



张明辉,武振波,马立雪,等.2020.短周期密集台阵被动源地震探测技术研究进展.地球物理学进展,35(2):0495-0511,doi:10.6038/pg2020EE0022.

ZHANG Ming-hui, WU Zhen-bo, MA Li-xue, et al. 2020. Research progress of passive source detection technology based on short-period dense seismic array. Progress in Geophysics (in Chinese), 35(2):0495-0511, doi:10.6038/pg2020EE0022.

短周期密集台阵被动源地震探测技术研究进展 Research progress of passive source detection technology based on short-period dense seismic array

张明辉¹,武振波²,马立雪^{3,4},郑凡^{3,4},解桐桐^{3,4},郑孟杰^{3,4},侯爵^{3,4,5},刘有山³,张永谦⁶,徐涛^{3,7},白志明³ ZHANG Ming-hui¹, WU Zhen-bo², MA Li-xue^{3,4}, ZHENG Fan^{3,4}, XIE Tong-tong^{3,4}, ZHENG Meng-jie^{3,4}, HOU Jue^{3,4,5}, LIU You-shan³, ZHANG Yong-qian⁶, XU Tao^{3,7}, BAI Zhi-ming³

- 1. 滨州学院,信息工程学院,滨州 256600
- 2. 成都理工大学,地球物理学院,成都 610059
- 3. 中国科学院地质与地球物理研究所,岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029
- 4. 中国科学院大学,北京 100049
- 5. 中国地震局地球物理研究所,北京 100081
- 6. 中国地质科学院,北京 100037
- 7. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心,北京 100101
- 1. Institute of Information Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, China
- 2. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
- 3. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China
- 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
- 5. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China
- 6. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
- 7. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Science, Beijing 100101, China

摘 要 近十年来,短周期密集台阵被动源探测技术日益成长 为国内外深部结构探测领域的一项重要手段.该技术相较于传 统宽频带地震探测具有高分辨、省时省钱、绿色环保等优点.尽 管低频信号不足,对岩石圈地幔以深结构探测能力有限,但密 集的台站间距使得地壳精细结构成像成为可能;台阵下方不同 方位射线形成密集的交叉覆盖,从而可通过反演和叠加偏移等 手段获取稳定的壳幔结构图像.因此,短周期密集台阵探测技 术已广泛应用于深部速度和界面结构成像,以及矿产资源勘 查、火山活动监测、微震精定位、发震断层的几何学和运动学特 征研究等多种不同领域.本文系统的总结了短周期密集台阵在 地壳结构研究和微震定位检测等方面的研究进展.展望未来, 以科学问题为导向,利用天然地震及背景噪声观测、重力测量、 InSAR 数据、GPS 测量等多种地球物理数据,开展联合反演和 成像,并提取研究对象的多属性特征正日益成为减少解的非唯 一性、揭示地质体真实赋存状态的有效途径;该领域方法技术 的迅速提升有望大大促进地震学及地球动力学研究,在深部结 构成像、矿产资源勘查等领域具有广阔应用前景.

Abstract In the past decade, the passive source detection technology based on short period dense array has increasingly become a domestic and international significant tool in the field of deep structure exploration. Compared with the traditional broadband seismic method, this technology has the advantages of high resolution, time and money saving, and environment protection. Despite the low-frequency signal is too weak to detect the deep structure of the lithospheric mantle the dense station distribution makes it possible to image the fine structure of the crust. Furthermore, take advantage of the dense ray crossing coverage from different directions beneath the array, the stable image of crust-mantle structure can be imaged by inversion and stack migration. Therefore, the short period dense array detection technology has been widely used in different fields, such as imaging of deep velocity and interface structure, mineral resources exploration, volcanic activity monitoring, microseismic high-precision positioning, and geometry and kinematic characteristics discussion of seismogenic faults. The paper systematically summarizes the research progress of short period dense array in the field of imaging study on crustal structure and microseismic location monitoring. Looking into to the future and guided by scientific questions, joint inversion and imaging could be carried out using a variety of geophysical data such as natural earthquake, ambient noise, gravity, InSAR, GPS and magnetotelluric measurements so as to, acquire the multi-attribute characteristics of the interested targets, and this method is increasingly developing to an effective way to reduce the non uniqueness of solutions and reveal the real

投稿网址 http://www.progeophys.cn

收稿日期 2019-12-12; 修回日期 2020-03-13.

基金项目 国家重点研发计划"深地资源开采"重点专项(2016YFC0600101, 2016YFC0600302, 2017YFC0601201)、国家自然科学基金 (41674064, 41704042, 41804060, 41874065, 41774097)和滨州学院博士基金(2018Y15)联合资助.

第一作者简介 张明辉, 女, 1990 年生, 讲师, 主要从事地震学研究. E-mail: zmhjoy@163. com

关键词 短周期密集台阵;地壳精细结构;断裂带;微震定位 检测	state of geological bodies. The rapid development of the detection methods in this area is expected to greatly promote the research of seismology and geodynamics, and has a broad application prospect
中图分类号 P315 文献标识码 A doi:10.6038/pg2020EE0022	in the fields of deep structure imaging and mineral resources exploration. Keywords Short period dense array; Crustal fine structure; Fault belt; Microseismic location monitoring

0 引 言

地震学是研究地球内部介质物理性质和地下结构,尤其 是深部结构不可或缺的技术手段(Mooney, 1989; Christensen and Mooney, 1995; 滕吉文等, 2004; 张明辉等, 2019). 从震 源角度划分,地震学探测主要分为主动源(人工源)探测和 被动源(天然源)探测.主动源探测方法主要采用人工爆破、 气枪激发等产生震源信号,具有震源位置和发震时刻已知、 激发能量可控等优点,利用相对高频的地震信号(主频几赫 兹到几百赫兹)和具有密集台阵、密集炮点的观测手段形成 对地下异常体的密集采样,以获得地壳精细结构(Prodehl and Mooney, 2012; Teng et al., 2013; 张忠杰等, 2013), 尤 其在石油勘探领域的应用非常广泛. 但主动源方法震源能量 较小,对岩石圈尺度成像能力有限.相比之下,被动源探测方 法成本较低,利用的是天然源地震,震源能量大,可探测壳幔 结构的深度较大,因而在地震深部探测领域应用广泛,是最 主要的方法之一(Nolet, 2008;艾印双等, 2013). 同时该方 法也存在不可忽视的缺陷:固定地震台站大多分布于陆内, 远震事件(震中距≥10°)由于传播路径远,震源产生的高频 信号会随着波场在地球介质中的传播而逐渐衰减,到达台站 时仅保留中低频成分.因此传统的被动源地震观测系统,无 论是固定台网或流动台阵,一般台间距较大(10~40 km),往 往导致对复杂地区结构成像的分辨较差,限制了能够探测的 异常体尺度和精细度.

近十年来,随着便携式一体化短周期地震仪的发展和完 善,短周期密集台阵被动源探测技术逐渐成为探测地球精细 结构的重要手段(Lin et al., 2013; Schmandt and Clayton, 2013; Nakata et al., 2015; Chang et al., 2016; Liu et al., 2017a, b; Bao et al., 2018; Wang et al., 2018; Wei et al., 2018; Mordret et al., 2019). 该技术以天然源地震信号(远 震或者区域地震)、环境噪声或其他能够被地震仪记到的力 源(如高铁振动)为信号源,利用密集布设的短周期地震仪 开展地震观测.根据探测目标的不同,台间距通常为几米至 几公里.由于台阵密集,相较于传统宽频带地震探测方法,可 以在短期内记录到累计较多的(远震)地震事件(典型工作 周期1~2月),因此野外工作具有省时省钱的低成本优点. 由于台间距密集,可以充分发挥基于密集台阵的地震学研究 手段的优势,比如波形反演和偏移成像等技术,从而提高对 地壳浅层目标异常体的探测精度(Gao and Shen, 2012, 2014; Chen et al., 2014),也可以探测地表断裂的深部形态、 隐伏断裂的深部走向等结构信息(Lewis et al., 2007; Zhao et al., 2010; Schmandt and Clayton, 2013; Allam et al., 2014; Ben-Zion et al., 2015; Bao et al., 2018; Share and Ben-Zion, 2018).

近几年,国内外开展了大量的密集台阵布设及研究工 作. 2011 年 Long Beach 密集台阵,在7 km × 10 km 范围内,布 设了 5200 个单分量传感器,台间距 120 m 左右;利用密集台 阵数据,开展了地震活动性的监测和定位(Inbal et al., 2015, 2016; Li et al., 2018a)及纽波特—英格尔伍德 (Newport-Inglewood)断裂带高精度结构成像等工作(Lin et al., 2013; Schmandt and Clayton, 2013; Bowden et al., 2015; Nakata et al., 2015; Chang et al., 2016). 2014年, 南 加利福尼亚地区布设了1108 个垂直检波器的密集 Nodal 台 阵,开展了圣哈辛托(San Jacinto)断裂带精细结构探测(Ben-Zion et al., 2015; Hillers et al., 2016; Roux et al., 2016; Qiu et al., 2017, 2018; Meng and Ben-Zion, 2018; Mordret et al., 2019). 圣海伦斯(St. Helens) 火山附近布设的由 905 个 检波器组成的密集台阵成功监测了火山区微震事件(Hansen and Schmandt, 2015).同时,国内也开展了大量的密集台阵 布设工作,包括五大连池台阵(Li et al., 2016b)、若尔盖台 阵(Liu et al., 2017b)、唐山台阵(Li et al., 2018b)、"地学长 江计划"实验台阵(Wei et al., 2018)、三江成矿带台阵(张 路等, 2020)和胶东台阵(俞贵平等, 2020)等, 获得了一系列 的地壳结构研究成果.

本文主要介绍短周期密集台阵技术的研究现状,包括在 地壳结构成像和震源定位检测等方面研究进展,并简要展望 其应用前景.

1 研究现状

利用短周期密集台阵开展的地震学研究,近年来取得较 大发展,主要集中表现在地壳结构研究和微震定位检测等方 面的研究.

1.1 密集台阵地壳结构研究

体波成像和面波成像是探测地球内部结构的基本方法, 本文将从这两方面来介绍地壳结构研究进展.

1.1.1 地震体波成像

(1)速度结构成像

速度结构成像主要用于地壳浅部结构探测,主要包括断 裂带深部形态与特征分布研究等.

①首波成像

对于存在岩石物性差异的缝合带或低速断裂带和高速 围岩之间的边界上,当地震波的入射角达到临界角时,在地 震波速度较低一侧的台站会记录到先直达 P 波到达的折射 波,称为断裂带首波(图1,Ben-Zion and Malin, 1991).该波 会从波速较快一侧地层折射到较慢一侧,从而穿过整个断裂 带,因此断裂带首波携带了断裂带及附近介质丰富的结构信



Fast velocity block Slow velocity block

- 图 1 断裂带首波和直达波第二到时波传播示意图 (Bennington *et al.*, 2013)
- Fig. 1 A cartoon demonstrating the FZHW (fault zone head wave) and DWSAs(direct wave secondary arrivals) propagation paths (Bennington et al., 2013)



- 图 2 直达波和断裂带反射的 P 波、S 波(a) 及断裂带的 绕射波(b)示意图(Yang, 2015)
- Fig. 2 Schematic plots for the direct and Fault Zone (FZ)reflected P and S waves (a) and FZ-diffracted body waves (b) (Yang, 2015)



图 3 拾取的 P 回折波到时(Nakata et al., 2015) Fig. 3 The picked arrival times of P diving waves (Nakata et al., 2015)





图 5 流动宽频带台阵(a)与短周期密集 台阵(b)探测目标差异

Fig. 5 Comparison of portable broadband seismic array (a) and short-period seismic dense array (b)



图 6 地壳结构的接收函数成像结果(a)和 动力学卡通图(b)(Liu *et al.*, 2017b) Fig. 6 The Receiver function image of crustal structure (a)

Fig. 6 The Receiver function image of crustal structure (a and cartoon of dynamics (b) (Liu *et al.*, 2017b) 息,可用于分析和研究断裂带及附近区域的精细结构,提高 对地震孕育和发生机理的认识(Lewis et al., 2007; Zhao et al., 2010; Allam et al., 2014; Share and Ben-Zion, 2018). 断裂带首波具有长周期、低振幅的特点,与直达 P 波极性相 反,通常用断裂带首波和直达 P 波的走时差异获取高精度的 断层表面速度信息(Hough et al., 1994; Zhao and Peng, 2008; Bulut et al., 2012; Bennington et al., 2013; Li and Peng, 2016; Najdahmadi et al., 2016; Share et al., 2017, 2019;徐涛等,2014a,b,2015).除了对波形的直接观测外,还 可以利用偏振分析来识别首波(Allam et al., 2014).正确地 认识和分析断层带首波,可以弄清楚断裂带两侧介质物性的 差异、改善精细速度结构的分辨能力,进而推动对地震的孕 育和断裂机制的研究.

②反射/直达波成像

断裂带通常呈现地震波低速异常特征,利用直达 P 波和 S 波的走时差异,并考虑断裂带直达波与反射 P 波和 S 波的 时间差异(Yang et al., 2014; Yang, 2015; 图 2a),可以利用 射线理论追踪在断裂带内传播且在其边界多次反射的地震 射线,获取断裂带低速区深度和宽度等.另外,如果有从断裂 带底部发育有折射的面波,利用体波和面波可以很好地约束 断裂带深度(图 2b).

③噪声干涉法

噪声干涉法是一种互相关分析方法(Schuster, 2009), 利用背景噪声干涉进行无源成像,可以重构经验格林函数, 由于环境噪声场主要受控于面波能量,所以利用噪声干涉法 提取面波更容易.但是,由于体波具有更高的频率,考虑体波 成分可以提高地下结构成像的分辨率(Nakata *et al.*, 2015).

Nakata 等(2015)通过计算两接收台站在频域的频率归 一化互相关(互相关分析),利用噪声干涉法提取了体波.为 了能从每个接收器对上提取体波,以成像地下结构的空间非 均匀性,Nakata 等(2015)在相关后使用了基于每个相关函数 及叠加函数之间相似性的选择滤波器和噪声抑制滤波器,在 每个虚拟源计算体波走时(图3),然后利用走时层析成像方 法获得了速度结构(图4).

(2)构造界面成像

①接收函数成像

接收函数基于等效震源和水平层状地球模型假设,通过 垂向分量和水平分量反褶积移除远震记录中的震源效应、传 播路径效应和仪器效应,从而剥离出台站下方的介质响应. 其主要信息为人射波在台站下方速度间断面产生的转换波 及其多次波,可以综合约束平均地壳厚度和纵横波速度比, 进一步估计地壳平均泊松比,是研究壳幔构造界面结构的重 要手段(Kind et al., 2002; Tian et al., 2005; 李永华等, 2006; Ai et al., 2007; Chen and Ai, 2009; 武振波等,2016; Duan et al., 2017; Si et al., 2017; Wu et al., 2017, 2018).

流动宽频带台阵观测方法,一般利用有限的地震仪(约 几十台)观测1~2年的时间,通过记录大量的地震事件对上 地幔的物性结构和界面结构进行成像,台间距一般为10~ 20 km(表1).然而,这样的台间距的接收函数成像中,经过 叠加、平滑等处理的接收函数图像的横向分辨尺度往往大于 10 km(图5a),对复杂地下结构分辨能力不足,难以揭示更 精细的地壳结构特征.与宽频带地震仪相比,利用短周期地 震仪在研究区开展密集布设(一般为几百台,台间距能达到 几十至几百米),观测较短时间(1~2月)即可采集获得几十 个典型远震事件(表1),其射线在地壳上地幔顶部内即形成 密集的交叉覆盖(图5b),横向分辨率达到1~2 km,接收函 数叠加成像结果能揭示地壳精细结构(Liu et al., 2017b; 俞 贵平等,2020; 张路等, 2020).

表1 宽频带流动台阵与短周期密集台阵观测对比 Table 1 Observation comparison between wide-band mobile array and short period dense array

	宽频带台阵	短周期台阵
台间距	10~20 km	几十~几百米
观测时间	1~2年	1~2月
地震仪数量	几十台	几百台
研究范围	地壳/上地幔	地壳

Liu 等(2017b)利用 2015 年 7 月 20 日至 2015 年 8 月 24 日期间组织实施的长约 160 km,台间距约 500 m 的短周期密 集台阵观测剖面数据,通过接收函数偏移成像方法,探测了 青藏高原东北缘若尔盖盆地与西秦岭之间的精细地壳结构 (图 6a),并探讨了东北缘的高原扩展和抬升的动力学机制 (图 6b),认为主要受控于大型走滑断层,而不是地壳流横向 流动的结果.

②谱比法波阻抗成像

近十几年,基于环境噪声记录的成像方法由于其低成本、高效率和有效性,已经被广泛应用于活动断层成像、盆地调查、地热资源勘探等浅层地壳速度结构研究中(Picozzi et al.,2009; 王伟君等,2009,2011; Agostini et al.,2015; Li, et al.,2016b;张宝龙等,2016; Civico et al.,2017; Bao et al.,2018). H/V频谱法利用单台噪声记录的水平分量频谱和垂直分量频谱比来评估场地的卓越频率和放大系数(场地效应),能提取沉积层和基底之间强烈地震波阻抗的频率响应.该方法不仅能反演浅层剪切波速度结构,通过频率-深度转换,其曲线可直接对连续地震波阻抗的深度进行成像(Nakamura,2000; Arai and Tokimatsu,2004; 王伟君等,2009,2011; Bao et al.,2018).

基于密集台阵观测系统, Bao 等(2018)利用 H/V 谱比 法对唐山断裂带的第四纪沉积的二维构造进行了成像(图 7).结果表明在约100 m 和300~800 m 深度分别显示出两 个明显的地震阻抗界面(图7b),断裂带正下方第四纪沉积 基底深度的快速变化(约200 m)与深地震反射剖面揭示的 断裂空间特征相吻合(图7c),表明唐山断裂带自第四纪以 来就受到强烈地震活动的破坏和改造.

相比于测井方法和地震主动源探测方法,基于密集台阵 观测的谱比法波阻抗成像原理简单,操作方便,是一种有效、 低成本的浅层沉积活动断裂研究方法.但是,在成像过程中, 频率-深度转换会受横波平均速度的影响,其横向分辨率也 受限于台间距(Bao et al., 2018).



图 7 (a) HVSR 曲线剖面;(b) 理论 HVSR 伪深度剖面;(c) 用深地震反射剖面对比计算的伪深度剖面; (d) 剖面(c)中的位置与构造图(d)中红框位置相对应(Bao *et al.*, 2018)

Fig. 7 (a) The calculated HVSR curve profile; (b) The theoretical HVSR pseudo-depth profile; (c, d) Comparing calculated pseudo-depth profile with depth seismic reflection profiling and the distribution in Fig. 4c corresponds roughly to the red dotted box in Fig. 4d(Bao et al., 2018)

1.1.2 地震面波成像

面波沿地球表面传播,对地壳上地幔横波速度结构敏 感,常用于地壳上地幔S波速度层析成像.近年来,随着密集 台阵的布设,利用面波信号恢复地壳结构成为可能.短周期 面波信号通常从地震事件或背景噪声互相关中提取.由于短 周期仪器频带较窄,主要用于地壳结构成像.

短周期台阵的地震面波成像研究包括传统两步法成像 (Yao et al., 2011),以及近些年发展的基于射线追踪的一步

法成像(Lin et al. 2013; Bowden et al., 2015; Fang et al., 2015; Chang et al., 2016; Li et al., 2016a, b)、面波程函成像(Lin et al., 2009, 2013)、聚束分析成像(Roux et al., 2016)和面波波形反演(Chen et al., 2014; Gao and Shen, 2014)等.

(1)传统两步法成像

背景噪声成像是近年来发展的一种被动源成像技术,通 过背景噪声的互相关提取台站间的经验格林函数,继而提取



图 8 五大连池地区密集台阵分布示意图(Li et al., 2016b) Fig. 8 Location of the dense seismic array in Wudalianchi Volcano Field (Li et al., 2016b)



图 9 五大连池地区浅层地壳 S 波速度结构(Li et al., 2016b)

Fig. 9 The shallow crustal velocity structure of the shear wave in Wudalianchi Volcano Field (Li et al., 2016b)

频散曲线,并进行面波成像研究(Yao et al., 2011; Lin et al. 2013; Bowden et al., 2015; Chang et al., 2016; Li et al., 2016). 该方法一般分为两步,即传统的"两步法":纯路径 网格频散反演和深部 S 波速度结构反演,即假设面波沿地球 大圆路径传播,每个网格单元当作是横向均匀的,先得到每

个网格单元上的纯路径频散曲线,然后,通过迭代求取观测 频散曲线和理论频散曲线在最小二乘意义下的最小残差解, 反演地球深部结构.与基于地震事件的层析成像相比,其依 赖的背景噪声源广泛、持续的存在于地表,不受时间和空间 的限制.



图 10 田厌迷推进法追踪得到的别线确任(Fang et al., 2013) (a) 0.8 s; (b) 1.4 s; (c) 2.0 s; (d) 2.6 s. Fig. 10 The ray paths obtained by the fast marching method(Fang et al., 2015)

利用二维阵列分布的密集台阵,通过噪声互相关,可以 提取(Rayleigh)面波信息用来反演区域地壳尺度的三维S波 速度结构,如高频(如大于0.5 Hz)环境噪声互相关(ANCC) 可以被用来反演高分辨率的地壳结构(Lin et al. 2013; Bowden et al., 2015; Chang et al., 2016; Li et al., 2016b; 王娟娟等,2018).图8是五大连池附近的密集台阵观测,通 过噪声互相关技术反演得到的浅层三维地壳速度结构(图 9)(Li et al., 2016b).结果显示在五大连池火山下7~13 km 深度处存在高达10%的显著低速异常,这与大地电磁测量 中明显的高电导率异常结果是一致的.这表明了基于短周期 密集台阵观测的面波成像方法有效性.

(2)基于射线追踪的一步法成像

传统的面波信号以及噪声提取的面波信号,传播路径均 基于大圆路径弧.沿地表传播的面波,对浅部的横波速度结 构很敏感,大圆路径弧的假设在浅层复杂介质中不成立.此 外,传统反演方法在反演过程中一般不更新敏感核和射线路 径,这在局部区域浅层地壳结构反演时,对于地壳速度结构 变化较大的区域可能会带来较大的偏差(罗松等,2019; Luo et al., 2019).

面波直接反演方法是通过直接反演混合路径 Rayleigh 波相速度频散数据获得三维横波速度结构的方法(Fang et al., 2015; Li et al., 2016a).该方法通过给定三维初始 S 波

速度模型,利用快速推进法(Rawlinson and Sambridge, 2004) 追踪两点间的射线路径(图 10),将每个网格节点下方看做 一维模型,利用射线路径计算两点间的频散曲线,并和实际 的频散曲线对比,利用基于波形的稀疏约束反演方法(a wavelet-based sparsity-constrained tomographic method)直接反 演三维S波速度结构(Fang *et al.*, 2015),反演结果与传统 噪声成像方法较为一致(图 11).

相比于传统反演方法,面波直接反演方法避免了相速度 图或群速度图反演的中间步骤,直接利用程函方程有限差分 走时计算射线路径,并不断迭代更新其敏感核矩阵和不同周 期的射线路径,考虑了复杂介质中射线弯曲对表面波层析成 像的影响,因此该方法能逼近真实情况,更适用于不满足大 圆弧路径假设的浅层复杂区域,适用于较短周期高精度反 演.相比较于面波波形反演的巨大计算量,该方法兼顾精度 与效率.

(3) 面波程函成像(Eikonal tomography)

随着短周期密集台阵布设成本的降低,更密集的台阵分 布,更高频率的信号用来反演高分辨率浅层地壳结构.背景 噪声成像中,互相关的计算是一种典型的数据密集型计算, 比如,对于 N 个台站,需要求解 N×(N-1)/2 个台站对的互 相关函数,同时,为了提高信噪比,一般还需要对长时间连续 记录的互相关函数进行叠加,因此,整个台阵间的互相关函



图 11 传统噪声成像反演与直接反演在 0.8 s、2.0 s的成像结果对比(Fang et al., 2015) (a)传统噪声成像反演在 0.8 s时的结果;(b)直接反演在 0.8 s时的结果;(c)传统噪声成像反演在 2.0 s时的结果;(d)直接反演在 2.0 s时的结果.

Fig. 11 Comparison of phase velocity maps at 0.8 s and 2.0 s between the traditional ambient tomography inversion and direct inversion methods (Fang *et al.*, 2015)

(a) 0.8 s of traditional ambient tomogrpahy inversion; (b) 0.8 s of direct inversion; (c) 2.0 s of traditional ambient

tomography inversion; (d) 2.0 s of direct inversion.

数所需的计算量与台站数量 N 和观测时间是呈正比的,尤其 是对于具有上百台,甚至上千台地震仪的密集观测台阵,计 算量相当巨大(李娜等,2018).因此,在短周期密集台阵观测 中,直接利用频散曲线的面波走时信息进行成像对传统计算 模式是一种极大的挑战.再者,传统的地震面波及环境噪声 提取的面波成像方法,均假定面波沿大圆路径传播,而忽略 了复杂介质引起传播路径弯曲对成像结果造成的影响.

Lin 等(2009, 2013)提出了基于程函方程的面波成像方 法,该方法基于密集台阵记录的面波信号,通过程函方程进 行波前相位的局部追踪,重建面波不同周期的空间走时场, 应用程函方程计算各周期走时场的空间梯度,用不同方位角 相速度的平均计算直接获得对应周期空间慢度场的分布,同 时台站内的波形幅度变化可用来诊断实际面波波形与平面 波模型的偏离.该方法无须提取面波频散,考虑了偏离大圆 路径的传播效应,而且克服了常规面波相速度反演过程中的 非唯一性和不确定性,尤其适合超高密度分布的短周期台 阵,计算高效. 2011 年,美国加州 Long Beach 地区布设了高密度分布 的短周期台阵(Lin *et al.*, 2013; Schmandt and Clayton 2013).在7~10 km 的范围内,布设了超过 5200 个高频 (10 Hz)地震阵列,台间距约 120 m. 通过噪声面波程函成 像,可以清晰的观察到0.5~4 Hz 的基阶 Rayleigh 面波,对应 1 km 深度以浅的地壳结构(Lin *et al.* 2013),发现北西-南东 向延伸的 Newport-Inglewood 断裂系呈现高速异常特征 (图 12).

哥伦比亚大学 Jin 和 Gaherty(2015)基于这两种方法,研 发出一套基于密集台阵自动获取面波相速度的程序-ASWMS (Automated Surface Wave Phase Velocity Measuring System), 应用这种基于程函方程的面波成像方法,获得了整个美国大 陆高分辨率的相速度分布图像.该方法将之前步骤系统自动 化,极大地推进了研究进程.但是,面波程函方法在高频计算 中省略了振幅项,所以研究区内的速度变化不能太剧烈,且 在台站比较均匀密集的区域可获得与台站间距相当的分辨 率(Lin *et al.*, 2009, 2013; Lin and Ritzwoller, 2011;





(a) 台站的1 Hz Rayleigh 面波震相走时;(b) 用最小曲率拟合法导出(a)的相位走时;(c) 基于程函方程从(b)中得到的相速度图.
 Fig. 12 A demonstration of eikonal tomography (Lin *et al.*, 2013)

(a) The 1-Hz Rayleigh wave phase traveltime; (b) The phase traveltime map derived from (a) using the minimum curvature fitting method; (c) The phase velocity map derived from (b) based on the eikonal equation.



图 13 聚束分析成像示意图(Roux et al., 2016) Fig. 13 Diagram of beamforming analysis tomography(Roux et al., 2016)



图 14 面波伴随成像拟合格林函数波形示意图(Chen et al., 2014) Fig. 14 Green's function waveform fitting by surface wave adjoint tomography (Chen et al., 2014)

Gouédard et al., 2012; Zhou et al., 2012).

(4)聚束分析成像(Beamforming Analysis Tomography)

传统的背景噪声成像计算互相关提取准确的格林函数 需要噪声源的方位分布尽可能均匀(Snieder, 2004),而现实 中,背景噪声源的分布具有明显的方位性,这样提取的格林 函数就会存在偏差.聚束分析(Beamforming)通过测量台阵 内不同台站记录的波形的相位相关性,可使信号与噪声分 离,提高信噪比,为相位追踪提供替代方案.该方法通过将整 个密集台阵分为若干个子台阵,并对任意一个子台阵内的每 个台站记录进行平面波校正及相位叠加,在慢度空间搜索并 计算聚束能量,聚束能量的极大值对应的速度即为整个子台 阵下方的面波慢度.

地震背景噪声信号的频率范围可以提供比地震事件更 高频的 Rayleigh 波信息,相对高频的信息通常更适于地壳范 围的浅层研究.因此基于背景噪声的聚束分析可以获得台阵 下方地壳尺度的精细结构. Roux 等(2016)将该方法用于以 1108 个垂直地震检波器为中心的高密度 Nodal 列阵记录的 连续波形数据中,利用 25 个传感器的子阵上的迭代双波聚 束和所有站对之间的互相关,从原始互相关数据中将表面波 和体波进行分离.图 13 是 2 ~4 Hz 的群速度反演结果,揭示 了研究区域圣哈辛托断裂带内部及周边结构特性的深度和 横向变化(Roux et al., 2016).

与传统层析成像方法相比,聚束分析成像不需要使用纯路径的反演(Roux et al., 2016),频散提取受台阵几何结构的影响较小,提取的相速度相对可靠;相对于程函成像,结果

更加光滑稳定.但该方法要求台站密集分布,且由于其假定 子台阵区域的波慢度相同而损失了横向分辨率,对长周期的 面波测量误差较大.

(5) 面波波形反演

传统的面波成像方法仅用到频散信息,没有利用振幅信息,很难利用高阶面波和散射面波信息(Yomogida and Aki, 1987)而获得更高分辨率的三维速度结构.近几十年,面波波形反演方法得到广泛推广,并取得了较好的应用效果(Zielhuis and Nolet, 1994;曹小林等,2001;Du, 2002;Zeng et al., 2011;Tran and McVay, 2012;Gao and Shen, 2012, 2014;Chen et al., 2014;Borisov et al., 2017;Groos et al., 2017;Liu et al., 2017a).和地震勘探领域的全波形反演不同,短周期密集台阵面波波形反演方法主要基于模拟和实测波形的互相关提取走时差,利用伴随状态法进行成像(Chen et al., 2014;Gao and Shen, 2012, 2014).

不同于射线理论成像,伴随成像方法利用波场正演方法 (如谱元法)来拟合干涉法提取的环境噪声面波经验格林函 数(EGFs)(Chen et al., 2014; Liu et al., 2017a).利用波形 互相关计算走时差将模拟记录和实际记录的差作为"伴随 源"反传,更新速度模型.与程函方程的面波成像方法 (Eikonal tomography)不同,伴随成像方法直接拟合经验格林 函数的波形相位(图 14),直接获得地壳的 S 波速度结构,无 需提取面波频散信息、面波频散反演相速度以及相速度反演 S 波速度结构等一系列环节,能够大大提高系列反演过程中 的非唯一性和不确定性,能提高成像的分辨率.



图 15 圣哈辛托断裂带区利用 1069 个检波器进行微震重定位(Ben-Zion et al., 2015)

(a)使用密集台阵(白色正方形)和断层轨迹(白色线条)的地图视图;(b) MFP 结果的三维视图;(c)和(d)分别是东向和北向的深度横截面. 黑色星号和白色星号分别表示事件的原始位置和重定位后的最佳位置估计.

Fig. 15 Example of locating the small event using data recorded by 1069 sensors of the Nodal array (Ben-Zion et al., 2015)
(a) Map view with the Nodal array stations used (white square) and fault traces (white lines); (b) A 3-D view of the MFP results;
(c) and (d) Depth cross-sections along the east (c) and north (d) directions. The black and white stars indicate, respectively, the original location and best location estimate using the technique.

1.2 密集台阵微震定位与检测

随着仪器技术的进步,在过去的几十年里,密集台阵观测技术能有效提高数据密度和信噪比,显著降低探测阈值,为研究地球结构和发震过程提供重要的地震资料.同时,密集的区域网络,也已越来越多地应用于提供高质量的微震定位(Ben-Zion et al., 2015; Inbal et al., 2015)、微震事件检测(Hansen and Schmandt, 2015; Inbal et al., 2015, 2016; Li et al., 2018a; Meng and Ben-Zion, 2018)及非常规震源的检测(Riahi and Gerstoft, 2015)等.

(1)微震定位

地震定位是地震学中最经典、最基本的问题之一,高精度的地震定位对于地震预报、工程地震及地下结构的成像研究等至关重要.密集台阵观测技术不仅可以用于微震事件的检测,还可以用于微震的定位(Ben-Zion *et al.*, 2015; Inbal

et al. , 2015).

Ben-Zion 等(2015)利用匹配场处理(缩写为 MFP, Kuperman and Turek, 1997; Cros *et al.*, 2011)实现了圣哈辛 托(San Jacinto)断裂带区微震事件的重定位,并利用线性 Bartlett 算子将 MFP 的相位延迟投影到 3D 网格上(图 15).

值得注意的是,地震定位的不确定性源于所用速度模型 的近似.因此,如果能得到区域详细精确的三维速度模型,能 提高定位的精度.

(2) 微震事件检测

随着地震观测技术的不断发展,利用密集台阵开展地震 检测研究受到广泛重视.而微震检测是揭示活动断层的主要 手段(Hansen and Schmandt, 2015; Inbal *et al.*, 2015).传统 的地震检测方法是通过人工从地震波形中识别震相来检测 地震,工作量繁重,且受人为因素影响较大.因此,地震震相



图 16 局部相似性、模板匹配和 STA/LTA 方法的检测性能的综合测试(Li *et al.*, 2018a) (a)合成检测流程图;(b)标度因子为1时4000个台站的信噪比柱状图;(c)局部相似性、模板匹配和 STA/LTA 的显著性水平与信噪比的关系. Fig. 16 Synthetic test of detection performance of local similarity, template matching, and STA/LTA (Li *et al.*, 2018a) (a)Flowchart of the synthetic test;(b) Histogram of SNR for 4000 stations when the scaling factor is 1;(c) Significance level versus SNR from local similarity, template matching and STA/LTA.

自动拾取和地震自动检测技术被提出,并不断发展.比较常用的方法包括短长时窗均值之比(Short Term Average to Long Term Average,简写为 STA/LTA)方法(Meng and Ben-Zion, 2018)、模板匹配方法(Peng and Zhao, 2009; Ross *et al.*, 2017; Meng and Ben-Zion, 2018)、局部相似性方法(Li *et al.*, 2018a)等.

STA/LTA 方法考虑每个台站的波形,确定一个滑动的 长时间窗,在该窗口内再取一个短时窗,利用短时窗内信号 的平均能量值与长时窗内的信号的平均能量值之比来检测 是否有新的地震事件触发(Meng and Ben-Zion, 2018).该方 法算法简单,计算速度快,但不适用于信噪比过低的信号.模 板检测方法利用现有的地震目录中记录到的地震事件作为 模板,与连续波形进行互相关,识别出与模板事件波形具有 较高相似度的地震事件,该方法在信噪比较低的情况下也能 有效地检测到大量小震事件(Peng and Zhao, 2009; Meng et al., 2013; Meng and Ben-Zion, 2018).局部相似法是指通过 测量相邻台站点上的波形相似性来区分信号和噪声,以此监 测低于噪声水平的地震事件(Li et al., 2018a).该方法只计 算两个最相邻的台站点上的波形相似性,不需要整个台网的 波形相似性. Li 等(2018a)利用长滩阵列记录的波形数据, 使用 SCSN 目录中的三个区域事件,分别用局部相似性、 STA/LTA 和模板匹配方法来显示三个事件(图 16),结果显 示局部相似性方法相比于其他两种更加的可靠.

(3)非常规震源检测

对于自然产生的震动(如地震)的研究对探测地下结构 具有重要的意义.对于非常规震源产生的噪声信号,如人为 噪声,通常具有较高的频率(>5 Hz),并且可能经常在相对 较小的距离处被散射和衰减.但是,随着低成本、独立地震传 感器的发展和普及,利用密集台阵观测技术进行非常规震源 的检测已引起关注(Wang *et al.*, 2014; Riahi and Gerstoft, 2015).

Riahi和 Gerstoft(2015)利用布设在美国加利福尼亚长 滩市由 5200 个传感器组成的密集台阵,对由交通产生的地 震能量进行了检测研究.在研究中,根据震动强度的时空结 构,可以测量地铁列车的时刻表,计算跑道统计数据和飞机 运动参数,甚至在夜间追踪高速公路上的大型车辆.因此,对 于这种非常规震源的检测和分析,可进一步用于实时交通 监控.

2 应用前景

短周期密集台阵技术克服了传统地震学基于天然源的 研究方法的限制,增强了台站密度、缩短观测周期,可以对浅 层进行高分辨成像,对地震发震位置和强度进行更精确的定 位.同时,对于地震、地壳运动等形变特征的认识,对深刻理 解断层运动方式、形变特征,分析地震发生机制有十分重要 的作用.但是单一的数据源对于结果的约束能力有限,如果 在地震研究中有效结合大地测量手段(重力数据、InSAS 数 据、GPS 数据)进行多数据约束,可以减少研究结果解释的非 唯一性,对提升研究结果的可靠性,进而研究断裂带等复杂 构造地区现今形变特征及对震源时空特征开展细致、全面、 深入的研究具有重要的意义.

(1) 重力方法

由于断裂带存在大量破裂,且破裂区内的液体会发生化 学反应,其密度要比围岩小(Wu et al., 1975; Aki and Lee, 1976).而布格重力异常是地壳内部不同密度岩体所表现的 重力值偏离正常重力值的异常响应,低速层的布格异常一般 为负,因此能直观反映地质体的形态分布及断裂构造的展布 等信息(王鑫等,2015).值得说的是,重力数据对海洋断裂带 的地质构造信息尤其有用,因为海洋断裂带的地震以及大地 测量的数据比较有限.然而,因重力数据结果的不确定性和 相对较低的分辨率,仅仅使用重力数据对低速层地质构造和 深度范围的确定来说仍然具有挑战性.所以,在地震学研究 中使用重力数据可以提高地下介质成像的精度.

(2) InSAR 数据

合成孔 径 雷达 干涉测量技术(InSAR, Interferometry Synthetic Aperture Radar)是一种对同一区域内两次或多次观 测的 SAR 复影像对进行相干处理以提取目标的地形或形变 信息的技术(Gabriel et al., 1989),可直接获取一定区域内 的连续地表形变场时空演化图像,在获取地面形变信息方面 具有独特的优势. InSAR 技术利用 InSAR 数据得出的震间应 力可以得到破裂地震带的地质构造信息,通过比较地震前后 地面形变也可获取断裂带低速层信息. 然而,利用 InSAR 数 据模拟断裂带深部构造需要考虑不确定性和断裂带参数的 相消平衡,而且 InSRA 获取的形变不是地表真实的形变,存 在视线向(LOS,Line of Sight)模糊的问题,由 InSAR 观测值 中很难分离出地表水平和垂直方向的形变量. 若能将 InSAR 数据与其他大地测量数据和地震数据结合,对于提升对断裂 带形变特征及孕震机制研究有重要的意义(Gudmundsson et al., 2002).

(3) GPS 数据

GPS 观测具有大范围、高精度、全天候和连续观测的特点,相比较于 InSAR 数据, GPS 所获取的是一系列离散观测站点在三维方向的运动变化.利用 GPS 数据并结合弹性半空间位错模型可以得到断裂带地质结构(孙云梅和李金平, 2017),而高频 GPS 可以记录震间应力和同震形变.将地震数据与 GPS 数据相结合,可以弥补 GPS 在空间分布上不连续的弱点,为断裂带构造成像提供更加可靠的支撑和约束.

3 结 论

(1)宽频带地震是探测岩石圈及地幔不同深浅尺度的 重要手段,但受限于台站间距大以及布设成本高,该方法难 以实现对复杂构造区(如断裂带)的高分辨地震探测.近十 年来,随着便携式一体化短周期地震仪的发展和完善,短周 期密集台阵成为探测地壳精细结构的重要方法.相比于传统 的宽频带地震探测,短周期密集台阵观测技术能实现密集甚 至超密集观测(台间距通常为几米至几公里),接收较短周 期信号,具有高分辨、低成本、观测周期短、绿色环保等优点. 密集台阵下方不同方位射线形成密集的交叉覆盖,使得该方 法对地壳精细结构成像成为可能,可通过反演、叠加成像等 手段获取稳定的地下结构图像特征.但受限于频带较窄,短 周期台阵主要用于地壳结构成像,对岩石圈及以深尺度探测 能力不足.

(2)基于短周期密集台阵观测的被动源地震探测不仅 为深部壳幔结构研究提供技术支撑,开展的体波成像和面波 成像可以有效提高对地壳浅层目标异常体的探测精度,获得 地表断裂的深部形态、隐伏断裂的深部走向等特征,为断裂 识别、发震断层的几何学和运动学特征研究等提供科学依 据.此外,密集台阵观测技术也越来越多地被应用于微震精 定位、微震事件监测及非常规震源的检测等,服务于油气勘 探、煤层开采、火山监测、发震过程等多个领域.

(3)地球物理学问题通常具有强烈多解性.单一的地震 学数据对结果的约束有限.因此,利用天然地震及背景噪声 观测、重力测量、InSAR数据、GPS测量等多种地球物理数 据,开展联合反演和成像,并提取研究对象的多属性特征可 以有效减少解的非唯一性,获得地质体在地下空间的真实赋 存状态.短周期密集台阵探测技术的发展有望促进地震学及 地球动力学研究,在深部结构成像和矿产资源勘查等领域展 现出广阔应用前景.

致 谢 感谢澳大利亚麦考瑞大学杨英杰教授的指导和帮助,感谢审稿专家的建设性意见!

References

- Agostini L, Boaga J, Galgaro A, et al. 2015. HVSR technique in nearsurface thermal-basin characterization: the example of the Caldiero district (North-East Italy) [J]. Environ. Earth Sci., 74 (2): 1199-1210.
- Ai Y S, Chen Q F, Zeng F, et al. 2007. The crust and upper mantle structure beneath southeastern China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 260(3-4): 549-563.
- Ai Y S, Wu Q J, Lei J S, et al. 2013. Seismological research methods of mantle structure[M].// Ed. Ding Z L, research methods of solid earth science (in Chinese), Beijing: Science Press, 381-401.
- Aki K, Lee W H K. 1976. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: 1. A homogeneous initial model [J]. Journal of Geophysical Research, 81(23): 4381-4399.
- Allam A A, Ben-Zion Y, Peng Z. 2014. Seismic imaging of a bimaterial interface along the Hayward fault, CA, with fault zone head waves and direct P arrivals[J]. Pure and Applied Geophysics, 171(11): 2993-3011.

- Arai H, Tokimatsu K. 2004. S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 94(1): 53-63.
- Bao F, Li Z W, Yuen D A, et al. 2018. Shallow structure of the Tangshan fault zone unveiled by dense seismic array and horizontalto-vertical spectral ratio method [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 281: 46-54.
- Bennington N L, Thurber C, Peng Z G, et al. 2013. Incorporating fault zone head wave and direct wave secondary arrival times into seismic tomography: Application at Parkfield, California [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(3): 1008-1014.
- Ben-Zion Y, Malin P. 1991. San Andreas Fault Zone Head Waves Near Parkfield, California [J]. Science, 251 (5001): 1592-1594.
- Ben-Zion Y, Vernon F L, Ozakin Y, et al. 2015. Basic data features and results from a spatially dense seismic array on the San Jacinto fault zone[J]. Geophys. J. Int., 202(1): 370-380.
- Borisov D, Modrak R, Gao F C, et al. 2017. 3D elastic full-waveform inversion of surface waves in the presence of irregular topography using an envelope-based misfit function [J]. Geophysics, 83(1); R1-R11.
- Bowden D C, Tsai V C, Lin F C. 2015. Site amplification, attenuation, and scattering from noise correlation amplitudes across a dense array in Long Beach, CA[J]. Geophys. Res. Lett., 42(5): 1360-1367.
- Bulut F, Ben-Zion Y, Bohnhoff M. 2012. Evidence for a bimaterial interface along the Mudurnu Segment of the North Anatolian fault zone from polarization analysis of P waves [J]. Earth and Planetary Science Letters, 327-328: 17-22.
- Cao X L, Zhu J S, Zhao L F, et al. 2001. Three dimensional shear wave velocity structure of crust and upper mantle in South China sea and its adjacent regions by surface waveform inversion [J]. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 23(2): 113-124.
- Chang J P, de Ridder S A L, Biondi B L. 2016. High-frequency Rayleigh-wave tomography using traffic noise from Long Beach, California[J]. Geophysics, 81(2): B43-B53.
- Chen L, Ai Y S. 2009. Discontinuity structure of the mantle transition zone beneath the North China Craton from receiver function migration [J]. Journal of Geophysical Research, 114(B6): 69-80.
- Chen M, Huang H, Yao H J, et al. 2014. Low wave speed zones in the crust beneath SE Tibet revealed by ambient noise adjoint tomography [J]. Geophys. Res. Lett., 41 (2): 334-340, doi: 10.1002/ 2013GL058476.
- Christensen N I, Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view [J]. J. Geophys. Res., 100(B6): 9761-9788.
- Civico R, Sapia V, Giulio D, et al. 2017. Geometry and evolution of a fault-controlled quaternary basin by means of TDEM and singlestation ambient vibration surveys: the example of the 2009 L'Aquila earthquake area, central Italy[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(3): 2236-2259.
- Cros E, Roux P, Vandemeulebrouck J, et al. 2011. Locating hydrothermal acoustic sources at Old Faithful Geyser using matched field processing[J]. Geophys. J. Int., 187(1): 385-393.
- Du Z J. 2002. Waveform inversion for lateral heterogeneities using multimode surface waves [J]. Geophysical Journal International, 149(2): 300-312.
- Duan Y H, Tian X B, Liang X F, et al. 2017. Subduction of the Indian slab into the mantle transition zone revealed by receiver functions [J]. Tectonophysics, 702: 61-69.
- Fang H J, Yao H J, Zhang H J, et al. 2015. Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: methodology and application [J]. Geophysical Journal International, 201(3): 1251-1263.
- Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94 (B7):

9183-9191.

- Gao H Y, Shen Y. 2012. Validation of shear-wave velocity models of the Pacific Northwest [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 102(6): 2611-2621.
- Gao H Y, Shen Y. 2014. Upper mantle structure of the Cascades from full-wave ambient noise tomography: Evidence for 3D mantle upwelling in the back-arc[J]. Earth and Planetary Science Letters, 390: 222-233.
- Gouédard P, Yao H J, Ernst F, et al. 2012. Surface wave eikonal tomography in heterogeneous media using exploration data [J]. Geophysical Journal International, 191(2): 781-788.
- Groos L, Schäfer M, Forbriger T, et al. 2017. Application of a complete workflow for 2D elastic full-waveform inversion to recorded shallowseismic Rayleigh waves[J]. Geophysics, 82(2): R109-R117.
- Gudmundsson S, Sigmundsson F, Carstensen J M. 2002. Threedimensional surface motion maps estimated from combined interferometric synthetic aperture radar and GPS data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107 (B10): ETG 13-1-ETC 13-14.
- Hansen S M, Schmandt B. 2015. Automated detection and location of microseismicity at Mount St. Helens with a large-N geophone array [J]. Geophysical Research Letters, 42(18): 7390-7397.
- Hillers G, Roux P, Campillo M, et al. 2016. Focal spot imaging based on zero lag cross-correlation amplitude fields: Application to dense array data at the San Jacinto fault zone[J]. J. Geophys. Res. Solid Earth, 121(11): 8048-8067, doi: 10.1002/2016JB013014.
- Hough S E, Ben-Zion Y, Leary P. 1994. Fault-zone waves observed at the southern Joshua three earthquake rupture zone[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 84(3): 761-767.
- Inbal A, Ampuero J P, Clayton R W. 2016. Localized seismic deformation in the upper mantle revealed by dense seismic arrays [J]. Science, 354(6308): 88-92.
- Inbal A, Clayton R W, Ampuero J P. 2015. Imaging widespread seismicity at midlower crustal depths beneath Long Beach, CA, with a dense seismic array: Evidence for a depth-dependent earthquake size distribution[J]. Geophysical Research Letters, 42(15): 6314-6323.
- Jin G, Gaherty J B. 2015. Surface wave phase-velocity tomography based on multichannel cross-correlation[J]. Geophys. J. Int., 201(3): 1383-1398.
- Kind R, Yuan X, Saul J, et al. 2002. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: evidence for Eurasian plate subduction [J]. Science, 298(5596): 1219-1221.
- Kuperman W A, Turek G. 1997. Matched field acoustics [J]. Mech. Syst. Signal Pr., 11(1): 141-148.
- Lewis M A, Ben-Zion Y, Mcguire J J. 2007. Imaging the deep structure of the San Andreas fault south of Hollister with joint analysis of fault zone head and direct P arrivals [J]. Geophysical Journal International, 169(3): 1028-1042.
- Li C, Yao H J, Fang H J, et al. 2016a. 3D near-surface shear-wave velocity structure from ambient-noise tomography and borehole data in the Hefei urban area, China[J]. Seismological Research Letters, 87(4): 882-892.
- Li N, Wang W T, Wang B S. 2018. Speeding the Nine-component cross correlation function calculation using cloud-computing and its application on the dataset of China Array-NE Tibet[J]. Earthquake Research in China (in Chinese), 34(2): 244-257.
- Li Y H, Wu Q J, An Z H, et al. 2006. The Poisson ratio and crustal structure across the NE Tibetan Plateau determined from receiver functions[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49(5): 1359-1368, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.05.015.
- Li Z F, Peng Z G. 2016. Automatic identification of fault zone head waves and direct P waves and its application in the Parkfield section of the San Andreas fault, California [J]. Geophysical Journal International, 205(3): 1326-1341.
- Li Z F, Peng Z G, Hollis D, et al. 2018a. High-resolution seismic event

detection using local similarity for Large-N arrays [J]. Scientific Reports, 8: 1646, doi: 10.1038/s41598-018-19728-w.

- Li Z W, Ni S D, Roecker S, et al. 2018b. Seismic imaging of source region in the 1976 Ms 7.8 Tangshan earthquake sequence and its implications for the seismogenesis of intraplate earthquakes [J]. Bull. Seismo. Soc. Amer., 108(3A): 1302-1313.
- Li Z W, Ni S D, Zhang B L, et al. 2016b. Shallow magma chamber under the Wudalianchi volcanic field unveiled by seismic imaging with dense array[J]. Geophys. Res. Lett., 43(10): 4954-4961.
- Lin F C, Li D Z, Clayton R W, et al. 2013. High-resolution 3D shallow crustal structure in Long Beach, California: Application of ambient noise tomography on a dense seismic array [J]. Geophysics, 78 (4): Q45-Q56.
- Lin F C, Ritzwoller M H. 2011. Helmholtz surface wave tomography for isotropic and azimuthally anisotropic structure [J]. Geophysical Journal International, 186(3): 1104-1120.
- Lin F C, Ritzwoller M H, Snieder R. 2009. Eikonal tomography: surface wave tomography by phase-front tracking across a regional broadband seismic array[J]. Geophysical Journal International, 177(3): 1091-1110.
- Liu Y N, Niu F L, Chen M, et al. 2017a. 3-D crustal and uppermost mantle structure beneath NE China revealed by ambient noise adjoint tomography[J]. Earth and Planetary Science Letters, 461: 20-29.
- Liu Z, Tian X B, Gao R, et al. 2017b. New images of the crustal structure beneath eastern Tibet from a high-density seismic array [J]. Earth and Planetary Science Letters, 480: 33-41.
- Luo S, Yao H J, Li Q S, et al. 2019. High-resolution 3D crustal S-wave velocity structure of the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt and implications for its deep geodynamic setting [J]. Science China Earth Sciences (in Chinese), 49(9): 1394-1412.
- Meng H R, Ben-Zion Y. 2018. Detection of small earthquakes with dense array data: example from the San Jacinto fault zone, southern California[J]. Geophys. J. Int., 212(1): 442-457.
- Meng X F, Peng Z G, Hardebeck J L. 2013. Seismicity around Parkfield correlates with static shear stress changes following the 2003 M_w 6.5 San Simeon earthquake[J]. J. Geophys. Res., 118(7): 3576-3591.
- Mooney W D. 1989. Seismic methods for determining earthquake source parameters and lithospheric structure [M]. In Pakiser, L. C., and Mooney, W. D., editors, Geophysical Framework of the Continental United States, G. S. A. Memoir 172: 11-34.
- Mordret A, Roux P, Boué P, et al. 2019. Shallow three-dimensional structure of the San Jacinto fault zone revealed from ambient noise imaging with a dense seismic array [J]. Geophys. J. Int., 216 (2): 896-905.
- Najdahmadi B, Bohnhoff M, Ben-Zion Y. 2016. Bimaterial interfaces at the Karadere Segment of the North Anatolian fault, Northwestern Turkey [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121 (2): 931-950.
- Nakamura Y. 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications [C]. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering Auckland, New Zealand.
- Nakata N, Chang J P, Lawrence J F, et al. 2015. Body wave extraction and tomography at Long Beach, California, with ambient-noise interferometry [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(2): 1159-1173.
- Nolet G. 2008. A breviary of seismic tomography [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Picozzi M, Parolai S, Bindi D, et al. 2009. Characterization of shallow geology by high-frequency seismic noise tomography [J]. Geophys. J. Int., 176(1): 164-174.
- Prodehl C, Mooney W D, 2012, Exploring the Earth's crust: history and results of controlled-source seismology [M]. Boulder: The Geological Society of America.
- Rawlinson N, Sambridge M. 2004. Wave front evolution in strongly

heterogeneous layered media using the fast marching method [J]. Geophys. J. Int., 156(3); 631-647.

- Peng Z G, Zhao P. 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake[J]. Nature Geoscience, 2(12): 877-881.
- Qiu H, Ben-Zion Y, Ross Z E, et al. 2017. Internal structure of the San Jacinto fault zone at Jackass Flat from data recorded by a dense linear array[J]. Geophys. J. Int., 209(3): 1369-1388.
- Riahi N, Gerstoft P. 2015. The seismic traffic footprint: Tracking trains, aircraft, and cars seismically[J]. Geophysical Research Letters, 42 (8): 2674-2681.
- Ross Z E, Hauksson E, Ben-Zion Y. 2017. Abundant off-fault seismicity and orthogonal structures in the San Jacinto fault zone[J]. Science Advances, 3: e1601946.
- Roux P, Moreau L, Lecointre A, et al. 2016. A methodological approach towards high-resolution surface wave imaging of the San Jacinto Fault Zone using ambient-noise recordings at a spatially dense array[J]. Geophys. J. Int., 206(2): 980-992.
- Schmandt B, Clayton R W. 2013. Analysis of teleseismic P waves with a 5200-station array in Long Beach, California: Evidence for an abrupt boundary to Inner Borderland rifting [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(10): 5320-5338.
- Schuster G. 2009. Seismic interferometry [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Share P E, Allam A A, Ben-Zion Y, et al. 2019. Structural properties of the San Jacinto fault zone at Blackburn Saddle from seismic data of a dense linear array [J]. Pure and Applied Geophysics, 176(3): 1169-1191.
- Share P E, Ben-Zion Y. 2018. A bimaterial interface along the Northern San Jacinto fault through Cajon pass [J]. Geophysical Research Letters, 45(21): 11622-11631.
- Share P E, Ben-Zion Y, Ross Z E, et al. 2017. Internal structure of the San Jacinto fault zone at Blackburn Saddle from seismic data of a linear array [J]. Geophysical Journal International, 210(2): 819-932.
- Si S K, Tian X B, Gao R. 2017. Constraints on upper mantle Vp/Vs ratio variations beneath eastern North China from receiver function tomography[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 138: 341-356.
- Snieder R. 2004. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase [J]. Physical Review, 69(4 pt 2): 046610.
- Teng J W, Zhang Z J, Bai W M, et al. 2004. Lithosphere physics [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Teng J W, Zhang Z J, Zhang X K, et al. 2013. Investigation of the Moho discontinuity beneath the Chinese mainland using deep seismic sounding profiles [J]. Tectonophysics, 609: 202-216.
- Tian X B, Wu Q J, Zhang Z J, et al. 2005. Identification of multiple reflected phases from migration receiver function profile: An example for the INDEPTH-III passive teleseismic P waveform data [J]. Geophysical Research Letters, 32(8): L08301.
- Tran K T, McVay M. 2012. Site characterization using Gauss-Newton inversion of 2-D full seismic waveform in the time domain[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 43: 16-24.
- Wang G C, Tian X B, Guo L L, et al. 2018. High-resolution crustal velocity imaging using ambient noise recordings from a high-density seismic array; An example from the Shangrao section of the Xinjiang basin, China [J]. Earthquake Science, 31(5-6); 242-251.
- Wang H, Quan W, Wang Y H, et al. 2014. Dual roadside seismic sensor for moving road vehicle detection and characterization [J]. Sensors, 14(2): 2892-2910.
- 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[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 61(11): 4436-4447, doi: 10.6038/cjg2018M0025.
- Wang W J, Chen Q F, Qi C, et al. 2011. The feasibilities and limitations to explore the near-surface structure with microtremor HVSR method-A case in baoding area of Hebei Province, China

[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 54 (7): 1783-1797, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.07.012.

- Wang W J, Liu L B, Chen Q F, et al. 2009. Applications of microtremor H/V spectral ratio and array techniques in assessing the site effect and near surface velocity structure [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 52(6): 1515-1525, doi: 10.3969/j. issn.0001-5733.2009.06.013.
- Wang X, Zhang J F, Jiang W L, et al. 2015. Deep structures of Jiangsu segment of Tan-Lu fault zone derived from bouguer gravity data[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 30(4): 1516-1525, doi: 10.6038/pg20150405.
- Wei Y H, Tian X B, Duan Y H, et al. 2018. Imaging the topography of crust-mantle boundary from a high-density seismic array beneath the middle-lower Yangtze River, Eastern China [J]. Seismol. Res. Lett., 89(5): 1690-1697.
- Wu F T, Blatter L, Roberson H. 1975. Clay gouges in the San Andreas fault system and their possible implications [J]. Pure Appl. Geophys., 113(1): 87-95.
- Wu Z B, Xu T, Badal J, et al. 2017. Crustal shear-wave velocity structure of northeastern Tibet revealed by ambient seismic noise and receiver functions [J]. Gondwana Research, 41: 400-410.
- Wu Z B, Xu T, Liang C T, et al. 2018. Crustal shear wave velocity structure in the northeastern Tibet based on the Neighbourhood algorithm inversion of receiver functions [J]. Geophys. J. Int., 212 (3): 1920-1931.
- Wu Z B, Xu T, Wu C L, et al. 2016. Crustal shear-wave velocity structure beneath the western Tibetan plateau revealed by receiver function inversions [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 59 (2): 516-527, doi: 10.6038/cjg20160211.
- Xu T, Zhang M H, Tian X B, et al. 2014a. Upper crustal velocity of Lijiang-Qingzhen profile and its relationship with the seismogenic environment of the Ms6. 5 Ludian earthquake [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 57 (9): 3069-3079, doi: 10.6038/ cjg20140932.
- Xu T, Zhang Z J, Liu B F, et al. 2015. Crustal velocity structure in the Emeishan Large Igneous Province and evidence of the Permian mantle plume activity [J]. Science China: Earth Sciences (in Chinese), 45(5): 561-576.
- Xu T, Zhang Z J, Tian X B, et al. 2014b. Crustal structure beneath the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: Constraints from active source seismic experiment along the Lixin to Yixing profile in East China [J]. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 30(4): 918-930.
- Yang H F. 2015. Recent advances in imaging crustal fault zones: a review[J]. Earthquake Science, 28(2): 151-162.
- Yang H F, Li Z F, Peng Z G, et al. 2014. Low-velocity zones along the San Jacinto Fault, Southern California, from body waves recorded in dense linear arrays[J]. J. Geophys. Res. Solid Earth, 119(12): 8976-8990.
- Yao H J, Gouédard P, Collins J A, et al. 2011. Structure of young East Pacific Rise lithosphere from ambient noise correlation analysis of fundamental-and higher-mode Scholte-Rayleigh waves[J]. Comptes Rendus Geoscience, 343(8): 571-583.
- Yomogida K, Aki K. 1987. Amplitude and phase data inversions for phase velocity anomalies in the Pacific Ocean basin [J]. Geophysical Journal International, 88(1): 161-204.
- Yu G P, Xu T, Ai Y S. 2020. Late Mesozoic extensional tectonics and gold mineralization in Jiaodong area: implications of short period dense array ambient noise imaging [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 63(5):1878-1893, doi:10.6038/cjg2020N0446.
- Zeng C, Xia J H, Miller R D, et al. 2011. Feasibility of waveform inversion of rayleigh waves for shallow shear-wave velocity using a genetic algorithm[J]. Journal of Applied Geophysics, 75(4): 648-655.
- Zhang B L, Zhang Z W, Bao F, et al. 2016. Shallow shear-wave velocity structures under the Weishan volcanic cone in Wudalianchi

volcano field by microtremor survey[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 59(10): 3662-3673, doi: 10.6038/cjg20161013.

- Zhang L, Bai Z M, Xu T, et al. 2020. Cenozoic magmatic activity and oblique uplifting of the Ailao Mountain: Evidence from short-period dense seismic array [J]. Science China Earth Sciences (in Chinese), in press,doi:10.1360/SSTe-2019-0291.
- Zhang M H, Liu Y S, Hou J, et al. 2019. Review of seismic tomography methods in near-surface structures reconstruction [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 34 (1): 48-63, doi: 10.6038/ pg2019CC0534.
- Zhang Z J, Gao R, Bai Z M, et al. 2013. Seismological research methods of the crustal fine structure [M].// In Ding Z L, editor. Research Methods of Solid Earth Science (in Chinese). Beijing: Science Press, 352-368.
- Zhao P, Peng Z G. 2008. Velocity contrast along the calaveras fault from analysis of fault zone head waves generated by repeating earthquakes [J]. Geophysical Research Letters, 35(1); L01303.
- Zhao P, Peng Z G, Shi Z Q, et al. 2010. Variations of the velocity contrast and rupture properties of M6 earthquakes along the Parkfield section of the San Andreas fault [J]. Geophysical Journal International, 180(2): 765-780.
- 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[J]. Geophysical Journal International, 189 (3): 1565-1583.
- Zielhuis A, Nolet G. 1994. Shear-wave velocity variations in the upper mantle beneath Central Europe [J]. Geophysical Journal International, 117(3): 695-715.

附中文参考文献

- 艾印双,吴庆举,雷建设,等. 2013. 地幔结构的地震学研究方法 [M].//丁仲礼主编,固体地球科学研究方法,北京:科学出 版社,381-401.
- 曹小林,朱介寿,赵连锋,等. 2001. 南海及邻区地壳上地幔三维 S 波速度结构的面波波形反演[J]. 地震学报,23(2):113-124.
- 李娜, 王伟涛, 王宝善. 2018. 基于云计算的九分量噪声互相关函数 计算及其在 China Array 密集台阵数据的应用[J]. 中国地震, 34(2): 244-257.
- 李永华,吴庆举,安张辉,等. 2006. 青藏高原东北缘地壳S波速度 结构与泊松比及其意义[J]. 地球物理学报,49(5):1359-1368, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.05.015.
- 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[J]. 中国科学:地 球科学,49(9):1394-1412.
- 滕吉文,张中杰,白武明,等. 2004. 岩石圈物理学[M]. 北京:科 学出版社.
- 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[J]. 地球物理学报, 61(11):4436-4447, doi:10.6038/cjg2018M0025.
- 王伟君,陈棋福,齐诚,等. 2011.利用噪声 HVSR 方法探测近地表 结构的可能性和局限性——以保定地区为例[J].地球物理学 报,54(7):1783-1797, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011. 07.012.
- 王伟君,刘澜波,陈棋福,等. 2009.应用微动 H/V 谱比法和台阵 技术探测场地响应和浅层速度结构[J].地球物理学报,52 (6):1515-1525, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.06.013.
- 王鑫,张景发,姜文亮,等. 2015. 基于布格重力数据研究郑庐断裂带江苏段深部构造[J]. 地球物理学进展,30(4):1516-1525,

doi: 10.6038/pg20150405.

- 武振波,徐涛,武澄泷,等. 2016. 利用接收函数反演青藏高原西部 地壳 S 波速度结构[J]. 地球物理学报,59(2):516-527, doi: 10.6038/cjg20160211.
- 徐涛,张明辉,田小波,等. 2014a. 丽江—清镇剖面上地壳速度结构及其与鲁甸 MS6.5 级地震孕震环境的关系[J]. 地球物理学报,57(9):3069-3079, doi: 10.6038/cjg20140932.
- 徐涛,张忠杰,刘宝峰,等. 2015. 峨眉山大火成岩省地壳速度结构 与古地幔柱活动遗迹:来自丽江一清镇宽角地震资料的约束 [J]. 中国科学:地球科学,45(5):561-576.
- 徐涛,张忠杰,田小波,等. 2014b. 长江中下游成矿带及邻区地壳 速度结构:来自利辛一宜兴宽角地震资料的约束[J]. 岩石学 报,30(4):918-930.

俞贵平,徐涛,刘俊彤,等. 2020. 胶东地区晚中生代伸展构造与金

成矿:短周期密集台阵背景噪声成像的启示[J]. 地球物理学报,63(5):1878-1893,doi:10.6038/cjg2020N0446.

- 张宝龙,张志伟,包丰,等. 2016. 基于微动方法研究五大连池火山 区尾山火山锥浅层剪切波速度结构[J].地球物理学报,59 (10):3662-3673, doi: 10.6038/cjg20161013.
- 张路,白志明,徐涛,等. 2020. 哀牢山地区新生代岩浆活动与抓斜 式抬升:来自短周期密集台阵观测的证据[J]. 中国科学:地球 科学,doi:10.1360/SSTe-2019-0291.
- 张明辉, 刘有山, 侯爵, 等. 2019. 近地表地震层析成像方法综述 [J]. 地球物理学进展, 34 (1): 48-63, doi: 10.6038/ pg2019CC0534.
- 张忠杰,高锐,白志明,等. 2013. 地壳精细结构的地震学研究方法 [M].//丁仲礼主编. 固体地球科学研究方法. 北京:科学出版社,352-368.