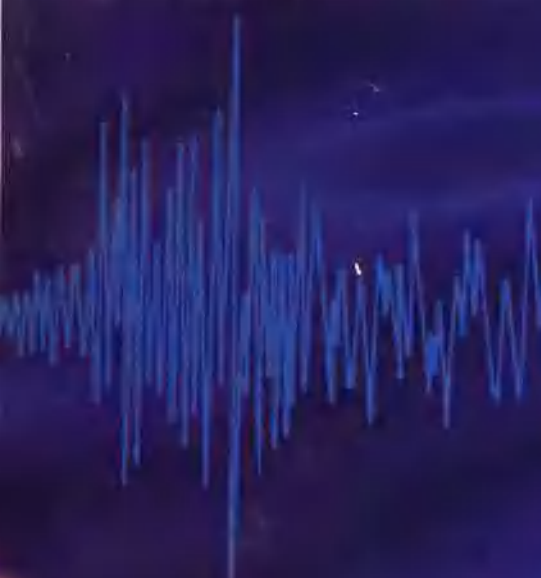
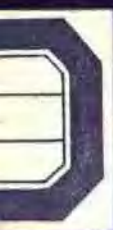




震源物理与 地震预报

[俄] Г. А. 索波列夫 著

张肇诚 张 炜 曹可珍 译校



地震出版社

震源物理与地震预报

[俄] Г. А. 索波列夫 著

张肇诚 张 炜 曹可珍 译校

地 震 出 版 社

1 9 9 7

内 容 简 介

只有在更好地理解地震孕育过程基本物理现象的情况下,地震预报的可靠性才可能提高。本书的目的是介绍室内和野外岩石破裂研究所积累的成果。书中给出了描述震源特征时采用的参数,讨论了经受非弹性变形岩石的力学、声学 and 电学的特性,介绍了现代地震孕育的模式,展示了地震前兆在各种场中的多样性,研讨了长期、中期和短期预报的方法。

本书的读者对象为地震、地球物理、地质、矿山和矿山爆破及有关领域的科技人员。

震源物理与地震预报

[俄] Г. А. 索波列夫 著

张肇诚 张 炜 曹可珍 译校

责任编辑: 曹可珍

责任校对: 张晓梅

*

地 震 出 版 社 出版发行

北京民族学院南路9号 邮编: 100081

中国地质大学轻印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 14.25印张 365千字

1997年8月第一版, 1997年8月第一次印刷

印数: 001-300

ISBN 7-5028-1421-3/P·883

(1909) 定价: 20.00元

序

地震预报事关人类的安全、经济的发展和社会的稳定。对破坏性地震进行成功的富有实效的预报预防，自古以来一直是人类共同的愿望，但在科学技术落后、愚昧的年代，这只能是一种幻想。现代科学技术的发展，逐渐为地震预报提供了某些可能，从而使地震预报研究与实践成为自然科学领域里最富魅力的前沿课题之一。

近几十年来，地震学家们进行了艰辛的地震预报探索，虽然遭受过许多挫折，但也获得某些成功。挫折与成功使国际地震界对地震预报褒贬各异。无疑，这是一种必然的现象。但不论是挫折，还是成功，贬还是褒，都引人深思，使人们在加深对地震预报困难性和复杂性认识的同时，看到了地震预报的希望，并努力进行有关的新理论、新方法的探索，以促进地震预报水平的提高。《震源物理与地震预报》正是这方面有代表性的科学论著之一。作者索波列夫教授是世界著名的地震学家，曾担任国际地震学和地球内部物理学联合会地震危险性与地震预报委员会主席，积极推进国际地震预报研究的深入与合作。在地震模拟实验、孕震模式、震源物理、地震前兆和地震预报方法研究等方面都有较高的学术造诣。《震源物理与地震预报》是作者的一本高水平的论著，相信这一论著中文版的出版，将有助于我国地震预报的学术研讨与预报探索。

近几年来，索波列夫教授与我国地震学家一起以大陆地震为背景，对地震预报的理论与方法进行了密切的合作研究。由于大陆地区地震发生环境和动力学条件与板块俯冲带有明显的差别，其地震与构造的关系和地震的前兆表现等也有不少差别。中国与俄罗斯等独联体国家的地震，多属大陆地震。

相信《震源物理与地震预报》一书的出版将有助于推进中国与俄罗斯等独联体国家在地震预报，尤其是大陆地震预报合作研究的深入。

陳章立

1997年4月，北京

中文版前言

尊敬的中国读者:

本书的俄文稿写于1991年。在过去的五年里得到了许多实验资料,包括中国的资料。考虑到地震的相互关联和饱含能量地壳的非线性特性,地震孕育过程的极端复杂性越益显得突出。我们尚处于了解大地变化万千的初始阶段。建立更符合实际的有关地震过程本质和规律的物理概念成了地震预报继续发展的一个主要条件。要在这条道路上前进,各国学者之间交换知识和思想是非常重要的。依我之见,1993年在距莫斯科不远的奥布宁斯克气象台进行的俄中地震预报研讨会是非常富有成果的。我也希望,1994年我在杭州进行的讲学和研讨有益于中国同行。

在杭州的讲学中作者对原书进行了部分修改和补充,蒙中国国家地震局的关怀及张肇诚教授等的帮助,本书中文版即将出版。借此机会,仅向国家地震局领导和有关部门及一起热情进行学术研讨和支持帮助这一工作的中国同行们表示衷心的感谢。

我认为在这里,把我目前形成的有关地震过程和预报工作的关键性认识简短地予以表述是有益的。具体实例和说明,读者可在后面书的章节中找到。

地壳由不同尺度的块体组成,有分形特性。各个块体具有不同的强度,不同的构造应力水平和方向。由于板块的相对运动和外力过程,在地球中应力积累速度超过其松弛速度的地区,同时有几个处于应力接近长期极限强度状态的地段。这一状态的表现是地震活动性的增高。已经证实,应力在块体交界的地质断裂交汇处或转折处集中,这些地方发生最强烈的地震。断裂系统也具有分形结构。

因此在具体的地震活动区同时有相当数量的具有不同震级和处于自身发展不同阶段的未来地震震源。一般说来,由于地震的仪器记录时间很短,研究者不知晓每个震源的发展历史。历史地震的信息保存在古代的纪事中,问题是震源地点很不确切,大量地震事件缺失。近些年迅速发展的用古土壤或砂液化确定古地震时间的方法,要求进行大量地质断层的挖掘,难于在近期实现。

在阐明地震周期、弱震活动性、地壳现代运动测量和断层填图的基础上,仅能以某种程度的概率确定几个未来强烈地震“候选者”的位置。在加载的非弹

性阶段，由于裂隙形成过程的发展和沿块体边界的塑性位移，会产生各种各样的宏观破裂前兆。

但由于月亮和太阳、气象因素、邻区的地震以及其他原因的综合作用，变化的和不同周期的影响，地壳各地段的应力是波动的。显然，随着应力状态的时空波动变化，前兆可多次出现和消失。这样，出现了前兆的闪烁效应和不可避免的“虚假”前兆。

已经可靠地确认，明显出现前兆的地点常常不与未来地震的震源符合，而是落在被称作“高灵敏点”的地方。首先，切割高压含水层的构造断裂带属于这一类。这种异常被称作参变量异常，因为它们与断裂带低强度和塑性岩石的物理参量变化有关。这种异常的存在导致前兆的大范围分布，并使确定具体震源的地点发生困难。

尽管如此，当具有广泛布设的前兆观测网时，可在某些情况下确定地震震源。把“GEOTIME”计算机系统用于唐山灾难性地震实例，对综合地球物理场处理的结果展示了这一点。这一研究是由中俄专家组不久前合作完成的。

地震学方法中地震平静的出现及随后的前震活动指出接近非稳定阶段的震源的位置。根据这一方法曾于不久前在震前2个月预报出了堪察加7.3级地震的地点。为了更准确地判定发震时间需要知道可能的地震事件距离达到极限长期强度的等待时间是多少。由于上面指出的外界因素，震源局部应力或大区域应力的微小增高会突然加速变形过程和缩短地震到来的时间。这可从岩石的力学实验和强度的动力学概念中得出。大区域内应力同时升高增加发生高震级地震的概率，因为地壳中的长断裂作用于大尺度的块体。已经证实大气前锋分布面与在大气压力变化作用下经受波动的地壳块体尺度之间的相关性。

从上面的分析中得出，监视由宇宙的、气象的和其他因素引起的地壳应力场变化应该是预报工作的必要组成部分。这些因素起到触发的作用。非稳定性到来与触发作用时刻之间的时间间隔取决于后者的周期与幅度。在大地条件下其变化范围还有待查明。

若是能找到判定孕育着的地震震源应力状态在超越长期极限强度后从积累到加速释放的转折点的方法则是革命性的一步。还没有在几十公里深度测定地壳应力或应变变化的直接方法。研究震源对外界作用的响应可期望是一种间接的方法。随着向极限强度接近，应变响应呈非线性增长，特别重要的是，由于介质对挤压和拉张的不同反应使响应信号畸变。这为利用人工的（可控震源）成天然的（固体潮）信号于探测地震震源以监视具非稳定性阶段的临近提供了

可能性。

基于以上所述，可提出以下地震预报的今后研究战略：

- 据历史地震活动性和地质构造资料确定未来地震的地点；
- 在识别每个震源的地震平静、环状地震活跃、前震活动等类型的预报指标基础上查明其所处地震周期的阶段；
- 利用自然或人工地震探测震源以阐明非稳定性的阶段，并按此指标将震源排序；
- 在覆盖全部可能震源的地区内进行面上各种前兆场变化的时-空综合分析，以查明异常的显著性和确定异常源；
- 监视应力（应变）和其他可以起触发作用参量的变化；
- 以上全部工作应配以震源物理的基础研究，以更好地认识这一类自然灾害的本质和规律。

这样的途径不能保证不失败，但将有助于提高预报发震地点、时间和震级的成功概率。

索 波 列 夫

1996年10月28日于莫斯科

译者的话

地震预报是世界科学难题。近几十年来积累了大量的科学研究资料和成果,进展与难点共存,褒贬各异,学术思想活跃。充分研究国际上取得的经验、成果和认识有助于加速我国地震预报探索的进程。中国与独联体国家同处欧亚大陆,在地震预报研究上有许多共同的科学问题,各有所长,有很强的互补性。基于上述认识,我们与一些朋友十几年来陆续以译文集的形式向读者介绍了前苏联在地震预报研究方面的许多成果。鉴于地球动力学和震源物理在地震预报探索中日益受到重视,1994年已把乌洛莫夫所著的《地球动力学与地震预报》一书翻译出版,今再将索波列夫所著的《震源物理与地震预报》一书译出呈献给读者。

著者于1992年来华时将本书的文稿交给译者,希望译成中文在中国出版。1994年国家地震局邀请索波列夫教授来华讲学,在杭州举办了“震源物理与地震预报”讲学研讨班。在此期间他对书稿进行了部分补充和修改,后来又为中文版写了前言,表述了他对地震过程和预报工作的关键性认识。在几年的合作研究和工作过程中译者对他的严谨治学和勇于探求的学风深为钦佩,本书实为其数十年地震预报辛勤研究和探索的结晶。相信本书不仅将以丰富的资料和内容吸引读者,更重要的是将引发我们去思考和探索。本书共分五章,前三章为基本知识、实验和理论,第四章讲地震前兆,第五章为预报方法和战略,全书理论与观测实际密切结合,深入探索地震预报的物理基础。

本书的翻译和出版是在国家地震局领导和局国际合作司和预测预防司的直接关怀和支持下完成的;工作过程中蒙尹祥楚、张国民等研究员在百忙中帮助审阅了部分章节的译稿,并向郑斯华、钱家栋、郝钦文、何世海等研究员进行了咨询;宋喜先高级工程师帮助进行了录入和排版工作。在此我们仅向关怀、支持和帮助本书翻译和出版工作的领导、部门和个人表示衷心的感谢。

本书前言、引言和第一章由张肇诚译,曹可珍校,张炜复校;第二、三章由张肇诚译,张炜校,曹可珍复校;第四章的一、二节由曹可珍译,张炜校,张肇诚复校;第四章三、四节和第五章及结束语由张炜译,曹可珍校,张肇诚复校;全书最后由张肇诚审定。书中涉及较多的名词和概念,为力求准确,工作过程中与著者保持了密切的联系,多次推敲。尽管如此,由于水平所限不当或不确之处在所难免,望读者指正。

译者

1997年2月于北京

目 录

引 言	(1)
第一章 地震的基本特征	(2)
一、地震的大小	(2)
二、地震震源	(5)
三、地质介质和地震活动性结构的不均匀性和自相似	(9)
四、应力-应变状态的不均匀性	(14)
第二章 地震过程和地震前兆的模拟	(20)
一、破裂结构	(21)
二、应力-应变状况的动态变化	(27)
三、声发射 (AE) 的空间-时间规律	(33)
四、弹性波速度的变化	(46)
五、电性参量的变化	(53)
六、预报参量的综合处理	(58)
七、沿已有断裂的非稳定滑动	(61)
第三章 地震孕育的模式	(72)
一、膨胀-扩散模式 (DD 模式)	(72)
二、雪崩-不稳定裂隙形成模式 (CA 模式或称 IPE 模式)	(74)
三、固化模式	(78)
四、非稳定滑动模式	(81)
五、相变模式	(85)
第四章 地震前兆	(88)
一、地震学前兆	(88)
地震空区	(88)
地震平静	(90)
环状活动性	(92)
震源的迁移	(93)
地震群集, 震群	(98)
地震活动断裂集中度	(103)
地震活动的局部集中	(109)
前震	(111)
地震动态的阶段	(113)
二、地球物理前兆	(120)
地面形变和倾斜	(120)
地震波走时	(129)

电磁参量.....	(130)
三、水文地球动力学和地球化学前兆.....	(146)
水文地球动力学前兆.....	(146)
地球化学前兆.....	(153)
四、地震前兆出现的规律性.....	(155)
第五章 地震预报方法.....	(163)
一、长期预报.....	(164)
二、中期预报.....	(172)
背景变化的研究.....	(172)
单项指标预报方法.....	(173)
综合参量预报方法.....	(179)
三、短期预报.....	(187)
四、地震预报的战略.....	(192)
结 束 语.....	(199)
参考文献.....	(201)

引 言

俄罗斯、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼、阿塞拜疆、格鲁吉亚、亚美尼亚、乌克兰和摩尔多瓦的辽阔领土具有高的地震活动水平。这里每年大约发生两次破坏性地震。在地震危险区生活着 5 000 万以上的人口。

近 50 年内强震在这里夺去了约 20 万人的生命，经济损失达数百亿卢布。

随着地下有用矿物的开采和高坝的建设出现了人类活动诱发的地震。此外，在核电站和大化工联合企业所在的地区甚至中等地震也会造成严重的危险，首先是生态后果和沉降、滑坡及雪崩等外力过程造成的灾害。过去认为是少震区的俄罗斯地台、东西伯利亚和西西伯利亚在此情况下成了具有地震危险的地区。这些使地震预报成了更具现实意义的问题。

近几十年世界各国积累了广泛的地震前兆观测方面的实验资料。已查明，在地震的孕育过程中伴随有小地震、岩石的电磁特性、地表形变和倾斜、地下水位及其化学组分的变化，以及其他反常的自然现象。同时还阐明，这些异常较难在干扰背景上识别，它们镶嵌状分布于地球表面，在不同地震活动区的具体地震前发展各异。

各国进行的对未来地震地点、时间和震级预报的尝试基本上未获成效。尽管也有成功的例子，首先 1975 年 2 月 4 日中国海城破坏性地震的预报属于此。由于有预报，震前 2 小时得以迁出居民。

实现可靠预报道路上的主要障碍之一是缺少对震源发展过程的深刻了解。前兆产生的机理及其与未来地震参数关系的规律研究得不够。

尽管原苏联的学者积累了大量的，常常是独一无二的前兆观测资料，查明了一系列地震孕育的基本规律，然而用俄文仅出版了日本研究者的地震预报方面总结性著作的译本^[1, 2]。

本书著者 10 余年来担任部际地震学和抗震建筑委员会地震预报专家组主席，有机会详细了解各单位在这个领域内的研究水平和成果。此外，作为国际地震学和地球内部物理学联合会地震危险性和地震预报委员会主席，著者还详细了解国外学者的成果。

著者为本书提出的主要目的是阐述地震孕育过程有关知识的现代水平，给出某些预报方法的论证和进一步完善这方面工作的建议。他相信，甚至在我们现有的知识水平上一定概率程度的地震预报是可能的。提前几年或几个月的中期预报较为可靠。为作出几天或几小时的实际有效的短期预报，则还需要克服很多困难。

为写作本书，著者利用了国内外许多学者的资料，在书稿中给出了相应的出处。作者仅向他们，以及给予过帮助的同事们，表示感谢。为使这一复杂的暂时远未解决的问题更为真实，著者与他们进行过创造性的讨论。一部分新的成果是在完成《全球自然环境和气候变化》国家科学技术项目中取得的。

第一章 地震的基本特征

地震是地球内部岩层中断裂动力学扩展（以每秒几公里的速度）的结果。运动着的断裂辐射出的波经过几秒钟达到地表，在强震情况下造成房屋破坏，导致人员的死亡。现代的地质学和地震学知识可以肯定，地震的发生是地球内已积累的应力突然释放的结果。应力受不断进行的地球物质分异过程及处于密度和温度非均匀状态下岩体对流的制约。密度和温度的非均匀状态是在地球作为星体形成时就已产生的或是因放射性加热而获得的。地球上存在有地震活动最强的窄带，可用板块构造理论很好地加以解释。据此理论地球的地幔物质在裂谷带上升到地面。这导致巨大板块的运动。在运动速度各异的板块的接触带上产生高应力，引起闭锁段岩石的破裂。

一、地震的大小

为了定量地估计地震的规模提出了各种量度，震级无疑是实际工作中最有用的^[3]。地震震级本质上是相对值。震级表中定义标准大小的地震，然后用同等观测条件下地震最大振幅与这一标准大小地震的比较来量度其他地震。这直接可从下面的定义中看到：

$$M = \lg A(D) - \lg A_0(D) \quad (1.1)$$

式中， D 为震中距； A_0 和 A 为固定的地震仪记录图纸上标准地震和被测定地震的最大振幅。伍德-安德森地震仪记录图纸上震中距 $D=100$ km、最大振幅为 $1\mu\text{m}$ 的地震，相当于公式 (1.1) 中 $M=0=(\lg 1)$ 的标准地震。

知道地震仪的频率特性可得到震级 M 与土层运动幅度 a (μm) 的关系式：

$$M = \lg a + 3 \lg D - 2.92 \quad (1.2)$$

公式 (1.2) 比公式 (1.1) 有更广泛的应用范围。并且当已知准确的土层振动幅度时，可将它应用于任何类型的地震仪。实践上地震震级 M 按下列关系式确定^[4]：

$$M = \lg \left(\frac{a}{T} \right)_{\max} + f(\Delta) \quad (1.3)$$

这里， T 为土层振动周期， $f(\Delta)$ 为确定不同波型 a/T 变化的校正函数。

有以下基本类型震级： M_L 为基本上用于小的地方震的里克特震级； M_S 为广泛用于震中距 $D>600$ km 远震的按面波确定的震级； m_B 为用于深源地震的按体波确定的震级。

各种波型震级之间的关系不是线性的^[5]。近几年来制定了以地震矩计算为基础的震级表^[6]。它被称为矩震级 (M_W) 表，在国际文献中被作为基准震级得到日益广泛应用。

文献[7]详细研究了各种震级之间的关系。也可方便地将它们与物理意义明确的参数地震矩 M_0 相比较，以下式表示^[8]：

$$M_0 = \mu U S \quad (1.4)$$

式中, μ 为震源岩石剪切模量, U 为地震断裂时两侧相对的位移量, S 为断层面积。 M_0 值实际上以某种简化用地震信息谱的低频部分计算得到。

图 1 给出了各种波型震级和矩震级 M_w 之间的关系。此处同时也给出了相应地震矩的对数值。这些关系的详细描述见文献[7]。据图 1 曲线的比较可认为, 按各种波型和各种方法确定的震级大小相差超过一级。在后面的讨论中, 当震级的绝对值具有原则性的意义时, 将给出相应的说明。

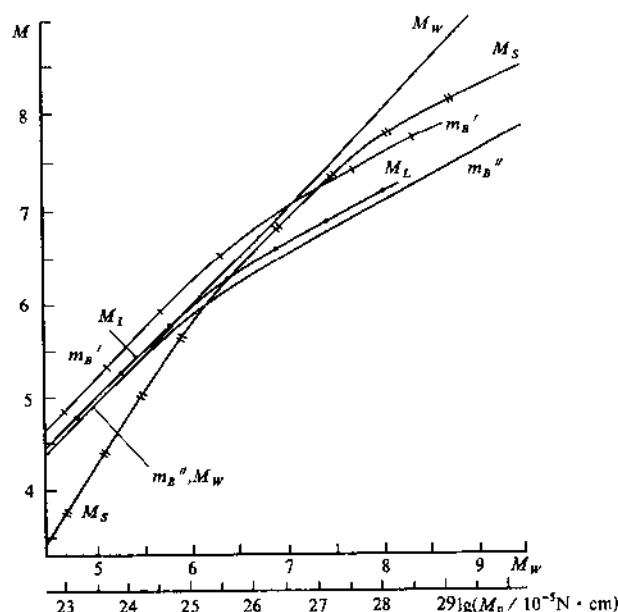


图 1 各种类型震级间的全球平均关系图

M_w 为矩震级; M_s 为面波震级; M_L 为里克特震级; m'_B 和 m''_B 为用中长周期或短周期地震仪确定的体波震级; M_0 为地震矩 (据文献[7])

震级给出地震大小的相对估计。换句话说, 用它可以比较大地震和小地震, 但这里能得到的关于这些地震震源的物理特性很少。为了更具体地谈震源的参数需要把震级与那些基本物理参数, 如能量, 联系起来。

把震源辐射的地震能量 E 与在地球表面记录到的地震波参数联系起来的公式的推导, 可以在文献[9]之类的文献中找到。作为一级近似, 能量正比于地震波振幅 A 除以周期 T 的平方与记录点上地震波通过的延续时间 t 的乘积:

$$E \propto B \left(\frac{A}{T} \right)^2 t \quad (1.5)$$

比较式 (1.3) 和 (1.5) 可见, 震级与能量间没有线性关系。不同作者提出了 M 与 E 之间的一系列相关式。由于不存在这两个地震特性的精确定义, 没有必要详细分析它们的差别。普遍采用的是古登堡-里克特公式:

$$\lg E(\text{erg}) = 1.5 M + 11.8 \quad (1.6)$$

据此式可得出 M 和 E 间的定量关系 (表 1)。

表 1 地震震级 (M) 与能量 (E) 对比表

M	$E / 10^7 \text{ J}$	M	$E / 10^7 \text{ J}$
8.5	3.6×10^{24}	6.0	6.3×10^{20}
8.0	6.3×10^{23}	5.5	1.1×10^{20}
7.5	1.1×10^{23}	5.0	2.0×10^{19}
7.0	2.0×10^{22}	4.5	3.6×10^{18}
6.5	3.6×10^{21}	4.0	6.3×10^{17}

如果在式 (1.6) 中 M 增加一级, 则 E 乘以系数 $10^{1.5}$ 。换句话说, $M=6$ 级地震的能量约比 $M=5$ 级地震的能量高 32 倍, 比 $M=4$ 级地震的能量高 1000 倍。

为表征地震大小我国的地震学家在使用震级的同时还使用能级 K 。它定义为以 10 为底的地震能量对数, 以焦耳 (J) 表示。例如, $K=16$ 相当于 $E=10^{16} \text{ J}=10^{23} \text{ erg}$ 。中亚地区采用拉乌季安的公式^[10]:

$$K = 1.8 M_s + 4.6 \quad (1.7)$$

远东使用费多托大得到的关系式^[11]:

$$K = 1.5 M_s + 4.6 \quad (1.8)$$

如果震级和能量表征震源处地震的大小, 则地球表面地震振动的强度用地震烈度表示。地震烈度表由两部分组成: 描述 (宏观) 部分和仪器观测部分^[12]。至目前为止我国正式使用的还是在 1952 年提出的宏观地震烈度表。此表建立在当时典型建筑在地震时受损情况描述的基础上, 而仪器观测资料极少。1964 年根据专门的工程地震和抗震研究建立了 MSK-64 烈度表^[13]。建立通用烈度表的困难, 一方面在于建筑类型和结构特点的多样性; 另一方面在于地震振动的特性与震源机制、地震能量、震源深度和地表附近的岩层特性密切相关。近来在抗震建筑中越来越注意振动的定量参数, 如各种大小地震时位移的最大幅度、速度、加速度、谱结构和土层振动延续时间。图 2 给出了据文献[14]资料得到的对应 MSK-64 烈度表的一些参数的平均值。

表 2 土层振动定量参数与烈度的关系表

烈 度	位 移 cm	速 度 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	加 速 度 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$	烈 度	位 移 cm	速 度 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	加 速 度 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$
I	< 0.6	< 0.4	< 0.2	VII	9	18	140
II	0.85	0.5	0.4	VIII	15	38	300
III	1.3	1.1	2	IX	23	70	600
IV	2.1	2.2	8	X	33	140	1000
V	3.5	4.5	25	XI	44	270	1600
VI	5.5	9	60	XII	> 50	> 350	> 2000

实践表明, 对于居民和建筑物来说有严重危险的是烈度等于和大于Ⅶ度的地震。震级5级及其以上的地震可引起这种破坏。震级和烈度之间没有直接的联系。平均来说, 在震源深度小于40 km时Ⅶ度区的面积($S_{Ⅶ}$)按以下关系随震级而增加:

M	Ⅶ度区面积 / km^2	M	Ⅶ度区面积 / km^2
5	100	7	3000
6	500	8	20000

例如, 1988年11月7日的亚美尼亚地震震级为6.8级, Ⅶ度区的面积 $S_{Ⅶ}=400 \text{ km}^2$ 。因此地震预报的目标应自预报5级地震开始。

二、地震震源

我们将把震源理解为地震发生时地壳中产生的断裂或断裂系统。本世纪20年代以来众所周知的地震波初动符号在地球表面的四象限分布^[15], 以及地震断层两侧位移的测量都无疑地说明, 地震震源为剪切型断层。与平移分量相比, 断层两侧相对位移的垂直分量可忽略不计。

地震以地球中积累的弹性能释放的形式产生。地震发生时能量释放, 并在断裂周围的岩体中再分配。但严格地说, 这一岩体的范围是不确定的, 实际上它在很大程度上取决于地壳的构造和应力-应变状态。因此我们没有把这一体积定义为震源。

另一方面, 积累能量的释放可以非弹性变形的形式产生, 这是完整介质破裂的一种变形形式。在地震学研究的频谱中不是所有的破裂都辐射弹性波, 而仅有动力扩展的断裂才如此。此时, 剪切变形的发展伴随着积累(潜在)能量的释放。从此意义上说, 地震是岩石力学失稳的结果。因此缓慢生长的断层, 如应力腐蚀形成的断层, 不能当作震源。当然后一情况下并不排除这种断裂会辐射少量波动的能量, 因为任何变形在微观水平上看来都是跳跃式的。

在文献[16, 17]中给出了与我们概念相近的震源定义。震源理解为在构造变形过程中所积累的应力的作用下(剪切)地球材料完整性的破坏(局部失稳)。文献[17]的作者以某种近似程度给出了用于力学破坏概念造成的地震震源的五条基本规则:

1. 构造地震震源是地球物质中的裂隙;
2. 裂隙的产生是构造变形时积累应力(剪切)造成的, 裂隙导致其表面应力的全部或部分释放;
3. 裂隙产生在不大的范围内, 然后以低于弹性纵波速度的速度扩展;
4. 震源相当于平移型裂隙, 即垂直位移的幅度很小, 可忽略;
5. 裂隙周围的材料仍然为线-弹性。

在本书中我们将用断裂(中文译名中用断裂或断层——译者注)一词代替裂隙, 使之更具地质色彩。至于这一断裂是沿着已存在的接触面(断裂)或是沿着宏观上完整的岩体产生, 这并不重要。在这种和那种情况下地震时在震源都发生介质的局部失稳和完整性的破坏。

不排除在地球深部积累能量的释放不以剪切断裂的形式实现。例如因相变或多态转变造成体积的突变。在第三章中我们将讨论这一问题。

震源机制问题在文献[16~18]中已详细研究。因此在本书中不进行讨论。但震源的某些特性从地震预报问题的观点来看具有重要的意义。

首先讨论震源断裂尺度和能量（震级）的关系。里兹尼钦科提出了综合关系式中的一种关系式^[19]：

$$\lg l = 0.244 \cdot \lg E - 2.266 \quad (1.9)$$

在此， l 以 km 计， E 以 J 计。

根据文献[20]，考虑到震级与震源深度 h 的关系，对于相对不太大的地震（ $M \leq 5$ ）的关系式为：

$$\lg l = 0.5 M - 0.411 \lg h - 1.3 \quad (1.10)$$

在此， h 以 km 计。

为得到震级与震源尺度、位移和释放的能量间的关系，斯坦伯格收集了 $M_S = 5.1 \sim 8.7$ 地震约 100 个地震的资料，这些地震的上述参数为已知或重新进行了确定^[21]。

震源的长度按照地表出露的断层长度或依据余震区的长度估计。宽度和面积 S 基本上按余震区的大小得到。位移量比断裂的尺度较难准确地和单解地确定。约有 25% 的情况是据地表直接测量资料得到的最大位移值 $D_{\max}$ 。在大多数情况下是从地震矩 M_0 和断裂面 S 值关系确定的平均位移值 D 。释放的能量按金森博雄和安德森在文献[22]给出的对水平与垂直位移的公式计算：

$$\Delta\sigma_h = \frac{2}{\pi} \mu \frac{D}{W} \quad (1.11)$$

$$\Delta\sigma_v = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu} \cdot \frac{D}{W} \quad (1.12)$$

如果位移的相应分量达到位移矢量的 70% 以上，则地震为平移、逆-逆掩或正断层型。相应地在近垂直震源面的情况下对于平移断层和正断层来说，优势位移为近水平或近垂直方向。逆-逆掩断层型地震以沿近水平断裂面位移为特点。经资料系统整理和分析得到了相关式^[21]。震源长度（以 km 为单位）与震级之间有以下相关式：

$$\lg l = 0.64 M_S - 2.75 \text{ (平移断层)}, \text{ 相关系数 } \gamma = 0.87 \quad (1.13)$$

$$\lg l = 0.45 M_S - 1.54 \text{ (逆-逆掩断层)}, \gamma = 0.9 \quad (1.14)$$

$$\lg l = 0.38 M_S - 1.06 \text{ (正断层)}, \gamma = 0.82 \quad (1.15)$$

亦确定了 $6.0 \leq M_S < 8.7$ 地震余震面积 S_a （以 km^2 为单位）与震级的关系式：

$$\lg S_a = 1.07 M_S - 4.79 \text{ (平移断层)}, \gamma = 0.91 \quad (1.16)$$

$$\lg S_a = 0.85 M_S - 2.9 \text{ (逆-逆掩断层)}, \gamma = 0.87 \quad (1.17)$$

$$\lg S_a = 1.22 M_S - 5.87 \text{ (正断层)}, \gamma = 0.98 \quad (1.18)$$

在上述震级范围内没有观测到平移断层和正断层余震面积的明显差别（这些余震很大程度上反映震源的大小）。逆-逆掩断层的面积比平移断层和正断层的略大一些。在比较长度与震级比值和面积与震级比值时发现，在同样震级情况下平移断层的长度比具有垂直位移的断层要大（特别是对大地震）；而在比较具有各种位移特性的震源面积时则难于作出类似的结论。

l 和 S 相关特性的差别可用具有倾向位移的地震断层面宽度较大来解释。对大地震这一现象尤为明显。例如，对接近于 8 级的平移型地震的 l/W 达到 20~30；而对于具有倾向位移的地震 l/W 不超过 5，平均在 2 左右。在 $\gamma=0.7\sim 0.92$ 的条件下，震源位移值 $D(M)$ （以 cm 为单位）与震级的关系可用以下关系式表示^[21]：

$$\lg D(M) = 0.75 M_s - 5.21 \quad (\text{平移断层}) \quad (1.19)$$

$$\lg D(M) = 0.25 M_s - 1.49 \quad (\text{逆-逆掩断层}) \quad (1.20)$$

$$\lg D(M) = 0.48 M_s - 3.03 \quad (\text{正断层}) \quad (1.21)$$

因此，沿走向位移的地震断层两侧的移动量要远远大于沿倾向位移的地震。在 $\gamma=0.6\sim 0.7$ 条件下，位移量与震源长度的关系由下式给出：

$$\lg D(M) = 0.79 \lg l - 1.3 \quad (\text{平移断层}) \quad (1.22)$$

$$\lg D(M) = 0.44 \lg l - 0.42 \quad (\text{逆-逆掩断层}) \quad (1.23)$$

$$\lg D(M) = 0.52 \lg l - 0.35 \quad (\text{正断层}) \quad (1.24)$$

没有观测到位移量与地震震源宽度间的明显关系。根据式 (1.11) 和 (1.12)，在断层宽度变化较小的情况下，震级增加时位移量的增加应导致释放应力的增加。文献[21]的资料确切表明，地质、大地测量和地震学资料的分析结果已证明在逆-逆掩断层和正断层的情况下断层两侧的垂直移动是不对称的。通常，上盘的位移大于下盘。断层两侧位移差可达数倍。

上面指出的不同类型地震震源的特点应导致地震效应的不同特性，即导致烈度和烈度分布的区别。可预料，线性延伸、陡倾角、宽度较小的平移断层与不大伸展、宽度较大的逆断层及缓倾角的逆掩断层等震线会有不同的形态。

逆-逆掩断层和正断层两侧活动的不对称，以及与此相关的在更加活动的盘上造成更为强烈的次生表面破坏，应导致地表地震效应的不对称性。

鉴于采用矩震级评价地震大小的方法的日益广泛应用，下面亦给出上述震源参数与矩震级 M_w 的关系式。这些关系式是在假定断裂长度与其宽度的比为常数的条件下在文献[7]中导出的：

$$\lg l = 0.5 M_w - 1.85 \quad (1.25)$$

$$\lg S = 1.0 M_w - 4.10 \quad (1.26)$$

$$\lg D = 0.15 M_w - 1.40 \quad (1.27)$$

位移沿地震断层的分布对了解非稳定发展的机理、扩展着的断层的地震波辐射理论和