

陈颢、徐逸鹤、蔡辉腾等,2018,关于地震科学实验场的一些思考——地下云图,中国地震,34(2),165~171.

# 关于地震科学实验场的一些思考——地下云图

陈颢<sup>1,2)</sup> 徐逸鹤<sup>1,3)</sup> 蔡辉腾<sup>1,4)</sup> 李稳<sup>1,5)</sup>

1) 南京大学地球科学与工程学院,南京市仙林大道 163 号 210046

2) 中国地震局地震预测研究所,北京市复兴路 63 号 100036

3) 中国地震局地球物理研究所(地震观测与地球物理成像重点实验室),北京 100081

4) 福建省地震局,福州 350003

5) 中国地震局地球物理勘探中心,郑州 450003

**摘要** 由中国地震局和美国国家科学基金委、地质调查局合作建立的地震预报研究实验场为中国早期地震工作的发展起到了良好的推动作用。由于种种客观原因,地震预报实验场的多数预想目标未能达成,发展受到了阻碍。最近几年,实验场重新受到重视,并更名为“地震科学实验场”。结合目前地震学发展的前沿和防震减灾事业的实际需求,本文提出增加“地下云图”作为实验场的新方向。利用高重复性、环境友好、安全性高的气枪震源,持续激发地震信号,实现对地下介质速度变化的连续监测;结合背景噪声成像获得的高分辨率 3 维地壳结构,构建 4 维(三维空间+一维时间)地下结构成像。“地下云图”可以反映地下速度和应力变化,为全国范围的地震监测预测提供新的业务手段,推动地震预测从经验预测到物理预测的转换。

**关键词:** 地震科学实验场 地下云图 4D 地震学 气枪

[文章编号] 1001-4683(2018)02-0165-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 1 回顾

1980 年 1 月 24 日,“中华人民共和国国家地震局和美利坚合众国国家科学基金会、美利坚合众国内政部地质调查局科学技术合作议定书”在北京签署(吴宁远等,1981)。为了深入开展中美合作,中方开辟了京津唐张和滇西两个地区作为地震预报研究实验场。在合作期间,国家地震局投资 1000 余万人民币用于两个实验场的建设。美方也提供了 129 套仪器,价值 250 万美元。中美双方还联合投资建设了中国数字化地震台网(共 9 个台站)(《当代中国》丛书编辑部,1993;顾平,1985)。

中美双方在建设地震预报研究实验场方面的合作,促进了地震仪器和观测设备的升级改造,根据协议书的规定,合作的领域包括地震前兆现象与预报技术的交流、板内活断层与地震研究、地震工程与减轻灾害、地壳深部结构、岩石力学实验室、超长周期地震台站的设置及资料和地震图的胶片交换等 7 个方面(顾平,1985)。在执行议定书的过程中,中美科技人员进行了频繁的交流(顾平,1987)。从 1980 年至 1984 年底,双方人员交流 253 次,其中,美

[收稿日期] 2018-04-18

[项目类别] 国家自然科学基金重大项目(41790463)、国家自然科学基金(41674058)共同资助

[作者简介] 陈颢,男,1942 年生,中国科学院院士。E-mail: yongchen@seis.ac.cn

方来华 155 人次,中方赴美 98 人次。地震预报研究实验场对中国的地震工作的发展起到了良好的推动作用。

20 世纪末期,陆续在山西、新疆开展过地震预报实验场的工作,地震局的许多科技骨干,如丁国瑜、梅世蓉、马宗晋、陈鑫连、许厚泽、姚振兴等都在现场工作过。这些实验场的目标主要是“监测预报”,选择多地震的地区为“地震预报实验场”,建设多种手段的高密度的观测系统,通过地震前兆的方法预报地震,并试图评价各种经验性方法的局限性(陈鑫连,1987;梅世蓉,1994;马宗晋,2000)。在任何地区,地震(特别是大地震)的复发周期都是很长的,而实验场项目的执行时间是有限的,所以,开展的预报实验场多数都没有完成预先设想的目标,其中,京津唐张实验场也很少被人们提及了。

例外的是滇西地震预报实验场,它的牌子至今还挂在云南大理,且已经挂在那里有 35 年之久了。当初挂牌子的人,如今大多已经退休了,几位受人尊敬的长者也已经去世了。20 世纪 80 年代初,为什么选择滇西作为实验场呢?一是该地区地震多,实践的机会多;二是红河断裂,红河从北向南流经滇西,滇西地震多发生在红河断裂(及其周围的许多断裂组成的断裂带)附近地区,以大理(弥渡)为界,红河断裂北段地震频繁,南段却很少有地震。同一条断裂,南北两段地震活动性质完全不一样,正如美国著名地质学家 Clarence R Allen 在议定书签订过程中所提出,这是研究地震机理、断层与地震关系的绝好地区,也是全球研究地震的基础前沿问题的最好地区(吴宁远等,1981)。同时,红河地处青藏高原东南缘,蕴含科学问题甚多。

20 世纪 90 年代,滇西实验场的领导体制、经费来源和管理方式发生了多次改变,影响了其发展。从 2015 年开始,关于滇西地震预报实验场的问题又引起了大家的关注,讨论的核心问题是实验场的定位和它的顶层设计。2017 年,在一次讨论滇西实验场的咨询会上,中国地震局科技委不同意沿用“地震预报实验场”的名称,建议随着时代的发展,应把早期的“地震预报实验场”改名为“地震科学实验场”。

借此机会,本文结合地震学研究的最新进展,对地震科学实验场的未来发展提出几点建议。希望借鉴气象学的先进思想,推动地震学和防震减灾研究的进一步发展。

## 2 3D 和 4D

欲从外部探测物体内部,需要 3 个要素:发射能穿透物体的场(波)源、物体外表面不同方位的接收装置、数据分析与成像方法。地震波是能穿透地球内部的波动,目前产生地震波通常有 3 种震源:天然地震、背景噪声(Ambient Noise Tomography)和人工震源。

20 世纪利用天然大地震了解了地球内部的整体结构,提供了全球板块构造重要的地震学证据,这是利用 20 世纪 6500 次全球 6 级以上地震数据的结果,也是 3D 地震学的辉煌年代(Dziewonski et al,1981;Kennett et al,1991;Kennett et al,1995)。但如果要研究地球的浅部结构(相比地球半径 6500km 而言),天然地震数量不够,分布不均匀,导致成像精度和分辨率不足。

21 世纪至今地震学研究最重要的突破之一,是背景噪声在浅层地壳的结构探测中的应用(Shapiro et al,2005)。背景噪声研究开辟了地震学研究的一个新领域,它不需要等待地震或使用人工源,即可获得高分辨率的浅层结构,这种方法的地下探测分辨率主要取决于台站

密度,背景噪声探测所布设的地震台站的数量和台站密度创造了传统地震学难以想象的新高度(Lin et al,2013)。基于短周期密集台阵的背景噪声成像方法可以有效获得地壳浅层(例如城市地区、断裂带地区等)的精细结构模型,为城市地震灾害评估及断裂带发震构造研究提供重要模型基础(Li et al,2016)。背景噪声方法,本质上是一种随机性的统计方法,为得到结果,需要累积长时间的大量数据,研究深部的上地幔结构(上万千米的尺度),需要利用全球台网的100~400s长周期面波几年噪声数据积累(Nishida et al,2009)。研究川滇地壳结构(几百千米尺度),需要利用区域台网5~50s中短周期面波至少1年的噪声数据(Yao et al,2006,2008)。研究台北盆地(10km尺度)的浅层地壳结构,要用0.3~4.0s短周期面波1个月的噪声数据(Huang et al,2010)。尺度越小,可恢复的面波频率越高,需要的连续噪声时间越短,对浅层结构越敏感。背景噪声在3D探测方面具有相当的优势。

人工震源也能够激发地震波,近10年来,我们引进了海洋无限水体激发地震波的气枪(Air-gun)用于陆地有限水体中,实现了绿色环保激发(Chen et al,2007; Wang et al,2012; Chen et al,2017),并在两个方面取得了明显进展。首先,发现和利用了气枪这种人工震源的震源特性——高度重复性,多次极小当量的激发,利用叠加和相关等处理方法,可以达到极大范围的地下探测的目的(Chen et al,2017)。其次,利用可以流动的人工震源,多点激发,多点接收,实现地下结构的高精度探测(张云鹏等,2016; She et al,2018; Tian et al,2018)。相比天然地震和背景噪声,三者都可以进行3D探测,但人工震源,在4D探测方面有着更大的发展潜力(图1)。

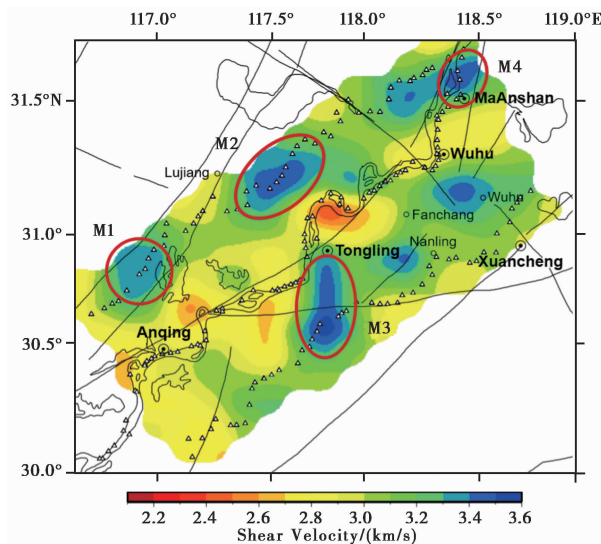


图1 运用气枪震源研究地下结构(3D)的例子。2015年在长江安徽段用气枪连续激发地震波,江北和江南接收,得到两岸的浅部结构:沿江区域呈明显低速,而在长江两岸发现一些面波的高速区。探测工作结束后,地质学家指出,这些高速区恰恰对应两岸的矿集区

M1: 安庆矿集区; M2: 庐枞矿集区; M3: 铜陵矿集区; M4: 宁芜矿集区(修改自 Pang 等(2014))

地球内部介质的结构及其变化一直是地球物理学家研究的主要内容之一。利用越来越密集的地震台站资料,我们已经可以获得高分辨率的地球内部结构。地球的很多灾害性活

动除了与地球内部的结构状态有关,还受制于内部状态的变化。如地球介质内部应力积累是地震的孕育、发生过程的重要因素,监测地球内部微弱的变化,为我们研究地震发生过程甚至寻找地震的前兆提供了可能。

由于很难直接深入地球内部进行测量,我们只能通过分析地震波来研究地球内部的变化。在地震波的众多参数中,地震波的波速测量精度最高,同时也能直接反映地下的应力状态和物质组成等物性参数。因此通过地震波波速变化研究地球内部结构变化成为被应用最广泛的方法。

相对地球介质结构的研究,目前我们对地球介质变化的研究(4D seismology)还处于初步阶段。在工业界,4D地震学在数据采集和数据处理方面已经取得了一些进展,并有越来越多的应用实例。石油工业界利用4D地震方法监测油气运移和开采过程已经取得较大成功。但是在与地震活动相关的地下介质变化的研究方面进展相对缓慢,究其原因在于与油气过程(以及二氧化碳注射等)相关的波速变化较大而与地震活动伴随的波速变化较小。

根据所采用的震源,研究与地震相关的地下介质变化的4D地震学的方法又可以分成:被动震源4D地震学(Passive 4D Seismology)和主动震源4D地震学(Active 4D seismology)。被动震源地震学是利用地震台站观测到的天然地震信号和噪声信号,比较不同时间的地震和噪声特征得到地下介质性质随时间的变化。

地震的能量很大可能有很多台站接收到,但是地震的分布在空间和时间上非常不均匀,同时天然地震的位置和发震时刻的确定存在较大的误差。因此利用天然地震研究地下介质变化的精度非常有限,这进而限制了天然地震的使用。近些年,无时无处不在的地震噪声逐渐被作为一种震源进行地下介质结构研究。最近,有研究者利用地震噪声进行地下介质随时间变化的研究。但是由于噪声能量小,需要通过长时间累积才能得到足够信噪比的信号,同时目前利用噪声只能获得面波信息而无法获得介质的完全响应。因此噪声可以用于深部介质长时间的平均变化或者与地震等事件相关的较大变化的研究。

为克服被动震源存在的问题,利用人工震源主动向地下发射地震波,进行地下介质监测,发展主动震源4D地震学(Active 4D seismology)自然成为一个重要的发展方向。虽然利用人工震源研究地下介质变化的思想可以追溯到20世纪70年代,甚至更早。但是由于当时的技术水平有限,因此相应的研究精度有限,而且相关研究曾经一度停滞。现在进行高精度主动震源监测的条件已经具备,这些都得益于以下技术的发展:①震源的发展,以气枪震源为代表的绿色震源可以进行长时间工作,并且具有高度可重复性;②电子技术和GPS技术的发展为我们的观测提供了高度同步的时钟;③数据处理方法的发展,在通讯理论中相对成熟的延时估计技术应用于地震数据处理,为获得高精度测量提供了基础。

### 3 天上有“风云”,地下有“云图”

如何发挥地震学4D探测的优势呢?先从气象学的启示谈起。20世纪60年代出现了卫星云图(Bristor et al, 1966),此后30年,各国都广泛应用这种技术了,中国的“风云”气象卫星就是一个杰出的例子(杨军等, 2011)。卫星云图不仅可以了解云层的结构(3D),更重要的是了解云层的运动(4D)(Platnick et al, 2003)。探测大气运动对于天气预报是至关重要的,几十年前,众人看好的数值天气预报,离开了卫星云图的观测资料,进展将会是有限



的。同样的道理对地震学也是一样。地震学是数理科学应用最广泛的学科,数值模拟一直是地震学的强项,但没有新型的观测数据输入,数值模拟的应用也是有限的。

卫星在地球上的空间运行,观测的是整个地球上方的云图,这是一种全场性的观测,而非一点性的观测。这是地震学学习气象学的核心关键。

设想在“地震科学实验场”建立像“风云”卫星一样的人工流动发射系统,配合发展相应的接收和数据处理系统,率先在技术集成方面实现工程创新(工程创新对于科学创新十分重要),则有可能做出“地震科学实验场”区域地下云图。该云图将反映地下介质的波速变化、应力变化等,开始从地震的经验预报向物理预报的探索。

4D 地震学是非常前沿的科技,它的发展面临许多挑战,如在硬件方面改进现有台站的授时、守时精度,建立由多个主动震源和多个观测台站组成的网络,形成地下介质连续监测的能力;在分析处理方面,要有与地震活动相关的监测,特别是地震孕育过程中介质是否存在波速变化,如果存在,其大小及空间分布如何,如何能更有效地观测到相关的变化,同时研究观测到的介质变化如何与地下介质的应力状态和物性等参数联系。

在“地震科学实验场”中所有的监测预报的传统做法应该不受影响,但是“地震科学实验场”的定位应该十分清楚,发展、检验和完善“地下云图”技术。这种定位不用等地震的发生,这种定位将为未来全国范围的地震监测预测提供新的业务手段。

## 4 总结

3D 地震学为建立地球不同尺度的物性参数模型做出了巨大的贡献。随着观测精度的提高和震源技术(如背景噪声、气枪)的发展,4D 地震学逐渐显露其在灾害(如火山、地震等)监测方面的潜力。本文建议以 4D 地震学为核心,建立“地下云图”技术系统。该技术系统应有从激发、接收到实时处理的完整流程,同时针对不同探测目的(大区域和城市区域)建立两套不同标准的技术系统。该系统的建成将为地震监测预测提供新的业务手段,并推动地震物理预测的探索发展。

## 参考文献

- 陈鑫连,1987,我国地震预报工作的回顾与展望,中国地震,3(2),1~6.
- 《当代中国》丛书编辑部,1993,当代中国的地震事业,北京:当代中国出版社.
- 顾平,1985,中美地震研究科技合作概况,中国地震,1(2),74~77.
- 顾平,1987,中美地震科技合作记事,国际地震动态,(12),34~35.
- 马宗晋,2000,20世纪地震预报科学的回顾与展望,国际地震动态,(6),1~4.
- 梅世蓉,1994,40年来我国地震监测预报工作的主要进展,地球物理学报,37(增刊I),196~207.
- 吴宁远、邹其嘉,1981,中美地震科技研究合作近况,国际地震动态,(7),1~4,24~25.
- 杨军、许健民、董超华,2011,风云气象卫星40年:国际背景下的发展足迹,气象科技进展,1(1),8~15,26.
- 张云鹏、王宝善、王伟涛等,2016,安徽气枪实验固定台层析成像初步结果,中国地震,32(2),331~342.
- Bristor C L, Callicott W M, Bradford R E, 1966, Operational processing of satellite cloud pictures by computer, Mon Weather Rev, 94(8), 515~527.
- Chen Y, Wang B S, Yao H J, 2017, Seismic airgun exploration of continental crust structures, Science China Earth Sciences, 60(10), 1739~1751.
- Chen Y, Zhang X K, Qiu X L, et al, 2007, A new way to generate seismic waves for continental crustal exploration, Chinese Science

- Bulletin, **52**(16), 2264~2268.
- Dzienwonski A M, Anderson D L, 1981, Preliminary reference earth model, *Phys Earth Planet Inter*, **25**(4), 297~356.
- Huang Y C, Yao H J, Huang B S, et al, 2010, Phase velocity variation at periods of 0.5–3 seconds in the Taipei Basin of Taiwan from correlation of ambient seismic noise, *Bull Seismol Soc Am*, **100**(5A), 2250~2263.
- Kennett B L N, Engdahl E R, 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification, *Geophys J Int*, **105**(2), 429~465.
- Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R, 1995, Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes, *Geophys J Int*, **122**(1), 108~124.
- Li C, Yao H J, Fang H J, et al, 2016, 3D near-surface shear-wave velocity structure from ambient-noise tomography and borehole data in the Hefei urban area, China, *Seismol Res Lett*, **87**(4), 882~892.
- 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, *Geophysics*, **78**(4), Q45~Q56.
- Nishida K, Montagner J P, Kawakatsu H, 2009, Global surface wave tomography using seismic hum, *Science*, **326**(5949), 112.
- Pang A J, Li S R, Santosh M, et al, 2014, Geochemistry, and zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology of Jilongshan Cu-Au deposit, southeastern Hubei Province, China, *Geol J*, **49**(1), 52~68.
- Platnick S, King M D, Ackerman S A, et al, 2003, The MODIS cloud products: algorithms and examples from Terra, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**(2), 459~473.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al, 2005, High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise, *Science*, **307**(5715), 1615~1618.
- She Y Y, Yao H J, Zhai Q S, et al, 2018, Shallow crustal structure of the middle-lower Yangtze River region in eastern China from surface-wave tomography of a large volume airgun-shot experiment, *Seismol Res Lett*, in press.
- Tian X F, Yang Z X, Wang B S, et al, 2018, 3D seismic refraction travel-time tomography beneath the middle-lower Yangtze River region, *Seismol Res Lett*, in press.
- Wang B S, Ge H K, Yang W, et al, 2012, Transmitting seismic station monitors fault zone at depth, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **93**(5), 49~50.
- Yao H J, Beghein C, Van Der Hilst R D, 2008, Surface wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis- II. Crustal and upper-mantle structure, *Geophys J Int*, **173**(1), 205~219.
- Yao H J, 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**(2), 732~744.

## Some Thoughts on the Earthquake Science Experiment Site—The Underground Cloud Map

*Chen Yong*<sup>1,2)</sup> *Xu Yihe*<sup>1,3)</sup> *Cai Huiteng*<sup>1,4)</sup> *Li Wen*<sup>1,5)</sup>

1) School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China

2) Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China

3) Institute of Geophysics, Beijing 100081, China

4) Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China

5) Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450003, China

**Abstract** The Western Yunnan Earthquake Predication Test Site set up by the China Earthquake Administration, the National Science Foundation Commission of America, and United States Geological Survey has played an important role for development of the early earthquake research work in China. Due to various objective reasons, most of the predicted targets in the earthquake prediction test site have not been achieved, and the development has been hindered. In recent years, the experiment site has been reconsidered again, and renamed as the “earthquake science experiment site”. Combined with the current development of seismology and the actual needs of disaster prevention and mitigation, it increased the “underground cloud map” as the new direction of the experimental site, which is discussed in this paper. Using high levels of repeatability, environment friendly, high security airgun source, continuous excitation of seismic signals, it can realize the continuous monitoring of the velocity change of underground medium. Combined with background noise imaging, the high-resolution 3-D crustal structure can be obtained, and the 4-D (3D space+1D time) underground structure imaging can be constructed. The “underground cloud map” can reflect underground velocity and stress changes, providing new means of business for the national earthquake monitoring forecast, which will advance the conversion of earthquake prediction from experience to physical prediction.

**Key words:** Earthquake science experimental site; Underground cloud map; 4D seismology; Air-gun