

用于专题地质填图的地球物理技术——短周期密集台阵

卢占武, 李文辉, 张新彦, 李秋生, 蔡玉国, 任彦宗, 程永志, 王光文
LU Zhanwu, LI Wenhui, ZHANG Xinyan, LI Qiusheng, CAI Yuguo, REN Yanzong,
CHENG Yongzhi, WANG Guangwen

自然资源部深地动力学实验室/中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources/Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:以问题和需求为驱动的专题地质填图强调, 针对某个主要地质体、沉积盆地、重要成矿带、地震带断裂系统等, 采用现代化的技术手段开展针对性的专题调查和填图, 以解决目标地质体结构、沉积盆地基底起伏、成矿地质体规模、断裂系统分布等重大问题。地球物理是专题填图不可缺少的手段之一, 近 10 年发展起来的短周期密集台阵技术, 因其布设灵活、应用广泛、精度高、成本低等特点备受关注。通过介绍短周期密集台阵发展现状, 以及在城市、矿山、地震灾害区、沉积盆地等不同地质地貌条件下, 利用短周期密集台阵进行近地表结构调查的应用实例, 提出了该技术在专题地质填图中的应用前景和技术方案建议, 力图通过短周期密集台阵的调查构建结构成像方法, 丰富和完善专题填图的技术方法体系。

关键词:区域地质; 专题地质填图; 密集地震台阵; 浅层结构

中图分类号: P623; P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)01-0001-12

Lu Z W, Li W H, Zhang X Y, Li Q S, Cai Y G, Ren Y Z, Cheng Y Z, Wang G W. A geophysical technology for thematic geological mapping: Short period dense array. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(1): 1-12

Abstract: Thematic geological mapping driven by the demands and problems emphasizes that for different geological environments such as a major geological body, sedimentary basin, important metallogenic belt and fault system, modern technical means can be adopted to carry out thematic geological investigation and mapping, so as to solve some major problems of above-mentioned geological environments. Geophysics, as one indispensable means in thematic mapping, its short-period dense array technology developed in recent 10 years has attracted much attention due to flexible layout, wide application, high precision and low cost. This paper mainly introduces the current situation of short period dense array, and its application to near surface structure investigation under different geological and geomorphic conditions such as cities, mines, earthquake and sedimentary basins, etc. The application prospect and technical scheme suggestions of its technology in thematic geological mapping is put forward to improve and perfect the method system of thematic geological mapping technology by means of constructing structure imaging method through the investigation of short period dense array.

Key words: regional geology; thematic geological mapping; dense seismic array; shallow structure

收稿日期: 2020-07-30; 修订日期: 2020-08-27

资助项目: 国家自然科学基金项目《藏南错那洞穹隆及邻区岩石圈结构与铍锡钨多金属矿产形成的深部背景研究》(批准号: 91962109)、自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题《喜马拉雅、三江成矿带混合源地震探测与浅-深结构研究》(编号: J1901-3)、中国地质调查局项目《阿拉善、藏东南等关键地段地壳圈层物质与演变基础地质调查》(编号: DD20190001)、《冈底斯构造带关键地区深部地质调查》(编号: DD20190016)和《雄安新区深部三维地质结构探测(地质所)》(编号: DD20189629)

作者简介: 卢占武(1978-), 男, 博士, 研究员, 从事地球物理和岩石圈结构探测研究。E-mail: luzhanwu78@163.com

专题地质填图是针对一定区域存在的重要地质或资源、环境问题,或是针对特定目标地质体等,以解决特定问题或满足社会特定需求为主要目的、填图与研究融为一体的地质填图。它是地质工作程度和发展阶段的必然,是填图发展的需要,也是实现地调和科研一体化的一种方式^[1]。

由于专题填图是以问题和需求为驱动,采用传统的地质填图方法已经无法满足现代专题填图的要求。充分利用现代化的探测技术手段,探索合适的专题填图方法技术组合刻不容缓。地球物理方法利用地质体密度、速度、磁化率、电导率等物性差异,通过地表观测获得反映地下地质体物性变化的数据,经过数据计算和处理确定地质体的分布特征等属性。以往区域地质调查中普遍使用的地球物理方法主要有重力、磁法、电法(MT+高密度电阻率法)、地震、探地雷达等探测技术。各种方法的探测深度和分辨率各不相同,且成本差异较大。从经济成本考虑,成本较低的重、磁方法使用最广泛,人工源反射地震方法虽然垂向分辨率最高,但成本偏高^[2]。相比之下,利用天然地震波的被动源地震成像方法,通过地震仪记录到的各种地震波的走时或波形信息反演地下速度结构,能够有效获得地下浅层三维结构。

本文主要介绍近 10 年发展起来的短周期密集地震台阵观测技术(以下简称短周期密集台阵),通过其在地下浅层结构探测的应用实例,探讨该技术在专题地质填图中的应用。

1 短周期密集台阵观测现状

短周期密集台阵方法是近 10 年发展起来的一种利用节点式地震仪开展地震信号观测的技术。该技术通过在较短时间内(通常 1~2 个月),密集布设数量较多的便携式一体化短周期地震仪,接收天然源地震、环境噪声等信号,通过噪声成像等计算处理,提高对地壳内目标异常体的探测精度。

这种密集阵列,通常由成百上千个地震台站组成,通过仪器数量的优势进行非常大的空间覆盖,在局部关键地段可将台站灵活布设,间距达到米级,以获得更丰富的地震信息。例如美国南加州的长滩阵列,2011 年 1—6 月期间,在约 10 km×6 km 的范围内,利用超过 5200 个高频单分量地震仪,进行了密集阵列的观测。该阵列的地震数据已成功

地应用于分析地壳和上地幔的远震体波结构、断裂带高精度结构成像、高分辨率局部地震活动性的检测等^[3]。

《Earthquake Science》于 2018 年出版了密集台阵的专辑,集中介绍了中国在密集台阵方面的研究成果,包括密集台阵数据快速计算方法,地壳、盆地、城市空间等不同尺度的密集台阵探测的成果,取得了很好的效果^[4]。

这种技术在地震活动性监测和定位^[5-6]、地壳结构^[7]、沉积层构造^[8]、城市空间地下探测^[9]、火山活动监测^[10]等方面都得到了很好的应用。

与人工源反射地震的方法对比,短周期密集台阵方法优点在于无需使用线缆可灵活布设地震仪,不需要仪器车进行数据接收,施工成本较低,而且可以人工源和天然源地震信号同时观测。但不足之处在于,记录人工源爆破激发的地震数据时,无法进行实时的数据监控,分辨率与三维人工源反射地震相比还有待提高。

与传统宽频带地震探测方法相比,该技术的特点在于通过密集台阵的观测,在短期内记录到累计较多的地震信息,在台阵下方形成密集射线交叉覆盖,使地壳精细结构的成像成为可能。其野外工作不仅绿色环保,且成本低、效率高^[11]。

针对台阵数据处理技术,接收函数和噪声成像的方法是应用较多的处理手段。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。利用短周期密集台阵观测,可依托大量的仪器设备在较短的时间内获得几十个典型远震事件,其射线在地壳和上地幔顶部内形成密集的交叉覆盖,获得的接收函数叠加成像结果能揭示出地壳精细结构^[11-13]。

基于噪声的成像方法很多。例如早期 Aki^[14]提出的 SPAC 法,Nakamura^[15]提出利用横向与纵向的频谱比分析(HVSR),以及现今常用的噪声层析成像(ANT)方法,被较多地应用于近地表速度结构、沉积层结构、城市空间地下探测、微震监控、火山和地震活动性研究等^[14-17]。Bensen 等^[18]提出的背景噪声数据处理的方法,被越来越多的应用于短周期密集台阵数据的处理中。

2 短周期密集台阵开展浅层结构调查实际应用

近年来,随着观测仪器的进步和观测方法的逐

渐成熟,中国短周期密集台阵的探测在地震灾害区、大中型城市区、水库库区、矿集区等领域的应用日益扩大,均取得了非常好的效果。

2.1 地震灾害区

地震灾害区多发育规模不同的断裂系统。由于地震频发,地震灾害区的沉积盖层厚度、断裂分布等情况错综复杂,因此开展地震灾害区近地表结构调查非常重要。

2.1.1 唐山断裂及邻区短周期密集台阵观测

Bao 等^[8]于2017年1—3月期间,采用“阵列+剖面”的方式,在唐山地区部署短周期密集台阵观测,其中阵列式观测采用152个节点地震仪器组成的密集台阵,阵列孔径40 km,仪器间隔1~4 km,仪器均为三分量的地震仪器,埋置在地下30 cm处。剖面上的密集台阵由37个QS-5型三分量地震仪组成,台站间距1 km,频带为0.2~100 Hz(图1)。

垂直唐山断裂走向1 km间距剖面式的密集台阵观测的结果,清晰地揭示了2个明显的地震阻抗界面。在100 m深度的层位是松散砂土和半固结粉土的交界面,流速差较大,沿剖面变化不大。300~800 m深度为第四纪沉积基底界面起伏,沿剖面由西向东变化较大^[19]。第四纪沉积物基底的快速变化与深地震反射剖面揭示的唐山断裂带的主断裂

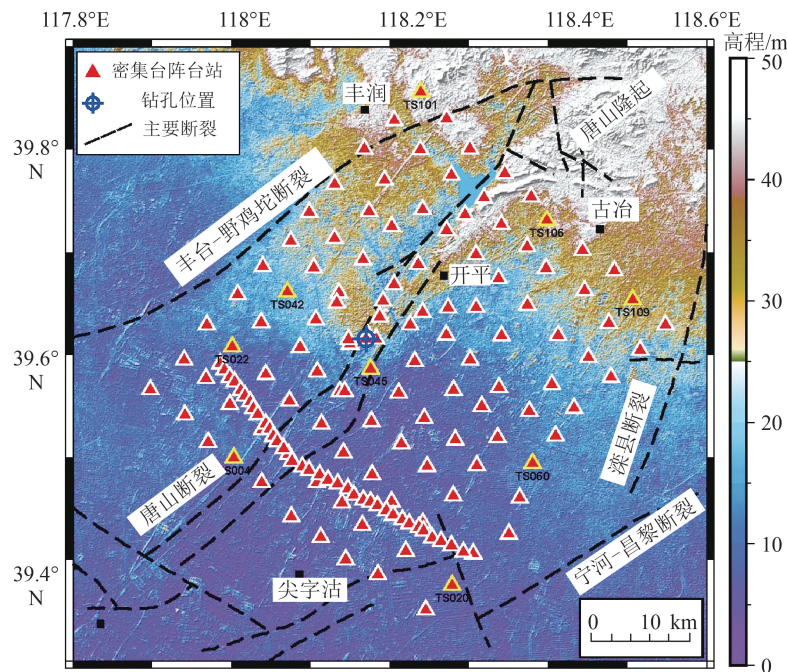


图1 唐山断裂及邻区短周期密集台阵部署位置图^[8]

Fig. 1 Location of the short period dense array in Tangshan fault area

构造在空间上具有良好的一致性^[20],推测第四纪以来唐山断裂带地震活动较大程度地影响第四纪沉积物的波动,影响幅度为100~200 m(图2)^[21]。

阵列式密集台阵下方成像结果揭示了唐山地震区第四纪沉积基底深度分布。北部有基岩出露,埋深浅;南部埋深较大,尤其是东南部靠近渤海湾盆地,埋深可达800~900 m(图3)。第四纪沉积基底与已有研究结果较一致,也表明了台阵方法探测沉积层结构的有效性^[8]。

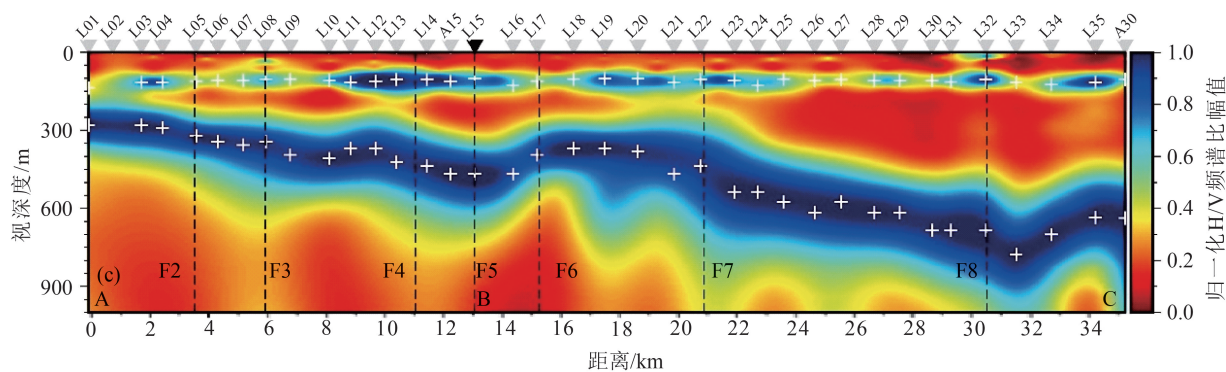


图2 唐山断裂及邻区短周期密集台阵观测的浅层结构^[19]

Fig. 2 The shallow structure observed with short period dense array in Tangshan fault and adjacent area

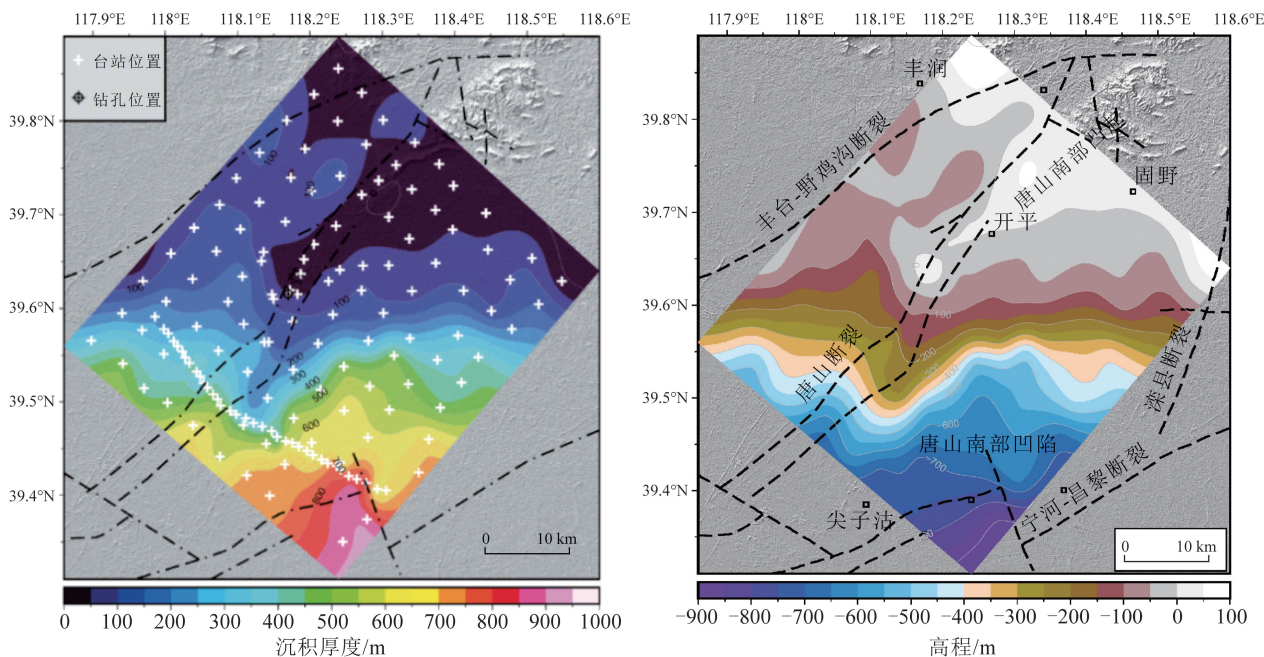
图3 唐山震区第四纪沉积厚度和基底埋深图^[8]

Fig. 3 Quaternary sedimentary thickness and basement of Tangshan earthquake area

2.1.2 程海断裂短周期密集台阵观测

程海断裂位于云南西北部,长度约 200 km,近南北向展布,北侧大致起始于永胜县,南部被北西—南东走向的红河断裂带截切(图 4),历史上多次发生过 6 级以上地震。由于地震灾害区的断裂带裂隙发育丰富,地下结构破碎,在地震学特征上通常表现为地震波速度的异常。而这种局部断裂的宽度通常仅为百米级尺度,需要依靠间距很小的密集台阵观测的数据,才能有效地对断裂的规模进行约束。

香港中文大学 Yang 等^[22]在 2018 年 1—2 月布设了垂直于程海断裂带的线性密集台阵,共计 158 个三分量 EPS 短周期地震仪,站间距为 40~50 m,长度达 8 km。在部署的 1 个月中,共记录到 5.5 级以上远震 20 次,局部地震 41 次。

利用记录到的地震数据,经过背景噪声层析成像处理,得到 2000 m 以浅的清晰地下构造,准确地厘定了程海断裂的宽度和深度。如图 4 所示,程海断层上有一个明显的低速带,其宽度为 3.4 km,深度达 1.5 km。推测与断裂带控制的宾川盆地形成过程中沉积物不均一的分布密切相关。考虑到宾川盆地人口众多,新发现的与程海断裂相关的低速

带可以作为地震危险性评估的一个重要因素。

2.2 城市地质与地下空间调查

城市地质工作是城市规划建设的重要基础,贯穿城市运行管理的全过程。解决“大城市病”、优化城市结构布局、拓展城市发展空间、推进绿色低碳城市建设、提高城市安全保障水平,需要城市地质调查提供空间、资源、环境、灾害等基础要素数据和服务支撑^[23]。

短周期密集台阵技术作为一种绿色环保型技术,可利用城市环境噪声作为输入源进行成像计算,在城市地下空间探测中取得了较好的研究成果。

2.2.1 济南市浅层结构(1000 m 以浅)

济南位于冲积平原和山脉的结合部位。该区岩性较单一,除表层第四系沉积薄层外,主要岩性为灰岩和侵入岩体。2017 年 9 月 27 日—10 月 30 日,中国地质科学院在济南市中心城区布设了 49 台三分量地震仪(图 5),台间距为 0.4~1 km,采样率为 100 Hz。通过背景噪声数据处理方法的计算,获得 100 m、300 m、600 m 和 1000 m 四个不同深度的横波速度切片图^[9](图 6)。

横波速度结构与研究区地质特征吻合很好。从不同深度结构看,在 300 m 以浅,主要岩性为灰岩

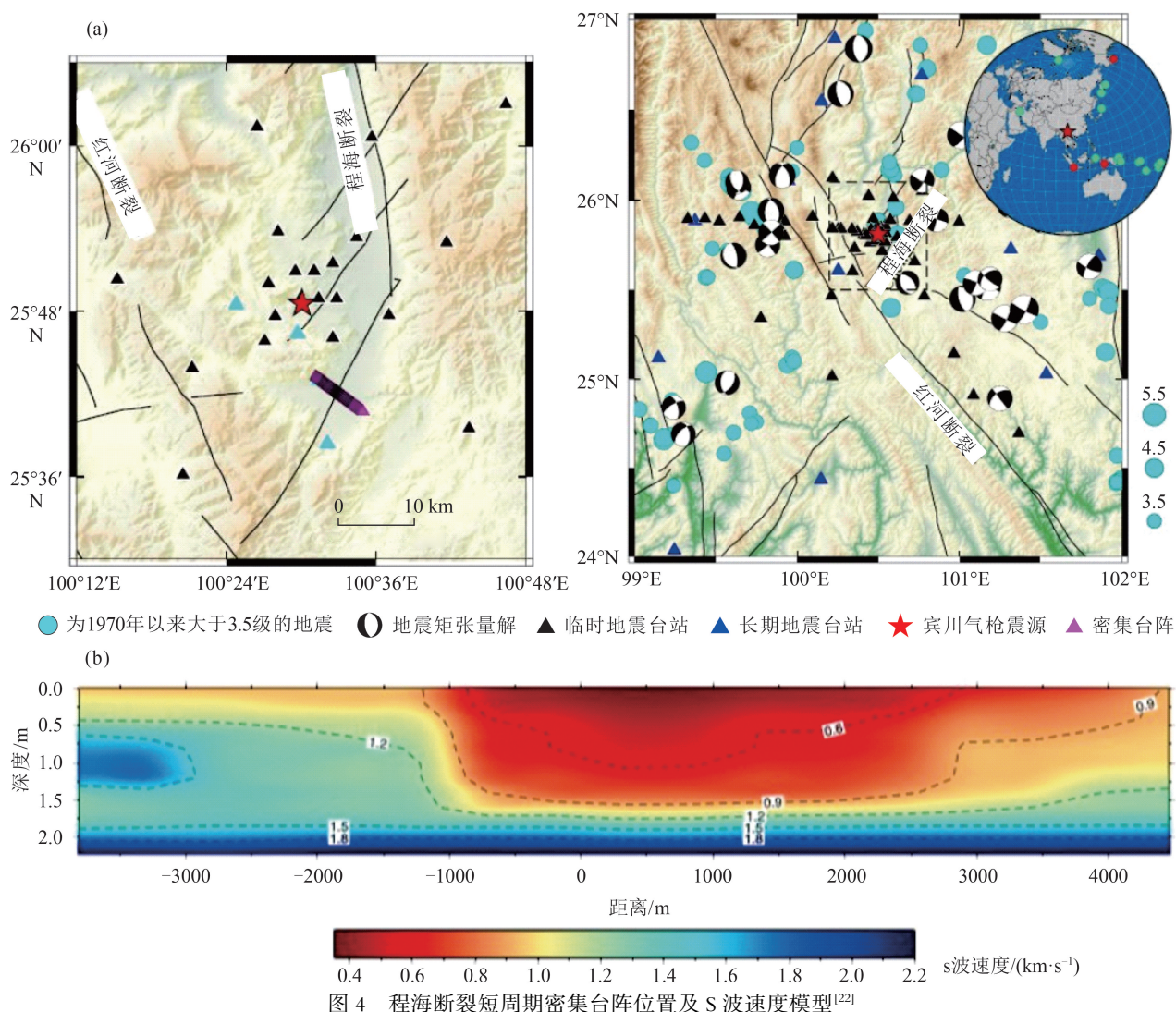


Fig. 4 Location of the short period dense array in Chenghai Fault area and shear wave velocity model

a—程海断裂位置与地震台站分布;b—程海断裂 S 波速度模型

且主要分布于研究区西侧,而侵入岩体主要分布于东侧,中间存在一个明显的分界面,指示存在一个近南北向的隐伏断裂。随着深度的增加,大面积的侵入岩体展布于深层,灰岩只在北侧局部有显现。横波速度结构整体揭示的深部岩层结构特征,可用来评估隐伏断裂的风险及灰岩在深层与岩体的空间关系特征。该区较尖锐的横波速度各向异性特征是海洋沉积、岩浆作用、频繁的地壳运动等共同作用的结果。通过获得高频面波信息得到的深层 1000 m 以浅的横波速度结构特征,对城市市政建设和规划,地铁修建及大型地下设施的建设具有指导意义^[9]。

2.2.2 合肥市浅层结构(400 m 以浅)

合肥市坐落在合肥盆地的北部,西部的大别造

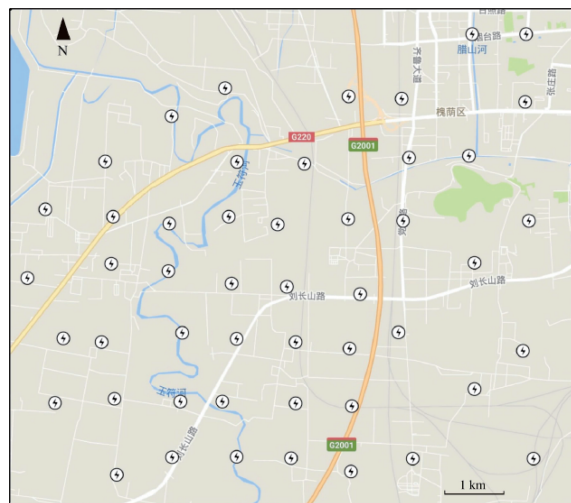


图 5 济南城区短周期密集台阵部署位置^[9]

Fig. 5 Location of the short period dense array in Jinan City

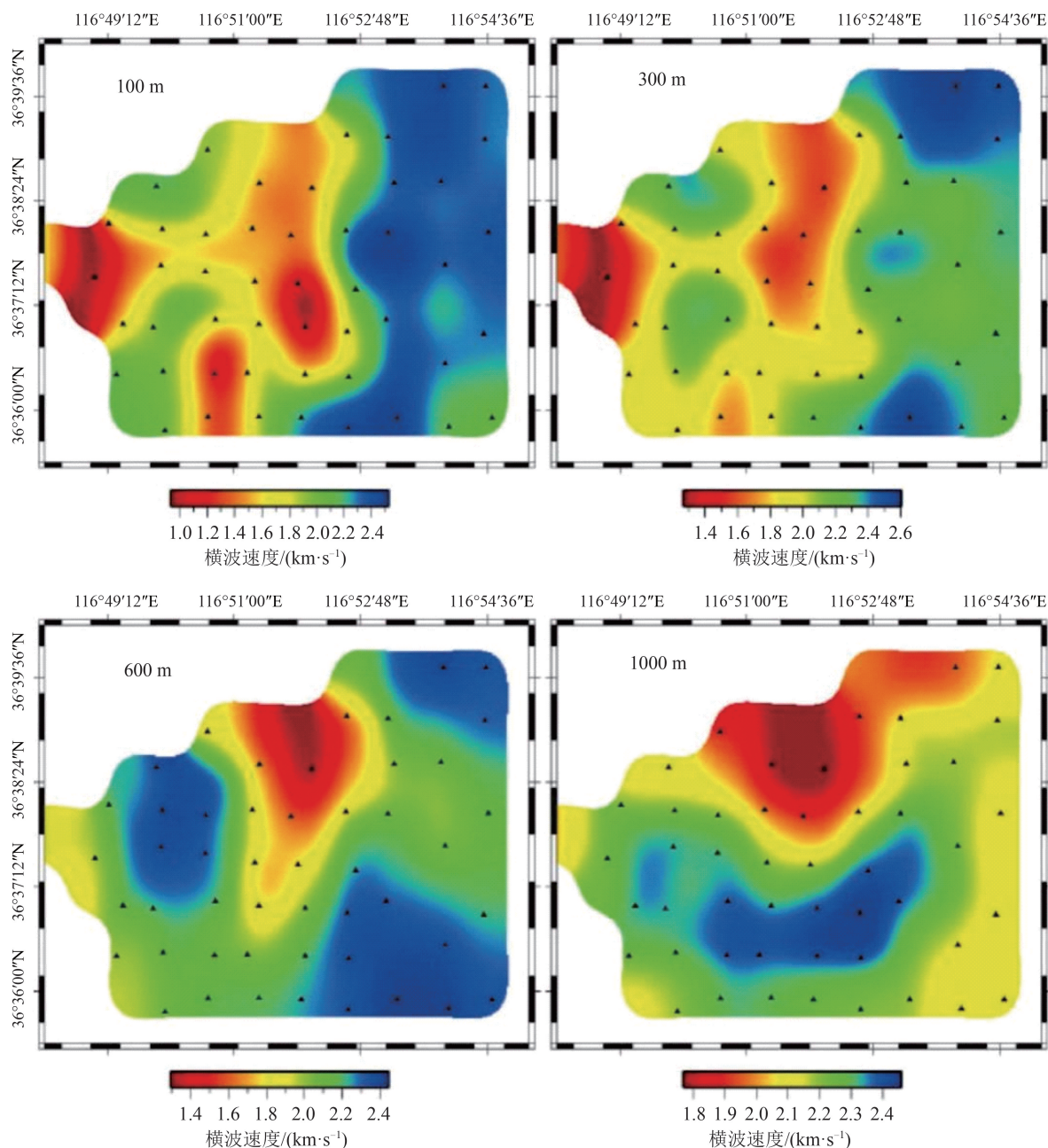


图6 济南城区不同深度(100 m、300 m、600 m、1000 m)横波速度切片图^[9]

Fig. 6 Section of shear wave velocity model at different depths(100 m,300 m,600 m and 1000 m) in Jinan urban area

山带和东部的郯庐断裂带影响了合肥盆地的形成和演化。合肥市的浅部地层主要为白垩系和古近系—新近系泥质粉砂岩沉积及风化程度不一的碎屑岩,一般深度为15~25 m。

中国科学技术大学于2013年5月18日—6月2日,在合肥盆地5 km×7 km覆盖范围内使用17个宽频带地震仪器(图7-a),连续采集了2周的噪声记录,仪器平均间距在1~2 km之间,采样率为1000 Hz。

地表到约400 m深度的层析结果(图7-b、图8)表明,蜀山断层将合肥市地下浅层结构分成南北两部分,市区北部的剪切波速度高于南部。该结果与区域地质条件一致,市区南部靠近中国第五大淡水湖——巢湖,沉积物较厚,剪切波速度较低^[24]。合肥市近地表速度模型的研究为城市规划和强地震动预测提供了有用的信息,在今后的工程建设中具有重要的应用价值。

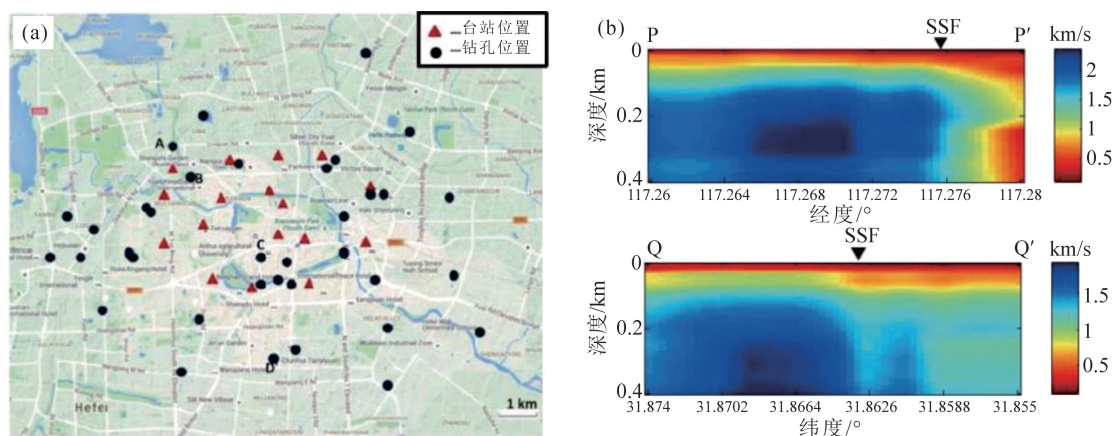
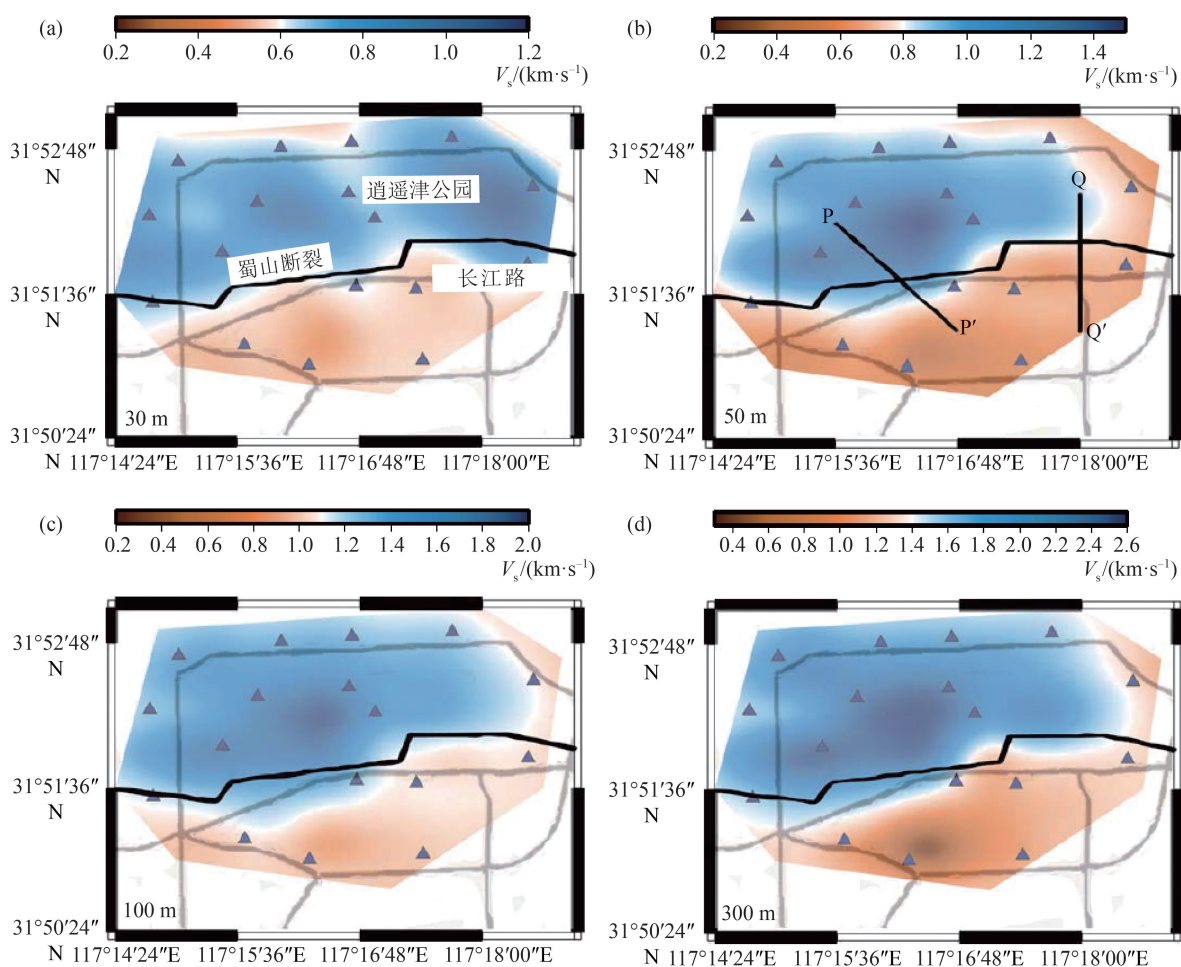
图 7 合肥市地震台阵部署图和浅层速度剖面^[24]

Fig. 7 Distribution of seismic array stations and the velocity structure section in Hefei City

a—合肥市地震台阵布设位置;b—2 条 S 波速度剖面,PP' 和 QQ' 的位置见图 8-b

图 8 合肥市不同深度 S 波速度结构^[24] (a~d 分别为 30 m、50 m、100 m、300 m 深度的结构)Fig. 8 The V_s structure of Hefei City at depths of 30 m, 50 m, 100 m and 300 m

2.3 大型水库库区浅层地下结构

调查大型水库库区的浅层地下精细结构,对于库区地震活动性的认识,评价库区的稳定性,具有非常重要的作用。

1959年开始蓄水的广东省河源新丰江水库,库区及其周围断裂构造较发育。库区在1962年发生过6.1级强震,在1989年、1999年、2012年、2013年均发生过5级左右的地震,地震活动性较强。开展库区精细地下结构调查,包括断层的形态、展布、速度变化等,可以更好地研究和理解地下结构和地震活动性的关系。2015年初,中国科学院广州地球化学研究所在新丰江库区人字石断裂(RZSF)周围布设了42个三分量短周期地震仪,台间距为100~500 m,获得一个月的连续地震记录^[25]。

图9为不同深度剪切波速度结构的水平分布图。总体看,该区域的速度分布较破碎,剪切波速度表现出强烈的横向变化。在100 m、300 m、450 m

和650 m深度上,人字石断裂处都呈现出明显的低速异常。在较浅深度上,研究区北部的人字石断裂处低速异常尤其突出,可能是由于该处为水库延伸区,受水的渗透作用影响断层的破碎程度较大所致。人字石断裂处的低速条带把该区域划分成东西两部分,断裂两侧整体上呈现出相对高速,与地表山丘地貌对应,可能为较完整的岩体结构。从垂直剖面AA'和BB'可以看出,以低速异常为特征的人字石断裂处深度至少延伸到800 m,且呈近垂直的高倾角。此外,CC'剖面也显示大面积的低速分布,表明沿这个剖面,可能是一个北西向的破碎带(小断层)^[25]。

2.4 矿集区浅部地壳结构

新疆北部喀拉通克矿区位于阿尔泰造山带北缘,是中亚造山带内的大型岩浆铜镍硫化物矿床,硫化物矿产资源丰富,在国民经济发展中占有重要地位。

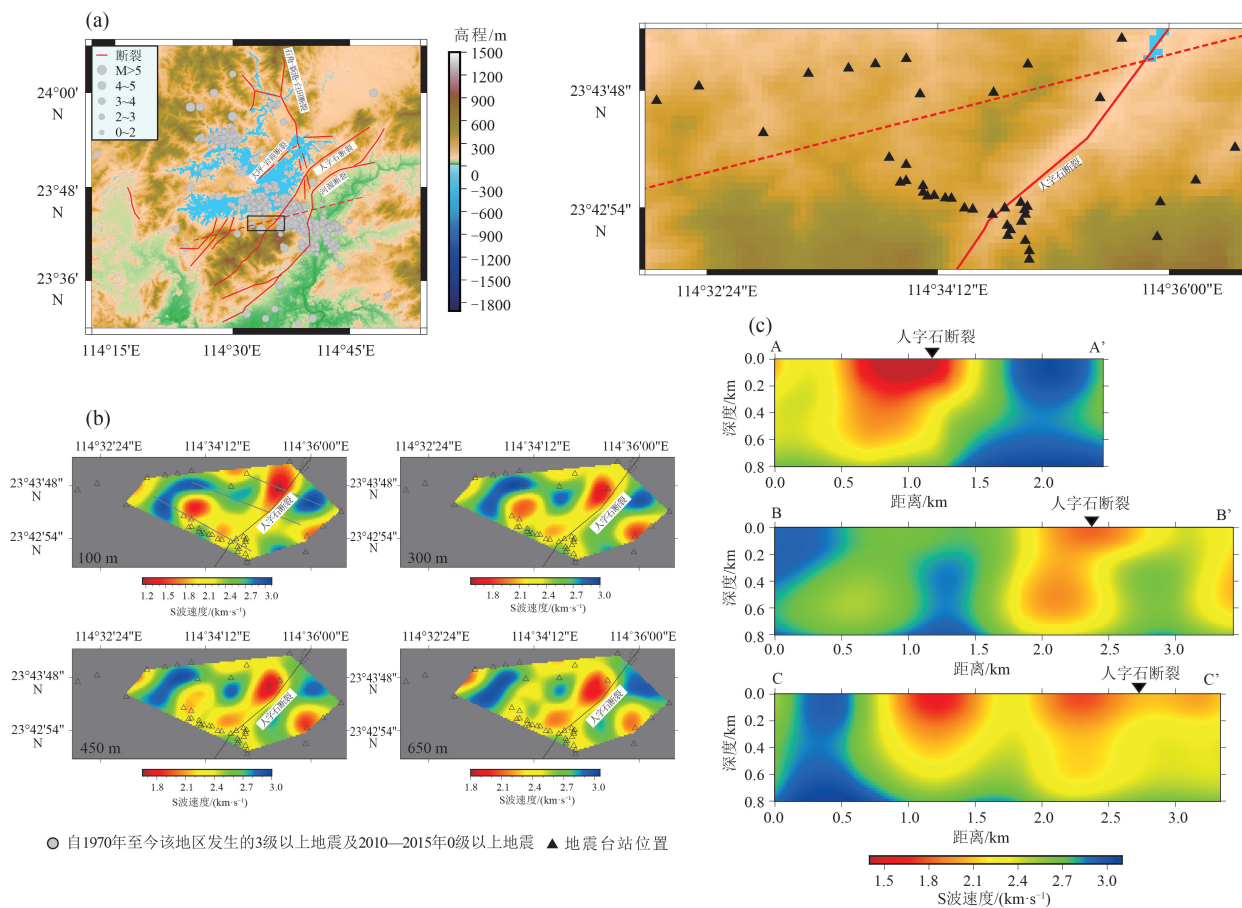


图9 新丰江水库库区地震台阵位置及浅层速度结构^[25]

Fig. 9 The location of the dense seismic array and shear wave structure in Xinfengjiang Reservoir

a—新丰江库区地理位置与地震台阵部署位置图;b—100 m、300 m、450 m、650 m 深度剪切波速度图像;c—剪切波垂直剖面图

中国科学院地质与地球物理研究所于2018年6月19日—8月25日,在新疆喀拉通克矿区开展了为期2个月的100台单分量短周期密集地震观测(图10-a、b),观测区范围为12 km×3 km,平均台站间距为500 m。采用背景噪声成像方法对2个月的连续波形数据进行分析,获取了矿区下方浅部地壳(0~1.3 km)三维剪切波速度结构(图10-c)。研究发现,0~0.5 km深度范围内,矿区主要含矿岩体呈现不同的速度特征,推测含矿岩体间的速度差异主要与岩体矿化程度有关。在矿区中部0.7~1.3 km深度范围内发现明显的低速区,推测其可能为早期的岩浆通道、矿区地层,或者为可能的矿

化区域。在矿区西北和东南区域内的0.7~1.3 km深度范围发现高速区,认为可能与早期岩浆上涌留下的辉长岩及橄榄辉长岩有关^[26]。

3 短周期密集台阵在专题地质填图中的应用基础

3.1 短周期密集台阵在专题地质填图中应用的成熟条件

经过长期的努力,填图专家在花岗岩、混杂岩、沉积岩、变质岩、基岩区构造地质填图等方面进行了卓有成效的实践和探索,取得了一批令人瞩目的成果^[27-32]。

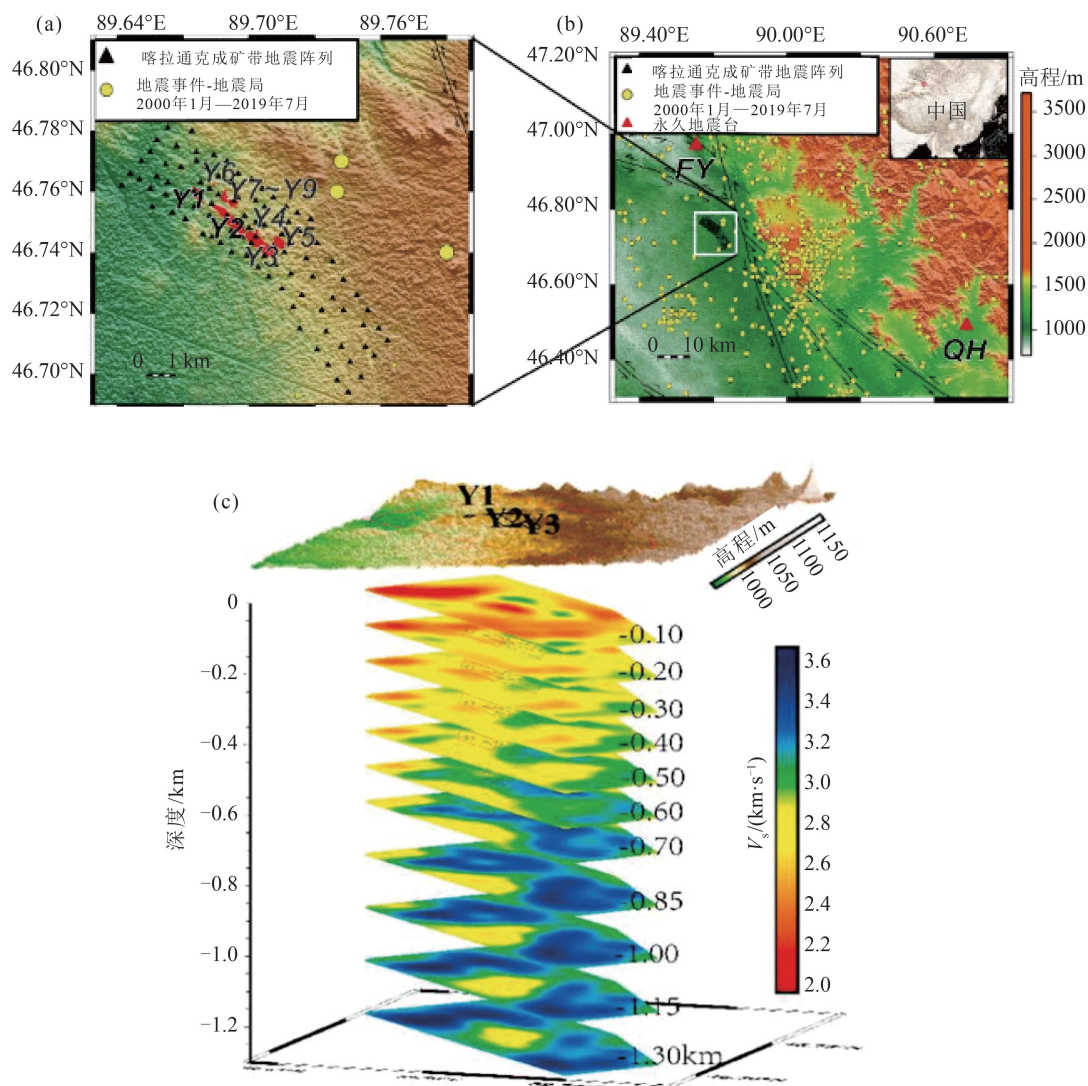


图10 喀拉通克矿集区地震台阵部署位置及剪切波速度结构^[26]

Fig. 10 Location of the seismic array and shear wave velocity structure in Karatungk mine area
a—台阵分布;b—矿区地理位置和周围地震活动性分布;c—三维剪切波速度结构

可是,由于地质条件的复杂多变,开展高精度的专题填图,还需要进行多方法、多手段的探索。短周期密集台阵方法可根据实际需要灵活设计台阵密度和布局,从而获取空间上较密集的采样。由于增加了台站密度、缩短了观测周期,可对浅层结构进行高分辨成像,对于深入认识一些重要地质要素,如沉积盆地基底起伏、沉积厚度、断裂规模、切割深度、延伸方向等问题,可提供高质量的地震数据支撑,具有重要的作用。

近年来,自然资源部、中国地震局、中国科学院、教育部等所属高校和科研单位先后购置了便携式短周期地震仪,在城市区、火山区、地震灾害区、矿产集中区开展了阵列式密集台阵的观测,在野外台站部署方面积累了丰富的经验。在数据处理方面,也取得了方法和运算效率的进步,特别是利用地震背景噪声方法获取近地表速度结构的研究取得了显著的进展,获得了研究区基于噪声成像的高分辨浅层速度结构^[33-35]。

可以说,短周期密集台阵技术在仪器装备、野外采集、数据处理等方面,已经具备了开展面积性、专题性填图的条件。

3.2 短周期密集台阵在专题地质填图中应用的技术建议

(1) 灵活采用观测系统。在未来专题填图中的应用,可以根据不同地质目标,开展灵活观测手段,部署的台站间距可根据调查范围、仪器数量、施工条件等实际情况确定,部署的图形建议采用“阵列+剖面”的形式,获得的结果既可以得到不同深度速度切片,也可以获得连贯的垂直横剖面的速度结构。

(2) 重视多源数据整合。考虑到单一的数据源对于结果的约束能力有限,如果在短周期密集台阵观测中有效结合其他手段,如用断裂信息、重力异常、地表地形、遥感等数据进行多要素的约束,可以减少调查结果解释的非唯一性,对在专题填图中针对特定地质体和填图目标开展细致、全面、深入的研究具有重要的意义。

例如,美国西海岸 San Jacinto 断层应用密集台阵观测的浅层速度结果和地形数据、断裂信息融合,取得了很好的效果(图 11)^[36]。从图 11-a 可见地表的 Clark 断层在 200 m 深度的变化趋势;从图 11-b 可见沉积基底的三维起伏形态与断层的关系。

4 小 结

现代地质填图的方式越来越强调针对某个主要地质体、沉积盆地、重要成矿带、地震带断裂系统等,采用多种手段的专题调查和填图方法,查明和解决目标地质体结构、沉积盆地基底起伏、成矿地质体规模、断裂系统分布等重大问题。开展多学科结合的地质填图,势在必行。

短周期密集台阵技术作为一种高效、环保、低成本的被动源地震方法,具有布设灵活、探测范围广、分辨率高、探测精度高的特点。应用实例分析表明,该方法在城市、矿山、地震灾害区、沉积盆地等不同地质地貌条件下进行近地表结构调查的有效性。通过联合多种地球物理探测方法,融合多源数据,必将构建高分辨、多物性的结构成像方法,丰富和完善专题填图的技术方法体系。

致谢:本文在前期工作积累和撰写期间,与北京卫星环境工程研究所李志伟研究员、南方科技大学郭震老师、中国地质科学院梁峰博士进行了有益讨论,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 王涛,计文化,胡建民,等.专题地质填图及有关问题讨论[J].地质通报,2016,35(5): 633-641.
- [2] 孟贵祥,吕庆田,严加永,等.“穿透性”探测技术在覆盖区地质矿产调查中的应用研究[J].地球学报,2019,40(5): 637-650.
- [3] Lin F C, Li D Z, Clayton R W, et al. High-resolution 3D shallow crustal structure in Long Beach, California: Application of ambient noise tomography on a dense seismic array[J]. Geophysics, 2013, 78(4): 45-56.
- [4] Yao H J, Wang B S, Tian X B, et al. Preface to the special issue of dense array seismology[J]. Earthquake Science, 2018, 31: 225-226.
- [5] Inbal A, Clayton R W, Ampuero J P. 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, 2015, 42(15): 6314-6323.
- [6] Inbal A, Ampuero J P, Clayton R W. Localized seismic deformation in the upper mantle revealed by dense seismic arrays[J]. Science, 2016, 354(6308): 88-92.
- [7] Liu Z, Tian X B, Gao R, et al. New images of the crustal structure beneath eastern Tibet from a high-density seismic array[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, (480): 33-41.
- [8] Bao F, Li Z W, Tian B F, et al. Sediment thickness variations of the Tangshan fault zone in North China from a dense seismic array and microtremor survey[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, (185): 104045. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2019.104045>

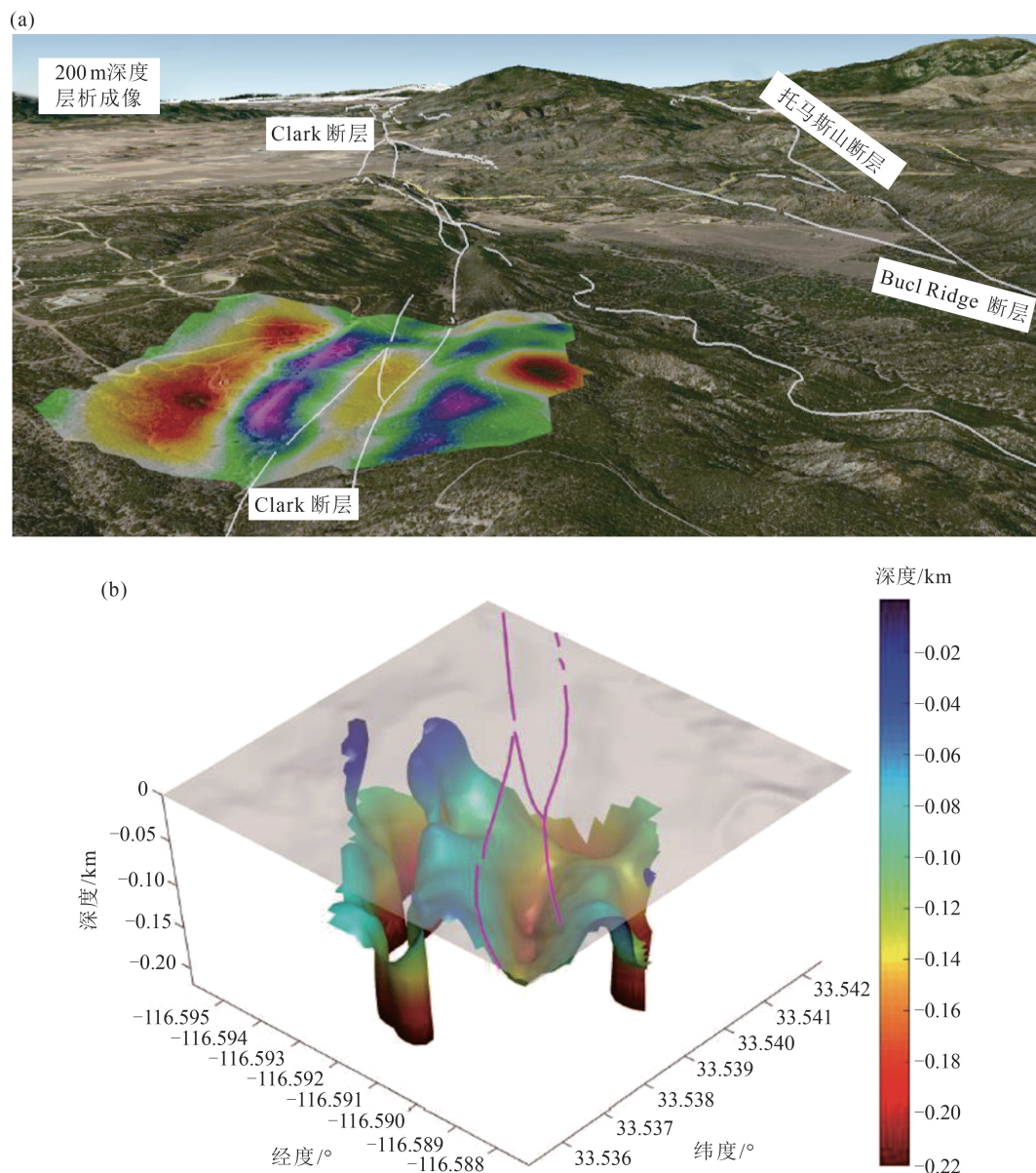


图 11 美国西海岸 San Jacinto 断层的浅层速度结构与地形数据、断裂信息融合实例^[36]

Fig. 11 Joint result of the shallow velocity, topographic data and fault information of the San Jacinto fault area in west coast of the United States

- [9] 梁锋,高磊,王志辉,等.利用背景噪声层析成像研究济南浅层横波速度结构[J].地学前缘,2019,26(3): 129-139.
- [10] Li Z W, Ni S D, Zhang B L, et al. Shallow magma chamber under the Wudalianchi Volcanic Field unveiled by seismic imaging with dense array[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43: 4951-496.
- [11] 张明辉,武振波,马立雪,等.短周期密集台阵被动源地震探测技术研究进展[J].地球物理学进展,2020,35(2): 495-511.
- [12] Liu Z, Tian X B, Gao R, et al. New images of the crustal structure beneath eastern Tibet from a high-density seismic array[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 480: 33-41.

- [13] 张路,白志明,徐涛,等.哀牢山地区新生代岩浆活动与掀斜式抬升:来自短周期密集台阵观测的证据[J].中国科学:地球科学, 2020, 50(8): 1069-1082.
- [14] Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. Bull. Earthq. Res. Inst., 1957, 35: 415-456.
- [15] Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface [J]. Quarterly Reports, Railway Technical Research Institute, 1989, 30(1): 25-33.
- [16] Brenguier F, Duputel Z, Shapiro N M. Towards forecasting volcanic

- eruptions using seismic noise[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(2): 126–130.
- [17] Xu Z J, Song X D. Temporal changes of surface wave velocity associated with major Sumatra earthquakes from ambient noise correlation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(34): 14207–14212.
- [18] Bensen G D, Ritzwoller M, Barmin M, et al. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169: 1239–1260.
- [19] Bao F, Li Z W, Yuen D, et al. Shallow structure of the Tangshan fault zone unveiled by dense seismic array and horizontal-to-vertical spectral ratio method[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2018, 281: 46–54.
- [20] 刘保金, 曲国胜, 孙铭心, 等. 唐山地震区地壳结构和构造: 深地震反射剖面结果[J]. *地震地质*, 2011, 33(4): 901–912.
- [21] 郭慧, 江娃利, 谢新生. 对 1976 年河北唐山 MS7.8 地震地表破裂带展布及位移特征的新认识[J]. *地震地质*, 2011, 33(3): 506–524.
- [22] Yang H F, Duan Y H, Song J H, et al. Fine structure of the Chenghai fault zone, Yunnan, China, constrained from teleseismic travel time and ambient noise tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125: 1–14.
- [23] 林良俊, 李亚民, 葛伟亚, 等. 中国城市地质调查总体构想与关键理论技术[J]. *中国地质*, 2017, 44(6): 1086–1101.
- [24] Li C, Yao H J, Fang H J, et al. 3D Near-surface shear-wave velocity structure from ambient-noise tomography and borehole data in the Hefei urban area, China[J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(4): 882–892.
- [25] 王爽, 孙新蕾, 秦加岭, 等. 利用密集地震台网高频环境噪声研究广东新丰江库区浅层地下结构[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(2): 593–603.
- [26] Du P X, Wu J, Wang J, et al. Imaging Karatungk Cu–Ni mine in Xinjiang, western China with a passive seismic array[J]. *Minerals*, 2020, 10(7): 601.
- [27] 田忠华, 刘福来, 许王, 等. 构造变形在变质岩专题填图中的作用及其意义——以辽南辽河群试点填图区为例[J]. *地质通报*, 2017, 36(11): 1942–1952.
- [28] 童英, 郭磊, 王涛, 等. 同源花岗岩谱系填图——内蒙古二连宝德尔石林花岗岩填图试点[J]. *地质通报*, 2017, 36(11): 1963–1970.
- [29] 薛怀民, 曹光跃, 刘哲. 陆相火山岩区岩性组合-岩相填图试验——以内蒙古西太仆寺破火山为例[J]. *地质通报*, 2017, 36(11): 2030–2035.
- [30] 许欢, 柳永清, 旷红伟, 等. 燕山西部尚义盆地沉积岩区专题地质填图方法与成果[J]. *地质通报*, 2017, 36(11): 1893–1918.
- [31] 闫臻, 王宗起, 付长垒, 等. 混杂岩基本特征与专题地质填图[J]. *地质通报*, 2018, 37(2/3): 167–191.
- [32] 张进, 曲军峰, 张庆龙, 等. 基岩区构造地质填图方法思考、实践、探索[J]. *地质通报*, 2018, 37(2/3): 192–221.
- [33] Yao H J, Hilst R D V D, Hoop M V D. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis — I. Phase velocity maps[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2006, 166(2): 732–744.
- [34] Yao H J, Pierre G, Collins J A, et al. Structure of young East Pacific Rise lithosphere from ambient noise correlation analysis of fundamental- and higher-mode Scholte-Rayleigh waves[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2011, 343(8): 571–583.
- [35] Bowden D C, Tsai V C, Lin F C. Site amplification, attenuation, and scattering from noise correlation amplitudes across a dense array in Long Beach, CA[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(5): 1360–1367.
- [36] Mordret A, Roux P, Boué P, et al. Shallow three-dimensional structure of the San Jacinto fault zone revealed from ambient noise imaging with a dense seismic array[J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 216: 896–905.