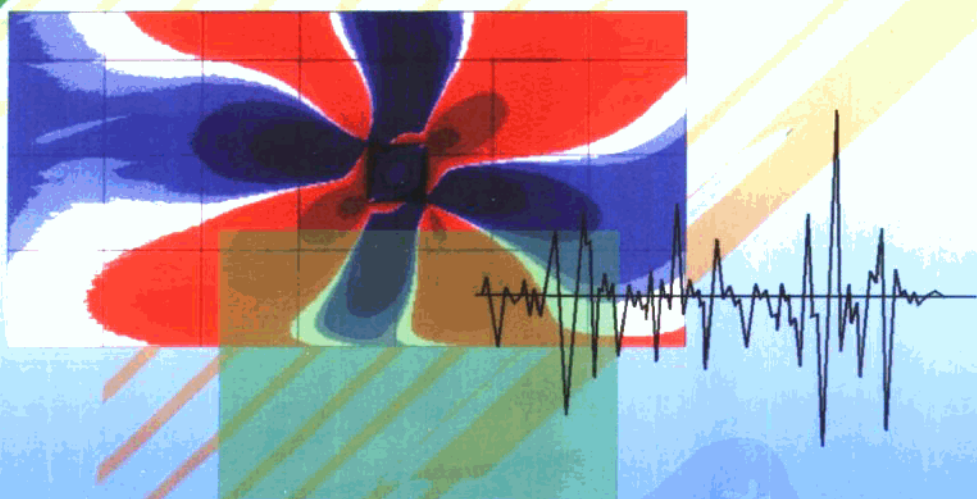


地震 中短期

预报的动态图像方法

陆远忠 吴 云 王 炜 编著
李闽峰 江在森 郭若眉



地震出版社

地震中短期预报的动态图像方法

陆远忠 吴 云 王 炜
李闽峰 江在森 郭若眉 编著

BA205/05

地 震 出 版 社

2001.10

内 容 提 要

本书是根据国家“九五”科技攻关项目“96-913”的第四课题的主要研究成果编写的。全书共分四篇, 12章。第一篇是关于地震应力应变场及其相关地球物理场的计算方法及与强震发生的关系的研究结果。第二篇是关于地震活动及孕震介质参数的时空演化图像与孕震过程关系的研究结果。第三篇介绍了圈定中短期地震危险区的动态图像预报方法及其理论基础。第四篇介绍了强震中短期动态图像预报的软件系统的开发。

本书的读者对象是地震研究人员, 地震预报人员及地震学科教学人员、研究生。同时对地质、测绘、地球物理学学科的研究工作者, 大专院校的师生也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

地震中短期预报的动态图像方法/陆远忠等编著. 北京: 地震出版社, 2001.10

ISBN 7-5028-1971-1

I. 地... II. 陆... III. ①地震观测-动态-图象分析-应用-地震中期预报

②地震观测-动态-图象分析-应用-地震短期预报 IV. P315.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 072444 号

地震中短期预报的动态图像方法

陆远忠 吴云 王炜 编著

李闽峰 江在森 郭若眉

责任编辑: 程仁泉

特邀编辑: 张宝红

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 68423031

门市部: 68467991

传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版(印)次: 2001年10月第一版 2001年10月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 637千字

印张: 26.75

印数: 001~500

书号: ISBN 7-5028-1971-1/P·1097 (2523)

定价: 40.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

近 30 年来,国内外地震预报研究有很大的发展。首先是建立了包括地震、地壳形变、地壳应力应变、地磁、地电、重力、地下流体动态及化学组分和地热等多学科以地震预报为目标的观测网,取得了连续的、大量的观测资料;第二是在世界范围内建立了包括中国华北和滇西在内的若干多学科综合的地震预报试验场,进行了地震前兆观测和强震预报的试验;第三是发展了大量的地震预报方法;第四是实现了某些中强以上地震的预报。但是,预报方法基本上是建立在经验统计上的,预报成功率不高。为了提高地震预报水平,实现从经验统计预报向物理的、动力的预报的进步,是预报研究的突出课题。我国已初步建成可研究地壳应力应变场动态演化的基本观测系统并积累了大量基础资料,该系统在空间上大致覆盖了我国主要地震危险区,除各学科前兆台网外,还建立了全国的和若干区域的 GPS 观测网,取得了多期观测成果。近年来对这些资料进行背景场和动态场的分析,研究它们与中国大陆板内地震的关系,已经取得了一些初步成果;在我国 30 多年的地震预报研究特别是“八五”攻关研究中,已发展了一些反映地壳介质在动力作用下力学性质变异的特征参量,初步研究了它们在强震孕育过程中的前兆意义,初步探索了求解地壳应力应变场的数字解方法,建立了相应的数学物理模型。这些成果有利于研究地壳应力应变场及相关地球物理场(重、磁、电、热、地下流体等)图像变化及其与强震孕育的关系,为进行物理的、动力的预报的试验研究提供了基础。据此,国家“九五”科技攻关 96-913“强震中短期(1 年尺度)预报技术的研究”项目第四课题开展了判定中短期地震危险区动态场及其跟踪方法的研究。通过分析全球及中国地震活动时空图像不均匀性的动力及地震前地壳内部多种地球物理场的变化信息(如地震、地壳形变、重力、地下水、地热、地磁、地电等),反演地壳内部应力应变状态,研究出利用强震前后中国板内地壳应力应变场、相关地球物理场和介质性质的动态演化图像进行中短期预报的技术和方法。

课题的总体思路,是发展一套基于应力应变场及相关地球物理场动态演化,进而结合介质物性、地壳微小破裂、小地震活动变化的新的预报系统,以期把多年来的经验性、统计性预报逐步推进到动力的、物理的预报,它具有探索性、创新性。重点是发展了一套有科学根据的反映地壳应力应变场及相关地球物理场的动态演化的方法,并将它与强地震发生有机地联系起来。初步建立跟踪孕震区孕震过程、判断孕震进入中短期阶段的动态图像预报系统。课题下设 4 个专题,18 个子专题,其名称及负责人是:

1. 区域动态应力应变场演化的观测和反演方法及其与强震活动关系的研究(吴云、江在森、王吉易)

子专题①地壳应力应变场动态图像及其与强震关系的研究(江在森)

子专题②地壳形变应变场动态图像及其与强震关系的研究(吴云)

子专题③重力场动态图像及其与强震关系的研究(李辉)

子专题④地下流体动态图像及其与强震关系的研究(王吉易)

子专题⑤电磁场动态图像与强震关系的研究(曾小革)

子专题⑥地温场动态图像及其与强震关系的研究(刘培洵)

2. 地震活动及孕震体介质参数的时空演化图像与孕震过程关系的研究(王炜、陈虹、尹祥础)

子专题①孕震介质特性的参数及其动态图像与孕震过程的关系(黎凯武)

子专题②中国大陆地震资料的加卸载响应比动态图像与孕震过程的关系(尹祥础)

子专题③反应介质和应力场特征的地震学参数的动态图像与孕震过程关系的研究(陈虹)

子专题④地震活动图像及其多种预报参数的综合动态图像在孕震中短期阶段特征的研究(王炜)

3. 圈定中短期地震危险区的动态图像预报技术和方法的研究(陆远忠、张东宁、李正媛)

子专题①各种尺度应力应变场的动态演化图像与强震活动关系的数值模拟(张东宁)

子专题②中短期动态图像预报方法的实验和震例综合研究(李正媛)

子专题③强震中短期动态图像预报系统的建立(陆远忠)

子专题④重点地区中短期预报方法和区域特征的研究(谢华章、刁守中、王振亚)

4. 强震中短期预报动态图像显示技术系统的研制(李闽峰、吴培稚)

子专题①中短期动态图像分析辅助软件系统研制(姜立新)

子专题②强震中短期预报辅助决策系统研制(吴培稚)

子专题③多媒体会商系统的研制(吴天安)

子专题④中短期动态图像显示系统的建立(李闽峰)

1996年10月,课题研究正式启动,2000年10月通过验收。本课题科技攻关研究的主要进展是:

(1) 分析研究近十几年的实际观测数据,建立相应数据库,发展了计算我国各区的应力应变场、相关地球物理场的方法,制作了大量我国各区的应力应变场、相关地球物理场动态演化的空间分布图像,并探索到其中一些图像的动态变化与我国强震孕育发生的一些统计联系,及其用以预报强震发生的途径和方法。特别是用我国新建的GPS网近几期观测数据,计算了全国及华北地区的水平速度场、水平应变率场,得到了华北地壳的主正应力、最大剪应力的分布图像。在研究和改进重力场、重力梯度场、重力位场的计算方法基础上,用重力实测数据进行了基于损伤模型的强震孕育过程的重力场模拟。

(2) 在理论研究与震例统计分析的基础上,提出了一些有较好成功前景的判定强震中短期危险区的标志和方法。如利用小地震时、空、强分布的不均匀

性,提出了中短期综合预报因子 A 值等及它们的预报效能的评定;在深入地球潮汐理论研究的基础上,建立了分点大潮、朔望大潮的理论,提出并建立了潮汐偏角理论,经过与地震发生所作的相关分析表明,这种理论和方法用于地震预报可以明显提高预报能力。

(3) 发展了我国渐进式预报的思路,初步建立起有一定理论基础、有实验室实验依据的,对现有各类地震观测数据进行分析 and 实现动态图像预报的系统,完成了相应软件模块的研制,并逐步投入试用中。

(4) 总结了华北、华东、华南、西北等地区孕震区域特征,建立了这些区域的中短期预报判据指标。

(5) 按照边研究边实践的原则,运用本课题的研究成果,已取得一些成功预测的实例,例如本课题 1999 年底提交的全国 2000 年地震危险区预测,及近几个月的预报实践,对辽宁岫岩地震、云南姚安 6.5 级地震及 2000 年 6 月 6 日甘肃省景泰—白银间 5.9 级地震都事先做出了一定程度的预报。

(6) 研制了大量可用于中短期预报分析会商的软件,建立了中短期动态图像预报软件系统。

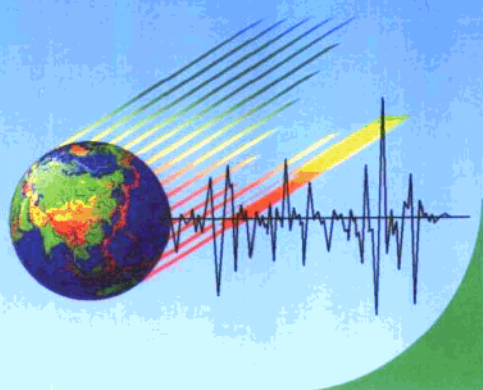
本书以课题研究成果为基础,根据课题验收的研究报告,进一步精选编成。全书共分四篇。第一篇,区域地球物理场演化的观测和反演及其与强震活动的关系,叙述从地壳形变测量(包括区域水准测量、GPS、跨断层场和台站测量、洞体应变和地倾斜观测、钻孔应变)、重力(区域重力测量和台站重力固体潮观测)、地下流体(水位、水气)、地磁地电、地温等直接观测资料建立地壳应力应变场图像以及相关地球物理量场、信息量场动态图像的方法;论述孕震模型、前兆理论;结合震例总结,分析这些动态场图像及其演化特征与地震孕育过程的关系;阐明地震孕育过程的阶段性特征及其进入中短期阶段的地壳应力应变场、相关地球物理量场和信息量场动态图像的演化特征;在此基础上,进一步研究与强震活动的关系,提出强震中短期危险区的判据和预测方法。此篇由吴云为主编写。第二篇,地震活动及孕震体介质参数的时空演化图像与孕震过程的关系,开发和研究了一些能正确反映介质本构关系变化特征的新指标,尤其对这些特征量时空动态图像的综合特征进行了深入研究,建立起它们的时空演化图像及其与孕震过程的关系,如提出地球固体潮汐分点大潮和朔望大潮特征图像的理论、地球固体潮汐偏角的理论、地震活动因子 A 值,使用神经网络得到的反应地震活动增强与平静的综合特征因子 M_0 、 M_1 、 M_2 等。此篇由王伟为主编写。第三篇,圈定中短期地震危险区的动态图像预报方法及其理论基础,在对地壳应力应变和地壳孕震介质动力动态图像研究、震例总结、物理实验的基础上,初步建立了孕震中短期的应力应变场演化及前兆特征的数学物理模型,提出了适用于中国板内地震中短期预报的动态图像技术和方法。此篇由陆远忠为主编写。第四篇,强震中短期动态图像预报的软件系统,介绍了本课题研制开发的强震中短期预报动态图像集成系统、多媒体地震会商系统、测震学日常分析预报软件系统。由李闽峰为主编写,第十二章中编入了王秀英硕士论文部分内容。

陆远忠统编全书,郭若眉负责全书的文字、图表的编排修订。

动态图像预测方法研究是“九五”地震预报技术攻关的一种新的尝试。其研究所依据的观测数据基础有了新的拓展，如 GPS 数据的应用，但数据积累仍很有限。数据处理方法更加严谨但也更加复杂。一方面突出并获得了地震前兆在空间区域上的分布信息，大大增加判定地震危险区所需的空間上的前兆信息量，这是有利的，但另一方面，反演求解所固有的不稳定性问题也突显出来。由于时间紧迫，这一问题只作了一般性理论探讨，实际工作中未充分顾及，这是今后工作需要加强的。

动态图像预测方法的研究比过去更加重视从物理、力学基础出发去研究地震孕育过程的特征及其与动态图像演化的关系，力图使提出的判据和方法具有坚实而明确的物理基础。从预报实践情况看，制约动态图像预测方法有效发挥作用的是各类观测数据的时空密度低，甚至于是严重不足。加强地震前兆监测台网建设，提高各类观测数据的时空密度，这是提高地震预报成功率的一个根本途径。从预报的结果看，动态图像预测方法研究的实效是明显的，预测判据物理力学意义明确，预测方法科学性显著增强。但是，动态图像预测方法的定量化程度仍然有待提高。因此，应用动态图像预测方法预测地震危险区时，实践经验仍然发挥着重要的作用，即便以后其定量化程度提高了，实践经验仍将不可轻视。

最后应当强调，本书的出版是课题全部参加人员的研究成果的体现。96-913 项目负责人及中国地震局和有关研究所、省地震局的项目主持部门、组织部门的科研管理人员的精心管理和大力支持是必不可少的条件。编著者向他们致以诚挚的感谢。



DIZHEN ZHONGDUANQI YUBAO DE DONGTAI TUXIANG FANGFA

责任编辑 / 程仁泉

封面设计 / 邢秀芬

ISBN 7-5028-1971-1



9 787502 819712 >

ISBN 7-5028-1971-1/P · 1097
(2523) 定价: 40.00 元

目 录

第一篇 区域地球物理场演化的观测和反演及其与强震活动的关系	(1)
第一章 应力应变场、相关地球物理量、信息量场的计算方法	(9)
1.1 根据形变观测数据建立地壳应变场动态图像的方法	(9)
1.2 根据重力资料建立重力场动态图像的方法	(45)
第二章 应力应变场和地球物理场动态图像与强震的关系	(57)
2.1 形变、应变场演化与强震的关系	(57)
2.2 重力场动态图像与强震的关系	(113)
2.3 地下流体动态图像的演化与强震的关系	(119)
2.4 电磁场动态图像与强震的关系	(125)
2.5 地温场动态图像与强震的关系	(134)
2.6 前兆异常区与地震危险性概率	(139)
第三章 应力应变场和地球物理场动态图像强震综合预测研究	(145)
3.1 动态图像方法强震中短期综合预测的基本思路	(145)
3.2 地球物理场动态图像的综合特征	(146)
3.3 丽江地震孕育过程动态图像异常特征及综合预测	(156)
3.4 圈定强震危险区指标与孕震进入中短期阶段的标志	(160)
3.5 预报实践	(164)
第二篇 地震活动及孕震体介质参数的时空演化图像与孕震过程的关系	(169)
第四章 地震活动参数及其动态图像	(171)
4.1 地震活动参数 $A(b)$ 值	(171)
4.2 地震活动频次、能量指标 σ_N 、 σ_E	(176)
4.3 地震活动因子 A 值	(184)
4.4 地震活动增强特征参数 W_0	(189)
4.5 地震活动增强特征参数 W_1	(193)
4.6 地震活动平静特征参数 W_q	(196)
4.7 C 、 D 、 MF 值综合异常交汇区方法	(200)
4.8 地震活动“增强”的方式及地震活动的复杂性	(207)
第五章 反映介质及应力场变化的参数及其动态图像	(212)
5.1 地震活动加卸载响应比方法的改进	(212)
5.2 地震波速比 V_p/V_s	(219)
5.3 地震平均应力场及其相关参数	(227)

5.4 地震环境应力场	(237)
第六章 反应孕震介质特征的前兆参数	(244)
6.1 日月零纬时窗分点大潮理论	(244)
6.2 倾斜固体潮的潮汐因子	(248)
6.3 地球潮汐偏角	(251)
6.4 日月引潮力触发地震	(252)
6.5 地磁转换函数	(254)
6.6 地电阻率各向异性度	(258)
第三篇 圈定中短期地震危险区的动态图像预报方法及其理论基础	(262)
第七章 中短期地震动态图像预报系统的基本思路和基本框架	(265)
7.1 建立中短期地震动态图像预报系统的基本思路	(265)
7.2 地震中短期动态图像预报系统的基本框架	(270)
第八章 中短期地震动态图像预报系统的建立	(273)
8.1 科学地选取工作时空域, 进行地震活动动态图像研究	(273)
8.2 用动态图像判断未来可能发生中强以上地震的区域	(277)
8.3 用动态图像判定强震孕震区	(288)
8.4 判定孕震区孕震过程进入中短期阶段的动态图像	(299)
8.5 预报系统对预测结果及其主要依据的动态显示	(306)
第九章 中短期地震动态图像预报系统的数值模型	(309)
9.1 强震数值预报系统原型的基本框架	(309)
9.2 中国大陆地震活动数值模型及华北地区构造应力应变场 动态变化的计算及其与地震活动的关系	(309)
9.3 地震活动的三维细胞自动机模型	(331)
9.4 首都圈强震数值预报系统原型(强震应力触发动态分析)	(341)
第十章 强震孕育过程的阶段性特征及中短期前兆的定性模式研究	(354)
10.1 概述	(354)
10.2 强震孕育模式理论与岩石破裂实验结果	(354)
10.3 前兆动态图像反映出的强震孕育过程的阶段性特征	(358)
10.4 强震孕育前兆时、空动态图像的定性模式研究	(361)
第四篇 强震中短期动态图像预报的软件系统	(372)
第十一章 强震中短期动态图像预报系统的研制	(373)
11.1 主要系统简介	(373)
11.2 解决的关键技术	(375)
第十二章 多媒体会商演示系统	(384)
12.1 国内外研究概况	(384)
12.2 多媒体制作软件概述	(387)
12.3 总体设计思想	(388)

12.4 程序的实现	(389)
12.5 本软件的特点	(394)
12.6 软件使用说明	(395)
参考文献	(398)

第一篇 区域地球物理场演化的观测和反演

及其与强震活动的关系

本篇叙述从地壳形变测量（包括区域水准测量、GPS、跨断层场地和台站测量、洞体应变和地倾斜观测、钻孔应变）、重力（区域重力测量和台站重力固体潮观测）、地下流体（水位、水氡）、地磁地电、地温等直接观测资料建立地壳应力应变场图像以及相关地球物理量场、信息量场动态图像的方法；论述孕震模型、前兆理论；结合震例总结，分析这些动态场图像及其演化特征与地震孕育过程的关系；阐明地震孕育过程的阶段性特征及其进入中短期阶段的地壳应力应变场、相关地球物理量场和信息量场动态图像的演化特征；在此基础上，进一步研究与强震活动的关系，提出强震中短期危险区的判据和预测方法。

地壳应力应变状态是地壳中十分重要的动力学特征。地球表面发生的许多现象，特别是强震活动及其伴生的多数前兆现象都与地壳应力应变状态密切相关。强震的孕育发生，主要取决于地壳介质结构性质和应力应变的积累、应力应变场的演化。地壳应力应变场演化的结果最终导致震源区的失稳破裂。另一方面单个前兆信号往往具有某种偶然性，而与应力应变密切相关的前兆场的动态演化图像则可能有较高的反映孕震过程的信噪比。因此，通过直接应力应变观测和其它地球物理场的观测和反演，研究应力应变场的动态图像及其与强震活动的关系，是使地震预测由经验、统计预测向物理的、动力的预测发展的重要途径，是建立中短期动态图像预测方法的基础。此项研究对于地壳动力学和工程地震、工程稳定性问题也有重要意义。

（一）不同研究领域的基本成果

（1）大地测量、地球动力学与地震预测

进入 90 年代，在大地测量领域由于大量高新技术的应用，使得测量的技术手段有了巨大的进步。特别是 GPS、INSAR 等空间测地技术的应用，不仅使观测精度大幅度上升，而且作业效率有了革命性的提高，使得传统技术无法实现的观测成为现实。空间测地技术将现代大地测量从地面推进到了空间、从陆地推进到了海洋、从静态推进到了动态。空间测地技术的应用，提供了前所未有的高时空分辨率的对地观测数据，使地球动力学研究、大陆动力学研究以及地震预测研究成为新的地学研究热点。为此，世界发达国家纷纷采取措施制定相应战略研究计划。首先是美国，率先制定全球动力学计划，通过国际合作，在全球建立了 GPS 跟踪站网，向全世界免费发布全部网站的坐标和运动速度数据；为了地震监测和研究，美国在圣安德烈斯断裂带布设高密度 GPS 台阵，以获取高时空分辨率地壳运动和形变信息。日本很快也布设覆盖本土的、间距为 30km 左右的高密度 GPS 台阵，以监测日本全岛的地壳运动和形变，为推进地震监测预报和研究服务。

在研究方面，国外学者比较重视板块的运动学、动力学研究，直接应用现代动态大地

测量（特别是 GPS 测量）的结果研究板块、块体之间的相对运动，使现代板块、块体运动学研究从定性走向量化。目前被广泛应用的 NUVEL-1 模型（Demets, 1990）在结合现代空间大地测量成果后，推出了新的改进模型 NUVEL-1A。NUVEL-1A 推算的各板块边界相对运动更加符合局部的实测结果。Zhengkang Shen 等（1997）根据南加州的密集 GPS 网数据给出了该区水平运动场，分析了过去 25 年的资料发现该区地震在震后保持持久的高应变率，指出地壳形变图像有助于发现隐伏断裂和确定可能的地震危险区。日本 1994 年 1 月 Hyogo-Ken Nanbu $M_s7.2$ 地震后，在震中附近的 GPS 台阵监测到 50mm 的同震位移；1995 年 10 月 Hokkaido-Toho-Oki 海中 $M_s8.1$ 地震时，远离震中的 GPS 台阵监测到同震位移达 600mm。Kato（1997）用日本 GPS 台阵 1996 年 4 月 1 日至 1997 年 3 月底每天的 RINEX 数据计算台点的坐标，用线性回归法估计了台点平均运动速度，并计算了该时段的线应变、面膨胀、最大剪应变和主应变轴方向，指出：a. 日本岛处于消减的大洋板块的压缩之中；b. 最大剪应变与近期地震活动区重合；c. 主压应变轴与大洋板块的消减方向一致。

90 年代初开始在华北、川滇等区域进行 GPS 观测与研究，积累了大量观测资料。我国在“九五”国家重大科学工程项目中支持建立了“中国地壳运动观测网络”。该科学工程包括 25 个 GPS 基准站、56 个基本站、近 1000 个不定期观测点，以及精密水准和重力测量。该工程的完成将大大提高我国监测现今地壳运动和形变的能力，为地震预报和研究提供更加丰富的基础数据。

用形变测量资料进行现今地壳运动、地震预报研究的工作是大量的。80 年代末，中国地震局地震研究所开始引进 GPS 技术，首先在滇西试验场进行观测试验。赖锡安、徐菊生等（1993）用 1988、1991 年两期 GPS 观测数据进行了滇西区域内的断层活动段的反演尝试，发现剑川—丽江断裂的中段活动剧烈，据此，预测该地段今后可能会发生一次 7 级地震（1996 年 2 月 3 日，丽江发生 $M_s7.0$ 地震），这是首次用 GPS 观测成果进行地震预测，并取得成功。进入 90 年代，GPS 技术在中国开始应用，为大空间尺度现今地壳运动和形变的研究提供直接观测数据。国家攀登计划项目“现代地壳运动和地球动力学研究”从 1992 年开始在中国大陆布网观测，至 1996 年建立了 22 个 GPS 点的观测网，取得了 21 个点的两期完整观测成果。朱文耀、程宗颐等（1997）利用 1992、1994 年在青藏高原东侧的 GPS 数据，初步研究各块体的运动速度和运动方式。王琪、游新兆等（1998）根据中美跨喜马拉雅的 GPS 联测数据，获得了西藏南部与尼泊尔之间的相对运动速度。周硕愚、张跃刚等（1998）将中国大陆划分为 6 个刚性块体，用全国 GPS 网 1994、1996 年的两期观测成果，研究了各块体的运动速度和运动方式，首次完全基于实测数据定量揭示出在中国大陆范围内各主要构造块体在数年时间尺度上的现今运动。

在 GPS 技术应用之前，主要用水准测量监测区域垂直运动。应绍奋（1988）、张祖胜（1990）较早使用水准测量资料研究地震活动，曾提出：垂直形变上升与下降的过渡带、两组速率等值线转折交汇的地区是易发生强震的危险区，并给出了中国现代地壳垂直形变及强震危险区图，图中划出的 19 个危险区在事后 4 年中有 6 个发生了强震。吴云（1994）从水平力与垂直力的联合作用论证了垂直形变速率高梯度带、隆起区易发生强震的机理。黄立人（1995）提出用垂直形变速率梯度矢量模的高值区作为强震危险区的判别标志。更早以前，于宗俦（1983）就认为：在“0”等值线附近的速率高梯度区易发生强震。“八五”攻关研究中，张祖胜（85-05-04-04）比较全面地研究了用水准、跨断层测量、固体潮资料

预测地震危险性的模式和方法；周硕愚提出用形变资料提取动力学参量的方法，并提出动力学图像预测地震的思路；薄万举进一步改进了信息合成方法（周硕愚、吴云在“七五”实用化攻关中提出形变信息合成增益法），提出多手段形变异常配套、集成的方法；蒋骏、张雁滨（1993）研究了应变固体潮剪切强度因子预报地震的方法；李旭东（1995）研究了倾斜固体潮的响应比特征；张雁滨（1997）研究了地表潮汐应变观测的响应比特征及预测地震的方法。

当前，由于 GPS 技术的普遍应用，获取高时空分辨率水平形变资料成为现实，国内外以研究地壳应力应变场及其与地震孕育的关系为重点，而应用响应比理论，研究岩石介质特性变化与地震活动的关系则是我国的独创。

（2）重力测量与地震预测

在本世纪 50 年代，日、美、苏等国在多震区开始进行重复重力测量，以试验能否观测到大地震前的重力变化。70 年代之后，观测到重力变化的报导日益增多，因此从事这项工作的国家也越来越多。迄今为止，几乎所有多地震的国家和科技发达的国家都开展了这项工作。国内外大量的观测结果表明，在地震的孕育过程中，的确显示出了具有地震前兆意义的重力变化。如 1964 年日本新潟地震和美国阿拉斯加地震，1965~1967 年日本松代震群发生期间，1968 年新西兰因南格华(Inangahua)地震，1971 年美国费尔南多地震前后，我国 1975 年的海城地震和 1976 年唐山地震，1996 年云南丽江 7.0 级地震等都有明显的重力变化发生。

我国的地震重复重力测量工作开始于邢台地震后的 60 年代，到目前为止已走过了近 30 年的历程。30 年来，在测量仪器、观测技术、数据处理和地震预报研究等方面都取得了长足进展。尤其是在测量精度方面，随着 80 年代中期 Lacoste-Romberg 高精度重力仪的引进，相对重力测量精度已达 $100 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ ($1 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2} = 1 \text{ Gal}$ ，下同) 左右。根据两期观测资料计算重力场时间变化，其精度在 $150 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右，相应的监测重力场变化的能力在 $400 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 以内。据研究，这个量级相当于一次 5.0 级地震孕育所产生的重力场变化。因此重复重力测量的监测能力已足以用于 5.0 级以上的中强地震预报研究。

我国的地震重复重力测量主要集中于地震危险地区，通过不断的努力，已陆陆续续建成 34 个区域网和 11 条测线或剖面。这些网或线每年观测 1~4 期不等，为认识地震的孕育和发生过程积累了大量的观测资料。

80 年代中期之前的工作主要集中在测网建设、观测工作的规范化和测量精度的提高等方面，同时也开展一些试验性的预报研究。“七五”攻关以来的研究主要在于观测数据的处理及结果显示的系统化和规范化，以及孕震重力变化机制及重力场变化与强震发生关系的实验研究。如陈运泰等的形变和质量迁移模式，李瑞浩等的扩容模式，黄建梁等的点源位错模式。同时也在此基础上开始了重力观测结果在地震预报的实用化研究，并将其结果实际应用于每年的地震趋势会商工作。

通过几十年来的努力，无论在重力的观测技术、测量数据的处理及结果显示的系统化和规范化方面，或是孕震重力变化机制及重力场变化与强震发生关系的实验研究等方面，都取得了许多实质性的进展。但在许多方面都还有待深入研究。

首先是限于观测技术的问题，目前的观测基本上为相对重力测量，缺乏必要的绝对重力测量加以控制。确定重力变化计算基准一直是一个困扰重力测量资料处理的问题。由此

而使重复重力测量结果的应用置信值 $400 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}$ 精度大打折扣。

其次是重力时间变化信息的提取问题。目前的分析基本上限于重力时间变化本身的分析。缺乏相关场的研究。重力场是一种比较稳定的物理场,其理论比较成熟。通过重力场的理论可以获得反映不同构造特性的物理场,如重力位场,梯度场等。此外重力时间变化与密度变化有关,而密度的变化与介质的受力过程紧密联系,即与介质的应力状态有关。因此通过重力的观测,获得重力变化,再通过适当的转换关系,可将重力的时间变化与介质的应力变化联系起来,多角度的研究地震的孕育和发展过程。

(3) 地下流体与地震预测

在地下流体与强震活动关系研究方面,不少学者进行了多方面研究。1975~1981年,我国的水文地球化学工作者对水氡前兆异常的时空特征做了较深入探讨,提出了“水氡异常场”概念。1981年李宣瑚提出了水氡异常时空演化的“扩展-收缩模式”。1975年海城地震之后,人们提出采用“变化率”参量来描述水氡的异常变化。此期间主要是采用多井孔的水氡综合变化率曲线来分析水氡趋势异常的时间变化特征(张炜等,1978)。在80年代后期,邢玉安曾探索过唐山地震前水氡动态图像的演化问题。1992~1995年开展的“八五”攻关中,王吉易等曾绘制出唐山地震的水氡变化率平面等值线图;董瑞树采用水位和水氡的从属函数(μ)等值线法,勾画出唐山、大同地震前的地下水异常的时空演化图。

地下水位动态图像的历史可追溯到1966年,邢台地震之后,当时人们直接利用水文地质部门绘制的不同时间的等水位图来预测邢台余震。“八五”攻关中,对地下水位的时空演化图像的生成方法进行了专门探讨,取得了一些有启示性的研究成果。例如,研制出井孔水位梯度变差值时空强扫描法(王雅灵等,1994);从属函数 μ 值等值线法(董守玉等,1986);含水层异常频次等值线法(贾化周等,1996)等,这些方法所勾画的动态图像,在一定程度上可反映出强震前的地下水位异常的时空演化过程。

以前的水位、水氡动态图像存在的问题是,a.反映水氡、水位异常变化的参量较繁杂,对各个参量的物理含义及表征方法未作仔细研究。b.地下流体动态图像的生成方法存在缺陷,显示的异常时空演化的连贯性和规律性较差。c.未提出中短期预报的指标和方法。

(4) 地磁、地电场与地震预测

地震电磁学研究地震孕育过程中地球介质电磁性质的变化,探索这些变化与地震发生的时间、地点、强度之间的关系,找出它们与地震孕育发生过程的内在联系,是地学中一门新的边缘学科。按观测物理量的差别,地电学方法已逐步形成两大分支,即地电阻率法和大地电场法。地震电磁学中的地球磁场方法,开展了场强变化的岩石介质典型结构(物性)的两个领域的研究工作。地震电磁学的主要研究内容或观测对象大致可以分为两类:一类属于物质电学属性(如大地电阻率)的测量及其电磁参数的测量;另一类是场量的测量,例如大地电场、地磁场以及与地震有关的电磁辐射的测量等。连续的和定点定期重复监测地球电磁场以及地球介质的电磁属性的时空演化是地震电磁学各方法的基础。电磁场动态图像与强震关系的研究正是依赖于这一基础。国外利用电磁前兆观测资料主要是进行地震前兆机理的研究,获得了一些较好的地震电磁前兆异常,并对其物理机理有了一定的认识(地震电磁效应、构造电磁效应、感应磁效应等),特别是由希腊地电学者 Varotsos, Alexopoulos 和 Nomicos(1981)共同提出的称为“VAN”地电预报法,以及发表的大量用“VAN”方法预报地震的文章(Tectonophysics, Vol.224,1993),在世界同行中引起了强烈

反响。希腊开展大地电场研究获得了较好的地震预报效果。

我国开展地震电磁学研究起步于 60 年代, 70~80 年代得到了长足的发展, 90 年代取得了重要进展, 研究成果得到国际同行专家的认可。在基础研究方面, 不仅积累了大量观测资料, 取得了以唐山地震为代表的数十个较为典型的震例, 而且在前兆机理和预报方法研究方面取得了许多进展, 如探索电磁场前兆异常与震源机制的关系、反映孕震介质特性的电磁参数的各向异性度研究等。相对而言, 对丰富的电磁资料缺少系统规范的处理和对比研究, 物理机制不够清晰, 获得的预报指标系统性不强, 缺少整体上的综合分析, 直接影响了地震中短期预报效能。因而, 从电磁学科各类方法的同源特征入手, 研究电磁学科前兆异常识别方法, 电磁场动态图像与强震关系及机理解释, 建立完整的电磁学科的中短期地震预报方法, 包括中短期强震危险区与强震震级预测的实用方法是非常必要的。

(5) 地温与地震预测

关于地热同地震之间的关系, 国内外许多学者都曾进行过研究。王林瑛、朱传镇等对唐山地震、海城地震震前的地温异常进行了分析(王林瑛等, 1984)。蔡永恩模拟了断层蠕动引起的升温现象, 对地热增温现象给出了一种物理上的解释(蔡永恩等, 1987)。尤传侠研究了澜沧—耿马地震前深井中的地温的观测数据(尤传侠, 1990)。汤懋苍比较了土壤热流场和深层大地热流场, 认为两者有一定的相似性(汤懋苍, 1991), 并通过对地下地热异常的监测发现了在我国每年都有相当区域的地热异常区, 他将其称为“地热涡”, 中强地震也大都发生在地热涡所在的区域内, 同时地热涡的迁移同强震迁移之间具有一定的相似性(汤懋苍, 1995)。强祖基则开展了与地温相关的热红外场与地震关系的研究(强祖基, 1992)。王瑜青等研究了短时间尺度的地热变化同地震的关系, 也发现短时间尺度的地热变化同 5 级以上的中强地震有较好的对应关系(王瑜青, 1994)。上述的研究均得到地温同强震存在一定关系这样的认识。但地温预测方法还有待完善, 其预报效率尚待进一步确认, 要建立一种高效低噪声的动态场跟踪方法还有很多工作要做。

(二) 主要研究内容与进展

①根据我国地震监测中形变测量的种类和特点, 提出了一套形变应变计算的方法, 包括由 GPS、定点应变测量资料计算水平速度场、应变率场, 由水准测量的观测资料拟合垂直运动速率场, 由跨断层观测资料计算 b 值等, 由固体潮观测资料计算应变潮汐日波半周期振幅比值及其追踪孕震过程的方法。

②系统地研究了地壳应变场的求解方法, 提出了不同类型地形变应变观测资料联合求解地壳应变场的位移梯度场联解方法。较深入地研究了应用最小二乘配置法推估形变、应变(信息)空间分布的具体方法, 提出了由实际观测资料确定协方差函数模型参数的方法, 并给出了实用方法。

③发现和揭示了地形变资料求解应变值的尺度相对性问题, 即应变值大小与计算应变的图形单元尺度存在系统的相关性, 这对地壳高应变区的判别有直接意义, 提出了根据统计分布特征量进行应变空间尺度归一化的方法。

④以现有主要孕震理论、响应比理论、岩石试验结果为基础, 研究了组合块体模型的形变特征及失稳判据, 阐明了孕震过程及其中短期阶段应力应变场的演化特征; 讨论了断层运动的特征; 分析了岩石加卸载试验数据及其失稳特征、应变固体潮观测数据及其地震前兆特征。在此基础上, 提出了判定中、短期强震危险区的应变标志、垂直形变标志、断

层运动标志, 以及根据应变固体潮观测跟踪孕震过程的方法。

⑤根据大量的震例总结与分析, 提出了一组应变类信息参量, 包括: 地壳垂直面内的剪切变形率 γ 、扩张变形率 θ 、断层形变累积率 D_c 、应变强度比 S_R 、断层带 b 值、应变固体潮汐日波振幅比值 R 等参量。

⑥把不连续变形分析方法 (DDA) 引入地壳应力应变场的研究。研究了用 DDA 进行大尺度不连续的地壳块体系统的建模, 以及对块体系统的位移、应力应变进行分析等问题。根据华北地区地质构造特征, 进行块体划分与建模, 利用 GPS 观测资料计算了华北地区应力场。

⑦研究了由重力观测资料解算重力场、重力梯度场、重力位场动态图像的实用方法。在解算重力场变化中引入了绝对重力观测结果, 得到了更精确的重力场变化空间基准, 使点值平均精度较大幅度提高。通过对仪器的格值常数适定性标定, 消除了观测结果中可达到 400nm/s^2 左右的格值变化的影响, 显著提高了孕震过程重力变化异常的识别能力。

⑧实际震例重力场动态图像、孕震模型引起的重力场变化和孕震体活动所引起的重力变化的数值模拟等, 研究了重力场动态图像与强震发生的关系。

⑨研究并改进了重力场转化为应力场的理论方法, 给出了以区域重力测量数据推算应力场的实用方法。

⑩研制出地下流体、电磁场、地温场的 13 个可用于中短期预报的信息参量, 包括水位变差 ΔH 、水氧基值变化率 R_0 、水氧滑动变化率 $\bar{R}$ 、地电阻率各向异性度 S 、地电阻率月相对变化速率 $R_p(t)$ 、地磁转换函数模变化量 $\Delta|A|$ 和 $\Delta|B|$ 、地磁转换函数总方差变化量 $\Delta\sigma_z$ 、地磁空间相关系数 R_z 、地磁加卸载响应比 $P(Z)$ 以及地磁场能量比 E_0 、地温梯度、地温土壤热扩散率等。

11 以华北、祁连—河西、川滇为重点区, 较系统地研究了各种场及其参量的动态演化与强震的关系, 在大量震例研究和总结的基础上给出了各类参量异常指标和孕震过程动态图像演化的基本形式, 研究了孕震过程进入中短期阶段的动态图像标志, 提出了各类场的动态图像方法判定强震中短期危险区的判据和预测方法。

12 对地震危险区危险性概率的研究, 以概率理论为基础, 充分阐明了以前兆异常为依据的地震综合预测或预报所固有的成功希望与失败风险, 基于实际统计结果求得的地震危险性概率指标可作为预测或预报决策依据。

(三) 地震预测实践、检评及认识

(1) 预测结果检评

本专题根据提出的动态图像判据和预测预报方法, 结合各手段前兆观测数据, 对 1999、2000 两个年度全国或部分地区的地震中短期 (1 年尺度) 危险区进行了预测, 结果表明:

①预测的危险区与未来 1 年内发生的 $M_s 5.0$ 以上地震的对应率超过 40%, 提高 10% 以上 (以往水平是 20%~30% 左右), 达到并超过了 10% 的考核目标。

②地震危险区地点预测的成功率显著提高。危险区一般为椭圆, 预测 6 级 (包括 6 级) 以上的地震危险区, 长轴不超过 5° , 短轴不超过 3° ; 预测 6 级以下的地震危险区, 长轴不超过 3° , 短轴不超过 2° 。预测的危险区在两个方向的线度均缩小约 20% 左右。

③中短期地震危险区预测的时间尺度是 1 年。这是预报工作程序提出的时间尺度要求, 而不是孕震过程研究得出的一种时间尺度结论, 因此, 缩短或延长这一时间尺度都会改变