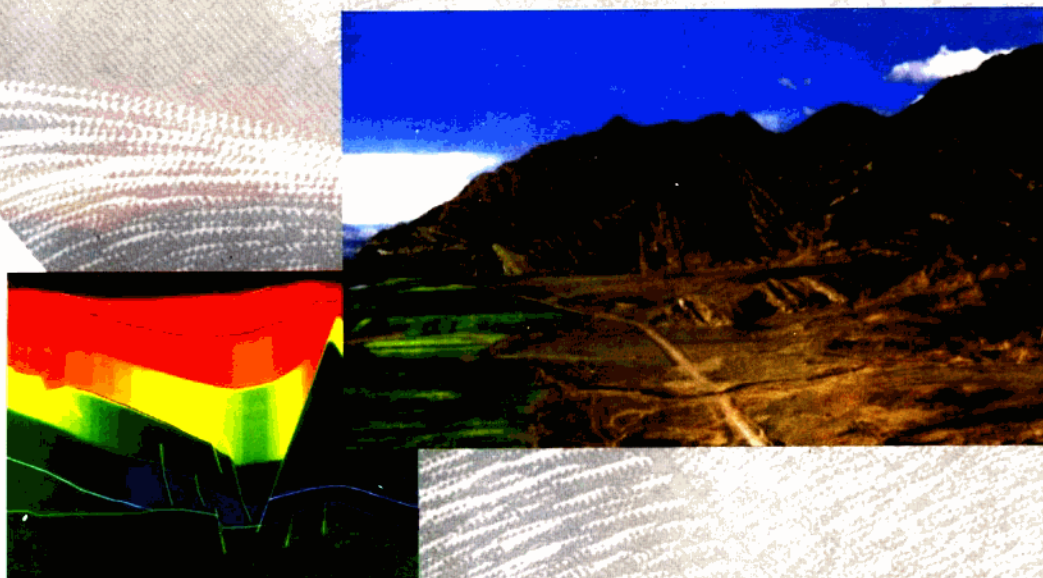


地震监测预报的 新思路与新方法

国家地震局地质研究所



地震出版社

前 言

1994年以来,我所参加了国家地震局“地震监测预报和短临前兆观测技术和方法的新理论、新技术、新方法探索研究”项目。由于获得的经费资助非常有限,科研处在工作安排和经费分配上只好考虑辅助支持课题经费不足的地震中短期预报中具有新思想的预报方法以及那些有发展前景的新的监测手段。其中,不少成果陆续汇集在我所编著出版的《地震危险性预测研究》(1994、1995、1996、1997年度)系列文集中,它们对我国一年一度的全国地震趋势会商和重点监视防御区的震情判定起到了积极作用,也为我所的地震监测预报工作注入了新的活力。

本书汇集的地震监测预报的新思路与新方法研究成果是一次阶段性的总结。今后,我所这项研究工作将在国家地震局支持下继续进行下去。

科技发展处张崇立和一室车用太先生为本文集的编撰出版工作投入了很多精力,做了大量工作。在此谨致以真挚的感谢。

国家地震局地质研究所

1997年10月31日

目 录

* 地震监测预报新思路 *

大陆强震的机理性预测研究构想.....	马宗晋 (1)
唐山地震前兆场形成与演化的固体膨胀-热物质涌落	
(DR) 模式	车用太 鱼金子 高维安 (10)
大陆动力学与多级孕震结构构造体系	王绳祖 (24)
异常、地震与构造活动.....	张崇立 楚全芝 (35)
华北地区降雨与地震关系及中期预报新思路	车用太 刘五洲 鱼金子 (39)

* 地震监测预报新方法 *

TP 法在首都圈地震预测中的应用	王绳祖 张宗淳 (43)
利用卫星遥感技术进行华北地区大震中期预测研究	
.....	李建华 叶文华 胡玉台等 (51)
地下气体在地震预报中的作用	王基华 (59)
断层气 CO ₂ 快速测定法及其在地震短临预报中的应用	
.....	林元武 王基华 高松升 (67)
用地下水水位、水温固体潮畸变异常预报地震的新方法	
.....	谷元珠 朱清钟 田竹君 (75)
北京太平庄井地下流体综合观测及映震灵敏性初析	
.....	张培仁 王基华 刘成龙等 (83)
热水中金属离子胶体的映震灵敏性研究	胡玉台 李建华 (93)
太平庄地下水微电流异常变化的研究.....	孔令昌 朱清钟 高松升等 (102)
地下流体物理化学动态映震的水动力学机制 ...	鱼金子 徐 峰 刘五洲等 (108)
谈卫星遥感热红外增温预报地震及其实践检验.....	强祖基 (116)

地震监测预报新思路

大陆强震的机理性预测研究构想^①

马宗晋

摘 要 此项研究构想以大陆强震的四个宏观特性为基础：“多震层”、陆壳构造地震、强震与“高导体”相伴以及复杂的蕴震场。对经验性与机理性预测进行了一般性讨论，提出不同于前兆和预报方法排队的评估方法——相图评估法，以显示报准率、虚报率和漏报率三者的比例关系。机理性预测研究可概括为六个工作层和三组研究系列的主体研究框架。工作层是：天体作用层、高空电离层、低空对流层、地表反映层、壳内蕴震层、地幔作用层。研究系列是：力学表现系列、磁电表现系列、热流体表现系列。

关键词 大陆地震 预报效能相图 非常规“前兆” 微动力

1 大陆地震的特性

1982年在北京召开了第一届大陆地震国际讨论会，与会各大洲专家，在会上和会后，直到现在，已从不同角度论及大陆地震的特性问题。大陆内的大地震是宏观尺度可达几百公里的一种自然现象，所以下面着重从宏观角度讨论它的一些特性。

1.1 “多震层”

亚欧、美、澳几大洲陆壳内强震的深度分布均呈现以中上地壳分界面上下为优势的层状分布^[1]。震源空间分布实际是带状的，但不同地震带的震源深度相近，所以，多个地震带之压缩投影剖面即呈“多震层”的图像。

地壳垂向剖面的应力计算表明，“多震层”的深度正好是弹性应变能最高的深度，岩性以高变质相为主。这就决定了该层在力学上是地壳组合板剖面中的“能干层”。该层的物性条件、力学环境及构造条件决定了大陆强地震的发生。

1.2 陆壳构造地震

全球构造地震可分三类构造环境：①环太平洋深俯冲带构造地震；②大洋脊转换段构造

^①国家地震局地质研究所论著97G0004。

地震;③陆壳构造地震。后者以板内活动构造边界,即陆壳与陆壳相碰的拼合带、板内活动断裂和地球物理特征带为构造基础。上述这三大类构造物理环境中发生的地震,在 b 值、频率、震波衰减等方面都存在重要差别^[12],因此,其预报方法与途径也有所不同。

1.3 强震与“高导体”相伴

有关学者在80年代已注意到“多震层”之下多与壳内高导层相伴^[13],90年代探明一些强震区之下更以“高导体”的伴生为特征^[14,5],这是壳内结构重要的物理条件组合。

高导层成因及其内部结构与组成尚有不同理解,但它是一个力学上相对的软弱层,并可能富含流体,此层与力学性状偏于脆硬的“能干层”上下配置,既有利于地震破裂发生和位移运动,也便于应变积累和流体的透入,从而强化地震孕育过程中“前兆”的表现。

1.4 复杂的蕴震场

各大陆地震区,都存在中短期地震活动的带状或面状相关,包括近场和远场相关,表现为地震迁移、能量转移等时空图像,由此打破了传统的单一点源孕震观念,奠定了在“多点场”观念基础上建立复杂蕴震场的概念^[6]。在蕴震场内构造格架的控制下,在统一场内多个结点应力应变的演变发展是相互影响相互制约的,其中大小地震与“前兆场”相伴而生共同演进,这是典型的非线性复杂系统^[7],因此,从中准确地判定这是一个即将发生的地震,还是伴随某一个地震在场上的前兆集中显现区是困难的。同样,判定成组地震依次发生的时间也是困难的。

上述四个特点表明,地震的空间展布类似于由活动构造格架控制的一盘棋,地震的发生与大区边界动力作用和源区地壳剖面结构的力学响应特征有关,地震的孕育过程伴随地壳不同岩性层及其中蕴含流体的、力学的、物理的和化学的变化,这些就是探索地震预报征兆与方法的宏观地质构造物理依据。

2 经验性预测和机理性预测

地震预测古今中外源远流长,从直观的朴素形态到信息的数理形态,但由于对地震自然态的表现尚远远认识不足,所以预测思想和方法至今尚宏微参半,经验性和机理性的预报思想和方法粗精各论,这是地震预测科学的现状,而且由于观测与机理研究的复杂性,地震预报学很长时间内,将保持经验与机理双向发展状态,尽管可能存在不相容之处,但我仍主张力求双向之所长。所以,我们既要充分利用经验预报中所依靠的那些震例事实,包括非常规的信息和方法,又要力求排除假像,强化其机理的理解和运用。

2.1 前兆预测效能相图

以各种前兆及其相应的种种预报方法预报地震,对其效能已有过系统的清理和多种统计评估其效能的算法,以求给出优劣的排序。然而,在实际预报工作中如何应用这些排序的结果尚很不清楚,也没有给出以排序结果否定哪些前兆或方法,也没有给出按排序加权的标准,说明这种单一的统计评估值如何用于实际预报工作还有待深入研究。

预报效能的评估总是针对报准率(A)、虚报率(B)和漏报率(C)三者的比例关系展开的,对于一种前兆或预报方法进行效能评估时,如果不仅给出它在评比中排序的结果,而能给出它在 A 、 B 、 C 三者的实际效能或特征,可能更有利于如何利用和考虑它在预报中所起

的作用。为此，我建议用三角相图的方式表达某一种前兆或方法的预报效能。

相图取正三角形标度格架， $\angle A$ 、 $\angle B$ 、 $\angle C$ 分别代表报准率、虚报率和漏报率为100%的标度顶点， $A-B$ 、 $B-C$ 、 $C-A$ 三边分别标度 A 、 B 、 C 的百分率。

定义： $A+B+C=D$

D 代表预报事件总数。

$A+B=F$

F 代表实报数。由此， A/D 为报准率， B/D 为虚报率， C/D 为漏报率。

选三个有特征性的假定预报例子如表1所示。

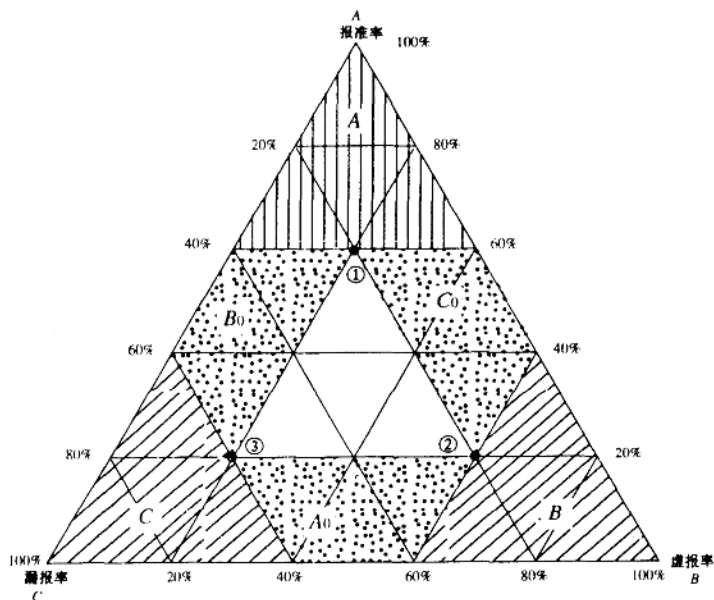


图1 地震预报效能相图

表1

	A	B	C
例1	6	2	2
例2	2	6	2
例3	2	2	6

由表1所给数据可在相图内点出它们的位置①、②、③。以这三个点作为与它邻近角区的底边，那么可从相图中割出三个角区。 A 角区代表相对报准率占优势的相区， B 角区和 C 角区则分别代表虚报率和漏报率占优势的相区。落在这三个相区内的前兆或预报方法，其预报的效能特征就比较明确了。如果有一些预报方法都落在 C 角区，即可研究它们为什么都偏于漏报，是该法的前兆基础与地震的相关性弱，还是确定预报的标准过严。同理，也可研究那

些落在 B 角区的方法,为什么都偏于虚报。此外,在相图中还割出 A_0 、 B_0 和 C_0 三个边区,它们分别是报准率低区、虚报率低区和漏报率低区,它们的预报效能的特性也体现得很明确。总之,以这样的相图来描述某种前兆与方法的预报效能特性有助于我们理解、运用和进一步研究它们,特别是对于综合预报的考虑。

2.2 经验与机理

所谓经验性地震预测和机理性地震预测,在极端情况下是有原则区别的。经验性预测更偏重于兆震统计相关的好坏,并不力求从地震的孕育过程可能引起某类前兆的时、空、强表现来判别该项前兆与地震是否机理相关;经验性预测甚至在利用多种前兆进行“综合预测”时,也只偏重“前兆”群体的统计优势,而难以不同类前兆的时空匹配关系来判定它们是否存在机理上的协调合理性作为选用的标准。就上述而言,显然经验性预测存在科学上的严重缺陷,然而在实际工作中,在开始考虑地震预报的科学问题时,都是从孕震过程可能的物理效应,从地震前兆的成因机理方面入手的,在实验室进行实验和理论计算时更是如此。但在大地复杂多变的环境中进行观测时,从“异常”现象求理于“前兆”与孕震的机理关系,很难获取一系列过程的参数,特别是场动态的协调变化。同类前兆空间上不能进行同一条条件下的比较和归算,地表观测的变化不能反演于震源深处孕育的过程,所以,能够用于日常预测任务的,只是一个地区多少类多少种,多少台前兆观测仪器,发现了多少个异常,它们异常的强度,延续时间和展布范围如何,以此作为实用于预报的基本途径。走经验预测的道路,是由于地震与地壳等相应变化的复杂性,观测条件的局限性和预测任务的现实超前性所决定的。但是,为了大力改进现存经验预测严重的理论缺陷,我们必须在观测台网的效能建设方面,在充分利用常规性和非常规性前兆预报经验方面,在蕴震基础理论研究方面,广开思路,加强研究,以提高预测的求理成分。

3 机理预测的现象依据和理论基础

总结以往地震预测的观测所得和理论研究的思考,用于预报的现象和物理基础,可归纳为主要的六个工作层次和三个主要物理研究系列,见表2。

3.1 对常规观测项目的补充

表2中标示 Δ 者是目前列为常规观测的项目,它们所观测的内容都是力学上、物理上、化学上定义明确的变量,但它们基本上都集中在地表反映层中,与壳内蕴震层或者与震源区都有相当的距离,加上观测场本身横纵向的非均匀、非连续以及人为干扰等问题,很难从这些地表测得的物理量直接反演震源的过程。从地震直接观测到的多种变异量,也还不能直接用于说明与蕴震过程的关系,这是大家所熟知的,都希望多取得一些壳内蕴震层的动态信息,再者希望把地表反映层内的某些种类变异量能够归一化到某种基本场上去,以求逐渐实现类似“天气图”一样的多种前兆综合动态场的监测。

目前已有了一些新的机遇,可望初步实现上述的希望。

(1) 全国数字化地震观测网的建设,可能获得地震网点基线间或台阵内波速和波形的变异量,从中可提供研究蕴震层结构、裂隙以及热状态变化的信息。

表2

	力学表现系列		磁电表现系列			热流体表现系列			
天体作用层	天体引力	太阳风斥力	黑子	太阳风	宇宙线				
高空电离层				电离层结构	反射率				
低空对流层	大气压强	地声	电场	气熔胶	地光	生物变异	地温异常	气象变异	热气 CO ₂ Cl ₂ 等
地表反映层	△断层活动	△地应力场	△地形变异	△地下水水位	△磁场	△电场		△垂线偏移	△重力场
							地下热场		地下水组成动态
壳内蕴震层	速度变异	地震波分裂	△微震	板块边缘动力	大地电磁场	高导体变异		热流体	高导层
地幔作用层	岩石圈底边界动力	地球转速			核幔边界热磁动力			地幔物质运动	

(2) 大地电磁仪GM-06型即将引入我国, 它的动态范围扩大到24位, 而且目前也正在为布施全国网作准备, 在适当的观测条件下, 精度可改进到1%, 这十分有利于地下电性结构的动态监测。与已有的全国的地磁网相匹配。

以上是能够补充获取深部动态信息现实可行的条件。

(3) 以GPS为主干的全国地壳运动监测网的建设正在进行, 它有可能提供大陆区全覆盖的地壳构造形变资料, 同时给出周边和深部动力条件信息。因为我国目前布设的前兆台网多是局域性或散点性的, 达不到大区联网, 而其中相当一部分前兆都是与地壳形变、断裂活动有关, 所以有可能以大陆区的形变、位移的量和状态, 作为归化其他前兆, 形成部分前兆综合动态的认识, 实现地壳变动“云图”的监测构想。

此外, GPS观测还可获得大气温度、湿度、电离层结构与电子密度等的动态信息。

(4) “八五”期间一项从卫星轨道偏离反演重力场的动态, 进而推算地壳应力场动态的研究已获得实际结果, 如能进一步提高轨道参数的精度和可信度, 相信会是大范围实时监测地下重力场动态的最佳技术方向。

(5) 通过地温测量如能反演地下热场的动态, 那将可以利用全国气象站的地温资料监测地下的热动态, 这将是获取全国地下热动态简易经济的布网方向, 不过必须实现从地温推算地下热的突破性研究。

(3)~(5)都是解决大区场动态资料的技术方向, (3)是现实的, (4)、(5)还有待加快研究。

3.2 重视非常规前兆的观测与研究

低空大气层、地表水和生物层是广泛覆盖在地壳之上的邻接层, 对固态的地表层来说, 它以活动性更强的“流质”动态为特征, 但这一特征对于反映地震孕育过程的动态来说, 既有劣于地表层也有优于地表层的反映能力。气温、气压、大气、电场、降雨、地气等是日常连续可见的, 但除了地气和地表水份监测已被列入常规外, 其它多项都被认为是大气的自身变动, 与地震孕育无关或相关很低, 而被忽视了。再有地动、地声、生物异常等临震性偶发现象, 平时难于监测, 由此也就难以被重视。但是如果注意震前气象异常和地光、生物异常之类现象的发生机理, 可发现它们可能与低空电场、气溶胶以及载有多种成分地下热气的逸出有某种关联。如果这一点被研究证实, 那么就在一定程度上抓住了众多“宏观异常”的本质, 一个可以投入日常监测的内容, 一个具有特殊“放大”作用的短临前兆, 可纳入多层次电磁和地下热流体溢出等两类前兆预报研究系列。这里有以下三项研究值得重视。

(1) 卫星热红外监测低空异常增温。此项研究国内已坚持进行多年, 并获得一些异常增温过程图像与地震对应的预测结果。此项观测技术的优点是显然的, 是目前获取低空增温图像唯一可行的方法; 而且, 伴随地震孕育过程, 地下热流体的运动以及溢出地表是在理论上和实测中都已反复证明了的。低空异常增温的机理还有待研究, 但更现实的是预测效能的评价和改进。

(2) 低空电场, 地光、闪雷、毛发散张、地气雾及其开合、局地骤雨骤风、异声等等异常现象。在国内外许多大震前后, 对此都有生动的记述。多种成因推测研究集中归之于低空电场的局域异常。低空电场的台网观测和预测实践已有多年, 如能在低空电场异常的宏观表现上加强研究, 可望获得临震宏观前兆监测仪的问世, 相信将十分有助于大地震临震预报。

(3) 电离层结构和电子密度的监测。国内外报道大震前电离层异常的震例较多,“八五”地震基金研究项目已初步证明,地下强震孕育,特别是临震前的失稳变动所激发的电磁波,造成电离层的扰动是完全可能的^①。以往电离层的探测是由少量的空间监测站进行的,目前GPS基准站覆盖全国,将大大改善电离层异常与大震关系的研究条件。

3.3 地球微动力对强震预测的参与

以地质时间尺度研究板块构造运动所讨论的动力问题,多是以百万年平均值为准的,而地震活动和地震预测所涉及的时间尺度一般也只是千年以内直至年甚至日内的变化,所以一般所说的动力环境或边界动力条件与预报所论的时间尺度是不匹配的。一般的动力学研究并未能真正参与地震预测研究,为此需要引入“现今动力”特别是“地球微动力”的概念。地球微动力包括地球整体或局部所承受的来自地球外和地球自身相互作用的多种微动力,例如,天体引力、太阳活动的多种物理动力、地球自转变化、多圈层之间的相互作用力、多层圈内部相互间的作用以及响应差动力等等^[8]。这些微动力的值是微小的,作用过程也多是短暂的,但作用方式和途径却是复杂多变的,这些动力对地球的特殊部位、特定时段的作用可能并不是“微不足道”的,会起到重要的触发或调制作用。

以往对太阳黑子、地球自转速度、大气环流型式、固体潮等方面的变化与地震的统计相关,以及从地震活动的某些规律性反推周期性或非周期性的动力特点,国内外都作了许多研究,但进入地球微动力学数理论证的程度尚浅,切望多领域的动力学专家参与研究。经归纳可初步提出以下几个建议开展的研究方向:

- (1) 地球转速和太阳黑子变化的相位与地震发生特定地区相关性的研究;
- (2) 多种天体引力造成的地球固体潮波动力轨迹的微动力学效应;
- (3) 全球大震定向迁移与岩石圈应变波传播的相关性及其微动力学研究;
- (4) 特定地区地震的周期性与地下流体和天体微动力学背景的探索;
- (5) 大气压的波动传播对地壳载荷动力效应的理论估算。

综上所述,我们已对表2中所列六个层次以不同方式进行了说明,下节对三个研究系列进行简要说明。

4 地震前兆机理研究的三个主系列

国内外多年来为精选真正前兆和可用的预报方法进行过繁重的清理、评比工作,然而至今仍未获得必震的前兆和普适的方法。原因可能还是自然态的大地的结构和动力所决定的蕴震过程和动力环境太复杂,远不是观念简单的解析态实验求理方式所能解决的,所以我不主张以前兆排队的方式来决定预报的决策方案,轻易否定那些前兆的客观性。从大量震前震后伴生现象的观测和记载,以及实验和理论研究的启发,我们有理由把它们归为如表2所列的三组多层次的研究系列。

4.1 地壳形变的力学研究系列

这里把地震作为地壳破裂的一种力学行为,把地震活动性作为地壳构造形变场在基本动

①杜品仁、蒋和荣、郭兼善,电离层异常是否可作为地震前兆的研究。

力和微动力复合作用下的自馈系统,也列入此研究系列。

地壳的速度结构和物性结构都以层状为基础,所以,在其变形中必须引入板的力学问题中组合板的观念,即弹性模量(E)不同的薄层组合板,其中 E 值最高和最低的“能干层”和“高导层”的上下配置是大陆强震特定的结构条件。

地壳整体受力,埋深在10 km以下的能干层当以波松变形为主,能干层承受的应力最强,而相伴的高导层可相当于准流体的半自由空间,所以,能干层中已有断裂的再活动和新生裂隙的条件最佳,释放的弹性能也相对偏高,所以可以宽频地震台网监测地壳蕴震过程中破裂和地震的发展,以及震波传播状态的变异,由此获取应力应变场的微动态,这是已往的经验、理论、实验都反复证实过的第一个合理而又可行的研究组合;第二是深部的构造变形与地表形变的耦合关系;第三是获得动态的应力应变场后如何以场求源。第一个问题需要不同研究领域专家的配合和专家知识领域的扩展,可以在课题组织上加以引导。第二个问题,需要地质和地球物理学家通过浅深结合的研究加以探索,目前的问题是如何把宽频地震台网和GPS形变网的监测所得,经过理论思维的配合,给出中上地壳整体的构造动态描述,了解深浅构造的贯通状况,控制应变场动态的活动构造格局和主要的结点,从而为在多点场系统中判断“待震点”提供背景。第三个问题更为复杂,需要更接近发震的伴生信息的获取和判断。

4.2 流体动态及其物化效应

这里包括从地幔到地表多种组分的液体和气体以及载热多组分气体射入低空引起多种物化效应的多层次研究系列。

地壳浅层从地表到10 km深度,包括石油和天然气还有大量的埋藏水和大气潜水,它们伴随浅层的构造变动起着重要的孔隙压和润滑作用,同时表现水位和水化的稳态变化,这是通常动态背景。而在蕴震过程中,特别是接近临震所表现的水位、水化突变和气体喷射的异常现象,则是预报信息;再者,地下载热气体的射出引起低空的增温以及可能伴随气雾和静电场跃变等现象,更是大地震临震期最令人关注的,这其中除水位、水化可定点观测外,其它都只能是随遇而知。幸喜目前卫星遥感、INSAR和GPS的技术,已接近于全天候、广泛监测近地低空温度和湿度的能力。显然,这是目前可能监测上述临震异常现象最佳的工作途径。流体动态及其物化效应研究系列当前的要点是地下热气射出的卫星观测和若干宏观异常现象的试验场观测以及资料调研与模拟性机理研究。

此研究系列的另一个重点是地幔以及壳内岩浆流体的位移引起大震前重力场,包括垂线偏差异常的监测和研究。

4.3 地下和空间电磁场异常的研究系列

如果把人工源的形变电阻率法和自然源的大地电磁法,作为探测地壳浅深电性结构发生变形的一种方式而列入地壳形变研究系列,那么本研究系列重点则在于对叠加于基本场之上的局域性或感应场和电磁信号的研究,具体内容包括基本磁场的畸变、大地电磁场的突发信号、低空电磁场异常和特异的表象,其中基本磁场和电离层目前可以广域连续观测,而大地电磁和低空电场只能设点观测,电磁异常的判断普遍存在复杂的干扰问题,如把上述四个层次异常上下综合起来,构成一个综合判定系统,可能取得自排干扰、匹配自恰的效果。

4.4 三个主系列的综合

上述三个系列的划分大体是物理的分界和相应的工作方式的分界,然而各自的特点和在

预报地震中所能起的作用是不同的。

地壳构造形变研究系列是直接与动力条件相联系着的，它是地震孕育和发生的力能基础，也是迫使和控制地下流体运动和方式的基本因素，地壳固体结构构造的变形，则为电磁感应异常和压电、压磁信息处理提供了物质基础。

相比之下，地壳形变更接近震源本体，而且信息量比较稳定，可信度强，但构造形变场的震兆显示度小，穿透力差。地下流体及其射出效应可放大地下动态的信息，同时空间定位性强，提供较丰富的临震信息。电磁场异常穿透力最强，响应层次最多，信息的时空定量精度最锐敏而复杂。看来三者互有优缺，互有补益，如能充分进行对四维的机理性的研究加以综合，相信会把地震预报科学的现状有效地推进一大步。

参 考 文 献

- [1] 马宗晋，中国大陆地震深度分布与“易震层”初探，地震科学研究，(3)，1983。
- [2] 马宗晋、陈章立、傅征祥，亚欧地震的地震系构造特征，中国科学，(9)，1980。
- [3] 刘国栋、宋惠珍，孕震层结构和物性，见：马宗晋主编：大陆多震层研究，北京：地震出版社，1992。
- [4] 徐常芳、赵国泽、詹艳，壳内低阻层的形成及其与地震的关系，见：刘若新主编，现今地球动力学研究及其应用，北京：地震出版社，1994。
- [5] 徐常芳，地壳内高导层成因、高温高压下卤水物态及其电导率（二），地震学报，18(3)，1996。
- [6] 马宗晋，华北多（应力集中）点场与地震，地震地质，2(1)，1980。
- [7] 张国民、李丽，强震成组孕育、成组发生过程中相互间影响的研究，地震，17(7)，1997。
- [8] 杜品仁、徐道一，天文地震学引论，北京：地震出版社，1989。

唐山地震前兆场形成与演化的坚固体 膨胀-热物质涌落 (DR) 模式^①

车用太 鱼金子 高维安

摘 要 根据唐山 $M_s 7.8$ 地震前唐山构造块体及其外围地区的重力、形变、地下水位等前兆场中短期阶段时空演化特征, 提出了板内强震前兆场形成与演化的坚固体膨胀-热物质涌落 (DR) 模式, 并以新发现的地温异常与岩浆活动的时空分布规律等事实及数值模拟的方法进行了初步论证。

关键词 唐山地震 前兆场 DR 模式

强震孕育与发生及其相应的前兆场模式是国内外地震学家十分关注的问题, 它直接关系到地震预报的理论与方法。国内外已有多种多样的模式问世, 如 DD 模式、IPE 模式、组合-预滑移模式等^[1]。这些模式多是以室内实验结果为基础提出的。本文则以实际观测到的资料为基础, 提出了坚固体膨胀-热物质涌落模式 (Model on Dilatancy of Storgng Body in the Crust and Rise-fall of Hot Material), 简称 DR 模式。

1 唐山地震前兆场时空演化及其力学含义

关于唐山地震的前兆场, 已有很多报道^[2~4]。我们从中选择了直接反映力学过程的井水位、地电阻率、地形变与重力四类前兆, 空间上分为震中区及其西南、西北与东部三个邻区, 对各类前兆的时间演化过程作了概化 (表 1~4)。

表 1 唐山震中区四项前兆概化特征

时段 前兆项目	1972~1973 年	1973~1974 年	1974~1975 年	1975~1976 年 (震后或震时)
重力	略有下降	缓慢上升	加速上升	快速下降
形变	地面下沉	地面上升	加速上升	加速下沉
地电阻率	上升	下降	下降或转平	快速下降—急升
井水位	缓降	快速下降	快速下降	回升—慢速下降

^① 国家地震局地质研究所论著 97G0005。

表 2 天津地区二项前兆的概化特征

时段 前兆项目	1972~1973 年	1973~1974 年	1974~1975 年	1975~1976 年 (震后或震时)
重力	平稳	缓升	快升	下降
井水位		下降	升—降	平稳—(剧降)

表 3 宝坻地区地电阻率前兆的概化特征

时段 前兆项目	1972~1973 年	1973~1974 年	1974~1975 年	1975~1976 年 (震前)
地电阻率	微降	缓降—陡降	陡升	下降—平稳

表 4 昌黎与柏各庄地区地电阻率与井水位前兆的概化特征

时段 前兆项目	1972~1973 年	1973~1974 年	1974~1975 年	1975~1976 年 (震前)
地电阻率		快降	上升—下降	下降—剧降
井水位	下降	上升	下降	缓降

从大量的室内外试验结果可看出, 上述四类前兆变化的力学含义是比较清楚的。四类前兆的升降变化与地壳受力状态间的基本关系如表 5 所示。

表 5 地壳受力状态与各单项前兆异常的基本特征

前兆手段 受力状态	地形变	重力	井水位	地电阻率
受压	地面下沉	重力值升高	井水位升高	地电阻率上升
拉张	地面上隆	重力值下降	井水位下降	地电阻率下降

根据表 5 所列的基本关系, 可以对表 1~4 中概化的唐山地震震中区与三个邻区各类前兆变化的特征给出地壳受力状态变化的解释, 为前兆场形成与演化模式的提出取得基本依据。

2 提出 DR 模式的依据

对于上述的前兆场各测点力学状态的时空演化特征, 无论用 DD 模式, 还是用 IPE 模式很难给出合理的解释。为此, 笔者提出了地壳固体膨胀-热物质涌落(DR)模式。该模式以下列认识为依据。

2.1 地壳中的强震孕育在坚固体内

梅世蓉教授自 1992 年起多次提出唐山地震孕育的坚固体模式^[5]。她从华北地区地壳的地震波结构中发现, 该区的强震多发生在地震波速度高的地壳中, 这部分被称为坚固体或硬包体。她认为, 地壳中的坚固体因其密度大, 不连续面不发育, 因此具有高弹模与高强度的特性, 从而具有积累很大变形能的性能。只有在这样的坚固体内, 才有可能积累足以发生强震的能量。

长期的构造活动, 尤其是坚固体外围众多的中小、中强地震活动不断地给坚固体输入能量。当输入坚固体内的能量, 超过其中某些部位的岩体屈服强度时, 就导致坚固体的微破裂及其相应的体积膨胀, 随着能量的不断输入, 坚固体逐渐走向破裂, 最终发生破坏而发生强震。坚固体内变形能积累的过程, 可能需要几十年乃至几百年的时间, 但膨胀则可能是震前几年的时间尺度上发生的过程。

2.2 热物质活动可能是强震发生的重要条件

大震孕育过程中可能在地幔的上隆或热物质涌入。傅承义教授(1976)在提出红肿学说时曾指出: 一次大地震发生之前, 相当大的一部分地球介质处于异常状态, 这种状态的形成可能与地下物质的迁移有关^[6]。马瑾(1982)在探讨唐山地震的发生条件时指出, 在华北平原区下部不少地方存在着地壳薄、温度高的地方, 其中可能存在深部物质的局部上涌^[2]。朱传镇等(1982)分析唐山地震的震兆时指出, 1976 年 7 月 13~23 日间唐山地区的地温明显增高, 80cm 深度层的正常日变幅为 0.1~0.3℃, 但此时最高可达 1.1℃, 这样的异常可能是地下热物质运动所造成的^[2]。由此看来, 唐山地区热物质上涌的问题, 早已引起不少著名地震学家的注意。

梅世蓉教授在提出坚固体孕震模式的同时, 还特别强调坚固体微破裂阶段, 有可能地幔热物质涌入坚固体中来, 一方面导致坚固体强度的弱化, 同时对地壳浅部产生附加的拉张应力。

王新华利用数值模拟技术, 分析了地幔热物质上涌对地壳浅部应力状态的影响问题。假设具有 600℃ 高温的物质由地幔顶部向地壳垂向涌入 5km 高度时, 在地壳浅层 5km 深度处的地温有可能上升几十度, 同时导致此处应力场中拉张应力显著增强的状态。

曾融生教授(1988)根据地震探测结果指出, 唐山地区的莫霍面在开平向斜的正下方存在断裂现象, 断距达 3~5km^[7]。这样的地壳深部断裂, 把地幔与地壳串通起来, 为地幔热物质向地壳的涌入提供了有利的通道条件。

由上可以推断, 唐山地震发生过程中有可能有热物质的上涌活动, 而且对地震的发生起了重要作用, 同时也对地壳浅部的受力状态产生重要影响, 从而表现出一系列的前兆场变化。

2.3 多震层下存在热流体活动

地壳中存在热流体并参与地壳中各种动力作用的观点, 已成为本世纪以来地球科学进

展的重要标志,地壳中的热流体与地震活动的关系也越来越引起地震学家们的关注^[8]。据徐常芳的研究^[9],中国大陆地壳中存在高导层。MT法探测结果,中地壳或下地壳上部存在着电阻率极低的层,其内很可能活动着高温、高浓度的卤水。大陆内的浅源地震,绝大部分发生在高导层以上的地壳中,在不发育高导层的地区一般不发生强震。

唐山地区发育有这样的高导层,其顶板埋深为20~25km,唐山地震的震源深度为10~20km,地震恰好发生在高导层之上,即高温、高矿化的卤水活动层之上。因此,推测唐山地震的孕育与发生有可能与热物质的涌入有关。

2.4 热物质上涌的某些证据

上述的唐山地震孕育与发生过程中可能存在热物质上涌的观点,都只是一种观点与推测,还没有找到较为可信的事实证据。笔者在这次研究中发现有关地温、电磁波信息与地壳放气等方面有一些证据。

根据曹新来(1994)提供的1970~1980年间河北省与天津市地温动态观测资料的分析结果,如下几点异常是很值得深思的。1970~1980年间的0.8m深度地温动态中,唐山、柏各庄、玉田、昌黎地区1975年的地温均值明显高于前后5年的均值(图1a),这种偏高的时段从1975年3月开始(图1b),1976年4月之后逐渐减弱。唐山地区1972~1978年各3月份的0~0.8m深度间地温随深度的变化特征曲线表明,一般年份的3月浅层地温是随深度降低的,而唯有1976年3月份的地温则随深度略有上升(图1c)。

1976年上半年河北省北部地区0.8m深度的地温月距平等值线图像与同期气温月距平等值线图像明显的不吻合,气温场则表现出以渤海为高温区向内陆逐渐降温的趋势(图2a),而地温场则表现出以唐山、天津为高温区呈北东向展布(图2b),说明两个场的热源不同。

以上资料表明,1975~1976年间唐山及其邻区的地温较其前后是偏高的,而且这种偏高与气温关系不明显,因此很可能是深部热活动的反映。

李建华等(1994)系统判读了1973年3月11日至1987年10月5日华北地区18幅、207个时相、637张不同时期、不同波段的MSS和TS卫星图像后发现,只在1975年3月01日至6月10日这一时段图像的沧东断裂带与丰南一带显示深色影像,并认为是与新构造活动有关的电磁波信息。笔者认为,这种异常也可能是沿深大断裂带有深部物质上涌引起的。卫星图像上显示出的异常段和上述的地温异常时段有一定程度的吻合,特别是两个异常开始的时段十分吻合。笔者认为,这种吻合不是偶然的,可能是一个强烈的热物质上涌事件的反映。

此外,还有一些可能与深部热物质活动有关的前兆现象。唐山地震前6~7个月天津地区津2、棉4、张道口等热水井水中CO₂的含量显著上升,上升幅度高达正常背景值的1~4倍,同期气体总量也有同步高值异常。这些异常的原因虽难断定,但都不能排除深部物质上涌的可能性。河北省迁安县安各庄井水温震前也有明显升高。

2.5 深部热物质活动方式

深部热物质活动方式的研究,对DR模式的建立有重要的意义。然而,这一问题,特别是这次地震前的活动方式问题,还不能直接取得可靠的资料。因此,只能从地质历史上的岩浆侵入或喷发作用的特征及现今某些热水井水温动态的变化特征去进行分析。

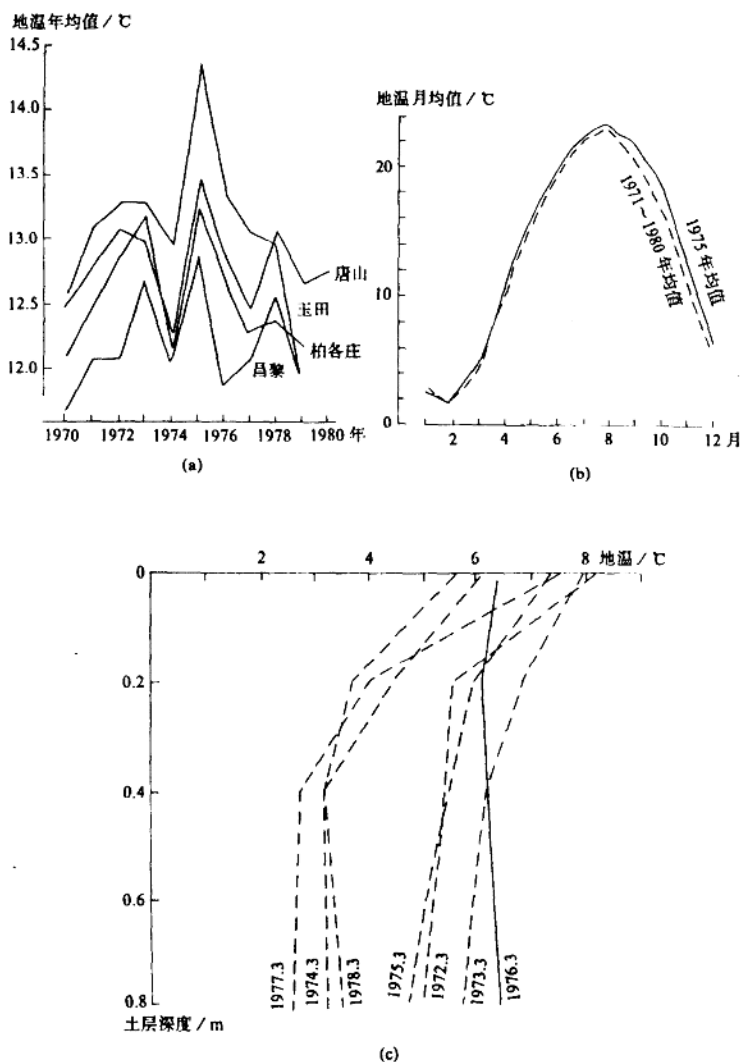


图1 唐山及其邻区 0.8m 深度层 1970~1980 年地温动态曲线

关于深部物质上涌的时间与空间上的作用特征，我们可以从地质历史上的火山活动痕迹与现今火山活动的表象中去理解。例如，新生代华北平原地区的玄武岩喷发非常清楚地表现出时空的不均一性。图 3 (a) 所示为玄武岩空间分布上的不连续性，图 3 (b) 所示为玄武岩喷发时间上的不连续性。现代火山喷发的间歇性则不言而喻，如著名的意大利维苏火山自有记载以来已断续喷发过 18 次，我国著名的长白山天池有史以来也于 1597、