

梅 世 蓉

地震科学研究论文选集

地震学、地震前兆与地震预报

地震出版社

梅 世 蓉

地震科学研究论文选集

地震学、地震前兆与地震预报

地震出版社

1993

(京) 新登字 095 号

内 容 提 要

本书是著者 40 多年来在地震科学领域研究的主要论文选集。全书包括论文 40 篇。约为 90 万字。论文中的大部分已分散发表在不同的学报、期刊、论文集，少部分是近几年完成的。

选集中论文归纳成八个部分：中国地震活动性；地震波、地球内部构造、地震参数测定与震源过程；唐山地震的深入研究；大陆地震的力学成因分类与预测途径；地震综合预报专家系统；中国地震前兆综合特征及其形成机理；孕育大地震的物理模式与中国地震活动性非均匀动力模式研究；俄、英文发表的部分论文。

本书可供地震预报、地球物理学、地球动力学等有关学科科技人员参考。

梅世蓉 地震科学研究论文选集

地震学、地震前兆与地震预报

责任编辑：宋治平 薛艳

责任校对：薛艳 宋治平

※

地震出版社出版、发行

北京民族学院南路 9 号

中国地质大学（北京）轻印厂印刷

※

787×1092 1/16 34.75 印张 890 千字

1993 年 4 月第一版 1993 年 4 月第一次印刷

印数 001—300

ISBN 7-5028-0904-X/P·560

(1297) 定价：27.80 元

目 录

前言	(1)
绪论	(3)
第一部分 地震活动性研究	
关于中国境内地震活动性的研究	萨瓦林斯基 梅世蓉 (15)
中国的地震活动性	梅世蓉 (20)
从华北地震活动的规则性看危险区划分的一个途径	梅世蓉 (39)
第二部分 地震波、地球内部构造、震源参数测定与震源过程研究	
$5^{\circ}-30^{\circ}$ 间 P、S 波及上地幔构造的研究	林邦慧 梅世蓉 (49)
震相 P_1 、 S_1 的特征	梅世蓉 (69)
中国东部沿海地区的面波特征及地壳构造的初步研究	梅世蓉 钱兆霞 (73)
PL 波的特性	梅世蓉 王碧泉 (74)
模拟震源动力学破裂过程的数值方法研究	余洋 梅世蓉 庄灿涛 (75)
唐山余震震源参数和衰减的联合反演	孙勇 郑斯华 梅世蓉 (86)
渤海及其邻区的地震层析成像	孙若味 赵燕来 梅世蓉 (98)
渤海地区地震参数的修定	赵燕来 孙若味 梅世蓉 (111)
第三部分 唐山地震的深入研究	
唐山地震的问题与启示	梅世蓉 (122)
唐山地震前兆的规则性与复杂性	梅世蓉 (143)
唐山地震前后的异常变化及强烈地震的预报问题 梅世蓉 张国民 张肇诚	(158)
从唐山地震的前兆特征看强地震的孕育过程及综合预报强震的初步探讨 梅世蓉	(196)
唐山地震前兆机理的数值模拟	梅世蓉 梁北援 朱岳清 (202)
唐山地震孕震过程的数值模拟	梅世蓉 梁北援 (210)
唐山地震的孕震环境、孕震过程与前兆机理的研究 梅世蓉 朱岳清 梁北援	(218)
第四部分 大陆地震的力学成因分类与预测途径探索	
地震前兆的地区性	梅世蓉 (228)
浅论唐山地震、松潘地震的共性	梅世蓉 (235)
我国大陆地区两类地震的前兆特征、发生机理与预报途径的探讨 梅世蓉	(242)
中国大陆地震的短临前兆	梅世蓉 (262)

中国大陆强震的预报问题	梅世蓉	(275)
第五部分 地震综合预报专家系统		
建立地震综合预报专家系统的必要性与可能性	梅世蓉	(285)
论地震综合预报专家系统(ESCEP)技术思路的理论依据与综合原则	梅世蓉	(288)
第六部分 中国地震前兆的综合特征及其形成机理		
中国大陆地震前兆的规则性与复杂性	梅世蓉	(301)
中国大陆地震前兆综合特征的物理机制	梅世蓉	(328)
地震活动图象物理机制的实验研究	梅世蓉 许昭永	(363)
真三轴压机刚度对岩石破裂声发射的影响及与地震活动性的联系	许昭永 梅世蓉	(370)
第七部分 孕育大地震的物理模式与中国地震活动性非均匀动力模式研究		
唐山地震孕育模式研究的科学思路与结果	梅世蓉 朱岳清	(381)
渤海及其邻区三维速度结构与地震活动性的关系	梅世蓉 赵燕来 孙若味	(391)
渤海及其邻区构造应力场的数值模拟和它的地震学意义	梅世蓉 车时	(412)
我国现代构造应力场方向与大小的数值模拟及其与地震活动的关系	梅世蓉 车时	(428)
 О Сейсмической Активности Китая	Мэй Широнг-Юн	(448)
On two new seismic phases P_1 and S_1	S.R.Mei	(465)
Short-term and immediate precursors to continental earthquakes in China	Mei Shirong	(470)
On the variety and complexity of the short-term and urgent precursors of the Tangshan earthquake	Mei Shirong	(492)
The precursory complexity and regularity of the Tangshan earthquake	S.R.Mei	(510)
Regionalism of earthquake precursors	Mei Shirong	(530)
Numerical simulation of the precursory mechanism of the 1976 Tangshan earthquake	Mei Shirong et al.	(539)
 论文索引		(549)

前 言

我从事地震科学研究已 40 年有余,环绕地震区划与地震预报任务进行了长期工作。迄今已发表论文百余篇;完成科学著作五部,有的已公开出版发行,有的即将出版,它们是:《一九七六年唐山地震》(地震出版社,1982);《地震综合预报专家系统》(地震出版社,1991);《唐山地震孕育模式研究》(地震出版社,1992);《中国地震预报概论》(地震出版社,1993)和本书。

已出版的几部著作或为集体创作,或与别人合著,它们不能完整地、充分地反映笔者的成果和思想。许多同志建议和希望我能尽快将多年来在实践中积累的经验、体会和研究成果系统地整理出版。我决定先将那些分散发表在各类期刊、论文集,不便查阅的文章集中起来,再加上部分早已脱稿,尚未发表的某些成果,组成一个以我的思想体系贯穿始终的论文选集,以饷读者。本书即为这一努力的结果。

这本文集共选人 40 篇论文,分成八个部分:中国地震活动性研究;地震波、地球内部构造、震源参数测定与震源过程研究;唐山地震的深入研究;大陆地震的力学成因分类与预测途径探索;地震综合预报专家系统;中国地震前兆综合特征及其形成机理;孕育大地震的物理模式及中国地震活动性非均匀动力模式研究;俄文、英文发表的部分论文。这些部分实际上反映了作者的主要研究领域。由于长期工作在地震监测预报工作的第一线,实践中提出的问题是多方面的,所以研究工作不得不涉及较宽的范围。七个方面的研究深度自然是不一样的。早年以地震活动性研究为主。邢台大地震后至今一直环绕地震预测、预报有关的问题开展了一系列的实用与理论研究。唐山地震前后侧重于地震前兆特征与地震预报方法研究。近十几年来转向大陆地震的孕震过程及前兆机理;孕震模式研究;我国地震活动的动力成因等基础性问题的研究。本论文集是这七个方面的系列研究成果。

在研究过程中逐步形成了两条明确的思路,一条是:从地震活动性的时空强分布规律出发,进而联系全国地壳、上地幔构造的区域特点及板块边界作用力的分段差异与边界作用的微变化,研究中国地震活动时空分布和变化的动力成因,在此基础上,寻找全国地震形势的物理预测途径。另一条思路是:通过典型地震(如唐山大地震)的透彻研究,了解大地震的形成条件(孕震区内外)和经历的过程,以及各阶段的伴生现象和派生现象;再通过全国各类地震前兆综合特征的分析与形成机理的实验、理论研究,寻找大地震三要素的物理预测途径和方法。最终的奋斗目标是:建立场源统一观下的强烈地震预报模式。

按照以上思路,已经进行了一系列研究,所得结果表明:沿着这两条路有希望达到预定目标,读者从本书将具体看到这两个思路的形成过程和根据。但是著者已年逾花甲,不知自己还能工作多长时间,能否达到目标是没有把握的。因此,愿将自己这方面主要研究成果和某些需要许多同行共同奋斗才能实现的科学思想奉献给广大读者,奉献给那些积极投入“八五”攻关研究的人员,奉献给那些热心地震预报事业,热爱地震科学研究的人们,愿他们能站在我们的肩膀上攀登地震科学的新高峰!这是出版本书的主要目的。

作者将一如既往地探索下去,希望能在有生之年做出一些更有价值的成果,留给人

民。现在，先以系统的方式将已取得的部分成果整理出版，供读者参考。由于时间仓促，对大部分已发表的文章均按原件翻印（文章出处请参阅书末的文献索引），全书未进行统一的文字编排和技术处理，敬请读者见谅。

梅世蓉

1993.1.20

绪 论

探索地震预报有两条基本的道路：一条是以理论为出发点，即从一定的理论前提出发，找出一个地震发生的模式，并由此推导可能发生的前兆和各种前兆之间的关系。另一条路则以实践为出发点，即从大量观测现象中总结、归纳、提炼前兆，然后上升为理论，在理论指导下进行再实践，遵循实践—认识—实践的道路。无论是那一条路都离不开理论联系实际的原则。我国地震预报走的是后一条道路。作者的研究自然离不开这个大环境，也以实践为出发点。但是，唐山地震以后，特别是80年代以来，人们都认识到要提高地震预报科学水平，必须从经验预报向物理预报过渡。因此，著者的研究工作重点转向地震学和地震预报有关的基础性研究，致力于地震预报科学途径的探索。

本书虽然包括了40年来的主要科研成果，但早期论文为数不多。书中反映的主要是80年代以来的研究成果。但是，任何人的思想都有一个历史的发展过程，作者的科学思想来源很久。从地震空区概念发展为固体孕震模式；从地震活动时空不均匀性，走向非均匀介质的非均匀动力作用模式的探索，经历了30多年的漫长岁月。从以下的概述中读者将清楚地看到这一点。

本论文选集包括了不同时期的代表性论文，反映出一个由浅入深的发展过程，但有一个总的思想体系贯穿其中。为了帮助读者把握本书的要领，理解各部分间的内在联系，下面对各部分的重点，特别是笔者的思想加以说明。

一、 中国地震活动性

这部分涉及历史地震参数的测定方法，地震活动的基本特性，大震前的异常活动图象，其主要内容大致有三方面：

1. 测定历史地震震源深度与震级的方法

深度与震级是每个地震最基本的参数，如何测定历史地震的这两个参数是早期研究中国地震活动性面临的主要问题之一。历史地震资料中只有破坏与有感情况的记载，所以解决这个问题只能从宏观资料中寻找答案。为此，著者首先利用地震等震线发展了一种测定震源深度的方法，然后又利用当时能得到的几乎全部资料，求出震中烈度 (I)、震级 (M) 与震源深度 (h) 的关系式：

$$M = \frac{2}{3} I + \frac{4}{5} \lg(h) - \frac{1}{2}$$

然后，利用这个关系式，先由等震线求出深度 (h)，而后根据历史资料给定的震中烈度 (I)，应用上式可求出震级 (M)。各国历史地震震级大体都是这样确定的，不同之处在于系数。笔者于1959年得出的上述公式是国内广泛使用的基本公式之一。它是研究中国地震活动性不可缺少的基础。

2. 中国地震活动性的全面研究

地震活动性研究历来是各国地震学中的基本问题。60年代以前，国内尚无专文论述。作者1960年发表的《中国的地震活动性》是第一篇专题论文。文中应用当时国际上较为先进的定量指标和方法，从空间分布、时间演变、重复性、应变释放等方面进行全面研究，揭示出地震活动的若干基本规律，如空间分布上的地区性、时间演变上的周期性、各地区重复性的差异性等。空间上的地区性主要表现在全国六大地震区的活动频度、强度存在很大的差别。时间演变上的周期性主要表现在各大区地震活动性存在时强时弱的起伏交替性，其时间尺度多为数百年（300—400年）。从全国地震活动性分析中还进一步看出更长周期存在的可能，文中曾指出：“中国的构造地震过程可能具有周期性，周期约千年。”在地震重复性方面各大区的差别也很大，当时已注意到大陆地区的西南具有最大的重复性，而华北、西北的重复性则较低，尽管地震强度大。在地震发生时间的季节性上曾提出：“强震之最大频度出现在三、四月，八、九月，在冬季频度小。”以上这些观点都为后来的大量事实和进一步研究所证实。

还应指出的是，从8级大震前后地震活动时空分布特征中，最早发现了两个十分重要的现象：①一切毁灭性地震（即大于等于8级地震）都不发生在有感地震（ $M > 3.5$ ）频度高的方块内，而是在其间或其附近；②1679年三河—平谷8级大震和1668年山东郯城8.5级地震前都出现有感地震频度增高，震后频度减小现象。这就是后来逐步发展，逐渐为人们认识和强调的“震前平静”和地震空区（今天测震学预报地震的重要指标）思想萌芽。

3. 地震空区的概念与意义

1970年通过研究大华北60多个6级以上地震前的活动特征后，明确提出：强震活动在空间上具有成带性、重复性、填充性；强震活动在时间上具有高潮期与低潮期的交替性；强震发生时，地震活动显示出一定的反常性：即在强地震前若干年，通常出现不同强度地震环绕大震震中分布的特殊状态，形成地震包围的“空白区”，空区内活动性很低，空区外活动性很高；大震前，空区外大面积内活动度普遍增高，并随时间起伏变化，大震有时发生在活动峰值之后的减小段内，震前数月或数年，有时在空区内出现个别活动或沿构造线相继发生小地震，大震前高活动区内地震分布是不均匀集中（震堆、震丛），有时大地震即位于几个集中分布区中间或靠近某个集中区。

根据以上认识，首先提出利用空区进行地震中长期预报的原则和方法：

(1) 凡处于高潮期的活动带或个别地段，其地震强度较大、频度较高，因而危险性也较大；处于低潮期的活动带或个别地段，其地震强度较小，因而危险性也较小。

(2) 在确定强震活动带上哪些地区可能发生强震时，不能一般地使用重复性原则，必须充分考虑大地震的发生具有填充性，因而对那些过去尚未发生过大地震，但介于强震震中中间，又具有发生大地震地质条件的地区应给予足够的注意。

(3) 具有发生强震条件的地区，若被不同强度地震所包围，形成一个反常高活动区包围的空白区或弱震区，区外出现地震的非均匀分布，活动度起伏变化，并出现峰值之后开始减小；区内出现个别活动等等特征时，则大地震的发生已为期不远（10年内）。

应用这些原则、方法于华北，对未来十年（1970—1979）的强震危险区作了预测，圈出了四个危险区，1975年海城地震与1976年唐山地震正好发生在其中的两个。实践表明：地震空区对地震中长期预报具有一定的效能。这个方法提出后，在国内引起了很大的

兴趣和关注，推动了这个领域的研究工作，并在编制中国第二代、第三代地震烈度区划图中广泛被使用，当然，在运用中有很大的发展。

二、地震波、地球内部构造和震源参数测定与震源过程

这部分包括八篇论文，最主要的是四篇，一篇是：“ $5^{\circ}-30^{\circ}$ 间的 P、S 波及地幔构造”。该文根据 37 个不同深度地震 P、S 波特征的研究，发现我国东部地区的 P、S 波存在着明显的地区差异，这些差异可能与地幔构造的差异性直接有关；并发现地幔低速层存在的多种证据及低速层特性的地区差异。此外，还对地幔中二个间断面存在可能性进行了讨论。这是我国利用天然地震波研究上地幔构造较早的论文。

另一篇论文是：“渤海地区地震环境、成因与地震趋势”科学基金课题中的部分成果，即“渤海及其邻近的层析成像”，运用 CT 技术对渤海及邻区三维速度结构与震源参数进行联合反演，得到了该地区地壳、上地幔速度结构的新信息。结果表明：①渤海湾内地壳薄，是莫霍面上隆的中心；②渤张断裂由几段相接而成；③该区岩石层厚度变化明显，渤海内为 110km，燕山地区大于 180km，渤海地区上地幔盖层速度是研究区内最高的，最大值为 8.45km/s ，其岩石成分是高密度物质，这是该区呈现高重力异常的原因。④渤海内庙岛西部中地壳有一个近似圆状的低速体，渤海内部强震以及近期地震沿其周边展布，那里是高低速块体的交界部位。利用反演结果还进行了地震活动性与三维速度结构的关系研究，三维速度结构与区域应力、应变场分布关系的研究。

在以上工作基础上，参予发展了一种横向不均匀介质中地震参数的修定方法。该方法以上述地壳上地幔结构的最新成果为基础构造速度模型，集中利用渤海周边山东、河北、北京、辽宁台网资料，统一修定了近年来渤海及邻区地震的震源参数。研究结果表明：唐山地区深度大于 20km 的地震很少，而渤海内大于 20km 的地震占相当比例，甚至超过 30km 的地震也不是个别的。这个结果对认识渤海地震成因具有重要意义。

1986 年与他人合作研究了震源动力学破裂过程，提出了一种求解剪切裂纹动力扩展问题的有限元差分方法。在研究二维反平面破裂的基础上，把所用的方法推广到三维问题。研究了许多简单震源模型。通过对比同一问题的解析解和其它数值解，对方法的正确性和计算精度进行了检验，结果表明我们的数值方法是可行的。最后，作为初步应用例子，研究了非均匀断层的自发破裂问题。应用计算中拟定了五种模型，例如，模型 A 中断层上没有障碍分布，强度是均匀的。破裂开始后，裂纹尖端向右传播，并很快加速到横波速度的极限破裂速度，破裂点的轨迹是连续的，断层上位移分布很简单。模型 B 是有一个强障碍体分布的断层，破裂开始传播时很规则，与 A 的情形相同，一旦到达障碍所在点，由于断层强度高而不发生破裂，破裂前沿在障碍体以外继续传播，在整个断层破裂之后，没有破裂的障碍才发生破裂。

三、唐山地震的深入研究

唐山地震是板内地震的一个重要典型，作者对它进行了多方面的研究，发表论文不下 25 篇，取得了许多重要结果。

1. 全面、系统地总结研究了唐山地震大震前后的各类观测资料与预报实践中的经验教训，明确地提出了十点启示与问题，重点剖析了唐山地震五个方面的复杂性及其可能的成因。在此基础上，特别强调了从复杂性中探索强震预报途径，以及进行综合预报的必要性。

2. 详细地分析了唐山地震的规则性与复杂性，论述了如何利用这些规则性进行地震综合预报的方法，研究了唐山地震前兆复杂性产生的原因，提出岩石膨胀、断层蠕滑、物质迁移三个因素的联合作用是规则性与复杂性产生的主要原因。进而应用有限元法进行数值模拟。计算中选择马克斯威尔体作为介质模型，开展了这些因素作用下的应力、应变场计算，并与实际资料进行对比，从理论上解释了唐山大地震前所出现的几个主要中长期异常的综合特征。

3. 详细地分析了唐山地震序列的复杂性及其可能的成因，进而应用有限元方法进行三维计算。考虑到问题的过度复杂，先以弹性体作为介质模型，尽量运用已有的地球物理资料，针对唐山地区的地壳、上地幔的结构与受力状态，计算应力、应变场。取得了与实际资料符合甚好的结果。据此提出：震源区内外纵向、横向的复杂结构及水平构造力与局部垂直力的联合作用是唐山地震序列复杂性产生的原因。

4. 根据上述理论研究结果，对唐山地震的形成条件与孕育，提出了“上地幔隆起孕育模式”和“坚固体孕震模式”。前者是孕育大地震的环境条件，后者是孕育大地震的震源体条件。近年来，又应用 CT 技术重点研究了唐山及其邻近地区的三维速度结构，并与地震活动分布进行对比，发现这一地区的强震无例外地分布在上地幔隆起区及地壳高速体内，或高速体与低速体的交界地区。这个结果为以上模式提供了实在的地球物理证据。

5. 在以上理论研究基础上，提出了六点对实践具有指导意义的物理预报线索：

(1) 地震危险区的判据是：具有较周围介质更高的弹性系数与粘性系数；具有应变梯度大与应力、应变随时间增加的力学特征；一般处在地形变梯度大，且冷热不均的地带。

(2) 强震危险区内的弹性应变能积累到后期，应力不再增加（实际可能减小），应变加速，出现应力、应变随时间的异常变化（正常情况下，应力、应变一起随时间增加）。这是强震孕育的长期指标。

(3) 如果强震孕育区内出现趋势异常增多、增强的总趋势，这是地震孕育进入中期阶段的指标。

(4) 趋势异常相对集中区与剪应力、剪应变变化区大体相当。

(5) 地震高潮期强震连发的决定因素是同期孕育多个强震，某个强震发生后，其余强震孕育区是否接着发生地震，及发震时间、地点与强度均取决于孕震区的自身条件，主要不是强震间的相互影响。

(6) 如果强震孕育区内，既存在上地幔隆起，又有物性与构造上的横向、竖向不均匀性存在，除了板块推挤的基本水平力作用外，还有垂直向上的局部力源，则在不均匀力系作用下，具有结构与物性不均匀的孕震体有可能形成复杂的强震序列。

四、 中国地震的力学成因分类与预测途径

为了弄清唐山地震研究结果具有多大的普遍性，能否应用到国内其他地区，为此，将

唐山地震与海城、松潘、炉霍、通海等前兆资料进行了对比研究，得出以下认识：

1. 地震前兆具有地区性

从国内外典型震例资料的对比中，指出板内地震、板缘地震、转换断层上的地震，其前兆具有很大的差异。进而根据我国强震前兆显示的总体特征，提出两类地震（断错型地震与走滑型地震）的存在。断错型地震一般发生在断块内部或断裂带汇而不交的部位，其前兆种类较多，分布较广，持续时间较长，而走滑型地震多发生在走滑断裂带上，其前兆种类较少，分布范围较小，持续时间较短。然后对这些差异产生的根源进行了定性分析，指出：差异的根源在于震源的力学性质不同，孕震环境不同。断错型地震中包含了新断层的形成，故孕育时间较长。走滑型地震为锁住断层的重新活动，故孕育时间较短，涉及面较小，其前兆种类较少，持续时间较短，分布范围较小。

2. 两类地震前兆差异具有丰富的内涵

以上所述的差异是笼统的概括，预测中难以掌握。为了探寻两类地震的具体差异，以便有针对性地寻找相应的预报方法。后来又继续研究了1966—1976年8组强震。从构造背景、大地测量、台网观测到的前兆异常与宏观异常，分析研究他们的异同，结合实验、理论研究成果，讨论两类地震的共性与特性产生的基础。取得了以下几点结果：

(1) 强震前在未来震中周围一定范围内都有地震活动的增强—腾空—发震现象存在。对于断错型地震其增强的表现形式为震群、震丛包围的空区。而走滑型地震前，活动性的增强则为顺着活动大断裂的条带分布或在断层端部，腾空表现为断层上的空段。

(2) 断错型地震前地形变异常区位于发震构造带内，与未来震中十分接近，而走滑型地震前的地形变异常区可能位于震中区外活动断裂的端部。

(3) 断错型地震前中小地震增强范围离震中300km左右，其活动性随时间起伏增长，在此区内观测到多项前兆异常，持续时间从数年至数月不等，震前数月外围地区台站趋势异常显示出恢复性转折。与此同期，中小地震收缩成条带，震中区内多表现为平静。走滑型地震前出现异常的范围与持续时间比同级断错型地震要小。

(4) 断错型地震前几天至十几天出现多种突发性异常，其形态多样、复杂，变化显著。临震前震中区的宏观异常突出。走滑型地震的临震异常范围小，种类少，变化不及断错型地震明显。两类地震的最大差异主要表现在短期、临震阶段。这点非常重要。

3. 两类地震的形成与发生具有不同的机制

在总结两类地震的共性与特性基础上，进而运用国内外实验与理论研究成果，对它们产生的物理机制提出了解释。将岩石形变当作地壳形变的一种比例模型，微破裂相当于微小地震。将三轴压缩下产生的主干破裂类比为断错型地震，摩擦滑动实验中的粘滑类比为走滑型地震。实验结果表明：低应力下的活动性是混乱的，不久活动性便降低到很低的水平。在应力大约接近破裂应力一半时，微破裂开始再度出现，并且稳定增加，直到临破裂前活动性迅速增加。这个图象和应力、应变特性紧密相关。低应力下微破裂活动开始发生的区域应力应变曲线是非线性的，且向上弯曲。在应力较高一些时，微破裂很低，岩石接近线弹性，而微破裂活动的再度增高与应力应变曲线的非线性部分相对应。不同岩石之间的特性仅有一个重要的区别，就是在低应力区和超过 $1/2$ 破裂强度时微破裂活动水平不同。在低应力区测到的微破裂水平与岩石的孔隙度成比例，大于 $1/2$ 破裂强度时的微破裂水平增加是岩石膨胀造成的结果。由此可见，膨胀现象是压缩条件下主干破裂前的基本

性质。根据微破裂与微小地震的可比性，应当预期大地震以前既应观测到地震活动性的增加，也应观测到膨胀效应，如地形变异常、波速异常等。

尽管膨胀是大破裂前的必然过程之一，但是它本身不能直接引起失稳，还要经过微破裂的丛集发展。当岩石处于其极限强度百分之几时，岩石中要出现微破裂的丛集发展。丛集区内微裂密度比背景裂隙大得多。由此可见，微破裂丛集才是导致失稳的直接原因。因此，大震前，在震中附近地区出现地震丛、地震群增多现象是由孕震物理过程所决定的必然现象。

以上论述仅适用于断错型地震，至于走滑型地震，必须借助于摩擦滑动的实验结果。国内外的实验研究均表明：当应力增加时，起初没有微破裂事件发生，说明断层表面锁住了，没有粘滑发生。当应力继续增加后，在粘滑之前的某一点，微破裂突然增加，直到粘滑发生。粘滑前出现微破裂活动的时段与应力-位移曲线上不大的非线性部分完全相应。正是因为非线性部分较短，微破裂事件很少，所以主破裂的前兆也很少、很小，持续时间很短。

4. 探索两类地震预报应有不同的途径

两类地震的前兆具有不同的数量、幅度、持续时间、分布范围、时空变化，服从不同的规律，预报的难点也不甚相同。走滑型地震预报的困难在于前兆信息少而弱，断错型地震的困难在于前兆的复杂性与多样性。因此，探索两类地震的预报途径应有不同的思路。

既然，走滑型地震一般发生在巨大的活动断裂带上的锁住段，没有持续时间很长、分布范围很广的地震前兆，为了寻找这类地震的预报途径，必须在较小的范围内布设较密的、高精度微震与形变测量，尤其是跨断层的水平、垂直形变测量。根据这些测量结果，可以找出哪里是活动段，哪里是闭锁段，以及应变的积累程度。

至于断错型地震，由于其前兆具有长、多、广的特点，与此相应的观测就应当是长时间、大范围的综合观测，包括孕震区内的观测与大范围的地球物理观测与地球化学观测。二者相辅相成。孕震区内的近场观测是为了取得将来进行地震三要素预报所必需的资料，而孕震区外的观测则是适应我国断错型地震前兆广泛分布和多变的特点。这类台网的任务是监测全国地球物理场动态，了解其正常变化规律，为识别异常奠定基础。

五、地震综合预报专家系统 (ESCEP)

为了将许多专家知识，特别是地震预报专家的知识集中起来，在地震预报实践中充分发挥作用；为了以统一规范描述、检验和应用分散专家的预报知识、判据、指标，克服以往地震综合预报或多或少存在的分散性、不稳定性 and 主观性等缺陷，提高综合预报的系统性、稳定性和科学性，1986--1989年我们研制了地震综合预报专家系统。该系统经过专家鉴定后，在国内外推广使用，近几年来在预报实践中取得了较好的效果。

地震综合预报专家系统以地震综合预报领域的最新专家知识为基础，以电子计算机为工具，应用扩展的不精确推理方法进行推理，采用风险决策策略，实现中强以上地震的长、中、短临预报，是一个计算机综合预报系统，一个模块式组合的智能化软件系统，一个可扩充易移植的电子计算机专家系统。

人工智能专家系统具有很大的潜力。它可以汇集各种来源的知识，使之系统化，形式

化,使专家知识不受时空限制;可不受周围环境的影响而持续稳定地完成复杂问题的求解任务;可避免技术偏见和处理问题的主观性与波动性,从而提高解答的客观性、科学性和稳定性;通过学习功能,能在一定程度上自动深化、扩充和发展其领域知识;一般说来,在总结与综合了多个专家知识经验后构成的专家系统,只要综合决策策略恰当,专家系统的水平将超过单个专家的水平。专家系统能否充分发挥出以上潜力,其关键是:正确地总结多个专家的经验 and 知识,拟定恰当的综合决策原则。

为了建立地震综合预报专家系统,首先需要将分散的、不成体系的专家知识进行全面总结,去粗取精,去伪存真,使之系统化,组成一个专家知识的完整体系。ESCEP所依据的知识绝非少数专家的见解,而是许多专家知识的集中。在ESCEP的知识库中,包括领域的常识性知识和启发式知识,前者是领域内的公认知识,后者是领域内专家多年工作实践中得到的知识。

在此项研究中,作者参加并领导专家组研究推进了地震预报知识的系统化、理论化。从力学角度指出:孕震区是震源体与周围介质组成的一个力学系统,一个非线性的动力系统。在构造力作用下经过长期的演变,由准线性演变为非线性的复杂过程。在这个系统的不同点上变形过程或裂纹扩展过程是不一样的,即变形与裂纹演变的空间图形是复杂的。任何点的变化都带有随机性,唯有系统的整体变化才有必然性和确定性,对系统的发展趋势预测具有意义。

因此,只有对震源及其周围介质足以导致岩石发生突然断裂的各种因素、条件进行综合研究,对震源区内外地震、应变、应力场及地磁、地电、重力场、水文地质、水文地球化学场的动态变化进行综合分析,才能逐步判定震源区,逐步判断其大小和发震时间。这就是我的动态变化进行综合分析,才能逐步判定震源区,逐步判断其大小和发震时间。这就是我们所说的“综合分析,逐步逼近”的地震预报战略思想。

“综合分析,逐步逼近”包含丰富的内涵,体现在综合预报的若干原则之中,并通过一系列综合预报方法来实现。根据目前对地震成因、孕震过程、前兆机理、地震活动规律的认识及地震预报实践,作者提出了四条基本原则:①层次分析与尺度对应原则;②统一分析与场源结合原则;③阶段预报与前兆组合关系对应原则;④临震阶段的多源外因显著响应判定原则。

根据这些原则的再研究,组成了地震综合预报专家知识的层次结构。

六、中国地震前兆的综合特征及其形成机理

我国地震预报从实践中产生,走的是一条经验预报道路,即从实际震例出发,总结经验,提取预报指标、判据和发展预报方法,沿着这条路取得了海城、松潘等地震预报的部分成功。然而预报不成功的震例更多,唐山大地震就是一例。这表明经验预报的能力是有限的。所以必须在继续提高经验预报的同时,将物理预报(成模式预报)探索提上日程。这是笔者通过十几年预报实践形成的明确观点,也是积极呼吁加强的课题。

近几年作者身体力行,为了推进物理预报探索做了很大努力,并取得一些结果,主要从三方面进行了探索:

(1)以唐山地震为典型,开展数值模拟,取得的结果已如前述。

(2) 开展多震例、多学科前兆的综合分析，寻找我国地震前兆的基本特征，研究形成这些特征的基本物理过程。

(3) 针对重复性较强的前兆，进行岩石破裂实验研究。

本部分所述内容就是沿着第二、第三条所取得的成果。

1. 总结研究了大陆地震的基本特征，提出了前兆的成因分类

将地震前兆的分学科研究（测震学、大地形变、地磁、地电、重力、水位、水化等）与分地震研究结合起来，提出了八个基本特征和四个基本问题。

八个基本特征是：地震前兆的普遍性与多样性；地震前兆的持续性与阶段性；前兆分布的集中性与非均匀性；趋势异常的稳定性与短临前兆的多变性；地震前兆的时空转移性；前兆特征量与震级、震中距的关联性；短临前兆与外因的相关性；前兆机理的统一性与多源性。

四个基本问题是：异常与地震关系的不确定性问题；同一地区不同时期的地震，其地震前兆是否重复的问题；不同地区、不同类型地震前兆的差异性问题；地震前兆与后效如何分辨的问题。

地震前兆的成因研究得出以下四类：

I类前兆称为力学前兆，它是应力、应变在局部地区集中的直接产物，包括地震活动性前兆、地壳形变前兆、声发射等。

II类前兆称为物理前兆，它是应力、应变在局部地区集中引起的物理效应，其大小与分布不仅取决于应力、应变的大小，并且取决于集中区内地壳电性、磁性、密度大小与分布，包括地电前兆、地磁前兆、重力前兆等。

III类前兆称为水文地球化学前兆，它也是应力、应变在局部地区集中引起的效应，其大小与分布不仅取决于应力、应变的大小，并且取决于应力集中区内的水文地质与水文地球化学条件。

IV类前兆称为触发前兆，它是应力、应变高度集中后，局部地区进入不稳定状态时，在微小的内外因素作用下的产物，与外因关系十分密切。

2. 提出了大地震孕育中有基本物理过程存在的可能

尽管地震前兆存在地区性，不同地区的地震从细节看千差万别，但是上述基本特征的存在说明，在大地震的孕育过程中有一些基本的物理过程在起支配作用，有一些基本的物理参量在控制着地震是否发生以及如何发生。非均匀介质中是否存在纵向、横向的非均匀性，是否存在规模较大的坚固体（高速体），这是强震孕育的关键，只有在这个条件存在的情况下，应力、应变才会向它集中，为大地震的发生提供充足的能量。能量在局部地区逐步积累的过程中，必然造成微破裂的大小和数量的变化，并为地壳乃至上地幔物质交流提供通道，结果引起上地幔与地壳结构、物性与状态的微变化，所有这些变化就是各类地震前兆产生的物理基础，给一定空间范围的地震活动场、地球物理场、地球化学场、水文地质状态带来种种异乎寻常的变化。

按照以上所述的基本过程，决定地震前兆的物理因素是应力应变值的大小和分布。因此，物理预报的探索内容应当至少包括三大方面：第一是研究局部地区的应力应变值的大小和分布与区域构造的关系，与板块边界上作用力的大小和分布的关系；第二是研究局部地区应力应变积累的物理效应和化学效应，研究应力应变变化与地震活动性参数变化的关

系；与地倾斜变化的关系；与地磁、地电、重力、水位、水化变化的关系；第三，应逐步建立各种地球物理参数的变化量与应力应变变化量的函数关系。这一系列的研究当然不是短期内所能完成的。

3. 对地震前兆部分综合特征形成机理给出一些解释

作者从国内外的有关实验与理论研究中发现了一些有助于解释前兆综合特征的结果，并加以发展。应用岩石变形的阶段性，解释地震前兆的阶段性；应用岩石变形及破裂的分区性解释地震前兆的空间分布；应用岩石变形局部化解释近源地震前兆场的动态变化；应用外因在短临阶段的特殊作用，解释触发前兆的发生机理；应用断层的亚临界扩展的理论计算结果解释了地震前兆在时空上的扩展性。

另外，还利用激光全息法所得的实验结果与地震前兆进行对比分析，从中得到几点重要认识：

(1) 变形局部化是岩石从受压到破裂过程中，在达到一个临界变形水平后出现的普遍现象，是分析、理解地震前兆时空演变的关键和基础。

(2) 变形局部化的演变过程决定于以下诸因素：岩样是否完整；裂纹的长度与方向；裂纹的排列与组合方式（雁列式或其他形式）；雁列式中的旋向列向是否相同等。这些因素既会影响到岩体的整体变形过程，也会影响到岩体内部变形场的时空演变，以及张裂纹、剪裂纹及最后的宏观破裂的演变图象。地震前兆场时空演变上的复杂性看来正是受这些因素所控制。

(3) 变形局部化剧烈变化的时段都在临破前不太长的时间，尤其是峰值应力前后，地震短临前兆受变形局部化控制出现此起彼伏及空间转移现象，尽管不同构造体系的转移细节存在一定差异，但在短临阶段，先以张裂缝向轴向方向扩展为主，随后又被反方向的剪裂缝过程所代替，主破裂前以剪切破裂及加速蠕滑为主，对各种（已经研究的几种）岩样构造则是共同的。由此可作出合理的推测，震源区内及其附近有些观测点上的前兆要出现突变—恢复，而有些点则出现突变加速，后者有可能位于终破断层上。从以往震例资料中已经得到一些这样的结果。

4. 进行了地震活动图象物理机制的实验研究

地震活动图象异常是地震前兆中的最重要的一类，异常现象包括地震活动性的增强、平静、前震、前兆震群、地震空区、条带、波速、波谱、震源机制异常等等，不下数十种之多。在这些现象中究竟哪些与震源有直接关系，对地震预报有决定意义？至今仍不清楚。为了弄清这个问题，必须研究地震活动图象的物理机制。

由于现象很多，不可能同时研究许多问题，不得不从众多现象中挑出那些重复性较强的现象作为研究对象。地震活动在时间序列方面不同尺度、不同表现形式的起伏变化（增强与减弱或密集—平静现象）；在空间分布上的条带、空区；大小地震的比例系数（ b 值）异常是比较常见的现象。我们就将它们作为首批实验研究的对象。

为了研究时间序列方面的问题，应用了云南省地震局研制的真三轴压机设备，进行破裂实验，研究了岩石声发射与岩石结构、性质及压机刚度的关系，并与天然地震活动情况进行类比分析。

按照作者提出的两类地震力学性质，设计了三种岩样进行试验研究：A.完全切通或大部切通岩样，以模拟老断层的新滑动所产生的走滑型地震。母岩用大理岩或砂岩，切口

以环氧树脂胶结。B.取完整大理岩和花岗岩以模拟块体内形成新断层所产生的断错型地震。C.含弱障碍体和坚固障碍体的拼合岩样，以及含天然石英夹层的砂岩岩样，以模拟复杂条件下产生的地震。

研究表明：通过改变岩样的性质和结构，得出了岩石主破裂前在形态上与地震活动频度起伏变化相似的声发射频度变化特征，这说明孕震体的完整性与均匀性是否存在，对震前地震活动的变化影响很大，新断部分越多，新断部分岩样越坚固，则震前频度升高现象越明显。对老新层的新滑动所产生的地震而言，断层带内物质越弱，震前小震频度下降现象越明显。可见，不同的孕震体内产生的地震，其频度随时间的变化特征是不同的。模拟实验得到的另一个有意义的结果是：岩石刚度及压机刚度对岩石破裂方式、声发射变化形式及岩石断裂前声发射平静时间的长短有重要影响。为了研究这个影响，引入岩石特征刚度及其与压机刚度比 R 值的概念。结果表明：当 R 值大于 0.2 时，岩样发生突然破裂；当 R 值小于 0.2 时，岩样发生缓裂。突发新裂时，声发射随时间的变化形式为峰值—平稳低值—上升至极大值（密集）—下降至极小值（平静）—再升—破裂。这种图形与一些 8 级大地震前长时间尺度的地震活动度变化很相似。主破裂前的声发射出现的密集—平静—再升—破裂与大地震前常出现的密集—平静—预震—大震图象也很相似。近些年来学术界在讨论破裂的自相似问题。我们实验中观测到的这些结果看来不是偶然的。

七、孕育大地震的物理模式及中国地震活动性不均匀动力模式研究

1. 孕育大地震的物理模式研究

对于大地震孕育的物理模式问题，作者从 70 年代初期就开始思考。对华北地区大震前普遍出现的中等地震的围空现象，曾提出这样的解释：“由于地壳内介质具有不均匀性，岩石破裂强度各处并不相同。假如应力场中存在一个破裂强度特别高的块体，当应力逐渐增高到相当水平时，周围地区由于破裂强度较低，先发生大量小断裂，因而产生大量小地震，从而形成大地震周围的空白区，直到大断裂在该块体内发生时为止。”这是后来提出的“坚固体孕震模式”的思想萌芽。1976 年唐山地震发生后，这个思想进一步强化。

唐山地震发生在唐山断块内一个规模不大的小断层区，历史上没有 6 级以上地震的记载，用地震学方法测出的 Q 值较高，表明该区介质较为完整。据此曾提出唐山地震的孕育可能是一个“硬包体”演化的结果。后来通过数值模拟的方法，一定程度上证实了这个设想，并更名为“坚固体孕震模式”。

在模拟计算中，选择二维马克斯威尔粘弹性平面模型。假定边界上作用力基本不变，介质力学上的非均匀性是应力、应变场不均匀分布的原因，在某个地区存在多个小块体，它们具有比周围介质更高的弹性应变能积累能力。对于马克斯威尔体，这相当于具有较大的刚性系统与粘性系数。研究表明：坚固体的存在是应力集中的重要条件，不仅会引起剪应力集中，还会造成剪应变梯度增高。邢台、渤海、海城、唐山几个大震区在 1966 年地震高潮尚未来到以前，具有的共同特征是：积累的剪应力、剪应变都比周围邻近地区要高。由应力集中的主要因素是粘弹性系数的横向不均匀，而粘性系数又与温度场的分布密切相关，可见，地形变梯度大与温度不均匀的地方是孕育强地震的有利条件。