

地震预测科学研究 论文选

■ 张国民 著

地震出版社

地震预测科学研究论文选

张国民 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震预测科学研究论文选/张国民著. —北京:地震出版社, 2013. 10
ISBN 978-7-5028-4178-2

I. ①地… II. ①张… III. ①地震研究—文集 IV. ①P315.0-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 285762 号

地震版 XM2795

地震预测科学研究论文选

张国民 著

责任编辑:王 伟

责任校对:孔景宽

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

发行部:68423031 68467993

门市部:68467991

总编室:68462709 68423029

专业图书事业部:68721991 68467982

E-mail: 68721991@sina.com

http://www.dzpress.com.cn

邮编:100081

传真:88421706

传真:68467991

传真:68455221

经销:全国各地新华书店

印刷:九洲财鑫印刷有限公司

版(印)次:2013年10月第一版 2013年10月第一次印刷

开本:889×1194 1/16

字数:1224千字

印张:39.5

印数:001~800

书号:ISBN 978-7-5028-4178-2/P(4866)

定价:200.00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

1966年邢台地震,开始了我的地震分析预报生涯。从此,围绕地震预报任务进行了长期的工作,直到退休。处于地球科学前沿的地震预报,至今仍是一个不解之谜。在地震分析预报工作中,许许多多的科学问题缠绕着我们,有待我们去探索、去研究、去解决:地震孕育的地质构造条件、地震孕育的深部环境、地震孕育发生的地球动力学机制、地震孕育发生的物理力学过程、地震发生的失稳破裂机制、孕震过程中的前兆现象、地震前兆的物理力学成因、地震前兆与孕震过程的内在联系……。就其与地震预测直接相关的地震孕育与前兆现象来说,一系列基础性的科学问题同样困扰着我们,如地震的孕育发生是个体(单个地震)行为还是群体(成组地震)行为;前兆是震源生成的还是构造应力场生成的;地震与前兆之间的关系是因果的还是相关(伴生)的;在地震活跃的时段,一个地震区内强震常常成组发生,这些成组发生的强震之间是彼此孤立的还是互相关联的;成组发生的强震之间若相互关联、互相影响,那么这种影响是增震(使未来地震的孕育过程加快)的还是减震(降低未来地震的危险)的……。

围绕地震预测预报的这一系列科学问题,地震科技工作者已经进行了长期不懈的钻研,而且必将更持久、深入地继续下去。笔者有幸作为这个队伍中的一员,在地震分析预报工作中与师长、同学、同事们合作,参与地震预测的科学探索。本书是笔者与合作者撰写的部分文章的选编。为便于阅读,将文章大致分为六个方面,分别为:①强震前地震活动、前兆异常及其综合分析;②震源孕育模型与前兆机理;③强震成组活动、成组孕育模型及其在地震预测中应用;④中国大陆强震活动与活动地块构造;⑤地震活动与前兆场特征的数值模拟与实验研究;⑥地震预测科学及其探索历程。每部分都只有少量文章,而且研究程度尚浅,只能作为读者研究这些问题时的引玉之砖。若能给读者以点滴启示,则是笔者最大的欣慰。

基于长期预测预报的工作实践及其探索研究,在地震预测中逐渐形成了两条科学思路,简单地说,一是源,二是场,也就是源的研究和场的研究。源即是单个地震震源。源的研究包括震源的深、浅部构造条件和孕震环境,震源在构造应力场中的地位,震源在应力场中发展、演化直至地震发生的过程(包括震间、震前、震时、震后的全过程,简称震源过程)、震源孕育发展过程各阶段的物理、力学、化学等各种效应(即通常所说的前兆)等。按其时间进程考察,即可构成震间(震源处两次相邻强震间的复发时间)、震前、震时和震后等诸阶段的研究。对震源发展演化的过程研究,是开展地震危险性分析和阶段性地震预报(如中长期预报和短临预报)的基本科学依据。

场即构造应力场。含有多种构造形态的地质构造块体,在其整体性的构造活动中可给出一幅区域应力场的图像。地质块体内的特殊构造环境,决定其存在一组(即多点)应力集中的孕震区(亦可称潜在震源区)。场的研究即是探索构造应力场的特征及其发展演化,分析构造块体内成组地震孕育发生的活动特点及其与构造应力场发展演化的关系,研究成组地震孕育发生的构造环境条件,以及成组强震间相互影响、相互作用等问题。由此可见,场的研究在地震预报研究中具有整体性和全局性的意义。

场、源之间既有关联性又有复杂性。源寓于场之中,其不仅有自身发展演化(包括震间、震前、震时、震后诸阶段)的过程,同时这一震源过程又受大区域应力场的总体演化过程的制约和场内强震活动间的相互影响,从而使地震的孕育呈现为一个复杂的演化过程。在地震预报实践中发现和提出的近场前兆和远场前兆,与震源演化过程相关的物理性前兆和与区域构造活动相关的构造活动性前兆,以及地震与前兆异常之间的错综复杂关系等都与场源演化的科学问题密切相关。

本书的文章基本上是围绕源与场这两条思路的探索。其中第一、第二部分以源的研究为主,包括

震源及邻近地区的地震活动、前兆异常、唐山大震的震例解剖、震源破裂失稳与前兆机理、震源孕育模型等研究。同时也含有部分场和场源关系的研究文章，如我国陆区的强震活动特点，地壳应变场与强震活动的场源关系，华北地震的时间分布及其物理解释等。第三、第四部分以场的研究为主，包括强震成组活动、成组孕育的模型、成组强震间的相互影响和相互作用，前兆场动态演化与强震成组活动，中国强震活动与活动地块构造，活动地块边界带（大型活动构造带）与强震活动等。第五部分是应用数值模拟和实验对场源问题的综合研究，包括对震源过程及其前兆成因的数值模拟，大区域（如中国大陆及其所含的地震区）应力应变场与地震活动的模拟等。第六部分则是对地震预测预报历程和地震预测科学发展的思考。

本文集的汇编出版得到中国地震局监测预报司车时副司长、刘桂萍处长的热情鼓励和支持，蒋长胜博士、马宏生博士、邵志刚博士、王辉博士、张浪平博士、曹建玲博士、张德成高工、张永仙博士、李丽博士、焦明若博士、刘杰博士等在文章的收集、遴选、汇编等工作中给予了大力帮助，宋治平博士为文集的汇编出版花费了很多精力，陈非比编审和王伟编审为文集出版做了很大的努力，借此机会，向一切支持、鼓励、帮助过的同事、同人和笔者的合作者们表示最诚挚的感谢！

由于笔者水平所限，加之许多文章又是多年前所作，错误和不当之处在所难免，而且不少内容，如前兆异常特征、前兆机理分析、孕震模型、地震预报历程、地震预测发展展望等在不同文章中多有重复，恳请读者谅解，并诚请大家批评指正。

目 录

绪论	1
第一部分 强震前地震活动、前兆异常及其综合分析	7
燕山带破坏性地震前的某些震兆特征	9
唐山 7.8 级地震孕震过程及中期前兆分析	14
唐山大地震前震源区及其邻近的异常变化特征	27
唐山地震前后的异常变化与强烈地震预报问题的探索	36
我国大陆强震活动的韵律性特征	69
印度板块北边界地震活动和中国大陆地震	78
地壳应变速率与地震活动关系的研究	
——从地壳应变场探索强震活动的场源关系	86
潮汐现象和地震前兆观测	97
地震前兆复杂性成因机理研究的讨论 (一)	
——地震前兆复杂性的表现形式	104
地震前兆复杂性成因机理研究的讨论 (二)	
——地震前兆复杂性成因机理	109
中国大陆地震震例异常统计与分析	115
关于地震综合预报物理基础某些问题的讨论	123
综合分析预报的科学思路与技术途径	133
第二部分 震源孕育模型与前兆机理	141
华北强震的时间分布及物理解释	143
岩石流变模型在孕震过程和前兆研究中的应用	152
地壳介质的流变性与孕震模型	160
汶川 8.0 级地震构造动力成因分析	168
华北几次大震余震应变释放特征及“应力窗口”的机制讨论	177
大地震的重复时间和余震持续时间关系的理论研究	183
地震前兆地区性差异的力学成因分析	191
由岩体失稳讨论地震前兆的复杂性	196
走滑型地震前断面位错加速运动和一种可能的短期前兆机制	202
孕震过程中岩石膨胀及断层蠕动的数值模拟研究	211
孕震模型在综合预报中的应用	222
第三部分 强震成组活动、成组孕育模型及其在地震预测研究中的应用	233
中国大陆强震轮回活动的计算机模型研究	235
地震孕育发生的场源关系初步研究	247
构造块体成组孕震模型和前兆场某些特征分析	255
高潮期中成串强震间的相互关系及其机理探讨	264
强震成组孕育、成组发生过程中相互间影响的研究	274
张北 6.2 级地震与强震成组活动	283
华北强震规律的研究	293

可可西里—东昆仑活动构造带强震活动研究	298
大陆地震的动力学模型研究	307
前兆场动态演化与强震成组活动	314
强震成组活动与潮汐力调制触发	326
岩石破裂强度变化对孕震系统地震活动影响的动力学模型研究	336
第四部分 中国大陆强震活动与活动地块构造	343
大陆强震机理与预测研究综述	345
中国大陆的强震活动与活动地块	353
中国大陆活动地块与强震活动关系	361
中国大陆活动地块边界带与强震活动	370
中国大陆地震震源深度及其构造含义	379
中国大陆及其邻区强震活动与活动地块关系研究	388
中国大陆活动地块变形与地震活动的关系	396
应用地震学方法研究中国大陆活动地块应力应变场	406
青藏活动地块区运动与变形特征的数值模拟	416
第五部分 地震活动与前兆场特征的数值模拟和实验研究	427
华北北部短临前兆场特征与震源过程的数值模拟	429
地震前兆复杂性的数值模拟研究	441
含预制软弱带的岩石破裂过程的数值模拟	449
中国大陆及其周边地区构造应力场的数值计算及其在地震活动性解释上的应用	456
中国大陆及其邻区地震活动的数值模型研究	466
基于准三维有限元方法建立的地震活动模型	474
昆仑山口西 8.1 级地震同震影响场的数值模拟	483
滑动方向相反的含障碍体平行断层失稳破坏应变场变化特征的研究	492
含障碍体滑动方向相同平行断层失稳破坏应变场、声发射分布特征的研究	503
利用多种地震学参数研究中国大陆地壳应变场	511
第六部分 地震预测科学及其探索历程	521
中国地震预报探索 40 年	523
我国地震前兆和预报的探索	543
我国地震预报研究近 10 年的发展与展望	554
地震预报研究的发展展望	566
年度地震预报能力的科学评价	574
确定全国地震重点监视防御区的研究	582
大陆动力学与大陆地震研究	593
从“国际地震与地球内部物理协会”第 23 届大会看当前地震预报的动向	602
帕克菲尔地震预报实验场：2004 年 6 级地震及其对地震物理和地震预测研究的影响	609
地震预测科学及其发展展望	618

绪 论

本书是笔者与合作者们在地震分析预报工作中撰写的部分文章的选编,为便于阅读,将文章大致归为六个方面。但因为这些文章都是围绕地震预测研究而彼此相关,互相密切联系的,因此分类只是大体上的归纳,彼此间难免互相交叉和混合。六个方面的分类分别为:(1)强震前地震活动、前兆异常及其综合分析;(2)震源孕育模型与前兆机理;(3)强震成组活动、成组孕育模型及其在地震预测中的应用;(4)中国大陆强震活动与活动地块构造;(5)地震活动与前兆场特征的数值模拟与实验研究;(6)地震预测科学及其探索历程。

一、强震前地震活动、前兆异常及其综合分析

地震预测的目的是对未来地震的发生时间、地点和震级做出判定。为实现这一目标,在科学技术上必须基于两点,一是对地震孕育、发生与震后全过程(简称地震过程)的观测,以获取地震孕育发生的信息;二是对观测到的地震过程进行探索和研究,以揭示地震孕育发生的科学规律。这些就是通常所说的地震预测的两大基础,即观测与研究。二者密不可分,相互依存和渗透,相互转化和推进,其中尤以观测为基础。

我国地震学先辈傅承义先生说过“地震预测必须依据某种前兆”。而强震前的地震活动图像,地震活动性参数和震源参数,地壳形变,磁场、电场、重力场等地球物理场变化,地下流体,气象因子以及动物行为习性等即是对地震孕育发生过程的前兆的观测内容。在观测基础上获取各种前兆现象,并通过大量震例的积累和研究,总结探索地震预测方法并在地震预报的实践中不断检验与发展,这是现阶段地震分析预报工作的基本形态,因此,20世纪80年代以来的“大地震震例总结研究”、“地震监测与预报方法清理研究”、“地震预报方法实用化攻关研究”、“地震短临预报方法及理论攻关研究”、“强地震中短期(一年尺度)预报技术研究”、“强地震短期预测方法和物理基础研究”等重要科技攻关项目,都是围绕着震例总结、地震前兆和预报方法等内容展开研究的,所发表的地震活动图像、地震活动性参数和震源参数、地壳形变、电磁场、地下流体等多学科前兆异常及其预测研究的论文数以千计。本书的这一部分只是其中之一粟,收集了笔者和合作者对首都圈地区地震,特别是唐山地震的部分研究论文,包括燕山带地震尤其是唐山地震前地震活动性、多学科地震前兆、孕震过程中各阶段前兆异常的综合特征及其时空演化,以及对地震过程与前兆特征的物理力学成因分析。

在《唐山7.8级地震孕震过程及中期前兆分析》一文中,系统总结了地震活动、震源机制、跨断层形变、地电阻率、地下水氡、水位、地磁等多学科的中期前兆异常,分析了异常的时空分布特征,并应用岩石力学实验结果与这些前兆做对比分析,给出了唐山地震前地震活动、地壳形变、地电阻率、水位、水氡等异常的发生、发展的时间进程和异常变化特征和实验结果的一致性,显示了强震前的多学科前兆异常可能是孕育过程进入高应力阶段后震源及邻区介质非线性体积膨胀和破裂发展的综合反映。在《唐山地震前后的异常变化与强烈地震预报问题的探索》一文中,在总结有关唐山地震研究的基础上,给出唐山地震前后的主要异常变化及其特征,并着重揭示了异常的复杂性,剖析其可能的原因,针对预报实践中碰到的主要问题和预报中的经验与教训,结合对复杂性的分析,进而对预测强烈地震的途径和方法做了一定的探讨。

本部分文章中还包括我国大陆强震的韵律性特征,地震前兆复杂性研究,中国大陆地震震例异常的统计分析,应变场与强震活动,地震综合预报途径与物理基础等,内容比较宽泛,但总体上都围绕着强震前的异常变化、多种前兆异常的综合特征及其时空演化、地震前兆的复杂性分析以及综合预报

途径与方法的探索。

二、震源孕育模型与前兆机理

众所周知,地震预报的突破有赖于对地震孕育发生规律的科学揭示。为此国内外地震学家围绕地震孕育的物理模式和前兆机理开展了不懈探索,如美国肖尔茨等的岩石膨胀流体扩散模式,苏联米雅金等的裂隙发展雪崩不稳定模式,我国郭增建等的震源孕育的组合模式,牛志仁等的膨胀蠕动模式和梅世蓉的坚固体孕震模式等都是该领域研究的代表。

震源孕育和地震前兆的理论与模型研究,需要通过理论分析与解析、数值模拟与实验研究等途径,模拟地震孕育和发生的物理过程,解析该过程中的多学科前兆,解释多学科前兆异常的综合特征及其演化过程。因此,需要将地震孕育、发展、发生的全过程与多种前兆演化放在同一个物理过程中加以研究和分析,为地震预测提供物理基础(或称理论基础)和预测方法。尽管这方面的研究已进行半个多世纪,但其显然还是处于初步的探索阶段。

本书的这部分文章只是这一领域中的零星探索。由于震源的孕育包含多源场的成组孕育过程和单个震源自身孕震过程两方面,因此笔者的工作也从这两方面开展。有关多源场的成组孕震的研究(笔者又称之为场的研究),归之为本书的第三部分,本部分则侧重单个震源孕育及其前兆的研究(笔者称之为源的研究)。由于场与源密不可分,其是在统一的孕震大系统的动力作用过程中孕育和发展的。这统一的孕震大系统又被称之为强震区或强震带(或称之为强震的构造区或强震构造带)。作为场源统一性研究的一个例子,本部分第一篇文章“华北强震的时间分布及物理解释”就以华北强震区公元1400年以来所经历的两个地震活动期中7级以上大震为例,探索了场上(强震区内)群体(成组)孕震和单个震源孕育的关系,给出了地震活动期中7级大震孕育过程中的相互联系和相互影响。应用了弹簧、滑块和麦克斯韦体的并联模拟强震的震源体,并由多个强震震源体组合成一个象征强震区的华北孕震大系统,通过解析解给出单个震源孕育过程中的应力、应变曲线,模拟了单个震源孕育、发生过程,同时也给出了成组强震间的相互影响和相互作用,模拟给出了华北强震活动期内7级以上大震呈指数型时间分布特征,解释了一个地震活动期内强震活动逐渐增多、加速,再发展到高潮的总体活动特征。并应用流变学模型讨论了华北第三(1400~1730年)、第四(1731年至今)活动期强震活动的地区差(主体活动地区转移)、时间差(活动期持续时间差异)、强度差(各活动期地震释放总能量的差异)等问题。

对于构造变形速率相当低的大陆地震而言,7级以上大震往往需要数百乃至数千年的孕育过程。对于如此长时间的动力作用和地壳深部特有的震源环境,孕震过程中介质的流变特性是不可忽视的重要因素。因此笔者与合作者在探讨震源孕育模型中坚持应用岩石介质的流变模型讨论孕震过程。在“岩石流变模型在孕震过程和前兆研究中的应用”一文中,应用岩石流变模型研究了单个震源的地震孕育发生过程,以定常应变速率为基本条件,在获取解析解之后,给出了孕震过程中应力、应变、应变速率、能量等多种特征量的时间曲线,并以此讨论了孕震过程中的前兆表现及其物理力学机制。在“地壳介质的流变性与孕震模型”一文中,在分析我国地震震源深度分布特征的基础上,应用我国地热分布等资料,运用地壳介质流变特性,探讨了震源深度分布的物理解释和孕震环境,推导了我国东、西部地壳脆韧性转换带深度,进而建立了孕震模型,讨论了孕震过程和前兆机理。

此外,笔者还应用震源的流变学模型讨论了余震窗“应力窗口”的机理,研究了大地震重复(复发)时间和余震持续时间的相互关系。同时在这一组文章中,还应用孕震过程中岩石膨胀和断层蠕动的数值模型和断面位错加速滑动模型等研究了地震前兆的特征与机理,还通过岩石失稳准则讨论了前兆复杂性和地区性差异等问题。

三、强震成组活动、成组孕育模型及其在地震预测中的应用

早在1960年,梅世蓉先生在研究中国地震活动性时就指出,强震活动在时间轴上具有高潮和低潮

相交替的特性,低潮期强震少发,高潮期强震频发。在经历了1966~1976年我国大陆10年大震之后,不少作者进一步考虑和研究强震活动的时空分布特征。李钦祖等发表了《华北地区大地震成组活动特征》,刘蒲雄发表了《华北成串强震整体孕育过程探讨》。之后,强震活动的成组性、成丛性或成串性等特点引起地震界的广泛关注,地震活动高潮与低潮、活跃与平静交替的轮回性活动特征在地震预测,特别是在中长期地震形势预测中得以广泛的应用。活跃期中强震成组活动包含两重含义,一是时间上从集,二是空间上丛集。1966~1976年间在华北的渤海及其周边和西南的川滇地区共发生12次7级以上大震即是最典型的实例。

面对范围不大的一个区域内强震成组发生,地震工作者们开始思考这些成组发生的强震之间的关系,如他们之间是彼此孤立的还是相互联系的;地震孕育和发生是单个震源的个体性行为还是多震源的群体性行为;成组发生的强震之间是否存在着相互影响,以及什么样的影响。与此相联系的是,地震前兆是震源应力场生成的还是构造应力场生成的;地震与前兆之间的关系是因果性的还是伴生(相关)性的,等等。

针对这些问题,笔者与合作者们建立了地震活动高低潮(即地震活跃与平静)交替的轮回性活动的计算机模型,开展成组强震活动现象、特点及其机理的探索,进而对场与源的关系进行研究。在成组孕震模型的构建中,将一个地质构造地块作为一个相对独立的地震区,构造块体内的活动构造带为若干地震带,构造带上的闭锁段则为地震带内的潜在震源区。这样,一个地质构造块体,作为一个相对独立的地震区常含有若干个地震带,每个地震带又含有若干个潜在地震震源区,由此组成一个孕震大系统。在此基础上,设计了模拟构造块体统一孕震的计算机模型。该模型中含有 n 个地震带,每个带含有 m 个震源区,即该孕震大系统共含有 $n \times m$ 个震源体。考虑到孕震过程的长期性,用具有流变特性的麦克斯韦体作为震源区的介质模型,用设定摩擦强度的滑块作为震源体构造强度,并应用定常应变速率作为动力作用条件。在对系统中 $n \times m$ 个震源的本构方程给出解析解的基础上,通过计算机系统计算给出这一孕震系统中每个震源区的应力、应变、应变能等参数随时间的变化曲线,同时给出当某一个震源破裂失稳(即发生地震)时整个系统内应力场在各震源区上的调整图像,并进而计算出应力调整后的整个系统的持续孕震的应力场演化图像。模拟了含有 n 个地震带,每带含有 m 个震源区的孕震大系统,其地震活动具有活跃和平静相互交替的轮回活动特性,显示了在活跃期内强震在时间和空间上具有成组、成丛活动的基本特性。同时也给出了成组地震孕育和发生过程中的相互影响、相互作用的应力场演化图像。

应用上述构造块体成组孕震模型,一方面可以对强震成组活动的多种特性进行揭示,同时还可以对地震与前兆间的关系认识给予有益的启示,即地震前兆在其生成机制上有两类,一类是由震源区自身应力增高而生成,另一类是孕震大系统中(多应力集中区)那些高应力区所生成。前者被称之为源兆,后者被称之为场兆。由此对地震前兆与地震之间的关系既有因果性又有伴生(相关)性的双重特性,以及远场前兆等的理解给予启发。

本部分中的《中国大陆强震轮回活动的计算机模型研究》《构造块体成组孕震模型和前兆场某些特征研究》《地震孕育发生的场源关系初步研究》《强震成组孕育、成组发生中相互影响的研究》《前兆场动态演化与强震成组活动》等文章就是围绕上述思路开展并给出了相应的结果。此外,这部分文章中还对华北地区、华北北部的晋、冀、蒙交界地区、青藏地块中可可西里—东昆仑地震带等地震区带的强震活动的成组性特征及其相关机理等做了探讨。

四、中国大陆强震活动与活动地块构造

本部分文章是笔者在主持“973”计划项目“大陆强震机理与预测”(1999~2004年)期间所撰写(或参与撰写)的部分文章。地震预测是国际性科学难题,究其原因主要是由于地震学家对强震机理缺乏足够的理解。地震,特别是大陆地震的孕育和发生是在复杂的地壳深部环境中,在复杂的动力作用下的构造活动演化过程。对这种复杂的物理过程,科学家还知之甚少。目前的地震预报是在对地

震孕育发生的规律尚不清楚的情况下进行的,这就从根本上制约了地震预报水平的提高。因此,揭示地震孕育发生的科学规律,开展强震机理与预测的基础研究,既是巨大的科学探索,又是重大的国家需求。

“大陆强震机理与预测”项目的总体科学思路是:从中国大陆强震的特殊背景出发,以活动地块动力学为主线,通过对最新构造变动和应力场演化的研究,划分出控制中国大陆强震的不同级别的活动地块;通过数学物理模拟研究地块活动与强震孕育的关系;并结合我国大量震例检验,发展大陆强震理论,以逐步应用于地震预测。项目研究共发表数百篇文章,本部分只是其中很少的一部分,重点是讨论我国强震活动与活动地块的关系。

活动地块又称地质构造块体(简称构造地块或地块),是在前人工作,如张文佑(1984)的断块构造理论和马杏垣(1987)、丁国瑜(1991)提出的活动亚板块、构造块体的基础上,综合了活动构造演化和现今地壳运动等成果提出来的。我国大陆晚新生代和现代构造形变以地块运动为主要特征,活动地块是被形成于晚新生代、晚第四纪(10~12万年)至今强烈活动的构造带所分割和围限、具有相对统一运动方式的地质单元。中国大陆及边邻地区被划分为6个Ⅰ级活动地块及其所含的22个Ⅱ级活动地块。而我国大陆地壳运动的动力学模型是活动地块整体性运动和块体内部分布式变形相结合的模式。由于活动地块相对完整并有相对统一的运动方式,所以活动地块之间的运动方式、运动速率、变形特征和深部结构等的差异则主要集中在各地块之间的边界带上。因此,活动地块边界带是活动地块之间差异运动和相互作用的边界带,也是地壳形变的局部化带和应力应变的集中带,因而也往往是强震孕育发生的主体地带,亦是我国陆区最基本和最重要的强震带。自有史料记载至2003年,我国陆区共记录到6级以上地震685次,其中8级以上巨大地震18次,7~7.9级大震118次,6~6.9级地震549次。在这些地震中,18次8级地震全都发生在Ⅰ、Ⅱ级活动地块边界上;101次7~7.9级地震分布在活动地块边界带上,占其总数的86%;有304次6~6.9级地震发生在活动地块边界带上,占其总数的56%。从地震能量释放和地震造成的人员死亡的灾害统计方面看,活动地块边界上地震能量释放占我国陆区地震总能量的95%,地震灾害占96%。而所有的Ⅰ、Ⅱ级活动地块边界带的总面积占我国陆区总面积的16.7%。由此可见,中国大陆活动地块对强震活动具有很强的控制作用。而且对于强度越高的地震,其控制作用越大。同时,各活动地块边界带的变形速率与该带的地震活动水平、带内强震的复发周期等也具有很强的内在联系。

除了活动地块边界带与强震活动关系之外,活动地块与强震关系的另一方面是各活动地块区的强震活动与该地块区内部构造变形的关系。如上所述,活动地块的构造运动具有相对统一的整体性运动和内部构造变形的双重特性,前者形成地块间差异运动并导致活动地块边界成为应力、应变的集中积累的强震带,而后者,即地块内部构造变形的差异导致各地块地震活动水平的差异。就Ⅰ级地块区而言,青藏与西域等活动地块构造变形强度很大,地震活动水平亦很高,而东北与华南活动地块的构造变形速率很小,地震活动水平也相对较低。在本部分“中国大陆活动地块与强震活动关系”等文中,针对我国大陆及邻区6个Ⅰ级活动地块,根据GPS观测资料给出各地块区的平均应变速率、主应变方向、面应变等结果,研究了这些应变参量与各地块地震活动的关系,给出了一些有意义的结果:由于各活动地块构造动力环境、运动与变形的性状、地质构造条件等的差异,形成各地块区内部构造活动和构造变形的差异,从而导致各地块间强震活动状况的差异,包括强震活动的总体水平、地震应变能的释放速率、强震活动轮回等。具体体现在各地块的现今地壳运动的变形速率(应变速率)与地震活动的应变释放呈线性相关;各地块区震源机制解的最大主压应力方向和GPS测量所给出的最大主压应变方向之间具有良好的一致性;同时震源机制解所给出的震源破裂类型与现今地壳变形的张压状态具有协调性。从而不仅从活动地块边界带与地震关系,也从活动地块内部变形性状与地震活动关系两方面研究了中国大陆强震活动与活动地块构造之间的内在联系,为理解大陆强震机理提供了有意义的启示。

五、地震活动与前兆场特征的数值模拟和实验研究

对地震过程开展数学、物理模拟是地震预测研究的一个重要方面,本部分文章是这一领域的尝试性探索,主要包括前兆场特征与震源过程的数值模拟,地震前兆复杂性的数值模拟,中国大陆及周边地区构造应力场和地震活动图像的数值模拟,以昆仑山 8.1 级地震为例的同震应力场的数值模拟以及地震活动与断层相互作用的实验研究等。

在前兆场特征与震源过程的数值模拟中,以华北地区 20 多次 5 级以上地震为实例,分析研究了这些震例的短期异常资料,总结了短临异常的 7 个特性,包括短临异常的普遍性,短临异常的突发性和变化形态的多样性,异常频次随时间的非线性加速增长,异常空间分布非均匀性,异常沿构造分布的优势性与向震中传播的迁移性,短临异常与外部环境因子(地磁场、气象因子、潮汐因子等)的相关性,以及相对于中期异常的复杂性等。针对前兆场的这些特征,构建震源孕育发生过程的岩石膨胀—断层蠕动的各向异性有限元模型,将岩石膨胀视为中短期阶段,以震源区介质软化和断层蠕动来模拟震源过程的短临阶段。通过有限元计算给出震源及周围地区应力、应变场的演化图像,包括平均应力、体应变、切应变、空隙压等参量,并根据各参量与实际观测中的应力、应变测量、地下流体测量、地电阻率观测等多学科前兆观测量的物理力学关系模拟短临阶段的前兆场变化,并将理论模拟结果和实际震例结果做对比分析,以探索短临前兆场特性的物理力学成因,尤其对短临前兆的复杂性问题做了专门的研究。

在对中国大陆及周边地区地壳构造应力场和地震活动的模拟方面,首先利用粘弹性有限元模型,采用由 GPS 测量得到的中国大陆周边板块运动参数做边界条件,并采用深部地球物理探测所获得的我国陆区各地块的地壳介质特性参数作为模型的介质参数,对中国及邻区的基本构造应力场进行数值模拟,给出了最大剪应力及其变化速率,最大剪应变及其变化速率,以及剪切应变能及其变化速率等空间分布,并通过与我国陆区实际地震活动中地震应变、地震能量的空间分布的对比分析,研究了地壳构造应力场和地震活动的内在联系,探讨了中国大陆地震活动时空非均匀性的动力学成因问题。

在此基础上,基于有限元方法,参照细胞自动机模型,建立模拟地震活动动态演化的动力学模型:利用有限元方法确定各单元的应力增长速率,设定各单元的初始应力和摩擦因素,通过破裂准则获取单元破裂时间,而后将破裂单元作为内部边界,利用有限元方法计算该单元破裂对系统造成的应力调整。由此建立定常位移速率边界条件下的地震活动模型,初步给出了与我国陆区地震活动时空演化相似的机理性图像,为探索我国地震活动的动力学成因提供了有意义的启示。

在物理模拟方面,针对我国许多强震区都含有一些相互平行的地震构造带,如华北地震区的山西带和河北平原带,大体上都是北东走向,大致呈平行展布的地震带。但其地震活动往往有很大的差异,在 1484 ~ 1730 年华北第三活动期中,山西带高度活跃而河北平原带十分平静;而在 1815 年以来的第四活动期中,河北平原带十分活跃而山西带却非常平静,二者呈交替状活动。而另外有些平行地震带,地震活动又呈同步(或准同步)性活动。针对平行断层(地震带)地震活动的这些不同特点。在本部分文章中,设计了两种状况的平行断层,通过实验室岩石力学实验来研究其地震活动特性并探索其原因。一种是滑动方向相同的平行断层的失稳破裂状况及其断层间的相互作用,另一种是滑动方向相反的平行断层上的失稳破裂状况及其相互影响。实验结果给出,滑动方向相同的平行断层,当其中之一发生破裂失稳时,在该断裂上的其他震源区应力增加,呈增震影响,但在与其平行的另一断层上,则是应力降低,呈减震的影响。这为我们理解山西带和河北平原带两条滑动方向相同(同为右旋滑动)的平行断层地震活动时间分布的差异特征提供了物理模拟的依据。而在滑动方向相反的平行断层的实验中,则是另一种结果,当其中一条断裂上发生破裂失稳时,不仅本断裂的其他震源区呈增震影响,而且在另一条平行断裂上也呈现为应力增加的增震影响。

六、地震预测科学及其探索历程

这部分是笔者对地震预测科学探索的某些回顾性总结、对地震预测科学及其发展展望的思考、地震预报能力评价和地震重点监视防御区的确定等方面的一组综述性文章。

地震预报已经经历了长时期的艰苦探索。自新中国建立以来,经历了20世纪50年代至1966年邢台地震前的地震预报酝酿和准备阶段;60~70年代伴随我国大震高潮和严重震灾而兴起的地震预报广泛实践、多路探索、多学科并进的大发展阶段;80~90年代的总结、清理、深化研究的阶段和进入21世纪以来以高新技术应用、开发和强化基础观(探)测与研究的新阶段。半个多世纪的艰苦探索取得了许多重要进展,也积累了许多重要的认识。然而就地震预报的能力和效能而言,尽管也曾取得过部分较好预报的实例,但更多的是一次次严重的挫折。

在回顾总结半个多世纪地震预测科学探索历程之后,笔者和合作者认识到发展地震预测科学的重要性:地震预测科学的发展是提高地震预报水平的关键和基础。为此,在“地震预测科学及其发展展望”一文中着重提出和讨论了发展地震预测科学的相关问题,包括地震预测科学的内涵,地震预测科学的框架,地震预测科学的发展趋势等。笔者将地震预测的科学内涵定义为对地震孕育发生与后效(简称地震过程)的观测和对观测到的地震孕育发生过程的探索与研究。前者的目的是获取地震孕育发生的信息和对地震过程发展演化的认识,而后者目的是系统揭示地震孕育发生的科学规律。

因此,简单地说,地震预测的科学内涵是对地震过程的观测和对地震孕育发生科学规律的揭示。对地震过程的观测包括对地震孕育发生的深浅构造和深部地球物理环境的探测,对地震孕育发生过程的多学科、全方位、立体化的动态演化的观测等。通过上述探测和观测,以获取地震孕育、发生和震后全过程的科学信息,确立地震预测的科学依据,建立地震预测的科学基础。对地震规律的科学揭示包括在对地震过程观测基础上开展地震孕育发生的动力学成因、地震破裂失稳的物理力学机制、前兆场动态演化、前兆机理等的探索研究,并在此基础上建立地震孕育发生的数学、物理模型,开展数值模拟和物理模拟并进行仿真研究,进而探索地震动力学预测的理论、模型、方法和技术。

依据上述科学内涵,形成包括地震过程观测、地震成因、地震前兆机理、地震预测方法和地震预测实验场等内容的地震预测学的科学框架,通过发展地震预测科学,支撑和引领我国地震预测预报,以不断增强地震预测预报的能力。

在这部分中,除了对我国地震预测科学探索历程的回顾与总结,并在此基础上所思考的地震预测科学及其发展展望的文章外,还有一些与此相关的文章,如“我国年度地震预报能力的科学评价”、“确立地震重点监视防御区的研究”以及反映国际上地震预测研究动向的“帕克菲尔德地震预报实验场:2004年6级地震及其对地震物理和地震预测研究的影响”等。

第一部分

强震前地震活动、前兆异常 及其综合分析

燕山带破坏性地震前的某些震兆特征^①

摘 要 本文系统分析了燕山带 1957 年以来仪器记录的地震资料,对 1967 年 7 月 28 日海坨山 5.5 级和 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级两次破坏性地震前的地震活动特点进行了探讨。

对北京及其所在的燕山地震带的地震活动,已有过一些研究^[1,2]。近年来我们结合该区的震情监视,以 1967 年 7 月 28 日海坨山 $M_s 5.5$ 和 1976 年 7 月 28 日唐山 $M_s 7.8$ 两次破坏性地震为例,对燕山带 20 多年来仪器记录的地震资料做了进一步分析,以期从中寻找大震前地震活动的异常特点,为京津唐地区的震情监视工作提供线索。本文是这方面工作的一部分。

一、资料

本文使用了国家地震局地球物理研究所 1978 年编辑的《北京及邻区地震目录汇编》中的地震资料,其中 $M_L \geq 4$ 级地震的资料自 1957 年开始,微震资料自 1966 年区域台网建成后开始。为保证所用资料在时间上连续和空间上均匀,本文选取的是 1957 年以来 $M_L \geq 4.0$ 级地震和 1966 年以来 $M_L \geq 2.0$ 级地震。

燕山带的空间范围主要是根据历史强震的分布轮廓、本区的构造背景和仪器地震资料所勾画的微震活动的集中范围来圈定的。其大致范围在北纬 $39^\circ \sim 41^\circ$,东经 $114^\circ \sim 119^\circ$ 之间。图 1 是燕山带 $M_s \geq 6$ 级历史地震震中分布图,它勾画出燕山地震带空间范围的基本轮廓,其震中大致呈北西西、近东西方向展布。另外,根据时振梁等人的研究^②,燕山带的地震活动大体集中在蔚县—怀来、北京—平谷一带和唐山—滦县一带。这三个地区均处于燕山山脉南缘的断褶带或同一方向的山间盆地内,它们之

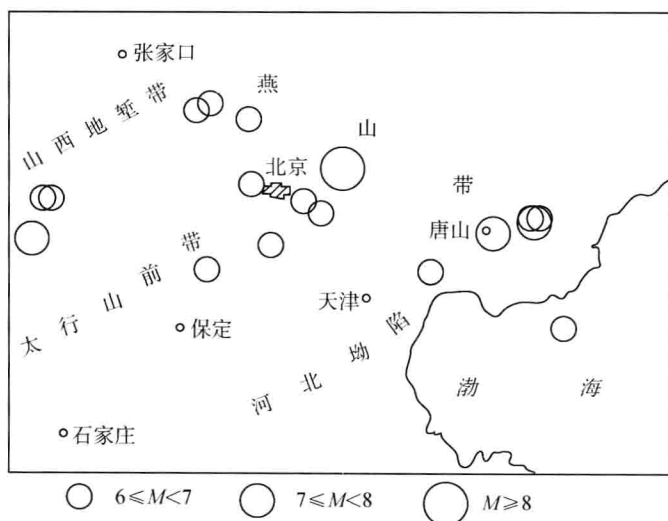


图 1 燕山带历史地震 $M_s \geq 6$ 级的震中分布图

① 本文原刊于《地震科学研究》,1981, No. 1, 31~34。作者:张国民,邱竞男,孙士铨,张秀臣。

② 国家地震局地球物理研究所二室,北京历史地震。

间相隔一定距离,展布成北西向燕山地震带。从地震地质的构造格局看,燕山带上述三个强震活动集中区,分别处于三条北东向构造与燕山山脉的交汇部分。因此我们在分析燕山带地震活动的震兆特点时,除了将燕山带作为一个整体来研究外,还往往分三个区来讨论地震活动的特点,即西区:蔚县—怀来地区,中区:北京—平谷地区,东区:唐山—滦县地区。

二、破坏性地震前的震兆特征

我们对上述地震资料做了如下处理:

(1) 将 $M_L \geq 4$ 级的地震按时间展开,做燕山带地震活动的 M_L-t 图和地震频度变化图,研究破坏性地震前后燕山带地震活动的时间变化特征。

(2) 做 $M_L \geq 4$ 级地震的时空分布图,研究燕山带地震活动空间分布随时间的转移,分析破坏性地震孕育和发生过程中地震活动空间分布的变化特点。

(3) 分区研究 1966 年有台网资料以来 $M_L \geq 2$ 级地震的频度,分析破坏性地震发生区域内地震活动的异常情况。

所得到的主要认识是:

(1) 燕山带破坏性地震发生前,全区 4 级以上地震明显增多。

图 2 分别给出燕山带 4 级以上地震的 M_L-t 图、季频度图和年频度季滑动曲线。从中可以看出,在 1967 年 7 月 28 日海坨山 5.5 级地震前,从 1964 年下半年至 1966 年上半年,4.0 级以上地震活动有近 2 年的增强和密集,在年频度滑动曲线上出现迅速上升的高值;在 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震前,4.0 级以上地震从 1972 年起明显增加,并延续到 1974 年底,在年频度的滑动曲线上呈现出延续 3 年多的高值。

大震前 4 级以上地震的增多主要集中在未来大震震中附近的地区,这从燕带 4 级地震的分区频度曲线可以看得很明显(图 3)。

(2) 在破坏性地震孕震过程中地震活动增强的背景上,强震发生前,4 级地震活动有一个平静的过程。

从图 2 可见,在海坨山 5.5 级和唐山 7.8 级地震前,在地震活动明显增强的背景上,发震前出现地震活动的突然平静,其平静时间为 1 至 1 年半。

因此在燕山带破坏性地震前,全区 4 级地震的活动似显示出“增强—平静—发震”的过程。

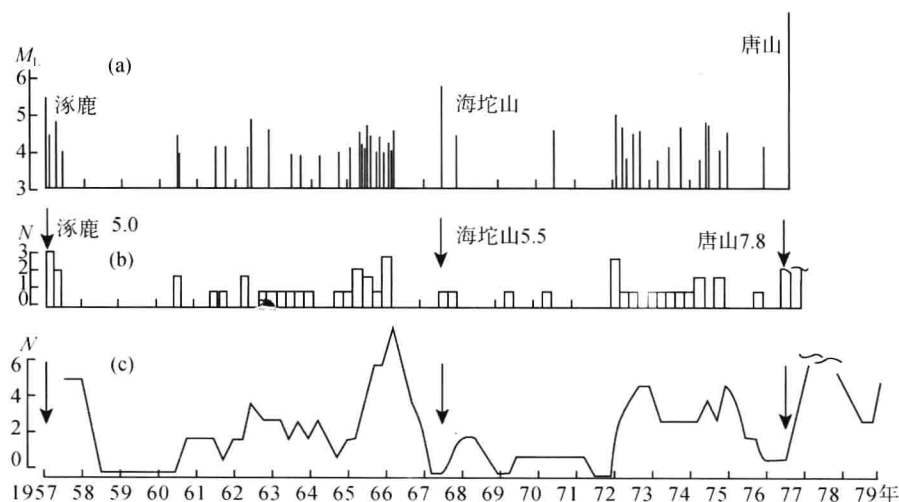


图 2 燕山带 $M_L \geq 4$ 级地震频度曲线

(a) M_L-t 图; (b) 季频度图; (c) 年频度季滑动曲线