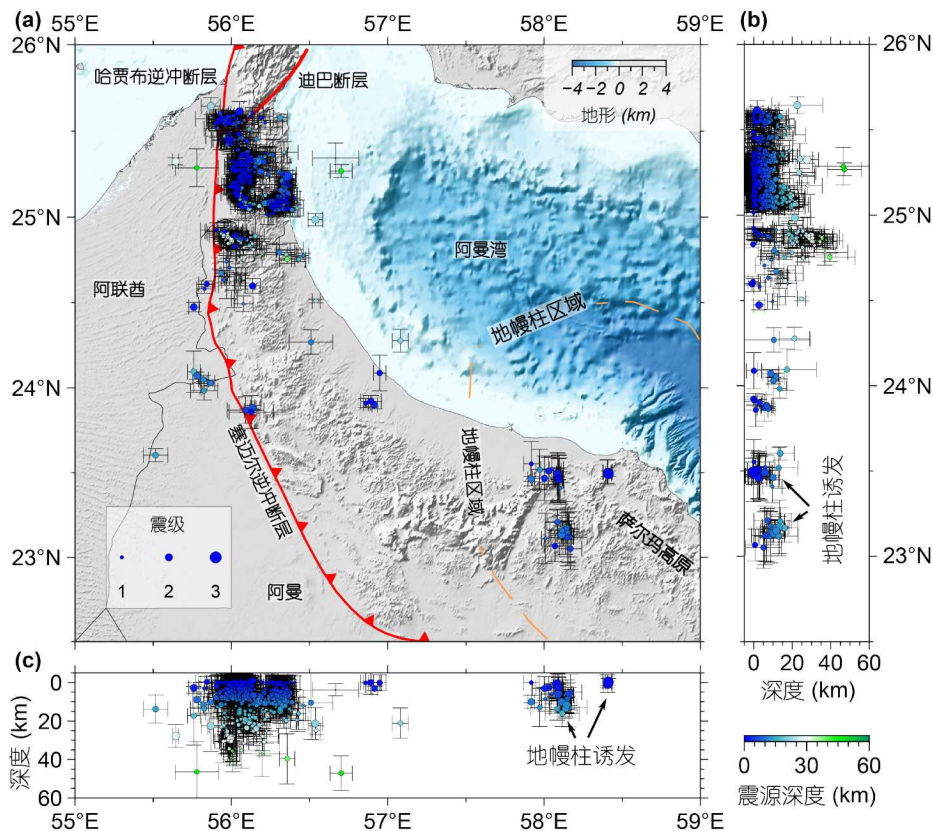


图6 经NonLinLoc定位的微震分布结果。(a) 微震分布的平面图。其中橙色虚线范围表示用层析成像结果识别的地幔柱区域；红色锯齿状实线和红色实线分别表示塞迈尔逆冲断层、哈贾布逆冲断层和迪巴断层；(b, c) 分别为微震沿纬线和经线方向的垂直剖面投影

Figure 6 The micro-earthquake locations calculated by NonLinLoc. (a) Map view of the micro-earthquakes. The domain marked by the orange dashed line is the plume zone identified by tomographic results. The red jagged and solid lines indicate the Semail and Hagab thrust faults, and the Dibba fault, respectively. (b, c) The vertical sections of the micro-earthquakes along the directions of latitude and longitude, respectively

与前面的结果一致，从图7可以看到地震事件依然由两个主要的地震群组成，分布在穆桑代姆半岛南部和丹尼地幔柱上方，分别有267和14个微震事件。相对前面的结果，重定位后地震数量大幅减少，但是在严苛的约束下，这些事件的精度和可靠度都非常高，足以反映丹尼“幽灵”地幔柱是否引发了岩石圈变形和地壳发生破坏。

4 讨论

虽然研究区经历了复杂的演化历史，但总体位于稳定板块内部，地震活动主要分布在围绕阿拉伯板块周边的板块边界和活动断层上，板块内部鲜有显著的地震发生^[42]。从微震定位和重定位结果来看，研究区的微震活动主要分布在阿曼蛇绿岩范围内的两个区域。穆桑代姆半岛南端的地震群离主要的断层近，而南边萨尔玛高原(Salma Plateau)范围的地震群离断层远(图6

和7)。在丹尼地幔柱被发现前，远离断层系统的地震通常解释由隐藏断层产生^[31]，这样的解释更符合当时的构造认识。然而，在我们发现隐藏在阿曼东部岩石圈下的丹尼“幽灵”地幔柱后，对远离断层系统的微震成因提出了疑问，下面将分别对北部断层成因和南部地幔柱隆升诱发成因的两个地震群进行讨论。

在100 Ma左右，特提斯洋活动俯冲带上的蛇绿岩形成后其岩石圈开始收缩，随后蛇绿岩和下伏板片从东北到西南逐渐仰冲到沉降的阿拉伯被动大陆边缘，这一过程持续了约20 Ma^[43-45]，最终形成了如今的阿曼塞迈尔蛇绿岩带(图1)。大陆性质的阿拉伯被动大陆边缘和大洋性质的特提斯洋残留岩石圈之间的仰冲边界(即塞迈尔逆冲断层)为孕震提供了条件。本文重定位结果展示，位于穆桑代姆半岛南端的微震事件群分布在残留俯冲板片和阿曼湾之间的过渡区域(图7)。最近，在阿拉伯东部地台的远震走时层析成像揭示沿塞迈尔

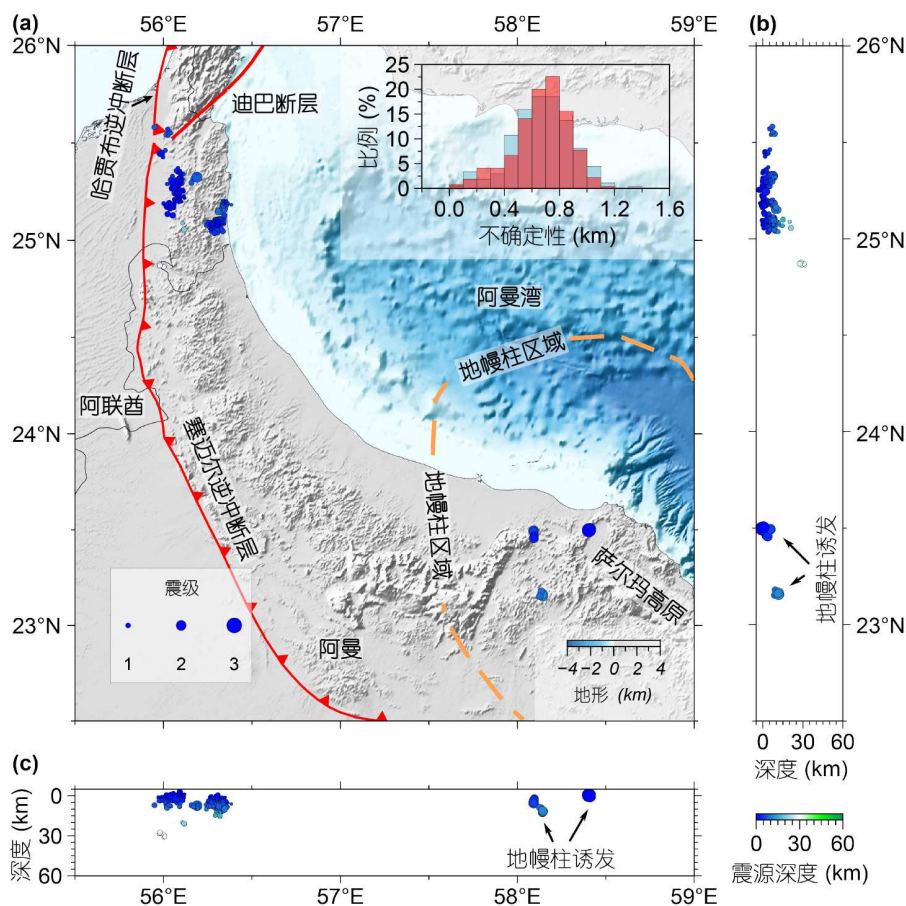


图7 经Growclust重定位的微震分布结果。(a) 微震分布的平面图。其中橙色虚线范围表示用层析成像结果识别的地幔柱区域。红色锯齿状实线和红色实线分别表示塞迈尔逆冲断层、哈贾布逆冲断层和迪巴断层。统计直方图中展示的是地震事件的水平(浅蓝色)和垂直(红色)重定位不确定性; (b, c) 分别为微震沿纬线和经线方向的垂直剖面投影

Figure 7 The relocated positions of the micro-earthquakes by using the Growclust. (a) Map view of the micro-earthquakes. The domain marked by the orange dashed line is the plume zone identified by tomographic results. The red jagged and solid lines indicate the Semail and Hagab thrust faults, and the Diba fault, respectively. Histograms show the uncertainties in micro-earthquake relocation for the horizontal (light blue) and vertical (red) directions. (b, c) The vertical sections of the micro-earthquakes along the directions of latitude and longitude, respectively

逆冲断层下方存在呈东北向倾斜的地震波高速异常体, 认为这是新特提斯洋的残留俯冲板片^[18]。此外, 该地震活跃的区域也是相对更早期的一项远震走时成像结果中揭示出的仰冲特提斯洋岩石圈北部边界^[17]。虽然, 远震走时成像方法难以避免拖尾现象影响, 导致无法准确估算残留特提斯洋岩石圈的厚度^[17,18]。但是, 根据接收函数估计的莫霍面起伏情况(>38 km)^[46], 这个震源深度接近40 km的地震群可能是由两个板块在边界处发生相对位移而在地壳中展示出区域强烈的构造活动性。

然而, 萨尔玛高原范围的地震群远离断层, 远震层析成像的结果表明, 其下方的速度异常与穆桑代姆半岛南部下方完全不同, 表现为垂直上升的低速异常, 而

不是倾斜的高速异常, 被认为是由“幽灵”地幔柱造成^[12,18]。来自核幔边界的地幔上升流以细长管道输送高温物质, 将地球内部的能量和物质传递到岩石圈底部, 高温物质受刚性岩石圈阻挡在岩石圈底部堆积并向四周发散^[47], 形成宽阔的蘑菇状头^[3,4]。传统理论认为热柱在岩石圈下方上升, 会引发地形隆起和减压熔融, 产生的岩浆可穿透岩石圈, 形成板内火山活动^[5], 地表板内热点火山、热点轨迹和明显的富集型地球化学特征是最明显的标志(如夏威夷热点、留尼汪热点、冰岛地幔柱、黄石热点等)^[48-51]。然而, 在阿曼东部由于巨厚的大陆岩石圈覆盖, 上升热流可能无法穿透这个厚实坚硬的盖子, 而隐藏在岩石圈下方^[12]。位于萨尔玛高原下方的柱状热异常正是由隐藏在岩石圈下方的

“幽灵”地幔柱造成,虽然没有穿透岩石圈形成地表热点火山,但是其热浮力仍然使得区域地形持续抬升,为上升热物质提供空间^[12]。岩石圈下的上升流会像岩浆上涌一样,通过穹隆或块体沉降的方式造成地壳变形^[52],最终在地壳中形成断层释放应力。微震活动是应力释放的最直接的证据,从微震初定位到重定位结果来看(图4、6和7),阿曼东部丹尼“幽灵”地幔柱上方岩石圈内的微震活动呈垂直分布。由于地震非常集中且震级较小,结合其下方新发现的上升地幔柱^[12,53]以及由热膨胀产生的动态剩余地形^[12,54]认识,我们认为这些微震事件是地幔柱造成岩石圈隆升过程中诱发形成的地震。与稳定板块内部的微震活动分布不同,地幔柱上升至岩石圈底部并向四周辐射,其顶部的刚性地壳中心是应力最为集中的区域,因此微震在这儿产生(图8)。稳定板块内由于地壳各处受到来自深部的应力相对分散,因此地震活动零散的与次生构造活动相关联。

5 结论

本研究基于布设在阿联酋和阿曼境内的107台宽频带地震仪记录的海量三分量连续地震波数据,利用人工智能深度学习方法拾取了大量微震到时信息。对这些微震到时经过严格筛选、关联、定位和重定位后,获得了阿拉伯板块东部的地震活动信息。其结果主要表现出北部与仰冲特提斯洋岩石圈(即阿曼蛇绿岩)边界相关的微震活动带和南部萨尔玛高原处与隐藏在岩石圈下方的丹尼“幽灵”地幔柱抬升引起的微震活动区域。萨尔玛高原的微震表明,即使地幔柱被掩盖在较厚的大陆岩石圈下方,但是其高温产生的浮力依然可以

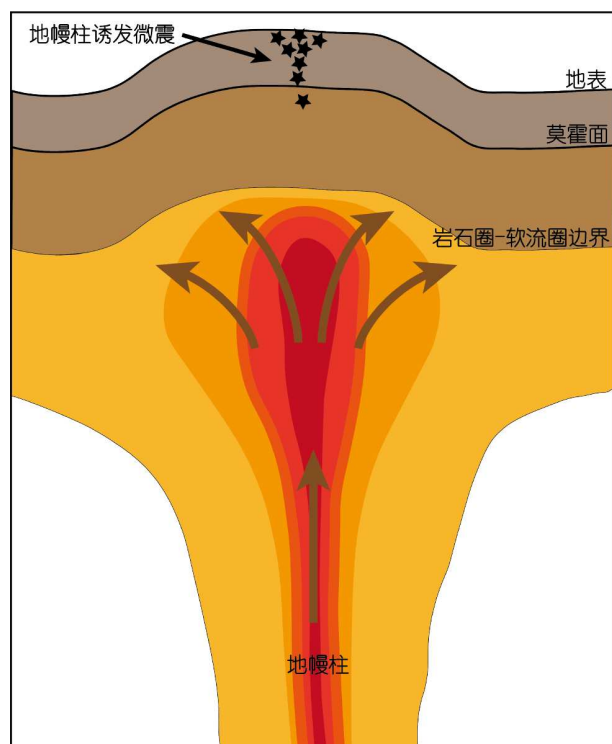


图8 阿曼东部丹尼地幔柱造成岩石圈形变和地壳破坏从而产生微震的示意图

Figure 8 Schematic diagram of the Dani plume in eastern Oman causing lithospheric and crustal deformations, thereby generating micro-earthquakes

通过抬升岩石圈,使之产生形变从而诱发板块内的微震。该结果从地震学角度提供了“幽灵”地幔柱与板块相互作用的证据,有助于我们进一步认识地幔柱的演化。

致谢 感谢编辑和两位匿名审稿人对论文提出的宝贵修改意见。本研究中使用基于深度学习的PhaseNet拾取微震到时,使用GaMMA进行到时信息关联,微震定位使用NonLinLoc软件,微震重定位使用GrowClust软件,图件使用GMT绘制。在此,一并感谢这些软件的作者所作出的贡献。

参考文献

- 1 Morgan W J. Deep mantle convection plumes and plate motions. *AAPG Bull*, 1972, 56: 203–213
- 2 Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 1971, 230: 42–43
- 3 Griffiths R W, Campbell I H. Stirring and structure in mantle starting plumes. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 99: 66–78
- 4 Campbell I H, Griffiths R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 99: 79–93
- 5 Hu H, Zhao D P, Lin J, et al. Seismic imaging of the Reunion mantle plume. *Research Square*, 2024, doi: 10.21203/rs.3.rs-4844057/v1
- 6 Long X P, Zhao G C, Zhai M G, et al. Research progresses and key scientific issues of pre-plate tectonics and origin of continents (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 1572–1585 [龙晓平, 赵国春, 翟明国, 等. 前板块构造与大陆起源研究进展及关键科学问题. *科学通报*, 2024, 69: 1572–1585]

- 7 Sun W. The Magma Engine and the driving force of plate tectonics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2988–3006 [孙卫东. “岩浆引擎”与板块运动驱动力. 科学通报, 2019, 64: 2988–3006]
- 8 Teng J W, Song P H, Ma X Y, et al. The driving force and movement of materials in the Earth's interior (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1995–2019 [滕吉文, 宋鹏汉, 张雪梅, 等. 地球内部物质的运动与动力. 科学通报, 2016, 61: 1995–2019]
- 9 Hand E. Mantle plumes seen rising from Earth's core. *Science*, 2015, 349: 1032–1033
- 10 Koppers A A P, Becker T W, Jackson M G, et al. Mantle plumes and their role in Earth processes. *Nat Rev Earth Environ*, 2021, 2: 382–401
- 11 Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 205: 295–308
- 12 Pilia S, Iaffaldano G, Davies D R, et al. Ghost plumes hidden beneath Earth's continents. *Earth Planet Sci Lett*, 2025, 666: 119467
- 13 Duputel Z, Ferrazzini V, Lengliné O, et al. Seismicity of La Réunion Island. *Comptes Rendus Géoscience*, 2021, 353: 237–255
- 14 Flóvenz Ó G, Wang R, Hersir G P, et al. Cyclical geothermal unrest as a precursor to Iceland's 2021 Fagradalsfjall eruption. *Nat Geosci*, 2022, 15: 397–404
- 15 Sigmundsson F, Parks M, Hooper A, et al. Deformation and seismicity decline before the 2021 Fagradalsfjall eruption. *Nature*, 2022, 609: 523–528
- 16 Wilding J D, Zhu W, Ross Z E, et al. The magmatic web beneath Hawai'i. *Science*, 2023, 379: 462–468
- 17 Pilia S, Hu H, Ali M Y, et al. Upper mantle structure of the northeastern Arabian Platform from teleseismic body-wave tomography. *Phys Earth Planet Inter*, 2020, 307: 106549
- 18 Pilia S. On the subduction polarity beneath the Semail Ophiolite. *J Geophys Res Solid Earth*, 2025, 130: E2025JB032145
- 19 Stern R J, Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: a geologic, petrologic, and geophysical synthesis. *Earth-Sci Rev*, 2010, 101: 29–67
- 20 Al-Husseini M I. Origin of the Arabian Plate structures: Amar collision and Najd Rift. *GeoArabia*, 2000, 5: 527–542
- 21 Ruban D A, Al-Husseini M I, Iwasaki Y. Review of Middle East Paleozoic plate tectonics. *GeoArabia*, 2007, 12: 35–56
- 22 Searle M P. Structure of the Musandam culmination (Sultanate of Oman and United Arab Emirates) and the Straits of Hormuz syntaxis. *JGS*, 1988, 145: 831–845
- 23 Ali M Y, Sirat M, Small J. Integrated gravity and seismic investigation over the Jabal Hafit structure: implications for basement configuration of the frontal fold-and-thrust belt of the northern oman mountains. *J Pet Geol*, 2009, 32: 21–37
- 24 Ali M Y, Aidarbayev S, Searle M P, et al. Subsidence history and seismic stratigraphy of the Western Musandam Peninsula, Oman-United Arab Emirates mountains. *Tectonics*, 2018, 37: 154–181
- 25 Glennie K W, Boeuf M G A, Clarke M W H, et al. Late Cretaceous Nappes in Oman Mountains and their geologic evolution. *AAPG Bull*, 1973, 57: 5–27
- 26 Searle M P. Structural geometry, style and timing of deformation in the Hawasina Window, Al Jabal al Akhdar and Saih Hatat culminations, Oman Mountains. *GeoArabia*, 2007, 12: 99–130
- 27 Wiesenberger L, Weidle C, El-Sharkawy A, et al. Measuring the phase of ambient noise cross correlations: anisotropic Rayleigh and Love wave tomography across the Oman Mountains. *Geophys J Int*, 2022, 231: 1233–1251
- 28 Weidle C, Wiesenberger L, El-Sharkawy A, et al. A 3-D crustal shear wave velocity model and Moho map below the Semail Ophiolite, eastern Arabia. *Geophys J Int*, 2022, 231: 817–834
- 29 Weidle C, Wiesenberger L, Scharf A, et al. Lithospheric evolution of eastern Arabia based on surface wave and receiver function analyses. *Earth Planet Sci Lett*, 2023, 611: 118145
- 30 Komeazi A, Kaviani A, Rumpker G, et al. Discriminating lithospheric and asthenospheric anisotropy beneath Northern Oman: sharp contrast observed at the Semail Gap Fault Zone. *J Geophys Res Solid Earth*, 2024, 129: e2023JB028627
- 31 Weidle C, Glück E, Deif A, et al. Seismicity and state of stress in NE Arabia. *Geol Soc Spec Publ*, 2024, 550: 389–402
- 32 Weidle C, Agard P, Meier T, et al. COOL (Crust of the Oman Ophiolite and its Lithosphere) seismic network. GEOFON Data Archive, 2013, doi: 10.7914/SN/5H_2013
- 33 Zhu W, Beroza G C. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival time picking method. *Geophys J Int*, 2018, doi: 10.1093/gji/ggy423
- 34 Zhu W, Hou A B, Yang R, et al. QuakeFlow: a scalable machine-learning-based earthquake monitoring workflow with cloud computing. *Geophys J Int*, 2022, 232: 684–693
- 35 Zhu W, McBrearty I W, Mousavi S M, et al. Earthquake phase association using a Bayesian Gaussian mixture model. *J Geophys Res Solid Earth*, 2022, 127: e2021JB023249
- 36 Lomax A, Virieux J, Volant P, et al. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models. In: Thurber C H, Rabinowitz N, eds. *Advances in Seismic Event Location*. Dordrecht: Springer, 2000. 101–134
- 37 Hu H, Niu X, Wang W, et al. Ocean bottom seismograph relocation and time correction using the MCMC algorithm. *Acta Oceanol Sin*, 2025, 44: 101–111

- 38 Brocher T M. Empirical relations between elastic wave speeds and density in the Earth's Crust. [Bull Seismol Soc Am](#), 2005, 95: 2081–2092
- 39 Trugman D T, Shearer P M. GrowClust: a hierarchical clustering algorithm for relative earthquake relocation, with application to the Spanish Springs and Sheldon, Nevada, Earthquake Sequences. [Seismol Res Lett](#), 2017, 88: 379–391
- 40 Waldhauser F. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward Fault, California. [Bull Seismol Soc Am](#), 2000, 90: 1353–1368
- 41 Hu H, Zhao D, Lin J, et al. A slab window beneath north Sumatra revealed by P-wave mantle tomography. [J Geophys Res Solid Earth](#), 2023, 128: e2022JB025976
- 42 Engdahl E R, Di Giacomo D, Sakarya B, et al. ISC-EHB 1964–2016, an improved dataset for studies of Earth structure and global seismicity. [Earth Space Sci](#), 2020, 7: e2019EA000897
- 43 Pearce J A, Alabaster T, Shelton A W, et al. The Oman ophiolite as a Cretaceous arc-basin complex: evidence and implications. [Philos Trans R Soc London Ser A Math Phys Sci](#), 1981, 300: 299–317
- 44 Rioux M, Bowring S, Kelemen P, et al. Tectonic development of the Samail ophiolite: high-precision U-Pb zircon geochronology and Sm-Nd isotopic constraints on crustal growth and emplacement. [J Geophys Res Solid Earth](#), 2013, 118: 2085–2101
- 45 MacLeod C J, Johan Lissenberg C, Bibby L E. “Moist MORB” axial magmatism in the Oman ophiolite: the evidence against a mid-ocean ridge origin. [Geology](#), 2013, 41: 459–462
- 46 Ali M Y, Watts A B, Searle M P, et al. Geophysical imaging of ophiolite structure in the United Arab Emirates. [Nat Commun](#), 2020, 11: 2671
- 47 Ito G, Dunn R, Li A, et al. Seismic anisotropy and shear wave splitting associated with mantle plume-plate interaction. [J Geophys Res Solid Earth](#), 2014, 119: 4923–4937
- 48 Nelson P L, Grand S P. Lower-mantle plume beneath the Yellowstone hotspot revealed by core waves. [Nat Geosci](#), 2018, 11: 280–284
- 49 Wolfe C J, Solomon S C, Laske G, et al. Mantle shear-wave velocity structure beneath the Hawaiian hot spot. [Science](#), 2009, 326: 1388–1390
- 50 Wamba M D, Montagner J, Romanowicz B, et al. Multi-mode waveform tomography of the indian ocean upper and mid-mantle around the Réunion hotspot. [J Geophys Res Solid Earth](#), 2021, 126: e2020JB021490
- 51 Wolfe C J, Solomon S C, Laske G, et al. Mantle P-wave velocity structure beneath the Hawaiian hotspot. [Earth Planet Sci Lett](#), 2011, 303: 267–280
- 52 Rhodes E, Burchardt S, Greiner S H M, et al. Volcanic unrest as seen from the magmatic source: reyðarártindur pluton, Iceland. [Sci Rep](#), 2024, 14: 962
- 53 Toyokuni G, Zhao D. Whole-mantle tomography beneath eastern Mediterranean and adjacent regions. [Geophys J Int](#), 2025, 241: 1155–1172
- 54 Hoggard M J, Winterbourne J, Czarnota K, et al. Oceanic residual depth measurements, the plate cooling model, and global dynamic topography. [J Geophys Res Solid Earth](#), 2017, 122: 2328–2372

Summary for “阿曼东部‘幽灵’地幔柱诱发的板内微震活动”

Micro-earthquake activities induced by a “ghost” plume in Eastern Oman

Hao Hu^{1,2,3}, Xing Xu^{1,3*}, Xiongwei Niu^{2*}, Aiguo Ruan², Zhiteng Yu², Xiaodong Wei², Anxia Chen^{1,3} & Simone Pilia⁴

¹ Advanced Research Institute of Applied Geology and Geophysics, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China

² State Key Laboratory of Submarine Geoscience, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

³ College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China

⁴ College of Petroleum Engineering and Geosciences, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia

* Corresponding authors, E-mail: xuxing@zuwe.edu.cn; xwniu@sio.org.cn

Over the past few decades, mantle plume studies have significantly advanced our understanding of lithospheric deformation caused by plume upwelling, as well as the mechanisms, patterns, and features of intraplate hotspot volcanism and seismic activity. Recently, the concept of “ghost” mantle plumes was proposed after discovering the presence of the Dani plume beneath eastern Arabia using seismic travel-time tomography and other multidisciplinary evidence, representing a novel scientific discovery that warrants further research to enrich our understanding. The “ghost” plume is concealed beneath the lithosphere, lacking the typical surface intraplate volcanism that characterizes mantle plumes. Their behavioral mechanisms are not yet well understood, and the interaction between the plume and the plate caused by the “ghost” mantle plume is a key scientific issue.

This study investigates seismic activity in eastern Arabia using three-component continuous-waveform data recorded by 107 broadband seismometers deployed across Oman and the UAE, aiming to reveal the effect of the Dani plume on lithospheric deformation. The data processing workflow involved the following: (1) a deep learning-based PhaseNet package was applied to pick a large number of arrival times of micro-earthquake phases from the continuous three-component waveforms. These phases were then associated using the GaMMa program, which is based on a Gaussian mixture model; (2) travel times from arrival time association were used for micro-earthquake locations using NonLinLoc, and 724 micro-earthquake events were obtained after inversion; (3) finally, 283 high-quality micro-earthquakes were obtained after relocation by utilizing GrowClust.

The spatial distribution of microseismicities reveals two distinct clusters. The first group is located south of the Musandam Peninsula, possibly related to the boundary of the obducted Tethyan oceanic lithosphere and collisional extrusion. Above the tomographically inferred location of the Dani plume, we find a second cluster of seismicity, which we believe to be generated by plume-induced lithospheric uplift. The latter finding demonstrates that although the “ghost” mantle plume is concealed beneath the continental lithosphere and leaves no volcanic record on the surface, its hot upwelling mantle flow can still deform the lithosphere and produce intraplate microseismicity.

“ghost” plumes, lithosphere deformation, microseismicity, deep learning, earthquake location

doi: [10.1360/CSB-2026-0057](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0057)