

邢台地震与我国地震预报的发展

张国民, 李志雄, 杨林章

(中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要: 详细叙述了自 1966 年邢台地震以来, 我国地震预报研究与实践的主要进展: 建设成了多学科的地震观测系统, 为地震预报打下了良好基础; 进行了大量震例研究, 初步建立了地震预报的判据和指标体系; 进行了地震预报理论的实验和研究, 提出了多种地震孕育发生模型及前兆机理; 通过 20 多年的 5 次地震预报攻关研究, 形成了数十种地震预报方法; 边研究, 边预报, 几十年来成功地预报了 20 多次破坏性地震, 并取得了减灾实效, 使我国地震预报的科学水平居于世界前列。本文还对地震预报尚需解决的科学难题进行探讨。

关键词: 邢台地震; 地震预报; 抗震救灾

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A

0 引言

1966 年 3 月 8 日凌晨, 河北省邢台地区隆尧县发生 6.8 级强烈地震。接着 3 月 22 日, 在宁晋县再次发生 7.2 级大震。这是中华人民共和国建国后首次发生在中国大陆东部人口稠密地区造成严重破坏和伤亡的地震, 在国内外引起重大反响。6.8 级和 7.2 级的震中烈度分别达到 9 度和 10 度, 受灾面积达 10 余万平方公里, 共损坏房屋 508 万间, 其中 262 余万间严重破坏或倒塌。位于震中地区的隆尧县马兰、任村一带和宁晋东汪等地, 房屋几乎全部倒塌, 村镇街道变成一片废墟。两次地震中共有 8064 人丧生, 38451 人受伤。强烈地震还造成良田被毁, 公路开裂, 桥梁塌落, 交通中断, 农田水利设施破坏等严重灾害。

邢台地震引起党中央、国务院和全国人民的极大关注。3 月 8 日当天, 国务院总理周恩来召开了各部委负责人参加的紧急会议, 全面部署救灾工作。第二天, 周总理又亲临灾区视察和慰问, 代表党中央向灾区人民提出“奋发图强、自力更生、发展生产、重建家园”的号召, 极大地鼓舞了灾区人民的抗震救灾斗争。

与此同时, 广大地震科技工作者从四面八方日夜兼程, 奔赴灾区, 在灾区人民要求“地震前打个招呼”的强烈呼声感召下, 以邢台震区为地震预报试验场, 密切监视和细致分析震情, 揭开了中国地震预报

科学实践的序幕。此间周总理对地震预报的殷切期望和深切关怀, 更是给地震科技工作者增添了巨大的动力。在 3 月 8 日地震当晚, 周总理亲自召开会议听取震情汇报。会上周总理向地震工作者提出要搞地震预报, 号召科学工作者到现场去, 到实践中去。3 月 11 日周总理在邢台抗震指挥部又对地震工作做了一系列重要指示。周总理指出: “我们的祖先, 只给我们留下了纪录, 没有留下经验。这次地震付出了很大代价, 这些代价不能白费! 我们还可以只留下纪录吗? 不能! 必须从中取得经验。”“希望转告科学工作队伍, 研究出地震发生的规律来。……这在国外也从未解决的问题, 难道我们不可以提前解决吗? ……我们应当发扬独创精神来努力突破科学难题, 向地球开战。”

3 月 22 日 7.2 级地震发生后, 周总理再次来到邢台, 在视察地震工作时, 周总理语重心长地对科学技术大学地震专业的同学说: “希望你们这一代能解决地震预报问题。”

在邢台地震现场, 地震工作者调查考察, 总结研究, 严密监视, 探索强震前的异常现象。发现大震前在震中区及其附近地区确有某些特殊现象出现。如井水翻花、变浑, 水位涨落, 动物行为异常, 小震活动出现“密集—平静”特征等。根据这些认识, 地震现场考察队曾成功预报了 3 月 26 日发生在宁晋百尺口的 6.2 级强余震。随着现场预报工作的广泛开展, 人们对地震发生过程的认识也不断深化。这些

* 收稿日期: 2006-03-01

作者简介: 张国民(1942—), 男(汉族), 上海市人, 中国地震局预测研究所研究员, 主要从事地震学预测和研究。

初步经验与认识,极大地鼓舞了地震工作者。来自当时的中国科学院、地质部、石油部、国家测绘总局和北京大学、中国科技大学等部门和单位的科技人员,在邢台大震现场,利用各自的优势探索地震预报的具体途径,从而形成了多学科联合,多路探索的生动局面。现场所开展的观测研究工作涉及地球物理、地质、大地测量、地球化学、工程力学以及生物、气象等十多个学科,建立了一批前兆观测台站,先后有测震、地电、地磁、地下水、水化学、水准、基线、重力、扭称、地应力、地声、地倾斜等 20 余种手段投入了观测,取得了一批有价值的观测资料。同时灾区群众也采用多种方法监测地震,如地下水、动物行为习性以及其他一些简易仪器。初步形成了中国第一个综合性的专群结合的前兆观测台网。至此,中国地震预报科研工作进入了以大量前兆观测为基础的,多学科联合攻关的新阶段^[1]。

1966~1976 年,10 年间在我国陆区共发生了 15 次 7 级以上大地震,其中有 12 次发生在华北(含辽宁海城)和川滇,有 3 次发生在新疆和西藏。除了这些 7 级大震外,在华东、西北等地还发生了一系列中强地震。一连串的强烈地震及其造成的巨大灾害激起了社会公众对地震预报的强烈需求,地震预报工作以邢台地震区为发源地,很快在华北、西南、西北、华南、东北等地发展起来。广大地震科技工作者在地震现场边观测、边研究、边预报,在全国范围内揭开了地震预报科学实践的序幕。

1 40 年来地震预报研究的主要科学进展

自邢台地震后我国开展大规模地震预报的科学实践以来,经过 40 年坚持不懈的努力,使我国的地震预报研究和地震预报工作迈出了非常重要的一步,并跻身于国际地震预报科学研究领域的前沿。笔者曾总结过 40 年来地震预报的主要科学进展^[2,3],现进一步综述如下。

1.1 建设了多学科地震观测系统,建立了地震预报的监测基础

与地球科学的各分支领域一样,地震预报是一门以地球实体为研究对象的观测科学。建立多学科监测的观测系统,是整个地震预报研究的最核心的基础。数十年来,所建立的地震监测基础包括多学科地震观测台网以及“九五”以来建设的数字地震观测台网和 GPS 观测网络等。

到上个世纪 90 年代初,多学科的地震观测已包括 400 多个测震台站和 20 多个地震遥测台网,还包括含有地壳形变、重力、地磁、地电、地下水化学、地下水位等学科的前兆观测台网。各学科前兆台网所含的台站数量列于表 1 中。各学科前兆台站的总和达 1700 多个。

表 1 各学科前兆台网的台站数量

前兆 学科	地壳 形变	地磁 学	地电 学	地下水 化学	地下水 动态	重力	应力 应变	电磁 波
台站 数量	262	255	95	493	504	14	70	36

除了表 1 中各学科的固定台站外,在各地震区还建立了定期复测的跨断层形变观测点 200 多个。同时,还建立了流动重力、流动地磁和流动形变观测网络,其测量线路的总长度达 150000km。该观测系统及其在 30 多年来所积累的大量的观测资料,不仅为地震科学研究,而且对地球科学的发展提供了大量宝贵的基础资料,从而为我国的地震预报发展奠定了重要基础。

“九五”期间,我国地震观测技术实现由模拟向数字的跨越。先后建成由 48 个数字地震台组成的国家数字地震台网、21 个区域数字遥测地震台网和由 107 个台站组成的首都圈数字遥测地震台网;宽频带流动观测系统建设得到快速发展,形成 140 套流动数字地震仪的流动地震观测能力;完成了全国地震前兆基本台网以及首都圈、苏鲁沪、川滇、甘宁青 4 个重点监视区前兆台网 159 个前兆台站的综合化、数字化改造;建立由 25 个基准台、56 个基本站和 1000 个不定期观测点组成的中国地壳运动观测网络。同时,地震信息系统建设也迅速发展,全国地震信息网络建成投入使用。

“十五”期间,随着“中国数字地震观测网络”项目的全面实施,以数字化改造和建设为中心的地震监测系统的现代化建设全面展开,102 个数字化国家地震台、35 个区域数字化遥测地震台网以及 1000 个强震台将建设,同时对 300 个前兆台站进行数字化改造。

上述多学科观测系统的建设,及其数字观测技术的应用,不仅对于地震预报是重大的基础建设,而且对于整个地球科学的发展都具有非常重要的意义。

1.2 积累大量的震例资料,建立经验性地震预报基础

在建立地震预测预报的多学科观测系统、开展广泛监测的基础上,自1966年以来,在上述台网的监测范围内已获得大量的震例资料。截止1999年,已获得5级以上震例将近180个。其中包括6级以上震例40个,7级以上的大震震例14个。这些震例分布于我国大陆地区的20多个省(自治区),覆盖了华北、华东、华南沿海、东北、西北、西南、新疆等地震区。对这180个震例逐个进行了编辑,从地震的基本参数、地震地质背景、烈度分布、地震序列、震源机制、地震台网和前兆异常、前兆异常特点等方面进行系统全面编撰,并以《中国震例》专著出版。从1966年~1999年180个震例共出版了《中国震例》8册。在180次5级以上震例中,共观测到各类异常2000多条。其中地震学方法的前兆占总数的三分之一左右。地形变、电磁、地下流体等学科的前兆占总数的三分之二左右。张肇诚等将这些前兆异常分成测震、形变、重力、地电、地磁、地下水化学、地下水物理、应力应变等11大类。每一类前兆又含有若干项目,如地震学前兆含有地震条带、地震空区、地震活动性增强、平静、地震窗、b值、前震群等异常项目^[4~7]。11类前兆共包括75种异常项目,2000多条前兆异常。如此丰富的震例资料,在国际上也是绝无仅有的,其无疑是地震科学和地震预报研究难得的宝库。尤其是对于当前的地震预报,在阶段上是属于经验性预报的性质,在科学上是属于初期的探索,所以,这些宝贵的震例资料,既是现阶段经验预报的重要基础,又是科学探索的基本事实依据。

在对大量震例资料和前兆性异常反复深入研究的基础上,总结了前兆异常的多方面特征,逐步发展了地震预报方法,形成了长、中、短、临阶段性渐进式地震预报的科学思路和工作程序,初步建立了经验性预报的基础。

在对地震前兆异常特征的系统总结和分析研究过程中,发现地震前兆具有一定的规律性(即带有一定的共同性),同时又具有相当大的复杂性的双重特性。其中,地震前兆异常所显示的规律性特征是用以地震预报的基础和依据,从而也是当前经验预报的基础。而地震前兆所显示的复杂性的特征既是制约当前地震预报水平提高的根源,同时也是对地震孕育、发生过程作进一步科学探索的基本科学问题。

经过地震预报的长期实践及其检验,前兆异常的下述基本特征是当前经验性预报的主要基础。

(1)地震前兆的普遍性和多样性

即在中强以上地震前,在具有一定的前兆监测

能力的地区,普遍地或多或少地存在地震前兆。而且其前兆异常的数量、种类、幅度等因地震而异、因地而异。而在一般情况下,地震越大、前兆种类越多,异常数量和异常范围也越大。这种带有普遍性的现象是地震预报最基本的依据。同时,地震前兆具有多样性的特点,其覆盖了与孕震过程相关联的地球物理、地球化学、地壳形变、地质构造活动各个学科,且在孕震过程不同阶段显示为不同的异常特征。

(2)前兆异常时间分布的阶段特征

大量震例资料所给出的前兆异常,按其发展演化的时间进程和异常形态,大致可以归纳为两种类型,即趋势性异常和突变性异常。前者为低速率的连续性变化,呈稳定变化的异常形态,且往往持续1~2年的较长时间。这种趋势性异常也称中期异常。而后者则在观测值上呈现为快速的突发性变化,异常变化速率大而持续时间短,仅在震前数天至一、二个月内出现。这种突发性异常也被称为短临异常。这种震前不同时间阶段出现的不同类型的异常,即异常的阶段性特征构成了阶段性地震预报的基本依据。其中趋势性异常是中期预报(年度预报或1~2年预报)的主要科学依据,而突变性异常则是短临预报的基本科学依据。

(3)前兆异常空间分布的集中性与非均匀性

与板缘地震相比,我国板内大陆地震震例所给出的前兆异常分布范围较广,且在震中附近相对集中。从而根据异常集中区的分析建立对未来地震区预测的判据。然而地震前兆异常在空间上除具有在未来震中区相对集中的特性外,还有非均匀性的问题。其表现为在一定的观测区内,有异常的点和无异常的点往往相间分布,或沿某些地带异常呈密集分布。这种情况可能与地质构造分布有关。

(4)前兆异常的特征量与未来地震的关联性

前兆异常特征量包括异常的项目、种类、密度、幅度、持续时间、分布范围等。一般来说,这些特征量随着潜在地震震级的增大而增大。其中较为典型和普遍的是:异常的总体数量,异常(主要是趋势异常)的持续时间、异常展布(主要是异常集中区)范围均随震级的增大而增大。通过系统分析和统计研究,建立了若干异常特征量与未来地震三要素(震级、发震地点、时间)的经验性关系。其中包括未来地震强度与异常种类、数量和异常比例(密度)的相关关系;异常持续时间、异常展布范围与未来地震震级呈对数线性关系;以及异常空间分布和异常集中

区与未来地震震中区的相关关系等。

(5) 前兆异常的时空转移性

所谓前兆异常的时空转移性是指前兆异常群体的时空动态演化。在前兆特征的详细研究中发现, 前兆异常的群体在时空分布特征上具有动态演化特征。其显示在早期的中长期至中期阶段, 异常由震中区向外围扩展; 在中短期至短临阶段, 异常由外围向震中区迁移丛集。根据前兆异常的这种时空动态迁移特征, 可以对未来地震发生的地点和时间预测建立相应的判据。

(6) 短临异常及地震发生与外因的相关性

这里说的外因包括磁暴、日月引力、地球自转速率的正负转折、乃至节气日、大气压力等因素。在前兆研究中发现有些前兆异常出现的时间与外因同步, 而且有些地震的发生时间与外因关系密切。因此, 有专家提出了将震源过程、前兆和外因有机结合起来的调制模式。其基本思想是大震前震源区处于不稳定状态, 此时微量级载荷可能调制震源过程并触发地震。因此当发现外因出现日期与短临异常日期同步时要特别注意加强观测, 并注意在外因出现日期和短临前兆集中日期发生地震。这种外因调制触发已是当前经验性预报实践中应用的一个重要因素。

1.3 地震预报攻关研究

在广泛开展地震预报实践的同时, 不少地震工作者还从多方面探索了地震孕育的理论和模型。为研究地震孕育的阶段性发展过程, 孕育过程中各阶段的前兆表现及其成因机理等提供了十分重要和有意义的理论依据。所探索的地震预报的理论模型包括两个方面, 一是单个震源孕育发生的理论与模型研究, 二是成组强震孕育和发生的理论研究。

关于震源孕育发生的理论研究, 不少学者自 20 世纪 70 年代以来就开展了许多有意义的探索, 提出了许多有启迪的研究结果。其中包括地震孕育的“红肿”模式; 震源组合模式; 膨胀—蠕动模式; 流变介质的扩展模式; 强震孕育的坚固体模式等。

例如, 震源组合模式认为, 震源区由应力积累单元和其两端的应力调整单元组成。前者相当于高强度的闭锁区, 后者为低强度的蠕动段。在构造应力作用下, 调整单元通过蠕动不断向积累单元输送应力、从而在积累单元形成应力集中, 并最终发生地震。运用此模式可解释孕震过程及孕震过程中的多种前兆现象。

膨胀—蠕动模式则是震源组合模式的具体化和

定量估算。该模型给出, 当调整单元向积累单元输送应力到达一定强度后, 引起积累单元岩石膨胀, 并在进一步发展过程中导致断层蠕动及其加速破裂, 进而发展为快速失稳破裂(地震)。该模式给出了趋势异常机制(岩石膨胀)和短临异常机制(断层蠕动)。

强震孕育的坚固体模式将孕震系统分为震源区和近源区两部分。其中震源区是破裂强度大于周围介质的相对坚固体; 近源区则是由包围震源区并在构造力学上与其有紧密联系的断层网络块体系统组成, 其强度低于震源区。由于震源区和近源区介质结构和介质强度的差异, 导致孕震过程中两区之间的前兆性差异及其前兆异常时空动态演化特征。并以此解释大陆强震的孕育过程和某些重要的前兆特征。

关于大陆强震成组孕育和成组活动的理论研究, 主要包括我国大陆强震发生的成组性特征研究, 以及对成组强震孕育发生及其相互影响的理论探索。在理论探索方面主要有多应力集中点模式, 构造块体成组孕震模型等研究。其中构造块体成组孕震模型考虑了我国强震活动的地质构造背景, 即强震大多发生在不同级别的活动地块的边界上, 以及强震活动具有活跃和平静相交替的成组活动特点, 并考察了我国大陆地震受印度板块和太平洋板块的碰撞和俯冲挤压的边界动力作用而提出的。该模型将强震孕育和发生的静态与动态、定性和定量、单(震源)体和群体等各方面有机结合起来, 引进了孕震过程的流变性和非线性力学过程、应用弹簧、阻尼器、滑块等力学元件组成一个模拟一个多层次构造块体的断层网络孕震大系统, 并从理论上模拟给出了强震成组孕育、成组活动、相互影响、相互作用的一系列重要结果。这些结果对于逐步揭示我国大陆强震的动力学成因, 认识成组强震活动及其相互影响, 以及在地震预报和地震前兆研究中的场源关系等探索中均给出了重要的科学启迪, 并对地震大形势预测和地震中、短期预报中前兆场演化的分析均有重要的实际应用价值。

1.4 建立了统计性预报的方法和判据

(1) 中长期预测取得可喜效果

在中长期地震预测方面, 自 20 世纪 80 年代开始开展十年时间尺度的中长期预报研究以来, 经历一系列努力探索, 逐步完善了预报的方法、判据和相应的理论, 使预测效能有了明显提高。例如在 1995 年研究编制了我国 2005 年以前地震重点监视防御

区图。在该图中,判定了未来 10 年(即 1996~2005 年)中我国陆区 21 个重点地震监视防御区,并由国务院向各部委和各省、市、自治区颁布作为近期我国防震减灾的重要目标区。自做出此预测之后的 1996 年以来,我国东部 5.7 级以上,西部 6.7 级以上的强震共发生了 14 次(见表 2)。除了发生在青藏高原无监测能力地区的 1996 年 11 月 19 日喀拉昆仑 7.0 级、1997 年 11 月 8 日西藏玛尼 7.5 级、

2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级、2004 年 7 月 12 日西藏仲巴 6.7 级 4 次地震外,其余 10 次地震中,有 8 次发生在预测区中。有 2 次(即 2004 年 3 月 24 日内蒙东乌珠穆沁旗 5.9 级、2005 年 11 月 26 日江西瑞昌 5.7 级)发生在预测区外。由此可见,我国在十年尺度的中长期预测方面显示了明显的进步,取得了十分可喜的预报效能。

表 2 1996~2005 年我国大陆东部 5.7 级以上,西部 6.7 级以上地震统计表

地 震			中长期预测情况
时间	地点	震级	
19660203	云南丽江	7.0	滇西至川滇交界预测区
19960319	新疆阿图什	6.9	南天山西段预测区
19960503	内蒙包头	6.4	呼包预测区
19961109	南黄海	6.1	苏皖沪浙预测区
19961119	喀拉昆仑	7.0	无监控能力
19970106	新疆伽师	强震群 $M_{\max}6.7$	南天山西段预测区
19971108	西藏玛尼	7.5	无监控能力
19980110	河北张北	6.2	晋、冀、内蒙古交界预测区
20011114	昆仑山口西	8.1	无监控能力
20030224	新疆巴楚、伽师	6.8	南天山西段预测区
20030816	内蒙巴林左旗	5.9	辽蒙交界预测区
20040324	内蒙东乌珠穆沁旗	5.9	(预测区外)
20040712	西藏仲巴	6.7	无监控能力
20051126	江西九江、瑞昌	5.7	(预测区外)

(2)年度预测显示有较好效能

自 1972 年开始,我国实行了一年一度的年度地震趋势会商制度。其任务是在每年新年伊始的头几天(一般均在元月上旬),集中各方面的地震预报专家分析研究新一年的地震活动趋势,判定新一年中的重点地震危险区。会商结果所判定的重点地震危险区将作为新一年中各级政府防震减灾工作的重点目标区。因此年度地震危险区的预测(简称年度预测)对防震减灾工作有十分重要的使用价值。

为了衡量地震预测的水平和检验地震预报的效能,地震专家们经过系统而广泛的探索,给出了 R 评分的方法,用 R 值衡量地震预测预报的实际效能。 R 值可用下述公式表述:

$$R=1-\text{漏报率}-\text{虚报率}$$

从 R 值的表达式可知,若所发生的全部地震均

作了准确预报,即漏报率为 0;而且所有的预报都发生了地震(且预报的未来地震的时、空、强三要素都正确),即虚报率为 0,那么这种情况被称作为完全成功的预报。显然,完全成功的预报 R 值得分可接近于+1。反之若所发生的地震全部漏报,即漏报率为 1;且全部的预报均未发生地震,则虚报率亦趋近 1,那么这种情况称之为完全失败的预报。可以看到,完全失败的预报可导致 R 值得分趋向-1。而随机瞎猜等无意义预报 R 值在 0 附近呈正负摆动。因此从多样本的统计结果看, R 值均为正值则显示有预报效能, R 值越大,其效能越高。

经过对历年年度预测的严格检验,表 3 中给出了自 1990~2000 年共 11 年我国年度地震危险区预测的 R 评分结果。

表 3 年度预测 R 值评分结果统计表

年份	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	平均
R 值	0.097	0.139	0.193	0.121	0.036	0.170	0.340	0.265	0.349	0.228	0.470	0.220

由表 3 的结果可以看到, 11 年中 R 值均大于 0, 平均为 0.22。而在随机预测(相当于瞎猜)的情况下, R 值大于 0 和小于 0 的几率是一样的。因此, 要连续 11 年 $R>0$, 其几率仅为 $1/2^{11}$, 即十万分之五。而连续 11 的 R 值不仅为正, 且平均为 0.22, 其可能性只有百万分之一。因此表中的结果表明, 我国的年度地震预测是有科学含量的, 尽管预测水平还不高, 但已经显示了其有较好的效能和可喜的前景。

2 取得了多次有减灾实效的较成功的短临预报

地震短临预报处于地震预报这一世界科学难题中的最前沿。其既包括了当前尚未解决的非线性失稳问题的科学难点, 也包括了社会公众对其迫切的需求及与当前短临预报能力之间的巨大差距。面对如此巨大的科学难题, 中国地震工作者不畏艰险, 努力拚搏, 取得了令人瞩目的成绩。

早在 20 世纪 70 年代, 我国地震科技工作者对 1975 年 2 月 4 日辽宁海城 7.3 级地震做出了成功的短临预报, 大大减轻了人员伤亡和财产损失。据估计, 海城地震的短临预报至少减少了十万人伤亡。联合国教科文组织召开的第一次国际地震预报科学讨论会的组委会主席、新西兰著名地球物理学家埃维森教授称海城地震预报成功“揭开了地震学的新篇章”, 是“地震科学的一个新的里程碑”。在海城地震之后, 我国地震工作者对 1976 年 5 月 29 日云南龙陵 7.4 级, 1976 年 8 月 16 日四川松潘 7.2 级等地震也作了较好的短临预报, 且取得了减轻灾害的实际效益。

自 20 世纪 80 年代末我国陆区进入一个新的地震活跃期以来, 我国的地震短临预报又取得了新的进展。此间, 我国地震工作者对多次中强以上地震做出了较好的短临预测。其中 20 世纪 90 年代中取得明显减灾实效的主要有 3 次。分别为 1995 年 7 月 12 日云南孟连 7.3 级地震, 1997 年 4 月 6 日新疆伽师 6.4 级、6.3 级地震和 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 5.4 级地震。

1995 年 7 月 12 日孟连 7.3 级地震的短临预报

是在地震序列发展过程中根据对序列类型判定和对地下流体、地变形等一系列短临异常的综合分析中作出的。孟连震区在 1995 年 6 月 30 日发生 5.5 级地震, 7 月 10 日又升至 6.2 级。赶往地震现场工作的云南省地震局地震专家组在 7 月 10 日晚根据地震活动性背景和多种短临异常分析, 和对序列性质的判断, 作出了在未来 3 天以内还可能发生 6~7 级乃至 7 级左右强震的预测, 并向地方政府报告。云南孟连地区政府根据此短临预测意见立即向震区发布临震预报并采取了一系列防震措施, 将群众从危房中撤离, 结果在 7 月 12 日凌晨 5 时 11 分发生 7.3 级大震。由于采取了措施, 大大降低了人员伤亡和财产损失。这次短临预报受到了云南省政府和国家地震局的表彰和奖励。

1997 年 4 月 6 日新疆伽师 6.4 级、6.3 级地震的预测, 是一次对持续数月的强震群中的后续强震的预测。1997 年 1 月 21 日新疆伽师发生 6.3 级、6.4 级地震, 之后 5 级以上地震连续发生, 至 1997 年 6 月 16 日, 共发生 $M_s\geq 6$ 级地震 7 次, 最大震级为 6.7 级。这种在 4~5 个月内发生如此多 6 级以上地震的强震群, 为国内外所罕见。新疆地震局的地震科技人员严密注视震情, 认真分析该强震序列的变化特征, 并结合前兆台站观测到的短临异常变化, 对该震群中的多次 5 级以上地震作了较好的短临预报, 其中最突出是对 1997 年 4 月 6 日凌晨发生的 6.4 级、6.3 级强震预报。自 4 月 1 日~4 月 6 日, 该地震序列的地震活动在正常背景上异常增强。前兆台站也观测到地磁、地倾斜等异常, 4 月 5 日序列活动又在异常增加的基础上突然平静。此间北京工业大学、中国气象局和地壳应力所专家根据多种观测资料和研究工作, 预测一周内伽师地区可能发生 7 级左右地震。新疆地震局及时抓住这些短临异常, 于 4 月 5 日下午紧急会商并做出了一周内伽师地区可能发生 6 级地震的预报。此预报意见迅速报告给地方政府, 并由地方政府向震区发出了短临预报。伽师县 15 万群众当夜撤离危房。第二天凌晨发生 6.4 级、6.3 级强震, 倒房 1000 余间, 但无一人死亡。此预报受到党中央和新疆维吾尔自治区的表彰。

1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 5.4 级地震的短临预报, 尽管这次地震震级不是很大, 但其短临预报

的社会影响和实际效益都十分突出。这次地震发生在1998年之后地震危险的中期背景比较显著的地区。辽宁地震局一直密切注视着辽东地区的中强地震背景。1999年11月1日在华北北部的大同一带发生5.6级地震,紧接着辽宁岫岩地区地震活动迅速增强。出现最大地震为4级多的震群性活动。之后,地震活动逐渐减弱。11月24日开始,岫岩地区地震活动又突然增强,至26日连续发生3次4级多地震和大量小震。辽宁省地震局根据地震序列的特征、结合中强地震的中期危险性背景及其他前兆现象,于26日夜做出了一周内在岫岩地区可能发生5~6级地震的短临预报意见。并经过仔细分析将发震地区缩小在二个乡镇的范围内。该短临预报意见于11月27日向省长办公会议作了汇报。省政府立即向有关县市发布并采取了有力的防范措施,包括部署预报区内的小矿井企业停产和撤离人员等。11月29日中午在预报区内发生5.4级地震。各类房屋建筑普遍受损,小矿井坑道破坏,但由于事先作了防范,撤离了矿井下的工人,因此,地震时无一伤亡。此次预报取得了防震减灾实效,受到了辽宁省政府的大力表彰。

进入新世纪以来,在短临预报方面又取得新的成绩。如2003年夏季,我国南北地震带震情呈现较快发展趋势,包括地震活动性的显著增强异常,形变、地下流体、电磁等多学科前兆异常的数量在7、8、9三个月呈连续上升的显著变化。9月中、下旬南北地震带各有关省地震局和中国地震局多次召开紧急震情会商和工作部署会议。在一系列震情工作的基础上,云南省地震局和甘肃省地震局于10月上旬分别作出滇中地区和祁连山地区可能发生中强地震的短临预报。云南与甘肃两省政府作了防震部署,结果在10月16日和10月25日在云南大姚与甘肃民乐山丹分别发生6.1级地震。这两次短临预报取得了减灾实效,分别受到云南省政府和甘肃省政府的表彰。

由上所述可见,经过数十年艰苦不懈的努力,我国在长、中、短临的地震预报工作中都取得了可喜的进展。当然,我国的地震工作者更深知,尽管我们在地震预报领域中已取得了长足的进步,我们已经在攻克地震预报科学难关的道路上迈出了坚实的一步,但是我们现有的进步只是局部性的,而非全局性的,是现象性和经验性的,而非本质性的,在新的世纪中,地震预报仍将面临着长期持久科学探索的艰难历程。

3 尚需长期艰苦探索的科学难题

地震预报的突破有赖于对地震孕育发生规律的科学揭示,而目前地震科学的进展离此目标尚有很大的距离,地震预报仍面临着继续长期艰难探索的科学历程。其探索的核心是对地震过程的观测与揭示,包括对地震孕育和发生的全过程(即震前、震时、震后)的观测和对该过程及其过程中所观测的各种现象、事件的科学探索,即在观测基础上揭示地震孕育发生的物理过程及其科学本质。因此地震预报的多路科学探索中需强化一些基础性工作和理论研究工作。

3.1 强化地震观测基础

作为地震科学分支的地震预测研究,地震观测是其整体性的科学基础。几十年来,我国的地震观测有很大发展,建立了多学科地震监测台网,开展高新技术在地震观测中应用的探索,地震观测技术研制也取得了一定的进展。但总的看来,我国的地震观测还十分薄弱,与国际上先进国家与地区相比,也还有相当差距。我国的台网数量不少,但密度还非常稀疏,特别是形变(含GPS)、流体、电磁等学科的台网。在台网布局上,东部数量多西部数量少,与我国地震活动西强东弱、西多东少不相适应,也跟不上国家西部大开发的战略需要;在观测技术上不少领域尚处于待开发状态,高新技术的开发应用也刚刚开始。

近一二十年来,全球性观测技术正在快速发展,数字观测技术正在取代传统的模拟观测系统;空间对地观测技术,和向地壳内部发展的深钻孔观测技术也正在迅速崛起。因此,为真正确立地震观测在地震预测研究中的基础地位,需要进一步发展和改善现有以地表和地表浅层观测为主的多学科的地震观测台网;同时要大力发展地震观测的新技术和新方法。与其同样重要的是从台站仪器检测、标定、维护、操作规范、观测条件和人员培训等方面采取有力措施,以保证观测质量的科学性、可靠性。

在新观测技术方面,需要进一步发展空间对地观测技术。包括GPS、VLBI、InSAR等技术,以大动态性、广覆盖区和高分辨率地开展地壳形变的动态监测。发展RS技术以开展地球磁场、重力场、地壳热状态(温度场)等的监测,从而进一步拓展地震观测的新领域、新方法和新技术。在向地壳深部发展的深井钻孔观测技术方面,进一步发展钻孔相对应力、应变和绝对应力测量,钻孔声波探测和深部流

体、地热等观测,以检测避开地表干扰的精度更高的深部地震信息。此外,也需注重包括海底地震观测、海底倾斜观测、海洋潮位观测等内容的海洋观测技术,以进一步拓展地震观测的各领域。

3.2 加强基础性研究与地震观测实际的结合

地震预测的突破有赖于对地震规律的科学揭示。加强基础研究则是揭示地震规律的基础途径。而基础研究又必须抓住地震预测实践中提出的基础性的、原始的科学问题,下列问题是其中的一部分。

(1)大陆地震的成因问题。包括大陆强震与大陆构造格架、大陆构造活动和构造变形的关系;大陆地震孕育的深部构造环境;大陆构造活动和构造变形的动力机制以及地震发生与活动断层关系等。

(2)大陆地震的机理问题。包括强震震源孕育发生的物理过程;成组强震孕育的构造物理基础;地震临界破裂失稳的非线性理论问题;地震破裂失稳的物理力学成因与空隙流体的作用;地震破裂规模的决定因素等。

(3)地震前兆机理。包括地震前兆的科学内涵,地震与前兆的关系(因果关系还是伴生关系),地震前兆成因的微观物理力学机制,地震前兆复杂性的物理成因等。

(4)地震前兆观测中的基础性理论。包括地震前兆观测资料与地壳深部震源过程及其地震信息的内在联系;前兆观测点位的最佳构造条件与环境;前兆观测的条件、技术、方法及分辨率等。

3.3 坚持地震预测试验场建设,并向国际化方向努力

由于地震活动固有的特性,如复发期长,地震受断层相互作用和地震活动间的相互影响等因素而其发生的不确定性大等特性,因而地震预测试验场成功的例子尚不多见。即使如此,多数地震学家还认为,正因为地震活动具有复发期长、发震的不确定性大等特性,因而更需要选定重点地区,建设地震预测研究试验场,以其研究成果带动整个地震预测发展。

而且地震预测试验场必须要有长期坚持的思想准备和工作安排。因此,不论是日本东海地区,还是美国的帕克菲尔德地区,尽管原先预测的地震至今尚未发生,而地震试验场的地震观测及其各种研究工作不但仍在继续,而且还在不断加强。与此同时,美国还计划在南加州的洛杉矶地区,加州北部的海沃特断层区等地开辟未来地震预测试验场。

20 世纪 70 年代以来,我国在新疆天山地区、山西临汾地区、云南滇西地区和首都圈地区先后开展地震预测试验场研究,积累了不少经验,尤其是滇西和首都圈试验场,通过不断地总结、完善,至今都取得了很可喜的发展。然而地震预测试验场研究工作尚需进一步探索,包括地震预测的科学思路、基础研究与预测实践的結合,新观测技术的发展运用等。以便通过地震预测试验场的建设,使有限的资金投入发挥更好的作用,以充分有效地利用地震预测系统的人力资源,真正做到监测、理论、实践的有机结合,从而切实地捕捉到一些具有较好可比性和可检验性的地震前兆。

在有关试验场的建设方面建议关注以下一些问题:①地震预测试验场的建设,要有一定的空间尺度,因为地震从孕育到发生,就其力学过程来讲涉及的范围十分巨大,而与其相关的各种前兆的物理信息覆盖的区域可能更大。因此,在基本定点台网建设的基础上,试验场需要配备一支充分灵活机动的野外观测队,以便有效地扩大试验场的观测范围。同时,应该充分发挥空间观测技术优势,在实验区形成一个覆盖面积较大的包括空间观测、地表及浅层观测和深钻观测等技术的立体观测网,从而获得丰富的前兆时空信息。②地震预测试验场的前兆台网建设应达到一定的密度,同类测项统一仪器型号,这样使观测到的数据更具有可比性、可检验性和代表性。同时须考虑多学科配合,多种观测参数间的相互印证,以在试验场内实现高密度、多参量、大动态、近震源的强化监测与研究。

参考文献:

- [1] 林乐志主编.《邢台地震对策及其社会学研究》[M].北京:地震出版社,1993.
- [2] 张国民.我国地震监测预报研究的主要科学进展[J].地震,22(1):2001.
- [3] 张国民,尹京苑.地震预报研究的发展展望[J].防灾减灾工程学报,23(4):2003.
- [4] 张肇诚主编.中国震例(1976—1980)[M].北京:地震出版社,1990.
- [5] 张肇诚主编.中国震例(1981—1985)[M].北京:地震出版社,1992.
- [6] 陈棋福主编.中国震例(1992—1996)[M].北京:地震出版社,2002.
- [7] 陈棋福主编.中国震例(1997—1999)[M].北京:地震出版社,2003.

综合映震效能;

(4)开展综合异常指数研究的关键在于地震监测资料(手段)的选取, 资料不在多而在精。这就要求平时应善于观察、总结、比较筛选骨干地震监测资料, 适时研究它们的异常动态识别技术, 挖掘地震信

息, 只有这样才能不断提高综合异常指数方法的应用研究水平;

(5)应用综合异常指数方法, 本文给出的华北地区 $M_L \geq 5.8$ 地震短期综合预测判据指标, 可望在日常地震分析预测中发挥积极作用。

参考文献:

[1] 王海涛, 曲延军, 和 锐. 基于多种地震前兆异常的综合异常指数研究[J]. 内陆地震, 2002, 16(4): 302-305.
[2] 周翠英, 朱元清, 王红卫, 等. 华北地区地震学指标的定量对比筛选及其综合预报方法研究[J]. 地震学报, 1999, 21(2): 208-213.
[3] 马禾青, 金春华, 张文孝, 马文娟. 综合异常指数的进一步研究与应用[J]. 地震, 2003, 23(4): 27-31.
[4] 罗兰格. R 值评分方法的再研究[J]. 华北地震科学, 2004, 22(2): 1-5.
[5] 顾功叙, 林庭煌, 时振梁, 等. 中国地震目录[M]. 北京: 地震出版社, 1983, 1-190.

Application of synthetic anomaly index method in short-term prediction of earthquake in North China

PING Jian-jun¹, SUN Pei-qing¹, FENG Xiang-dong¹, JIA Jiong¹, LI Man-xi²

(1. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China;
2. Lincheng Seismostation, HEA, Lincheng 054300, Hebei Province, China)

Abstract: Based on systematic analysis, nine seismometry parameters that response earthquakes well in North China are selected, which are seismic frequency, seismicity scale, mf-value, b-value, D-value, η -value, seismicity intensity entropy and seismicity time entropy. Using synthetic anomaly index method, we calculated their seismic anomaly index values separately and synthesized these values into a chronogenesis curve. After studying its short-term anomaly characteristics to earthquakes, the criterion index for $M_L \geq 5.8$ earthquakes in North China is obtained. The R-value test indicts that it has good prediction effect.

Key words: North China; synthetic anomaly index; short-term earthquake prediction

(上接第 23 页)

Xingtai earthquake and the development of earthquake prediction in China

ZANG Guo-min, LI Zhi-Xiong, YANG Lin-zhang
(Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract: The practice and development of earthquake prediction in China since Xingtai earthquake occurred in 1966 is introduced. The main achievements include: multidisciplinary seismic monitoring system is established; the criterion and index for earthquake prediction are formed; earthquake prediction experiments have been performed, and many prediction method have been put forward; over 20 earthquakes have been forecasted. Some difficult scientific problems are also discussed here.

Key words: Xingtai earthquake; earthquake prediction; earthquake resistance and disaster succor