

地震预警系统的实践及与实时地震学发展之间的关系

李佳威¹, 秦玉峰², 蒋策¹

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2. 国家海洋技术中心, 天津 300112

摘要 地震预警系统在过去30年里逐渐从科学界的讨论变成了防震减灾的实践。在调研地震预警系统发展的基础上, 梳理了近年来不同国家、不同机构围绕地震预警开展的研究。介绍了采用简易烈度计(MEMS)和智能手机来实现地震预警的一种尝试性方法。在传统分析地震预警系统发展空间范围的基础上, 分析预警系统发展时间节点信息, 讨论地震预警系统的实践与实时地震学发展之间的关系。

关键词 地震早期预警; 实时地震学; 历史和现状; 众包

自20世纪80年代起, 随着数字地震学和通信、计算机自动处理技术的发展, 地震早期预警系统(earthquake early warning system, EEWS, 简称地震预警系统)应运而生^[1]。该系统旨在快速提供关于地震参数(如震中、震级和发震时刻)和强地面运动参数的可靠估算。进入21世纪后, 地震预警系统可以在地震发生后的几秒至几分钟内提供警报, 此时破坏性较强的地震面波没有到达某些特定的区域(例如预警“盲区”以外的近震区), 而这些区域也极有可能是极震区, 因此该系统在防震减灾方面具有非常巨大的潜力^[2-3]。

现有的地震预警系统包含2类系统, 即异地地震预警系统和现地地震预警系统。异地(front detection)地震预警利用震源区附近的监测台网向远处的潜在破坏区进行预警; 而现地(onsite)地震预警相当于在目标防御区周围画出“保护圈”, “保护圈”检测到任何不利的信号都将立即发出警报^[4]。值得注意的是, 在异地预警不能发挥作用的区域, 现地预警通常能够提供可用的前导时间(leading time); 当异地预警可以发挥作用时, 其通常可提供充足的前导时间。为了更好地发挥地震预警系统的优势, 这2类系统有相互融合的趋势。

越来越多的国家和地区意识到地震预警系统在防震减灾方面的巨大潜力^[5], 开始大力发展符合当地实际的预警系统。世界上第1个运行且投入公共服务的是墨西哥地震警报系统(Seismic Alert System, SAS)^[6]。进入21世纪, 随着地震

预警方法与技术的更新, 越来越多的预警系统开始投入实时测试, 地震学家划分了2类预警系统且介绍了与之相关的预警成功或失败的例子^[7]。中国也有学者从中国防震减灾的实际需求出发对国内外地震预警系统的方法和技术做过总结和整理, 相关研究表明, 在中国一些地震重点监视防御区(如首都圈、南北地震带、东南沿海地区等)布设地震预警系统是可行且迫切的^[8-13]。中国地震预警的发展非常迅速, 国家地震烈度速报与预警工程现在已经正式立项并完成了台址勘测工作。作为该工程的重要试点区, 福建省地震预警系统的建设取得了重大进展, 并计划在2017年开始向公众提供预警服务^[14]。另一方面, 随着“众包(crowdsourcing)”概念的引入, 地震学家和工程师开始尝试采用简易烈度计(MEMS)与智能手机相结合的方式, 实现一种全新的地震预警。

大数据时代的来临, 使得地震学的许多领域都在发生深刻变化, 其中包括建立在测震学基础上的地震预警系统。实时地震台网连续记录获得海量的地震数据, 而海量的地震数据反过来使得相关领域发生变革, 进一步推动相关学科的发展。本文调研了全球地震预警系统的发展, 总结过去30年来不同国家和地区在地震预警实施方面的研究和工作, 特别关注了大数据时代背景下地震预警系统研究的新动向。通过对当前地震预警系统发展现状的总结和梳理, 希望为地震预警系统的建设和规划提供相应的参考和借鉴。

收稿日期: 2016-12-28; 修回日期: 2017-02-13

基金项目: 中国地震局“监测预报改革设计研究——地震预测预报20年发展设计”专项

作者简介: 李佳威, 硕士研究生, 研究方向为地震早期预警, 电子信箱: lijw@cea-igp.ac.cn

引用格式: 李佳威, 秦玉峰, 蒋策. 地震预警系统的实践及与实时地震学发展之间的关系[J]. 科技导报, 2017, 35(5): 65-72; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.05.008

1 已建成地震预警系统并投入使用的国家和地区

截至2016年12月,已建成地震预警系统且投入实际使用的国家和地区主要包括墨西哥、中国台湾省、土耳其、罗马尼亚、日本、韩国。

1) 墨西哥。墨西哥现有的预警系统有2套台网^[15-17],第一套是为墨西哥城(Mexico City)和格雷罗州(Guerrero)提供预警服务的地震警报系统(SAS)。1985年的墨西哥地震造成了超过1万人死亡和3万人受伤,在吸取此次的教训后,SAS经过建设于1991年开始为25家学校和地铁提供预警服务,并最终于1993年开始面向公众预警。SAS现在由48个沿格雷罗海岸布设的加速度计组成,该套预警系统是世界上首个面向公众提供预警服务的地震预警系统;第二套是为瓦哈卡城(Oaxaca)提供预警服务的瓦哈卡地震警报系统(Seismic Alert System of Oaxaca City, SASO)。SASO由36个分布于瓦哈卡城附近的地震台站组成。由于该地的潜在发震区距离瓦哈卡城距离很近,所以该系统使用了数据处理时间比较短的算法。SASO在2003年开始正式提供预警服务,但由于资金的短缺以及用户较少而面临着一系列运营和使用方面的困难。

2) 中国台湾省。台湾省在1995年就已建成了地震快速报警系统,这套系统在1999年集集地震发生后的102 s内快速地估算了震源参数、震动图等信息,为抗震救灾提供了非常重要的信息支持^[18],而真正促进台湾省地震预警系统发展的是1986年的花莲地震。在这次地震中,距离震中120 km远的台北市由于盆地放大效应而致灾,地震学家意识到,如果当时有地震预警系统发出有效预警信号,那么台北市的损失将有可能大大减少^[19]。因此,由台湾省中央气象局(Central Weather Bureau, CWB)安装的第1套基于布设在岛内的约100个加速度计和虚拟子网技术(Virtual Sub-Net)的地震预警系统于1998年投入测试,并于2001年开始正式运行^[20]。2007年,另一个基于Earthworm的地震预警原型系统开始建设并测试;2015年,Chen等对测试结果做了介绍,该系统取得了不错的预警效果^[21]。与此同时,台湾省也在开展使用简易烈度计进行地震预警的效果研究^[22]。

3) 土耳其。土耳其伊斯坦布尔地震响应和预警系统(the Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System, IERREWS)由博卡齐奇大学坎迪利天文台和地震研究所(Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute of Bogaziçi University, KOERI)于2002年完成建设并负责运行和维护。该预警系统由整个台网的100个强震动台站中的10个实时台站组成^[23],主要布设在大马尔马拉断层(great Marmara fault);土耳其的另一套地震预警系统,即自组织地震预警信息网(Self-organizing Seismic Early Warning Information Network, SOSEWIN),则选择了另一种不同的预警策略,该套系统利用的是拥有无线传感技术的低价感应器,并是第1个采用这种预警模式的预警系统^[24-25]。

4) 罗马尼亚。罗马尼亚的弗兰恰(Vrancea)地区是主要

的地震危险区。2006年,罗马尼亚国家地球物理研究所(the National Institute for Earth Physics, NIEP)和德国卡尔斯鲁厄大学(Karlsruhe University)设计并安装了地震预警系统。与墨西哥的SAS一样,罗马尼亚的预警系统也采用了异地地震预警模式。该地震预警系统可以快速检测地震事件,并将警报发送到首都布加勒斯特,该系统的一个重大创新是在警报发出之后的0.9~1.2 s内采取自动安全措施,如关闭核电站、天然气网络、石油运输管道等。基于这一创新,该预警系统在2006年3月欧洲信息社会技术颁奖仪式(the European Information Society Technologies Prize Awards)的相同领域唯一获奖,并且是颁奖仪式上展出的265个项目中获奖的20个项目之一^[26-27]。

5) 日本。早在20世纪60年代,日本铁路系统就沿着其铁路轨道布设了一系列地震计^[28-29]。当这些地震计检测到地震,且当强地面运动强度达到预定的阈值后,系统将会自动触发且制动正在高速运行的火车或者高铁。随后几十年间,沿着日本东海岸又加设了更多的地震台站,即紧急地震检测与警报系统(the Urgent Earthquake Detection and Alarm System, UrEDAS)。1995年的神户地震造成了超过6000人死亡和高达2000亿美元的损失,促使覆盖日本全境的地震预警系统建设的全面启动^[30-32]。这套系统的主要组成部分包括:(1)约800个左右的高灵敏度台站(Hi-net),其中约650个是井下强震台站(KiK-net);(2)约1000个地表地震台站(K-net),其中约200个台站由日本气象厅主管维护,约800个台站由日本防灾科学技术研究所(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, NIED)主管维护;(3)约70个宽频带地震计(F-net)。2007年,日本气象厅正式开始向公众提供地震预警服务,该套系统采用的定位和震级估算方法已有诸多介绍^[30-31,33]。但2011年东日本的 M_w 9.0 Tohoku地震还是暴露了该系统的许多问题^[34-35],其中最重要的2个技术问题,一是由于破裂断层的有限性造成震中距较远而断层距较近的预警台站低估了该处的潜在破坏,二是由于台站同时记录到多个中小余震而造成潜在破坏的过高估计。

6) 韩国。从2015年初开始,韩国气象厅(the Korea Meteorological Administration, KMA)开始向韩国民众提供地震预警信息服务。该套地震预警系统基于韩国气象厅和韩国地质资源研究院(the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KIGAM)部署在朝鲜半岛的地震台站,算法使用的是加州大学伯克利分校(University of California, Berkeley)的地震报警系统第2版(ElarmS-2),其中震级估算采用的是 P_d 算法^[36]。

2 正在实时测试地震预警系统及讨论其可行性的国家和地区

除上述建成地震预警系统且已将其投入使用的国家和地区外,其他国家和地区虽然现在并没有实际可用的地震预

警系统,但其地震学家和工程师仍然在积极地进行探索。已经开始对地震预警系统进行实时测试的国家和地区包括:意大利、中国大陆、美国加州、西班牙、欧盟、以色列;正在探讨地震预警系统在当地的可行性和必要性的国家和地区包括:吉尔吉斯斯坦、东加勒比群岛、希腊和冰岛等。

1) 意大利。在1980年伊尔皮尼亚(Irpinia)地震的警示下,意大利那不勒斯腓特烈二世大学物理科学系与那不勒斯国家地球物理与火山学研究所-维苏威火山观测站的联合研究组(a joint research group between the Physics Department of the “Federico II” University of Naples and the INGV-Osservatorio Vesuviano, Naples, RISSC)于2002年设计了伊尔皮尼亚地震台网(Irpinia Seismic Network, ISNet)。ISNet由30个台站组成,覆盖了亚平宁山脉坎帕尼亚-鲁卡尼亚一线近(100×70)km²的范围。该台网在2006年建成了实验性的地震预警原型系统(Probabilistic and Evolutionary early warning SysTem, PRESTo),并于2009年开始测试运行^[37]。

2) 中国大陆。中国的地震危险区面积较大,覆盖地域广。受现有地震台网密度所限,中国大陆至今尚无正式投入使用的地震预警系统。但中国对于地震预警系统的探索和研究非常活跃^[38]。除在少数几个核电站及重点工程使用地震预警系统外,在中国大陆投入测试的预警系统还有首都圈地震预警原型系统和福建省地震预警系统。首都圈地震预警原型系统由中国地震局地球物理研究所和台湾大学地球科学系在2007年开始合作建设并实时测试运行,2010年完成全部建设。该原型系统主要基于首都圈地震台网所属的94个宽频带(BB)地震台和68个短周期(SP)地震台,这些地震台分别位于首都圈西部山区和东部平原地区,平均台间距约50 km^[39];福建省地震局在2009年建成了一套实验性的预警原型系统,2012年11月对该套系统进行了线上测试。该预警系统在福建地区有125个台站,平均台间距31 km,平均时间延迟大约1.3 s。此外,这套系统还纳入了台湾地区16个台站及邻近省份的25个台站。该系统预计将于2017年左右对福建地区的公众提供预警服务^[44]。此外,中国计划于“十三五”期间建成一套覆盖全国范围的地震预警系统,计划新建4000个实时地震监测台站和超过1万个低成本的感应器,其中包括4个全国重点地震预警区,即北京首都圈地区、东南沿海地区、南北地震带和新疆北部地区。福建省的地震预警系统将在这其中发挥重要作用。

3) 美国加州。1974年,美国加利福尼亚州地震预警系统由斯坦福法案开始研究讨论建设,1989年洛马普列塔(Loma Prieta)地震后,为了在旧金山和奥克兰地区对该地震的余震进行预警,这里曾经有过地震预警的原型系统^[40]。2009年加州完成了预警系统的研究,且ElarmS系统开始实时测试^[41],该方法能根据地震波形计算出不同的参数,如P波触发时间、 P_0 、 τ_p^{max} 和信噪比,并且会计算每秒的峰值振幅。该系统每秒都在实时更新,并且会提供其预测的强地面运动分布图“AlertMap”。加州的预警系统(即CISN ShakeAlert)由分布

在约400个场地中的近600个地震仪器组成,这套系统由美国地质调查局(the United States Geological Survey, USGS)组织,加州理工学院(California Institute of Technology, Caltech)、加州大学伯克利分校(UC, Berkeley)和华盛顿大学(University of Washington)参与其中。在戈登(Gordon)和贝蒂穆尔(Betty Moore)基金会的支持下,他们在北美西海岸联合发展了CISN ShakeAlert系统,华盛顿大学的西北太平洋地震台网(the Pacific Northwest Seismic Network, PNSN)在这其中发挥了重要作用^[42]。2012年该系统开始试运行,目前有多套预警系统正在依托加州整合地震台网(California Integrated Seismic Network, CISN)在线实时测试,其中包括现地地震预警方法^[43]、升级后的ElarmS-2系统^[44]、PreSEIS方法^[45]、虚拟地震学家^[46]以及2015年4月加入测试的一个有限断层算法FinDer^[47]。2016年2月15日,美国加州大学伯克利分校伯克利地震实验室与德意志电信合作开发了一款名为MyShake的手机应用,该应用试图利用手机自带的加速度感应器监测地震,并向用户发送地震警报^[48]。

4) 西班牙。伊比利亚(Iberia)半岛坐落于欧亚板块和非洲板块的边界附近,这里常年地震频发,且历史上发生过多次破坏性的大地震,如1775年里斯本大地震。西班牙位于伊比利亚半岛中东部,长期受到地震灾害的威胁。2016年, Romeu Petit等介绍了一套在美国地质调查局(USGS)Earthworm工具基础上发展的,由加泰罗尼亚 ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya)建立的地震预警原型系统的设计、布局及初步结果^[49]。此外,该地也进行过异地预警模式和阈值预警的研究。

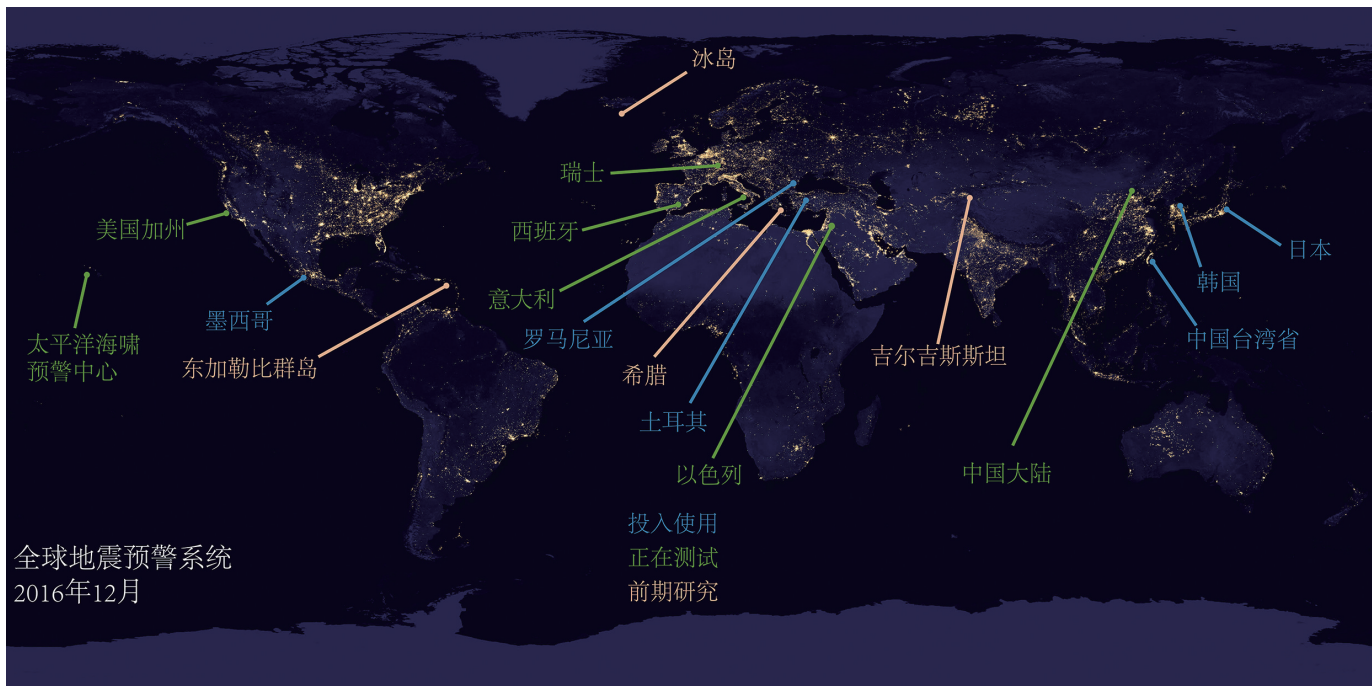
5) 欧盟。欧洲的第1个地震预警系统是用于保护立陶宛伊格纳利纳(Ignalina)核电站的现地地震预警系统,该地震预警系统由7个台站组成^[50]。21世纪初,欧洲的一些研究组又在伊斯坦布尔、布切雷斯特及坎帕尼亚等地区建立了地震预警系统^[51]。此外,瑞士也开展了虚拟地震学家(VS)系统的测试工作。

6) 以色列。随着以色列人口的激增以及面临的潜在地震危险性,以色列地质调查局(the Geological Survey of Israel)布设了一套地震预警系统,包括100台布设在死海断层(Dead Sea Transform)附近的新增强震加速度仪和宽频带速度仪,并且接入测试了ElarmS系统^[52]。

此外,吉尔吉斯斯坦、东加勒比群岛、希腊和冰岛^[53-56]都对当地发展预警系统的可行性及必要性进行过讨论。

3 地震预警系统的发展现状

世界范围内地震预警系统的发展大致可以分为3类:1) 预警系统已经投入运行和使用的国家和地区;2) 预警系统尚处于测试或者发展阶段的国家和地区;3) 正在进行预警系统可行性和必要性研究的国家和地区。图1展示了2012年由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)地球观测站(NASA's Earth Observatory)根据



注:蓝色代表地震预警系统已经投入运行和使用的国家及地区,绿色代表预警系统尚处于测试或者发展阶段的国家或地区,橙色代表正在进行预警系统可行性和必要性研究的国家和地区。

图1 全球夜间灯光分布(图片来源:NASA)

Fig. 1 Global night light distribution

苏奥米国家极地轨道伴随卫星(the Suomi National Polar-orbiting Partnership)采集的数据而制成的地球夜间灯光分布图,直观展示了地球入夜后的城市灯火分布情况。

需要指出的是,图1的数据是将一定时间段内各特定时间点测定的地球夜半球灯光数据汇总整理而得,它一方面部分反映了世界人口集中分布的情况,另一方面也直接反映了区域的工业化、现代化及城市化水平。

本文将全球已开展地震预警系统的国家和地区标注于图1中,对照Allen等^[7]的全球地震动峰值加速度参数区划图(图2),可以直观看出一些具有高地震危险性且经济社会高度发展的地区,如美国西海岸、中国首都圈地区、中国台湾省和日本等,这些地区迫切需要行之有效的防震减灾手段。因此,如果地震短临预测研究短期内仍无法取得重大突破,地震预警作为替代选项将具有广阔的应用前景。

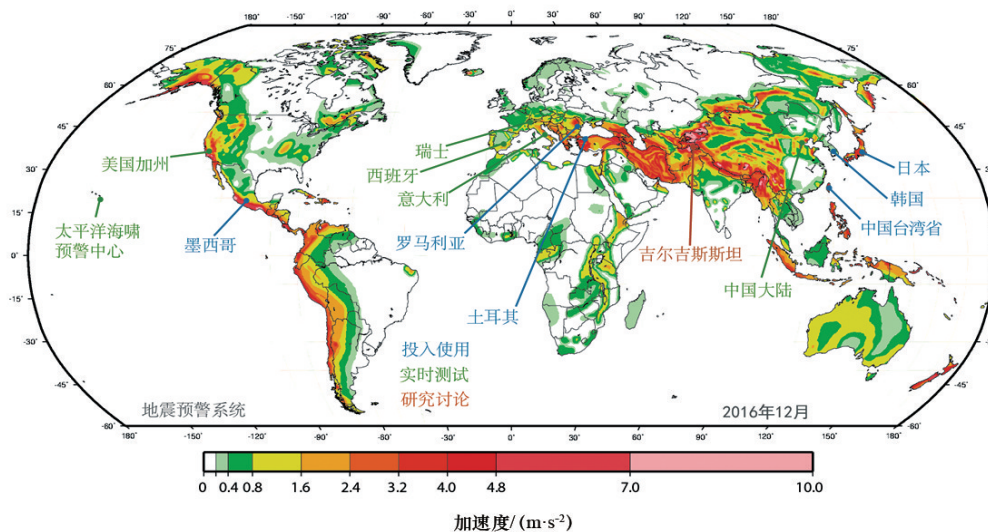
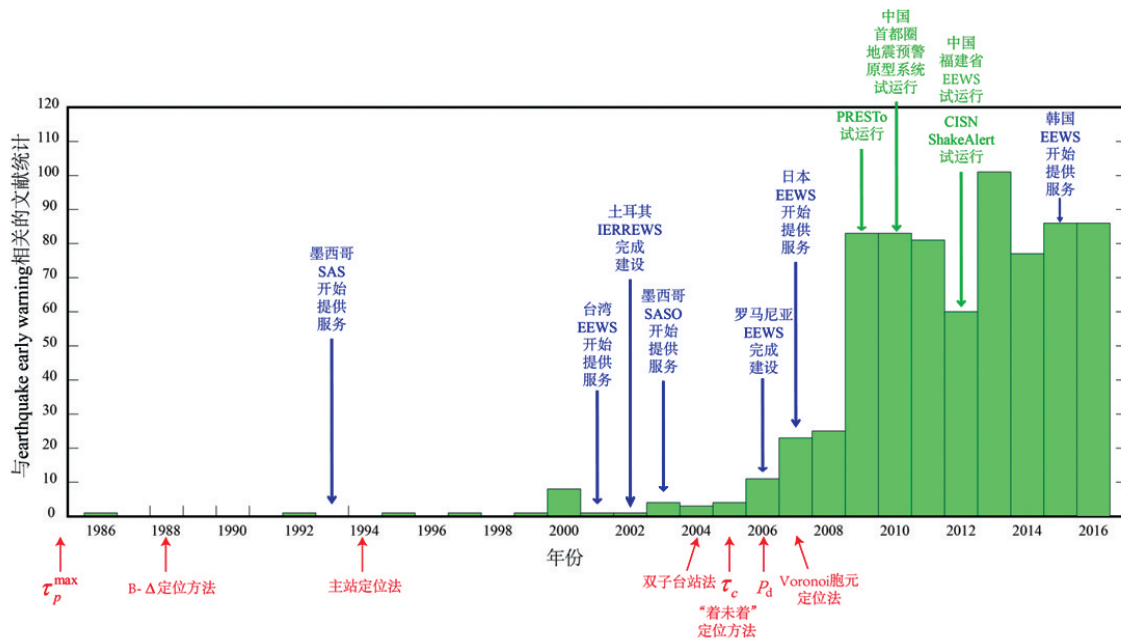


图2 全球未来50年发生概率超过10%的地震动峰值加速度参数区划

Fig. 2 Zoning map of global seismic hazard

实时地震学的主要意义在于地震事件后对于数据的快速收集和分析^[57]。实时地震学和地震早期预警之间最初并不被认为有差别,但随着地震预警系统的发展(图3),大部分系统在建设时更偏重于台网建设等方面。但实时地震学也确实提出了很多重要的地震学问题,其中很多问题对于预警系

统预警效果的评估具有重要的参考价值。图3同时展示实时地震学基础研究与预警实践的相互关系,可以看到各国及地区地震预警系统发展的先后顺序。值得注意的是在2000年后,无论是地震预警系统实践还是实时地震学的文献统计都进入了发展的活跃期。



注:检索数据库为Web of Science;其中蓝色字体表示投入公共服务的地震预警系统,绿色字体为测试系统,红色字体为震中和震级的估算方法。

图3 1986—2016年间与地震预警相关的文献频次统计

Fig. 3 literature statistics of the frequency of earthquake early warning from 1986 to 2016

4 基于“众包”(Crowdsourcing)的预警实践

2006年6月,美国《连线》杂志记者Jeff Howe提出了“众包”(Crowdsourcing)的概念。最初,Jeff Howe将这一概念概括为企业或是组织把内部某些工作人员的特定工作任务按照自由自愿分配的形式外包给未预先指定的、大型的网络去完成的做法^[58]。而现在,这一概念逐渐演变为从广泛群体,特别是在线的网络社区中获取所需服务和想法的实践^[59]。

随着智能手机网络的飞速发展,基于“众包”的传感器网络已成功应用于环境科学中。地震学家注意到,智能手机设有内置加速度计,而且手机市场发展速度很快,这使得采用智能手机作为地震监测的一种手段越发变得可能。因此,将普通民众纳入到地震科学(公民科学),特别是地震监测预警等项目的发展中,会使地震预警系统的发展充满巨大潜力^[60-61]。美国地质调查局(USGS)的“Did You Feel It (DYFI)”便是一个例子。目前正在测试的系统包括:

1) 地震台网工程(the Earthquake Network Project)。这是一个基于“众包”概念、且依赖于智能手机用户的地震预警系统,旨在将全球范围内的个人智能手机作为接收器而建设的全球尺度的地震预警系统。该工程始于2013年1月,到

2016年,参与该工程的智能手机在全球范围内达到了12万部^[62]。

2) “我的震动(the MyShake)工程”^[48]。“MyShake工程”最初是由加州大学伯克利分校负责的一项工作,这项工作旨在检测智能手机的加速度传感器质量。受此启发,该校的地震学家开发了一款安卓应用,该应用可以用来检测每一次运动到底是手机用户的正常人类活动还是地震活动。检测地震事件的手机应用整合了之前地震时手机的记录,最终发展成一套基于单台智能手机的地震识别算法。同时,应用会将信息发回位于加州大学伯克利分校的信息处理中心,进一步确认是否确为地震事件,之后再由多台手机发回的信息确定该地震的震中、震级和发震时刻等信息。MyShake还尝试通过推特用户的推文进行地震预警。

3) 地震捕手台网(the Quake Catcher Network, QCN)。这一工程使用基于微机电系统的低价简易地震计,将该地震计安装于自愿者家中以记录地震。QCN采用价格低廉的感应器,而且由自愿者安装并负责运维台站,因而大大降低了运行成本。2010年3月,QCN安装了实时检测地震震级和位置的算法,此后还得以进一步发展可生成AlertMaps。目前,

QCN可以为地震预警系统提供快速、粗糙的震级估计^[63-64]。

4) 社区地震台网 (the Community Seismic Network, CSN) 工程^[65]。社区地震台网布设于美国加州洛杉矶地区, 主要用于测量强地面运动, 其获得的强震动信息将发送给 USGS 用于绘制 ShakeMap 和 ShakeCast。CSN 现在主要集中在洛杉矶北部地区, 但是其计划增加数千个感应器以覆盖整个洛杉矶盆地的人口稠密区。为了有效地运维这样一个庞大的台网, CSN 采用了一个云端的处理系统, 该系统的处理能力是动态扩展。此外, CSN 也采用了分布式系统用以执行基本的事件检测等任务, 并将结果发布到云端。为了使台网覆盖整个洛杉矶盆地, CSN 计划在各大学校布设感应器。最新的报告显示, CSN 已经在洛杉矶联合学区 (Los Angeles Unified School District, LAUSD) 的 1200 所学校布设, 并且已经在这些学校的 100 个中布设了感应器作为测试, 且运行顺利。为了适当地加密台站, 自愿者们也可以申请将感应器安装在自己家里。CSN 开始于 2010 年并且已经发展成了功能性的地震台网, 目前正计划将 CSN 和南加州地震台网 (Southern California Seismic Network, SCSN) 整合起来作为南加州的一个权威地震台网。与此相类似的还有日本的家庭地震计 (Home Seismometer)^[66]。

在未来的应用中, 这些基于“众包”的台网数据可能会提供关于地震波传播和地震破裂过程的更多细节信息。而现在, 这些台网所面临的重大挑战是如何保持获取高质量的数据, 以及如何在下一次大地震发生时确保该台网仍然处于正常的运行状态。

5 结论

1) 在过去的 30 年里, 地震学基础理论以及数字信号处理等技术的发展使得地震预警系统得以成功实践, 并且在数次的强震检验中发挥了实际减灾作用。各国的成功经验将为未来世界各地地震预警系统的发展提供重要的参考和借鉴。

2) 电子通信技术和智能手机的飞速发展, 以及“大数据”时代的来临, 将为地震科学的发展和变革带来新的历史机遇。“众包”概念的应用项目包括地震台网工程、“我的震动”、地震捕手台网、社区地震台网和日本的家庭地震计。这一领域的发展不仅大大压缩了地震监测预警的成本, 而且避免了由于地震台站分布不均匀而带来的诸多问题, 更有望满足最大限度地减小预警“盲区”的实际需求。

3) 虽然地震预警系统正处于蓬勃发展期, 但是其在实际的应用中面临诸多挑战和问题。在硬件上, 系统设备的维护与更新直接关乎预警成败, 台站的使用寿命和强震复发周期的关系也是一个值得讨论的课题; 在软件上, 如何缩小预警系统的时间延迟进而最大限度地减小预警“盲区”、如何准确检测地震事件、如何快速准确地估算震级震中和强地面运动参数, 这些挑战带来了预警系统的质疑, 但同时也指明了地震预警相关方法和技术的发展方向。

致谢: 中国地震局地球物理研究所吴忠良研究员和蒋长胜研究员对本文工作进行了悉心指导, Boston University 谢飞与作者进行了科技论文写作方面的讨论, 作者在此一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] Heaton T H. A model for a seismic computerized alert network[J]. *Science*, 1985, 228(4702): 987-990.
- [2] Gasparini P, Manfredi G, Zschau J. Earthquake early warning systems [M]. Berlin: Springer, 2007.
- [3] Satriano C, Wu Y M, Zollo A, et al. Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(2): 106-118.
- [4] 吴忠良, 蒋长胜. 预警的概念及相关物理问题[J]. *物理*, 2007, 36(6): 472-475.
Wu Zhongliang, Jiang Changsheng. Early warning: Concept, techniques, and physics[J]. *Physics*, 2007, 36(6): 472-475.
- [5] Strauss J A, Allen R M. Benefits and costs of earthquake early warning [J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(3): 765-772.
- [6] Lee W H K, Espinosa-Aranda J M. Earthquake early warning systems: Current status and perspectives[M]//Early warning systems for natural disaster reduction. Berlin: Springer, 2003, 409-423.
- [7] Allen R M, Gasparini P, Kamigaichi O, et al. The status of earthquake early warning around the world: An introductory overview[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 682-693.
- [8] 周彦文, 刘希强, 胡旭辉, 等. 早期地震预警方法研究现状及展望珠 [J]. *国际地震动态*, 2008(4): 28-34.
Zhou Yanwen, Liu Xiqiang, Hu Xu, et al. Current situation and prospects of the research on the earthquake early warning systems[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2008(4): 28-34.
- [9] 赵冰, 刘希强. 全球地震早期预警研究综述[J]. *西北地震学报*, 2011, 33(4): 392-402.
Zhao Bing, Liu Xiqiang. An overview of earthquake early warning research around the world[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, 33(4): 392-402.
- [10] 殷海涛, 刘希强, 李杰, 等. 现今地震预警技术及其在国内发展状况的探讨[J]. *中国地震*, 2012, 28(1): 1-9.
Yin Haitao, Liu Xiqiang, Li jie, et al. Current earthquake early warning technology and it's development in China[J]. *Earthquake Research in China*, 2012, 28(1): 1-9.
- [11] 吴林斌. 中国地震预警系统现状与发展前景综述[J]. *大地测量与地球动力学*, 2013, 33(增刊2): 123-125.
Wu Linbin. Summary of status and development prospect of earthquake prediction system in China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 33(Suppl 2): 123-125.
- [12] 张红才, 金星, 李军, 等. 地震预警系统研究及应用进展[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(2): 706-719.
Zhang Hongcai, Jin Xing, Li Jun, et al. Progress of research and application of earthquake early warning system (EEWs)[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(2): 706-719.
- [13] 高峰, 杨学山, 马树林. 地震预警系统综述[J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(5): 62-69.
Gao Feng, Yang Xueshan, Ma Shulin. Summary of earthquake early warning system[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(5): 62-69.
- [14] Zhang H C, Jin X, Wei Y X, et al. An earthquake early warning system in Fujian, China[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(2): 755-765.

- [15] Goltz J D, Flores P J. Real-time earthquake early warning and public policy: A report on Mexico City's Sistema de Alerta Sísmica[J]. *Seismological Research Letters*, 1997, 68(5): 727-733.
- [16] Suárez G, Novelo D, Mansilla E. Performance evaluation of the seismic alert system (SAS) in Mexico City: A seismological and a social perspective[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 707-716.
- [17] Espinosa-Aranda J M, Cuéllar A, Rodríguez F H, et al. The seismic alert system of Mexico (SASMEX): Progress and its current applications[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(2): 154-162.
- [18] Wu Y M, Lee W H K, Chen C C, et al. Performance of the Taiwan rapid earthquake information release system (RTD) during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake[J]. *Seismological Research Letters*, 2000, 71(3): 338-343.
- [19] Teng T L, Wu L D, Shin T C, et al. One minute after: Strong-motion map, effective epicenter, and effective magnitude[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(5): 1209-1219.
- [20] Wu Y M, Hsiao N C, Lee W H K, et al. State of the art and progress in the earthquake early warning system in Taiwan[M]//*Earthquake early warning systems*. Berlin: Springer, 2007: 283-306.
- [21] Chen D Y, Hsiao N C, Wu Y M. The Earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(2A), 568-579.
- [22] Wu Y M, Liang W T, Mittal H, et al. Performance of a low-cost earthquake early warning system(P-Alert) during the 2016 M_L 6.4 Meinong(Taiwan) earthquake[J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(5), 1050-1059.
- [23] Erdik M, Fahjan Y, Ozel O, et al. Istanbul earthquake rapid response and the early warning system[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2003, 1(1): 157-163.
- [24] Fleming K, Picozzi M, Milkereit C, et al. The self-organizing seismic early warning information network (SOSEWIN) [J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 755-771.
- [25] Sesetyan K, Zulfikar C, Demircioglu M, et al. Istanbul earthquake rapid response system: Methods and practices[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(2): 170-180.
- [26] Ionescu C, Böse M, Wenzel F, et al. An early warning system for deep Vrancea (Romania) earthquakes[M]//*Earthquake Early Warning Systems*. Berlin: Springer, 2007: 342-349.
- [27] Mărmureanu A, Ionescu C, Cioflan C O. Advanced real-time acquisition of the Vrancea earthquake early warning system[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(2): 163-169.
- [28] Nakamura Y. UrEDAS, urgent earthquake detection and alarm system, now and future[C]//*Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver BC: 2004.
- [29] Nakamura Y, Saito J. UrEDAS, the earthquake warning system: Today and tomorrow[M]//*Earthquake Early Warning Systems*. Berlin: Springer, 2007: 249-282.
- [30] Horiuchi S, Negishi H, Abe K, et al. An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(2): 708-718.
- [31] Kamigaichi O, Saito M, Doi K, et al. Earthquake early warning in Japan: Warning the general public and future prospects[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 717-726.
- [32] Nakamura H, Horiuchi S, Wu C, et al. Evaluation of the real-time earthquake information system in Japan[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(5): L00B01.
- [33] Odaka T, Ashiya K, Tsukada S, et al. A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(1): 526-532.
- [34] Lay T, Kanamori H. Insights from the great 2011 Japan earthquake[J]. *Physics Today*, 2011, 64(12): 33-39.
- [35] Hoshiba M, Aoki S. Numerical shake prediction for earthquake early warning: Data assimilation, real-time shake mapping, and simulation of wave propagation[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(3): 1324-1338.
- [36] Sheen D H, Park J H, Seong Y J, et al. Application of the maximum-likelihood location method to the earthquake early warning system in south korea[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106: 1064-1073.
- [37] Zollo A, Colombelli S, Elia L, et al. An integrated regional and on-site earthquake early warning system for southern Italy: Concepts, methodologies and performances[M]//*Early Warning for Geological Disasters*. Berlin: Springer, 2014: 117-137.
- [38] 杨陈, 郭凯, 张素灵, 等. 中国地震台网现状及其预警能力分析[J]. *地震学报*, 2015, 37(3): 508-515.
Yang Chen, Guo Kai, Zhang Suling, et al. Status quo of China networks and analyses on its early warning capacity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2015, 37(3): 508-515.
- [39] Peng H S, Wu Z L, Wu Y M, et al. Developing a prototype earthquake early warning system in the Beijing capital region[J]. *Seismological Research Letters*, 2011, 82(3): 394-403.
- [40] Bakun W H, Fischer F G, Jensen E G, et al. Early warning system for aftershocks[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(2): 359-365.
- [41] Allen R M, Brown H, Hellweg M, et al. Real-time earthquake detection and hazard assessment by ElarmS across California[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(5): L00B08.
- [42] Hartog J R, Kress V C, Malone S D, et al. Earthquake early warning: shakealert in the Pacific northwest[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(4), 1875-1886.
- [43] Meier M A, Heaton T, Clinton J. Evidence for universal earthquake rupture initiation behavior[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(15): 7991-7996.
- [44] Kuyuk H S, Allen R M, Brown H, et al. Designing a network-based earthquake early warning algorithm for California: ElarmS-2[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 104(1): 162-173.
- [45] Köhler N, Cua G, Wenzel F, et al. Rapid source parameter estimations of southern California earthquakes using PreSEIS[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 748-754.
- [46] Cua G, Fischer M, Heaton T, et al. Real-time performance of the virtual seismologist earthquake early warning algorithm in southern California[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 740-747.
- [47] Böse M, Felizardo C, Heaton T H. Finite-fault rupture detector (FinDer): Going real-time in Californian shakealert warning system[J]. *Seismological Research Letters*, 2015, 86(6): 1692-1704.
- [48] Kong Q K, Allen R M, Schreier L, et al. MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond[J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): 1-8.
- [49] Romeu Petit N, Colom Puyané Y, Jara Salvador J A, et al. Develop-

- ment of an earthquake early warning system based on earthworm: Application to southwest Iberia[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106: 1–2.
- [50] Wieland M, Griesser L, Kuendig C. Seismic early warning system for a nuclear power plant[C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE 2000). Auckland: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000.
- [51] Gasparini P, Manfredi G. Development of earthquake early warning systems in the European Union[M]//Early Warning for Geological Disasters. Berlin: Springer, 2014: 89–101.
- [52] Nof R N, Allen R M. Implementing the elarms earthquake early warning algorithm on the Israeli seismic network[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(5): 2332–2344.
- [53] Stankiewicz J, Bindi D, Oth A, et al. The use of spectral content to improve earthquake early warning systems in Central Asia: Case study of Bishkek, Kyrgyzstan[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(5): 2764–2773.
- [54] Zuccolo E, Gibbs T, Lai C G, et al. Earthquake early warning scenarios at critical facilities in the Eastern Caribbean[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14(9): 2579–2605.
- [55] Sokos E, Tselentis G A, Paraskevopoulos P, et al. Towards earthquake early warning for the Rion–Antirion bridge, Greece[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14(9): 2531–2542.
- [56] Vogfjörð K S, Kjartansson E, Slunga R, et al. Development and implementation of seismic early warning processes in South–West Iceland[R]. Icelandic Meteorological Office Report VÍ, 2010.
- [57] Kanamori H. Real–time seismology and earthquake damage mitigation [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005, 33: 195–214.
- [58] Howe J. The rise of crowdsourcing[N]. *Wired magazine*, 2006–06–14.
- [59] Hammon D K L, Hippner H. Crowdsourcing[J]. *Business & Information Systems Engineering*, 2012, 54(3): 165–168.
- [60] Allen R M. Transforming earthquake detection[J]. *Science*, 2012, 335(6066): 297–298.
- [61] Minson S E, Brooks B A, Glennie C L, et al. Crowdsourced earthquake early warning[J]. *Science Advances*, 2015, 1(3): e1500036.
- [62] Finazzi F. The earthquake network project: Toward a crowdsourced smartphone–based earthquake early warning system[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(3): 1–10.
- [63] Lawrence J F, Cochran E S, Chung A, et al. Rapid earthquake characterization using MEMS accelerometers and volunteer hosts following the *M* 7.2 Darfield, New Zealand, earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(1): 184–192.
- [64] Chung A I, Cochran E S, Kaiser A E, et al. Improved rapid magnitude estimation for a community–based, low–cost MEMS accelerometer network[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(3): 1314–1323.
- [65] Clayton R W, Heaton T, Chandy M, et al. Community seismic network [J]. *Annals of Geophysics*, 2012, 54(6): 738–747.
- [66] Horiuchi S, Horiuchi Y, Yamamoto S, et al. Home seismometer for earthquake early warning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(5): 151–157.

Earthquake early warning system: Practice and its relation with real–time seismology

LI Jiawei¹, QIN Yufeng², JIANG Ce¹

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China
2. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

Abstract The earthquake early warning system (EEWS) has been gradually developed from scientific hypothesis into real disaster prevention practice for the past 30 years. This paper summarizes the worldwide EEWS development and its constructing divergence in different time periods. Moreover, an introduction of the use of MEMS (Microelectro Mechanical Systems) and smartphone by seismologist and engineers as a new means of earthquake early warning is given. Not only the space for EEWS development but also more information about EEWS time nodes is analyzed in this paper. Finally, the relation between EEWS and real–time seismology is discussed.

Keywords earthquake early warning system; real–time seismology; history and status quo; crowdsourcing

(编辑 韩丹岫)