

殷海涛、刘希强、李杰等, 2012, 现今地震预警技术及其在国内发展状况的探讨, 中国地震, 28(1), 1~9。

· 研究综述 ·

现今地震预警技术及其在国内发展状况的探讨

殷海涛^{1,2)} 刘希强¹⁾ 李杰¹⁾ 徐长朋¹⁾

1) 山东省地震局, 济南市文化东路 20 号 250014

2) 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京德外祁家豁子 100029

摘要 本文首先从地震预警的概念、系统构成和技术方法等方面入手, 对目前国际上地震预警技术的最新研究进展和热点问题进行了全面的论述。继而通过对国内发展现状的系统分析, 认为地震预警系统的开展在政府、社会、台网建设和研究基础等方面都已经具备了基本的条件。结合当前国内的实际情况, 对地震预警系统在实施过程中可能遇到的技术问题和非技术性挑战进行了估计, 并建议加强法律措施、公众教育、震害防御等方面的配套工作, 最大限度地发挥地震预警系统在防震减灾工作中的作用。

关键词: 地震预警 地震波 震级估计 发展探讨

[文章编号] 1001-4683 (2012) 01-001-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

中国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间, 受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压, 地震断裂带十分发育, 是一个地震多发的国家, 其地震具有分布范围广、频次高、强度大、灾害重的特点。仅 1976 年唐山 7.8 级和 2008 年汶川 8.0 级大地震就造成了超过百万人的伤亡, 经济损失近万亿元人民币, 这都给世人留下了挥之不去的沉痛记忆。在每次大地震后, 人们在悲痛之余总会期盼地震可以事先预测, 人们有时间采取措施, 从而能极大地减少生命伤亡和财产损失。然而地震究竟能否预测, 这一直是科学界具有争议的问题 (Hamada, 1991; Geller et al, 1997)。但一个不争的事实是, 由于地震的发生机制太过复杂, 到目前为止, 地震预测仍是一个世界级的难题。本文的目的不是讨论地震预测是否可能, 而是在当前的科技背景下, 将视线放到了地震发生后短短的几秒至几十秒的时间内, 能够及时提供地震报警信息且具有部分成功经验的地震预警技术上。

国内学者夏玉胜等 (2000) 给出了地震预警时间和人员伤亡关系的理论预测: 如果提前

[收稿日期] 2012-03-01

[项目类别] 国家重大科技支撑项目 (2012BAK19B04)、国家自然科学基金项目 (41104023)、山东省科技发展项目 (2011GSF12004) 共同资助

[作者简介] 殷海涛, 男, 1980 年生, 博士, 副研究员, 主要从事地球动力学和地壳形变分析研究。

E-mail: yinhaitao121@163.com

3s 预警,人员伤亡比减少 14%;提前 5s,伤亡比减少 22%;提前 15s,伤亡比将减少 53%。而日本实时地震情报利用协议会(REIC)的测试结果表明^①,在日本,如果提前 2s 获得警报,死亡人数可减少 25%;提前 5s,死亡人数能减少 80%。所以,在目前地震预测还很不成熟的情况下,为了应对突发性和毁灭性的地震灾害,最大限度地降低损失,进行地震早期预警(Earthquake Early Warning,以下简称 EEW)非常必要,且具有十分重要的现实意义。

1 地震早期预警的概念及系统构成

1.1 地震预警、预测和预报

EEW 的概念是在 1868 年 10 月 21 日美国旧金山湾区 M7.0 地震发生两周后,由医师 Cooper(1868)最先提出来的。其最基本的思路是,由于电磁波的速度(300,000km/s)远大于地震波在地壳中的传播速度(通常 <10km/s),因此,如果在发震区安装监测系统,当地震发生时,可利用速度差在地震波到来之前将地震警报发布给离震中一定距离的区域,达到降低损失的目的。

因为“地震预警”和人们常提到的“地震预测”、“地震预报”只有一字之差,所以公众经常会对其概念进行混淆。而对于地震预测(Earthquake Prediction)或预报(Forecast)的概念,地震学家已经给出了明确的定义(Wyss, 1991)。在我国,习惯于把科学家和研究单位对未来地震发生的地点、时间和大小所做的相关研究的结果称作“地震预测”,而把由政府主管部门依法发布的有关未来地震的警报称作“地震预报”(陈运泰,2009)。在国际上两者也没有严格的或统一的界限,但与“地震预警”相比,却有着本质的区别。中国地震局局长陈建民已经对媒体做了准确的描述:预测是通过活动规律来判断在什么时期什么地方可能发生几级地震,而预警是通过电信号和地震波传播速度的差值,对可能被地震波及区域做出提前通知的体系^②。换言之,它们之间最根本的区别就是,地震预测或预报是在地震发生之前做出的,而地震预警是在地震后发布的。所有的 EEW 系统都只有在检测出破坏性地震后才能发出有效的警报信息。

1.2 EEW 原理及系统构成

地震是由地下几千米至几百千米的岩体发生突然的破裂或错动而释放能量的过程,这些能量是以地震波的形式向四周进行传播。地震波为机械波,具有一定的传播速度,约为几千米每秒,当地震波到达某地后才会对当地造成影响。而 EEW 就是利用这个时间差,在强烈的地震波动发生前快速精确地估计地震潜在的破坏性,并发出预警信息。

目前,通过科学家们和政府机构不断地探索和努力,已经发展了多套地震预警系统,如日本 UrEDAS、墨西哥 SAS 和 SASO、美国 ElarmS、土耳其 PreSEIS 和 SOSEWIN 等系统。虽然每个系统都有各自的特点和优势,但其基本构成大致相同,主要由地震监测台(网)、通讯系统、中央处理控制系统和对用户的警报系统等 4 部分组成(图 1)。而中央处理控制系统中的地震参数快速测定是 EEW 的技术核心,主要包括实时定位、震级测定、目标区地震动估计和触动警报等 4 部分内容,如图 2 所示。EEW 系统是一项复杂的系统工程,其特点是

① [Http://www.real-time.jp/](http://www.real-time.jp/)

② [Http://www.china.com.cn/2011/2011-03/11/content_22114392.htm](http://www.china.com.cn/2011/2011-03/11/content_22114392.htm)

高度集成、实时监控和极速响应,这需要科技人员、政府和社会公众等多方面合作共同努力才能发挥其最大功效。

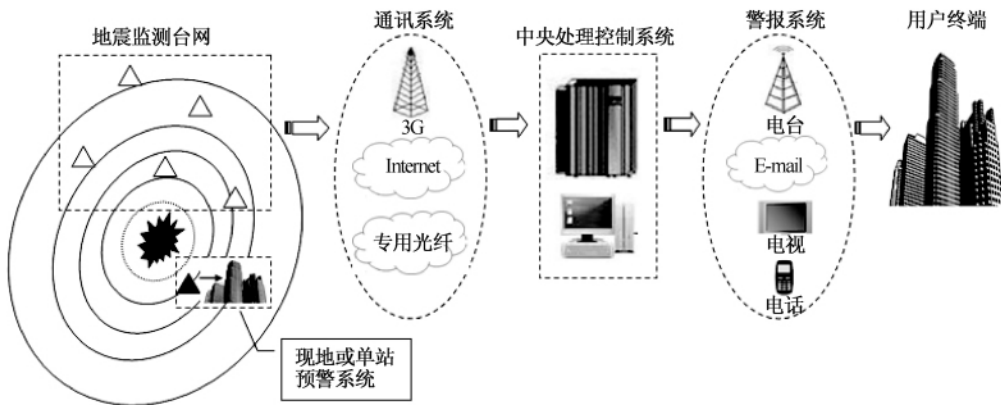


图1 EEW 系统构成

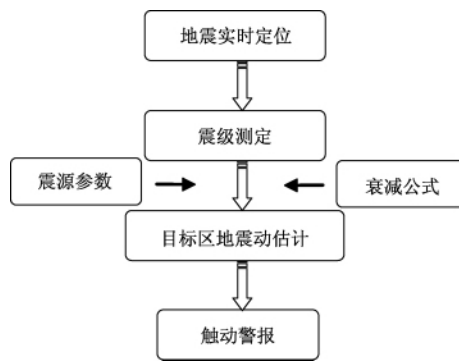


图2 地震参数快速测定流程图

2 EEW 的技术和方法

在过去的 10 年中,随着地震观测网的扩展,巨大地震造成的民众危险意识的增加,以及政府部门和地震学家的逐步重视,EEW 得到了快速的发展。国际上许多专家学者及研究机构对地震预警技术和方法做了大量的研究工作,目前 EEW 方法可按预警区域划分为波前探测预警(front detection)和现地预警(onsite warning);也可按监测(站点)规模划分为区域预警(regional warning)和单站预警(single-station warning)。这些都是利用检测地震发生后所产生的地震波(P 波或 S 波)来进行地震预警的,各有优势,可适用于不同地质条件和经济条件的地区。

2.1 波前探测

波前探测是最早出现的地震预警方法,由 Cooper 在 1868 年提出来的,即利用震源区的地震监测设备向远处的“震害区”进行预警(Cooper, 1868)。此方法通过 S 波计算震级,相对可靠,但预警速度较慢,由于此种方法起效的关键在于震源区附近是否安装有地震监测设

备,这需要对未来地震发生的区域有足够的了解才能实现。日本铁路系统最早使用的就是这种方法。此外,墨西哥城的 Seismic Alert System (SAS) 和罗马尼亚也使用该方法,SAS 可提前 60s 为墨西哥城(距离震源区 320km)提供预警。

波前探测方法的前提条件是目标城市距离震源区(地震带)较远,通常大于 60km。但不是所有的城市和防御目标都符合上述条件,所以此方法具有一定的局限性。而且此方法利用 S 波检测来提供警报,而地震发生后 P 波的传播速度(5.5 ~ 7.0km/s)要明显快于 S 波(3.2 ~ 4.0km/s),而且携带的能量较小,造成的破坏也很小。所以随后科学家们发展了利用 P 波来计算地震参数,这样不但可以有效地增加预警时间,并使为震中区域提供预警成为可能。

利用 P 波检测来进行地震预警时所使用的参数主要是 P 波的频率和振幅。检测 P 波频率的方法主要有卓越周期法 τ_p^{\max} 和平均周期法 τ_c 。卓越周期法可以在连续的时间序列中提取出来,并转换为震级,其优势是可以在 1s 内估计出初始震级。平均周期法是计算一个固定的时间窗内(通常为 3s)的平均周期,并推测出震级。而 Shieh 等(2008)的研究表明,同时使用这两种方法会更有效。P 波的振幅检测主要利用位移峰值、速度和最初几秒的加速度(通常为 3s)来推测地面运动状态。此外,利用 P 波的累积能量也可以用来估计震级。这些方法在美国、日本、中国台湾和土耳其伊斯坦布尔等国家和地区进行了成功的检验,并一直使用至今。

2.2 现地预警或单站预警

波前预警虽然对远处的城市或重大工程有较好的预警效果,但对破坏最严重的震源区不能做出预警。所以需要发展现地预警,其原理是在一个地点探测地震信息,并在同一地点发出预警警报。这必须要使用 P 波检测,其主要方法是利用 P 波的卓越周期 τ_p^{\max} 和振幅 P_d 组合,或平均周期 τ_c 与振幅 P_d 的组合来估计震级,并快速做出判断,发布预警。这种预警方法的典型预警时间为:在 10km 处可提供约 2s 的预警,50km 处可提供约 7s 的预警(Allen et al, 2011)。日本 UrEDSA 是最早使用现地预警的系统,目前仍工作于日本的铁路系统中。

2.3 区域地震预警

单站预警方法的优点是可以快速发布预警信息,能够为震源区提供服务,且造价相对较低,只需安装一台设备便可运行。但由于地震预警的发布会对社会造成较大的影响,而单套设备一方面由于 P 波传播的多样性,而不能全面把握其特征,另一方面很容易受到外部因素影响而产生干扰信息,增加了虚报漏报的机率,所以人们发展了更稳健有效的预警方法即区域预警方法。

区域预警是基于地震观测网络并综合上述预警技术进行工作的。其主要原理是将地震观测网收集到的地震波形数据通过通信网络传递到处理中心,并在此进行处理、估计和报告。区域预警方法的盲区在震中附近 15km 范围内,但随着距离的增大,预警时间会有明显地提高。其典型预警时间为:在 50km 处可提供约 9s 的预警,100km 处可提供约 22s 的预警。近几年,随着地震监测台网的不断扩充,区域预警技术得到了全面的发展,出现了如:ElamS、Virtual Seismologist、PreSEIS、Presto、NIED 和 SOSEWIN 等方法。这些方法正在不同的地区进行积极地检测,有望为地震预警提供新的途径。

以上方法各有优势,在选择时主要参考震源区的情况、地震带的分布、地震的类型(深度、震源机制等)和站点特征等。现地方法可更快地进行预警,并可估计当地地面震动的情

况,但是震源参数无法确定;区域法相对较慢,但是它能通过衰减关系式来预测邻区的地面运动。为了更好地发挥其优势,这几种方法有相互融合的趋势。

目前的 EEW 系统只基于地震仪观测网,利用 P 波检测来估计震级,这对快速估计中小地震震级是非常有效的。但目前有可靠的证据证明(Yamada et al, 2008),在利用前几秒的 P 波信息来估计震级的时候,当 $M > 7$ 地震发生时,震级估计会出现饱和,即传统的 P 波检测方法无法区分所探测到的地震是 6.8 级还是 7.8 级。虽然说这并不影响地震预警的发布,但是以 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级巨大地震为例,就是因为低估了震级,才导致了地震和海啸没有做出相应的防御措施。所以,无论从科学研究的角度还是从实际应用的角度来讲,都需要继续开展这方面的研究。

地表位移是估计地震震级的一项重要参数,传统的方法是对地震仪所测速度进行一次积分或对强震仪所测加速度进行二次积分得到位移结果。但这会引起基线漂移现象,出现位移的不确定性(Boore et al, 2002)。为了解决这个问题,科学家们想到了高频实时 GPS 技术。近年来,将高频实时 GPS 技术应用于 EEW 已成为国际研究的热点(Bock et al, 2011; Diego et al, 2012),它的最大优势在于直接获取地面运动状态,不需要积分,在振幅方面也不会产生饱和;相反,地面运动越大其相对定位精度便会越高。但由于其水平定位精度为亚厘米级,垂直向精度更是低一个数量级,所以其灵敏度相对较低。因此,在大震震级估计方面,现阶段最好的方法是将高频实时 GPS 和传统地震仪进行结合,这样不仅可以增强震级估计的可靠性,而且由于 GPS 台网和地震台网通常是独立分布的,结合两种手段将会增大地震监测的覆盖范围,减小盲区,可更好地为地震预警服务。Crowell 等(2009)和 Bock 等(2011)提出了一种利用高频 GPS 观测台网和地震台网联合进行预警系统的方法,这套系统已经应用于美国南加州地区,并取得了良好的效果。

3 EEW 在国内的发展前景、挑战及建议

3.1 EEW 在国内的发展现状

地震预警技术作为地震监测的新技术、震灾预防的新手段,已经在日本、美国、墨西哥、土耳其、意大利、瑞典、罗马尼亚、中国台湾等多个地震多发国家和地区得到应用,而且取得了部分成功预警的实例,如墨西哥的 SAS 系统成功地对 1995 年 7.2 级地震进行了预警,在 S 波到来前 72s 发布了公众预警,地铁在震前 50s 停止运行(Brown, et al, 2011)。日本的预警系统成功地对 2005 年宫城 7.2 级地震进行预警,在 S 波到达仙台前的 16s 发布了预警信息。相对而言,我国的地震预警系统研究才刚刚起步,但是已经具备了以下进一步发展的基本条件。

(1) 政府关注。2006 年以来,我国政府先后发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》、《国家地震科学技术发展纲要(2007~2020 年)》和《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》,并都将地震监测预警作为一项重点领域,这足以说明我国政府对地震灾害监测预警技术的高度关注和重视。

(2) 社会需求。近年来,通过国内外几次巨大地震的惨痛经历,人们对地震事件的关注度和忧患意识逐步增强,社会各界急切地希望地震预警系统能早日建成,及时提供警报信息,最大限度地减少生命财产损失,为人们的生活和社会的稳步发展提供保障。

(3) 台网建设。中国地震台网建设情况:中国地震局“十五”重大工程项目“中国数字地震观测网络”于 2008 年 4 月通过国家验收。通过项目的实施,全国测震运行台站达到 1021 个,其中包括国家台 148 个,区域台 821 个,火山台 33 个,2 个台阵 19 个台点,基本覆盖了全国地震多发区,为地震预警系统的建立提供了良好的平台(图 3)。高频 GPS 台网:国家重大科技基础设施建设项目“中国大陆构造环境监测网络”已于 2012 年 3 月通过验收,建成了由 260 个连续观测和 2000 个不定期观测站点构成的、覆盖中国大陆的高精度、高时空分

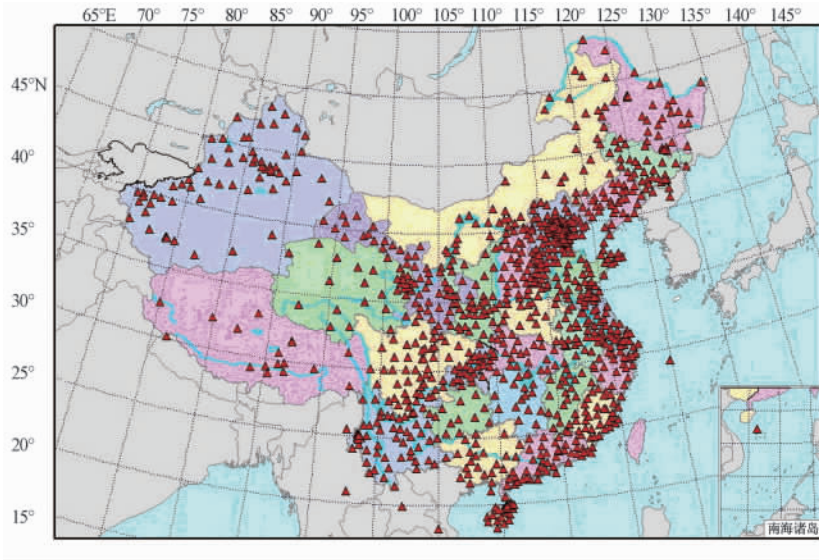


图 3 中国地震台网台站分布图

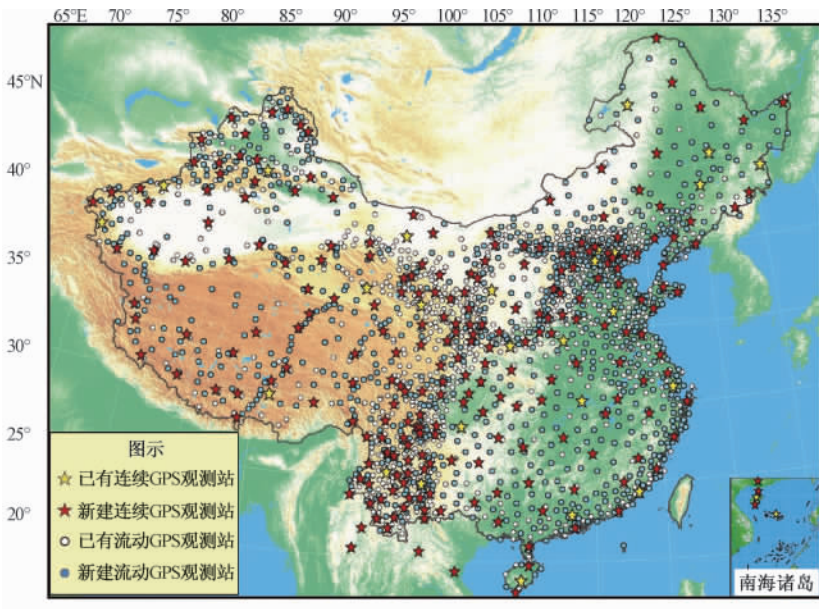


图 4 国家 GPS 观测网分布图

辨率和自主研发数据处理系统的观测网络(图4)。其中260个基准站全部采用高频GPS接收机,可同时采样15s、1Hz和50Hz观测数据,在兼顾较长周期的地壳形变的同时,还可采集更丰富的瞬时地表运动信息,这不仅为此项技术在国内的发展提供了充足的数据资源,也为地震预警系统的发展提供了有力的支持。

(4)发展现状。近几年,国内学者对地震预警技术和预警系统的发展也在进行深入的思考(张晓东等,2004、2008),并逐步开展技术研究和系统开发工作。1994年,中国广东大亚湾核电站建立了用于地震报警的地震仪表系统;2004年,天津市成立了滨海地震预警中心;2011年,成都高新减灾研究所在汶川地区积极开展地震预警系统研究和试验工作;2012年山东省地震局、中国农业大学和民政部国家减灾中心所承担的国家科技支撑计划项目——“面向公众的地震监测预警技术研究及集成示范”正式开展;2012年3月8日,铁道部与中国地震局签署关于高铁地震安全的战略合作协议,加强双方在高铁地震预警方面的合作,未来有望实现高铁地震的异地预警。

3.2 面临的挑战和建议

虽然我国在建立地震预警系统方面已经具备了一定的条件,而且可以借鉴国际上先进国家和地区的成功经验来开展工作,但仍要面临很多技术方面的问题。目前EEW系统的完善所要解决的最重要的技术问题是如何实时获取和描述地震有限破裂过程图像。由于EEW系统的运行都是基于震源的有限破裂做出分析和判断的,这会出现震级饱和和地震震动预测不确定性。而对于大地震来讲,即使可以精确地估计地震震级大小,但断层破裂的方向和破裂尺度对强地面运动仍具有很大的影响,所以如何有效地结合地震仪和大地测量资料,并利用断层模型和破裂物理学进行地震预警仍是亟待解决的问题。

而且地震预警系统除了要解决一系列技术问题外,它本身更是一项复杂的社会工程,在具体的实施过程中将会遇到多种非技术性的挑战:①由于地震预警技术还不成熟,所以目前即使地震预警系统最发达的日本,其预警的正确率也仅为30%左右。如果出现错报、漏报和误报的情况,将会引起责任和法律纠纷。所以,针对地震预警系统的法案与相关实施标准应配套出台,为地震预警工作的规范开展提供保障。②EEW系统使用频次低。日本的UrEDAS系统1992年安装的EEW,2004年才成功地进行一次预警。系统如果长时间得不到应用,人们便会产生麻痹思想,甚至质疑它的价值。所以有专家建议可为公众提供更小地震或更多地震的预警服务,因为以适当的方式使用警报信息既可以提醒人们注意地震灾害,又增加了一次学习避震知识的机会,使公众的防震减灾意识得到普遍加强。③中国大陆地域广阔,不同地区的地质构造条件也具有很大差异。所以我国地震预警系统的建立,不可能一蹴而就,需要先建立示范区,然后再向全国推广。马宗晋院士早在1993年就提出了加强地震的分类、分级、分区预警研究,针对中国大陆的不同构造区域研究符合区域特征的预警指标(马宗晋,1993)。④从当前EEW的效果上来看,在震源区还存在预警时间短,民众很难及时做出有效避震措施等问题,而且无论今后地震预测、预报和预警的水平达到何种程度,震害防御工作都绝不能忽视。当务之急是探测断层分布情况,提高地震区划的精细程度,为建设工程提供科学、安全、合理的抗震设防依据,而且要严把建筑质量关,确保建筑物达到相应的抗震标准。⑤在我国,大多数民众对地震知识和避震常识的了解肤浅,即使获取了预警信息,也很难及时做出正确的反应,这主要是由于破坏性大地震在我国是偶发性事

件,人们经常会存在侥幸心理而忽视这方面的学习,导致在地震突发时造成不必要的伤亡和损失。因此,必须加强公众对地震应急知识的教育和演练,通过普及推广全民防灾减灾知识,增强全社会地震防御意识,才能最大限度地减少地震造成的损失。

4 结语

在目前还无法做到准确的地震预测、预报的情况下,地震预警虽然是退而求其次的办法,但国际上已经积累了许多成功的经验,这不仅给抗震减灾工作带来了新的希望,更使人们增加了对抗自然灾害的勇气和信心。地震预警是一项复杂系统工程,必须要由政府、科学界和社会组织间密切沟通和联系,只有这样才能在紧急的情况下做出正确的反应。开展地震监测预警研究是地震科技发展的必然,同时也具有强烈的社会需求,对保障国家能源安全、社会公共安全和社会稳定具有重大意义。我们相信,地震虽然是不可避免的,但通过整个社会不断的努力,它所造成的灾害是可以大大减轻的。

致谢:感谢美国迈阿密大学的 ShimonWdowinski 教授在资料收集方面提供的帮助。感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议。

参考文献

- 陈运泰,2009,地震预测:回顾与展望,中国科学 D 辑:地球科学,**39**(12),1633~1658。
- 马宗晋,1993,中国重大自然灾害及减灾对策(总论),170~176,北京:科学出版社。
- 夏玉胜、杨丽萍,2000,地震预警(报)系统及减灾效益研究,西北地震学报,**22**(4),452~457。
- 张晓东、张国民,2004,关于地震预警的思考,国际地震动态,**6**,42~46。
- 张晓东、蒋海昆、黎明晓,2008,地震预测与预警探讨,中国地震,**24**(1),67~76。
- Allen R M, Ziv A, 2011, Application of real-time GPS to earthquake early warning, *Geophys Res Lett*, **38**, L16310, doi: 10.1029/2011GL047947.
- Bock Y, Diego M, Crowell B W, 2011, Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and Accelerometers, *Bull Seism Soc Am*, **101**(6), 2904~2925, doi:10.1785/0120110007.
- Boore D M, Stephens C D, Joyner W B, 2002, Comments on baseline correction of digital strong-motion data: examples from the 1999 Hector Mine, California earthquake. *Bull Seism Soc Am*, **92**(4), 1543~1560, doi:10.17850120000926.
- Brown H, Allen R M, Hellweg M, et al, 2011, Development of the ElamS methodology for earthquake early warning: Realtime application in California and offline testing in Japan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**, 188~200.
- Cooper J D, 1868, Earthquake indicator, San Francisco Bulletin.
- Crowell B, Bock Y, Squibb M, 2009, Demonstration of earthquake early warning using total displacement waveforms from real time GPS networks, *Seism Res Lett*, **80**(5), 772~782, doi:10.1785/gssrl.80.5.772.
- Diego M, Bock Y, Crowell B W, 2012, Real-time centroid moment tensor determination for large earthquakes from local and regional displacement records, *Geophys J Int*, **188**, 703~718, doi:10.1111/j1365-246X.2011.05297.x.
- Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al, 1997, Earthquake cannot be predicted, *Science*, **275**, 1616~1617.
- Hamada K, 1991, Unpredictable earthquakes? *Nature*, **353**, 611~612.
- Shieh J T, Wu Y M, Allen R. M, 2008, A comparison of tau-c and tau-p-max for magnitude estimation in earthquake early warning, *Geophysical Research Letters*, **35**, L20301.
- Wyss M, 1991, Evaluation of Proposed Earthquake Precursors, Washington DC: American Geophysical Union, 94.
- Yamada M, Heaton T, Beck J, 2008, Real-time estimation of fault rupture extent using envelopes of acceleration, *Bull Seism Soc Am*, **98**, 607~619.

Current Earthquake Early Warning technology and it's development in China

Yin Haitao^{1,2)} *Liu Xiqiang*¹⁾ *Li Jie*¹⁾ *Xu Changpeng*¹⁾

1) Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

2) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

Abstract Earthquake Early Warning (EEW) comes into the sight of people as a result of unreliability of earthquake prediction. The paper illustrates comprehensively the research status and hot issues of EEW in terms of the concepts, compositions and methods. The study of the government status, social needs, network building and research foundations reveals that it is a right time to build EEW in Chinese Mainland. It also estimates the technical difficulties and non-technical challenges in the course of the implementation of EEW in China, and suggests the enhancement of legal measures, public education and seismic protections to bring the Earthquake Early Warning system into full play in earthquake relief.

Key words: Earthquake Early Warning Seismic wave Magnitude estimating
Development Discussion