



“九五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

地震中短期预报物理 基础研究

中国地震局监测预报司



地震出版社

地震中短期预报物理基础研究

中国地震局监测预报司

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震中短期预报物理基础研究/中国地震局监测预报司.
—北京:地震出版社,2002.6

(“九五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书)

ISBN 7-5028-2019-1

I. 中… II. 中… III. ①地震中期预报—研究
②地震短期预报—研究 IV. P315.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 012340 号

“九五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

地震中短期预报物理基础研究

中国地震局监测预报司

责任编辑:姚家榴

责任校对:张晓梅

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:2002 年 6 月第一版 2002 年 6 月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:506 千字

印张:19.75

印数:001~500

书号:ISBN 7-5028-2019-1/P·1112 (2570)

定价:35.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

丛书编委会

主 任：陈章立 陈建民
副主任：阴朝民 潘怀文 李志雄
委 员：张国民 罗兰格 陆远忠 罗灼礼
高 旭 车 时 李永林

本书编委会

主 编：张国民 尹京苑 张 流
编 委：梅世蓉 马宗晋 牛志仁 石耀霖
聂永安 李世愚 许昭永 刘 杰
李 丽 朱元清 杜品仁

序 言

强烈地震常常以其猝不及防的突变性和巨大的破坏力给社会经济发展、人类生存安全和社会稳定带来严重的危害。建国以来我国发生的1966年河北邢台大地震、1970年云南通海大地震、1999年台湾南投大地震,特别是1976年河北唐山大地震等都对人民生命财产安全造成严重损失,给社会公众带来了巨大的灾难。

尤其值得注意的是,随着现代经济的快速发展,人口向城市集中和城市都市化程度的提高,地震灾害正在以加速的趋势发展。远的不说,单就20世纪90年代以来,造成万人以上死亡或百亿美元以上经济损失的重大地震灾害就发生了多起,其中包括1990年伊朗大震造成4万人死亡,1993年印度拉土地震造成2.5万人死亡,1994年美国洛杉矶地震造成200亿美元的经济损失,1995年日本阪神地震死亡人数超过6千人,经济损失近1000亿美元,1999年土耳其伊兹米特地震造成1.7万人死亡和200亿美元的经济损失。当世界刚刚踏入新世纪门槛的2001年1月26日,发生在印度古吉拉特邦的7.9级大地震,又夺取了3万人的生命,并造成超过100亿美元的经济损失。因此,减轻地震灾害已成为国际社会的一个热点。

通过地震预报和在预报基础上的预防以减轻地震灾害,一直是地震科学家为之奋斗的目标。我国自邢台地震后开始地震预报研究和实践以来,经过数十年几代地震学家的努力,已经建立起独特的地震预报研究和管理机制和较为完善且全面服务于地震预报的监测台网体系。与我国国民经济五年计划同步开展的地震科技攻关研究,已成为这种特色机制的有机组成部分。

“九五”地震预报科技攻关研究旨在提高中短期(一年尺度)地震预报水平,同时加强1~3年中期预报方法和理论的研究。经过几年的努力,在“边研究、边应用”方针的指导下,年度中短期地震预报水平有明显提高,在中短期前兆异常识别、动态图像预报方法、强震中短期孕育过程的物理机理及预报模型等方面的研究成果,进一步改进和完善了经过几十年地震预报实践形成的长、中、短、临渐进式地震预报的理论系统,并取得了1997年新疆伽师6.3级、6.4级地震、1999年辽宁岫岩5.4级地震等多次具有减灾实效的成功预报实例。在国际地震学界关于地震能否预报的争论声中进行的“九五”地震预报研究所取得的成果,展示了地震预报研究的前景,坚定了中国地震工作者的信心。中国地震学家多年努力取得的宝贵资料和经验,将成为世界科学宝库中的一颗明珠。

“九五”是中国地震预报事业发展中承前启后的重要阶段。经过“六五”以

来四个地震预报科技攻关五年计划的实施，已经建立起较为系统的经验性地震预报的方法、判据，并尝试性地探索了地震预报的理论。然而我们也清醒地认识到，现有的进步离突破地震预报的科学目标还有相当长的距离。“九五”期间建立的数字化地震和前兆观测台网、中国地壳运动观测网络，为地震预报研究取得进展提供了契机。依托新的观测技术，开发新的信息处理方法，取得对地震现象更细致、更接近真实的认识，将是地震预报取得突破的希望之所在。

地震预报是世界性的科学难题，解决这个难题是社会的需求，是地震学家不可推卸的职责。我国的防震减灾事业任重道远，地震工作者应积极探索，深入研究，敢于实践，善于突破，为提高地震预测预防能力，减轻地震灾害损失而努力工作。

本套丛书是“九五”地震预报研究成果的提炼和总结，是广大地震科技工作者辛勤劳动的结晶。希望这套丛书能对提高地震预报工作人员的业务水平，促进地震预报研究和实践的深入开展发挥作用。

陈建

前 言

地震预报是全世界关心的问题，又是全世界公认的科学难题。而大陆地震的预报，比起发生在大洋边缘海沟的海洋地震，具有更大的科学难度。关于海洋板块运动、海洋板块俯冲带地震发生的规律，人类已积累了许多知识，但对于大陆动力学，却知之甚少。因此大陆地震的预报是科学难题的前沿。我国地震科学工作者在大陆地震预报的探索中已经历了数十年的艰难历程，付出了巨大的努力和艰辛，使我国在地震预报研究领域取得了长足的进步，在向攻克地震预报难关的科学道路上迈出了坚实的一步。我国采用边观测、边研究、边预报的方针，在部分地震前取得了较为成功的预报，尽管预报是经验性的，而且能报准的比例还很小。这些进步都在地震预报领域中展示了希望之光。然而应该看到的是，已有的进步仍然是局部性的而非全局性的，是现象性(经验性)的而非本质性的。展望未来，地震预报研究既面临很好的形势和发展机遇，又面临着长期持久科学探索的艰难历程。

地震预报的突破有赖于对地震孕育、发生规律的科学揭示。大陆地震预报涉及大陆动力学、大陆岩石圈结构、构造物理、震源物理、岩石破裂失稳、流体在地震过程中作用等一系列科学领域，更直接地涉及到地震前兆的探测和地震前兆的机理等科学问题。为推进对我国大陆地震孕育、发生规律的探索，在“九五”期间科技部(原国家科委)主持的“九五”国家重点科技攻关计划项目《强地震中短期(一年尺度)预报技术研究》(国家科委 96-913)中，设立了以“强地震孕育中短期预报物理基础”为课题的重点攻关课题(96-913-03)。该攻关课题由中国地震局监测预报司组织实施。课题负责人为张国民、尹京苑、张流，主要成员有梅世蓉、马宗晋、牛志仁、石耀霖、聂永安、李世愚、许昭永、刘杰、李丽、朱元清、傅征祥、张永仙、何昌荣、李炳乾、蒋海昆、焦明若、杜品仁、王绳祖、王华林、卢振业、周翠英、刘桂萍、陈宇坤等。经过全体参加者五年的努力工作和深入研究，全面地完成了课题及课题所属的专题、子专题的全部研究工作，取得了非常丰富的科研成果。在这些科研成果的基础上，提炼、汇总和编纂成书。全书可分为如下三部分：

1. 板内强震孕育模式的深入研究

通过数值模拟的方法，综合邢台震区深部构造探测结果，讨论了邢台地震孕育发生模型及其前兆机理，提出了邢台地震孕育发生的概念模型。

将损伤变量耦合于材料的本构关系中，利用有限元方法就包体孕震模式的孕震过程进行了分析研究，得出在受载过程中孕震体发生突然失稳而导致地震的一些力学条件。

根据强震区深部构造特征,提出了热物质侵入地壳的几种可能性,并根据张北地震这一具体震例,提出了深部热物质运移对孕震过程的影响以及伴随产生的前兆现象。

综合概括了华北地区强震孕育、发生的共性与个性。讨论了壳内低速高导体的成因及强震孕育的流体上涌激发模式。

2. 大陆地震成组孕育过程中的前兆场动态特征研究

使用强震组增益 P 、强震组效能 R 和强震时间分布变异值 S 对中国大陆强震成组活动的客观性作了检验,发现我国大陆强震具有两种突出的活动模式:丛集性复发模式和准周期复发模式。

在进一步发展由弹簧-滑块-阻尼器组成的平面网络非线性动力学模型的基础上,初步建立起更接近实际情况的细胞自动机模型,以研究中国大陆地震活动的特点。

应用成组孕震计算机模型的理论结果研究强震成组孕育和成组活动过程中孕震系统及其所含各地震带、震源区应力随时间的变化,进而给出孕震系统应力场时空动态演化的图像,从而从理论上研究强震成组孕育和成组活动过程中的场源关系。

从三个方面讨论了强震间的相互影响:①单一断层(单断多源)情况下强震间的相互影响;②相邻平行断层情况下强震间的相互影响;③多断层(断层网络)情况下强震间的相互影响。

3. 强震孕育过程中中短期阶段多种前兆综合成因机理研究

通过大理岩破裂实验,研究了典型构造中微裂纹演化、集结的过程和特征。根据微破裂集结临界条件的相似原理,认为这些特征可以类推到公里尺度,成为地震前兆的一次效应。它们有助于解释地震中短期阶段的前震或广义前震分布。

设计并完成了单轴压缩下不同裂纹角的表面裂纹Ⅱ-Ⅲ复合型三维破裂实验。实验结果为反对称畸变广角锥面破裂。实验中发现三维破裂为多重破裂,具有分形结构。

在理论上进一步完备了断裂力学的拉应力判据,提出了三维破裂的最大主应力定点法。证明了三维破裂面为双曲率曲面(广角锥面),外缘为准螺旋线。上述结果和国际上一系列实验结果完全符合。

以含锯切面的花岗岩为样品,在不同含水条件下研究了光面、含脆性物质夹层(石英粉)和含塑性物质夹层(粘土质断层泥)三类断层的摩擦滑动行为。

通过准动态光弹实验分别研究了一组含软包体、等模量包体及坚固体的复合模型中的应力及其变化。分别对含带雁行裂纹系及组合裂纹系的九个坚固体复合模型,在单轴压力作用下的应力场及破裂特征作了实验研究和对比分析。

采用适当配比的塑化松香,模拟岩石圈延性层,研究了塑性流动波传播过程。结果表明,在边界挤压的条件下,模型中出现波速相对较快的“快波”和

相对较慢的“慢波”。板块边界的驱动作用通过不同波速的多重塑性流动波向板内传播，不仅控制着地震能量背景的起伏振荡，而且导致缓慢构造运动的韵律性变化。

参加以上研究工作的人员中既有长期从事地震预报工作的老同志，他们的工作为课题研究的顺利进行提供了保障，同时也吸收了大批具有较好理论基础的青年地震工作者，他们的加入，为课题研究注入了活力。

地震预报研究涉及到的难题很多，需要经过不懈的努力才有可能取得一定的进展。本书的研究内容只讨论了诸多难题中非常有限的几个方面。本书由张国民，尹京苑、张流负责编写，各章主要完成人见各章页下注。由于认识所限，书中难免存在一些不妥之处，望大家批评指正。

最后需要强调的是，本书是课题全部参加人员共同研究的产物，是一项集体的成果。科技部、中国地震局和有关研究所、省地震局的领导和项目主持部门、组织部门的科研管理人员的精心管理和大力支持，是本项课题成果顺利取得的重要条件，编著者在此一并致以谢忱。

目 录

绪论	(1)
§ 0.1 强震孕育过程中的动力学环境和前兆机理研究	(1)
§ 0.2 强震成组孕育、成组活动中短期阶段前兆场机理研究	(4)
§ 0.3 地震过程及其中短期前兆机理的实验与理论研究	(8)
参考文献	(11)
 第一章 强震孕育发生模型数值模拟及其前兆机理探讨	(12)
§ 1.1 现状分析	(12)
§ 1.2 邢台地震区深部构造特征的综合与孕震概念模型	(14)
§ 1.3 邢台地震破裂过程的分析	(17)
§ 1.4 邢台地震的主要前兆特征与形成机制探讨	(19)
§ 1.5 三维数值模拟计算的边界条件问题	(22)
§ 1.6 邢台强震区的深部构造对强震孕育影响的三维数值模拟	(27)
§ 1.7 邢台强震孕育发生动态三维数值模拟	(39)
参考文献	(49)
 第二章 基于损伤力学理论和光弹实验的非均匀体镶嵌孕震模式研究	(50)
§ 2.1 基于损伤力学的孕震过程	(50)
§ 2.2 含不同弹性模量包体的复合模型中应力变化的实验研究	(59)
§ 2.3 含典型裂纹系硬包体复合模型的应力场及破裂特征的实验研究	(62)
参考文献	(68)
 第三章 孕震区内热物质运移过程及其伴生地震前兆	(69)
§ 3.1 孕震过程中热物质运移的基础、途径与条件	(69)
§ 3.2 地热前兆的观测事实	(71)
§ 3.3 与热物质运移过程伴生的其他地震前兆	(78)
§ 3.4 关于热物质及其在震前上涌的可能性研究	(80)
§ 3.5 热物质的侵入对孕震过程的影响	(82)
§ 3.6 热物质上涌过程与前兆关系的数值模拟研究	(86)
参考文献	(93)
 第四章 强震成组活动的客观性——观测事实及其科学检验	(94)
§ 4.1 我国大陆强震活动的成组性	(94)
§ 4.2 我国大陆东西部强震活动的成组性	(99)

§ 4.3 区域强震活动的成组性	(100)
参考文献	(102)
第五章 大陆强震成组孕育和成组活动的理论模型研究	(104)
§ 5.1 强震成组孕育、成组活动模型研究的一些科学思想	(104)
§ 5.2 由弹簧-滑块-阻尼器组成的网络模型	(106)
§ 5.3 复杂网络模型的建立和应用	(119)
参考文献	(127)
第六章 模型物性参数变化对大陆地震成组活动影响的模拟	(128)
§ 6.1 边界条件变化对大陆地震成组活动的影响模拟	(128)
§ 6.2 孕震体静摩擦强度对系统地震活动的影响	(145)
§ 6.3 孔隙流体压对地震成组活动的影响	(158)
参考文献	(168)
第七章 强震成组孕育、成组活动过程中构造应力场时空演化和前兆实例研究	(170)
§ 7.1 构造应力场时空演化的理论图像	(170)
§ 7.2 应力场动态图像分析	(175)
§ 7.3 川滇地区强震成组活动及其前兆场时空演化	(180)
§ 7.4 华北北部地区前兆时空演化与强震活动	(185)
§ 7.5 地震活动性时空演化及强震活动	(188)
参考文献	(190)
第八章 强震成组孕育、成组活动过程中的相互作用和影响以及具有一定 物理基础的统计模型的建立	(192)
§ 8.1 强震成组活动中相互影响的理论图像	(192)
§ 8.2 成组强震间相互影响的地震活动性证据	(195)
§ 8.3 强震间相互影响的综合前兆证据	(201)
§ 8.4 地震群体活动的加速模型	(205)
§ 8.5 应力释放模型	(210)
§ 8.6 耦合应力释放模型	(213)
参考文献	(216)
第九章 典型构造内微破裂集结的实验和理论研究	(218)
§ 9.1 二维模型	(218)
§ 9.2 三维模型	(224)
§ 9.3 研究结果在地震学中的意义	(231)
参考文献	(233)

第十章 坚固体模式的孕震过程及前兆特征的实验与理论研究	(235)
§ 10.1 坚固体的基本性质	(235)
§ 10.2 坚固体的孕震特点	(240)
参考文献	(247)
第十一章 水对岩石摩擦滑动过程及系统失稳行为的影响	(249)
§ 11.1 实验方法	(249)
§ 11.2 实验设计	(250)
§ 11.3 实验结果	(250)
§ 11.4 讨论与结论	(256)
参考文献	(258)
第十二章 岩石圈塑性流动波与地震及其前兆的时空演变	(260)
§ 12.1 引言	(260)
§ 12.2 实验条件和方法	(261)
§ 12.3 “快波”的实验结果与分析	(262)
§ 12.4 “慢波”的实验结果与分析	(267)
§ 12.5 岩石圈塑性流动波	(272)
§ 12.6 讨论	(279)
§ 12.7 结论	(284)
参考文献	(284)
第十三章 深部花岗岩的变形过程和声发射特征	(287)
§ 13.1 实验方法和数据处理	(287)
§ 13.2 实验样品及实验条件	(288)
§ 13.3 实验结果与分析	(289)
§ 13.4 结论	(300)
参考文献	(302)

绪 论

地震预报研究的进一步发展,需要人们对强震发生的机理开展更深入的研究,更全面地认识孕震区的动力学环境、强震发生的构造背景,并通过相关前兆的表现特征更好地理解强震的孕育过程。由于人们不能直接了解地下深部的情况,而为了地震预报的目的,人们又需要对以上诸多认识有一个科学的总体描述,从而力图达到近似定量化地表述一个强震孕育发生过程的目的。于是各国地震工作者根据伴随强震发生的主要现象,相继提出了许多强震孕育模式,如著名的 IPE 模式、DD 模式、组合模式、包体模式、DC 模式、固结模式等。

同时人们发现,地震活动具有明显的空间不均匀性和时间非平稳性特点。前者表现为地震在空间上成带、成区分布,后者表现为地震活动在时间轴上具有活跃和平静(高潮和低潮)相交替的特性,这些特性从形态上看即表现为强震活动的成组性。而每个强震组往往又有其主体活动区,亦即在空间上也带有一定的丛集性。成组活动之外,强震相当稀少,且在时间上和空间上呈十分离散的状态。

对于特定的时间、空间而言,地震是小概率事件,它的发生有相当的偶然性,其发生的规律难于掌握。为了对提出的各类孕震模式以及由统计得出的强震活动成组性进行定量化的研究,人们进行了大量的计算机数值模拟研究和室内岩石力学实验。与野外观测相比,计算机模拟出的和实验室内的“地震”由于条件可控制、因果关系明确,这方面的研究可以给出许多理解天然地震现象的启示。因此,对充实、深化板内强震孕育理论研究内容,具有非常现实的意义。

本书是在“八五”研究的基础上,针对近些年来地震预报中遇到的实际问题,以观测资料为依据,通过理论分析、数值模拟方法以及室内实验,围绕以下几个方面的问题,就强震孕育过程的机理进行的讨论。

§ 0.1 强震孕育过程中的动力学环境和前兆机理研究

0.1.1 非均匀地壳介质中震源孕育模式研究

地震前兆是地震孕育到特定阶段才出现的现象。所以,要想认识地震前兆场的时空分布规律,不能从前兆论前兆,必须将地震前兆研究与地震成因和孕育过程联系起来。这就不能不触及到地震学的基本概念和基本问题。迄今所有的震源模式都立足于一个基本概念,即地震是连续块体裂缝破坏的结果。虽然基于这个概念成功地解决了许多地震学中的问题,如地震波的传播、地球内部速度结构及震源参数的测定等等。但是,应用这个概念来研究地震孕育过程是远远不够的,因为地球固体层并不是连续介质,地震过程也不只是裂缝发育过程。按照非线性地球物理学观点,地球是一个巨大的开放系统,参与与外界的能量质量交换;地球物理介质是由各种规模的块体组成,其尺度大小服从几何级数定律;组成系统的块体被断

层所分割；块体内的强度大于断层；块体之间也进行能量质量交换。在此过程中，当某些块体的能量达到一定值时，该系统就变得不稳定；最后到了某个时刻，在不稳定的、能量饱和的介质中发生动力学破裂，并伴随着弹性波发生，使积累的弹性位能转化为其它形式——地震能、热能和电磁能等形式。释放弹性能的岩石体被称为地震震源，或叫做地震活动块。失稳的块体尺度越大，地震的强度越大。

按照以上概念，地震是地壳、上地幔物质在构造力作用下长期变形的结果，是岩石层块体层次结构中一部分块体与周围介质发生能量、质量交换后，产生某个块体或块体集合的应力高度集中，并导致这些块体失稳、破裂的结果。地震孕育过程是一个非线性、不稳定的过程，伴随着性质不同的大量随机现象。由此出发研究强地震的孕育、发生规律，并建立相应的地震前兆场模式，必须运用地球物理学方法研究一系列基本问题，诸如强震孕育的基本条件和基本过程是什么；能大量积累弹性形变能，并突然发生破裂失稳的块体应具备哪些结构特征和力学性质；构造块体中应力集中的过程、时空分布规律及其与地震活动、地震前兆的关系；地震前兆的复杂性与构造块体的结构、力学性质及地球内部过程与边界动力作用的关系等等。此外，还必须引入非线性理论，研究强震前反映孕震场整体特征及其变化规律，尤其是地震孕育短临阶段(远离平衡态)的前兆特征、规律与机制，更需要借助这个理论。

20 世纪 80 年代以来，国内外学者都注意到地震前兆在时空分布上的大尺度及其演化过程的复杂性。强烈地震的前兆一般分布在震中及其周围的广阔空间，方圆数百公里，乃至上千公里的范围，并且显示出空间分布上的不均匀性及随着时间的变迁性；在时间过程上，不是一个简单上升或下降的过程，而是起伏多次变化；各种观测手段记录的地震前兆形态不同，强度不同，起始转折时间也不同。所有这些复杂性都是现有震源模式所无法解释的。因此，在“八五”攻关中国家地震局提出了“地震前兆场物理模式建立及前兆空间分布物理机制研究”(85-04-04 项目)。在此项目中，以梅世蓉为首的课题组，运用观测资料分析、数值模拟计算和岩石破裂实验与非线性理论相结合的方法，联系强震区的深部构造特征，结合破裂失稳条件，研究了板内强震孕育条件、过程及地震前兆的发生机制，提出了“坚固体孕震模式”的物理力学基础，初步探讨了与孕震过程有关的地震前兆。

该模式以强震孕育发生的两个基本条件：①具有积累大量弹性应变能的条件；②具有发生突然应力降的条件为基础，分析了我国华北、西北、南北带强震区三维速度结构特征，得出下列关系：

(1) 大陆强震的孕育、发生与地壳、上地幔速度结构的非均匀性(纵向与横向)存在紧密联系。强震区的地壳一般具有高速、低速镶嵌分布的多层结构特征，且上、中地壳的速度结构图像横向变化突出。壳内高速度层与壳内多震层基本一致。上、中地壳内高速体及其下方低速体的存在是强震孕育的重要基础。在速度结构比较均匀，上、中、下地壳速度分布横向变化不大的地区，如鄂尔多斯地块、塔里木盆地等，即使速度值很高也无大地震发生。

(2) 强震震源区的上、中地壳内有较大规模的高速体存在，高速体的四周速度较低，为一个相对低速介质包围的“坚固体”(又称“硬包体”)；高速体的上方常有盆地或地堑对应；而下方常有一定规模的地壳低速体存在；强震区下的上地幔速度较低($7.3\sim 7.9\text{ km/s}$)且有上地幔隆起与之对应；强震区下的莫霍面上有高角度深断裂存在的若干证据。

(3) 从强震与大断裂的关系看，发生在大断裂带上与不发生在大断裂带上的强震都存在。这表明强地震与大断裂的关系并非一一对应。没有大断裂带的地方，若存在孕育、发生

大震的深部构造条件也可能发生强震。但在壳内高速体存在的地方,若有深断裂存在,其地震活动性可能更高。

(4) 在大震震源区的一侧存在上地幔隆起,存在地幔热物质向壳内侵入的可能性。

然而“八五”的研究又引出了大量的新问题急待研究解决,如:地下水或深部热物质参与坚固体的孕育、发展将带来什么效应;热物质侵入地壳对改变整个孕震区环境的作用有多大;坚固体周围介质的结构与力学性质对坚固体的形成和发展的影响是什么;坚固体孕震模式中应力-应变集中的时空分布形式和能量积累的时空分布形式有怎样的对应关系。“八五”期间人们虽然分别对唐山 7.8 级地震、共和 7.0 级地震的孕育过程和前兆特征进行了模拟,取得了一些较为满意的结果,但是数值模拟的震例太少,还不足以说明理论的普适性和有效性。在模拟中所涉及的方法多为二维数值模拟(平面应力问题),对于孕震区介质在深度上的不均匀性(例如层状结构)没有讨论,板块构造力复杂边界条件的设置问题没有讨论,没能给出坚固体孕震模式下孕震区的三维时空图像。由于前兆物理模式的研究是推进地震预报研究深入的重要问题之一,也是难度相当大的攻关研究课题,它需要有可信度高的并且足够多的前兆观测资料和有关的基础资料支持,如深部资料、岩石力学实验资料、地质构造资料和板块动力学资料等。这方面的研究需要长期不断的积累,持之以恒的科学探索,才最终有望取得一定的进展。

0.1.2 强震孕育的深浅部地壳构造物理环境、动力条件的综合分析研究

强震孕育、发生与地壳、上地幔结构的非均匀性有关,这是从 20 世纪 80 年代以来地球物理学家与地震地质学家已达成的共识。但是,在这非均匀性中包含哪些因素?其中最重要的是什么?不同学者强调的重点则不同。80 年代,对地壳高、低速层的相间分布及壳内低速层的存在及上地幔隆起非常强调。90 年代以来,随着对强震区地壳细结构的深入研究,以及 CT 技术在大陆地区深部结构研究上的应用,使人们对这一问题有了新的认识。

刘国栋、王椿镛、张先康等通过对邢台、唐山、怀来等强震区深部构造探测提出:①大震震源往往位于浅部铲式正断层的下盘和壳内陡倾角隐伏深断裂上断点之间所围限的空间内。②壳内存在折离带,该折离带被隐伏深断裂所阻,强震多发生在交汇区内。③在大震震源区附近有壳内低速-高导体发育,大震往往发生在壳内低速-高导体的上方或上角隅的脆性地壳内。④在大震震源区的一侧上地幔局部上隆,上地幔物质向壳内渗入(刘国栋、王椿镛、张先康等,1995)。

刘福田、刘建华、孙若昧等则通过层析成像资料,提出我国大陆地震多发生在壳内高速区与低速区的过渡带,且偏于高速带一侧(刘福田等,1986;1989;1991)。梅世蓉通过大陆地震活动与大范围 CT 资料的全面对比,及唐山、邢台主、余震分布与两个震区较细致的 CT 资料对比,提出:①强震区的地壳一般具有高速、低速相间分布的多层结构特征,且上、中地壳的速度结构图像横向变化突出;壳内高速度层与壳内多震层基本一致;上、中地壳内高速体及其下方低速体的存在是强震孕育的重要基础;强震震源区的上、中地壳内有较大规模的高速体存在,这个高速体四周被低速介质包围;②强震震源区下的上地幔速度较低,且有上地幔隆起与之对应;③强震震源与大断裂的关系并非一一对应,但在壳内高速体存在的地方,若有深断层存在,其地震活动性可能更高(梅世蓉,1997)。

以上两方面的认识各有侧重,前者针对孕震的构造环境,而后者针对的是震源的形成。

其实,它们是互相补充的,震源体的形成离不开环境,但强调的重点不同。刘国栋等似乎特别强调了低速层的重要作用,而梅世蓉则特别强调高速体的作用。它们各自的作用究竟如何?这是需要仔细研究后才能说清的问题。

本课题有关这方面的研究主要以华北地区为重点,这一地区地质构造十分复杂。它既是长期陆壳形成、发展和演化的结果,又是不同时期构造运动作用的综合体。考虑到如果把地震活动理解为现今地球动力学过程的一种表现,那么,探讨华北地区地质构造与强震活动的关系,应突出以下两点:①在资料利用上,要充分反映区域地质构造、地震构造和活动构造的最新研究成果;②在时间尺度上,要充分表现最新构造活动,阐明强震与第四纪活动构造的关系。基于这种考虑,对华北地区的活动构造,主要研究地貌构造、第四纪活动断裂和第四纪断陷盆地或拗陷三部分。

为了建立较完善的孕震模型,探讨地球物理场和地壳上地幔结构特征与强震的关系,是探索强震孕育机制和地震成因的重要手段。自1966年邢台地震后,在华北地区已作了大量深部探测工作。根据深部电性结构、地震测深和重力反演结果编绘的华北地区上地幔高导层埋深与强震分布图、华北地区壳内高导层埋深与强震分布图和华北地区莫霍面埋深与强震分布图,可寻找地壳上地幔结构特征与强震分布之间的关系。

长期以来,许多研究者都认为,华北地区现代的主要动力环境是受印度次大陆的推挤和太平洋板块俯冲造成的挤压环境,相应的挤压应力场是最重要的动力学因素。华北地块的受力状况是:东部受太平洋板块向西的挤压力,西南部受印度板块指向北东的挤压力;四面受外围介质侧向的压力;垂向承受重力、流体压力或浮力等。在我们的模拟中是取印度与欧亚板块边界的NE向挤压应力作为华北地区地震活动的主要动力来源,另外,也考虑太平洋板块的俯冲对华北地区地震活动的影响。

除板块边界作用力外,华北地区岩石圈下是否存在地幔对流,它产生的壳下应力场是华北地区地震活动的动力条件,值得考虑。因为,据Liu(1978)的结果,地幔对流产生的壳下压应力和张应力的量级为 10^7 Pa,可以解释与华北地区地震活动有关的一些特征。

除水平作用力外,垂直作用力也可能是强震孕育和发生的动力来源。自晚第三纪起,华北东部盆地地区大面积整体沉降,这是岩石圈温度降低后重力均衡作用的结果,也与华北东部所处弧后扩张环境有关。这一沉降运动是否会产生强震力源?高祥林(1994)认为,华北东部的大面积整体沉降,相当于岩石圈绕水平轴的转动,支点在太行山。由于岩石圈具有一定的刚度,东部的沉降对西部的鄂尔多斯块体产生向上的力矩作用,造成鄂尔多斯块体整体抬升。因此,现在仍在继续的华北盆地的沉降运动看来对地震的孕育过程不会有太大作用。除下沉运动外,上地幔隆起产生的垂直作用力及相应的热应力以及垂直差异运动产生的垂直作用力也可能是孕震力源。但是,如果以强震震源机制解中有正断层分量存在,才证明地壳中有独立的垂直作用力存在,则华北地区强震孕育过程中垂直作用力显然很小。

§ 0.2 强震成组孕育、成组活动中短期阶段前兆场机理研究

通过20世纪我国大陆7级以上地震的时间分布图,可以看到大陆地震的活动在时间轴上具有高潮和低潮相交替的特征。20世纪共经历了四个地震活动平静和活跃相交替的轮回。每个轮回可分为平静、过渡、高潮三个阶段。在整个轮回中,地震活动呈现为由少到多、由

平静到活跃的加速(指数型)发展过程,而且每个轮回都有一个强震主体活动的地区。这是中国大陆强震活动最基本的图像。

根据中国地震学家和地质学家的研究,中国大陆作为一个相对完整的地震区,包含 20 多个地震带,每个地震带又含有若干震源区,总共有 800 多个震源区。使中国大陆成为一个相对独立的、含有 20 多个地震带和 800 多个震源区的统一大孕震系统。而印度板块和太平洋板块对中国大陆的推挤是中国大陆大孕震区的动力条件。

自 1980 年李钦祖等提出华北地区大地震的成组活动特点以来,对强震群体(成组)活动特征的研究日趋深入。1980 年马宗晋等提出华北多应力集中点场的思想。1982 年马宗晋等又提出了我国强震幕式活动的观点。1983 年,刘蒲雄等研究了华北地震高潮中大震成带发生的特点。1987 年张国民等研究了中国大陆强震的韵律特征。进入 90 年代之后,李钦祖等又进一步研究了中国大陆强地震及其异常的成组性,张国民等研究了构造块体成组强震活动模型。加之许多其他作者的工作,将我国大陆强震成组孕育、成组活动的特点及其在地震预测中应用的研究不断引向深入。

中国大陆位于欧亚板块的东南部,东邻太平洋地震带,南靠地中海—喜马拉雅地震带。中国大陆在亚欧板块、太平洋板块与印度板块的作用之下,形成四个支点,即缅甸、兴都库什、台湾和东北四个作用点。日本测地学会 1989 年给出的测量资料表明,太平洋与欧亚板块之间的相对运动速率约为 $90\sim 100\text{ mm/a}$,菲律宾板块与欧亚大陆之间的相对运动速率为 50 mm/a ,印度板块相对于欧亚大陆的运动速率为 $40\sim 60\text{ mm/a}$ 。印度板块对我国大陆地壳的活动起主要的作用,由于印度板块的碰撞,中国大陆地区形成了世界上规模最大的板内地震区和地震带,这些地震区、带上地震频发,大震不断。

我国的台湾和喜马拉雅地区位于板缘地带,地震活动高度活跃。而大陆内部地区的地震也十分活跃。这种遍及全国各内陆地区的地震活动与三大板块通过四个支点对中国大陆的作用有密切的关系。因而在对中国大陆地区地震活动成组活动进行模拟时,除了了解地质状况以外,还必须详细了解外界作用力对大陆内各断层系、各地质构造区的作用以及外力作用后系统内应力、应变的变化情况。

中国大陆地区属欧亚板块内的中国-东南亚亚板块,是典型的板内区。作为中国-东南亚亚板块的主体部分,一方面,中国(及其邻区)大陆构造块体具有整体性的特点,但同时在这个具有整体性的大陆地块内部,又被活动断裂分割成各种不同级别的构造块体,构成了中国大陆地壳的层次块体结构图像。中国大陆及邻区活动断裂和强震震中分布图表明,中国大陆构造块体在大尺度上有整体性,而在各种小尺度上是由各种次级块体组成的,而大地震在不同层次块体边界呈现为带状分布。

也正是由于周围大板块对中国大陆的作用,使得中国-东南亚亚板块的地震活动具有明显的层次结构,且地震活动在时间域上的分布具有自相似性。而大陆地区地震活动又极其复杂,从板缘区到板块近边缘区和板块内部区有几十年到数百年的活动周期,各地震区的地震活动具有不同的特征,同时又表现出明显的不均匀性。而从边缘到内部,地震活跃期的起始时间及其主体活动时段有逐渐滞后的现象,这也说明我国大陆内部的地震活动状况不仅与大陆内部断层的活动与分布有关,而且与周围板块的边界动力作用的关系也较为密切。

这一方面的讨论分 4 个方面进行。