

梅世蓉 朱岳清 等著

唐山地震孕育模式研究

Seismogenic Model of Tangshan Earthquake

Mei Shirong Zhu Yueqing

地震出版社

写在前面

本书是《一九七六年唐山地震》问世以后又一部较为系统地研究唐山地震孕育环境的专题著作。前者侧重于基础资料的系统化和记载具有科学价值的重要现象与观测事实，并对各类地震前兆的表象进行了描述、归纳和剖析，由此引出了一系列的经验教训和有待深入研究的科学问题。书中特别强调了唐山地震的复杂性，指出，“预测强烈地震的有效途径，必须从复杂性中去进行探索，……，必须将前兆的观测分析与地球内部构造、物理化学性质和状态、区域应力场的演变、地震力源、震源区的构造物理环境、孕震过程、前兆机理等方面紧密地结合起来。从动力学的观点、方法去分析，把握观测曲线的变化，这样才能抓住本质，将地震预报放到坚实的科学基础之上”。

本书作者就是沿着这一思路，对唐山地震进行了深入的研究。书中重点研究的是孕震力学环境与震源过程，同时对部分前兆的形成机理也做了物理力学分析。据此，对唐山地震的孕育提出了一个关于孕震物理力学环境的“地幔上隆孕震模式”与关于震源过程的“坚固体模式”。它们均从重要的观测事实出发，经过详细的物理力学分析，提炼出理论模型，并研究其理论意义、应用意义与适用性，还探索了应用这些模式进行陆内或板内大震三要素预报的思路与线索，无论是理论模式本身、研究思路与方法，包括如何探索从现有观测资料中开发新的地震前兆信息的途径等方面都具有一定的价值。国家地震局八五攻关任务之一就是研究地震预报模式、预报指标体系和开发新的地震前兆信息。为了推动这一工作，我们将自己已发表在不同期刊上的论文与在不同学术会议上宣读的报告编辑成册，为读者系统了解我们过去在这方面已开展的工作提供一个方便。从这个角度看，本书具有承上启下的作用。为了争取时间，我们既利用已发表的论文制版也补制了部分新版，虽在形式上不统一，但其内容是相互联系的。作者衷心期望本书的出版能引起更多的同行对深入研究唐山等板内大震的热情，因为唐山地震留下的资料与提出的问题足够几代人研究探索，否则是不容易彻底弄清楚的。

用巨大代价换来的资料去探索地震与地震预报的奥秘将不仅对地震学本身而且也将对许多其它领域具有重要意义。由于研究正在深化，论点论据难免不当；疏漏不当之处可能不少，诚望读者批评指正。

本书大部分研究工作是在地震学联合基金会资助下进行的。作者谨此致以诚挚谢意。

作者

1992.2.22

目 录

1 . 唐山地震孕育模式研究的科学思路与结果 ... 梅世蓉、朱岳清	(1)
2 . 唐山地震前兆的复杂性与规则性	梅世蓉 (11)
3 . 唐山地震孕震过程的三维有限元分析及其在地震预报 研究上的意义	朱岳清、梅世蓉、梁北援 (19)
4 . 唐山地震孕震过程的数值模拟	梅世蓉、梁北援 (30)
5 . 唐山地震前兆机制的数值模拟	梅世蓉、梁北援、朱岳清 (42)
6 . 岩石膨胀与地震前兆机制 (一) ——地壳内存在岩石膨胀的可能性	梅世蓉、梁北援 (50)
7 . 定常边界力作用下断层应力应变积累的模拟与地震危险区讨论	梁北援、罗咏生、梅世蓉、高欣欣 (58)
8 . 二维非线性膨胀模型及壳内膨胀体对地表垂直位移的影响	梁北援、梅世蓉、朱岳清 (67)
9 . 1976年唐山地震前后的重力变化和震区莫霍面的变形	朱岳清、吴兵、邢如英 (75)
10. 一个三维密度界面反演的权函数法	朱岳清 (92)
11. 小尺度地幔对流、壳下应力场与华北地震	朱岳清、强祖基、马丽 (100)
12. 重力异常、莫霍面变形与唐山地震的孕育过程	朱岳清 (109)
13. 地震前兆的地区性	梅世蓉 (116)
14. 地球上层的对流——兼论华北地震的动力来源	朱岳清 (123)
15. 亚欧大陆地震活动的空间谱分析	朱岳清、邢如英 (153)
16. 线性粘弹性问题的有限元法和FEAP程序	梁北援等执笔 (166)
17. The Precursory Complexity and Regularity of the Tangshan Earthquake	Mei Shirong (179)
18. Numerical Simulation of the Precursory Mechanism of the 1976 Tangshan Earthquake	Mei Shirong, Liang Beiyuan, Zhu Yueqing (199)
19. Regionalism of Earthquake Precursors	Mei Shirong (210)
20. Rifting in the Bohai Region and Its Effect on Seismicity	Zhu Yueqing and Mei Shirong (219)
21. On Preparation Dynamics and Source Process of One Kind of Intracontinental Large Earthquake	Zhu Yueqing and Xing Ruying (232)

CONTENTS

- 1 . The Scientific Ideology for the Seismogenic Model
Research of Tangshan Earthquake and Its Results
..... Mei Shirong and Zhu Yueqing (1)
- 2 . The Complexity and Regularity of the Precursors of
Tangshan Earthquake Mei Shirong (11)
- 3 . The 3-D Finite Element Analysis on the Preparation Process of
Tangshan Earthquake and Its Significance to the Earthquake
Prediction Study
..... Zhu Yueqing, Mei Shirong, Liang Beiyuan (19)
- 4 . Digital Simulation on Seismogenic Process of the 1976 Tang-
shan Earthquake Mei Shirong, Liang Beiyuan (30)
- 5 . Digital Simulation on Precursory Mechanism of the 1976 Tang-
shan Earthquake
..... Mei Shirong, Liang Beiyuan, Zhu Yueqing (42)
- 6 . Rock Dilatancy and Mechanism of Earthquake Precursors (1)
—The Possibility of Rock Dilatancy in the Crust
..... Mei Shirong, Liang Beiyuan (50)
- 7 . A Model of Accumulating Stress and Strain Along a Fault
Under Steady-State Boundary Force and the Discussion on
the Seismic Risk Area
... Liang Beiyuan, Luo Yongsheng, Mei Shirong, Gao Xinxin (58)
- 8 . A Constitutive Equation for 2-Dimensional Non-Linear
Dilatancy Model and the Effect of Subcrustal Rock Dilatancy on
the Vertical Displacements at the Surface of the Earth
..... Liang Beiyuan, Mei Shirong, Zhu Yueqing (67)
- 9 . Gravity Variation and Moho Surface Deformation Before and
After 1976 Tangshan Earthquake
..... Zhu Yueqing, Wu Bing, Xing Ruying (75)
10. Weighted Function Method for Geophysical Inversion
on 3-Dimensional Density Discontinuous Surface
..... Zhu Yueqing (92)
11. Small-Scale Mantle Convection, Subcrustal Stress Field and
Seismicity in the North China Region
..... Zhu Yueqing, Qiang Zuji and Ma Li (100)
12. Gravity Anomaly, M-Discontinuity Deformation and Seis-
mogenic Process of the Tangshan Earthquake
..... Zhu Yueqing (109)

13. Regionalism of Earthquake Precursors Mei Shirong (116)
14. Convection in the Upper Layer of the Earth—In Addition to
the Dynamical Source of Earthquake in North—East China
..... Zhu Yueqing (123)
15. A Space—Spectrum Analysis on Asia—Europe Continental
Seismicity Zhu Yueqing, Xing Ruying (153)
16. Finite Element Analysis Method for Linear Visco—Elastic
Problem and FEAP Program Liang Beiyuan et al. (166)
17. The Precursory Complexity and Regularity of the Tangshan
Earthquake Mei Shirong (179)
18. Numerical Simulation of the Precursory Mechanism of the
1976 Tangshan Earthquake
..... Mei Shirong, Liang Beiyuan, Zhu Yueqing (199)
19. Regionalism of Earthquake Precursors Mei Shirong (210)
20. Rifting in the Bohai Region and Its Effect on Seismicity
..... Zhu Yueqing and Mei Shirong (219)
21. On Preparation Dynamics and Source Process of One Kind of
Intracontinental Large Earthquake
..... Zhu Yueqing and Xing Ruying (232)

唐山地震孕育模式研究的科学 思路与结果

梅世蓉 朱岳清
(国家地震局分析预报中心)

摘 要

为了研究唐山地震的孕震环境,沿两条思路探索,一条是剖析震源区的物理过程及相应前兆机制;一条是剖析地震的物理力学环境及破裂特征与序列特征。

按前条思路,通过对唐山地震前兆复杂性与规则性的剖析,定性讨论地震前兆综合特征的物理机制,提出岩石膨胀、断层蠕滑与物质迁移可能是唐山地震前兆复杂性的重要原因;应用岩石破裂实验结果,进行了膨胀模型的研究与模拟计算;应用二维马克斯威尔粘弹性模型,模拟了唐山地震的孕震过程,提出了唐山地震震源过程的坚固体模式,对穿过唐山的剖面结构进行了数值模拟,进一步揭示了震源区内的岩石膨胀、蠕滑等过程与前兆的关系;较好地解释了震前出现的某些前兆,最后,根据研究结果,对地震物理预报的可能线索进行了讨论。

按第二条思路,研究唐山及邻区的孕震环境及深部状态的变化,提出了一种实用的三维密度界面的反演方法,并用于重力约束反演,得出唐山震区莫霍面上隆,而且震前出现了明显的继承性上隆;系统地研究了地幔对流理论与分析方法,大尺度和小尺度地幔对流的型式与渤海地区地幔物质上涌特征及其所造成的壳下应力场与华北地震孕震过程的关系,提出复杂力系孕震的观点及唐山地震孕育过程中力系的构成;综合上述结果,提出了唐山地震孕育的动力学模式——地幔上隆孕震模式;采用三维弹性有限元方法,对唐山地震孕震环境与孕震过程进行了数值模拟,所得结果较好地解释了唐山地震序列的三维空间分布和震源破裂特征;最后,提出了大陆强震孕育的动力学分类,并以唐山地震为例论述了复合型大震的孕震动力学与震源过程。

一、问题与思路

唐山地震是 20 世纪中伤亡最大的一次毁灭性地震。大地震前后取得的各种观测资料极为丰富,由它所提出的许多科学问题带有相当的普遍意义。例如,是什么条件决定了它的孕育、发生与发展?根据哪些判据鉴别不同震级的强震危险区?如何判别强震孕育的阶段?等等。这些问题是唐山地震最发人深省的重要问题。

地震孕育与前兆机理一般被认为是一个极其复杂而又困难的问题。在孕震过程中是否普遍存在可观测的前兆,并据此进行地震三要素的具体预报,在认识上存在很大的分歧。有些地球物理学家对此持否定态度,尤其是 1979 年夏美国凯奥蒂湖地震 ($M=5.7$) 发生

在世界上最先进的密集观测台网内，震前竟未出现令人信服的前兆现象，从而使“地震预报是不可能的”悲观论调曾在部分科学家中扩散。然而，也有另一部分地球物理学家通过观测与理论研究，发现了许多很有意义的线索和前兆，从而增强了对地震预报的信心，并提出了一些如何处理地震前兆复杂性问题的方法与途径。安艺敬一与茂木清夫就是其二。茂木清夫分析了圣安德烈斯断层上地震前兆何以较少的力学原因，指出了地震前兆的多少和强弱与断层带的力学性质密切相关。与此同时，梅世蓉通过对唐山、海城、松潘、炉霍、龙陵等震例资料的分析指出，我国大陆地区强震，按前兆的总体特征，可分为两大类：断错型地震与走滑型地震⁽¹⁾。前者发生在断块内部或断裂带汇而不交的地区，后者发生在走滑断裂带上。断错型地震的前兆种类多、分布广，而且持续时间长；相对而言走滑型地震，前兆种类较少，分布范围较小，持续时间较短。同时，还指出两类地震的差异在于震源的力学性质不同，孕震环境不同，走滑型地震是老断层的重新滑动，而断错型地震需形成一定规模的新断裂。而且，根据这类地震前出现明显的背景性空区现象，提出这相当于地层中镶嵌着一个“硬包体”，它是形成高应力集中的基础，当应力积累到一定程度时，岩石内要发生膨胀及裂隙发展与串通等过程，逐步形成裂隙集中区，从而介质强度减弱，后者相当于“硬包体的软化”，它的存在和变化要引起周围介质中应变、应力场的变化，从而导致一系列前兆现象的发生、发展。

上述推断是否正确，有待深入研究，如果进一步的研究能在一定程度上证实这一推断，这对预测类似于唐山这种类型的地震将会有帮助，因为这类地震依靠一般的地震地质法（地面无显著大断裂存在）和地震统计预测法（历史上无强震记载）进行预报都面临着很大的困难。需要从另一角度即从物理力学角度，去探寻预报的线索。否则，唐山地震教训的重演恐难避免。

地震的发生从根本上说取决于孕震体的物理力学环境与条件，这包括震源体内部及其周围介质的结构物性与动力条件。震源体是承受载荷、最后突然释放应变能的系统，而周围介质是加载与输能的系统，它们之间的有机联系肯定是存在而紧密的，其物理内涵则有待人们去揭示。

为了深入地认识唐山地震的孕育与发生，建立相应的模式，我们沿两条思路进行探索：一条是剖析震源区内大破裂前的基本物理过程；研究其伴生现象与派生现象及其相互关系；研究震源体的物理力学性质变化对区域应力场的影响，按“坚固体震源模式”，选取二维马克斯威尔粘弹性模型，应用数值模拟方法，计算了源内、源外区的位移场、应力场与应变场的分布与变化，并与观测资料进行对比，据此对地震前兆的规则性与复杂性提出解释。

另一条思路是研究唐山地震孕育的物理力学环境，分析唐山断块区构造和介质的物理力学性质，结合板块运动、地幔对流与物质上涌等外力对孕震体的作用，分析孕震体结构、构造、物性等方面的强烈不均匀性，及其在承受很不均衡的外力系作用下，应力场与应变场的变化特征，分析震前出现的前兆（特别是重力异常）所反映的深部变化，提出相应的孕震模式；然后，对孕震体内的应变场与应力场进行三维弹性分析，将其结果与实际地震序列及其破裂力学特征进行对比，据此对唐山地震序列的成因及其复杂性提出解释。

二、唐山地震前兆的特征及其成因的力学分析

沿着前一条思路的研究, 针对前兆特征与成因问题, 我们取得了以下几方面结果:

(一) 对唐山地震前兆的复杂性与规则性进行了剖析^(2, 3)

强调了三点: 1. 各类震前异常的起始时间与转折时间既有同步性, 又有差异性; 2. 中期趋势异常、短临异常显示不同的特征, 前者具有稳定性, 后者具有多变性; 3. 中期趋势异常空间分布与短临异常的空间分布不同, 中期异常在震中附近呈相对集中, 而短临异常则转而分散。

根据国内近年的研究成果, 提出震源区内在大地震前存在三个相互联系的物理过程: 岩石膨胀、断层蠕滑、物质迁移, 它们是形成地震前兆规则性与复杂性的主要原因。

这些定性认识是随后定量计算的基础。

(二) 对壳内存在岩石膨胀的可能性及其影响量级与特征进行了分析与模拟计算

我们以岩石力学实验结果为基础, 分析膨胀的性质、类型、膨胀出现的必要条件及影响膨胀过程的诸因素(围压、温度、应变率、孔隙度、孔隙压力), 并联系地壳内的温度、压力、地壳结构与岩石物理力学性质等, 讨论了地壳内存在岩石膨胀的可能性及其深度限制, 研究表明, 在几公里至十几公里处的地壳内, 在特定条件下, 岩石发生膨胀是可能的⁽⁴⁾。

为了回答地下深处的膨胀过程是否可能在地面上产生足以观测到的效应问题, 我们进行了膨胀模型的研究及相应的模拟计算; 扩充了 Nur 的力学模型, 考虑了围压对膨胀的影响; 探讨了起始膨胀应力的判别准则; 并编制出相应的程序; 设计了一个较简单的二维剖面模型, 对地壳内不同深度产生膨胀的可能性及膨胀后所引起的地表垂直位移变化进行了模拟计算与分析, 结果表明: 不仅埋深几公里至十几公里的震源体可以发生膨胀, 甚至埋深 20—30 公里, 围压达 5×10^8 帕的条件下也有可能产生膨胀, 从而支持了壳内可能产生膨胀的论点。计算结果还表明: 膨胀区越浅, 地表垂直位移越大; 膨胀在地面造成的影响并不是处处都是隆起, 而是在一定距离以外, 还可产生沉降, 这些结果对说明唐山震中区震前出现的地形变异异常⁽⁵⁾是很有意义的。

然后, 又对一个含障碍体的走滑断层做应力、应变积累的模拟计算, 并讨论在力学性质分布不均匀的情况下, 断层内外剪应力、剪应变的变化, 以及断层障碍处力学参数随时间变化的效应, 进一步讨论在定常场作用下断层附近可能出现的危险区特征。主要结论是: 即使在定常边界力作用下, 由于断层内外物质力学性质的不均匀分布, 中强震的危险区终将出现在壁垒处及断层端部; 断层内软弱带上可能发生小震或蠕滑; 至于危险区, 我们认为是应变梯度较高, 同时应力又集中的区域⁽⁶⁾。

以上结果本身具有说明问题的独立意义, 同时又是进行更为复杂的, 对唐山地震孕震过程和前兆机制模拟计算的准备和基础。

(三) 对唐山地震的孕育过程进行数值模拟⁽⁷⁾

我们选择二维马克斯威尔粘弹性平面模型, 假定:

(1) 边界上的作用力基本不变;

(2) 介质力学性质上的非均匀性是应力、应变不均匀分布的原因;

(3) 在某个区域内存在多个小块体, 它们具有比周围介质更强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数与粘性系数(即固体)。

(4) 当能量积累到极限, 坚固体软化将引起应力应变场变化, 从而引起前兆异常现象。

计算分两步, 第一步为范围较大的概略计算, 以了解定常边界力作用下, 由于介质的非均匀性造成的应力、应变场的概貌与相互影响。第二步则以第一步结果为基础, 计算唐山断块区内岩石膨胀与断层蠕动引起的应力、应变场变化, 进而研究这种应力、应变场变化与唐山地震前兆异常间的关系。

研究结果表明:

1. 研究结果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 年地震高潮期尚未来到以前, 具有的共同特征是: 积累的剪应力与剪应变梯度均比邻近地区要高。由应力集中的主要因素是粘性系数的横向不均匀, 而粘性系数又与温度场分布关系密切可见, 地形变梯度大与冷热不均的地方是孕育强震的有利条件。

2. 邢台、渤海、海城、唐山大震连发现象的成因主要在于同期孕育, 而大震的相互影响是次要的。

计算结果表明, 1966 年以前几个未来大震震源区积累的应力水平相差无几。邢台、河间地震的发生使唐山地区的应力、应变稍有减小, 渤海地震的发生, 使唐山地区应力、应变稍有增加, 海城地震影响甚弱。可见, 唐山地震的能量来源于长期积累, 其他大震的影响是次要的。

3. 唐山断块区的岩石膨胀与断层蠕动 (相当于坚固体的软化) 均可能对应力、应变场产生显著影响, 尤其是膨胀效应更为突出, 应力、应变场变化范围在东西方向约为 200 公里, 南北方向约为 100 公里, 与唐山地震前的中期趋势异常范围相近。这说明岩石膨胀与断层蠕动有可能是引起许多中期前兆异常的根源。

4. 在前兆出现期间, 明显增加的不是应力, 而是应变, 因而加强应变测量具有重要意义。此外, 应力、应变随时间的变化由同向变化 (都随时间增加) 转为反向变化 (应力随时间减小, 应变随时间增加) 可能是孕震进入后期的重要标志。

5. 唐山震源体的形成很可能是在定常边界力作用下, 由于地壳介质的非均匀性, 在局部地区应变能长期积累的结果。应变能大量积累的条件是唐山断块区的地壳中存在一个坚固体, 它具有较强的抵抗变形的能力。一系列中期趋势异常的发生与应变能积累到后期出现应变加速过程有着直接的与间接的关系, 这相当于坚固体的软化过程。这就是坚固体模式。

(四) 对唐山地震前兆机制进行了数值模拟⁽⁸⁾

采用二维非线性有限元模型, 对穿过唐山震区的剖面结构进行模拟, 考察其非均匀性与震源区应力集中的关系, 岩石膨胀与地面垂直位移及重力异常的关系, 模拟计算分为四个阶段: 1967 年以前; 1968—1969; 1970—1972; 1973—1975 年。第一阶段的计算结果 (位移、应力、应变) 作为以后各阶段的初始状态, 这时膨胀尚未发生, 故作为线弹性问题处理。

研究结果表明:

1. 唐山断块区内坚固体与断层壁垒的存在, 可以造成岩石膨胀发生的高应力差条件。

2. 当地壳内几公里至十几公里的深度发生岩石膨胀时, 在地面上可以引起数十毫米以上的上升形变异常, 这与唐山大震前垂直形变量相近, 同时, 膨胀过程中微裂隙增多会导致小地震的频度增高与波速比下降, 故岩石膨胀可能是 1968—1969 年前兆异常的主要机制。

3. 岩石膨胀之后某些断层 (如唐山断层、宝坻断层) 发生蠕动, 可以造成局部地段的地面下沉, 而渤海地震的发生可以引起大面积的下沉, 故断层蠕动与渤海地震的影响是 1970—1972 年大面积不均匀下沉的可能机制。

4. 1973—1975 年趋势异常的增多、增强是岩石膨胀的进一步发展及深部物质涌入震源体的联合作用的结果, 但岩石膨胀发展是深部物质涌入的条件。

由此项研究可见, 唐山地震前兆机制在不同阶段包含不同内容。早期以岩石膨胀为主, 继之断层蠕动, 尔后为膨胀、蠕滑、物质迁移、物质上涌、地幔上隆加剧等过程的联合作用。到了短期、临震阶段还有其他更为复杂的物理、化学过程参予, 不过在本课题中未能对此 (短、临阶段) 进行研究。

(五) 对地震物理预报线索进行了初步探索⁽⁹⁾

我们研究唐山地震孕震环境、条件与过程不仅是为了说明唐山地震, 更重要的是为了寻找类似地震的物理预报线索, 因为这一类地震在我国地震中占有相当的比例, 而预报这类地震又特别困难, 按统计预报法或地震地质法都很难如愿, 必须沿着物理预报途径探索。这当然要长时间的研究, 本课题是在这个方向上所作的初步尝试。得到了一些有意义的线索:

1. 强震危险区的判据

强震危险区应具有较周围介质更高的弹性系数与粘性系数; 具有应变梯度大及应力、应变随时间增加的力学特征。一般处在地形变梯度较大, 且冷热不均的地带。

2. 强震孕育的判据 (或称地震长期前兆的判据)

这里的强震危险区指的是具有发生强震潜在可能的地区, 没有时间概念。当强震危险区内的弹性应变能积累到后期, 应力不再增加 (实际可能为少量减少), 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、应变均随时间缓慢增加)。这是长期前兆的重要判据。

3. 如果强震孕育区内出现趋势异常项目随着时间增多、增强的总趋势, 显示成批出现的特点, 这是孕震进入中期阶段的可能判据。

4. 趋势异常相对集中区与剪应力、剪应变变化区大体相当, 后者大于“坚固体”。趋势异常相对集中区含震中区。因此, 勾划出趋势异常相对集中区, 对未来强震地点预报具有重要意义。

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展, 及其发展时间、地点与强度均取决于孕震区自身条件, 主要不在于强震间的相互影响。因此, 当某个强震孕育区内的趋势异常与别处强震或中强震发生时间大体相近时, 不可将转折前的整段异常与远处强震相联系 (这是唐山震前造成错误判断的重要教训之一), 只要当地不发生足够强的地震, 观测到的某些物理量的趋势也不发生根本改变, 作为强震孕育区的背景就依然存在。随着时间的推移, 可能积累更多的能量, 震级估计值应当与趋势异常的持续时间和展布的空间尺度相当。

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、竖向上的非均匀性存在, 除了板块推挤造成的基本水平力作用外, 还有垂直向上的局部力源, 则在不均匀的力系作用下, 具有结构与物性不均匀性的孕震体内形成复杂的强震序列是可能的。

以上六点为地震物理预报提供一些线索, 真正的物理预报应当基于一定的物理模型对地震三要素给出定量计算结果。但是, 在纯经验预报的情况下, 即局限于现象之间的表面联系, 而不了解其物理实质的情况下, 提出这些线索, 并在综合预报时予以适当考虑, 对提高监视预报水平是有益的。

三、唐山地震孕震环境的物理力学分析

沿着第二条思路, 我们进行了下述九个课题的系统研究, 这些研究工作彼此间的联系是紧密的。这些课题及取得的主要成果如下:

(一) 唐山地震前后的重力变化及其深部成因⁽¹⁰⁾

分析了唐山地震前后十年间的流动重力资料及其观测精度, 通过降噪试验及可靠性分析, 证实了趋势异常变化的存在, 分析了引起重力变化的物理因素, 采用时域带通滤波的方法对资料进行预处理, 用样条函数求出了重力测值的拟合曲面, 借助于窗口滑动求均方法滤去浅部短波长密度扰动的重力效应, 根据剩余重力异常场作约束反演。发现震前、震时和震后该区莫霍面附近岩层可能出现过变形, 尤其是震前数年, 变形幅度更大。从而想到, 莫霍面变形可能是造成地壳应力集中并孕育地震的重要原因。为了深入探索这一问题, 接着进行了莫霍面形态的研究与相应分析方法的研究。

(二) 京津唐地区莫霍面形态及三维密度界面的约束反演研究⁽¹¹⁾

莫霍面可被看成地球介质的密度界面。这个所谓界面当然是从物理上而非纯几何学上理解的。震前震区莫霍面可能发生过变形, 则该界面原来形态如何? 为研究这个问题, 我们研究和创造性地提出了一个三维密度界面约束反演的新方法, 称之为权函数法。权函数法的要点是以物理分析和数学推导为基础, 以地震测深结果作约束, 推导得出了三维异常密度层厚度的数值公式和迭代修改层厚 Δh 的窗口加权分配公式与权重函数, 并且采用样条函数作重力测值的曲面拟合, 用豪斯霍尔德方法与追赶法相结合的方法进行大型线性方程组求解, 研制了整套计算机程序 (Sprevs 程序)。该方法的特点是比常用的 u 函数法精度更高, 而比马奎特方法收敛性更好, 对 1 米至十几公里的变化均适用。接着应用该方法进行了唐山地区莫霍面基本结构和 1976 年唐山地震前后莫霍面动态变化的约束反演。结果得出唐山地区正处于莫霍面隆起顶部西北侧, 莫霍面从唐山向西北逐步下倾变深; 1976 年前后十年间, 唐山地区莫霍面剧烈变化, 即 71—76 年剧烈上隆, 震时下降, 77 年至 80 年又稍有回升。总体上看, 唐山地震前震区莫霍面在原来上隆状态下出现了剧烈的继承性上隆。为什么会有莫霍面上隆区和继承性上隆出现呢? 为了寻根究底, 我们开展了地幔对流、板块运动及其与地震活动性和地震孕育过程关系的系列研究。

(三) 地球上层的对流与板块运动及地球上层动力学环境的物理力学研究⁽¹²⁾

通过综合分析和评述先前作者的研究成果, 我们系统地探讨了地球上层介质的物理力学的特征, 得出其介质结构构造纵向与横向都具有非均匀性的结论; 探讨了地球上层不均一的热状态与热特征, 得出地幔因积热软化并可能产生物质对流, 探索了地球重力场特

征, 得出全球重力场明显偏离流体静力平衡; 许多作者关于地幔介质蠕变特征的研究表明, 对地球内部的快速过程, 地球上层介质服从弹性变形规律, 而对缓慢过程, 则呈粘性流体特征; 继之我们研究得出地球介质的粘滞度约为 10^{22} 泊量级, 粘滞度不高, 可以流动。在探索过重力对流与热对流理论的异同, 并评述了二种对流观的相似性与等效性后, 讨论了朗柯恩 (S.K.Runcorn) 的重力对流理论与分析计算方法及其发展, 结合作者本人的工作, 论述了重力异常场与地球内部密度异常源之间的关系, 特别分析了大小尺度地幔对流的划分准则及其对流的密度异常源的中心深度, 得出卫星重力位球谐系数中 2—11 阶系数对应大尺度对流, 其对流域的中心埋深约为 1360km, 而 12—25 阶系数对应小尺度对流, 其埋深约为 340km, 后者实际还可分为二个部分。由此进一步使地幔对流理论分析与重力实际观测结果之间建立了确定性的物理联系。在分析了大量观测与理论分析结果, 例如海岭与洋中脊裂谷, 海上磁测结果、岛弧与贝尼奥夫带特征、地震震源机制、地幔岩性的实验研究, 特别是地幔对流与板块运动的实验室模拟观测结果, 以及由地幔对流计算出的壳下应力场与板块运动图案、裂谷拉张特征及地震活动性分布特征的对比结果之后, 我们得出了以下结论: ①热对流与重力对流本质上是相似和等效的, 重力场中密度异常是对流形成的根本原因, ②地幔对流是板块运动的原动力, 大尺度对流与一级板块运动相对应, 小尺度对流与二级板块运动相对应, 或者说, 对于一级板块而言, 小尺度对流是形成板内地震的重要原因, ③对流对地震活动性的控制机制可以通过板块挤压 (碰撞) 或俯冲形成板间地震, 由地壳屈曲或小尺度对流的发散流与汇聚流造成板内的带状或环状地震活动区 (带), 也可由地幔流动受阻上隆孕震。

(四) 亚欧大陆地震活动特征与大尺度地幔对流研究

为了考虑唐山地震孕育的大环境, 我们开展了这一研究工作。我们统一编制了本世纪亚欧大陆 6 级以上地震目录, 用这个目录作经向、纬向一度一度按地震能量与频度的统计, 以该统计结果作为采样的空间序列作最大熵谱与功率谱估计, 结果得出亚欧大陆地震活动空间谱的若干主频率, 考虑到亚欧板块在太平洋板块西向推挤俯冲与印度板块北北东向碰撞环境下的变形机制很类似于薄壳圆筒受压的情况, 我们采用薄壳受压屈曲力学模型分析其屈曲半波长, 取其长宽厚度比与亚欧大陆地壳长宽厚度比相当, 结果发现前述空间谱的主频率与该薄壳受压屈曲模型的屈曲波纹相当一致⁽¹³⁾。由此, 我们认识到地幔对流与一级板块运动是亚欧大陆地震活动的重要控制力源。

(五) 小尺度地幔对流与华北地震活动关系的研究⁽¹⁴⁾

我们取卫星重力位 12 至 25 阶球谐系数, 计算了小尺度地幔对流引起的华北地区壳下应力场, 得出的结果表明, 该应力场具有挤压性质, 挤压中心在山西临汾—洪洞一带, 应力大小为 $0.2—0.75 \times 10^8 \text{Pa}$, 整个应力场具有规则的中心对称特征。壳下应力场的几何特征与震源机制解的结果, 大震裂缝走向与错断方式以及地震的空间分布等彼此均具有良好的一致性, 对唐山地震与海城地震而言, 这种一致性尤为明显。从而认为, 小尺度地幔对流及其造成的华北地区壳下应力场对 1966—1976 年这一强震高潮内的华北地区地震的孕育过程起着控制作用。

(六) 渤海地区地幔上涌及其与地震活动关系的研究⁽¹⁵⁾

作为华北地区二个地震剧烈活动小区之一的渤海及其周边地区 (另一小区在山西境内), 地震强度大、频度高、破坏严重, 近期发生过渤海、海城、唐山大震, 历史上发生

过郯城、三河-平谷巨震。该区很可能存在特殊的深部孕震环境。为了研究这个问题，我们在仔细分析卫星重力位系数分组拟合结果后，取 17—25 阶系数计算了该区地幔对流形式及其造成的渤海地区壳下应力场，得出该区地幔上隆。这一结果不仅与许多作者地震测深的结果和以地震测深资料为约束所作该区三维重力反演得出的地幔介质密度界面形态的结果一致，而且得到大量地质地貌资料、地幔岩包体资料、地球物理场（包括地磁、地热、重力与地震波速度）观测资料和矿物沉积资料的支持。大量的地震震源机制解结果更与壳下应力场结果惊人地一致。从而认为渤海地区地幔上隆是该区局部孕震环境的主要因素之一。

(七) 唐山地震孕震动力学模式的研究⁽¹⁶⁾

在前述研究结果的基础上，我们综合分析了唐山地震孕育环境的动力学模式，提出唐山地震是在大尺度地幔对流与板块运动的推挤力（太平洋板块向西，印度板块向北东推挤），小尺度地幔对流造成的壳下粘滞切应力（向北西西）和底部地幔上隆造成的上隆力交叉联合作用于物性与结构构造都很不均匀的唐山菱形块体上孕育和发生的。这里所述的各种力源的组合构成了一个复杂的力系，这种孕育地震的动力学模式是十分复杂的，我们称之为地幔上隆孕震模式。

(八) 唐山地震孕震过程、力源机制及序列特征的三维物理力学分析

唐山地震是一个复杂的地震序列。主震之前无明显前震，主震之后强余震持续时间长、起伏大，形成三个特征不同的余震密集区，该序列包括五次 6 级以上地震及大量 6 级以下余震。显然，如此复杂的序列特征必然与震区内外的结构、物性及外力系的复杂情况紧密相联，为了讨论不平衡外力系作用于不均匀孕震体上如何形成大震序列，我们进行了三维有限元分析⁽¹⁷⁾。计算中采用弹性力学模型，有关介质结构，边界条件、力学参数均按前述物理力学分析结果取定。

分析区域取北京至山海关，天津至怀柔的矩形区，厚度为 0—35 公里。根据介质结构、构造的纵向、横向与深度方向上的非均匀性，将模型划分为 9 层，每层分断裂与未断两种单元，共计 1000 节点，954 个三维单元。全部边界均按等效原则，将位移约束转换为应力加载，以避免应力反射造成的应力场畸变。

整个计算工作均在 IBM-4341 中型计算机上完成。

对所得结果作了破裂危险度分析和破裂单元应力方向特征分析，为了判别单元是否发生摩擦破坏，根据 Byerlee 定律，定义了摩擦破坏危险度 F_s ：

$$F_s = (\tau_{\max} - \mu \sigma_n) / \mu \sigma_n$$

其中 μ 是摩擦系数， $\tau_{\max}$ 是最大剪应力， σ_n 是正应力。

我们取 $F_s > 1.0$ 作为单元的破裂判据，分别判定各单元是否破坏，并与余震序列中 6 级以上地震进行对比。结果表明：整个破坏单元覆盖区与唐山地震序列 6 级以上强余震分布区相符。

由每个单元各应力分量求得的平均值，计算各主应力的方向余弦，进而求出主应力与水平面的夹角及断面与平面的夹角为 70° 左右，这与实际地震断层面近于直立和地震错动近于水平的情况一致。进一步分析还表明：计算所得的断裂旋性与实际的右旋剪切性质也是一致的。

计算结果说明唐山地震的确可能是在板块推挤和壳下粘滞切应力作用下，由于地幔物

质上隆而孕育发生的。两大板块的联合推挤是区域条件，而底部物质上隆是局部特殊条件。地震破裂在唐山一带发生，说明了整体背景环境中特殊孕震条件的作用，即上隆变形与上隆力的作用，唐山地震与地幔上隆密切相关。基于这一分析，可以看到，地幔上隆孕震模式良好地刻画了 1976 年唐山地震的孕震动力学环境。

(九) 板内大震孕震机制的分类特征及复合型陆内大震的孕震动力学研究^{〔18〕}

综合分析板内大震的孕震力学环境及震源区介质物性与几何结构特征，我们将板内大震从动力学上划分为四个类型，第一类型是挤压型，第二类型是引张型，第三类型是剪切型，最后一类是复合型。分别对应于这四个孕震动力学类型，板内大震发震的运动学分类也有四个类型，第一类是老断层的推覆逆冲或新的压性断层形成，第二类是老断层拉张或新的张性断层形成，第三类是老断层的错动或新的剪切断层的形成，第四类是前述三者之某一形式的组合。基于这一分类，我们以唐山地震为例进一步分析了复合型大震的孕震环境与力源组成及发震时的运动学过程。同时分析了我国和国外某些可能属于复合型大震孕震环境的地区及其地震活动性特征。提出在板内（或陆内）各类大震的预报研究中，复合型大震的孕震动力学模式研究具有十分重要的意义^{〔17〕}。

参 考 文 献

- (1) 梅世蓉，地震前兆的地区性，中国地震，1 卷 2 期，1985。
- (2) 梅世蓉，唐山地震前兆的复杂性 with 规则性——兼论地震前兆综合特征的成因，《唐山地震孕育模式研究》，地震出版社，1992。
- (3) Shirong Mei, The Precursory Complexity and Regularity of The Tangshan Earthquake, J.Phys.Earth, 34, Suppl. S193-S212, 1986.
- (4) 梅世蓉、梁北援，岩石膨胀与地震前兆机制——地壳内存在岩石膨胀的可能性，地震，1 期，1986。
- (5) 梁北援、梅世蓉、朱岳清，二维非线性膨胀模型及壳内膨胀体对地表位移的影响，中国地震，2 卷 2 期，1986。
- (6) 梁北援、罗咏生、梅世蓉、高欣欣，定常边界力作用下断层应力应变的积累与地震危险区的讨论，中国地震，3 卷 2 期，1987。
- (7) 梅世蓉、梁北援，唐山地震孕震过程的数值模拟，中国地震，5 卷 3 期，1989。
- (8) 梅世蓉、梁北援、朱岳清，唐山地震前兆机制的数值模拟，中国地震，5 卷 2 期，1989。
- (9) 梅世蓉、朱岳清、梁北援，唐山地震孕震环境，孕震过程与前兆机理的研究，地球物理学报，1989 年增刊。
- (10) 朱岳清、吴兵、邢如英，1976 年唐山地震前后的重力变化和震区莫霍面的变形，地震学报，7 卷 1 期，1985。
- (11) 朱岳清，一个三维密度界面反演的权函数法，地震科学研究，1 期，1984。
- (12) 朱岳清，地球上层的对流研究——兼论华北地震的动力源，《唐山地震孕育模式研究》，地震出版社，1992。
- (13) 朱岳清、邢如英，亚欧大陆地震活动的空间谱分析，地球物理学报，28 卷 1 期，1985。
- (14) 朱岳清、强祖基、马丽，小尺度地幔对流、壳下应力场与华北地震，地震地质，6 卷 3 期，1984。
- (15) Zhu Yucqing and Mei Shirong, Rifting in the Bohai Region and its Effect on Seismicity, Earth-

quake Research in China, Vol.1, No.2, 1987.

(16) 朱岳清, 重力异常、莫霍面变形与唐山地震的孕育过程, 地震, 3 期, 1984.

(17) 朱岳清、梅世蓉、梁北援, 唐山地震孕震过程的三维有限元分析及其在地震预报研究上的意义, 地球物理学报, 31 卷 4 期, 1988.

(18) Zhu Yueqing, Xing Ruying, On Preparation Dynamics and Source Process of One Kind of Intracontinental Large Earthquake, 《Prevention of Earthquake Disasters》, Vieweg Braunschweig-Wiesbaden, 1992.

唐山地震前兆的复杂性与规则性

——兼论地震前兆综合特征的成因

梅 世 蓉

(国家地震局分析预报中心)

摘 要

根据唐山地震的核实资料,分析异常总体显示的复杂性与规则性:1. 各类震前异常起始、转折的同步性与差异性;2. 中期趋势异常的稳定性与短临异常的多变性;3. 中期异常空间分布的相对集中性与短临异常的离散性。然后,根据国内近年的研究成果,讨论了异常总体特征形成的机制,提出震源区内的岩石膨胀、物质迁移、断层蠕滑是形成前兆规则性与复杂性的主要成因。

前 言

唐山地震是继海城地震成功预报之后发生的一次灾害极大的地震,又发生在台网最密,观测工作时间最长的地区,震前早已发现了不少异常,并提起了我们高度的注意。但是,临震前仍未能做出预报,原因何在?这是国内外都很关心的问题。地震后,经过不止一次地总结,人们从不同角度研究了唐山地震的震前、震后变化,余震序列,破裂过程,发震构造,孕震条件与过程等等问题,已发表的报告、文章不下数百篇。1981年以前的主要研究成果已编入1982年出版的《一九七六年唐山地震》^[1]一书中。然而,唐山地震留下的丰富资料和提出的复杂问题不是几年内所能解决的。目前仍有不少人在继续研究,笔者是其中的一员,抱着寻找强震预报有效途径的目的,结合唐山地震预报实践中的经验与教训,对唐山地震前兆的复杂性与规则性及其成因进行研究,希望从中找到一些对地震预报有用的线索和方法。研究分为三方面:在充分核实资料的基础上,对资料进行归纳,抽出综合特征;针对这些特征的机制进行理论与实验研究;根据以上两方面结果建立相应的预报方法。本文所述主要是第一方面的研究成果。

一、唐山大震前的主要异常

为了后面讨论的必要,先将大震前在唐山及其周围出现的主要异常概述如下:

1. 根据大地测量资料,唐山新块区于1968—1969年一度出现地面隆起,1970年后转为下沉。
2. 与地面隆起同期,小震频度出现峰值,1970年后小震频度呈减小趋势。1973年后,环绕唐山形成地震围空,波速、 b 值出现明显异常。海城地震后,频度、波速、 b 值

均一度出现回升转折。

3. 1973—1975年唐山外围地区，断层活动加强；1976年4月以后出现加速、转折变化，临震前几天出现恢复。

4. 1973—1975年唐山及其邻区地下水位出现趋势下降；1976年4月唐山、天津一带地下水位下降加速；临震前几天至几小时地下水变化更加复杂、多样。

5. 1973年，唐山及其周围地下水氧含量上升；1976年4月转为下降；震前半个月大范围内出现水氧突跳。

6. 1973年后，唐山及其外围出现视电阻率下降；震前两个月显示加速下降，临震前半个月出现电阻率突变。

7. 1972年后唐山地区重力值缓慢上升；震前三个月重力值加速上升；临震前一周重力值出现下降。

8. 震前一周唐山、昌黎一带出现地温与地脉动异常。

9. 临震前两天在唐山地区出现大量动物异常。

10. 临震前数小时唐山附近出现大量声、光、电磁异常。

此外，还有地下油、气动态异常与低空大气物理参数异常等。

二、唐山地震的复杂性与规则性

从以上列举的异常项目可见，唐山地震前的异常种类繁多，表现形态复杂、多样，不仅不同观测项目的变化方式不同，甚至同一项目在孕震的不同阶段，其变化的样式也不同，不同阶段观测到异常的项目种类不同。震中区内、外的异常种类与特征不同。因此，唐山地震前兆从总体看是非常复杂的。正是异常的复杂性使我们陷入迷惑不解状态，以致在大震迫在眉睫的时候，仍未觉察出这样的严重性。

大震后，经过仔细分析，认为唐山地震孕育是一个长期并涉及广阔空间的问题。它的震前异常经历了一个由少到多，由简单到复杂，由慢变到快变，由震源到外围，临震前又由外围到震中的演变过程，显然，这种规则性对地震预报具有重要价值。如果我们能将复杂性中包含的种种规则性揭示清楚，这将有助于对地震前兆物理判据和地震预报方法的探索。根据目前的认识，将唐山地震前兆的复杂性及其中包含的规则性归纳成以下三点：

1. 各类震前异常起始、转折的同步性与差异性

根据国内外地震前兆模式研究，各类前兆异常的起始、转折时间基本相同。但是，唐山地震前的异常情况比理论预见复杂得多，有些异常表现出一定的同步变化，而有些异常则不然。当小震活动与地形变显示出上升异常时，其它观测项目并无异常。当这两个异常出现之后，才陆续出现 b 值、波速、地下水位、水氧、地电阻率趋势异常（见本书文[17]中图1），它们的起始转折时间并不完全相同，且海城地震之后，波速、 b 值、小震频度发生恢复性转折。随后又增添了一些新的异常项目，如唐山外围的断层活动加强、唐山断块区内地磁场出现异常。还有油气动态异常等。

截至1975年底各类趋势异常基本全出现，正是多种异常同期出现在唐山及其周围，促使我们做出“1976年京津唐渤海地区有发生5—6级地震可能”的判断。为什么估计5—6级而不是7级或更强？原因在于趋势异常起始、转折时间的差异性上。由于1968—1969