

# 地震预测

## ——进展、困难与前景

陈运泰

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 地震预测是一个既紧迫要求予以回答、又需要通过长期探索方能解决的地球科学难题。20 世纪 60 年代以来,中期与长期地震预测研究取得了一些有意义的进展,如板块边界大“地震空区”的确认、“应力影区”、地震活动性图像、图像识别以及由美国帕克菲尔德地震预报实践获得的正反两方面的经验等。但是地震预测尚处于初期的科学探索阶段,目前总体水平仍然不高,特别是短期与临震预测的水平与社会需求相距甚远。地震预测的进展主要受到地球内部的“不可入性”、大地震的“非频发性”以及地震物理过程复杂性等困难的制约。依靠科技进步,强化对地震及其前兆的观测,选准地点、开展并坚持以地震预测试验场为重要方式的地震预测科学试验,系统地进行基础性的对地球内部及对地震的观测、探测与研究,坚持不懈,对实现地震预测的前景是可以审慎地乐观的。

**关键词** 地震预测;地震预报;地震前兆;地球内部

**中图分类号:** P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-3246(2007)02-0001-24

### 引言

2006 年对于中国地震学家来说无疑是一个独特的年份。2006 年是河北唐山地震 30 周年,河北邢台地震 40 周年,又是我国台湾梅山地震 100 周年。

1976 年 7 月 28 日 03 时 42 分 56 秒(北京时间)在河北省唐山市发生了一次矩震级  $M_w$  7.6(面波震级  $M_s$  7.8)的强烈地震,震中位置  $39.6^\circ\text{N}, 118.0^\circ\text{E}$ ,震源深度 17 km,震中烈度 XI 度。主震发生后的当天傍晚(18 时 45 分 36 秒),在距唐山 40 余千米的滦县又发生了一次  $M_w$  7.0( $M_s$  7.1)地震,震中位置  $39.7^\circ\text{N}, 118.4^\circ\text{E}$ ,震源深度 18 km,震中烈度 IX 度。24.28 万人在这次地震中丧失生命,16.4 万人重伤,经济损失约 100 亿元(张肇诚, 1990)。

2006 年是河北邢台地震 40 周年。1966 年 3 月 8 日凌晨,北京时间 05 时 29 分 14 秒,在河北省邢台地区隆尧县东南发生了  $M_s$  6.8 地震,震中位置  $37^\circ 21' \text{N}, 114^\circ 55' \text{E}$ ,震源深度 10 km。在两个星期后的 3 月 22 日,在隆尧县北面的宁晋县内又连续发生了  $M_s$  6.7 和  $M_s$  7.2 两次地震。 $M_s$  6.7 地震的发震时刻为 16 时 11 分 36 秒,震中位置  $37^\circ 30' \text{N}, 115^\circ 05' \text{E}$ ,

---

作者简介:陈运泰,地球物理学家,中国科学院院士、发展中国家科学院院士,现任国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)执行局委员,中国地震局地球物理研究所研究员、名誉所长,北京大学地球与空间科学学院教授、院长  
基金项目:地震科学联合基金(项目编号 106018)资助项目  
中国地震局地球物理研究所论著编号 07AC2002  
本文收到日期:2007-3-11

震源深度 9 km;  $M_s$  7.2 地震的发震时刻为 16 时 19 分 46 秒,震中位置  $37^{\circ}32'N, 115^{\circ}03'E$ ,震源深度 9 km。邢台地震造成了 8 064 人死亡,38 000 人受伤,毁坏房屋 500 万间,直接经济损失约 10 亿元(张肇诚,1988)。邢台地震使灾区人民的性命财产蒙受了巨大损失,但同时这次地震也成为了我国地震工作的一个重要转折点。周恩来总理两次亲临地震现场视察、慰问,并向地震工作者提出了一定要搞好地震预测、预报的号召。从此,我国的地震工作进入了一个以探索地震短临预报方法并进行试验性预报为特征的新阶段。

2006 年又是我国台湾梅山地震 100 周年(叶永田,郑世楠,1998;郑世楠等,1998;Utsu,2002)。1906 年 3 月 17 日 6 时 42 分(当地时间),在我国台湾省嘉义县南部的梅山镇(震中位置  $23.6^{\circ}N, 120.5^{\circ}E$ ,震源深度 6 km)发生了一次地方性震级  $M_L$  7.1 的强烈地震,震中烈度 IX 度。这次地震几乎夷平了梅山镇,主震及其强烈余震造成了 1 275 人死亡,2 480 人受伤,其中重伤 759 人。梅山地震灾情惨重,但这次地震也成为了台湾岛上第一个有仪器记录及较完整文献记载的灾害性地震(Omori,1907)。

2006 年对于全世界的地震学家来说同样是一个独特的年份。100 年前的 1906 年,全球发生了 4 次 8 级以上的大地震。根据最新的统计资料(Engdahl and Villasenor, 2002),自有现代地震仪器记录以来,上个世纪(1900~1999 年)平均 1 年才发生 0.7 次(或者说大约 3 年才发生 2 次)8 级或 8 级以上的大地震,1 年发生 16 个 7 级或 7 级以上地震,等等。然而 1906 年这一年,全球就发生了 4 次 8 级或 8 级以上的大地震!除了 1906 年 9 月 14 日 16 时 04 分 18.0 秒(协调世界时)在新不列颠岛发生的  $M_w$  8.0 地震(震中位置  $7.0^{\circ}S, 140.0^{\circ}E$ )外,其余 3 次均造成了重大人员伤亡与财产损失(Utsu,2002)。

1906 年 1 月 31 日 15 时 36 分(协调世界时),一次  $M_w$  8.6 地震袭击了厄瓜多尔—哥伦比亚地区(震中位置  $1.0^{\circ}N, 81.5^{\circ}W$ ),致使 1 000 余人死亡。

1906 年 4 月 18 日当地时间 4 月 18 日 5 时 12 分(协调世界时 4 月 18 日 13 时 12 分),在美国西海岸的旧金山地区发生了一次  $M_w$  8.0 ( $M_s$  8.3)地震,震中位置  $37.7^{\circ}N, 122.5^{\circ}W$ ,震中烈度高达 XI 度。地震摧毁了包括旧金山地区在内的美国西海岸的许多大城市,严重毁坏了这些城市中的许多建筑物。在旧金山地区,地震在至少 60 处引发了大火,大火连续燃烧了 3 天 3 夜,烧毁了 42 000 幢房屋。至少有 700 人(早期的报告)、甚而可能高达 3 000 人(最新的估计)在这次地震中丧生,确切的死亡人数至今都未能完全确定。地震学家对这次地震及其伴生的现象进行了广泛深入的研究,提出了关于地震直接成因的“弹性回跳理论”(Reid, 1910),使得旧金山大地震成为了现代地震学的一个重要的里程碑。

1906 年 8 月 17 日 0 时 40 分(协调世界时),当地时间 8 月 16 日 12 时 40 分,在智利的瓦尔普拉斯索(Valparaiso)发生了  $M_w$  8.5 ( $M_s$  8.4)地震,震中位置  $33.0^{\circ}S, 72.0^{\circ}W$ 。3 760 人在这次地震中丧生。智利是全球地震活动最强烈的国家之一。有鉴于此,在这次大地震之前智利政府就已特地聘请国际著名的法国地震学家巴罗(Fernand Montessus de Ballore, 1851~1923)担任该国地震观象台台长。在巴罗的主持下智利开始布设地震台网,开展相关的地震监测与研究,成绩斐然。尽管如此,当时智利朝野对巴罗主事多年竟未能先知瓦尔普拉斯索地震仍深感失望,指责有加。及至巴罗最后病故于任上,也以人不我谅,引为遗憾(翁文灏,1929)。所幸 100 年后的今天,智利特地举行了以他的名字命名的国际学术大会(International Conference Montessus de Ballore 1906 Valparaiso Earthquake Centennial, Santiago 6-8 November, 2006),纪念瓦尔普拉斯索地震 100 周年,缅怀巴罗的历史功绩,也算是一种迟到的理解(Cisternas, 2006)。

在20世纪(1900~1999年),高达180多万人被地震夺去了生命,平均一年约1.8万余人死于地震,经济损失数千亿美元(Kanamori, 1983; Utsu, 2002; National Research Council of the National Academies, 2003; <http://www.earthquake.usgs.gov>)。进入新世纪以来,地震灾害不断,似乎还有愈演愈烈之势。2001年印度古杰拉特(Gujarat)  $M_w$  7.6地震造成了3.5万人死亡、6.7万人受伤、60万人无家可归和约100多亿美元的经济损失。2003年12月26日伊朗巴姆(Bam)地震只有  $M_w$  6.6( $M_s$  6.8)级,却造成了4.1万人死亡,使具有千年历史的巴姆古城毁于一旦。2005年10月8日巴基斯坦  $M_w$  7.6地震,造成了8.6万人死亡,1万余人受伤、9千余人失踪,数百万人无家可归。在2004年12月26日发生的印尼苏门达腊—安达曼(Sumatra-Andaman)  $M_w$  9.1特大地震及其引发的印度洋特大海啸更使约28.3万人丧失生命,令全世界为之震惊!迄今仍余震不断,继续危及生灵。

的确,地震是一种会给人类社会带来巨大灾难的自然现象。地震最突出的特点是它的猝不及防的突发性和触目惊心的巨大破坏力。1835年2月20日15时30分(协调世界时),在智利康塞普森(Concepción)—瓦尔普拉索发生了一次  $M_s$  8.1地震,震中位置  $36.0^\circ\text{S}$ ,  $73.0^\circ\text{W}$ 。地震毁灭了康塞普森城。1835年3月5日,伟大的博物学家、进化论的创始人达尔文(Charles Darwin, 1809~1882)在他著名的贝格尔(Beagle H M S)号环球旅行途中到达了康塞普森,经历了多次余震(达尔文以进化论的创始人闻名于世,但是他也是地震地质学的一位先驱者)。康塞普森—瓦尔普拉索大地震破坏的景象给予达尔文强烈的震撼,他写道(Darwin, 1898):

“通常在几百年才能完成的变迁,在这里只用了一分钟。这样巨大场面所引起的惊愕情绪,似乎还超过了对于受灾居民的同情心。”

在众多的自然灾害中,特别是在造成人员伤亡方面,地震造成的死亡人数占各类自然灾害造成的死亡人数总数的一半以上。地震灾害堪称群灾之首。所以自19世纪70年代后期现代地震学创立以来的130余年里,地震预测一直是地震学研究的主要问题之一,许多地震学家莫不苦思预测地震、预防与减轻地震灾害的方法(Milne, 1880)。特别是自20世纪50年代中期以来,作为一个非常具有现实意义的科学问题,地震预测一直是世界各国政府和地震学家深切关注的焦点(傅承义,刘恢先,1956; Tsuboi et al, 1962; 傅承义, 1963; Press et al, 1965; Press and Brace, 1966; National Research Council of the National Academies, 1976, 2003; Садовский, 1982~1986)。

地震预测是公认的世界性的科学难题,是地球科学的一个宏伟的科学研究目标。如能同时准确地预测出未来大地震的地点、时间和强度,无疑可以拯救数以万计生活在地震危险区人民的生命;并且,如果能预先采取恰当的防范措施,就有可能最大限度地减轻地震对建筑物等设施的破坏、减少地震造成的经济损失,保障社会的稳定和促进社会的和谐发展(陈运泰, 1993)。

通过世界各国地震学家长期不懈的努力,地震预测、特别是中长期地震预测取得了一些有意义的进展。但是地震预测是极具挑战性尚待解决的世界性的科学难题,目前尚处于初期的科学探索阶段,总体水平仍然不高,特别是短期与临震预测的水平与社会需求相距甚远。

本文将在简写本(陈运泰, 2007)的基础上,略加详细但仍是相当简略地介绍地震预测研究进展情况,分析地震预测在科学上遇到的困难,阐述解决这些困难应采取的科学途径,展望地震预测的前景。

# 1 地震预测研究进展

## 1.1 预测与预报

地震预测(预报)不是指像“在某地最近要发生大地震”这类含糊的“预测”、“预报”或说法。不同时指明地震发生的地点、时间和大小(简称为地震“三要素”)并对其区间加以明确界定的“预测”、“预报”,几乎没有什么意义。此外,地震学家还用发震概率来表示预测的可信程度。所以,地震学家把地震预测定义为“同时给出未来地震的位置、大小、时间和概率四种参数”,每种参数的误差(不确定的范围)小于、等于下列数值(Wyss,1991):

位置:±破裂长度;

大小:±0.5 破裂长度或震级±0.5 级;

时间:±20%地震复发时间;

概率:预测正确次数/(预测正确次数+预测失误次数)。

地震预测通常分为长期(10 年以上)、中期(1 年至 10 年)、短期(1 日至数百日及以下)(Knopoff,1996a)。有时还将短期预测细分为短期(10 日至数 100 日)和临震(1 日至 10 日及以下)预测。长、中、短、临地震预测的划分主要是根据需人为地划分的,界线既不是很明确、也并不完全统一。在我国,以数年至 10 年、20 年为长期、1 年至数年为中期、数月为短期,数日至 10 几日为临震(梅世蓉等,1993)。在国外,也有以数年至数 10 年为长期、数周至数年为中期、数周以下为短期的(Wallace et al, 1984; Kisslinger,1989; Geller, 1997)。实际上,许多地震预测方法所用的地震前兆涉及的时间尺度并不正好落在上述划分法规定的范围内,而是跨越了上述划分法规定的界线。在公众的语言中,甚至在专业人士中,对“地震预测”和“地震预报”一般不加区分,并且通常指的就是这里所说的“地震短、临预测”。在国际上,一些地震学家把不符合上述定义的“预测”、“预报”等等通通称作“预报”(forecast)。例如对在一段长时期内的某一不确定的时间发生地震的概率做出估计就属于这种类型的“预测”——按这种叫法便应当叫做“预报”。提出美国加州中部帕克菲尔德(Parkfield)在(1988±4.3)年间会有一次 6 级地震(Bakun and McEvilly, 1979, 1984; Bakun and Lindh, 1985),按这种叫法也是一种“预报”。若照这种说法,“长期预测”和“中期预测”便应当称作“长期预报”和“中期预报”。在我国,也有把科学家对未来地震发生的地点、时间、大小和概率所做的相关研究的结果称作“地震预测”,而把由政府主管部门依法发布的有关未来地震的警报称作“地震预报”。在地震长期预测中,通常只涉及在正常情况下地震发生的概率。这种“预测”并非是广大公众最为关注的、能有足够的时间采取紧急防灾措施(如让居民有足够时间撤离到安全地带等等)的“地震短、临预报”。即使如此,这种“预测”对于地震危险性评估、地震灾害预测、抗震规范制定、地震保险等等,也是十分有用的。在评估地震预测(地震是真报对了还是碰运气碰上的?)时,“目标震级”的大小是很重要的。理由很简单:因为小地震要比大地震多得多(一般地说,在某一地区某一时间段内,某一震级地震的数目是震级比它大 1 级地震的数目的 8 至 10 倍)、因而更容易碰巧报对!在给定的地区和给定的时间段内要靠碰运气报对一个  $M_w$  6.0 的地震并非易事,而靠碰运气“对应上”一个  $M_w$  5.0 的地震的“预测”还是很有可能的。

## 1.2 地震长期预测

**1.2.1 地震空区。**在地震长期预测方面,最突出的进展是板块边界大地震空区的确认。在环太平洋地震带,几乎所有的大地震都发生在利用“地震空区”方法预先确定的空区内(Sykes,

1971,1978; Sykes and Nishenko,1984; Nishenko, 1989,1991)。在我国,板内地震空区的识别也有一些成功的震例(陈章立等,1981;陆远忠等,1985;梅世蓉等,1993)。

地震是地下岩石中的“应变缓慢积累—快速释放”的过程(Reid,1910)。对地震过程的这一认识是“地震空区”方法的物理基础。基于这一认识可以推知:在指定的一段断层上,将会准周期性地发生具有特征大小与平均复发时间的地震。这种地震称作“特征地震”。特征地震的大小(震级)可以由在该段断层上已发生过的特征地震的震级予以估计,也可以根据该段断层的长度或面积予以估计。特征地震的平均复发时间可以由相继发生的两次特征地震的时间间隔予以估计,也可以由地震的平均滑动量除以断层的长期滑动速率予以估计。“地震空区”指的是在时间上已超过了平均复发时间、但仍未以特征地震的方式破裂过的一段断层。1906年,地震预测的先驱者、著名的日本地震学家今村明恒(Imamura A)在他所写的一篇论文中曾确认东京近海的相模湾(Sagami Bay)为地震空区,成功地预报了1923年 $M_s$  8.2关东(Kanto)大地震(亦称东京大地震)。今村明恒还曾经成功地预报了1944~1946年日本南海道(Nankaido)大地震(Imamura, 1928;Nishenko,1989)。前苏联的费道托夫(Федотов С А)是第一位用现代地震科学原理阐明地震空区概念的地震学家(Федотов, 1965)。他研究了1904~1963年间沿日本—千岛群岛—堪察加岛弧一带浅源地震震源区的空间分布,发现这些大地震的震源区基本上是连续分布的。他认为大地震震源区之间的空隙区便是未来最可能发生大地震的地区,称作“地震空区”。费道托夫在他1965发表的论文(Федотов, 1965)的一幅地图中指出了未来可能发生大地震的地区。他的预测很快就在3个地方得到验证,即1968年5月16日日本十胜—隐岐(Tokachi-Oki) $M_w$  8.3地震,1969年8月11日南千岛群岛 $M_w$  8.2地震,以及1971年12月15日堪察加中部 $M_w$  7.8地震。

20世纪60年代板块大地构造学说的确立为根据板块边界的地形变与历史地震活动性“收支”平衡情况估算在地质年代里板块边界的地形变速率提供了精确的运动学参考框架。Sykes和他的同事(Sykes,1971,1978; Sykes and Nishenko, 1984; Nishenko,1989,1991)将1957,1964和1965年发生于阿留申海沟的3次地震的滑动量除以北美板块与太平洋板块之间的相对运动速率,得出在这3段断层上地震的平均复发时间都约为100年。他们运用海底磁异常条带资料以及经过准确定年的地磁场反向时间表等全球性的资料,在1973和1979年得出了有关最近可能会发生大地震的板块边界段的预报结果(Kelleher et al,1973; McCann et al, 1979),并且在1991年出版了经改进后的预报结果(Nishenko,1991)。

各个断层或断层段的表现是不同的(Schwartz and Coppersmith,1984)。按照特征地震的概念,对于特定的一段断层,断层上的滑动量主要是通过具有类似的震级、破裂面积和平均滑动量的特征地震释放出来的。这样一来,相对于比它大的和比它小的地震,特征地震必定比按古登堡(Gutenberg B)—里克特(Richter C L)关系式预期的多得多,可是这与迄今在所有的地区几乎都观测到地震服从古登堡—里克特关系式所表示的分布相矛盾。对此,Wesnousky及其同事解释说,由于断层段服从幂律分布,所以在一个地区的地震还是按古登堡—里克特关系式分布的(Wesnousky et al,1983;Wesnousky,1994;Kagan and Wesnousky,1996)。

特征地震的概念对于地震物理学与地震灾害评估有着重要的意义。在地震灾害的评估中,特征地震的平均复发时间是一个很重要的物理量。上一个特征地震的发震时间好比是一只“地震钟”的“零时”。从这个“零时”开始,与这个特征地震类似的下一个特征地震的发生概率即可予以估计。但是,对于按古登堡—里克特关系式分布的地震来说,就不能用“地震钟”这

样一种简单方法来估算下一个地震发生的概率,因为对于任何一个震级的地震来说,便应当有许多个震级比它略小、但其特征并无不同的地震。不过特征地震的频度应当比按古登堡—里克特关系式分布的地震的频度高以及特征地震的震级这两个特征也很难用实际震例的资料予以检验。

作为地震长期预测的一种方法,特征地震方法取得了一定程度的成功。用这个方法预测大地震原理很直观,看上去很简单,做起来似乎也很容易。但是要把它推广应用仍有一定的困难,因为不易确定特征地震的震级并且缺少估计复发时间所需的完整的地震记录资料。此外,由于地震过程内禀的不规则性以及地震的发生具有“空间—时间群聚”的趋势,所以在实际应用地震空区假说同时预测特征地震的震级与发震时间时仍有困难。地下岩石中的“应变缓慢积累—快速释放”的概念意味着在指定的一段断层上错动将周期性地发生,这个结果是基于依次发生的地震的应力降和两次地震间应力积累的速率两者都是常量的假定。但是,在实验室内做的岩石粘—滑实验表明两次地震事件之间的时间间隔是变化的,应力降是不完全、不规则的,“初始应力”(震前应力)与“最终应力”(震后应力)都是不均匀的。如果初始应力均匀但震后应力不均匀那么只有地震发生的时间是可以预测的(这种情形称作“时间可预测模式”)(Bufe et al, 1977);如果初始应力不均匀但震后应力均匀,那么只有地震的震级是可以预测的(这种情形称作“震级可预测模式”)(Shimazaki and Nakata, 1980)。

**1.2.2 “东海大地震”。**沿日本西南海岸的南海海沟,在过去的500年间重复发生过多次大地震,包括1498, 1605, 1707, 1854和1944~1946年地震,平均复发时间约为120年。在20世纪70年代初期,一些日本地震学家指出,1944~1946年间发生的几次大地震比1854和1707年的地震小。他们认为,1944~1946年地震的破裂并没有到达南海海槽的东北部、叫做骏河(Suruga)海槽的地方,所以他们推断在板块边界的这一地段、现在称为“东海大地震空区”的地方,不久的将来将有可能发生一次震级 $M \approx 8$ 地震。这就是日本地震学家预报中的“东海大地震”(Mogi, 1970, 1981, 1985; Ando, 1975; Utsu, 1977; Matsumura, 1997)。

1978年6月,日本政府通过了一个以地震预报为前提的、预防和减轻地震灾害为目的的大型地震对策法案,称作“大地震对策特别措施法”,从1978年12月14日开始实行。该法案制定了很详细的应急反应计划以及发布短期预报的步骤,其中最重要的一点是:当监测前兆的网络观测到异常时,由专家组成的专门委员会(原先称作“东海地震判定会”,现在称作“地震防灾对策强化地区判定委员会”)最晚在1小时后就举行会议,会议在最长30分钟内就得做出判定,判定该异常是不是所预测的“东海大地震”的前兆。如果判定是“东海大地震”的前兆,就得整理成“地震预报情况”材料经由气象厅长报告内阁总理大臣。内阁总理大臣收到报告后,要立即在内阁会议上发布“警戒宣言”,并启动应急反应计划。

自1978年到现在已过了28年,迄今仍未检测到需要启动应急反应计划的异常,一次也没有开过紧急判定会议(不过,判定委员会还是每月召开一次例行的碰头会)。著名的地震预测专家、判定委员会主席茂木清夫(Mogi K)对该委员会能否履行其判定东海大地震短临前兆的功能表示怀疑,并于1997年辞去该委员会主席职务,黯然下台。然而,继任的新主席溝上惠(Mizoue M)也持有类似观点。日本国土地理院于1997年公布了一个报告。报告说,在日本目前还做不到像“地震对策法案”所要求的短期预报,并且什么时间能做到也不得而知。

东海大地震的预报实践表明,即使对于像这样一种发生于板块边界的、看上去很有规律的历史地震序列,准确的预报也是很困难的。

**1.2.3 帕克菲尔德地震。**帕克菲尔德地震的预测也是基于“地震空区”理论。在美国西海岸圣安德列斯断层靠近帕克菲尔德(在 20 世纪 80 年代时是一个居民仅 37 人的小镇)的一段断层上,有仪器记录以来发生过 3 次  $M \approx 6$  地震,即:1922,1934,1966 年帕克菲尔德地震;而在有仪器记录以前,也发生过 3 次  $M \approx 6$  地震,即:1857,1881 和 1901 年帕克菲尔德地震。平均每 22 年便规则地发生一次帕克菲尔德地震。帕克菲尔德平均 22 年便发生一次  $M \approx 6$  地震的规则性以及 1934 年与 1966 年的帕克菲尔德地震的前震活动性图像之间的相似性使得地震学家相信这些帕克菲尔德地震是以大约相同的滑动量、相隔大约 22 年在同一段断层的破裂。由“同震位移”与断层滑动速率的比值求出的地震复发时间也是大约 22 年(Bakun and McEvilly,1979,1984; Bakun and Lindh,1985)。根据这些资料以及其它有关资料,美国地质调查局(USGS)在 1984 年发出正式的地震预报(Shearer,1985),明确指出在圣安德列斯(San Andreas)断层靠近帕克菲尔德的一段断层上,在(1988 $\pm$ 4.3)年(即最晚在 1993 年初之前)将发生一次  $M \approx 6$  地震,发震概率约为 95%。

到了 1993 年年底,预报中的帕克菲尔德地震还没有发生。美国地质调查局于是宣布“关闭”帕克菲尔德地震预报的“窗口”。年复一年,“盼望”中的帕克菲尔德地震一直不来,为此,地震学家对帕克菲尔德地震迟迟未发生提出了许多解释。例如,一种解释是:1983 年发生于加州科林佳(Coalinga)的地震可能缓解了帕克菲尔德地区的应力(Simpson et al,1988)。另一种解释是:1906 年旧金山大地震后应力的松弛效应推迟了帕克菲尔德地震的发生(Ben-Zion et al,1993)。再一种解释是:帕克菲尔德地震序列可能根本就不是特征地震,而是一种随机发生的事件(Kagan,1997)。

**1.2.4 1989 年洛马普列塔地震。**1989 年 10 月 18 日美国加州洛马普列塔(Loma Prieta) $M_w$  6.9 ( $M_s$  7.1)地震被认为是一次成功预报了的地震。这次地震发生于 1906 年旧金山大地震破裂带南端的一段断层上。在洛马普列塔地震发生前,许多地震学家和研究集体曾经对这段断层做过详细的研究,他们注意到:在这段断层上,1906 年旧金山大地震的地表破裂的滑动量比北段的小,表明在这一段断层积累的应变在 1906 年旧金山大地震时没有完全释放完;并且在这一段小地震又明显地少,这种现象通常是大地震之前的地震活动图像。据此他们发出了中长期地震预报,认为在未来 20 年内在这一段断层上会发生一次  $M$  6.5 地震,发震概率是 30%(Lindh,1983;Sykes and Nishenko,1984;Working Group on California Earthquake Probabilities,1988)。在有关这次地震预报的报告发表 2 年后便发生了洛马普列塔地震,因此这次地震被认为是成功预报了的。不过也有人认为,因为洛马普列塔地震与预报的并不准确地相符,所以仍然不能排除是碰运气碰上的。的确,这次地震不是发生在圣安德列斯断层系的主断层上,而是发生在一条叫做萨尔根特(Sargent)的次要断层上,该断层以约  $70^\circ$  的倾角向西南倾斜,与圣安德列斯断层不相交,断层错动的倾滑分量也相当大,与以右旋走滑为主的圣安德列斯断层不一致。此外,历史应变资料表明,这一段断层的地表破裂的错动量虽然比北段小,但从地壳深部的情况看,在 1906 年旧金山大地震时,在地壳深部已发生了相当大的滑移,所以可能并没有“节余”下多少滑动量给所预报的这次地震(Harris,1998)。

### 1.3 地震中期预测

**1.3.1 应力影区。**由地震空区模式可以推知,地震的发生受到先前发生的地震所引起的应力变化的影响而加速或减速。如果大地震的发生降低了破裂带附近某区域的应力,从而降低了该区域发生地震(既包括比该地震大的地震、也包括比该地震小的地震)的可能性,直至该区域

内的应力得以恢复为止。这便是“应力影区”模式(Harris and Simpson, 1996, 1998; Deng and Sykes, 1997)。应力影区模式不同于地震空区模式,它不仅涉及断层段,而且也涉及其周围区域。此外,由于应力是张量,所以地震的发生既可能使某些断层段上应力增加,也可能使某些断层段上应力减小。在靠近已破裂的断层段的某些区域,应力实际上是增加的,从而应力影区模式对“地震群聚”现象提供了一种物理上说得通的解释。目前,运用应力影区模式对许多地震序列做了很有意义的回溯性的研究,不过尚未被用于地震预报试验。这是因为,地壳中的应力分布的图像与先前发生过的地震破裂的详细情况、断层的几何情况、地壳中的应力—应变关系、地下流体的流动对地震引起的应力变化的响应以及其它诸多难以测定的因素有关。

**1.3.2 地震活动性图像。**地震活动性图像是用得最多的一种地震预测方法。之所以用得最多,部分原因是比较可靠的地震活动性资料几乎随处可得。茂木清夫(Mogi, 1985)提出,一次大地震之后接着是频度随时间逐渐减少的余震,然后是长期平静期(第一次平静期),这个平静期后依次是:未破裂带地震活动性增加,中期平静期(第二次平静期),前震活动期,短期平静期(第三次平静期),最后是大地震。这就是地震活动性图像的“茂木模式”。茂木清夫(Mogi, 1985)描述过一系列地震活动性图像的实例以至许多人以为可以用他所描述的地震活动性图像来确认大地震轮回演化的阶段,从而预报地震。日本的 Ohtake 等(1977, 1981)利用茂木模式曾成功地预报了 1978 年墨西哥南部瓦哈卡(Oaxaca)  $M 7.7$  地震。不过,也有人认为这只是一次表面上的成功,因为在 1967 年全球有一些大的地震台网停止运作致使全球地震记录的总体情况发生了重大的变化,由此得出的地震活动性图像所反映的前兆的真实性被复杂化了(Habermann, 1988)。特别需要指出的是,在实际发生的地震震例中,茂木模式所描述的任何—一个阶段都有可能缺失;并且,各个阶段尚未有公认一致的、可被客观地运用的定义;此外,迄今也还没有对茂木模式进行过全面的检验。

**1.3.3 图像识别。**克依利斯-博罗克(Кейлис-Борок В И)及其俄国同事提出了一种称作强震发生“增加概率的时间”(Time of Increased Probability, 缩写为 TIP)的中期预测方法,运用计算机进行图像识别,以识别出大地震即将来临前的信息(Keilis-Borok and Kossobokov, 1990; Healy et al, 1992; Kossobokov et al, 1999)。他们提出了为预测全球 8 级以上大地震而设计的“M8 算法”以及为预测美国加州和内华达州而设计的“CN 算法”,在地震活动区中预先给定的范围(圆圈)内对地震目录进行扫描,寻找地震发生率的变化、大小地震比例的变化、余震序列的活动度与持续时间、以及可用作诊断的其它标志。他们报告说,在他们预测的未来比较可能发生大地震的那些范围(圆圈)内取得了意义重大的成功。从 1999 年开始他们对阈值为  $M 7.5$  和  $M 8.0$  的地震做提前 6 个月的预测。例如,运用这个方法,克依利斯-博罗克及其同事对 2003 年 9 月 25 日发生在日本北海道的  $M 8.1$  大地震以及加利福尼亚中部 2003 年 12 月 22 日圣西蒙(San Simeon)  $M 6.5$  地震在震前做出了预报,并取得了成功(Keilis-Borok and Shebalin, 2003)。特别是,预报圣西蒙地震的、题为“关于加州岩石层的现状”的报告是在该地震前 6 个月,即 2003 年 6 月 21 日提交给一个由著名科学家组成的专家组的。

#### 1.4 地震短、临预测

**1.4.1 地震前兆。**在地震发生前,常常可以观测到一些异常,如地应变加速或地面隆升、重力场变化、磁场变化、电场变化、地下电阻率变化、地下水位变化、地下流体流动、地下水化学成分变化、大气化学成分变化以及其它一些可能对应力、对岩石中的裂纹或岩石的摩擦特性的变化敏感的参数的变化。这些异常称作地震前兆,或者说,可能的地震前兆。通常认为,地震前兆



反映的可能是地下岩石临近破裂时的应力状态。在地震预测中用于检测地震前兆的主要方法是地球物理方法,此外还有大地形变测量、地球化学等方法。在地震预测实践中,多年来,地震学家一直在致力于探索“确定性的地震前兆”,即任何一种在地震之前必被无一例外地观测到、并且一旦出现必无一例外地发生大地震的异常。

美国在 1964 年 3 月 27 日阿拉斯加  $M_w$  8.5 大地震之前并不重视地震预测工作。阿拉斯加大地震后,美国开始重视并逐渐加强地震预测研究。1965 年 Press 等(1965)提出了地震预测和震灾预防研究十年计划(《地震预测:十年研究计划建议书》)。1977 年美国国会通过了《减轻地震灾害法案》,把地震预测工作列为美国政府地震研究的正式目标(Allen, 1982)。特别是在 1970 年代,紧接着前苏联报导了地震波波速比(纵波速度  $V_P$  与横波速度  $V_S$  的比值  $V_P/V_S$ )在地震之前降低之后(Семенов, 1969; Нерсесов и три, 1969),美国纽约兰山湖地区观测到了震前波速比异常(Aggarwal et al, 1975),随之而来的大量有关震前波速异常、波速比异常等前兆现象的报导和膨胀—扩散模式、膨胀—失稳模式等有关地震前兆的物理机制的提出(Scholtz et al, 1973; Mjachkin et al, 1975),以及 1975 年中国海城地震的成功预报,在美国乃至全世界范围内掀起了地震预测研究的热潮,甚而乐观地认为“即使对地震发生的物理机制了解得不是很透彻(如同天气、潮汐、火山喷发预测那样),也可能对地震做出某种程度的预报”(Press, 1975, 1976; National Research Council of the National Academies, 1976)。当时,许多著名的地球物理学家都深信:系统地进行短、临地震预测是可行的,不久就可望对地震进行常规的预测,关键是布设足够的仪器以发现与测量地震前兆。但是很快就发现地震预测的观测基础和理论基础都有了问题:对报导的波速比异常(Whitcomb et al, 1973)重新做测量时发现结果重复不了(Allen and Helmberger, 1973);对震后报导的大地测量、地球化学和电磁异常到底是不是与地震有关的前兆产生了疑问;由理论模式以及实验室做的岩石力学膨胀、微破裂和流体流动实验的结果得不出早些时候提出的前兆异常随时间变化的进程(Rice and Rudnichi, 1979)。到了 20 世纪 70 年代末,大多数早先提出的可能的地震前兆都被确认为对地震短、临预测价值不大。

从 1989 年开始,国际地震学与地球内部物理学协会(IASPEI)下属的地震预测分委员会,组织了由 13 名专家参加的工作小组,对各国专家自己提名的有意义的地震前兆进行了严格的评审(Wyss, 1991, 1997; Wyss and Booth, 1997)。这个专家小组把地震前兆明确地定义为“地震之前发生的、被认为是与该主震的孕震过程有关联的一种环境参数的、定量的、可测量的变化”。第一轮(1989~1990)对各国专家自己提名的认为是有意义的 28 项地震前兆作了评审,第二轮(1991~1996)10 项,两轮共 37 项(第二轮中有一项在第一轮中已评审过)。按照这个专家小组评定的结果,只有 5 项被通过认定。这 5 项可分为 3 类。第一类是地震活动性图像,包括:①震前数小时至数月的前震(foreshocks),例如 1975 年 2 月 4 日中国辽宁海城  $M_s$  7.3 地震的前震(吴开统等, 1976);②震前数月至数年的“预震”(preshocks),例如 1988 年 1 月 22 日  $M_s$  6.7 澳大利亚 Tennant Creek 地震(Bowman, 1997);③强余震之前的地震“平静”(Matsu'ura, 1986)。第二类是地下水的特性,只有一项,即:④1978 年 1 月 14 日日本伊豆一大岛近海  $M_s$  7.0 地震前地下水中氡气含量减少、水温下降(Wakita et al, 1988, 1991)。第三类是地壳形变,也只有一项:⑤地壳形变,例如 1985 年 8 月 4 日美国加州 Kettleman 山地震前地下水上升反映的地壳形变(Roeloffs and Quilty, 1997)。对于地应变、地倾斜、地壳运动等则未能做出决定,而对于尾波、Q 值、S 波分裂、潮汐应变振幅、震群、自然电位、地电阻率和地

磁场、电磁辐射、应变对降水量的响应、高程变化、地面垂直运动、断层蠕动、地壳形变(海平面变化—地震)、干旱—地震等则未予以认定。评审未予以通过并非说所提名的这些前兆方法一定毫无用处,只表明根据评审专家和专家小组的意见,该方法目前尚未成熟、尚不能完全确信所提名的前兆是否真是前兆。即使被确认为“有意义的地震前兆”的5项,并不意味着即可用以预报地震。例如,前震无疑是地震的前兆,但是如何识别前震仍然是一个待解决的问题。

**1.4.2 帕克菲尔德地震预测试验场。**20世纪80年代以后,对地震前兆的研究重点转移到寻求大地震前的暂态滑移前兆。基于详细的实验室滑移实验和模拟计算以及对1966年帕克菲尔德地震现场的定性的野外考察,一些地震学家认为大地震前会有暂态滑移前兆(Dieterich, 1978; Rice, 1979)。在实验室条件下观测到的震前暂态滑移量是很微小的,但是理论计算表明,在有利的条件下,如果在实验室里观测到的临界暂态滑移量可以随着岩石样品中的裂纹放大到天然地震断层那么大的尺寸而成比例地放大,那么临界暂态滑移在野外是可能被观测到的。为研究这些问题,美国地质调查局(USGS)在帕克菲尔德建立了地震预测试验场,在靠近所预测的帕克菲尔德地震未来震中的地方用大地测量方法、应变仪、倾斜仪等前兆仪器作长期、连续、精确的地壳应变测量,希望能记录下任何可能的前兆性滑移的应变资料以验证理论。

如前所述,到了1993年年底,预报中的帕克菲尔德地震一直没有发生,美国地质调查局于是宣布“关闭”了这个地震预报的“窗口”。虽然如此,幸运的是,对预报中的帕克菲尔德地震的监测工作并没有“关闭”,设置在帕克菲尔德地震预测试验场的台网继续坚持地震前兆的监测工作(Lindh, 2003)。2004年9月28日17时15分24秒(协调世界时),地震学家在加州中部帕克菲尔德地震试验场守候多年的 $M_w$  6.0地震(震中位置 $35.815^\circ\text{N}$ ,  $120.374^\circ\text{W}$ ,震源深度7.9 km)终于发生了。帕克菲尔德地震姗姗来迟,比预测的时间晚了整整11年,但是无论如何还是来了。虽然在震前未检测到、至今也仍未分析出有地震前兆,但是由多种仪器设备构成的复杂的前兆台网记录下了有史以来记录最为翔实的一次地震从发震前至发震时乃至发震后的全过程,取得了地震活动性、地应力、地磁场、地电场、地下水、地震引起的强烈地面运动等等的完整的记录。这些记录对于了解地震破裂是如何开始的、如何传播的、又是如何停止的,对于增进对断层、地形变、震源物理过程、地震预测、预防和减轻地震灾害的认识,提供了很有价值的资料(Bakun et al, 2005; Lindh, 2005)。

**1.4.3 帕克菲尔德地震预测试验的启示。**帕克菲尔德地震的预测试验经历了从预测研究(1979~1984)、发布预报(1985)、全面展开地震监测(1985)、地震迟迟不发生,于是关闭预报“窗口”(1993)直至预报中的地震发生(2004),长达四分之一世纪的漫长历程。从帕克菲尔德地震试验场的地震预报实践,我们可以看到:

(1)与以前发生的6次帕克菲尔德地震比较,2004年9月28日帕克菲尔德地震的震级( $M_w$  6.0)与这些帕克菲尔德地震的震级相近;地点一致,破裂也发生在同一段断层上;此外,这次地震的余震与1934年与1966年帕克菲尔德地震的余震很相似。所以可以说,帕克菲尔德地震的震级和破裂范围是预报对了。但是发震时间很明显没有报对,晚了整整11年!这表明,地震学家迄今对于特征地震在一段断层上重复发生的时间(复发时间)为什么会有这么大的起伏变化仍缺乏认识,特征地震的中长期预测模型有待改进。

(2)2004年帕克菲尔德地震破裂段的两个端点与以前发生的帕克菲尔德地震一样;破裂方式也一样,都是从一端起始、然后往另一端扩展的“单侧破裂方式”。但是,与以前发生的帕克菲尔德地震不同,这次地震的破裂不是从北端起始、然后往南端扩展;正相反,它是从南端起

始、然后往北端扩展的。这说明,地震学家对地震破裂起始与扩展的规律尚缺乏了解,单凭经验是无法正确预测未来地震的破裂起始点、终止点以及破裂扩展方向的。这是从帕克菲尔德地震预测试验得到的新的认识。这一新的认识对于地震灾害预测、对防震减灾至关重要!今后在震害预测中,再不能只根据以往的震例轻易假定未来地震的破裂扩展方向;要加强对地震破裂起始、终止与扩展规律的研究。

(3)2004年帕克菲尔德地震发生在预先精心设计的密集的地震观测台网与前兆观测台网内。布设这些台网的目的本来就是为了检测前震及其它各种可能的地震前兆的。但是从震前直至今天仍未检测到地震前兆。诚然,一方面,仍需进一步仔细分析记录资料;但是,另一方面,这种情况至少表明帕克菲尔德地震没有明显的地震前兆。联想到在世界各地,在像美国、日本这样的经济实力雄厚、科学技术先进的发达国家的地震危险区内,地震观测台网与前兆观测台网密布,地震区内的地质构造情况一般都认为研究得相当透彻,这些国家的地震学家一直在努力寻找、检测在中等( $M_w$  5至 $M_w$  7)与中等以上地震之前可能的地震前兆,特别是前兆性的应变异常变化。既然迄今未能检测到这种变化,这至少说明可靠的地震前兆的确是很不容易检测出来的。沿着这一方向继续寻找前兆的努力固然不能轻言放弃;但是,另辟蹊径、提出新的思路、探索新的方法,却是应当予以提倡鼓励的。

(4)帕克菲尔德地震预测试验表明“特征地震”的概念对于地震预测可能很有意义。不过,上面已提到,关于“特征地震”仍有不少争议。同时,我们也不要忘记,在一个地区成功的经验不一定适用于其它地区,就像1975年我国海城地震的经验性预报成功的经验不适用于1976年唐山地震一样。所以,在我国,乃至在像日本、土耳其等地地震活跃的国家或地区,选准试验场所,开展并长期坚持像帕克菲尔德地震预测试验场那样的地震预测试验研究,是非常有必要的。这样做,可望获得在不同构造环境下断层活动、地形变、地震前兆、地震活动性等等的十分有价值的资料,从而有助于增进对地震的了解、攻克地震预测难关。

## 2 地震预测的困难与地震的可预测性

### 2.1 地震预测的困难

地震预测是公认的科学难题。那么,它究竟难在哪里?它为什么那么难?归纳起来,地震预测的困难主要有如下三点:地球内部的“不可入性”;大地震的“非频发性”;地震物理过程的复杂性。

**2.1.1 地球内部的“不可入性”。**地球内部的“不可入性”是古希腊人的一种说法。我们在这里指的是人类目前还不能深入到处在高温高压状态的地球内部设置台站、安装观测仪器对震源直接进行观测。“地质火箭”、“地心探测器”已不再是法国著名科幻小说作家儒勒·凡尔纳小说中的科学幻想,科学家已经从技术层面提出了虽然大胆、然而比较务实的具体构想(Stevenson, 2003),只不过是目前尚未提到实施的议事日程上罢了。迄今最深的钻井是前苏联科拉半岛的超深钻井,达10 km,德-捷边境附近进行的“德国大陆深钻计划”预定钻探15 km。和地球(平均)半径(6 370 km)相比,超深钻所达到的深度还是“皮毛”,况且这类深钻井并不在地震活动区内进行,虽然其自身有重大的科学意义,但还是解决不了直接对震源进行观测的问题。国际著名的俄国地震学家伽利津(Галицын Б)曾经说过(Галицын, 1912; Саваренский и Кирнос, 1955):

“可以把每个地震比作一盏灯,它燃着的时间很短,但照亮着地球的内部,从而使我们能观

察到那里发生了些什么。这盏灯的光虽然目前还很暗淡,但毋庸置疑,随着时间的流逝,它将越来越明亮,并将使我们能明了这些自然界的复杂现象……”。

这句话非常动人!这个比喻十分贴切!不过,话虽然可以这么说,真要做起事情来却没有这么简单。因为地震的地理分布并不是均匀的,全球的地震主要发生在环太平洋地震带、欧亚地震带以及大洋中脊地震带这三条地震带,并不是到处都有“灯”,所以地震这盏“灯”并没有能够把地球内部的每个角落全照亮!何况地球表面的约70%为海洋所覆盖,地震学家只能在地球表面(在许多情况下是在占地球表面面积仅约30%的陆地上)和距离地球表面很浅的地球内部(至多是几千米深的井下)、用相当稀疏、很不均匀的观测台网进行观测,利用由此获取的、很不完整、很不充足、有时甚至还是很不精确的资料来反推(“反演”)地球内部的情况。地球内部是很不均匀的,也不怎么“透明”,地震学家在地球表面上“看”地球内部连“雾里看花”都不及,他们好比是透过浓雾去看被哈哈镜扭曲了的地球内部的影像。凡此种种都极大地限制了人类对震源所在环境及对震源本身的了解。

**2.1.2 大地震的“非频发性”。**大地震是一种稀少的“非频发”事件,大地震的复发时间比人的寿命、比有现代仪器观测以来的时间长得多,限制了作为一门观测科学的地震学在对现象的观测和对经验规律的认知上的进展。迄今对大地震之前的前兆现象的研究仍然处于对各个震例进行总结研究阶段,缺乏建立地震发生的理论所必需的切实可靠的经验规律,而经验规律的总结概括以及理论的建立验证都由于大地震是一种稀少的“非频发”事件而受到限制。作为一种自然灾害,人们痛感震灾频仍;可是等到要去研究它的规律性时,又深受“样本”稀少之限(当然,这句话的意思不是说希望多来大地震)!

**2.1.3 地震物理过程的复杂性。**从常识上说,不言而喻,地震是发生于极为复杂的地质环境中的一种自然现象,地震过程是高度非线性的、极为复杂的物理过程。地震前兆出现的复杂性和多变性可能与地震震源区地质环境的复杂性以及地震过程的高度非线性、复杂性密切相关。

从专业技术的层面具体地说,地震物理过程的复杂性指的是地震物理过程在从宏观至微观的所有层次上都是很复杂的。例如,宏观上,地震的复杂性表现在:在同一断层段上两次地震破裂之间的时间间隔长短不一,变化很大,地震的发生是非周期性的(Sornette and Knopoff, 1997);地震在很宽的震级范围内遵从古登堡—里克特定律;在同一断层段上不同时间发生的地震其断层面上滑动量的分布图像很不相同;大地震通常跟着大量的余震,而且大的余震常常还有自己的余震;等等。就单个地震而言,地震也是很复杂的,如:发生地震破裂时,破裂面的前沿的不规则性;地震发生后断层面上的剩余应力(震后应力)分布的不均匀性,等等。在微观上,地震的复杂性表现在:地震的起始也是很复杂的,先是在“成核区”内缓慢地演化,然后突然快速地动态破裂、“级联”式地骤然演变成一个大地震。这些复杂性是否彼此有关联?如果有,是什么样的关系?非常值得深究。从基础科学的观点来看,研究地震的复杂性有助于深入理解地震现象和类似于地震的其它现象的普适性;反过来,对于地震现象和类似于地震的其他现象的普适性的认识必将有助于深化对地震现象的认识从而有助于预防与减轻地震灾害。

## 2.2 地震的可预测性

在物理学中,把物理系统的演化对初始条件高度敏感的非线性依赖性称为“混沌”。混沌对于许多物理现象的可预测性是一种内禀的限制。地震学家早在混沌这个物理概念广为应用

之前凭借直觉就已经熟知这一概念(Richter, 1955)。一些专家认为(例如, Bak et al, 1987, 1988; Bak and Tang, 1989; Bak, 1996), 地震系统与其他许多系统一样, 都属于具有“自组织临界性”(self-organized criticality, 缩写为 SOC)的系统, 即在无临界长度标度的临界状态边缘涨落的系统。在具有“自组织临界性”的系统中, 任何一个小事件都有可能以一定的概率“级联”式地演化成大事件。“级联”是否发生与整个系统内的所有细节有关, 而不仅仅是与大事件及其邻近区域的细节有关; 整个系统内的所有细节虽然从理论上说是可以测量的, 但是因为需要测量的细节的数量是如此之多以至于实际上是不可能——准确地测量的; 并且人们迄今仍然不了解其中的物理定律。因此, 从本质上说, 具有自组织临界性的现象是不可预测的。值得注意的是, 具有自组织临界性的系统中的临界现象普遍都遵从像地震学中的古登堡—里克特定律那样的幂律分布。

地震是地下岩石的破裂过程。在震害学中, 表示地震数目多少(频度)与地震大小(震级)之间关系的古登堡—里克特定律表明地震频度与破裂的尺度遵从幂律关系, 这意味着地震在空间域上的分布是分形的。在震害学中, 还有另外一条定律, 即表示余震的频度随时间作指数衰减的、修正的大森房吉(Omori F)定律。大森定律意味着地震在时间域上的分布也是分形的。据此, 一些专家认为: 地震无论是在空间域上还是在时间域上都具有典型的分形结构, 并不存在一个特征的长度标度, 所以地震是一种自组织临界现象; 地震系统与其他许多系统一样, 都属于具有“自组织临界性”的系统。进一步他们认为, 既然自组织临界现象具有内禀的不可预测性, 所以地震是不可预测的; 既然地震预测很困难, 甚至是不可预测的, 那么就应当放弃它, 不再去研究它(Geller, 1997)。

可是, 地震是不是一种自组织临界现象, 这不是一个靠“民主表决”、“少数服从多数”可以解决的问题! 多数人认为地震是一种自组织临界现象, 并不能说明地震就是一种自组织临界现象(Knopoff, 1999)! 地震的自组织临界性的最重要的观测依据是由古登堡—里克特定律推导出的幂律, 但这个幂律实际上只是一种表现现象。从这个实际上是表现现象的幂律出发, 认为地震除了受到一个地区所能支持的最大震级的限制以外, 不存在特征尺度、具有“标度不变性”的结论是一种错误的观念。关键的问题之一是没有考虑到余震的效应。Knopoff(1999)指出, 通常我们看到的地震活动性图像中, 很多地震实际上是过去发生的大地震的余震, 必须把这些余震的“账”算清楚, 算到大地震——它们的主震上, 才能给出符合真实情况的地震分布的图像。在细致地研究了余震的效应之后, Knopoff(1999)发现地震现象并不是不存在特征尺度, 而是至少存在 4 个特征尺度: ①相应于“大”地震与“小”地震分界即发震层(易震层、孕震层)的厚度(约 15 km, 相当于 6.5 级地震)的特征尺度; ②相应于“大”余震与“中”、“小”余震分界(约 5 级地震)的特征尺度; ③相应于余震区的空间范围(1~3 km)的特征尺度; ④相应于断层带宽度(100~200 m)的特征尺度。

耐人寻味的是, 在研究地震的自组织临界性时, 许多研究者运用的理论模型恰恰是 Knopoff 和他的学生 Burridge 在 40 年前提出的 Burridge-Knopoff 弹簧—滑块模型(简称 B-K 模型)(Burridge and Knopoff, 1967)。这些研究者以 B-K 模型或其它与 B-K 模型大同小异的、非常简单的、类似于地震的模型做的数值模拟理论研究得出了“地震不可预测”的结论, 如: 一个小事件是否生长为大地震不可预测地依赖于整个系统内的弹性性质、断层长度以及所贮存的弹性能的微小变化(Otsuka, 1972a, b; Bak and Tang, 1989; Ito and Matsuzaki, 1990); 如果任何一个大地震都有可能演变为大地震, 那么地震预测将是不可能的(Brune, 1979); 对单个

地震的发震时间和震级做确定性的地震预测是不可能的(Kittl et al, 1993);等等。对地震预测持否定意见的 Geller(1997)概括说,这些数值模拟采用的都是非常简单的类似于地震的模型,唯其简单,更表明对于一个确定性的模式来说是何等容易成为不可预测的;因此没有理由认为这些理论研究得到的结论不适用于地震。

Knopoff(1999)认为这些研究者由于没有恰当地考虑地震的物理问题,所以“他们虽然模拟了某些现象,但他们模拟的不是地震现象。”他指出,地震表现上遵从的幂律对应的只是一种过渡现象,而不是系统最终演化到的自组织临界状态;地震现象是自组织的,但并不临界。地质构造复杂的几何性质使主震和余震遵从大致相同的、类似于分形的分布,这使得人们很容易将它们混为一谈,而不考虑幂律的可靠性问题,从而简单地从幂律出发得出地震具有自组织临界性、进而推出“地震不能预测”的结论。在逻辑推理上这好比说,“哺乳动物有4条腿,桌子也有4条腿,所以桌子也是一种哺乳动物或哺乳动物也是桌子。”

对地震的可预测性这一与地震预测实践以及自然界的普适性定律密切相关的理论性问题的探讨或论争还在继续进行中。既然地震的可预测性的困难是源于人们不可能以高精度测量断层及其邻区的状态以及对于其中的物理定律仍然几乎一无所知。那么如果这两方面的情况能有所改善,将来做到提前几年的地震预测还是有可能的。提前几年的地震预测的难度与气象学家目前做提前几小时的天气预报的难度是差不多的,只不过做地震预测所需要的地球内部的信息远比做天气预报所需要的大气方面的信息复杂得多,而且也不易获取,因为这些信息都源自地下(地球内部的“不可入性”)。这样一来,对地震的可预测性的限制可能与确定性的混沌理论没有什么关系,而是因为得不到极其大量的信息。

### 3 实现地震预测的科学途径

#### 3.1 依靠科技进步、依靠科学家群体

地震预测是一个多世纪以来世界各国地震学家最为关注的目标之一。如前已述,在20世纪70年代中期以前,由于膨胀—扩散模式、膨胀—失稳模式的发展以及1973年美国纽约兰山湖地震和1975年中国海城地震的成功预报使得国际地震学界对地震预测一度弥漫了极其乐观的情绪(Press, 1975, 1976; National Research Council of the National Academies, 1976)。然而,运用经验性的地震预报方法未能对1976年中国唐山大地震做出短、临预报以及到了20世纪80~90年代,美国地震学家预报的圣安德列斯断层上的帕克菲尔德地震、日本地震学家预报的日本东海大地震都不发生(前者推迟了11年于2004年9月28日才发生,后者迄今还不发生),又使许多人感到悲观。一个多世纪以来,对地震预测从十分乐观到极度悲观什么观点都有,不同的观点一直在辩论,从未有止息(例如, Geller, 1991a, b, 1997; Geller et al, 1997a, b; Hamada, 1991; Turcotte, 1991; Knopoff, 1996a, b, c, 1999; Knopoff et al, 1996)。

地震预测面临的困难(或者说性质、特点)是客观存在的困难,既不是今天才冒出来的,也不是今天的新“发现”;地震预测研究的这些性质或特点本质上也是包括地震学在内的固体地球科学的性质或特点。困难既是挑战,也是机遇。事实上,一部近代地震学的历史也就是地震学家不断迎接挑战、不断克复困难、不断前进的历史。解决地震预测面临的困难的出路既不能单纯依靠经验性方法,也不能置迫切的社会需求予不顾、坐待几十年后的某一天基础研究的飞跃进展和重大突破。在这方面,地震预测、特别是短临预测与医学以及军事科学或许有类似之处,而与纯基础研究不完全一样(陈运泰, 1993)。这就是:①时间上的“紧迫性”,即必须在第一

时间回答问题,不容犹豫,无可推诿;②对“敌情”、“病情”、“震情”所掌握的信息的“不完全性”;③决策的“高风险性”——一个决策动辄涉及成千上万、甚至是几十万人的生命,几十亿、上百亿元的经济损失以及难于用金钱计算的社会安定和谐问题。医学和军事科学都十分重视理论和基础研究,但病人的家属不会把病人送给只懂(哪怕是学问高超的)医学理论知识但缺乏临床经验的医生动手术,军队也不会喜欢赵括那样的指挥员。地震预测的这些特点既不意味着对地震预测可以降低严格的科学标准,也不意味着可以因为对地震认识不够充分、对震情所掌握的信息不够完全(极而言之,永远没有“充分”、“完全”的时候)而置地震预测于不顾。在这方面,值得回顾一下地震学界的先辈们给我们留下的十分宝贵的然而也是极其惨痛的经验教训(Aki,1980,2002;石桥克彦,1994):

寺田寅彦(Terada T)是 20 世纪初日本著名的一位地球物理学家,也是一位优秀的散文作家。他是 1923 年 9 月 1 日关东大地震发生后于 1925 年 11 月创建的东京帝国大学(今东京大学)地震研究所的创建者之一(创建者还有首任代所长末廣恭二,長岡半太郎、石原純等)。他的一句据说在日本是家喻户晓的警句是:

“天灾总是在人们将其淡忘时来临。”

这句极富哲理的警句虽然并不具体涉及天灾的科学内涵,但无论是对广大的公众还是对负责公共安全的政府官员,时至今日都是一个十分有教益的警示。可是,那种由仍有争议的科学原理得出的对公众的警告可能起不到什么作用,反而会给科学家本人带来不幸。在日本地震界广为人知的大森房吉和今村明恒的故事就是一个例子。今村明恒深信地震空区理论,并曾预测东京附近的相模湾将发生大地震。该地区处于一个大地震活动带上,但历史上还没有发生过大地震。1906 年,时为助教授的今村明恒发表了一篇文章,预测在 50 年内相模湾将发生大地震;并对东京缺乏防火设施提出警告,指出如果相模湾发生的大地震袭击东京,东京将有 10 万人会死于火灾。可是,这篇文章受到了时为东京帝国大学地震学教研室主任的大森房吉教授的猛烈抨击。大森房吉认为今村明恒的文章缺乏可靠的科学依据并会引起社会的恐慌。在大森房吉抨击今村明恒的文章发表后的 17 年中,今村明恒的处境十分悲惨。直到 1923 年 9 月 1 日,他的预测不幸言中:地震真的发生了!关东大地震[日本气象厅(JMA)震级  $M_{JMA} 7.9$ ,  $M_s 8.2$ ,震中位置  $35.2^\circ N, 139.5^\circ E$ ]夺走了 14.3 万人的生命,受伤人数达 10 余万人,房屋全部倒塌 12.8 万余间,部分倒塌 12.6 万余间,烧毁 44.7 万余间,受灾人口达 340 余万人,经济损失 55 亿日圆,成为了日本有史以来最严重的一次自然灾害。关东大地震发生时,大森房吉正在澳大利亚参加第二届泛太平洋科学大会,教研室主任的工作暂由今村明恒代理。得知大地震的消息后,大森房吉提前结束澳洲之行回国。在乘船回国途中,他的健康状况因脑痛急剧恶化。他于 10 月 4 日抵达横滨,前去迎接他的正是今村明恒!大森房吉除向前去迎接他的今村明恒表示感谢外,还为关东大地震震灾深为自责。大森房吉在抵达日本不久后(11 月 8 日)去世,终年 55 岁。逝世之前,大森房吉将后事托付给了今村明恒。

我们从睿智的寺田寅彦、勇敢的今村明恒和谨慎的大森房吉的故事可以得到什么样的启示呢?寺田寅彦的警示虽然没有从科学上对天灾做出具体的预报,但直至今日仍然正确地反映了当今社会的状况。今村明恒基于地震专业知识而做出的具体的警告,虽然事后被证明是正确的但在当时却被与他同时代的更有名望的科学家以科学依据不可靠(我们在前面提到的“不完全性”)并会引起了社会的恐慌(“高风险性”)为理由所“打压”。一个世纪以来,经过几代地震学家的努力,对地震的认识的确大有进步,然而不了解之处仍甚多。目前地震预测尚处于初

期的科学探索阶段,地震预测的能力、特别是短、临地震预测的能力还是很低的,与迫切的社会需求相距甚远。解决这一既紧迫要求予以回答、又需要通过长期探索方能解决的地球科学难题唯有依靠科学与技术的进步、依靠科学家群体。一方面,科学家应当倾其所能把代表当前科技最高水平的知识用于地震预测;另一方面,科学家(作为一个群体,而不仅是某个人)还应勇负责任,把代表当前科技界认识水平的有关地震的信息(包括正、反两方面的信息)如实地传递给公众,应当说实话,永远说实话!决不能重演像当年大森房吉压制今村明恒观点那样的悲剧。

### 3.2 强化对地震及其前兆的观测

为了克服地震预测面临的观测上的困难,在地震观测与研究方面,多少年来,地震学家不但在陆地上,在海岛上,而且向海洋进军、在海底,大量布设地震观测台网,形成从全球性至区域性直至地方性的多层次的地震观测系统。例如,截至2003年,属于全球性[台距(台站之间的距离)约2000 km]的地震台网(Global Seismic Network,缩写为GSN)的地震台已达126个;截至2005年,中国国家数字地震台网(National Digital Seismograph Network)的地震台已达152个,区域数字地震台网(Regional Digital Seismograph Network)的地震台已达678个。即使如此,地震观测台网仍然是很稀疏的。在大多数地区,限于财力和自然条件,台网密度仍较低,台距较大。这种情况造成了一方面是“信息过剩”,即:现有的数字地震台网产出的大量数据使用得不够,不能充分发挥其作用,积压浪费;而另一方面,则是“信息饥渴”,即:由于台网密度低、台距较大,资料不便于分析研究、以至于在监测地震或开展地震研究时,捉襟见肘,感到资料不足。有鉴于此,地震学家应努力变“被动观测”为“主动观测”,在规则地加密现有固定式台网的基础上,在重点监测与研究地区布设流动地震台网(台阵),进一步加密观测,改善由于台距过大、不利于分析解释地震记录的状况;并且不但利用天然地震震源,而且也运用包括爆破在内的人工震源对地球内部进行探测以获得有关震源特征和地震波传播路径效应的更多的、更精细的信息。

在地震前兆的观测与研究方面,应继续强化对地震前兆现象的监测、拓宽对地震前兆的探索范围,以期在可靠的和丰富的前兆现象基础上,构制自由度较小的定量的物理模式进行模拟、反复验证,逐渐地、然而实效上可能会是较快地阐明地震前兆与地震发生的内在联系,实现地震预测。地震是发生在地球内部的自然现象。一个7级大地震释放的应变能的数量级达 $10^{15}$  J,很难置信在如此巨大的应变能释放之前不出现任何“讯号”。已知的地震前兆包括直接与地震过程相联系和不十分直接与地震过程相联系的两大类。前者如地震活动性、地震空区、 $b$ 值、 $Q$ 值、波速与波速比等地震学前兆;以及如通过地倾斜、地应变、地应力、重力变化等形式表现出来的地形变、地应力与重力前兆,后者如地磁、地电、地下水位、地下水化学和动物异常等。它们涉及地球物理、大地测量、地质、地球化学等众多的学科和广阔的领域。一方面,可沿着已有的方向继续努力寻找地震前兆;但是,另一方面,应当努力探索新的前兆。例如,现在已经发现的洋中脊转换断层上的“慢地震”,在俯冲带上以及圣安德列斯断层上的“寂静地震”,还有在大型的逆冲断层下面周期性的缓慢滑动事件及与其相关的间歇性的简谐颤动,等等,均应引起重视。20世纪90年代以来,空间对地观测技术和数字地震观测技术的进步,使得观测(现代地壳运动、地球内部结构、地震震源过程以及地震前兆的)技术,在分辨率、覆盖面、动态性等方面都有了飞跃式的发展,高新技术[如全球定位系统(GPS)、卫星孔径雷达干涉测量术(InSAR)等空间大地测量技术,用于探测地震前兆的“地震卫星”,等等]在地球科学中的应用



为地震预测研究带来了新的机遇,多学科协同配合和相互渗透是寻找发现与可靠地确定地震前兆的有力的手段。

### 3.3 坚持地震预测科学试验——地震预测试验场

地震既发生在板块边界、也发生在板块内部,地震前兆出现的复杂性和多变性可能与地震发生场所的地质环境的复杂性密切相关。因地制宜、即在不同地震危险区采取不同的“战略”,各有侧重地检验与发展不同的预测方法,不但在科学上是合理的、而且在财政上也是经济的。应重视充分利用我国的地域优势,总结包括我国的地震预测试验场在内的世界各国的地震预测试验场经验教训,通过地震预测试验场这样一种行之有效的、开展在严格的、可控制的条件下进行的、可用事先明确的可接受的准则予以检验的地震预测科学试验研究;选准地区,多学科互相配合,加密观测,监测、研究、预测预报三者密切结合,坚持不懈,可望获得在不同构造环境下断层活动、形变、地震前兆、地震活动性等等十分有价值的资料,从而有助于增进对地震的了解、攻克地震预测难关。

### 3.4 系统地开展基础性、综合性的对地球内部及对地震的观测、探测与研究计划

为了克服地震预测面临的观测上的困难,除了前面已经提及的强化对地震及其前兆的观测外,还应考虑:①在地震活动地区进行以探测震源区为目的的科学钻探,钻探到发震层所在深度对震源区作直接观测。科学钻探常因代价昂贵因而只能是“一孔”、顶多是若干个“孔”,而被讥为“一孔之见”,而且还只是“皮毛”。但是能够到达发震层所在的深度对震源区作直接的观测,尽管是“皮毛”的“一孔之见”,还是十分宝贵的,所得的结果对于克服“不可入性”带来的困难、对于验证理论是很有意义的;②在断层带开挖探槽研究古地震,延伸对地震“观测”的时间窗的长度以克服大地震的复发时间比人的寿命、比有现代仪器观测以来的时间长得多(大地震的“非频发性”)带来的困难;③在实验室中进行岩石样品在高温高压下的破裂实验,模拟单个地震的孕育、发生、扩展、停止,地震序列的形成与发生以及地震的轮回过程,等等。通过对岩石样品中的微小破裂事件的实验研究藉以了解作为大的破裂事件的天然地震的发生发展规律,以克服被动地等待观测复发时间漫长的天然地震的发生(大地震的“非频发性”)带来的困难;④利用计算机对地震做数值模拟,模拟地震的孕育、发生、扩展、停止,地震序列的形成与发生以及地震的轮回过程,等等。通过在计算机中进行数值模拟,既能再现复发时间以数十年、数百年计、甚至更长的天然地震的孕育与发生过程、地震序列的形成与发生以及地震的轮回过程,又能模拟破裂时间以仅仅数秒、数十秒、至多数百秒计的天然地震的快速破裂过程。

为此,应当实施旨在对地球内部及对地震系统地进行基础性的、综合性的观测、探测与研究的大型的科学计划。目前美国正在实施的“地球透镜计划”(EarthScope)就是一个很有创新意义的例子(EarthScope Working Group, EarthScope Project Plan, 2001),值得借鉴。“地球透镜计划”旨在通过观测、研究北美大陆的活动构造和岩石层结构,以发展地震科学,促进地震科学在减轻地震灾害中的应用。该计划由 4 个部分组成:

(1)美国台阵(USArray)计划。“美国台阵计划”拟对美国大陆、阿拉斯加及其邻区的岩石层(地壳和上地幔)结构做高分辨度的地震成像。该计划拟动用 400 套宽频带地震仪组成大型的遥测地震台阵,有规则地进行实时观测;再用 2400 套便携式地震仪组成移动式台阵,借助于天然与人工两种震源,对在上述大型遥测台阵“脚印”内的关键目标做高密度的短期观测;并以固定式的地震台网——美国地质调查局国家地震台网(USGS/National Seismic Network)进行长期、连续的地震观测。

(2) 圣安德列斯断层深部观测(San Andreas Fault Observatory at Depth, 缩写为 SAFOD) 计划。该计划是圣安德列斯断层深部的钻探计划, 拟在圣安德列斯断层带 1966 年帕克菲尔德地震震源的上方打一个 4 km 深的钻。钻探将直达发震层所在深度, 获取断层带的岩石及流体的样品供实验室分析地球物理参数, 包括地震活动性、孔隙压、温度、应变等; 该计划拟对井下和邻区的流体活动性、地震活动性、形变等进行长达 20 年的长期监测。

(3) 板块边界观测(Plate Boundary Observatory, 缩写为 PBO) 计划。该计划拟用应变仪和超高精准的 GPS 仪对美国西部进行地形变测量, 包括: 用“骨干台网”、即台距 100~200 km 的、连续记录的 GPS 遥测台网获取从阿拉斯加直至墨西哥的整条板块边界的、在空间上是长波长、在时间则是长周期的地形变信息的概况; 并在构造活动地区(如主要断层带和活动岩浆系统)集中进行 GPS、井下应变及地震观测。

(4) 合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, 缩写为 InSAR) 计划。用星载 InSAR 对地面形变成像、特别是对与活动断层和火山有关的地面形变场成像。美国国家航空航天局(NASA), 美国国家科学基金会(NSF) 和美国地质调查局(USGS) 三家合作, 以卫星对广阔的地域做空间上是连续性的、时间上则是间歇性的应变测量。InSAR 测量是面上的测量, 它将与 PBO 的 GPS 点上的测量形成互补。对于所有类型的地形地貌, 空间测量将达到密集的空间覆盖(分辨率 100 m) 与时间覆盖(每 8 天一次), 矢量解将准确到 2 mm。预计用于整个“地球透镜计划”仪器设备的经费分别是: USAArray, \$64.0 百万; SAFOD, \$17.4 百万; PBO, \$91.3 百万; InSAR, \$245.0 百万; 用于数据分析及运行管理的费用是 \$15 百万/年~\$20 百万/年。

### 3.5 加强国内合作与国际合作

地震预测研究深受缺乏作为建立地震理论的基础的经验规律所需的“样本”太少所造成的困难之限制。目前在刊登有关地震预测实践的论文的绝大多数学术刊物中几乎都不提供相关的原始资料, 以致其他研究人员读了之后也无从作独立的检验与评估; 此外, 资料又不能共享。这些因素加剧了上述困难。应当正视并改变地震预测研究的实际上的封闭状况, 广泛深入地开展国内、国际学术交流与合作; 加强地震信息基础设施的建设, 促成资料共享; 充分利用信息时代的便利条件, 建立没有围墙的、虚拟的、分布式的联合研究中心, 使得从事地震预测的研究人员, 地不分南北东西, 人不分专业机构内外, 都能使用仪器设备、获取观测资料、使用计算设施和资源、方便地与同行交流切磋, 等等。

## 4 结语

以上介绍了国际地震预测研究的概况, 简要地分析了地震预测在科学上的遇到的困难, 阐述了解决这些困难应当采取的科学途径。自 20 世纪 60 年代以来, 中、长期地震预测取得了一些有意义的进展, 如板块边界大地震空区的确认、“应力影区”、地震活动性图像、图像识别、由帕克菲尔德地震预报试验场的预报实践获得的正反两方面的经验, 等等。但是目前地震预测的总体水平、特别是短期与临震预测的水平仍然不高, 与社会需求相距仍甚远。地震预测作为一个既紧迫要求予以回答、又需要通过长期探索方能解决的地球科学难题的确非常困难。但是, 特别需要乐观地指出的是, 与 40 年前的情况相比, 地震学家今天面临的科学难题依旧, 并未增加; 然而这些难题却比先前暴露得更加清楚。20 世纪 60 年代以来地震观测技术的进步、高新技术的发展与应用为地震预测研究带来了历史性的机遇。依靠科技进步、强化对地震及

其前兆的观测、开展并坚持以地震预测试验场为重要方式的地震预测科学试验、系统地开展基础性的对地球内部及对地震的观测、探测与研究,坚持不懈,对实现地震预测的前景是可以审慎地乐观的。正如著名科学家、液态燃料火箭发明人戈达德(Robert H Goddard,1882~1945)所说的:

“慎言不可能。昨日之梦想,今日有希望,明日变现实。”

#### 参考文献

- Aggarwal Y P, Sykes L R, Simpson D W and Richards P G. 1975. Spatial and temporal variations in  $t_s/t_p$  and in P-wave residuals at Blue Mountain Lake. New York; Application to earthquake prediction[J]. *J Geophys Res*, 80, 718~732
- Aki K. 1980. Possibilities of seismology in the 1980s[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 70, 1969~1976
- Aki K. 2002. Synthesis of earthquake science information and its public transfer: A history of the Southern California Earthquake Center. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P and Kisslinger C (eds), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*[M]. Pt A, Academic Press, San Diego, 39~49
- Allen C R and Helmberger D V. 1973. Search for temporal changes in seismic velocities using large explosions in southern California. In: Kovach, R. L. and Nur, A. (eds.), *Proceedings of the Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System*[M]. Stanford University Publications in Geological Science 13, Stanford, California, 436~452
- Allen C R. 1982. Earthquake prediction—1982 overview[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 72, S331~S335
- Ando M. 1975. Possibility of a major earthquake in the Tokai district, Japan, and its pre-estimated seismotectonic effects[J]. *Tectonophysics*, 25, 69~85
- Bak P. 1996. *How Nature Works; The Science of Self-Organized Criticality*[M]. Springer-Verlag, New York, 226pp
- Bak P and Tang C. 1989. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon[J]. *J Geophys Res*, 94, 15 635~15 637
- Bak P, Tang C and Wiesenfeld K. 1987. Self-organized criticality: An explanation[J]. *Phys Rev Lett*, 59, 381~384
- Bak P, Tang C and Wiesenfeld K. 1988. Self-organized criticality[J]. *Phys Rev*, A38, 364~374
- Bakun W H and Lindh A G. 1985. The Parkfield, California earthquake prediction experiment[J]. *Science*, 229, 619~624
- Bakun W H and McEvilly T V. 1979. Earthquakes near Parkfield, California: Comparing the 1934 and 1966 sequences[J]. *Science*, 205, 1 375~1 377
- Bakun W H and McEvilly T V. 1984. Recurrence models and Parkfield, California earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 89, 3 051~3 058
- Bakun W H, Aagaard B, Dost B, Ellsworth W L, Hardebeck J L, Harris R A, Ji C, Johnston M J S, Langbein J, Lienkaemper J J, Michael A J, Murray J R, Nadeau R M, Reasenber P A, Reichle M S, Roeloffs E A, Shakal A, Simpson R W and Waldhauser F. 2005. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake[J]. *Nature*, 437, 969~974
- Ben-Zion Y, Rice J R and Dmowska R. 1993. Interaction of the San Andreas fault creeping segment with adjacent great rupture zones, and earthquake recurrence at Parkfield[J]. *J Geophys Res*, 98, 2 135~2 144
- Bowman J R. 1997. Case 22: A seismicity precursor to a sequence of  $M_s$  6. 3—6. 7 midplate earthquakes in Australia[J]. *Pure Appl Geophys*, 149, 61~78
- Brune J N. 1979. Implications of earthquake triggering and rupture propagation for earthquake prediction based on premonitory phenomena[J]. *J Geophys Res*, 84, 2 195~2 198
- Bufe C G, Harsh P W and Burford R O. 1977. Steady-state seismic slip—A precise recurrence model[J]. *Geophys Res Lett*, 4, 91~94
- Burridge B and Knopoff L. 1967. Model and theoretical seismicity[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 57, 341~371
- Cisternas A. 2006. Montessus de Ballore pionero de la Sismología; El hombre y su obra. *International Conference Montessus de Ballore 1906 Valparaiso Earthquake Centennial*[M]. Santiago 6-8 November, 2006
- Darwin C. 1898. *Journal of Researches into the National History and Geology of the Countries During the Voyage of H M S. Beagle Round the World Under the Command of Capt*[M]. Fitz Roy, R. N. D. Appleton and Co., New York

- Deng J and Sykes L. 1997. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: A 200-year perspective[J]. *J Geophys Res*, 102, 9 859~9 886
- Dieterich J H. 1978. Preseismic fault slip and earthquake prediction[J]. *J Geophys Res*, 83, 3 940~3 948
- EarthScope Working Group, EarthScope Project Plan, 2001. EarthScope: A New View into the Earth[R]. 36pp
- Engdahl E R and Villasenor A. 2002. Global seismicity: 1900—1999. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P and Kisslinger C (eds), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology[M]*. Pt. A, Academic Press, San Diego, 665~690
- Geller R J. 1991a. Shake-up for earthquake prediction[J]. *Nature*, 352, 275~276
- Geller R J. 1991b. Unpredictable earthquakes[J]. *Nature*, 353, 612
- Geller R J. 1997. Earthquake prediction: A critical review[J]. *Geophys J Int*, 131, 425~450
- Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y and Mulargia F. 1997a. Earthquake cannot be predicted[J]. *Science*, 275, 1 616~1 617
- Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y and Mulargia F. 1997b. Cannot earthquake be predicted[J]. *Science*, 278, 488~490
- Habermann R E. 1988. Precursory seismic quiescence: Past, present, and future[J]. *Pure Appl Geophys*, 126, 277~318
- Hamada K. 1991. Unpredictable earthquakes[J]. *Nature*, 353, 611~612
- Harris R A. 1998. Forecasts of the 1989 Loma Prieta, California earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 88, 898~916
- Harris R A and Simpson R W. 1996. Stress relaxation shadows and the suppression of earthquakes: Some examples from California and their possible uses for earthquake hazard estimates[J]. *Seism Res Lett*, 67, 40
- Harris R A and Simpson R W. 1998. Suppression of large earthquakes by stress shadows: A comparison of Coulomb and rate-and-state failure[J]. *J Geophys Res*, 103, 24 439~24 451
- Healy T H, Kossobokov V G and Dewey I W. 1992. A Test to Evaluate the Earthquake Prediction Algorithm M8[M]. U S Geological Survey Open-File Report 92-401, Denver, Colo., 23pp  
<http://www.earthquake.usgs.gov>
- Imamura A. 1928. On the seismic activity of central Japan[J]. *Jap Jour Astron Geophys*, 6, 119~137
- Ito K and Matsuzaki M. 1990. Earthquakes as self-organized critical phenomena[J]. *J Geophys Res*, 95, 6 853~6 860
- Kagan Y. 1997. Statistical aspects of Parkfield earthquake sequence and Parkfield prediction[J]. *Tectonophysics*, 270, 207~219
- Kagan Y and Wesnousky S. 1996. The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution. Which is it? Discussion and Reply[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 86, 274~291
- Kanamori H. 1983. Global seismicity. In: Kanamori H and Boschi E (eds.), *Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation[M]*. Elsevier North-Holland Inc, New York, 596~608
- Keilis-Borok V I and Kossobokov V G. 1990. Premonitory activation of seismic flow: Algorithm M8[J]. *Phys Earth Planet Interi*, 61, 73~83
- Keilis-Borok V I and Shebalin P. 2003. Short-term advance prediction of the San Simeon earthquake, California, December 22, 2003, magnitude 6.5[R]. (personal communication)
- Kelleher A, Sykes L R and Oliver J. 1973. Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean[J]. *J Geophys Res*, 78, 2 547~2 585
- Kisslinger C. 1989. Potents and predictions[J]. *Nature*, 339, 337~338
- Kittl P, Diaz G and Martinez V. 1993. Principles and the uncertainty principles of the probabilistic strength of materials and their applications to seismology[J]. *ASME Appl Mech Rev*, 46, S327~S333
- Knopoff L. 1996a. Earthquake prediction: The scientific challenge. In: Knopoff L, Aki K, Allen C R, Rice J R and Sykes L R. (eds.), *Earthquake Prediction: The Scientific Challenge, Colloquium Proceedings[J]*. *Proc Nat Acad Sci USA*, 93, 3 719~3 720
- Knopoff L. 1996b. A selective phenomenology of the seismicity of Southern California. In: Knopoff L, Aki K, Allen C R, Rice J R and Sykes L R. (eds.), *Earthquake Prediction: The Scientific Challenge, Colloquium Proceedings[J]*. *Proc Nat Acad Sci, USA*, 93, 3 756~3 763

- Knopoff L. 1996c. The organization of seismicity on fault networks. In: Knopoff L, Aki K, Allen C R, Rice J R and Sykes L R. (eds), *Earthquake Prediction: The Scientific Challenge, Colloquium Proceedings*[J]. *Proc Nat Acad Sci, USA*, 93, 3 830~3 837
- Knopoff L. 1999. Earthquake prediction is difficult but not impossible[J]. *Nature, Debates*, March 11, 1999, 6pp
- Knopoff L, Aki K, Allen C R, Rice J R and Sykes L R (eds). 1996. *Earthquake Prediction: The Scientific Challenge, Colloquium Proceedings*[J]. *Proc Nat Acad Sci, USA*, 93, 3 719~3 837
- Kossobokov V G, Romashkova L L, Keilis-Borok V I and Healy J H. 1999. Testing earthquake prediction algorithms: Statistically significant advance prediction of the largest earthquakes in the circum-Pacific, 1992~1997[J]. *Phys Earth Planet Interi*, 111, 187~196
- Lindh A G. 1983. Preliminary Assessment of Long-Term Probabilities for Large Earthquakes along Selected Fault Segments of the San Andreas Fault System in California[M]. U. S. Geol. Surv. Open-File Report 83-63, Menlo Park, California, 15pp
- Lindh A G. 2003. The nature of earthquake prediction[J]. *Seism Res Lett*, 74, 723~735
- Lindh A G. 2005. Success and failure at Parkfield[J]. *Seism Res Lett*, 76, 3~6
- Matsumura S. 1997. Focal zone of a future Tokai earthquake inferred from the seismicity pattern around the plate interface [J]. *Tectonophysics*, 273, 271~291
- Matsu'ura R S. 1986. Precursory quiescence and recovery of aftershock activity before some large aftershocks[J]. *Bull Earthq Res Inst, Univ. Tokyo*, 61, 1~65
- McCann W R, Nishenko S P, Sykes L R and Krause J. 1979. Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries[J]. *Pure Appl Geophys*, 117, 1 082~1 147
- Milne J. 1880. Seismic science in Japan[J]. *Trans Seism Soc Japan*, 1, 3~33
- Mjachkin V, Brace W, Sobolev G and Dieterich J. 1975. Two models of earthquake forerunners[J]. *Pure Appl Geophys*, 113, 169~181
- Mogi K. 1970. Recent horizontal deformation of the Earth's crust and tectonic activity in Japan (1)[J]. *Bull Earthq Res Inst, Univ. Tokyo*, 48, 413~430
- Mogi K. 1981. Earthquake prediction program in Japan. In: Simpson D W and Richards P. (eds.), *Earthquake Prediction: An International Review, Maurice Ewing Monograph Series 4*[J]. *Amer. Geophys. Union, Washington D C*, 635~666
- Mogi K. 1985. *Earthquake Prediction*[M]. Academic Press, London, 355pp
- National Research Council of the National Academies. 1976. *Predicting Earthquakes: A Scientific and Technical Evaluation—With Implication for Society*[M]. National Academy Press, Washington D C, 62pp
- National Research Council of the National Academies, 2003. *Living on an Active Earth*[M]. The National Academies Press, Washington D C, 418pp
- Nishenko S P. 1989. Earthquakes, hazards and predictions. In: James D E (ed), *The Encyclopedia of Solid-Earth Geophysics* [M]. Van Nostrand Reinhold, New York, 260~268
- Nishenko S P. 1991. Circum-Pacific seismic potential; 1989~1999[J]. *Pure Appl Geophys*, 135, 169~259
- Ohtake M, Matumoto T and Latham G. 1977. Seismicity gap near Oaxaca, southern Mexico, as a probable precursor to a large earthquake[J]. *Pure Appl Geophys*, 113, 375~385
- Ohtake M, Matumoto T and Latham G. 1981. Evaluation of the forecast of the 1978 Oaxaca, southern Mexico earthquake based on a precursory seismic quiescence. In: Simpson, D. and Richards, P. (eds), *Earthquake Prediction—An International Review, Maurice Ewing Series 4*[M]. *Amer Geophys Union, Washington D C*, 53~62
- Omori F. 1907. Preliminary note of the Formosa earthquake of March 17, 1906[J]. *Bull Imp Earthq Invest Comm*, 1(2): 53~69
- Otsuka M. 1972a. A chain-reaction-type source model as a tool to interpret the magnitude-frequency relation of earthquakes [J]. *J Phys Earth*, 20, 35~45
- Otsuka M. 1972b. A simulation of earthquake recurrence[J]. *Phys Earth Planet Interi*, 6, 311~315
- Press F. 1975. Earthquake prediction[M]. *Scientific American*, 232(5): 134~137

- Press F. 1976. Heicheng and Los Angeles: A tale of two cities[J]. *Eos, Trans Amer Geophys Union*, 57, 435~436
- Press F and Brace W F. 1966. Earthquake prediction[J]. *Science*, 152, 1 575~1 584
- Press F, Benioff H, Frosch R A, Grigg D T, Handin J, Hanson R E, Hess H H, Housner G W, Munk W H, Orowan E, Pakiser Jr L C, Sutton G and Tocher D. 1965. Earthquake Prediction: A Proposal for A Ten Year Program of Research [C]. White House Office of Science and Technology, Washington D C, 134 pp
- Reid H F. 1910. The California Earthquake of April 18, 1906[J]. Publication 87, 2, Carnegie Institution of Washington, 192pp. reprinted 1969
- Rice J R. 1979. Theory of precursory processes in the inception of earthquake rupture[J]. *Gerlands Beitr Geophys*, 88, 91~127
- Rice J R and Rudnicki J W. 1979. Earthquake precursory effects due to pore fluid stabilization of a weakening fault zone[J]. *J Geophys Res*, 84, 2 177~2 193
- Richter C F. 1955. *Elementary Seismology*[M]. W H Freeman, San Francisco, 768pp
- Roeloffs, E. and Quilty E. 1997. Case 21: Water level and strain changes preceding and following the August 4, 1985 Kettleman Hills, California[J]. *Pure Appl Geophys*, 149, 21~60
- Scholz C H, Sykes L R and Aggarwal Y P. 1973. Earthquake prediction: A physical basis[J]. *Science*, 181, 803~810
- Schwartz D P and Coppersmith K J. 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas faults[J]. *J Geophys Res*, 89, 5 681~5 698
- Shearer C F. 1985. Southern San Andreas Fault Geometry and Fault Zone Deformation: Implications for Earthquake Prediction (National Earthquake Prediction Council Meeting, March, 1985)[C]. U S Geol Surv. Open-file Rep. 85-507, Reston, Virginia, 173~174
- Shimazaki K and Nakata T. 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquakes[J]. *Geophys Res Lett*, 7, 279~282
- Simpson R W, Schulz S S, Dietz L D and Burford R O. 1988. The response of creeping parts of the San Andreas fault to earthquakes on nearby faults: Two examples[J]. *Pure Appl Geophys*, 126, 665~685
- Sornette D and Knopoff L. 1997. The paradox of the expected time until the next earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 87, 789~798
- Stevenson D J. 2003. Mission to Earth's core—a modest proposal[J]. *Nature*, 423, 423~424
- Sykes L R. 1971. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps and prediction[J]. *J Geophys Res*, 76, 8 021~8 041
- Sykes L R. 1978. Intraplate seismicity reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation[J]. *Rev Geophys Space Phys*, 16, 621~688
- Sykes L R and Nishenko S P. 1984. Probabilities of occurrence of large plate rupturing earthquakes for the San Andreas, San Jacinto, and Imperial faults, California[J]. *J Geophys Res*, 89, 5 905~5 927
- Tsuboi C, Wadati K and Hagiwara T. 1962. Prediction of earthquakes—Progress to date and plans for future development [R]. Rep. Earthquake Prediction Res. Group Japan. Earthq Res Inst, Univ. Tokyo, Tokyo, 21pp
- Turcotte D L. 1991. Earthquake prediction[J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 19, 263~281
- Utsu T. 1977. Possibility of a great earthquake in the Tokai district, Japan[J]. *J Phys Earth*, 25, S219~S230
- Utsu T. 2002. A list of deadly earthquakes in the world; 1500—2000. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P and Kisslinger C. (eds), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*[M]. Pt A, Academic Press, San Diego, 691~717
- Wakita H, Nakamura Y and Sano Y. 1988. Short-term and intermediate-term geochemical precursors[J]. *Pure Appl Geophys*, 126, 267~278
- Wakita H, Nakamura Y and Sano Y. 1991. Short-term and intermediate-term geochemical precursors. In: Wyss, M. (ed), *Evaluation of Proposed Earthquake Precursors*[M]. Amer Geophys Union, Washington D C, 15~20
- Wallace R E, Davis J F and McNally K C. 1984. Terms for expressing earthquake potential, prediction, and probability[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 74, 1 819~1 825

- Wesnousky S. 1994. The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution; Which is it? [J]. Bull Seism Soc Amer, 84, 1 940~1 959
- Wesnousky S, Scholz C and Shimazaki K. 1983. Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting[J]. J Geophys Res, 88, 9 331~9 340
- Whitcomb J H, Garmany J D and Anderson D L. 1973. Earthquake prediction; Variation of seismic velocities before the San [Fernando] earthquake[J]. Science, 180, 632~635
- Working Group on California Earthquake Probabilities. 1988. Probabilities of Large Earthquakes Occurring in California on the San Andreas Fault[R]. U S Geological Survey Open-File Report 88-398, Reston, Virginia, 62pp
- Wyss M. (ed.). 1991. Evaluation of Proposed Earthquake Precursors[R]. Amer Geophys Union, Washington D C, 94pp
- Wyss M. 1997. Second round of earthquake of proposed earthquake precursors[J]. Pure Appl Geophys, 149, 3~16
- Wyss M and Booth D C. 1997. The IASPEI procedure for the evaluation of earthquake precursors[J]. Geophys J Int, 131, 423~424
- Нересов И И, Семенов А Н и Симбирева И Г. 1969. Пространственно-временное распределение оттошений времен пробега поперечных и продольных волн в Гармском районе. Сб. Физические Основания Предвестников Землетрясений[J]. Изд. Наука, 88~89
- Саваренский Е Ф и Кириос Д П. 1955. Элементы Сейсмологии и Сейсмометрии[J]. Государственное Изд., 543pp
- Садовский М А. 1982~1986. Прогноз Землетрясений[M]. Том 1~6, Изд. "Донин"
- Семенов А Н. 1969. Изменение отношения времен пробега поперечных и продольных волн перед сильными землетрясениями [J]. Изв АН СССР Физика Земли, (4), 72~77
- Федотов С А. 1965. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильский островов и северо-восточной Японии[J]. Тр. Ин-та Физики Земли АН СССР, Изд. Наука, 36, 66~93
- 石橋克彦[日]. 1994. 大地動乱の時代 地震学者は警告する[M]. 岩波新書, 235
- 陈运泰. 1993. 地震预测研究概况[J]. 地震学刊, (1), 17~23
- 陈运泰. 2007. 地震预测现状与前景. 见:中国科学院(主编); 2007 科学发展报告[M]. 北京:科学出版社, 173~182
- 陈章立, 刘蒲雄, 黄德瑜, 郑大林, 薛峰, 王志东. 1981. 大震前区域地震活动性特征. 见:丁国瑜, 马宗晋(主编); 国际地震预报讨论会论文选[M]. 北京:地震出版社, 97~205
- 傅承义. 1963. 有关地震预告的几个问题[J]. 科学通报, (3), 30~36
- 傅承义, 刘恢先. 1956. 天然地震的灾害及其防御[J]. 科学长远规划, 第 33 项
- 陆远忠, 陈章立, 王碧泉, 刘蒲雄, 刘文龙, 戴维乐. 1985. 地震预报的地震学方法[M]. 北京:地震出版社, 268
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 高旭, 张肇诚等. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社, 498
- 翁文灏. 1929. 地震[M]. 上海:商务印书馆, 25
- 吴开统, 岳明生, 武宦英, 曹新玲, 陈海通, 黄伟琼, 田抗援, 卢寿德. 1976. 海城地震序列的特征[J]. 地球物理学报, (2), 95~109
- 叶永田, 郑世楠. 1998. 活动断层地球物理探勘计划 1987 年度报告——由历史地震资料探讨 1906 年梅山地震断层的分布 [R]. 经济部中央地质调查所, IES-R-661, 255
- 张肇诚(主编). 1988. 中国震例(1966~1975)[M]. 北京:地震出版社, 222
- 张肇诚(主编). 1990. 中国震例(1976~1980)[M]. 北京:地震出版社, 421
- 郑世楠, 叶永田, 游明圣, 徐明同. 1998. 1906 年梅山地震断层的回顾与探讨[R]. 中国地质学会 87 年学术研讨会, 225~226

## Earthquake prediction: progress, difficulties and prospect

Chen Yuntai

(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

### Abstract

Earthquake prediction is a difficult problem in Earth science that the general public wants to be solved urgently, yet for achieving this scientific goal long-search is required. Since 1960s considerable progress has been made in long- and intermediate- term prediction, including seismic-gap method, stress shadow method, seismicity pattern method and computerized pattern recognition techniques in predicting large earthquakes, the occurrence of anticipated Parkfield earthquake. At present, earthquake prediction is in its infant, exploratory stage, the ability to make short- and imminent- term earthquake prediction remains poor. Study of earthquakes prediction encounters difficulties caused by the facts that source region in the Earth's interior is inaccessible for direct observations, large earthquakes are infrequent and complexities exist in physical process of earthquake. To achieve reliable earthquake prediction it is necessary to introduce scientific and technological advances into studies of earthquake prediction, to enhance seismological observations and earthquake precursor observations, to perform scientific experiments with patience and diligence in carefully selected earthquake prediction experiment sites, and to systematically carry out basic observation, exploration and researches of the Earth's interior and earthquake sources. Although to predict earthquakes is difficult, but the prospect is cautiously optimistic.

**Key words:** earthquake prediction, earthquake forecast, earthquake precursor, Earth's interior