

地震预报方法

实用化研究文集



国家地震局科技监测司



综合预报专辑

地震出版社

前 言

提高地震预报水平,减轻地震灾害是各级地震部门和全体地震工作者的首要任务。地震预报水平的提高,依赖于现代化技术的进步和各有关学科领域研究的进展,也依赖于地震科研成果在分析预报中应用的程度。诚然,地震预报是当今自然科学领域的一大科学难题,必须持之以恒地坚持探索。地震预报的困难性和任务性,决定着地震前兆预报方法的研究是一个长期的任务。经过20多年来的广泛实践证明,我国地震预报既有成功的经验,也有失败的教训,整体来说预报水平还是不高的,需要花大力气来探索研究提高地震预报水平的方法途径。为了继承发展我国20多年的预报实践经验,推进我国地震分析预报工作的科学化,加快地震科研成果在分析预报工作中的应用,以便更有效地提高当前地震预报水平,尤其是短临预报水平,国家地震局于1987—1988年,集中了全国优秀科技骨干近千人,重点开展了以短临预报为主的地震前兆预报方法实用化攻关研究,从某种意义上说,这是国家地震局为迎接我国大陆地区新的地震活跃期到来所采取的技术准备的一项重大措施。

这次实用化攻关研究的主要目标和任务是,把20年来各级地震部门的预报经验系统化,并对其进行科学的论证;对各种资料处理方法、干扰因素的排除、异常的识别、前兆判定及其所有软件程序设计等进行深入研究和认真筛选;针对各前兆手段和综合预报方法,制定出适用于分析预报工作各个环节的一套技术指南。同时要对20年来监测台网内发生的一系列中强以上地震和震情事件做深入再研究,着重研究不同地区、不同类型地震前兆的共性表现与差异,研究地震前兆与无震异常的区别,以提高各种前兆手段和综合的试用性预报方法、判据和指标,同时要给出用其进行预报可望获得成功的概率估计。

在国家地震局攻关领导小组的指导下,组织了地震学、定点形变、大地测量、水位、水化、重力、地电、地磁、应力应变及综合预报方法等10个攻关组;10个学科方法先后共部署了51项一、二级课题,及201项三级课题。通过攻关,重点突出了预报方法的实用性,预报指标的定量化(半定量化)及资料处理的微机化、规格化。这对于预报经验与科研成果的应用,无疑是有力的推动。

为了便于广大地震工作者,尤其是分析预报人员更好地学习、了解各学科方法实用化研究的具体内容和详细的理论分析、计算推导,为地震预报第一线的科技人员在工作中更好地运用“地震分析预报方法指南”并提供进一步探索研究的基础资料,国家地震局科技监测司组织《地震预报方法实用化研究文集》的出版。文集将各学科方法三级课题的研究成果汇编成6个专辑;即《地震学专辑》、《综合预报专辑》、《地磁地电专辑》、《水位水化专辑》、《形变应变重力专辑》、《大地测量专辑》。这些专辑是在1983—1985年地震前兆系统清理基础上的深入研究的成果汇编,它不仅对当前的分析预报工作有积极的指导意义,而且也今后地震理论的深入攻关研究奠定了一定的科学基础。实用化攻关研究一、二级课题将分别另行编汇。

希望本文集的出版能够给我国地震分析预报带来新的发展,为各国学者了解我国地震分析预报的进展提供方便。

国家地震局科技监测司

1989年3月

写在前面

本书是地震综合预报实用化研究的论文集。

地震综合预报的实用化研究,包括综合预报的方法、判据、指标、工作程序等的研究。旨在通过本项研究把20年来地震综合预报探索的各种经验系统化,并在实际应用中逐步达到程序化和指标化。为此,根据综合预报的特点,重点研究孕震过程中可能出现的多种前兆异常的总体特征,研究各类前兆异常在时空过程中的关联和组合关系。总结、归纳、提炼对当前综合预报有科学价值和实用价值的综合异常判别方法,综合预报的判据与指标,综合预报的方法及相应的技术要求,以及研究预报效能评价的科学方法,进而研制分层次、分阶段的综合预报的工作程序。

为实现上述研究目标,地震综合预报实用化研究安排了下述四个方面的研究,即

1. 地震综合预报工作程序的研究;
2. 中国大陆及其不同地区地震综合预报的判据和指标的研究;
3. 地震综合预报方法的研究;
4. 预报效能评价的科学方法的研究。

上述四个方面均包括了一系列的研究内容。其中地震综合预报工作程序的研究,包括综合预报的科学思路,阶段性综合预报工作程序,重点监视区的综合预报工作程序等研究内容。地震综合预报判据和指标的研究包含全国和分区的前兆综合特征,全国和分区的综合预报判据和指标等方面的内容。地震综合预报方法研究中含有物理和数学的12种综合预报方法。关于预报效能的评价方法安排了有关统计检验和评分方法研究的有关内容。在本专辑的编辑中,分别将上述四大方面归为四个篇,在四篇中共含有32篇研究论文。

本专辑的成果是在国家地震局及其职能部门科技监测司领导下完成的。国家地震局组织的地震综合预报实用化研究学术领导小组由张国民、徐京华、张肇诚、高旭、罗兰格、罗灼礼、陈立德、李海华、朱令人、孙加林组成。该小组具体组织了地震综合预报实用化研究的实施,整个工作中得到陈章立、孙其正、李宣璐等同志的指导,耿庆国同志承担了本书的编辑审定工作。

张国民

1989年10月

目 录

第一篇 地震综合预报工作程序

综合分析预报的科学思路与技术途径·····	张国民等(3)
常规地震综合分析预报工作程序指南·····	高旭等(12)
常规综合分析预报工作程序与技术规范·····	陈立德等(27)
重点监视区地震综合分析预报工作程序与技术规范·····	罗灼礼等(45)
中强地震的综合分析预报工作程序与技术规范·····	贺楚儒(57)
突发性震情的综合分析预报工作程序与技术规范·····	魏柏林等(63)
广西地区突发性震情综合分析预报工作程序与技术规范·····	李明文(72)
地震学异常综合预报指标与方法的研究·····	韩渭宾等(76)
《地震重点监视(含中期预测)区综合预报工作程序指南》的研究·····	李海华(88)

第二篇 中国大陆及其不同地区地震综合预报判据和指标的研究

四川地区综合预报判据和指标的研究·····	程式等(103)
云南地区地震综合预报判据和指标的研究·····	罗平等(119)
西北地区地震综合预报判据和指标的研究·····	李海华等(142)
华北地区地震前兆的主要特征及综合预报判据和指标·····	胡长和等(159)
中国大陆地震震例及综合预报判据和指标的研究·····	张肇诚等(185)
60个中强地震前兆异常时空特征及其判别·····	马丽等(217)
中国大陆的断层活动和应力场基本特征及其在地震综合预报中的应用·····	黄福明等(228)
中国大陆地震形变前兆与形变背景值·····	顾国华等(246)

第三篇 地震综合预报方法研究

地震综合计算预报的计算机系统·····	罗兰格等(255)
华北地震的积分法综合预报研究·····	李广鑫等(270)
地震综合预报的信息系统方法:原理、模型与应用·····	周硕愚等(279)
孕震模型在综合预报中的应用·····	张国民等(295)
地震综合预报的物理方法·····	牛志仁等(307)
多项异常因子最佳组合在地震预报方面的应用·····	骆永妙等(317)
地震预报物理方法的研究·····	贺楚儒(325)
模糊数学在地震综合预报中的某些应用——基于地震前兆的模糊综合 预报·····	冯德益等(332)
用于地震综合预报研究的模式识别方法·····	张郢珍等(342)

地震综合预报层次分析方法.....李海华等(355)

中国大陆 $M_s \geq 7.0$ 级强震跨越式发震危险时间点实用化预测指标研究.....耿庆国(365)

专家系统的不精确推理方法在地震预报中的应用.....王炜等(377)

第四篇 地震预报效能评价方法研究

地震预测有效性的统计检验和统计效率值研究.....朱成熹等(389)

一维地震预报评分问题—— 3×2 列联表在地震预报评分中的应用.....秦卫平等(406)

预报成败的评定方法.....黄世奇(413)

第 一 篇

地震综合预报工作程序

综合分析预报的科学思路与技术途径

张国民 高旭

(国家地震局分析预报中心)

前 言

1966年邢台地震后,地震科技工作者遵照周恩来总理关于“要抓住邢台现场不放”,“多路探索,多兵种联合作战”的重要指示,在邢台地震区开展了大规模的地震预报实践。这种在地震现场多路探索的预报实践,决定了我国地震预报研究既包含单学科前兆观测和震情分析的预报研究,同时又包含应用多学科、多手段的观测资料全面分析和综合判定地震孕育、发生过程的综合预报研究。

邢台地震后20多年的我国地震预报实践,是单项学科的前兆观测、预报不断深入研究,与多学科、多手段的前兆资料综合分析、综合研究两方面并进的发展过程。鉴于震情判定的实际需要,地震综合分析预报已成为当前地震日常监测预报工作的重要环节,并在实际的震情判定中取得一定成效。但是,综合预报仍处在经验性的初级阶段。1983至1985年,在国家地震局的统一部署下,地震综合分析预报与其它单项前兆方法一起,进行了系统的清理研究,通过对近60个震例的全面总结,提炼了大陆地震前兆的基本特征,提出了某些方面的物理解释。并指出综合预报尚处于探索性阶段,必须在加强观测和理论研究的基础上进行重点课题的攻关性研究,探索和发展有一定物理基础的概率性预报方法。为此,从1987年起,国家地震局又组织了地震综合预报的实用化研究的攻关工作。本文主要概述综合分析预报的科学思路 and 物理基础,是在许多作者工作基础上的一篇综述。

综合分析预报的含义

一、地震预报研究中单项研究与综合研究的关系

地震的发生是一个极其复杂的综合性的自然现象,伴随地震孕育、发生的过程将产生并显露出多方面的异常现象以及地壳介质各种物理性质的变化。地震预报试图通过对这些异常现象的深入研究,对地震的发生作出科学的预测。各单项预报手段是从某个学科的侧面来探索其与地震的关系,并在其观测对象、观测技术、前兆机理及其前兆观测方法与观测条件等方面构成各自独立的研究对象。地震综合预报是在各单项手段研究的基础上,应用现有的震例经验和现阶段对孕震过程的理论认识,着重研究在地震孕育、发生过程中多种异常现象之间的关联和组合,及其与孕震过程的内在联系,从而综合判定震情并进行地震预报。因此,各单项手段的预报研究和综合预报研究之间是互相依存、互相关联、互相推进、相辅相成的。

单项前兆方法的研究是纵向的深入和发展,同时也为综合预报的发展提供可靠的科学基础。同样,综合预报研究的发展既可以使整个预报研究进一步推进和深化,同时也为单项前兆研究提供更加和谐的和客观的科学背景。

二、综合预报研究的基本内容

根据上述对综合预报的理解,对综合预报的有关内容可作如下的概括。

(一)综合预报的科学问题

(1) 尽管综合预报的基础是单项手段的预报研究,但综合预报研究本身则侧重于各单项之间的关系。如各单项之间的关联和组合的关系,及其与孕震过程的联系等,而不是单项观测研究的本身。

(2) 各种前兆现象之间的相互关联、组合包括:a)多种前兆现象时、空、强的综合特征;b)各种前兆现象之间的联系,以及与地震三要素之间的联系等。

(3) 多种前兆的关联、组合与孕震过程的联系包括:a)各种前兆在孕震过程中出现的物理背景或统一的物理条件;b)多种前兆的综合机制;c)各种前兆现象之间的内在联系;d)前兆异常综合特征的物理力学成因;e)多种异常时空强综合特征和未来地震三要素的关系等。

(二)综合预报的研究途径

研究上述这些科学问题的途径主要有两大方面。一是实际震例研究,二是实验和理论研究。

实际震例研究,是通过对中强以上地震,尤其是7级以上大震震例的系统研究,从大量实际资料中分析地震孕育过程的不同阶段,各种前兆异常的时、空、强变化特点,从中提炼地震前兆的综合特征和综合异常图象,进而总结地震前兆综合特征及综合图象与孕震过程和未来地震三要素的关系。通过实际震例研究,上升为对地震孕育、发生过程的理性认识,从而加深对地震孕育和发生过程的理解。

第二方面是通过模拟地震孕育发生过程的实验研究、数值计算及理论研究,对地震孕育发生的阶段性特征、前兆综合机制、多种前兆之间相互关系及综合特征,直至前兆模式、孕震理论等进行多方面的系统探索,以取得对地震孕育过程和孕震过程前兆表现的科学认识,并逐步建立地震孕育和前兆机制的科学理论。

通过上述两大方面的研究,期望对地震孕育和发生过程以及大量震例经验取得比较深入的科学认识,而综合预报的目的和任务,就是应用这些认识,对地震孕育和发生的可能性及其过程进行判断,提出长期、中期、短期和临震的地震预报。

现行综合预报的科学思路

研究地震孕育发生过程中的各种效应,捕捉地震发生的前兆以预报地震,这是地震预报研究的基本思路。通过20多年地震现场的实践研究和多方面的理论探索,我们对地震孕育发生的过程和各阶段的前兆表现取得了一些初步的认识,因而也为现行综合预报科学思路的建立提供了一定的实践和理论的基础。我国地震综合预报的思路(在一定意义上说,也是整个地震预报的思路)就是在这20多年的预报实践探索中产生并逐步发展的。由于篇幅限制。这里不能全面叙述其发展过程及全部内容,而只从震源和区域场的角度来讨论综合预报的科学思路。

一、地震学和地震预报研究中的源和场的问题

笠原庆一把地震学的研究概括为地球内部物理学的研究、地震本质的研究和地震学的应用研究三个方面。他指出,“地震本质的研究是地震学中最根本的问题”^[1]。而地震本质的研究可以分为两个分支(表1)。头一个分支是研究单个地震震源,从而给出一幅震源孕育、发展至地震发生全过程中地震现象的总的全面的图象。而第二个分支是研究一个区域内一组地震的活动特点,包括成组地震活动之间的相互关系,地震发生对构造环境的依赖关系等。笠原庆一在这里所说的第二个分支,实际上是区域场的问题。

表1 关于地震研究的分类



我国20多年地震预报探索亦给出,地震预报研究涉及地震学中这两个最根本的问题,即源的研究和场的研究。

源即单个的震源。源的研究包括震源在应力场中的地位、震源在应力场中发展、演化直至地震发生的过程,及其该过程中的各种效应。按其发展演化的时间进程考察,即可构成如表1给出的震间、震前、震时、震后等诸阶段的研究。这些研究通常被称为震源过程的研究。需要说明的是,震源发展、演化及其各种效应的研究有时也被称之为震源应力场研究。

场即区域应力场。含有各种构造的地质块体,在整体的构造活动中可给出一幅区域应力场的图象。场内的特殊构造环境,决定了其存在一组应力集中的孕震区。场的研究即是探索这一地质构造块体内成组地震孕育、发生的活动特点,它们与构造环境的关系,以及成组强震之间的相互影响等问题。由此可见,场的研究在地震预报中具有整体性和全局性研究的意义。

二、地震的源兆、场兆和双重兆

中日苏等国的地震工作者都发现,前兆现象不但震中附近出现,而且可以在远距离上出现。对此日本学者石桥克彦把地震前兆分为两种,即所谓物理性前兆和构造性前兆。物理性前兆是指孕震过程中震源区应力、应变积累,震源及邻近地区介质物理性质变化所引起的各种观测量的异常变化,是直接反映震源孕育、发展、演化的地震前兆。构造活动性前兆是指与孕震过程相关的区域构造活动所引起的异常变化。这种异常不单反映震源的发展演化,而且还反映与震源演化相关联的区域构造活动。

我国地震工作者在地震前兆和预报方法的系统清理中发现,地震前兆具有集中性与离散性相并存在的特点,即所谓前兆异常在空间分布上的不均一性和不连续性,张肇诚在系统分析了前兆时空分布(尤其是空间分布)的基础上,将前兆分为区域性前兆和局部性前兆。区域性前兆往往在大范围内广泛分布,具有标志区域应力场增强的作用,可能对存在的孕震过程

具有背景性指示意义。局部性前兆出现在未来震源区及其附近，地区上比较集中，常有较好的时间阶段显示，对未来地震三要素特别是地点有某种指示作用。张肇诚以华北为例，对两类前兆现象作了归纳^[2]。

为了更明确起见，本文将上述两类异常分别称为源兆和场兆，除了这两类前兆外，在预报实践中还发现有另一种异常现象。这类异常与大地震的发生有关，是大震发生后的一种响应或效应。如大地震发生后在大区域内发生的响应地震（又称诱发地震），以及大震后在大区域内某些特殊点上出现的激烈的宏观和微观的异常变化。汪成民等称那些后效强烈的区为后效敏感点。而响应地震和后效敏感点往往可能是大区域内未来强震的危险区的指示。从本质上看，这类变化是反映成组强震之间相互影响和相互联系的标志。一方面它们反映大震发生后场的变化，同时也显示未来强震震源区应力状态的变化。因此它既有场兆的意义，又有未来强震的源兆性质，因而是一种场、源联合的效应，这里称之为双重兆。

这样，我们把地震的前兆异常归纳为源兆、场兆、双重兆三类，它们的主要表现如表2所示。

表2 地震的源兆、场兆、双重兆分类

源 兆	震源及邻近地区地震活动增强、丛集或平静，低b值，波速下降，介质衰减特性和应力降变化，形变、水氡、视电阻率、重力场、磁场的变化，地下流体（水、气、汽油）以及动物、声光电等宏观现象
场 兆	区域地震活动性综合指标异常，余震窗、震群窗、相关地震，水氡、水位、形变、断层位移等前兆灵敏点（穴位）异常，短临阶段的大范围宏观（如地下水、气、油、动物等）与微观（视电阻率、水化等）动态性快速变化
双重兆	响应性地震（诱发前震），大震后效强烈反应的后效敏感点异常（含宏观和微观）

三、场和源的理论探索

我国地震工作者在地震预报研究中对场和源关系的探索，可追溯到70年代初。其探索的途径包括理论分析、实验室研究和有限元数值模拟等。在理论分析方面，1971年傅承义教授曾提出孕震区远大于震源区的“红肿假说”^[3]，此后郭增建、马宗晋等又分别提出“块动观点”^[4]，“多应力集中点”^[5]等假说。这些理论分析的主要内容列于表3中。

表3 场、源关系研究中的几种主要观点

观 点	红 肿 假 说 ^[3]	块 动 观 点 ^[4]	多应力集中点 ^[5]	强震指数型分布及流变模型解释 ^[6]
主 要 思 想	提出孕震区的概念，孕震区远大于震源区，大震前孕震区发生形变、构造活动、介质特性变化及物质运移等	构造块体呈整体运动，既是在其边缘孕震的动力，同时也在该块体的其它构造部位产生应力变动	在构造力作用下，构造块体内部的一些特殊部位上形成多个应力集中点。它们在构造活动中互相影响，不断改变场内的应力分布	地质块体内多个孕震区通过构造联结成整体，用流变模型分析逐个强震发生对场内应力状态的影响
解 释 的 问 题	前兆现象可以大范围出现，并呈现项目多样、数量丰富的前兆现象	前兆可能离散出现，并在远距离发生异常现象	成组强震同时孕育、成串发生，及彼此影响。以及存在前兆灵敏点、穴位等	讨论了大震发生对场的影响和强震间的相互关系，解释强震呈指数型时间分布的特点

除了理论分析之外,不少作者在实验室模拟研究了我国西南、华北等区域的强震活动及其构造活动图象,以探索这些地区构造应力场的总体特征及边界受力状态^[7,8]。

此外,在70年代后期以来,应用有限元计算的数值模拟来研究场和源关系的探索日益发展^[9]。其中张郢珍等对1966至1976年我国西南和华北的一系列强震进行了数值模拟,研究了地震孕育过程中的孕震应力场的空间分布,同时还研究了地震发生时对区域应力场的影响,并结合地震活动图象和前兆的空间分布讨论了场和源的关系。之后,朱岳清等方法又作了进一步改进,利用地壳三维结构模型和粘弹性介质模型研究了唐山地震的孕育及其应力场的变化,研究了唐山地震前兆的时空分布特征。接着,梅世蓉等进一步模拟了1966年以来华北成串强震的发生过程,研究了单个震源的孕育发展过程以及该过程对整个场的影响,并结合前兆分布进行了讨论^[10]。

用有限元方法探索场、源关系,是一种比较有效的方法,它不仅能给出单个震源和整个应力场的发展演化图象,而且也能给出相对定量的结果。

最近,我们进一步用有限元方法探讨了场和源的关系。首先给出我国大陆和邻近地区的整体应力场图象。结果表明,我国大陆地区应力方向有较规则的分布,以青藏高原地区为中心,呈发散状。在东部地区,主压应力以东西方向为主,北部为北东,南部为南东,与近年间其他作者的研究结果相近。我国西部地区的应力图象较复杂,从总体看,大致以南北向为主压应力的优势方向。此外还给出了我国大陆地区应力场数值大小的分布,显示了我国大陆地区东西部之间应力背景的高低有明显差别。西部大约为东部的3倍。这一结果与我国东西部之间强震分布的差异,本世纪以来7级以上地震频度和地震能量释放的差异相吻合。据统计,本世纪以来我国东部和西部(以东经107°为界)7级以上强震的频度分别占总频度的13%和87%;能量分别为10%和90%。这正好与应力场给出的东西部能流的结果一致。

对华北区域性应力场及其场和源的关系我们作了初步研究,其结果如下。

(一)区域场中包含着多个孕震区(即可能的震源区)

应用华北地区构造格架和岩石综合流变力学模型,给出公元1000年以来各时期小华北地区的应力图象分布图。图象显示了在华北地质块体的那些具有特殊构造环境的地区,形成了多处高应力区。如邢台附近的束鹿地堑、沧州附近的里坦地堑、渤海拗陷、唐山菱形块体、北京附近的夏垫断裂、辽宁海城一带等地区。这些区具有介质强度较高,在构造活动中应力、应变水平较高,能积累和贮存巨大应变能的条件,故称其为可能的孕震区或震源区。

(二)在构造块体内的多个孕震区具有同时孕育地震的特点

从华北地区公元1000年以后的各时间点的应力图象看,可看到华北地区多个可能孕震区的应力水平在时间过程中不断增长,显示了在构造块体内,即区域应力场内多个孕震区同时在孕育地震的特点。在比较长的数百年的震间阶段,由于各孕震区大多还处在弹性积累阶段,整个区域应力图象显示出比较稳定的缓慢变化。在总体的多点孕震图象中,由于各孕震区介质强度和应力集中程度的差别,某些应力水平达到极限强度的孕震区将首先发生地震。

(三)平静期和高潮期

在华北地区地震活动过程的研究中,显示出有一、二百年的平静期和数十年的活跃期。这种地震活动图象似可以从华北地区地壳区域应力场的时间变化图象中得到启示。从区域应力分布图象中可看到,在地震活动平静的数百年中(相当于震间阶段),尽管给出了多个高应

力区和多点孕震的特点,但各孕震区的应力水平还不很高,尚处于弹性应变积累的阶段,此时整个区域内的应力图象变化比较稳定。但当某个孕震区接近地震发生的软化阶段时,由于震源区介质特性的变化,造成区域内应力分布较快和较大的变化(相对于由大区域构造力作用引起的应力变化而言)。一旦该震源区发生地震,由于介质性质和震源处大幅度错动,造成区域内应力图象更为激烈和明显的变动。这些变化在一些特殊的构造上比其它未发震的孕震区更为集中。显然应力场的这些较快速的变动对某些孕震区的孕震过程将起一定的促进作用。这种影响包括下列几种作用方式:

- (1) 震源孕育达到软化阶段时使某些构造和某些其它孕震区的应力水平发生变化;
- (2) 地震发生时的位错使某些构造和某些其它孕震区的应力水平增高;
- (3) 应力增高的那些构造可能出现蠕动或蠕动加速的构造活动增强的变化,并使与这类构造相关的孕震区更快地积累应力。

上述诸因素的影响使孕震区加速应力、应变的积累过程(相对于原来仅通过边界构造力作用而应力缓慢增加而言),从而使地震加速到来。尤其是在发生多次地震后,由于上述影响因素的互相叠加,进一步加速了后面地震的发生,并形成地震高潮到来。

(四)场和源的相互作用

地质构造块体在边界力作用下形成区域应力场。场内包含多个应力集中的潜在震源。整个区域应力场又随时间的发展而变动。这是一幅场的图象。从这个图象中可看到,源寓于场之中,且随着场的演化而发展变化。这是场对源的作用。

另一方面,源在发展演化过程中也对场的变动产生影响。这个影响包括直接和间接两种。直接的作用包括孕震后期震源区软化引起的场内应力变化和地震发生时震源错动引起的场内应力变化。间接的影响是地震孕育和发生均可以使某些构造上应力水平增高,并导致这些构造的活动增强,如产生蠕动,或原来有蠕动的断层出现蠕动加快等,这种构造活动的增强又使区域应力场产生变动。这些都可称之源对场的反作用。

(五)对源兆、场兆、双重兆的理解

1. 源兆

在孕震过程中,震源及附近地区是高应力区,而且应力、应变随时间逐渐增长。在该过程的后期,将伴随微破裂的发展和介质特性变化,以及最后的应变弱化等,从而将表现各种丰富的前兆现象。这些变化以源为中心,形成一个异常集中区。有些手段的异常幅度,如 b 值、视电阻率等还勾划出以震中区为高值向外逐渐衰减的图象^[9,11]。这些前兆异常与震源在空间上重合,在时间进程中反映源的发展、演变的阶段性特征,因而可能是直接反映震源区地震孕育、发生过程的征兆。

2. 场兆

在场和源的探索中给出,地震孕育过程对区域应力场有直接和间接的影响。这种影响一方面使构造块体内地震活动状况发生变化,即出现所谓大范围内地震活动综合指标的异常。另一方面,也可能在那些应力变化部位产生前兆观测的异常。由于有些应力变化部位可能较远,于是形成离散出现的所谓“窗口”、“穴位”等远距离的灵敏点异常。

另一方面,地震孕育过程有时造成沿某些构造的应力水平发生大幅度增高或下降,这一方面可能引起该构造带上地震活动指标的变化,而同时也可能引起这些断层活动的异常。如

张性活动增强或压性活动增强等。辽宁金县水准异常曾对应不少远距离地震,可能是这方面的实例。唐山地震前,沧东断裂、八宝山断裂,乃至延怀盆地的一些断层都曾出现异常活动,可能是这种原因所致。另外,各种构造活动又会导致其它的效应,如油、气、水以及形变等异常,这些异常可能在临震阶段更为突出。因为越接近临震,震源区介质特征变化(软化)越大,这种直接和间接的效应也可能更为突出。

3. 双重兆

如上所述,地震的孕育、发生可能在某些构造带或某些点上造成应力变动。这种应力的变化必将在地震活动和前兆观测上表现出来。如大震后有时沿某个带牵动出一群中小地震,有时在某些点上牵动出一些中等地震,而这些中等地震又可能在一定意义上标志着该区未来的地震危险。地震孕育、发生在区域应力场内引起的某些构造或某些点的应力变化也将通过前兆观测表现出来。这种反映包括远区前兆和大震的后效强烈区。汪成民曾研究过大震后有时沿某个构造由近及远地激发出一系列强烈后效,并给出某些后效扩散的速度等。在构造的某些部位,应力场变化有时比较突出,这可能相对应于那些后效突出的地方。所以从场的分析,可能为前兆敏感区、后效强烈区和未来强震危险区之间的可能联系提供依据。

这些既反映场的变动,又反映未来源的变动的双重兆所出现的地区,是高应力区,在一定程度上预示该区的强震危险。但具备这种条件的地方并不一定是强震危险区,也可以是震群区或中等地震的多发区。而这样的地区可作为标志场的变动的“窗口”在预报中应用。

从上面场、源力学关系分析,并参照其它研究,可对地震孕育、发生的力学条件概括为下述几点,即(1)高应力区的背景条件;(2)应力(或应变)随时间增长的条件;(3)满足失稳的条件。

四、综合预报——震源的过程追踪和区域场的动态监视

由上面的分析给出,大震前的前兆异常在时间上显示的长中短临的阶段性和空间上显示的集中与离散并存的不均匀分布是地震前兆最基本的特征,也是地震孕育过程中源和场两者的综合效应的表现。前兆异常在时间上的阶段性和空间上的集中性较好地反映了源的发展演化过程,而前兆现象在空间和时间上的离散性分布则较好地反映孕震过程中场的变化。显然,前者在预报中是渐进式、稳态式,并带有确定性特点的预报过程。而后者则是背景式、跨越式,因而具有不确定性特点的预报。目前的预报思路是这两方面的合成。

因此,在目前的认识水平和科学条件下,综合预报的科学思路似应建立在对震源过程的追踪和对区域场动态的监视上。所以,无论是地震活动性的分析研究还是地震前兆的观测分析,都应该是既要追踪式的监视危险区各类异常的发展(即其时、空、强的变化过程),同时还要注意监视大区域内地震活动和前兆异常的背景性变化。

综合预报的技术途径

地震前兆异常的时空变化图象是一幅非常复杂的图象,在预报思路中已归纳为源的过程追踪和场的动态监视相结合的思想,为实现这一思路,在监测和分析工作中可归结为点、带、面、体四层次监视和综合分析的技术途径。

一、“点”监视

所谓点监视即为台站的监视和综合分析研究工作。它是四个层次中的基础。台站监测的任务是真实、客观地反映该点地壳运动的状态,如应力、应变的变化,地壳形变,构造蠕动,介质性质变化,壳内物质的运动(如流体的运移等)等。

为此,需要在下面几方面加强研究。

(1) 台址条件研究。根据不同手段的特点及观测研究对象的差异,选择适合本手段的地质构造条件、岩石介质的物性条件,观测环境等。

(2) 观测条件、观测方法和观测技术的研究。根据各手段观测研究对象的特殊性,结合地震异常和噪声水平的高低,研究观测技术、观测方法和观测条件,研究观测技术主要是观测仪器、记录设备等。其目的是真实地探测到所要观测的物理量,并根据异常和噪声水平确定仪器的观测精度和灵敏度。同时通过观测方法和观测条件的研究来保证这种客观测量的实现。

(3) 单台资料的分析研究。掌握正常的变化背景、噪声水平,研究和提炼本台站的异常特征,并研究识别异常的方法和异常判别的依据和指标。

二、“带”监视

地震往往成带分布。因此,监视一个构造带或地震带上地壳运动的状态,是地震预报研究的重要方面。以点监视为基础,在相应地震带上选取最合适的部位布置全带的方法手段配套的观测,对构造带上不同段落的构造活动方式、强度进行监视,弄清带上哪些是小震活动段,哪些是断层蠕滑段,哪些是断层的闭锁段。并监视闭锁段应力、应变积累,变形与破裂的发展,以及估计带上地震活动的趋势并做好震情判定,这是带监视的基本内容。

三、“面”监视

所谓“面”监视,即为场的动态监视。地震异常不是简单图象而是复杂图象,不是均匀图象而是不均一图象。地震预报既有确定性的一面,也有不确定性的一面。地震预报中发现的这些特点决定了地震监测必须有一个场的监视。面监视不仅可以为地震预报提供背景性判据和指示区域可能发生地震的指标,而且对震源及其附近地区的过程追踪也有重要作用。因为孕震区(或异常集中区)是一个比较大的范围,一般为震源线度的2倍尺度。即使在孕震区内,应力应变图象也是很复杂的,尤其在临震时更为突出。所以震源区的变化过程,是不可能由震源附近的单台所能代表的。特别是长中短临各阶段的异常,并不在一个台上顺序出现,这就更需要有一个面上多台站的监视,才能实现对地震孕育过程的时间追踪。

四、体监视

地震预报是探讨地震前地壳的特殊运动形式及其各种效应。这些运动和变化不仅存在于地壳内部,而且直接影响到地表乃至低空大气。如地球内部的热通过地壳向地表和低空中释放,地壳活动过程中造成壳内存留气体向低空释放乃至彼此交换,地壳活动中(如破裂)可能释放出微小粒子(如电子)并向地表和低空逸出而造成发光、低空电场、电磁场变化等异常现象。这些都说明地震前的异常现象不仅存在于地壳内,还会影响到地表乃至低空。因此对地震孕育过程的监视和异常的检测应逐步向立体监测发展,包括壳内、地表和低空。

壳内监测包括通过地震波传播特性的研究探讨深部介质特性的变动、深部结构的状况,通过中小地震震源动力学参数的研究探索地壳应力、应变的变动状况及介质情况;通过重力

测量研究壳内物质的运动；通过地震活动图象分析研究壳内应力状况和构造活动状况以及用电测深、磁测深等方面探测深部介质电性的变化等。

地表的监测是目前主要的监测内容，包括地面观测和地表浅层观测，如地面变形、浅层的应力、应变测量，断层活动测量，电阻率、地下水、水化学、地温等多种观测方法。

低空观测包括大气电场、地磁场(既反映空间变化磁场、也反映地球基本磁场)、以及电磁波观测，乃至气象要素的特殊变化等。探测地壳激烈变动前后对低空的各种影响。

随着地震预报研究的推进，无论是壳内的地表的还是低空的观测方法和观测手段都将不断发展和提高。

通过上述点、线(带)、面、体四个层次的监测，组成一个监测体系，以达到对源的过程追踪和对场的动态监视。这就是当前用以进行综合预报的主要技术途径。

参 考 文 献

- (1) 笠原庆一著，赵仲和等译，地震力学，地震出版社，1984。
- (2) 张肇诚，地震前兆的类型及其应用研究，地震，No.3，1987。
- (3) 傅承义，地球十讲，科学出版社，1976。
- (4) 郭增建等，震源物理，地震出版社，1979。
- (5) 马宗晋，华北地壳的多(应力集中)点应力场与地震，地震地质，Vol.2，No.1，1980。
- (6) 张国民等，华北强震的时间分布及物理解释，地球物理学报，Vol.28，No.6，1985。
- (7) 郭世凤等，华北地区现今构造应力场的光弹性模拟实验，地震科学研究，第二辑，1980。
- (8) 中国科学院地质研究所实验地震研究组，西南地区现代构造应力场与地震活动性的实验研究，地质科学，2期，1977。
- (9) 马宗晋等，1986—1976年中国的九大地震，地震出版社，1982。
- (10) 朱岳清等，唐山地震孕育过程的三维有限元分析及其在地震预报上的意义，地球物理学报，Vol.31，No.4，1988。
- (11) 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组，一九七六年唐山地震，地震出版社，1982。

常规地震综合分析预报工作程序指南

高 旭 马 丽 刘桂萍

(国家地震局分析预报中心)

前 言

以邢台地震为起点的我国地震预报实践,一开始就走上了“多路探索,多兵种联合作战”的综合观测、综合分析研究和综合预报的道路。到目前为止我们已经积累了60次中强以上地震的震例资料,其中包括数以百计的前兆现象。这些前兆异常具有一定的时间、空间特征,特别是在时间进程上有较为明显的阶段性。这是我国地震工作者多年来逐渐形成的长、中、短、临渐近式的预报思想和工作程序的主要事实基础^[1]。

根据各类前兆异常变化的时间进程,以及预报实践的需要,划分了不同的异常阶段:几十年称为长期,几年称为中期,几个月称为短期,几天称为临震^[2]。在此基础上所做的各种预报分别称为长期预报、中期预报、短期预报、临震预报。尽管地震前兆理论模式繁多,但各种模式的基本格局和其主要的物理过程大体上和我国地震工作者通过现场实践和经验研究而给出的孕震过程和前兆物理机制的认识相似^[3]。这表明20多年来所进行的综合预报是有一定的物理基础和理论依据的。

根据地震预报方法实用化研究的要求,我们在清理攻关的基础上,进一步系统地整理和研究了近20年的综合预报经验以及大量的研究成果,初步总结和提炼了用以指导中、短、临各阶段综合分析预报工作的工作程序、内容及其技术要求,供实际预报工作参考。

中期预报阶段的综合分析预报工作

一、中期预报的含义、目标、基础与工作程序

(一)中期预报的含义、目标

我国近20余年数十次的震例资料表明,孕震过程中的前兆现象具有阶段性发展的特征。这一特征对于大地震尤为明显,即可把前兆进程分为长、中、短、临四个阶段。根据国内外学者对孕震过程的理论与实验研究,上述四个阶段对应于震源介质的弹性应变、体积膨胀、微破裂加速发展和大破裂迅速形成等四个物理过程。其中,中期阶段即体积膨胀阶段是前兆现象开始明显发育的重要阶段。鉴于此阶段中介质应变的变化尚较缓慢和稳定,因而,中期阶段出现的趋势性异常亦具有连续、缓慢发展和形态较为同一等特征。

近十几年的研究表明,震源是在一定的构造条件和区域应力场的作用下产生的,而震源过程又对“场”产生不可忽视的影响,同时,在一定的空间范围内,多个震源在孕育过程中互