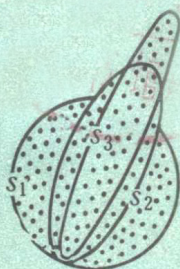


56.252

04268

地震孕育过程

〔苏〕В. И. 米雅奇金 著
冯德益 顾瑾平 译



地震出版社

56.254
04268

地 震 孕 育 过 程

[苏] B. И. 米雅奇金 著

冯德益 顾瑾平 译

地 震 出 版 社

1 9 8 3

内 容 提 要

本书介绍了孕震区地震透视方法和孕震物理学研究成果。提出了一套孕震理论,讨论了某些地球物理前兆现象的时空变化特征。详细叙述了震源地震透视的研究方法和研究成果。

本书可供地震学、地球物理学、地震地质学和矿山地质学研究人员和实际工作人员参考。

Академия Наук СССР. Ордена Ленина
Институт Физики Земли им. О. Ю. Шмидта
В. И. Мячкин

Процессы Подготовки Землетрясений
Издательство «НАУКА», Москва, 1978

地 震 孕 育 过 程

〔苏〕В. И. 米雅奇金 著

冯德益 顾瑾平 译

地 震 出 版 社 出 版

北 京 复 兴 路 63 号

北 京 印 刷 三 厂 印 刷

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

各 地 新 华 书 店 经 售

850×1168 1/32 7.75 印张: 200 千字

1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷

印数: 0001—2,100

统一书号: 13180·215 定价: 1.45 元

前 言

假如能预报某一过程是如何随时间发展的，那么研究这种过程的科学就已达到可以综合各种事实，探讨各种现象之间的相似性，建立物理和数学模型的水平。换句话说，就已达到可以建立关于预报过程某种理论观念的水平。

预报地震发生时间方面的进展可能就是一个好的例子。半个世纪前，一些著名的地震学家就已经认为，预报地震发生的时间是可能的，因为大量弹性能的积累不可能在外围介质没有任何变化的情况下进行。观测这些变化就开辟了发现地震前兆现象的途径。还有一点也是很明显的：固体介质中进行的所有过程都应该是足够稳定和比较缓慢的，此外，这些过程要比另外一些过程（如确定天气的大气过程）更易于记录。很早以来，地震学家们就在探索和寻找预示地震到来的岩石性质的变化。但是所发现的物理实质不同的大量前兆都未能得到普遍的承认。因为有不少证据说明它们不一定在每次地震前都出现。为了使不同前兆的观测方法更加完善，并能积累足够的资料，也还需要时间。

本书是在对震源区现有认识水平基础上的系统论述，该理论是由作者与 Б. В. 科斯特洛夫，Г. А. 索波列夫及 О. Г. 沙米娜合作研究出来的，称之为雪崩式不稳定裂隙形成理论。

本书的特殊价值是，作者把很大的注意力集中在以上述理论为基础，研究震源区岩石随时间的变化，从而形成十分合乎逻辑的课题，探讨了研究方法，并收集了足以证明所用的理论前提正确无误的实验资料。

作者只详细研究了与地震波速度变化相联系的前兆，工作的质量是好的，以致于无法怀疑所记录到的速度变化的可靠性。书

中叙述的实验结果令人信服地证明了震源区范围内岩石性质的可变性。在此意义上说，米雅奇金的著作不但在研究地球内部状态的变化上，而且在建立地震发生时间预报方法的基础方面，都最先提出了一些以地震波速度变化*为基础的新途径。应该认为，本书叙述的思路在相当一段时间内都有价值。作者在分析速度变化实质时所采用的那些方法也将会广泛应用于分析其它前兆的物理实质。尤其是，米雅奇金成功地使用了定性的理论结论与实验观测结果相结合的方法，这种方法一定会延续下去（利用这种方法可以把前兆区分为长期和短期的，这对于地震时间的实际预报非常重要）。在堪察加地区，认真进行的震源区地震透视实验探索工作对地震预报事业有直接贡献。对为发现地震孕育区而采用地震透视方法的所有人来说，米雅奇金的著作提供了许多宝贵的方法性建议，从而可以节约大量的时间和工作量。

作者引用的有关模拟破裂过程的知识也是丰富而有意义的。当然，现在还不能绝对地说实验模型完全符合自然界的条件，从而可以直接把实验室结果推广到自然界。但是，模型内部和实际震源过程有很多特性非常相似，这使我们可以对地球内部性质变化实验研究的前景抱有希望。因此，研究破裂过程与其尺度的依赖关系非常重要，引用实验室的一些研究结果也必然会给在这个方面深入工作的研究者带来益处。

我们还要指出上述雪崩式不稳定裂隙形成过程模式的一个最重要的特点。此模式不仅可以解释已发现的前兆，而且还可能预测那些尚未研究的前兆和一些伴随地震发生的现象。例如，作者在这个模式的基础上曾经假定，有初动符号与主震相反的前震和余震存在。这一预言对于余震已经得到证实。最近已表明，这种模式的一系列效应都可以作定量估计。

* 在苏联，广泛寻找地震前兆，其中包括震源区地震波速度前兆的首批工作是在涅尔谢索夫（苏联科学院大地物理研究所）的领导下，在加尔姆地球物理试验场进行的，现仍在继续开展。

米雅奇金的著作是创新的，其中许多内容不能认为已经完善，某些地方还可能有争论，因此，在阅读此书时会有一些要与作者商榷的新问题，本书另一方面的价值正在于此。

M. A. 萨道夫斯基院士

导 论

地震学发展到现阶段的特点是加强了震源物理过程研究，形成了震源物理这一新的研究方向。这个方向的基础是：（1）经典地震学的成就（弹性波的辐射与传播特征，震源参数的确定）；（2）地质学和地球物理学关于地球内部结构与构造运动过程的资料；（3）断裂物理学与力学的研究成果。

在这一阶段，与发展传统地震学研究方法（首先是地震空间和时间动态特征的研究）的同时，那些可以确定地震发生时地球深部物质的物理和力学状态变化的方法具有愈来愈大的意义。

地震透视就是这种方法之一。这种方法是用已知辐射参量的震源所激发的地震波研究岩体的应力状态和破损程度（“裂隙度”）的变化。地震波包含其传播途径上介质性质的许多物理力学特征的信息，并且，至少从原则上讲，是识别这些性质变化的较好标志之一。

利用介质的主要地震特征量（波的传播速度）研究地球内部应力状态和地震预报的思想，几乎与十九世纪末二十世纪初建立的地震学同时产生（今村明恒，凯维什里格蒂，伽里津）。1949年 Г. А. 甘布尔采夫院士提出并开展了利用爆破进行地震透视的首批方法性实验。1962年到1965年，曾经由 И. Л. 涅尔谢索夫领导在苏联科学院大地物理研究所地震综合考察队开展了这些实验。

在我们的研究工作以前，没有记录到超过观测误差的波的走时变化。当弱震震源处于主震震中附近时，其纵波与横波速度比 V_p/V_s 的前兆变化的第一批结果，由宫本贞夫、涅尔谢索夫、康德拉金科等在1950年到1960年间同时得到。众所周知，由于资

料有矛盾和不充分，使人难以确信究竟是哪一种速度(V_P 或 V_S)对比值 V_P/V_S 的变化起了作用，以及这些变化是否由于介质特征量的变化或震源的定向变化而产生。

广为流传的岩石在地震前呈现弹性变形和地震的发生具有突变特性的概念，几乎完全没有探讨那些与破坏前逐渐发展的裂隙形成过程有关的效应。

1953到1963年间，作者曾经发现并研究过在岩石加载与破坏过程中岩石块体内弹性波特性的变化效应。建立了波速急剧变化与岩体内产生裂隙的联系（与 С. Д. 维诺格拉多夫合作），确定了波的动力学参量与记录的一般形状对岩石应力状态和裂隙变化有十分灵敏的反映。这些实验规律与其它研究结果的综合，以及关于破裂孕育过程在不同尺度水平上相似的概念是对地震透视思想和实际可能性进行长期检验性研究的基础。

1965年，在萨道夫斯基院士的倡议和领导下，苏联重新恢复了地震前兆的探索与地震预报方法和物理基础的研究工作。1966年至1974年，在作者的学术指导与组织领导下，远东地震物理和前兆研究考察队在堪察加试验场开展了野外观测。1966年到1968年的第一阶段，在考虑地震测深成果、最大可能的测量精度和实验条件的重复性的基础上，探索了堪察加地震透视观测系统的最佳方案。在定常观测（方法完善的情况下）的同时，还对在这些条件下固体变形与破坏及地震波传播特性等问题进行了实验及理论研究。从1970年开始，在苏联科学院大地物理研究所震源物理与前兆研究室开始了应用断裂力学规律描述地震孕育过程的工作。

这本专著总结了在作者领导和参加下完成的震源物理和地震透视研究工作。本书的基本内容如下：发展地震孕育过程的物理概念并探讨其定性理论（第一章）；综合作为地震透视基础的弹性波传播特性对岩石应力状态及含裂隙程度的依赖关系的研究结果（第二章）；拟定观测系统与观测方法（第三章）；研究堪察加

东部海岸附近地壳弹性波运动学与动力学参量的时空变化，并利用已发展了的一些地震孕育概念对这些变化进行地球物理解释（第四章）。

本书同其它一些有关地震预报问题研究的基本差别在于：试图彻底使用破裂物理学的成就来建立地震孕育过程的模式，并探讨观测方法及观测结果的地球物理解释。

堪察加的野外观测基本上是由地震学研究室的应力状态与破裂过程实验室的同事们完成的。参加野外所有阶段工作的有高级工程师 A. M. 帕列诺夫；初级研究员 P. П. 索洛维也娃，B. B. 勃力沃布拉任斯基，H. A. 道尔比尔金娜；机械师 B. C. 特卡琴柯以及高级工程师 O. A. 马克西莫夫。参加研究工作的还有初级研究员 O. Д. 沃叶沃达等多人。地震透视方面的大多数文章和研究成果都是在上述同事们的参加下完成的，而在理论与实验室研究方面参加的则有初级研究员 C. И. 茹布可夫，O. Д. 沃叶沃达和高级工程师 A. M. 帕列诺夫。作者对整个实验室集体所有的其他合作者们，首先是高级研究员 B. B. 科斯特洛夫表示深切的谢意。

我们应该对苏联科学院通讯院士 Ю. B. 里兹尼钦科，通讯院士 C. A. 费多托夫，物理学数学科学博士 C. M. 兹维列夫和物理学数学科学副博士 Л. C. 魏茨曼在考察工作初期最困难阶段给予的帮助、建议和支持表示衷心的感谢。

最后，我还要对萨道夫斯基院士表示衷心的感谢。他对整个考察与实验工作全面的经常支持与关切，对地震透视与地震孕育物理学的一些学术观点的见解，都保证了本书中的一些研究项目的进行与完成。

目 录

前 言 导 论

第一章 地震孕育过程 (1)

§ 1 地震预报问题与前兆探索 (1)

§ 2 震源物理 (12)

§ 3 流变模型在估计地震循环过程中应力和应变
方面的应用 (18)

§ 4 裂隙增长引起的固体破坏 (28)

§ 5 前兆显示的持续时间与地震能量的关系 (41)

§ 6 地震孕育的定性理论 (47)

第二章 地震透视方法的物理基础 (65)

§ 1 纵波速度与振幅对应力和裂隙形成过程依赖
性的一般规律及其原因 (66)

§ 2 地壳弹性波速度与振幅变化的定量估计 (76)

§ 3 波通过孕震区传播的数值模拟 (86)

§ 4 用大尺度模型对破裂时的弹性波速度的研究 ... (96)

第三章 方法探讨 (112)

§ 1 工作地区的地质和地球物理特征 (113)

§ 2 观测方法与采用的仪器 (131)

§ 3 研究地震波激发条件稳定性的方法实验 (139)

§ 4 处理方法与观测误差 (159)

第四章 弹性波传播特征量随时间的 变化及其地球物理解释的 可能性	(182)
§ 1 波传播时间的变化	(182)
§ 2 纵波速度场的长期变化及其地球物理解释	(196)
§ 3 关于纵波速度的短期变化同地震事件的 可能联系	(206)
§ 4 记录动力学参量的变化	(211)
结束语	(223)
参考文献	(225)

第一章 地震孕育过程

最近十年来，在地震学中，已从用地震资料研究地球结构和地震波传播特性的经典阶段明显地过渡到研究震源本身的过程的阶段^[65,126,147,195,199,202]。在作者参与完成的论文^[86-106]中曾经指出，在震源物理这个新的发展方向中，孕震物理部分目前研究得最少，而这一部分对地震预报则非常重要。建立孕震理论与地震预报实际计划的唯一途径是：研究把断裂力学用到地球物理学中巨大岩体破裂上的物理概念，用地球物理和地质事实来检验这些概念，以及在综合这些事实的基础上结合实际地质介质模型的研究，发展这些概念。本章简要介绍地震预报以往和现今方法的基础，地震前兆的主要事实以及作者及其同事们在几个地震物理学问题上的工作成果。

§1 地震预报问题与前兆探索

苏联地震预报问题的提出与发展大致可以分为三个主要阶段。

一、把这个问题作为地震学中一个最重要的课题提出来，并且确定解决这个问题的基本途径（用仪器研究地震并探索地震前兆）。此阶段的工作与 А. П. 奥尔洛夫、И. В. 姆希凯托夫和 Б. Б. 伽里津^[34]的名字联在一起。

二、在 Г. А. 甘布尔采夫的发起和领导下，于1949年—1955年间布署了世界上第一批综合地震预报工作，从而确定了以后多年的具体研究方向。

三、重新提出地震预报问题，并且从1964—1965年开始，在

萨道夫斯基的发起和领导下，在全苏范围内广泛开展了从建立预报试验场到研究大岩体破坏过程的物理基础与模式的研究工作^[151,152,166]。

早在第一阶段，就把地震预报看成一个综合性问题，其成果是与整个地球物理学和一些相邻学科的发展联系在一起的。作为可能的地震前兆，曾经研究过地面的缓慢运动、弹性波速度和大地电磁场的变化、泉水流量与温度变化、地声现象以及动物行为等。

在二十世纪上半世纪，尽管日本和其他国家的学者作过个别的尝试，但是没有得到能证实地震前兆存在的重要结果。

在第二阶段，Г. А. 甘布尔采夫概述了地震预报的基本物理前提，并率领大批人员在中亚细亚（加尔姆地区的一个“天然实验场”及其它地区）进行了大规模的综合观测（研究地倾斜，地声，小震活动规律，弹性波传播速度，地球的电磁场，以及地震活动带的结构）。甘布尔采夫认为，把地震测深方法用于地震活动区，不仅对于研究地震带的特性及其与地震活动性的关系，而且对确定地震波速度场的变化，都具有特殊的意义。几乎所有包括在研究计划*中的地震物理学问题现在都取得了良好的结果，即：弱震带和强震震源（震源区）在空间上的相互联系；高频度小震的发生与有震、无震的关系；“活”断层和“死”断层的差异；地震活动的震源动力学特性指标；震源内的运动特性。这些工作的开展对于苏联的地震学和整个地球物理学的进展都有巨大影响。

1952到1962年间，在Ю. Б. 里兹尼钦科^[138,149,142]的领导下，进行了冲击地压和矿井其它过程的研究，这些过程可以看作与地震前出现的及地震时伴随的过程相类似。已经证实，在冲击地压、矿柱或井底边缘岩块震动等动力现象出现之前，人工与天然

* Г. А. 甘布尔采夫院士手稿集。

地震波在超声频和声频范围内的波动场特性都要发生变化。

六十年代初，美国、日本都制定了全国性的工作计划，其中包括研制仪器设备、建立大规模仪器观测网，对地壳内的大断裂进行地质和地球物理学研究，开展实验室和理论研究以及为预防地震灾害而开展的工程地震学的研究。

苏联科学院大地物理研究所开展的第三阶段的预报研究，从一开始就把地震预报问题列入了研究计划，并且举行了第一次全苏代表会议。这次会议总结了当代苏联和外国已有的研究成果^[127,152]。1966年的塔什干地震后，又提出了在哈萨克、吉尔吉斯、塔吉克和乌兹别克等加盟共和国的地球物理试验场内发展寻找地震前兆方法的必要性。苏联科学院大地物理研究所曾经制订出一个“寻找地震前兆的工作计划”，这个计划得到了苏联科学院主席团所属地震学和抗震工程联络会议的赞同^[127]。现在，苏联的地震预报工作是由苏联科学院的一些研究所和加盟共和国科学院管理的。

1971年8月在莫斯科举行的国际大地测量和地球物理协会代表大会对地震预报的进一步发展具有重大意义。会议表明，尽管美国和日本在仪器方面具有明显的优势，但苏联在寻找地震前兆方面却有很大的成就。苏联的成就促使美国大大加速了观测资料整理工作和筹备新的研究工作。1973和1974年有大量重复或补充苏联研究成果的文章公布于世。1974年，在塔什干举行了一次地震预报国际讨论会（主席是E. Ф. 萨瓦连斯基）^[166]。该会议表明，探索地震前兆及其物理基础的工作领域已大大扩大。社会主义国家参加了这一问题的研究。

在加尔姆试验场，美国的和苏联的一些单位首次开展协作，准备出版第一本共同研究的论文集（在1973—1974年制订了具体协作计划）。

苏联许多著名的地震学家、地质学家和地球物理学家都在不同程度上参加了包括地震预报物理基础在内的这个问题各方面的

探索工作：地壳内断裂形成的地质学和地球物理学观点（В. В. Белоусов, М. В. Гзовский^[32,33]），震源物理学，即震源的时空特征（Ю. В. Резниченко^[143]），岩体运动的物理过程（В. А. Магницкий, Ю. В. Резниченко^[79,140]），电子计算机方法在分析地震前兆和判别强震危险性标志中的应用（В. И. Кейлис-Борок^[31]），地面形变与大地构造过程的联系以及重力变化等（Ю. Р. Буланже, В. А. Магницкий^[16]和其它许多人）。

И. Л. 涅尔谢索夫在发展和组织苏联地震预报研究中作出了特殊贡献^[109]。在И. Л. 涅尔谢索夫的领导下，苏联科学院大地物理研究所的加尔姆试验场成了世界上第一个长期固定进行地球物理学、地质学和大地测量学方法的全面的综合性观测的试验场；因此，在这里最先取得许多可靠的预报研究结果并非出于偶然，这对七十年代预报问题的蓬勃发展起了推动作用。

С. А. 费多托夫对于地震活动周期性的研究^[172]以及在此基础上建立的关于千岛群岛—堪察加半岛的长期预报研究也具有重大意义。堪察加试验场探索了多种预报方法的特定组合，第一次布署了试验性地震预报工作^[228]。

现在，除了许多定期出版的刊物之外，还有一系列国际的、苏联内部的学术会议和讨论会的文集及资料，从中也可以看出地震预报工作的日益扩大的规模以及物理概念的发展^[166,177,178,195,202,231,260]。因而，下面只是简单列举近年来用各种方法进行的野外研究所取得的基本成就，并且比较详细地介绍一下地震波速度测量方面的研究工作。震源物理的发展趋势则在下一节研究。

前兆标志的寻找：（大地震发生前一个时期内，各种地球物理场特征的异常）。

地震活动性的时空过程：弱震组合的研究表明，塔吉克共和国加尔姆地区的地震场随震中密度的变化而有明显差异。已经发现，地震活动性背景随时间而变化，并与地质构造有联系。地震活动性背景在最初7—8年间是增长的，后来在较强地震（ 10^{13} —

10^{15} 焦耳)发生前的某一时间段内,在未来地震区附近可发现特有的平静期。长时期的观测还发现主震前发生的小震震源应力主轴逐渐重新定向。在临近强震之前,压应力轴的方向会发生变化。这个阶段与长期的调整阶段相比较,其影响的地区要小得多。该地区的尺度和异常的存在时间依赖于孕震力的大小。人们发现,强震前,高频与低频波的能量比有所变化。并且看出这些规律性与大地测量结果、弹性波速比的变化以及电磁观测结果相关。得出的结论是,把多种独立的指标组合起来可以大大提高地震预报的可靠性。

曾提出并且把纵波与横波振幅比的参量 θ 作为预报准则进行了研究^[125]。此参量还用一系列强震后的强震发生概率变化的地震统计方法进行了检验^[40]。表示重复率曲线斜率的 γ 值变化是由苏联学者在研究矿井冲击地压^[142, 145]和塔吉克的地震^[83]时提出来的。现在这一结果已为加利福尼亚四次中强地震所证实^[245]。

电磁场:在塔吉克共和国的加尔姆地区,从1967年开始,就利用功率为26千瓦的直流发电机来观测视电阻率的变化。在一些特定的长达2—3个月的时间段内观测到了视电阻率的下降,每次下降都伴随有能量为 10^8 到 10^{13} 焦耳的地震发生。有人提出可用深部有液体进入或地下深处的孔隙压力增高导致岩石强度降低来解释上述效应^[8]。在同一个地区,1973年进行了大功率磁流体动力直流发电机的试验。磁流体动力发电机的引入使我们可以研究大极距和大深度上电阻率随时间的变化,这样无论是在识别前兆,还是在查明其物理实质方面都开辟了重要前景。

在堪察加地区,自1967年起就在一个长约500公里的区域内进行了大地电场法的观测^[158, 159]。所发现的大地电场的电位曲线变化呈海湾形,并且对震级 $M \geq 5$ 的地震而言,这种变化在震前一、二个星期开始。能量为 10^{17} 焦耳数量级的地震之前,在长达几百公里的地区内都观测到了类似的电场扰动。在一系列能量较

小的地震的作用下产生异常的可能性也不能排除。整个看来，地震发生的时间与异常出现相互关系是极为复杂的，这是由于这个地区的地震活动水平高，且此种效应的实质还不完全清楚^[158, 159]。利用自然电场和磁场变化寻找地震前兆的工作在美国圣安德烈斯断层上也进行过。在那些观测中，能量为 10^{12} 焦耳的地震前没有发现明显的变化。

1968年用质子地磁仪获得的地磁异常效应^[210]至今仍是此类方法中唯一的成功实例。

地面形变与倾斜的观测：这些最广泛的研究方法具有很长的历史。许多著名学者都发表过这样的见解：研究地面形变如同研究地震活动性本身一样，是地震前兆研究中最有前途的方向^[15, 257, 258]。最近二十年来的文献中不止一次地出现过轰动一时的关于发现明显地震前兆的报道，尤其是有关地面倾斜前兆的报道。然而，进一步的分析表明，地面形变特性的复杂性（尤其是在小测距观测的情况下）和各种干扰的存在都要求有一些纵横交织的大测距测量系统，这些测量系统在将地面形变和倾斜与地震进行确定对比时是必需的^[75, 119]。因此，1973—1974年间发表的文献多数都是论述改进测量仪器、观测方法与观测系统以及资料处理方法的。

在苏联建立了反映试验场地区（加尔姆）形变速率增大的水准网（重复水准测量）位移与地震活动背景变化之间的联系，证实了在国外一些论著中普遍反映的一个特点，即地震到来之前，地面运动的符号要发生变化^[75]。从一些单个应变计的观测结果^[75]可以看出，仅根据一个台站的资料是不可能获得地震前兆信息的。同时还得出了形变特性变化与100公里左右距离上最大地震之间的关系。还进行了一系列完善倾斜观测仪器与观测方法的工作（乌兹别克共和国科学院地震研究所，苏联科学院大地物理研究所）。现在，在千岛群岛一堪察加半岛地区已开始用激光在100公里量级的测距上进行位移变化测量的实验（苏联科学院