

应急地震学的研究进展

倪四道*

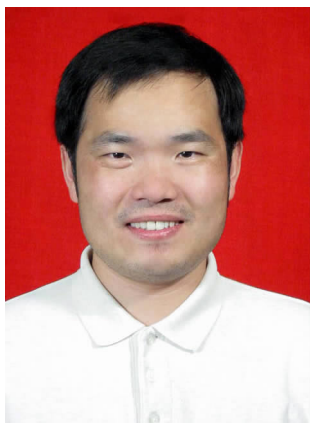
(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 因孕震过程很难进行直接观测,人类对孕震过程及地震破裂起始过程了解尚少,地震的短临预报在短期难以取得突破。目前美、日等发达国家及地区采取的对策是,强化建筑物抗震设防、深化地震快速应急研究。应急地震学是指在地震发生后以最短的时间确定地震的位置及强度,利用现代通信的快速性,在破坏性地震波(主要是地震面波)达到之前几到几十秒的时间内采取适当的措施,避免一些人员财产损失,形成地震预警系统。应急地震学另一个重要内容则是地震灾害的快速估计,即利用国家及全球的地震波形信息,结合地震灾区的强地面震动记录,快速确定地震的起始、终止时间、地点及能量释放的具体过程,结合当地地质结构信息,从而估计各地区可能的受灾程度,为合理分配救灾资源提供第一手资料。在进一步加密我国地震台网的基础上,在东部平原大都市地区我国应可实现强震(6.5级以上)发生后20秒内快速确定震中及震级,实现地震极早期预警。同时可在几小时内确定地震能量释放过程,形成地面震动理论评估图(shakemap),按照灾情程度合理分配救灾资源,提高救灾效率。

关键词 地震应急学,研究进展



中国科学院



倪四道教授

1 地震及应急地震学

多数地震是地球内部物质运动在板块边界或者板块内部断层附近积累的大量应变能突然释放的结果。地震灾害具有突发性和

严重性的特点,一直是人类社会的巨大威胁。而我国处于强震多发区,遭受的地震灾

害特别严重,尤其是1976年唐山地震和此次汶川地震给我国带来了巨大经济和人员损失,其形成的灾难在世界上也是罕见的,防震减灾研究是我国地球物理研究最重要内容。

如果能够对地震进行准确的预报,人员伤亡及部分经济损失则可得到有效避免。然而,地震一般起始于地表下8—15公里的深度,目前科学上还没有有效的手段高精度地对地震孕育区的物理过程进行监测,科学家对地震破裂如何开始的物理机制了解甚少,因而很难做出准确的地震预报(地震之前几天,地震位置精确到百公里以内,而且震级要比较明确)。断层之间的相互作用非常复

* 收稿日期:2008年7月2日

杂,Anderson 等人^[2]发现,发生在某些断层上的地震破裂只会沿着一个断层传播,从而最终发展为一般大小的地震。而有些地震则是在一个断层上开始,然后很快地触发了另外一个更长断层上的活动,可形成震级高达 7.8 的强震。所以说,如果对断层之间相互作用的机理和过程没有详细研究,则很难预测地震的大小。实际的例子是,2002 年的 Alaska 地震序列,在 10 月 23 日发生了 6.7 级地震,10 天后不远的地方发生了 Denali 主震。Denali 主震开始的破裂呈现逆冲型的震源机制,20 秒之后迅速转变为走滑机制,在破裂了 300 多公里后停止,最终震级达 8.1^[3]。如果起始的逆冲型地震没有继续发展,也许该地震只是一个不超过 7 级的地震。这个例子说明,事先准确预测地震大小是非常困难的。就目前的地震物理的研究水平来看,地震短临预报依然是世界性的难题,近期内难以取得突破性进展。目前美、日等发达国家及地区采取的对策是,在地震发生前,强化建筑物抗震设防,使强震引起的地面震动不形成灾害;在地震发生后,实时采集、处理地震信息,在强地面震动尚未形成之前采取紧急措施避免一些灾害的形成(地震早期预警)及在地震灾害形成之后,快速确定地震成灾范围,按照灾情严重程度调配救灾资源,提高救灾效率(震灾快速评估)。地震早期预警和震灾快速评估是应急地震学(real-time seismology)的主要研究内容^[6]。

地震早期预警是指在地震发生后以最短的时间确定地震的位置及强度,利用现代通信的快速以及快速但是强度弱的 P 波和慢速却强烈的 S 波的时间差,在破坏性的地震波(主要是地震面波)达到之前,发出预警信息,从而能够采取紧急措施,减轻人员财产损失。例如,汶川地震发生在成都以西 100 多公里处,地震面波需要 40 秒左右才

能达到。如果利用该地震附近的地震台(假定 50 公里内有两个台),根据地震的 P 波特性和强度,成都就可以有 20 多秒的预警时间终止关键性活动(学生上课、重要会议、医院手术、高速列车、金融交易、军事演习、危险性工业品生产等),以及对电、煤气、自来水等设施进行暂停,减少由次生灾害造成的损失。此次地震不仅给当地造成了惨重的损失,也给其他地区的人民造成了显著的影响。在地震发生 10 多分钟后,强烈的面波抵达北京、上海等东部城市,使在高层建筑内的正常生产、工作、学习暂时中断。如果我国已经形成了地震早期预警系统,那么完全可以在地震面波还没有到达东部大城市之前,向民众及相关部门通报有关情况,那么完全可以避免不必要的社会恐慌。

在地震灾害形成之后,政府需要尽快掌握灾情严重程度及分布情况以便组织救灾。目前有两种方案可确定地震灾害的分布情况。对于强震动观测点比较密集的地区,可根据每个点上的峰值加速度勾画出地面震动等值线,从而形成地面震动图(shakemap),从而估计地震成灾范围。对于强震动观测点稀疏的地区,则可利用国家及全球的地震信息,在短时间内确定地震的起始、终止时间、地点及能量释放的具体过程,结合当地地质结构信息,从理论上计算出 shakemap,来估算各地区可能的受灾程度,为合理分配救灾资源提供第一手资料。一般说来,可以挽救的人员和财产随着震后的时间推移越来越少,因此震灾评估需要在尽量短的时间内以尽量高的精确度完成。

随着地震观测点密度的增加以及数据传输技术、地震数据处理技术、地震波形反演算法等方面的进步,应急地震学已经在一些发达国家和地区得到了应用,产生了明显的效果。本文就应急地震学的一些基本问题

进行简要介绍,以期抛砖引玉。

2 应急地震学国际发展现状及趋势

广义来说,应急地震学已有很长的历史。不过早期应急地震学的主要内容是地震信息快速发布(地震速报)。在上世纪 60、70 年代,随着地震观测中心可以快速取得遥测地震数据,地震的 3 大要素(时间、地点、震级)可以在较短的时间内确定,地震速报系统也成为现实。90 年代,美国加州理工学院和美国地质调查局(USGS)合作建立了真正的快速地震播报系统(Caltech/USGS Broadcast of Earthquakes, CUBE),该系统可以在地震发生后的几分钟内把地震的位置、震级等信息迅速向注册用户通报。在此之后,随着南加州高密度的台网 TriNet 的建立,加州理工学院和 USGS 建立了更实用的地震信息播报系统(Shakemap)。Shakemap 主要是对密集的地面震动观测数据进行插值,得到地面震动强度的分布。这套系统在地震发生后几分钟内就可以把地面震动分布确定下来并通知用户,对于救灾非常有用。大约在相同的时期,日本也建立了类似的系统(SIGNAL、ROSE 等)。10 多年前台湾地区强地面观测站密度有了大幅度的提高,在此基础上建立了相应的地面震动速报系统。

地震预警的设想也早就有人提出。在 1868 年 J.D.Cooper 提出在旧金山东边的 Hayward 断层边上建立地震观测站,利用电报对旧金山提供地震预警。虽然他的建议没有得到实施,却给后人提供了有意义的思路。此后地震学经过 100 多年的发展,终于使地震预警成为现实。现代的地震预警有两种方案,一是基于地震速报系统,即利用地震观测网中离震中最近的几个台,快速确定地震的 3 要素,然后利用现代通讯和破坏性地震波的时间,让离震中较远的人们有一定的时间采取措施。此方案(网络预警)确定了

地震的基本要素,可以向比较远的区域发布预警。但该方案有比较大的盲区,需要几个台才能确定地震的信息。另一方案是单点地震预警,此方案利用地震 P 波和 S 波的特点,进行地震预警。其工作流程是,该点的地震仪连续监测地震动,如果检测到很强的 P 波,则产生预警,警告破坏性地震波即将达到。该方案只需要一个台,所以盲区小^[9]。但只能对该地点进行预警,其应用有一定的局限性。比较好的方案是把网络预警和单点预警结合起来,以减少盲区和增加预警范围^[8]。

地震预警系统已在地震减灾得到了应用。在 20 世纪 60 年代,日本铁路系统研发了 UrEDAS 系统,该系统利用一个地震台的观测资料,粗略判断地震的基本要素,如果检测到强震发生,该系统则通知高速列车采取制动措施,避免脱轨事故。1989 年加州 Loma Prieta 地震发生后,Bakun^[10]等人提出了该地震强余震的预警系统,即通过主震区较密集的地震台网监测余震,一旦有强余震发生,立即向大城市奥克兰的建筑工人(尤其是高处工作的工人)发送预警,他们有 20 多秒的时间疏散到安全地带。在台湾、墨西哥等地区也建立了地震早期预警系统。

地震预警研究最关键的目标就是以最短的时间确定地震的要素。然而从直觉来说,对大地震进行预警似乎是不可能的。例如此次汶川地震的持续时间近百秒,最终成为 8 级地震。那么是否必须等到地震结束才能知道地震强度呢?近几年的应急地震学的重大成果对此给出了否定的回答。Allen and Kanamori^[1],Olson and Allen^[7]在 *Science* 和 *Nature* 上的研究成果表明,地震破裂过程具有某种确定性,即地震刚开始的几秒钟信息已经基本上可以满足判断地震结束时间以及最终震级^[4]。他们利用震中距很近的地震台记录的 P 波的前几秒的波形计算得到了地震的特征时间,发现这些特征时间和震级



中国科学院

有很好的对应性。他们的研究表明,P波之后的4秒钟就足以判断震级。目前的研究重点之一是如何利用尽量少的台比较快速确定地震位置,亦有不少进展^[11,12]。

在地震灾害快速评估方面,旅美学者纪晨利用小波变换反演远震P波,可以比较快速准确得到地震的破裂过程,在此基础上,可以计算出理论的shakemap^[5]。该方法对强地面震动观测点稀疏的地区的地震灾害评估有特别重要的意义。日益提高的超级计算系统逐步使得三维地球模型中地震波形的计算成为可能,将对地震灾害快速评估起到重要的推进作用。

3 我国应急地震学现状及进展

根据相关报道,汶川地震发生后,国家地震监测部门在5分钟左右确定了地震位置及强度,十几分钟后上报地震信息。而在地震发生十几分钟后,地震面波基本上已经离开我国(图1),所有的地震直接灾害及影响已经形成,达不到地震预警的效果。而确定地震何时结束、何地结束及通过地震破裂模型评估地震灾害,做出地震震动图(图2),则是地震一天后的事情了。因此,我国应急地震学的能力还需提高。

经过几代地震学家的努力,我国地震学研究在有些方面处于世界较先进的水平。中科院和中国地震局所属的几个研究所在地

震研究方面实力雄厚。在陈 院士的带领下,中国地震局已开展了地面震动图的研究工作,正稳步取得进展。中国地震局地球物理所开展了地震早期预警研究,可望在短时间内有一系列的成果。地震发生后较短时间内,中科院地质与地球物理所的姚振兴院士研究组和中国地震局地球物理所的陈运泰院士研究组,利用远震波形反演得到了汶川地震的震源破裂过程。笔者基于USGS的震源模型,在地震一天后计算得到了Shakemap(图2),其总体形状与实地考察得到的地震烈度有较好的对应。中国科学技术大学的陈晓非教授则利用三维的有限差分方法,考虑了复杂地形的影响,通过大规模并行计算,得到了更为准确的Shakemap。他的研究成果显示,山峰对地面震动具有明显的放大作用,而山谷中的地面震动相对弱一些,和山区灾区的实际地震成灾情况接近。

但是我国的应急地震学研究的系统化、集成化相对落后,不能满足我国地震减灾的需要。此次地震对武汉等大城市造成明显恐慌后,地震速报的信息才逐步公布。作为比较,6月份的日本岩手地震发生后数秒内电视台就播出了强震发生的信息,公众甚至有时间采取应急措施,有效地避免了地震恐慌。地震后一天内,我国没有自己的理论地震烈度图,抗震救灾指挥部只能根据USGS

提供的理论烈度图指导救灾。此次震区附近有大量的强震动观测点,但是让人非常痛心的是,极震区的一些观测资料被地震毁坏,即使没有毁坏的资料也没有能实时地传输到数据中心为抗震救灾提供帮助。和日本的强震资料的高效及时利用相比,差距不小。

4 建议及对策

汶川地震给我国的应急地震学研究提出了迫切的需求。与目前



图1 汶川地震成灾过程及地震预警目标

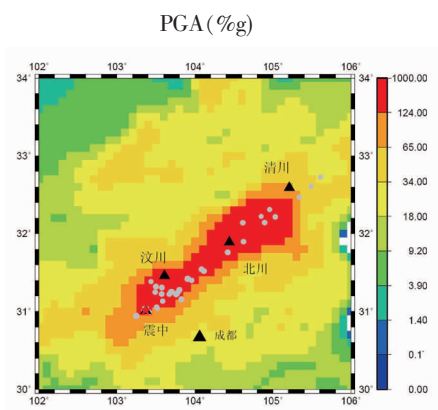


图2 汶川地震理论地表强震动(峰值加速度)分布图。圆点为余震

发达国家的地震后灾害定位及评估能力相比,我国的应急地震学科研体系有明显的差距。美、日等国家已经开始利用地震发生后4秒钟的信息,快速确定地震位置及强度,实现早期预警。根据我国的情况及社会需求,针对我国已有的地震监测能力,在1—2年内达到以下目标是完全可能的:

(1)具有密集观测网地区的早期预警。对于东部大都市区,例如(北京、天津、唐山等组成的)首都圈,(上海、南京、苏州等)组成的长三角都市圈,应能做到地震发生后20秒内基本确定地震位置及震级,给都市的经济、社会活动提供10—30秒的宝贵时间采取关键措施,减轻损失、保障社会稳定。

(2)观测网稀疏地区的早期预警。对于西部地区(云南、四川、西藏、新疆),因疆域大,地震台网覆盖密度低,暂时无法达到20秒内预警目标。但是考虑到300—500公里内总有一个台,因此可以做到100秒内,定出地震位置及震级。对于成都、昆明市、乌鲁木齐等大城市,适当增加城市附近观测站密度,应可实现20秒预警。那么,西部发生的大地震面波需要10多分钟才能到达东部,其对东部的影响基本上可以防范于未然。

(3)地震灾害快速评估。对于首都圈等强地面震动观测点密集的地区,可以在几分

钟内形成shakemap。对于强地面震动观测站稀疏地区,可以利用远震波形。20分钟内,地震波已经到达全球的任何一个位置,因此地震所有的信息都已经可以确定。利用现代地震学的研究成果,地震学家已经可以很快确定地震的细节,包括地震起始、终止地点和时间,以及地震能量释放的具体过程。在此基础上,计算出地震波在震源区的地面震动强度,结合震源附近的强地面震动记录,计算出shakemap,形成地震成灾分布图,为高效率救灾提供第一手资料。按照目前地震学的研究能力,可以在两小时内得到这样的结果。

在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中,国家强调了对重大自然灾害监测与防御方面的研究。纲要也明确了建设“国家公共安全应急信息平台”的重要性,强调构建国家公共安全早期监测、快速预警与高效处置一体化应急决策指挥平台。应急地震学研究正是重大自然灾害监测与防御研究及国家公共安全应急信息平台建设的重要组成部分。因此非常有必要把我国的相关地震学研究力量组织起来,形成有效的应急地震学研究体系。建议国家对应急地震学研究进一步规划并逐步落实。

主要参考文献

- 1 Allen R M, Kanamori H. The potential for earthquake early warning in southern California. *Science*, 2003, 300:786-89.
- 2 Anderson G, Aagaard B & Hudnut K. Fault Interactions and Large Complex Earthquakes in the Los Angeles Area. *Science*, 2003, 302:1 946-1 949.
- 3 Eberhart-Phillips D, Haeussler G *et al.* The 2002 Denali Fault Earthquake, Alaska: A Large Magnitude, Slip-Partitioned Event. *Science*, 2003,300:1 113.
- 4 Ellsworth W L, Beroza G C. Seismic evidence for an earthquake nucleation phase. *Science*, 1995,



中国科学院

- 268:851-55.
- 5 Ji C, Wald D J, Helmberger D V. Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2002, 92:1 192-1 207.
- 6 Kanamori H. Real Time Seismology and Earthquake Damage Mitigation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2005, 33:195-214.
- 7 Olson E, Allen R M. The deterministic nature of earthquake rupture. *Nature*, 2005, 438:212-215.
- 8 Wu Y M, Kanamori H. Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2005, 94.
- 9 Wu Y M, Shin T C, Chang C H. Near real-time mapping of peak ground acceleration and peak ground velocity following a strong earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2001, 91:1 218-1 228.
- 10 Bakun W H, Fischer F G, Jensen E G *et al.* Early warning system for aftershocks. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1994, 84:359-365.
- 11 Horiuchi S, Negishi H, Abe K *et al.* An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2004, 95:708-718.
- 12 Odaka Y, Ashiya K, Tsukada S *et al.* A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2003, 93:526-532.10

Progress in Real-time Seismology

Ni Sidao

(Mengcheng National Geophysical Field Observatory and Research Station,
University of Science and Technology of China 230026 Hefei)

Accurate earthquake prediction is still a far-reaching goal for modern seismology because of the complicated seismogenic process and rupture initiation process. More reliable and rewarding measures are seismic risk assessment and enforcement of building code before earthquake. Implementation of early warning system (EWS) for strong earthquakes and rapid seismic damage mitigation are the two major components of real time seismology. EWS takes the advantage of time difference between the fast propagating weak P waves which carries definitive information of strong earthquakes, and the later arriving damaging S waves. With only a few to tens of seconds, magnitude and location of an earthquake can be estimated with the initial portion of P waves, and early warning is issued to avoid damages. Then within hours, global waveforms can be inverted to get the detailed process of seismic energy radiation, a reliable map of ground shaking can be calculated based on the inverted models with verification from strong motion records. For the dense network in Eastern China, 20 seconds early warning is realizable.

Keywords real-time seismology, rapid seismic damage, mitigation, earthquake early warning

倪四道 中国科学技术大学教授,教育部“长江学者”特聘教授,中国科技大学蒙城地球物理国家野外科学观测研究站站长。中国地震学会预报分会、中国海洋学会海啸分会委员。1993年毕业于中国科技大学,2001年在美国加州理工学院获博士学位。2001—2004年在加州理工学院地震学实验室从事研究工作。主要从事计算地震学、全球地震学、深部地震物理等方面的研究。在 *Nature*、*Science*、*EPSL*、*JGR*、*GSA* 等国际刊物上发表文章多篇。主持国家杰出青年基金、自然科学基金重点基金等项目。E-mail:sdni@ustc.edu.cn