

密集地震观测带来的变革*

张晔军¹, 陈会忠^{2, ♣}

(1. 中国地震台网中心, 北京 100045; 2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要: 进入21世纪, 地震观测的重大变化就是密集地震观测网的出现, 通过论述地震密集观测技术带来的变革, 得出以下认识: (1) 这种变革改变了传统地震观测模式, 突破了传统的地震台网的概念; (2) 观测地震活动像为实时地震观测和预测带来了新的发现; (3) 密集地震台网将地震带进了大数据时代, 推动传统地震学从依靠自身判断(依靠计算模型)做决定到依靠数据做决定的转变, 而人工智能技术可以在大数据基础上推进地震学跨界创新, 向智慧地震发展。

关键词: 密集地震观测技术; 变革; 移动互联网; 大数据; 人工智能

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)01-0001-14

1 密集地震观测技术

21世纪, 密集地震观测技术、地震烈度速报和预警技术迅猛发展, 地震科学研究不断深入, 密集地震观测网(Dense Observation Network)和超密集地震台阵(Dense Seismic Array)应运而生。前者的产生是地震烈度速报和预警的研究需要, 后者的产生则主要是局部地区地震科学进一步深入研究的需要。密集地震观测技术的出现是和高新技术发展紧密相联的, 高新技术发展有4个方面: 传感器技术(特别是微机电传感器MEMS技术)、移动互联网技术、大数据技术和人工智能技术。高新技术发展必将影响和推动地震学的发展。

1.1 密集地震观测网

汶川大地震发生之后, 尽管我国地震速报系统快速测定了地震基本参数, 但是那时还没有建立地震烈度速报系统, 无法提供基于观测的地震烈度速报图, 不能给汶川地震的应急响应和紧急救援提供更多有价值的决策信息。因此, 地震烈度速报的研究被提上日程。实际上, 美国自1994年北岭地震之后, 就开始对地震动图(ShakeMap)进行研究。在破坏性地震发生之后能够快速提供峰值地面加速度、峰值速度的空间分布图和仪器地震烈度分布图, 称为地震动图(ShakeMap)。由

于传统的地震台网的台站密度不够, 烈度速报就需要加密地震台站。但是当时没有价格低廉的地震观测设备, 用传统的设备投资巨大。通过地球模拟器, 在传统台站之间增加“虚拟地震台”来“加密”地震台网, 以此来获得地震动图(泽仁志玛等, 2006), 这就是最早烈的度速报系统, 称为仪器烈度速报。

日本在1995年阪神地震之后, 投入巨资在全国建立具有1000多个地震台的Hi-net地震台网, 这使日本在烈度速报方面发展迅速, 目前Hi-net

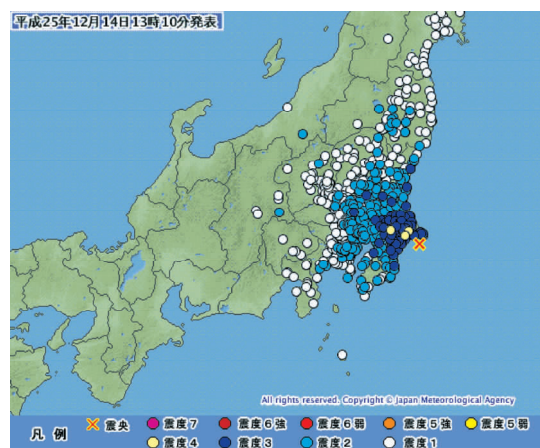


图1 2013年日本千叶近海5.5级地震烈度速报图
Fig. 1 Rapid intensity distribution map of Chiba offshore M5.5 earthquake in Japan in 2013

* 收稿日期: 2016-12-02.

♣ 通讯作者: 陈会忠(1943-), 研究员, 主要从事现代地球物理和地震观测技术、地震信息技术的开发和研究, 以及科技基础条件平台战略研究。近年来还从事地球科学和地震科学的传播和普及。

已经发展到 3 000 多个台站。因此日本是最早利用密集地震台网实现烈度速报的国家,突破了传统的以地震三要素测定的地震速报。由于台网密集可直接显示每个台站记录的地震动值,就可以生成烈度速报图。地震发生后的 1~2 min 内,就可发布地震烈度的信息 (<http://www.jma.go.jp/jp/quake/>),图 1 为 2013 年 12 月 14 日 12 时 6 分日本千叶近海 5.5 级地震的烈度速报图,共使用 800 多个台站数据,在震后约 3 min 发布。

地震预警是地震发生后,对即将到来的破坏性地震动进行预测和警报 (DB/T 59—2015)。地震预警是从英文 “Earthquake Early Warning” 翻译过来的。日本叫 “地震紧急速报”,中文应翻译为 “地震报警或地震警报”,而不应翻译成 “地震预警”。翻译成地震预警容易和地震预报混淆。美国称为 “Shake Alert” 系统,即震动报警系统。

地震预警的效果仍有许多不理想的地方,如地震预警技术从原理上就存在 “预警盲区”。如前所述地震预警是在大地震发生后,向远处发出警报。从大地震发生到警报的发出,是需要时间的,这个时间是地震波从震源到达地震台的时间和地震台收到地震信号判定地震并做相关处理时间的总和。在这段时间内,地震波照样传播,由于后至的 S 波、面波会造成更大程度的破坏,这段时间对应的 S 波传播的距离,我们称之为盲区,即地震警报到达该地区时,破坏性地震波已经到达或已经过去。显而易见,为了缩小地震预警的盲区,最重要是需要建立密集地震观测网。根据科技部科技支撑项目研究的结果 (张晁军等,

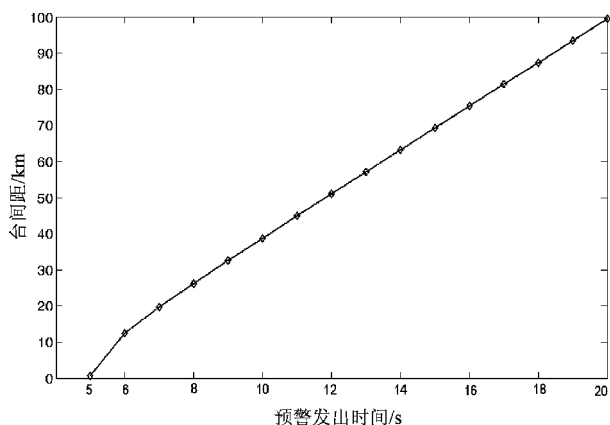


图 2 预警时间与台间距关系图

Fig. 2 Relationship of the warning time and the distance between two stations

2014),以正方形台网为例,以理想方式 (地震发生后即可立即被周边 3 或 4 个台站感知,即地震发生在正方形中心),考察台间距对预警时间的影响,得出图 2 结果。图 2 中显示地震预警网至少需要 10 km 左右就要建立一个地震台站。显然用传统的技术建立地震台站需要巨额投资。

1.2 超密集地震台阵

深入研究地震过程,需要精确确定地震的震源、地震发生的过程、动态观测地震波传播,进而确定深部地震发震断层和性质,因此近几年出现了密集地震台阵。比如美国在加利福尼亚长滩建立了一个由 5 200 个垂直传感器组成的超密集地震台阵。图 3 是在圣菲斯普林斯的超密集地震台阵 (美国加州伯克利大学地球和空间系网站, <http://web.gps.caltech.edu/~clay/SFS/SFS.html>),它由在以 6 km 为半径的范围里部署了 2 500 个连续记录的传感器组成,科学家利用费尔菲尔德超密集地震台阵对地震进行了和传统地震台网不一样的观测和研究。

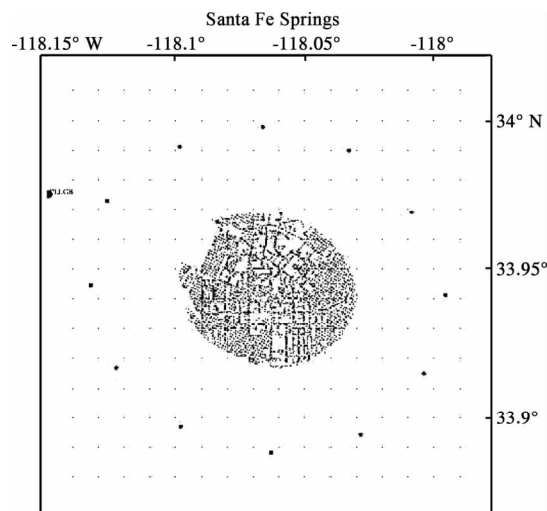


图 3 超密集地震台阵

Fig. 3 Distribution of super intensive seismic array

这样的密集地震观测技术可以有效提高信噪比,清楚显示地震波场过程。这样的集群阵列揭示了以前未发现的地震活动的空间分布、特别是深部地震活动,从而可以确定地震断层的轨迹。

2 高新技术发展的 4 大现象

密集地震观测技术的出现是和高新技术发展

紧密相联的。近些年,高新技术发展有4个方面,那就是传感器技术(特别是微机电传感器 MEMS 技术)、移动互联网技术、大数据技术、人工智能技术。可以预见,高新技术发展必将影响和推动地震观测技术的发展。

2.1 新型 MEMS 传感器

引人注意的是在 2013 年 10 月发表在美国 BSSA 上一篇题为“Suitability of low-cost three-axis MEMS accelerometers in strong-motion seismology: tests on the LIS331DLH iPhone) accelerometer”(Alessandro, Anna, 2013)的文章。该篇文章展示了安装在 iPhone 手机中 LIS331DLH MEMS 加速计和传统的 EpiSensor 力平衡加速计(force-balance accelerometer, FBA) ES-T 比较的结果,证明了这类微机电 MEMS (micro-electro-mechanical system) 传感器可以提供一种新的方式用来大量加密地震观测网观测点的数量。MEMS 这种新型传感器的产生和在地震观测中的应用为密集地震观测网和密集地震台阵提供了可利用的传感器技术,同时其价格低廉是密集地震观测技术发展的物质基础。

台湾研制的 Palert 地震预警设备的价格也只有传统地震仪的 1/20 (Wu *et al*, 2013)。图 4 是四川和台湾生产的适于移动互联网使用的地震预警台站设备。



图 4 MEMS 地震观测设备

Fig. 4 MEMS seismic observation equipment

2.2 移动互联网及其发展

近年来,移动互联网技术发展迅速,智能手机、Pad 等一系列移动互联网终端设备已经在互联网应用上代替了计算机。移动互联网以宽带 IP 为技术核心,可以同时提供语音、数据、多媒体等业务的开放式基础电信网络。特别是近几年智能

手机的出现,以及各种各样的应用 APP 软件,通过无线方式接入互联网和传输数据信息已经成为人们的生活方式。

智能移动终端所具有的小巧轻便、随身携带的特点决定了移动互联网具有接入移动性。移动终端的便携性使得用户可以在任意场合进行网络接入。移动互联网的使用场景是动态变化的,但由于用户号码具有唯一性,手机各种不同的操作系统和底层硬件终端类型具有多样性等等,因而和传统互联网不同。

移动互联网技术和地震观测技术相结合,使得地震观测技术向密集和超密集观测有了实用的数据传递和处理平台。以智能手机为基础,结合 MEMS 技术开发的地震烈度计和地震预警技术(图 5),得以迅速发展。

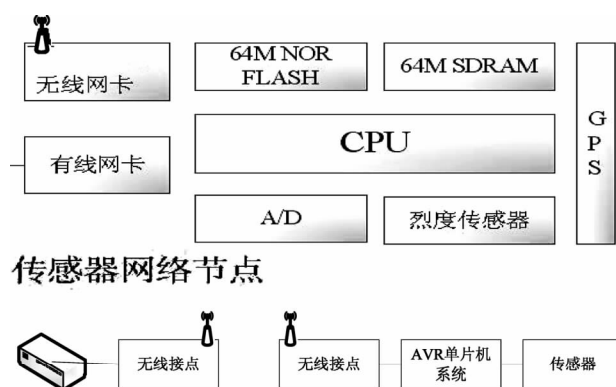


图 5 利用移动互联网传递地震信号

Fig. 5 Seismic signal transmitted by using the mobile Internet

利用移动互联网技术可以方便地进行密集地震观测网的组网,无需专门架设和租用电信运营商的专线,只需向电信运营商申请一定互联网手机数据网业务,或者移动物联网业务,获得联网的 UIM 或 SIM 卡即可完成无线接入互联网传送地震数据的应用。

密集地震观测网的工作和运行方式也与传统的地震观测网不同,为了保证地震警报的及时发出和烈度速报的自动发布,它是以传感器网络为基础的方式组网和运行的,在移动互联网基础上向物联网发展(图 6)。它是网状网,每个智能传感器,称为节点,都可以互联,它有一个和多个入网认证中心和数据中心,称为 Sink 节点,是传感器网络管理中心、原始数据和结果数据中心。

传感器网络智能发现“事件”，对于“事件”的快速反应和处理比传统的网络更准、更快。

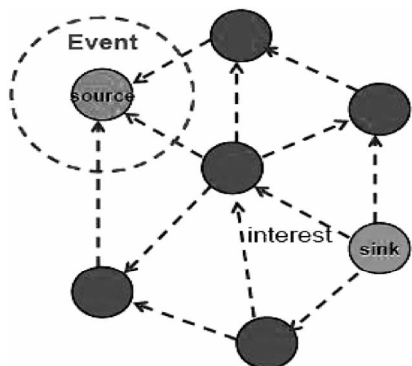


图6 传感器网络工作方式

Fig. 6 Sensor network working mode

密集地震观测网的组网可以在地震行业网基础上进行，也可以依托互联网单独组网。实际上，利用移动互联网组网，Sink点就像移动蜂窝电话一样需要建立基站，我们可称为地震蜂窝基站，如果这样的系统和大数据云平台连在一起，就被称为大数据云平台的数据汇集器。

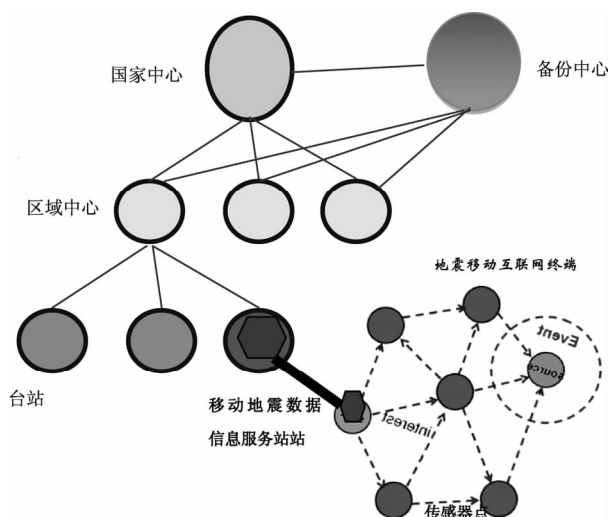


图7 密集地震观测网的组网架构

Fig. 7 Architecture of intensive earthquakes observation network

在组网的布局上，基站 Sink 实际是某一地区的管理注册服务器，任何一个台站的接入以及工作状态都由它自动管理。它按照一定的协议和规定好的密集地震观测网的管理标准，管辖台站的运行，进行事件处理，并向总中心报告（图7）。

2.3 大数据时代和地震

美国政府在2012年3月21日宣布大数据时代计划——“Big Data is a Big Deal” (<http://www.whitehouse.gov/blog/2012/03/29/big-data-big-deal>)，地质调查局（USGS）承担了重要任务。这是美国政府第二次宣布信息技术计划（第一次是在1994年宣布信息高速公路计划），此后互联网的发展几乎改变了世界。

大数据的产生和新型传感器及移动互联网密不可分。全球移动互联网智能手机已经达到26亿部，中国已经达到7亿部，各种新型传感器的数量远远超过智能手机的数量，正是它们使数据“爆炸式”增长。据美国政府估计，全球每年由各类设备产生的数据达到约1.2 ZB（1 ZB = 12 亿 TB），大数据就是在这样的基础上产生的。

大数据的倡导者维克托·迈尔-舍恩伯格曾说过“大数据是人们获得新的认知，创造新的价值的源泉。大数据带来3个转变：（1）更多：不是随机样本，而是全体数据；（2）更杂：不是精确性，而是混杂性；（3）更好：不是因果关系，而是相关关系”。因此很多人认为大数据是信息技术的新的时代，而这个发展可能像互联网一样标志着一个新的时代。

大数据就是巨量数据，巨量数据是怎么产生的？巨量数据一定是在传感器和设备从精密到简单、从笨重到智能、从昂贵到低廉、从量少到量大的过程中产生的。当前是移动互联网时代，最明显的例子就是智能手机，现在手机的能力和阿波罗登月指挥用的计算机是一样的，那时价值几亿美元。可是现在手机的成本不到1000元人民币，可以做到人手一部。所以其量大，而产生的数据是巨量的，大数据就是在这个背景下产生的。

大数据是手机、新型机电式传感器（MEMS）这些终端产生数据的源头，近十年来迅猛发展的结果。这些价廉、智能、物美、量大的终端促使数字化数据迅速增长。

如上所述，密集地震观测网完全遵循了大数据的产生规律，从精密传统地震仪到简单 MEMS 烈度计，从昂贵设备到廉价 MEMS 设备，从高精度仪器到智能化设备，从100~200 km、稀疏量少的传统台站到台间距仅有10 km乃至1 km的密集地震观测网和台阵。地震观测的数据从小数据变

成了大数据。所以说，密集地震观测网将会把地震带进大数据时代。

地震大数据的产生起源于密集地震观测，密集地震观测网无论在空间采样还是时间采样上都是传统的地震观测网无法比拟的，我国密集地震观测网将会拥有数万到数十万个传感器，地震预警和地震烈度速报催生了密集地震台网，而密集地震台网产生了巨量数据，它是地震大数据的基础。

2.4 人工智能（AI）的应用前景

人工智能（Artificial Intelligence，简称 AI），是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学，人工智能被提出已有 60 年，但是一直进展缓慢。最近人工智能成为热词，是由机器和人的围棋大战引发的，即计算机阿法狗（Alpha Go）战胜了韩国著名棋手李世石 9 段。如今，移动互联网，特别是大数据的出现，使人工智能发展迅速。特别是数据挖掘、计算机视觉、图像识别、自然语言处理、语言翻译、生物特征识别、人脸识别、搜索引擎、医学诊断、检测信用卡欺诈、证券市场分析、DNA 序列测序、语音和手写识别、战略战术指挥和机器人运用这些方面，都取得了突飞猛进的发展。

提供了重要技术机器学习的基础的互联网和大数据为人工智能开辟了美好的前景，大数据是机器学习的资源地。而机器学习的方法是深度学习，如今人工智能发展应该说是大数据的背景下深度学习的结果。当然，计算机技术的发展，特别是 GPU（Graphic Processing Unit）的广泛普及和存储技术的发展也是人工智能技术的硬件基础。

人工神经网络（Artificial Neural Networks）在地震处理和地震模拟技术方面很早就得到了应用，其实它是人工智能机器学习和深度学习的重要手段。在巨量大数据的背景下，在某些场景中，经过深度学习技术训练的机器在识别图像时比人类更好，比如识别猫、识别血液中的癌细胞特征、识别 MRI 扫描图片中的肿瘤。谷歌 AlphaGo 学习围棋，也是在大数据背景下深度学习的结果，没有互联网对李世石的围棋大数据学习，机器也不可能获胜。

当前人工智能对于地震科学研究和技术带来了巨大挑战和机遇。美国最近研发的利用智能手

机建立地震预警的 MyShake 系统和中国地震台网中心的地震信息播报机器人都是人工智能应用在地震方面的案例。人工智能是一门极富挑战性的科学，在地震大数据时代，它和地震科学结合起来，必将对地震学的推动开辟新的前景。

3 地震学的变革

前述高新信息技术发展的 4 个现象其实就是“互联网+”的重要体现，它必将深入各行各业，产生新的模式和新的业态。地震观测在这 4 大现象的推动下已经清晰地看到新的密集观测方式的产生，改变了地震科学研究和地震观测技术的传统模式。

3.1 突破传统地震台网概念

如前所述，密集地震观测网突破了传统的地震台网规模，是一种新的地震观测网，由于台间距为 10 km 以下，甚至 1~2 km 或者几百米，它已经突破传统地震台网的概念了。

（1）由于密集，不需要非常严格的地震台站的台址和环境条件；

（2）由于密集，不需要非常灵敏的地震仪和传感器，因此价格便宜；

（3）由于密集，不需要专门建设台站，只需简单安装。

（4）由于密集，台站数量大，仪器设备需要智能化和高可靠性，基本可以做到免维护。

密集地震观测网在其监测的区域里对微小地震的监控能力也并不会下降，地震台站的大数量或高密度在某种程度上代替了量少、高灵敏的传统地震台网。

密集地震观测网的发展，特别是用于地震烈度和地震预警。它对地震观测的主要突破如下：

（1）地震烈度速报直接产出

密集地震台网带来的第一个突破，就是仪器烈度速报直接产出，日本是最早利用密集地震台网实现烈度速报的国家，使地震烈度信息在震后 1~2 min 就可以快速发布。密集地震预警网可以快速测定台站的速度、加速度及位移，由于台站是高密度的，直接标出台站的振动数值，就是很好的烈度速报图（图 1）。日本的地震烈度速报的产出速度就是地震波掠过台网的速度，在震后很快

就可产出,这对地震应急响应和紧急救援具有至关重要的作用。

(2) 地震预警取得了实际应用

密集地震观测网的第二个突破就是使地震预警成为可能。日本地震预警系统自 2007 年正式运行以来,已经有数十次成功地震预警的实践,包括成功预警高速铁路采取措施而减轻损失。我国也具有了像四川芦山 7.0 级地震和其他 5.0 ~ 6.0 级地震实现地震预警的实例。

2014 年 8 月 24 日旧金山纳帕 (Napa) 发生了 6.0 级地震。加州理工学院地震专家郝克森 (Aegill Hauksson) 表示,在震源深度为 7 英里的地震发生后 10 s,地震预警系统发出了第一个警报。尽管据说有在 150 名自愿者,只有一名自愿者在旧金山收到了警报。美国地震学家认为地震预警技术是近十几年地震观测技术最重要的突破和进展。

(3) 更快测定地震参数

密集地震台网带来的第三个突破,是在高密度地震观测网实践中得出的,那就是地震参数的快速测定也必将改变。对于台间距为 10 km 的高密度台网,实际上首先观测到的地震台站位置,就已经是传统地震定位 I 类精度了——震中。台湾使用首先收到地震的几个台站的中心点或前 8 个台站定位,可以在 20 s 之内速报地震三要素,这是传统的地震台网无法比拟的。

至于地震震级也必将由于密集地震台网的出现而更加精确,我们都知道矩震级 M_w 是公认的比较理想的震级标度,其概念是金森博雄 (Kanamo-

ri) 提出来的,实际上是地震断裂来决定的,它具有不饱和的特点。由于密集地震台网观测得到的最大 PGA 或 PGV 或 PD 覆盖区的面积与 M_w 具有线性关系,这样利用密集地震台网观测到的最大振动的面积 (图 8),就立即可以测定出 M_w ,其速度已经远远超过传统的远台测定 M_w 的方法,而且要准确的多。

(4) 近场快速跟踪地震破裂过程

密集地震台网带来的第四个突破是跟踪地震破裂过程。目前由于地震台网不够密集,无法使用震中附近的台站观测数据来反演地震破裂过程,这是由于近台记录地震波形的复杂,使反演地震破裂过程很难实现。传统的地震台网只能用远台的有限的面波资料来反演地震破裂过程,实际上带来很多不确定性,一个大地震会出现不同的结果。密集的地震台网将改变这一状况,它可以跟踪大地震的破裂方向和过程,使地震破裂过程产出丰富的直接观测数据,使地震破裂过程的结果可以快速得以直接判断。观测到地震震后的过程,还可以据此研究和模拟地震孕育发生和产生的全过程,使人们更加深入了解地震。图 9 是何加勇采用最基本的惠更斯理论,使用近场地震台站记录反演汶川地震的破裂源,以迅速追踪地震破裂过程。

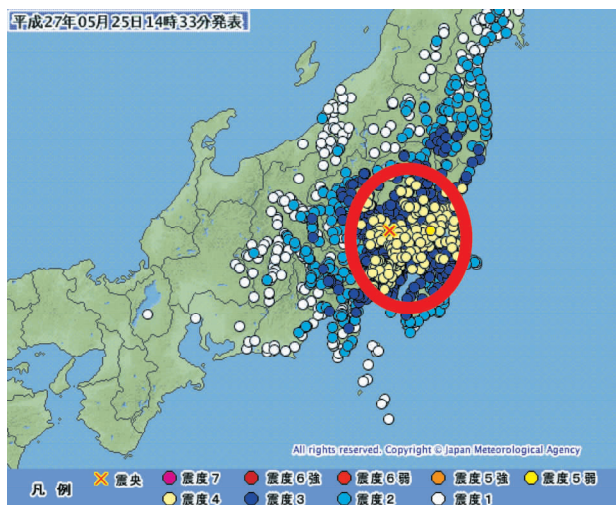


图 8 快速测定地震参数

Fig. 8 Rapid determination of seismic parameters

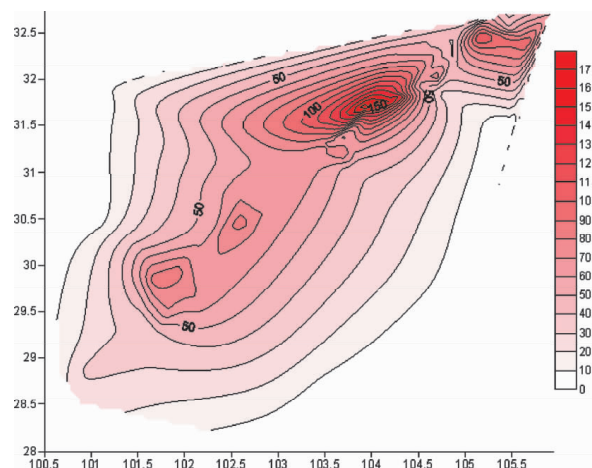


图 9 快速近场跟踪汶川地震破裂过程 (何加勇)

Fig. 9 Rapid near-field tracking for the rupture process of the Wenchuan earthquake

(5) 动态监视地下结构

密集地震台网带来的第五个突破是动态监视地下结构的变化。这样一个密集地震台网,将会

记录到非常多的中小地震，成都市地震预警试验台网自 2013 年 1 月运行以来，该系统监测到的 2.5 级以上地震就 500 多次，这些中小地震就像物理探测的震源一样，可以用来探测地下结构，动态监视地下的变化。同时还可以实时成像，成为所谓的动态“地下云图”，为探索地震预测提供可视化资料，这是稀疏台网无法做到的（图 10）。

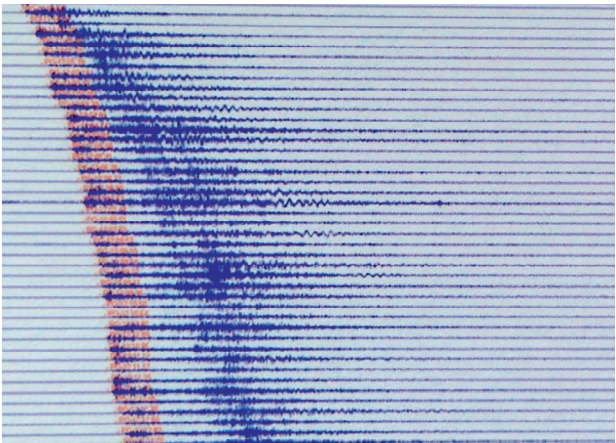


图 10 成都密集地震台网小地震记录
Fig. 10 Small earthquakes recorded by the Chengdu intensive seismic network

密集地震观测网必将推动地震学、特别是地震观测学，向实时动态地震学、应急地震学发展。一些新的概念将会产生，新的地震参数处理方法，新的地震参数和参量，新的地震动参数和参量也会出现。密集地震台网的出现，使我们面临一系列新的课题和挑战，我们的思想和观念也必须随之改变。密集地震观测网到底还会为地震观测学、地震学带来了什么突破？传统地震台网，我们可以称之为骨干地震台网在地震观测系统中将会发挥什么样的作用？也是我们必须研究的。

3.2 超密集地震台阵的新发现

超密集地震台阵的观测使地震观测有了新的发现，图 11a 所示为圣菲斯普林斯超密集地震台阵，在距离台阵中心 35 km 处发生了一个 $M_L3.4$ 地震。那时只有 60% 传感器正在工作，仍可以清楚观察地震活动影像（Earthquake Movie）。从活动图像上可以清楚看到地震波传播的图像以及各种震相的速度变化（图 11b）。

图 12 是日本的实时地震动活动图像，全国共 4 000 个台站每隔 2 s 显现一次当前时间的地震动加速度峰值，地震动的活动图像几乎实时的显示

地震动的情况，监视着全国地震情况，地震发生时便可立即发出警报。

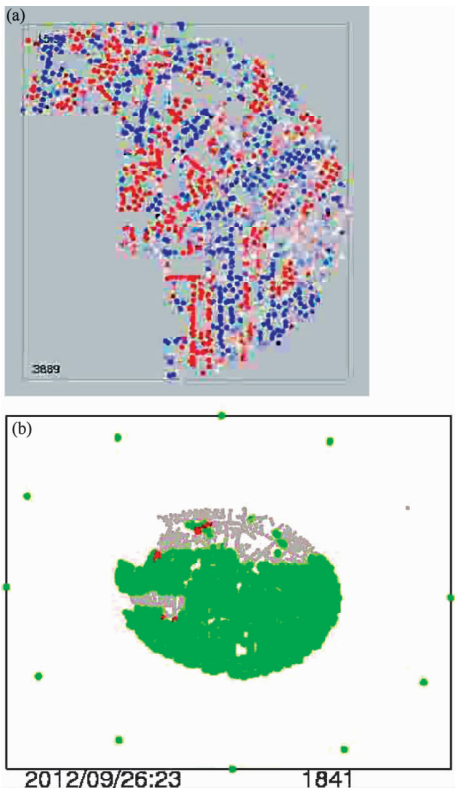


图 11 圣菲斯普林斯超密集台站分布 (a) 及其记录的地震活动影像 (b)
Fig. 11 Distribution of super intensive seismic stations (a) in Santa Fe Springs and images of earthquake activity recorded by station array (b)

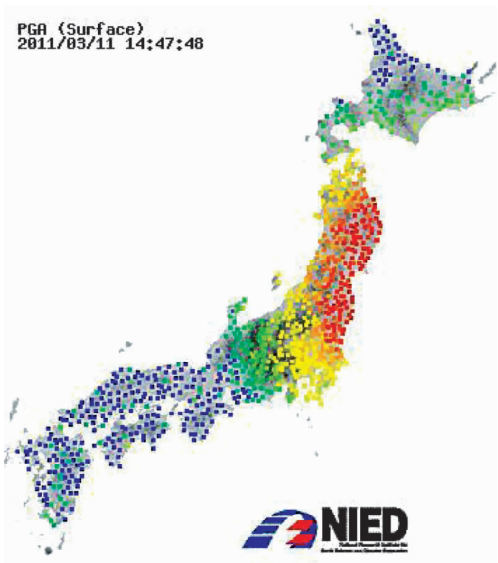


图 12 日本的全国地震动图
Fig. 12 National earthquake motion map of Japan

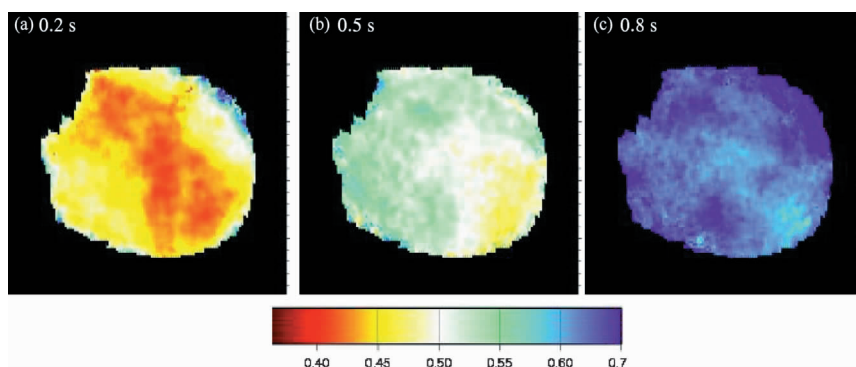


图 13 超密集地震台阵的地震波速度图像

Fig. 13 Seismic velocity images of super intensive seismic arrays

美国加州理工大学 (Caltech) 使用 5 200 个台站的超密集地震台阵 (Inbal *et al*, 2015; Lin *et al*, 2013), 发现沿着纽帕—英格伍德断层 (Newport – Inglewood) 有一种小级别地震, 而其震源深度超过 24 km。据分析认为这是一种新类型地震, 其因所处深度几乎超出地壳而不能被常规地震仪检出, 只有超密集地震台阵才可以监测到这种新型地震。这种新型地震几乎穿透地壳而接近地幔, 其发生深度前所未见。因此科学家无法用目前已知的理论加以解释而陷入困惑, 这种新型的地壳深层地震的最大震级仅为 2 级, 推测累积的震动作用很可能会扩延成毁灭性强震。于是在 2016 年 10 月初他们预测加州发生大地震的概率上升了 100 倍。这在加州引起了不小恐慌 (<http://mini.eastday.com/a/161011181059104-2.html>)。但是地震学家也发现 2012 年苏门答腊发生的 8.6 级地震的震源深度也超过 24 km, 这个地震的主要能量传向地球内部, 而地面破坏不大。这又提示地球及人类受到神秘力量保护而免于遭受毁灭性灾难。在台湾使用超密集地震台阵的相变速度变化数据, 进行大地震地应变的观测和测量也取得了重要的进展。

3.3 向地震大数据思维转变

由于密集地震观测技术将地震行业带进了大数据时代 (当然地震大数据并非完全由密集地震观测网所产生, 移动互联网也会产生大量的社会地震数据), 地震数据变成为巨量的数据。以巨量数据来观测和研究地震必然要改变人们的思维, 地震大数据将推进传统地震学从依靠自身判断 (依靠计算模型) 做决定到依靠数据做决定的转变。

地震数据从小数据到大数据就显示了大数据

思维。地震大数据思维表现在如下的几个方面:

(1) 地震大数据是巨量数据, 是多维、多种、非常繁杂的广泛的数据

地震小数据, 主要拘泥传统地震行业产生的观测、调查、试验、考察数据, 种类少、采样率低。例如观测数据, 由于地震台站观测仪器精密昂贵, 地震观测技术复杂, 因此地震观测台站间距一般为 30 km, 有的地区甚至更大, 地震台网稀疏。信息的匮乏迫使地震研究趋向于采用因果关系范式, 去理解问题并做出决策。因为数据少, 希望能从这些少量的数据中找出因果。但是当处理出了问题, 可能因果关系就无法发现, 结果的可信度也常被质疑。

地震大数据突破了密集地震观测技术, 地震观测数据成百倍、千倍、万倍的增加。除了密集地震观测所产生的数据, 还包括非地震行业产生的地震相关的数据, 社会感知的地震数据, 例如地震灾害数据、地震宏观现象数据以及一些传统地震学所认为的不是地震的数据等等, 这些数据已经远远超过传统地震学的范畴, 不仅跨学科而且可以深入到社会科学领域。所以地震大数据已经突破了传统地震学数据的概念, 它表现为多维、多种、繁杂、多样的巨量数据, 这些巨量数据完全符合大数据的大量、多种、产出快、有价值的点。

(2) 地震大数据是找关系

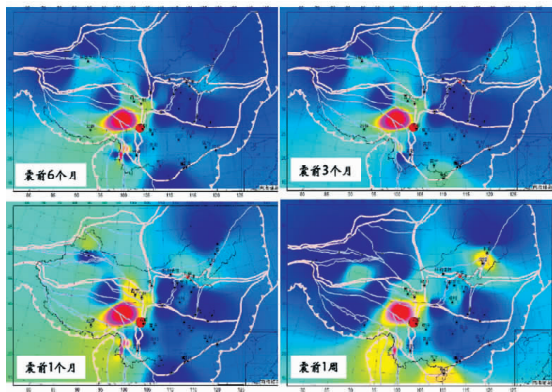
大数据时代对于数据的研究不再拘泥于对因果关系的探究, 这将会使地震行业有条件向关联、非关联等相关关系探究的转变。在商业和金融已有很多大数据技术应用的经典案例。在地震大数据应用上, 中国地震台网中心张崇立等的前兆异

常度的案例说明了大数据应用前景。

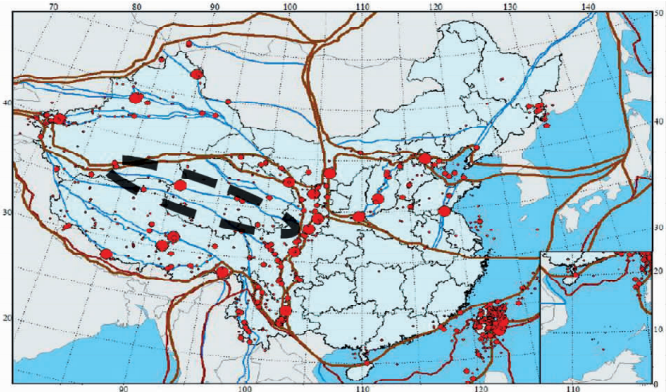
案例很简单，就是将汶川地震前每周会上提出的前兆数据异常数和在划分的二级块体里台站的比例称为前兆异常度。按照大数据的方式，不管这些数据的手段和学科（地震前兆观测数据包括地形变、地磁、地电、地下流体、地球化学、地表面振动、地震等学科与几百种观测手段和仪器），也不管它的空间维度和结构，只要出现异常就带入异常度公式计算。

我们定义“异常活动度”为表示某一地块（或某一地质构造单元）在某一 t 时刻表现为异常活动的剧烈程度的参量。一般地，理论上表示为

$$A_{ZCL}(\varepsilon, t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow S} \frac{N_A(\varepsilon, t)}{N(\varepsilon, t)}. \quad (1)$$



(a) 汶川地震前兆异常度演变



(b) 巴颜喀拉块体与地震活动性分布图

图 14 地震前兆异常度

Fig. 14 Earthquake precursory anomaly

使用大数据关联方法进行地震前兆异常度的研究表明：地震前兆观测数据是和构造体有关的，它们是相关联的。汶川地震前兆异常度的变化，和巴颜克拉块体有关联，这和各方面研究成果是一致的。因此美国地震调查局（USGS）承担的大数据计划也是从全球地学数据中寻找地震复发率的研究。

(3) 大数据使处理简单

传统的小数据时代，在数据的限制无法突破的情形下，数据处理算法的研究越来越深入，发明的算法越来越复杂。如测定地震参数的算法和地震定位的方法，数量越来越多，越来越复杂，速度也越来越慢，需要的计算机能力越来越高。如前所述，当数据量以指数级扩张时，原来在小数量级的数据中表现很差的简单算法，准确率会

式中， A_{ZCL} 是一个无量纲的参量。 S 用来量度与孕育某个震级水平的地震相匹配的、且不可再分的基本地质构造单元的理论空间尺度，它与根据研究对象的需要所设定的震级下限有关。 ε 是对应于 S 的地质构造单元之特征空间尺度的参量，它是 S 的近似值，与“地震-构造活动”关系研究结果的准确性和精细程度有关。 N_A 表示某一具 ε 特征空间尺度的地质构造单元内在 t 时刻呈异常活动状态的质点数， N 表示与 ε 对应的地质构造单元内质点的总数。

对汶川地震前每周的异常度的前6个月到前一周进行计算。结果发现前兆异常度（图14a）和二级巴颜克拉块体（图14b）有很好的关联性，而用其他划分方法找不到相关性。

大幅提高。大数据的简单算法比小数据的复杂算法更有效。密集地震台网的定位基本就是最先到达台站的平均间隔，而且比传统台网定位准确。而震级的计算根本不需要量取震相幅值，而是直接计算密集地震台网地震波扫过后最大震动的面积进行推算，这个面积其实就是金森博雄的矩震级公式，只需转换一下系数，处理快速简单而准确（图15）。

(4) 大数据使审慎决策到快速决策

传统地震台网处理和决策都非常慎重，通过收集和分析数据来验证这种假设；如果有一些数据有问题，就影响原有假设，决策与行动是审慎的。小数据的地震速报可以较快地进行自动速报，但是处理复杂，要多中心审慎决策，特别是终报更需要审慎决策。原因是小数据依靠模型解算方

程, 由于空间数据间隔太大, 往往初值确定不准确, 大量计算可能仍然得不到可靠的结果, 必然影响快速决策。

密集地震台网的大数据, 不再受限于传统的方式, 可以简单而准确得到地震的位置和大小,

无需反复地检查、修定和复核。足以做出快速决定。地震预警的警报可以在数秒内发出, 地震烈度速报也可以在几分钟内发出。快速决策对于大地震的防震减灾和挽救生命无疑是具有重要的意义。

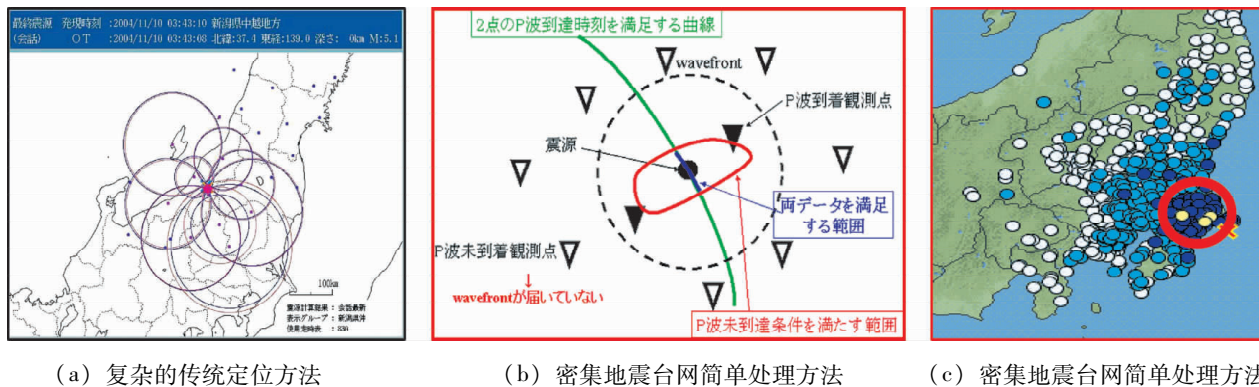


图 15 从复杂到简单的地震定位处理方法

Fig. 15 Methods of seismic location from complex to simple

3.4 发展人工智能推进智慧地震

人工智能在大数据技术出现后, 发生了突飞猛进的发展。跨界创新是大数据时代的特征, 而人工智能技术恰恰可以在大数据基础上推进跨界创新, 同样地震在人工智能应用上, 有着非常重要的应用前景, 最重要的就是向智慧地震推进, 即更透彻的感知、更全面的互联、更深入的智能化。

(1) 人工智能手机地震预警

美国开发的智能手机 MyShake 预警系统就是一个很好的案例 (Kong *et al*, 2016)。智能手机比传统地震台网更为广泛和普及, 它内置了可用于检测地震的加速度计, 使用智能手机的内置传感器来收集数据和分析地震。智能手机 MyShake 系统可以从日常的各种震动中至少检测到距手机 10 km 以内的 5 级地震。这些数据汇集到观测网中心, 经过一定的算法处理, 可以实时测定地震的位置和震级, 发出地震预警信息。这对没有地震预警系统的区域, 可系统地提供地震预警。而在有预警系统的区域, MyShake 系统是对专业预警原系统预警能力的补充和增强。该系统地震波形记录还可以用来提供快速地震烈度图, 以评估地震对建筑物的影响, 还可以获取地球内部浅层结构图像和地震破裂过程。

该系统利用了人工智能技术, 采用了机器学习

习的办法, 在人为噪声和地震信号中分离出 18 种信号, 经过震动台和实际地震的实验, 在深度学习的基础上, 得到了识别地震信号的 3 种特征 (图 16), 有效地在智能手机信号里识别出地震, 从而开发了人工智能手机地震预警系统。

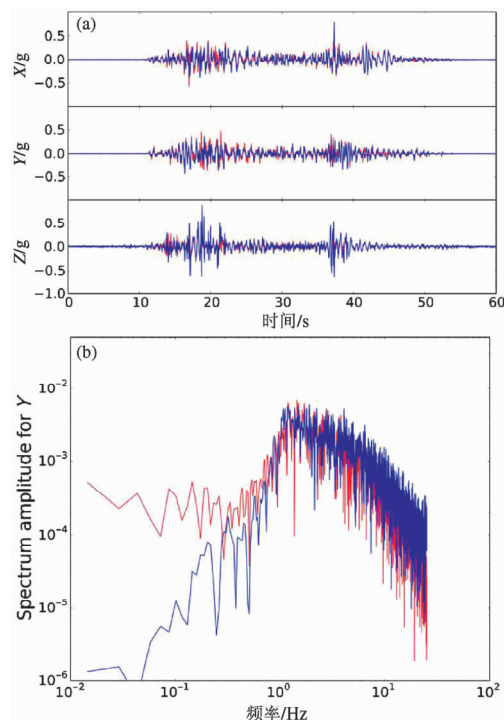


图 16 智能手机的噪声

Fig. 16 Noise of smart phone

通过对各种智能手机的噪声进行测试,了解智能手机的噪声背景情况,然后进行三维振动台试验,输入一个真实的地震数据,对固定和不固定手机波形的频谱进行比较,如图17所示。图17a为三星Galaxy S4手机三分量加速度从2014年8月23日16:00开始的12小时记录。它显示了人类的日常运动的加速度为第一个8小时,然后在夜间出现平稳。图中的红框表示图18b的时间窗口;图17b显示图17a的1分钟数据,这1分钟是距纳帕M6.0地震

38 km处的手机记录。地震发生在当地时间上午03:20:44;图17c为手机记录特征图,显示IQR与ZC的对地震的区分,蓝点是人类活动,红点是地震特征;图17d区分地震3个特性的三维图。

利用人工智能方法对手机振动和地震记录进行区分,在18种特征信号中识别出了最好用的3个特征:加速度矢量和的四分位距(IQR)、最大的过零率(ZC)和累积绝对速度的加速度的矢量和(CAV)(图18)。

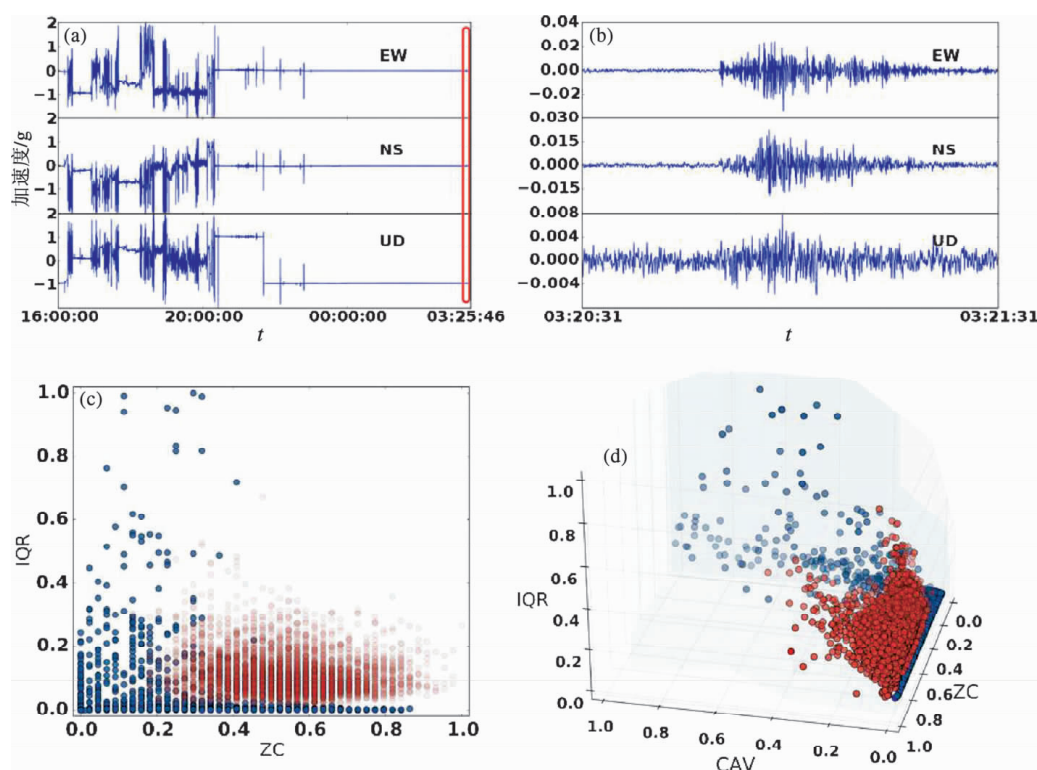


图17 人工智能手机振动和地震识别

Fig. 17 Vibration of artificial intelligence phone and earthquake identification

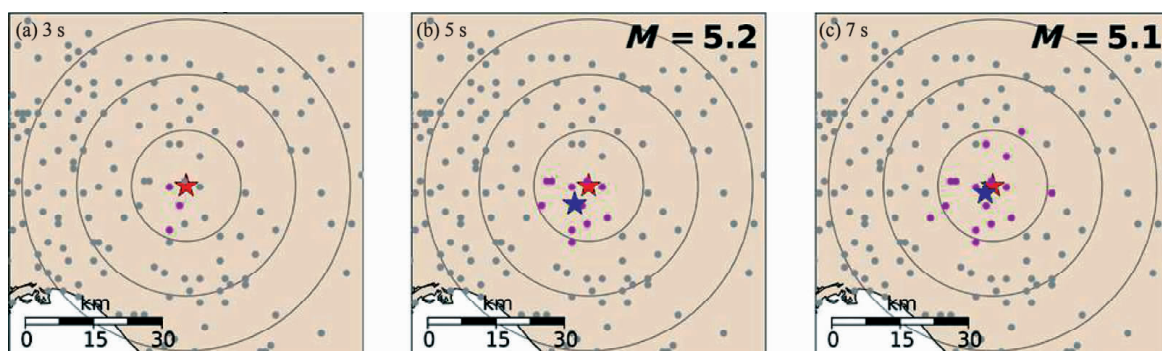


图18 地震事件预警实际检测

Fig. 18 Real detection of earthquake early warning

图 18 是地震预警效果,在地震事件发生 3 s, 5 s, 和 7 s 后,模拟 2014 年拉哈布拉 $M5.1$ 地震触发检测,灰色点是手机点的位置,粉红色表示单个触发。红色星是真正地震的位置,圆圈是 10 km、20 km、30 km 半径线。蓝色星代表在 5 s 内检测到的事件位置,在每个图中的震级在右上角显示。10 km 范围内 98% 内的地震记录可以被确认和识别。随着距离的增加和幅度的减小,成功率会降低,93% 的日常运动振动可以很好地被确认和识别。人工智能技术使手机有了地震智慧,通过技术手段和互联网让公众参与到地震工作中来,并为其提供精细化和个性化的服务,实现人人参与地震工作,人人享受地震服务。

(2) 地震信息播报机器人

地震信息播报机器人是中国地震台网中开发的智能速报工具,图 19 是地震信息播报机器人发布的新疆阿克陶县 6.7 级地震微信。

新疆克孜勒苏州阿克陶县发生 6.7 级地震(公测)



图 19 地震信息播报机器人产出的震中分布图和地形图

Fig. 19 Epicenter distribution and topographic maps generated by earthquake information broadcasting robot

这个用时 3 s 的机器人的地震速报内容已经不仅仅是地震参数的速报,而是智能的产出和地震相关的信息:

“据中国地震台网正式测定,11 月 25 日 22 时 24 分在新疆克孜勒苏州阿克陶县发生 6.7 级地震,震源深度 10 km,震中位于北纬 39.27° ,东经 74.04° 。

根据中国地震台网速报目录,震中周边 200 km 近 5 年来发生 4 级以上地震共 83 次,最大地震是 2015 年 12 月 7 日在塔吉克斯坦发生的 7.4 级地震。

本次地震震中周边 10 km 内的村庄有阔勒坡其,50 km 内的乡镇有木吉乡。距离最近的县级市乌恰县 116 km,距离最近的地级市喀什地区 169 km,距离最近的省会城市乌鲁木齐市 1 238 km。

2000 年,阿克陶县辖 2 个镇、11 个乡,面积 24 555.06 km^2 。阿克陶县 2003 年人口为 172 031 人。2012 年,阿克陶县实现生产总值 16.02 亿元,比 2011 年增长 15.1%。海拔 1 325 m。”(以上内容由机器人于 2016 年 11 月 25 日 22 时 41 分 51 秒自动编写,用时 3 s,公测阶段仅供参考)

地震信息播报机器人,集成了人类智慧,从大数据中迅速判断快速的向公众提供不一个地震参数还要详细的地震信息速报,可以提供更加个性化的服务。

(3) 跨界互联网大数据的地震应急

在“互联网+”地震时代,产生了地震互联网大数据,一个地震微博将会影响数亿人,产生的数据足以称为大数据,它完全反映一个地震和各行各业的关联,反映社会在地震时的状态。根据互联网的大数据得到的和地震关联的数据信息,既快速又准确,加快了大地震应急和救援的速度和能力。例如互联网手机数据产生的大数据热力图表示了人口的实时流动,就是实时人口分布图,在发生大地震时它立刻指明了生命救援的方向(图 20)。

图 21 是中国地震台网中心地震信息速报机器人产生的 2016 年 7 月 31 日广西梧州市苍梧县地震人口热力图,从图中可以看出在距震中 20 km 流动人口稀少,由此可以判断此次地震造成人员伤亡很小。

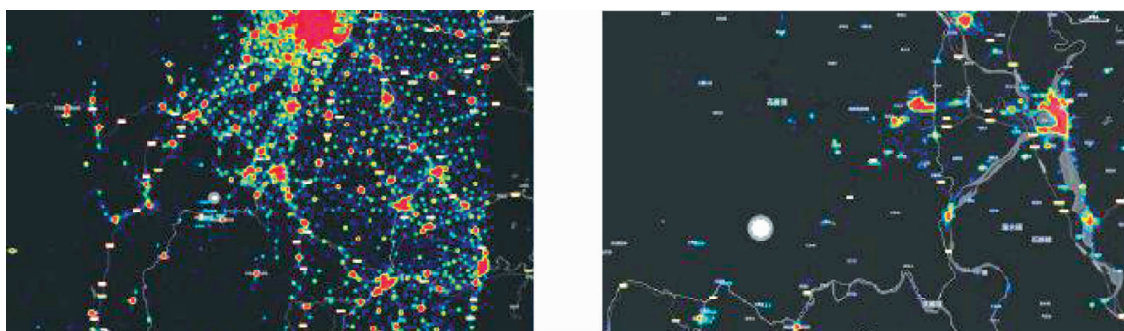


图 20 2015 年四川乐山 5.0 级地震人口热力图

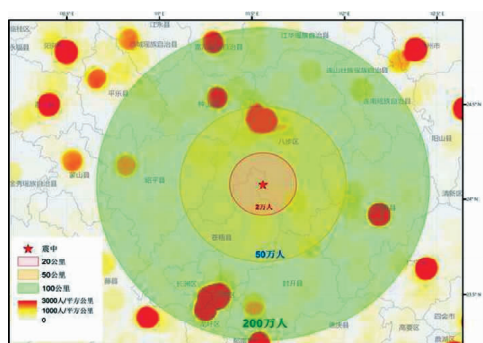
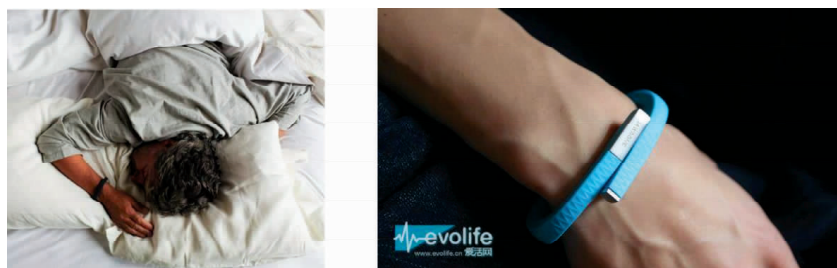
Fig. 20 Population thermodynamic map of Sichun Leshan $M5.0$ earthquake in 2015

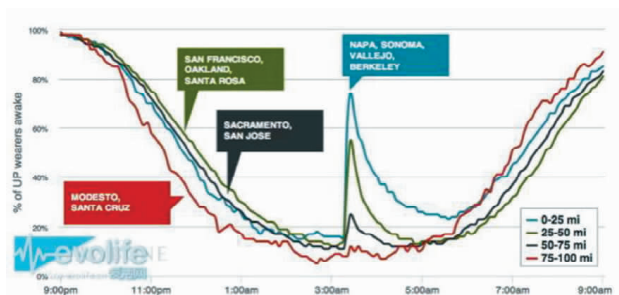
图 21 2016 年 7 月 31 日广西梧州苍梧县地震人口热力图

Fig. 21 Population thermodynamic chart of Guangxi Wuzhou Cangwu County $M5.0$ earthquake on Jul. 31, 2016

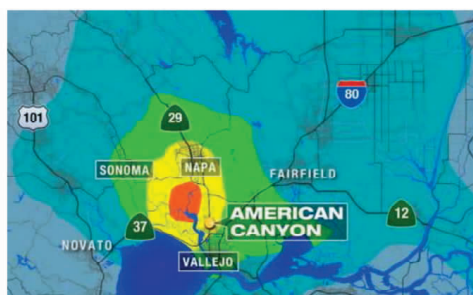
2014 年 8 月 24 日美国旧金山纳帕发生了 6.0 级地震，根据消费电子产品 Jawbone 的数据，地震发生时 93% 的居民都被震醒了。Jawbone 公司对湾区成千上万的 UP 手环佩戴者进行了睡眠追踪，这个手环支持计步和睡眠追踪功能（图 22）。数据表明在震中附近的纳帕、索诺玛等地，几乎所有入睡的手环用户都被地震惊醒。随着距离震中越来越远，地震能吵醒的人迅速减少，在旧金山和奥克兰地区有一半以上的 UP 手环佩戴者在地震中醒来。到了 75 英里外的莫德斯托和圣克鲁斯，睡着的用户几乎没有受到任何影响，45% 接近地震震中的人在地震发生后没有再入眠。这被称为 Jawbone 手环绘出“地震源”。



(a) UP 手环



(b) 手环地震惊醒记录曲线



(c) 手环惊醒“震动图”

图 22 可穿戴手环绘出“地震源”

Fig. 22 Earthquake origin drew by wearable bracelet

综上所述,从密集地震观测网络、超密集地震台阵到地震学新的发现,从密集地震观测数据到地震大数据时代,从地震大数据发展到人工智能,从人工智能发展到智慧地震,这就是高新技术给地震学带来的新模式和变革。我们的时代是科技高速发展的时代,高科技会推动地震学的突破,但是更重要的是改变观念和思维,这样才能有创新。

参考文献:

- 东方头条. 加州出现新型地震,显示有神秘力量保护人类? [EB/OL]. (2016-10-11) [2016-11-25] <http://mini.eastday.com/a/161011181059104-2.html>.
- 好奇心日报. 在加州地震后智能手环比人们知道得更多[EB/OL]. (2014-08-28) [2016-11-25] <http://www.evolve.cn/html/2014/79128.html>.
- 何加勇. 2009. 地震动参数速报技术研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 日本气象厅 2013 年 12 月 14 日 12 时 06 分日本千叶近海 5.5 级地震烈度速报图 <http://www.jma.go.jp/jp/quake/> 平成 25 年 12 月 14 日 13 时 10 分气象厅发表.
- 泽仁志玛,陈会忠,何加勇,等. 2006. 震动图快速生成系统研究[J]. 地球物理学进展,21(3):809-813.
- 张晁军,陈会忠,蔡晋安,等. 2014. 地震预警工程的若干问题探讨[M]. 工程研究—跨学科视野中的工程,6(4):344-370.
- 中国地震台网速报. 2015 年四川乐山 5.0 级地震人口热力图[EB/OL]. (2015-01-15) [2016-11-25] <http://weibo.com/u/1904228041?topnav=1&wvr=6&topsug=1>.
- ALESSANDRO A D, ANNA G D. 2013. Suitability of Low-Cost Three-Axis MEMS Accelerometers in Strong-Motion Seismology: Tests on the LIS331DLH (iPhone) Accelerometer[J]. BSSA, 103(5):2906-2913.
- INBAL A, CLAYTON R W, AMPUERO J. 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.
- KONG Q K, ALLEN R M, LOUIS S, et al. 2016. MyShake: A smart-phone seismic network for earthquake early warning and beyond[J]. Science Advances, 2(2):e1501055-e1501055.
- LIN F C, LI D Z, ROBERT 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):45-56.
- WU Y M, CHEN D Y, LIN T L, et al. 2013. A High-Density Seismic Network for Earthquake Early Warning in Taiwan Based on Low Cost Sensors[J]. Seismological Research Letters, 84(6):1048-1054.
- DB/T 59—2015, 地震观测仪器进网技术要求—地震烈度仪[S].

The Challenges Brought by Dense Seismic Observation

ZHANG Chaojun¹, CHEN Huizhong²

(1. China Earthquake Network Center, Beijing 100045, China)

(2. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract

Dense seismic observation technology has been quickly developed in 21st century, Dense Observation Network and Dense Seismic Array are established with seismic intensity rapid reporting, earthquake early warning and the earthquake science research deepening. The development of dense seismic observation technology is tied with high technology, there are four aspects of the high technology, the sensor technology, especially the MEMS technology, the mobile Internet technology, the big data technology, and the artificial intelligence technology. The development of seismology must be affected by the development of high and new technology. This paper discusses the dense seismic observation technology bringing change about seismology, change the traditional mode, breakthrough tradition concept of the seismic observation network. Seismic activity image has brought new discoveries for earthquake prediction; big data for earthquake promotes the traditional seismology judging from relying on their own (depending on model) to change the decision to rely on data. Artificial intelligence technology can promote the seismology cross-border innovation on the basis of big data.

Keywords: dense seismic observation; innovation; mobile Internet; big data; artificial intelligence