



地震预测: 回顾与展望

陈运泰^{①②*}

① 北京大学地球与空间科学学院, 北京大学-中国地震局现代地震科学技术研究中心, 北京 100871;

② 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

* E-mail: chenyt@cea-igp.ac.cn

收稿日期: 2009-08-21; 接受日期: 2009-09-30

地震行业科研专项“首都圈地壳孕震层动态监测研究”(批准号: 200808068)资助

摘要 本文概要回顾自 20 世纪 60 年代以来国际地震预测研究与地震预报实践的进展情况, 指出地震预测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目前尚处于初期的科学探索阶段, 虽然总体水平仍然不高, 特别是短期与临震预测的水平与社会需求相距甚远, 但是近半个世纪以来并非毫无进展. 文中以板块边界大“地震空区”的确认、“应力影区”、地震活动性图像、图像识别等方法以及美国帕克菲尔德(Parkfield)的地震预报实践为例, 说明在中期与长期地震预测方面, 地震预测研究均取得了一些有意义的进展. 文中分析了地震预测在科学上面临的困难, 阐述了为解决这些困难所应当采取的科学途径, 展望了地震预测的前景, 指出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”以及地震物理过程的复杂性等困难的制约; 地震预测虽然困难, 但并不是不可能的; 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, 坚持不懈地、系统地进行基础性的对地球内部及对地震震源区的观测、探测与研究, 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
地震震源

地震是一种会给人类社会带来巨大灾难的自然现象. 在众多的自然灾害中, 特别是在造成人员伤亡方面, 全球地震灾害造成的死亡人数占全球各类自然灾害造成的死亡人数总数的 54%, 堪称群灾之首. 在 20 世纪(1900~1999 年), 全球有高达 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, 经济损失达数千亿美元^[1~5]. 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) 地震(矩震级 $M_w 7.6$)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 $M_w 6.6$ 级(面波震级 $M_s 6.8$), 却造成了 3.1 万人死亡、3.0 万人受伤, 使具有千年历史的巴姆古城毁于一旦. 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦地震($M_w 7.6$), 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)特大地震($M_w 9.1$)及其引发的印度洋特大海啸更使约 28.3 万人死亡与失踪, 令全世界为之震惊! 迄今仍余震不断, 继续危及生灵. 2008 年 5 月 12 日我国汶川 $M_w 7.8$ ($M_s 8.0$)地震, 造成了 8.7 万人死亡与失踪, 迄今不但余震不断, 而且滑坡和泥石流等次生灾害亦时有发生.

作为一种自然现象,地震最引人注目的特点是它的猝不及防的突发性与巨大的破坏力。关于这一点,中外古人根据经验均已有了深刻的认识。早在2000多年前,在《诗经·小雅·七月之交》中就有关于地震的突发性及其巨大的破坏力的生动描述^[6]:

烨烨震电,不宁不令。

百川沸腾,山冢崒崩。

高岸为谷,深谷为陵。

哀今之人,胡憯莫惩?!

“不宁”指地不宁,即地动;“不令”是不预先通告给人们周知,突如其来^[7]。诗中惊叹地震突如其来,势如闪电,声如雷鸣,其力足以令山川变易。译成白话文,就是(参阅周锡馥^[8]):

耀眼的雷霆闪电,

地震突如其来。

无数江河在沸腾,

山峰碎裂崩塌。

高耸的崖岸陷落为山谷,

深邃的山谷隆升为丘陵。

可怜今天的人啊,

为何竟不知自省?!

1835年2月20日15时30分UTC(协调世界时),在智利康塞普西翁(Concepción)-瓦尔帕莱索(Valparaíso)发生了一次 $M_s8.1$ 地震,震中位置 36.0°S , 73.0°W 。地震毁灭了康塞普西翁城。1835年3月5日,伟大的博物学家、进化论的创始人达尔文(Darwin C., 1809~1882)在他著名的贝格尔(H. M. S. Beagle)号环球旅行途中到达了康塞普西翁,经历了这次大地震的多次余震。达尔文以进化论的创始人闻名于世,但可能鲜为人知的是他也是现在称为地震地质学(earthquake geology)的一位创始人和先驱者。康塞普西翁-瓦尔帕莱索大地震破坏的惨烈景象给予达尔文强烈的震撼,他写道^[9]:

“通常在几百年才能完成的变迁,在这里只用了一分钟。如此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。”

通过地质调查已经知道,地球在整个地质时期都发生过地震。相传在帝舜时期(约公元前23世纪)“三苗欲灭时,地震泉涌”;夏帝发七年(约公元前1831年)“泰山震”^[10]。在《史记·周本纪》中,就有关

于地震的历史记载^[10]:“周幽王二年(公元前780年),西周三川(泾水、渭水、洛水)皆震,……,是岁也,三川竭,岐山崩”。

正如日食、月食和彗星等天象一样,地震曾被中外古人归于超自然的原因,被当作是上天的惩戒。甚至到了公元1750年,还有人在英国《伦敦皇家学会哲学丛刊》(*Phil. Trans. Roy. Soc. London*)上发表文章,认为把地震归于自然成因的人应当向那些因此被冒犯的人道歉^[11]!也和古人从来没有放弃过对日食、月食、彗星等天象的“天意”的“窥测”的努力一样,数千年来,古人对地震的成因及其预测的探索从来没有停止过。只是由于地质学严重缺乏物理学原理解释,对地质构造运动与地震关系的认识长期裹足不前。直到18世纪牛顿《自然哲学的数学原理》出版,牛顿力学问世,才为包括地震在内的地球上的所有运动的统一解释提供了物理基础。在牛顿力学的影响下,地震学逐渐发展成为一门现代的科学。到了19世纪70年代后期,现代地震仪研制成功,地震学步入了一个新的时代^[12,13]。

无情的大地震激发了人们对地震的成因及其预测的探索。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,多少地震学家莫不苦思预测地震、预防与减轻地震灾害的方法(例如, Milne^[14])。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之一^[3,15~22]。

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乃至数十万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^[23~27]。

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之一,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.

本文是在作者有关地震预测的几篇文章^[23~27]的基础上汇编增删写成的,意在向关注这一问题的广大读者简明地评介国际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(prediction)或预报(forecast)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,还须要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 4 种参数,每种参数的误差(不确定的范围)小于、等于下列数值^[28]:

位置: $\pm$ 破裂长度;

大小: ± 0.5 破裂长度或震级 ± 0.5 级;

时间: $\pm 20\%$ 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(1~10 年)、短期(1 日至数百日及 1 日以下)^[29].有时还将短期预测细分为短期(10 日至数 100 日)和临震(1~10 日及 1 日以下)预测.长、中、短、临地震预测的划分主要是根据(客观)需要、但却是人为(主观)地划分的,并不具有物理基础,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;数日至十几日为临震^[30].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^[31~33].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,甚而在专业人士中,对“地震预测”和“地震预报”通常不加区分,并且通常指的就是这里所说的“地震短、临预测”.在国际上(例如 Wyss^[28]),一些地震学家把不符合上述定义的“预测”、“预报”等等称作“预报”,亦称概率性(地震)预

报,而把符合上述定义的“预测”称作“确定性的(地震)预测”.例如对在一段长时期内的某一不确定的时间发生某一震级范围地震的概率做出估计就属于这种类型的“预测”——按这种说法便应当叫做“预报”.预测美国加州中部帕克菲尔德(Parkfield)在(1988 $\pm$ 4.3)年间会有一次 6 级地震^[34~36],按这种说法也是一种“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,习惯于把科学家和研究单位对未来地震发生的地点、时间和大小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”.地震长期预测(长期预报)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、地震灾害预测预防、抗震规范制定、地震保险、等等,也是十分有用的.为避免混淆起见,除非特别说明,本文采用我国的习惯说法.在评估地震预测(地震是真报对了还是碰运气“撞上”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,在某一地区某一段时间内,某一震级地震的数目是震级比它大 1 级地震的数目的 8~10 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”(“撞上”)一个 $M_w 5.0$ 的地震的“预测”还是很有可能的.

从更广泛的意义讲,从预防和减轻地震灾害的目标考虑,地震预测还应包括对地震发生时指定地点的地面运动强烈程度的预测.强(烈)地面运动(地震工程学家亦称之为强地震动)的预测是地震学与工程学交叉的重要学科领域,近 30 多年来发展很快;限于篇幅,本文暂不涉及这一重要问题.

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^[37-41]。在我国,板内(板块内部)地震空区的识别也有一些成功的震例^[30,42,43]。

地震是地下岩石中的“应变缓慢积累-快速释放”的过程^[44,45]。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”(日本地震学家称之为“固有地震”)。特征地震的大小(震级)既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既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、国际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 $M_s 8.2$ 日本关东(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^[40,46]。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^[47]。他研究了1904~1963年间沿日本-千岛群岛-堪察加岛弧一带 $M_s \geq 7\frac{3}{4}$ 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即“地震空区”。费道托夫在1965年发表的论文^[47]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等^[37-41]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

出在发生这3次地震的3段断层上地震的平均复发时间都大约为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地球物理观测资料,在1973和1979年得出了近期可能会发生大地震的有关板块的边界段的预报结果^[48,49]。后来,他们又出版了经改进后的预报结果^[41]。

每条断层或断层的每段的表现都是不同的^[50]。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., 1889~1960)-里克特(Richter C. F., 1900~1985)定律(关系式)预期的多得多^[51,52],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-里克特定律所表示的分布相矛盾。对此,Wesnousky等^[53-55]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-里克特定律分布的。

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。因为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-里克特定律分布的地震来说,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,以目前实际震例的观测资料的状况,特征地震的频度应当比按古登堡-里克特定律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(图 1(a)). 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)和“最终应力”(震后应力)都是不均匀的. 如果初始应力 σ_2 均匀但最终应力 σ_1 不均匀, 从而应力降($\sigma_2 - \sigma_1$)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”)(图 1(b))^[56]; 如果初始应力 σ_2 不均匀但震后应力 σ_1 均匀, 从而应力降($\sigma_2 - \sigma_1$)也不均匀, 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”)(图 1(c))^[57].

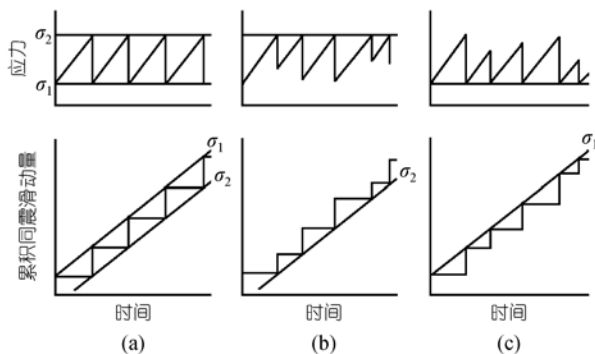


图 1 在构造应力积累的速率保持恒定的情况下的地震预测模式

(a) 时间与震级均可预测的模式; 构造应力积累的速率保持恒定、“初始应力”(震前应力) σ_2 和“最终应力”(震后应力) σ_1 都均匀, 从而应力降($\sigma_2 - \sigma_1$)也均匀、地震按严格的周期性重复地发生. (b) 时间可预测模式; 初始应力均匀但最终应力不均匀, 从而应力降不均匀、只有地震发生的时间是可以预测的. (c) 震级可预测模式; 初始应力不均匀但最终应力均匀, 从而应力降不均匀、只有地震的震级是可以预测的(据 Shimazaki 和 Nakata^[57])

1.2.2 “东海大地震”

沿着日本西南海岸的南海海槽-相模海槽, 在过去的 500 多年间重复发生过多次震级 $M \sim 8$ 的大地震, 包括 1498, 1605, 1707, 1854 和 1944~1946 年地震, 平均复发时间约为 117 年(图 2). 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. 于是他们推断在板

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 $M \sim 8$ 的地震. 这就是日本地震学家预报中的“东海大地震”^[22,58~65]. 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“大规模地震对策特别措置法”, 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后, 由专家组成的专门委员会(原先称作“东海地震判定会”, 现在改称作“地震防灾对策强化地区判定委员会”)最迟不超过 1 个小时就得举行会议, 并且会议在至多 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

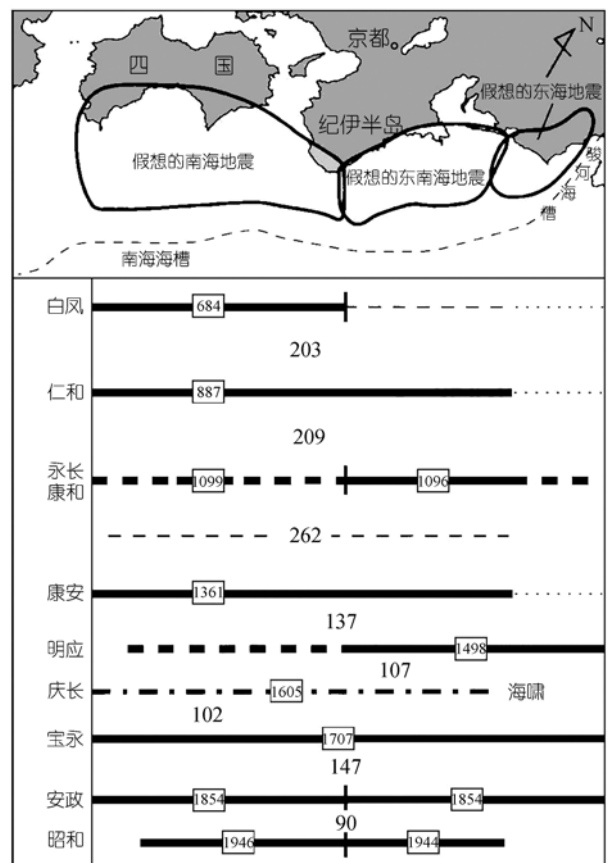


图 2 沿着日本西南海岸的南海海槽-相模海槽(在骏河海槽东北面, 图中未绘出)在过去的 500 多年间重复发生过的震级 $M \sim 8$ 的浅源大地震的破裂区

沿着骏河海槽的东海地区即是日本地震学家预报中的“东海大地震”空区(据日本地震学会地震予知检讨会^[22])

震”的前兆。如果判定是“东海大地震”的前兆，就应整理成“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 31 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“判定委员会”紧急会议(不过，“判定委员会”还是每月召开一次例行的碰头会)。国际著名的专家、“判定委员会”主席、东京大学地震研究所原所长茂木清夫(Mogi K.)教授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 年在地震预测饱受垢病的批评声中辞去该委员会主席职务，黯然下台(令人欣慰的是，与此形成强烈反差，2003 年在日本札幌举行的第 23 届国际地球物理与大地测量联合会(IUGG)大会上，茂木清夫教授做了题为“地震预测”的大会报告后，与会世界各国科学家报以热烈的长时间的掌声向这位地震预测的先驱者致以崇高的敬意)。然而，继任的新主席溝上惠(Mizoue M.)教授也持有类似观点。日本文部省国土地理院于 1997 年公布了一个报告^[66]；报告说，在日本目前还做不到像“大规模地震对策特别措置法”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 1980 年代时是一个居民仅 37 人的小镇)的一段断层面上，有仪器记录以来发生过 3 次震级 $M \sim 6$ 的地震，即：1922, 1934, 1966 年帕克菲尔德地震(图 3 中序数为 4, 5, 6 的地震事件)；而在有仪器记录以前，也发生过 3 次 $M \sim 6$ 的地震，即：1857, 1881 和 1901 年帕克菲尔德地震(图 3 中序数为 1, 2, 3 的地震事件)。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 $M \sim 6$ 的地震的规则性以及 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^[34-36,67]。根据这些资料以及其他有关资料，美国地质调查局(United States Geological Survey, 缩写为 USGS)在 1984 年发出正式的地震预报(据 Shearer^[68])，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面上，在(1988±4.3)年(即最晚在 1993 年 1 月之前)将发生一次 $M \sim 6$ 的地震，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，有的地震学家认为这次预报本身就是一种错误^[69]，认为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^[55,70,71]。一些地震学家则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 5 月 2 日发生于加州科林佳(Coalinga)的 $M_w 6.4$ 地震可能缓解了帕克菲尔德地区的应力^[72]。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^[73]。

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

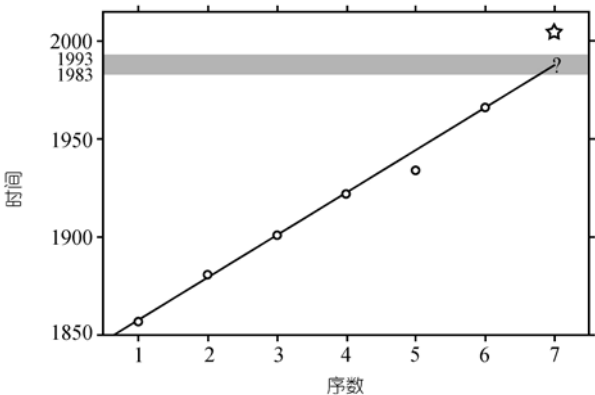


图 3 帕克菲尔德地震的预测

预测帕克菲尔德在(1988±4.3)年(即最晚在 1993 年 1 月之前)将发生一次 $M \sim 6$ 地震。图中序数 1~6 的圆圈表示历史上发生的 6 次帕克菲尔德地震，问号表示所预测的帕克菲尔德地震，灰色条带表示预报帕克菲尔德发生的时间窗(1983~1993)。帕克菲尔德 $M_w 6.0$ 地震(五角星)迟至 2004 年 9 月 28 日才发生，比预报的时间晚了至少 11 年(据日本地震学会地震予知检讨会^[22])

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 $M6.5$ 地震,发震概率是 30%^[74,39,75]。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所预报的地震并不准确地相符,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° 的倾角向西南倾斜,与圣安德列斯断层既不相交,并且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动,所以可能并没有“节余”下多少滑动量给所预报的这次地震^[76]。

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^[77~79]。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^[80]。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^[81],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他诸多目前尚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,原因是这个方法直观明瞭,并且比较可靠的地震活动性资料几乎随处可得。茂木清夫(Mogi^[61])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^[61])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简单地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^[82,83]曾利用茂木模式成功地预报了 1978 年墨西哥南部瓦哈卡(Oaxaca) $M7.7$ 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^[84]。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阶段都有可能缺失;并且,尚未有一致公认的、可被客观地运用的鉴别各个阶段的定义;此外,迄今也还没有对茂木模式进行过全面的检验。

在地震活动性图像研究方面,除了“茂木模式”即茂木清夫的方法外,其他研究者还提出了一些不同的分析方法,例如,同时考虑地震的时-空-强三要素具有不同权重效应的“区域-时间-长度方法”(Region-Time-Length 方法,简称 RTL 方法)^[85~93];基于复杂系统统计力学的地震物理预测模型的“图像信息学方法”(Pattern Informatics 方法,简称 PI 方法)^[94~96];用于比较在某一地区、某一时间段内地震活动性的平均变化率与该地区地震活动性的总平均

变化率以检测大地震前近震中地区的地震活动性的可能的异常平静期, 并与其他所有在随机的时间与随机的地点可能发生的地震活动性变化率减少加以比较, 估计这种“平静期”的统计意义的“Z-值法”^[97]; 通过测量在一给定的 3 维空间与给定的时间“点”上微震活动的重叠程度以检测微震活动性的空间群聚、地震活动高发期以及地震平静期的“微震重叠法”(SEISMic OverLAPing 法, 简称 SEISMOLAP 法)^[98]; 等等. 上述研究者运用这些方法在一些震例研究中均检测到了地震活动性的异常变化.

1.3.3 图像识别

曾任 IUGG 主席的国际著名地球物理学家克利斯-博罗克(Кейлис-Борок В. И.)及其俄国同事基于对“地震流”特性的分析, 提出了一种称作强震发生“概率增加的时间”(亦称“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^[99-105]. 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(California)和内华达州(Nevada)地震而设计的“CN 算法”. 他们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各种标志. 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. 自 1999 年起, 他们对阈值为 M7.5 和 M8.0 的地震做提前 6 个月的实时预测. 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 M8.1 大地震以及加利福尼亚中部 2003 年 12 月 22 日圣西蒙(San Simeon)M6.5 地震在震前做出了预报, 并取得了成功^[106,107]. 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. CN 算法也被用在如意大利等其他地区的地震预测并取得了成效^[108].

尽管克依利斯-博罗克在国际上具有崇高的学术地位, 声名鼎盛, 他与他的俄国同事提出的算法也可谓相当成功, 不但如此, 该算法还被别人应用于股

票行情预测乃至总统大选的预测并且获得更为巨大成功, 但毋庸讳言, 他们所预测的未来可能发生大地震的范围实在太太, 其线性尺度是所预报的未来可能发生的大地震的破裂长度的大约 5~10 倍; 更重要的是, 该算法主要是根据对地震目录做回归统计分析的经验算法, 对所采用的诊断函数的物理意义及其与地震孕育过程的关系缺乏深入的分析与探讨.

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他一些可能对应力、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^[109-122]. 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和地球化学等方法. 这些地震前兆统称“微观”地震前兆, 相应的方法称为“微观”地震前兆方法. 除了上述“微观”地震前兆外, 还有不依靠精密仪器、能为人们在地震前所感知的“宏观”地震前兆 (“宏观”异常), 如动物行为异常、地下水和温度变化等性质^[123-127]. 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^[18]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^[128]. 特别是在 20 世纪 70 年代, 紧接着苏联报道了地震波波速比(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^[129,130], 美国纽约兰山湖地区观测到了震前波速比异常^[131,132], 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^[133~135], 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、潮汐和火山喷发预测那样), 也可能对地震做出某种程度的预报”^[136,137,20]. 当时, 连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并测量地震前兆. 但是很快就发现地震预测的观测基础和理论基础都有问题: 对先前报导的波速比异常(Whitcomb 等^[138])重新做测量时发现结果重复不了(Allen 等^[139]); 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^[140,141]. 到了 20 世纪 70 年代末, 大多数早先提出的可能的“微观”地震前兆都被确认为对地震短、临预测价值不大. 至于“宏观”地震前兆, 通常认为只要做出适当的处理, 至少在一定的程度上可以用它们来做出地震震级、震中区和发震时间的实际预报^[125]. 然而, 在对宏观地震前兆做了系统研究后, 力武常次(Rikitake T.^[125])提出, 宏观地震前兆的特征尚待阐明, 因为宏观地震前兆常常很可能被许多“噪声”所干扰, 需要对其可靠性做认真的评价. 对动物行为异常等宏观地震前兆异常的成因, 对动物行为异常等宏观地震前兆为什么会、以及如何对数量级为 10^{-7} ~ 10^{-6} 的地壳应变的变化产生反应的, 迄今仍未得出结论性的意见^[125,126,142].

从 1989 年开始, IUGG 所属的 7 个协会之一的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^[28,143~145]. 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)对各国专家本人自由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 $M_s7.3$ 地震的前震^[146]; ② 震前数月至数年的“预震”(preshocks), 例如 1988 年 1 月 22 日 $M_s6.7$ 澳大利亚 Tennant Creek 地震^[147]; ③ 强余震之前的地震“平静”^[148]. 第二类是地下水的特性, 只有一项, 即: ④ 1978 年 1 月 14 日日本伊豆-大岛近海 $M_s7.0$ 地震前地下水中氡气含量减少、水温下降^[149,150]. 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^[151]. 对于地应变、地倾斜和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)和干旱-地震等则未予以认定. 评审未予以通过并非断然否定所提名的这些前兆方法, 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、或者说尚不能完全确信所提名的前兆是否真是地震前兆. 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、特别是在震前实时地识别前震, 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, 国际上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^[152,140,141]. 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、应变仪和倾斜仪

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^[153]。2004 年 9 月 28 日 17 时 15 分 24 秒 UTC,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 $35.815^\circ N$, $120.374^\circ W$, 震源深度 7.9 km)终于发生了(见图 3)。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、至今也仍未见分析出有地震前兆,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、地下水和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^[154,155]。

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、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(地震复发时间)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西北端起始、然后往东南端扩展的;正相反,它是从东南端开始,然后往西北端扩展的,地地道道的“南辕北辙”!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!它告诉我们:今后在地震灾害预测中,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他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,或者是现有的地震前兆观测手段和方法尚不足以发现、检测出地震前兆。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($M_w 5 \sim 7$)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,这说明可靠的地震前兆按现有的地震前兆观测手段和方法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,无疑应当予以提倡和鼓励。

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,上面已经提

到,关于“特征地震”仍有不少争议(例如, Wesnousky 等^[53]; Simpson 等^[72]; Ben-Zion 等^[73]; Savage 等^[69]; Wesnousky^[54]; Kagan 和 Wesnousky^[55]; Kagan^[70]; Rong 等^[156]; Jackson 和 Kagan^[71]). 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他地区,就像即使是在我国,1975 年海城地震的经验性预报成功的经验不适用于相距约 400 km 的 1976 年唐山地震一样. 所以,在我国,乃至在像日本、土耳其等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、地震前兆和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.

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(陈运泰^[24-27]): 地球内部的“不可入性”、大地震的“非频发性”和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^[157],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,德国-捷克边境附近进行的“德国大陆深钻计划”预定钻探 15 km. 和地球(平均)半径(6370 km)相比,超深钻所达到的深度还是“皮毛”,况且这类深钻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. 国际著名的地震学家、俄国的一位王子伽利津(Галицын Б. Б.)曾经说过(据 Галицын^[158]; Саваренский 和 Киринос^[159]):

“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. 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”;地震这盏“灯”也没有能够把地球内部的每个角落全照亮! 何况地球表面的 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(尽管如此困难,近半个世纪以来,地震学家在地球内部的层析成像方面还是取得了与其他学科相比毫不逊色的巨大的成功).

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)!

大地震是一种稀少的“非频发”事件,不等于说地震是一种稀少的“非频发”事件. 在地震学中,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震级遵从幂律关系^[51]。简单地说,地震越小,频度越高(或者说数量越大);通俗地说,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 8~10 倍;具体地说,全球平均每 3 年大约发生 2 个 $M_S \geq 8.0$ 地震,平均每年大约发生 17 个 $M_S 7.0 \sim 7.9$ 地震, 134 个 $M_S 6.0 \sim 6.9$ 地震, 1319 个 $M_S 5.0 \sim 5.9$ 地震, 13000 个 $M_S 4.0 \sim 4.9$ 地震, 130000 个以上 $M_S 3.0 \sim 3.9$ 地震, 1300000 个以上 $M_S 2.0 \sim 2.9$ 地震, 等等^[4,5]。显然,倘若不论其大小,地震的确不但不是“非频发”的,而且是“频发”的! 在地震学中,大地震通常指的是 $M_S \geq 7.0$ 的地震^[52,160]。就全球而言,与平均一年发生上千个中等大小的地震($5.0 \leq M_S < 7.0$ 的地震)相比,平均一年发生 17~18 次大地震($M_S \geq 7.0$ 地震)尚属“非频发”事件。大地震的“非频发性”与不论其大小的地震的“频发性”不能混为一谈^[161]。

也不要把大地震的“非频发性”与灾害性地震的频繁发生(“频发性”)相混淆。近年来,不仅是大地震,连中等大小的地震($5.0 \leq M_S < 7.0$ 的地震)也频频袭击人口稠密的地区,造成相当严重的地震灾害。影响地震造成人员伤亡和财产损失的因素很多,除了地震大小外,还有震源深度、地理位置、发震时间、结构与建筑物的质量、地质土层条件等因素。一个最新的典型例子当推前面已提及的 2003 年 12 月 26 日伊朗巴姆地震。巴姆地震的震级只是 $M_W 6.6 (M_S 6.8)$, 地震不大,却因当地绝大多数的民居和古老的建筑物均系土砖结构,抗震性能极差、震源又浅(震源深度只有 10 km)、地质土层条件很差、地震震中正好就在巴姆城的正下方,地震又发生在当地时间凌晨(发震时间为 1: 56: 52 UTC, 当地时间为上午 5: 26: 52, 当地时间与协调世界时的时差为 3.5 h), 诸多不利因素叠加在一起,以至造成了约 3.1 万人死亡, 约 3 万人受伤, 约 7.56 万人无家可归, 85% 以上的建筑物与基础设施毁坏, 具有千年历史的巴姆古城毁于一旦。

2.1.3 地震物理过程的复杂性

从常识上笼统地说,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^[162,163];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;大地震通常跟随着大量的余震,而且大的余震还有自己的余震;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;地震发生后断面上的剩余应力(亦称最终应力、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”式地骤然演化成一个大地震。这些复杂性是否彼此有关联? 如果有,是什么样的关系? 都是非常值得深究的问题。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以及类似于地震的其他现象的普适性;反过来,对于地震现象以及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,从而有助于对预防和减轻地震灾害。

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、非线性的依赖性称为“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。在混沌这个物理概念广为应用之前,地震学家凭借直觉早已熟知这一概念^[51,52]。有一些专家认为(例如, Bak 等^[164,165]、Bak 和 Tang^[166]、Bak^[167]), 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, 常缩写为 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”式地演变成大事件。“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。从理论上说,虽然整个系统内的所有细节是可以测量的,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一一准确地测量的;况且迄今人们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(古登堡-里克特关系式)那样的幂律分布.

地震是地下岩石的快速破裂过程.在地震学中,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.在地震学中,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、经宇津德治(Utsu T., 1928~2004)改进的大森房吉(Omori F., 1868~1923)定律(参见 Bullen^[11])。“改进的大森定律”现在亦称“大森-宇津定律”或“大森-宇津定标律”.大森-宇津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,无论是在空间域上还是在时间域上,地震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(SOC)现象;他们还认为,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.这些专家进一步推论说: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^[33].言之凿凿,应和者甚众.一时间,“地震不可预测”论甚嚣尘上.

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^[168]!这是因为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,而这个幂律实际上只是一种表观现象.从这个实际上是表观现象的幂律出发,便得出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,这是错误的.产生这一错误的关键是没有考虑到余震的效应. Knopoff^[168]指出,在我们通常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——它们的主震的头上,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^[168]发现地震现象并非不存在特征尺度,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(亦称易震层、孕震层)的厚度(约 15 km, 相当于 6.5 级地震)的特征尺度(Scholz^[169]);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 多年前提出的 Burridge-Knopoff 弹簧-滑块模型(简称 B-K 模型)^[170].这些研究者以 B-K 模型或其他与 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:一个小地震事件是否生长、是否发展为大地震事件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^[166,171~173];如果任何一个地震都有可能演变为大地震,那么地震预测将是不可能的^[174];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^[175];等等.对地震预测持否定意见的 Geller^[33]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^[168]则认为这些研究者滥用了他的模型(B-K 模型),他认为,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,地震表观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(SO)的,但并不临界(C).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推出地震具有自组织临界性、进而推出“地震不能预测”的结论. Knopoff^[168]尖锐地指出主张“地震不可预测”的研究者在逻辑推理上的谬误.他指出,主张“地震不可预

测”的研究者的逻辑推理好比说是:“哺乳动物(自组织临界现象)有 4 条腿(遵从幂律分布), 桌子(地震现象)也有 4 条腿(遵从幂律分布), 所以桌子(地震现象)也是一种哺乳动物(自组织临界现象)或哺乳动物(自组织临界现象)也是桌子(地震现象)”。

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争论还在继续进行中^[171~184]。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差不多, 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”)。不过, 这样一来, 对地震的可预测性(预测地震的能力)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^[133,134]、膨胀-失稳模式的发展^[135]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^[136,137,20]。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, 后者迄今尚未发生), 又使许多人感到沮丧悲观。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^[33,176,177]; Geller 等^[178,179]; Hamada^[180]; Turcotte^[181]; Knopoff^[29,168,182]; Knopoff 等^[184])。相应地, 地震预测预报的“行情”亦大起大落。从 20 世纪 80 年

代中期开始, 一直到不久以前, 正如曾对帕克菲尔德地震预测做出重大贡献的科学家之一的林德(Lindh A. G.)博士^[153]感叹道:“当前被视为在做地震预测工作是极其不时尚的, 以至于人们调侃说如果你想得到资助那么在你的基金申请书中切勿有任何涉及地震预测的字眼。”

尽管如此, 和坊间流传的说法大相径庭, 国际地震学界对地震预测预报以及预防与减轻地震灾害的关注与研究从来没有停止和放弃过。近一二十年来, 特别是近年来, 地震预测预报问题在世界范围内重新引起各界的关注^[185~187], 不幸的是, 这至少部分地是以频繁发生的灾害性地震(如前面已提到的 2001 年印度古杰拉特地震、2003 年伊朗巴姆地震、2005 年巴基斯坦地震以及迄今余震不断的、引发了印度洋特大海啸的 2004 年印尼苏门达腊-安达曼特大地震等)造成的灾难为代价! 各国地震学家正在加紧努力, 以更广阔、更新颖的视野审视地震预测预报(例如, Linde 和 Sacks^[188]; Thanassoulas^[189]; Crampin 等^[190]; Beroza 和 Ide^[191]; Bromirski^[192]; Liu 等^[193]; Borghi 等^[194])。

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, 也不是最新的“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, 一部现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。地震预测的确困难, 但并非是不可能的。讨论地震预测的困难是为了找准问题, 以便对症下药, 战胜困难。我们在下文(3.4 节等)将要述及的许多地震预测的研究方法便是地震学家针对上述困难提出来的方法。地震预测预报面临的困难既不能作为放松或放弃地震预测研究的藉口; 也不能作为放弃地震预测研究、片面强调只要搞抗震设防的理由。面对地震灾害, 地震学家要勇于迎接挑战, 知难而进; 增强防御与减轻地震灾害的能力, 包括做好抗震设防工作、增强工程抗震设防的能力(如提高地震动预测水平)等等, 离不开地震预测预报水平的提高, 也离不开对地震发生规律及其致灾机理的认识。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、翘首企盼几

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^[24-27]. 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、上百亿元或以上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(即使是学问高超的)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^[195-197].

寺田寅彦(Terada, T.)是 20 世纪初一位国际著名的日本地球物理学家, 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 月建立的东京帝国大学(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、石原純等国际地震学界熟知的地震学家), 现在仍然矗立在东京大学地震研究所门前的铜版上的碑文便是出自他的手笔. 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, 但无论是对广大公众还是对负责公共安全的政府官员, 时至今日都是一个极有教益的警示. 可是, 由尚有争议的科学原理得出的对公众的地震警告可能起不到什么实际作用, 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, 时为东京帝国大学地震学教研室助手(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 年间, 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. “雪上加霜”, 在乘船回国途中, 他的健康状况因脑病急剧恶化. 大森房吉于 10 月 4 日抵达横浜, 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, 终年仅 55 岁. 逝世之前, 大森房吉将东京帝国大学地震学教研室主任的工作托付给了曾经被他猛烈抨击过的今村明恒.

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, 他的警示是长鸣的警钟, 告诫人们时刻不要忘记防灾减灾. 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(前面提到的信息的“不完全性”)并会引起了社会的恐慌(决策的“高风险性”)为由所“打压”, 他的正确的预报竟以社会遭受严重损失、今村明恒个人长期承受巨大的压力为惨重代价才得以证明! 需要指出的是, 大森房吉的“打压”并非出自个人的恩怨, 而是认为当时今村明恒的科学依据尚不可靠、不足以得出相模湾将发生大地震的结论, 并且, 按照现在的流行说法, 预报

的“时间窗”长达 50 年;大森房吉本人也并非没有注意到东京近邻地区可能发生地震,例如,他于关东大地震发生前一年(1922 年)曾经写道(Bolt^[12]):

“现在东京近邻地区保持地震平静,但距东京平均 60 km 距离的周围山区地震频频发生,虽然在城里常常明显感到这些地震,但因为该区不属于严重破坏的地震带,并不构成危险.然而随着时间的流逝,目前地震活动区的地震活动将逐渐平静下来,而作为补偿,东京湾可能再度发生地震活动,并可能发生一次地震.这样,一个震源距东京一定距离的地震将产生局部变动和部分破坏.”

大森房吉卓越地预报了未来即将发生地震的地点(“东京湾可能再度发生地震活动,并可能发生一次地震”),但低估了地震的强度(“一个震源距东京一定距离的地震将产生局部变动和部分破坏”),而且没有料到不久(翌年)就发生!

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预报;另一方面,科学家(作为一个群体,而不仅是某个个人)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与研究

为了克服地震预测预报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”即台站之间的距离约 2000 km)的全球地震台网(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^[198].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^[112,199,123-126,200-203]以及如通过地倾斜、地应变、地应力和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^[204-206]、地下水位、地下水化学^[110,111,149,150,207-209]和动物异常^[142,126]等.它们涉及地球物理、大地测量、地质和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方周期性的缓慢滑动事件^[210-212,188,191]及与

其相关的间歇性的简谐颤动^[192], 台风对地震的触发作用^[193], 以及利用地震剪切波分裂监测地壳应力变化以预报地震的时间和震级的“应力预报地震”(stress-forecast earthquake)方法^[190,213~221], 地震活动性的“临界加速模型”^[162,222], “加速矩释放模型”(acceleratory moment release 模型, 简称 AMR 模型)^[223], “短期丛集模型”^[224], “应力触发模型”^[80,81]等等, 均应引起重视。

为了推进地震预报(earthquake forecasting)稳步向前发展, 有必要对地震预报的质量进行科学的、客观的评估。为此, 在美国南加州大学的南加州地震中心(Southern California Earthquake Center, 缩写为 SCEC)、美国地质调查局(USGS)以及美国自然科学基金会(National Science Foundation, 缩写为 NSF)的共同支持下, 南加州地震中心的“区域性地震似然模型工作组”(Working Group on Regional Earthquake Likelihood Models, 缩写为 RELM)倡议开展名为“地震可预测性合作研究”(Collaboratory Studies for Earthquake Predictability, 缩写为 CSEP)的国际合作, 计划先从美国加州开始试验, 然后推广至全球, 对预测模型和预报模型进行严格的评估^[225]。迄今, 除 SCEC 外, 已有瑞士苏黎士高等工业学校(Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich)、新西兰地质与核科学研究所(Institute of Geological and Nuclear Sciences, New Zealand)以及日本东京大学地震研究所(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)参加这一国际合作计划, 成为其试验中心。这一国际合作计划已从 2009 年 8 月 1 日开始实施, 将对新西兰、日本、西太平洋北部及南部以及全球的地震预测模型和预报模型进行严格的评估。这种全球性的预测预报模型严格的客观的评估必将有助于改进预测预报模型, 提高预测预报地震的能力。

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、覆盖面和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”等在地球科学中的应用为地震预测研究带来了新的机遇(例如, Borghi 等^[194]), 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(板间地震)、也发生在板块内部(板内地震), 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、而且在经济效益上也是比较高的。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方式, 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、地震前兆和地震活动性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。

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(孕震层)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 利用计算机做地震数值模拟, 模拟地震的孕育、发生、扩展、停止, 地震序列的形成与发生, 地震的轮回过程以及地震的致灾过程, 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(大地震的“非频发性”)、地震序列的形成与发生以及地震的轮回过程(大地震的“非频发性”), 又能模拟破裂时间以仅仅数秒、数十秒计的天然地震的快速破裂过程(地震的“突发性”).

为此, 应当实施旨在对地球内部及地震系统地进行基础性的、综合性的观测、探测与研究的大型科学计划. 目前美国正在实施的“地球透镜计划”(EarthScope)是一个很有创新意义的例子(EarthScope Working Group, EarthScope Project Plan, 2001)^[226], 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计划(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、温度和应变等; 该计划拟对井下和邻区的流体活动性、地震活动性和形

变等进行长达 20 年的长期监测.

(3) 板块边界观测计划(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、在时间上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. 用星基 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, “点面结合”. 对于所有类型的地形地貌, 空间测量将达到密集的空间复盖(100 m)与时间复盖(8 天), 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: USArray, \$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每年 \$15~20 百万.

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(大地震的“非频发性”)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, 语焉不详, 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 讨论与结论

以上从正反两个方面概要评述了国际地震预测预报研究的情况, 分析了地震预测预报在科学上的遇到的困难, 阐述了为解决这些困难应当采取的科学途径. 我们指出, 自 20 世纪 60 年代以来, 中期和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、图像识别以及美国帕克菲尔德地震在预报期过了 11 年后终于发生, 等等. 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遥远. 我们还指出, 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尽管非常困难, 但并非不可能; 困难既不能作为放松或放弃地震预测研究的藉口; 也不能作为放弃地震预测研究、片面强调只要搞抗震设防的理由. 地震作为一种自然现象, 是人类所居住的地球这颗太阳系中独一无二的行星生机勃勃的表现, 它的发生是不可避免的; 但是, 地震灾害, 不但应当而且也是可以通过努力予以避免或减轻的. 面对地震

灾害, 地震学家要勇于迎接挑战, 知难而进; 要加强对地震发生规律及其致灾机理的研究, 提高地震预测预报水平, 增强防御与减轻地震灾害的能力. 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、坐等几十年后的某一天基础研究的飞跃进展和重大突破. 特别需要乐观地指出的是, 与 40 多年前的情况相比, 地震学家今天面临的科学难题依旧, 并未增加; 然而这个难题却比先前暴露得更加清楚, 并且 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预报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, 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预报科学试验, 坚持不懈地、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, 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(Goddard R. H., 1882~1945)所言:

“慎言不可能. 昨日之梦想, 今日有希望, 明日变现实.”

致谢 两位审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议, 谨表谢忱.

参考文献

- 1 Kanamori H. Global seismicity. In: Kanamori H, Boschi E, eds. *Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation*. New York: Elsevier North-Holland Inc., 1983. 596—608
- 2 Utsu T. A list of deadly earthquakes in the world: 1500—2000. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P, et al, eds. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*. San Diego: Academic Press, 2002. 691—717
- 3 National Research Council of the National Academies. *Living on an Active Earth*. Washington DC: The National Academies Press, 2003. 418
- 4 Engdahl E R, Villasenor A. Global seismicity: 1900—1999. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P, et al, eds. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*. San Diego: Academic Press, 2002. 665—690
- 5 <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/>
- 6 孔丘, 编订. *诗经*. 北京: 北京出版社, 2006. 383
- 7 李善邦. *中国地震*. 北京: 地震出版社, 1981. 612
- 8 周锡瓚, 选注. *诗经选*. 广州: 广东人民出版社, 1984. 307
- 9 Darwin C. *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. Fitz Roy, R. N. D.* New York: Appleton and Co., 1898
- 10 谢毓寿, 蔡美彪, 主编. *中国地震历史资料汇编(第一卷)*. 北京: 科学出版社, 1983. 227
- 11 Bullen K E. *An Introduction to the Theory of Seismology*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1963. 381
- 12 Bolt B A. *Earthquakes and Geological Discovery*. New York: W. H. Freeman, 1993. 229
- 13 Agnew D C. History of seismology. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P, et al, eds. *International Handbook of Earthquake and*

- Engineering Seismology Part A. San Diego: Academic Press, 2002. 3—11
- 14 Milne J. Seismic science in Japan. *Trans Seism Soc Jpn*, 1880, 1: 3—33
- 15 傅承义, 刘恢先. 天然地震的灾害及其防御. 1956-1967 年科学技术发展远景规划, 第 33 项. 1956
- 16 Tsuboi C, Wadati K, Hagiwara T. Prediction of Earthquakes—Progress to Date and Plans for Future Development. Rep. Earthquake Prediction Research Group Japan. Tokyo: Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1962. 21
- 17 傅承义. 有关地震预告的几个问题. *科学通报*, 1963, (3): 30—36
- 18 Press F, Benioff H, Frosch R A, et al. Earthquake Prediction: A Proposal for A Ten Year Program of Research. Washington DC: White House Office of Science and Technology, 1965. 134
- 19 Press F, Brace W F. Earthquake prediction. *Science*, 1966, 152: 1575—1584
- 20 National Research Council of the National Academies. Predicting Earthquakes: A Scientific and Technical Evaluation—With Implication for Society. Washington DC: National Academy Press, 1976. 62
- 21 Садовский М А. Прогноз Землетрясений. Том 1-6, Изд. “Дониш”. 1982—1986
- 22 日本地震学会地震予知検討委員会, 編. 地震予知の科学(日文). 東京: 東京大学出版会, 2007. 218
- 23 Chen Y T, Chen Z L, Wang B Q. Seismological studies of earthquake prediction in China: a review. In: Dragoni M, Boschi E, eds. Earthquake Prediction. Roma: Il Cigno Galileo Galilei, 1992. 71—109
- 24 陈运泰. 地震预测研究概况. *地震学刊*, 1993, (1): 17—23
- 25 陈运泰. 地震预测现状与前景. 见: 中国科学院, 编著. 2007 科学发展报告. 北京: 科学出版社, 2007. 173—182
- 26 陈运泰. 地震预测——进展、困难与前景. *地震地磁观测与研究*, 2007, 28(2): 1—24
- 27 陈运泰. 地震预测要知难而进. *求是*, 2008, (15): 58—60
- 28 Wyss M. Evaluation of Proposed Earthquake Precursors. Washington DC: American Geophysical Union, 1991. 94
- 29 Knopoff L. Earthquake prediction: the scientific challenge. In: Knopoff L, Aki K, Allen C R, et al, eds. Earthquake Prediction: The Scientific Challenge, Colloquium Proceedings. *Proc Nat Acad Sci USA*, 1996, 93: 3719—3720
- 30 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社, 1993. 498
- 31 Wallace R E, Davis J F, McNally K C. Terms for expressing earthquake potential, prediction, and probability. *Bull Seism Soc Amer*, 1984, 74: 1819—1825
- 32 Kisslinger C. Potents and predictions. *Nature*, 1989, 339: 337—338
- 33 Geller R J. Earthquake prediction: a critical review. *Geophys J Int*, 1997, 131: 425—450
- 34 Bakun W H, McEvelly T V. Earthquakes near Parkfield, California: comparing the 1934 and 1966 sequences. *Science*, 1979, 205: 1375—1377
- 35 Bakun W H, McEvelly T V. Recurrence models and Parkfield, California earthquakes. *J Geophys Res*, 1984, 89: 3051—3058
- 36 Bakun W H, Lindh A G. The Parkfield, California earthquake prediction experiment. *Science*, 1985, 229: 619—624
- 37 Sykes L R. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps and prediction. *J Geophys Res*, 1971, 76: 8021—8041
- 38 Sykes L R. Intraplate seismicity reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation. *Rev Geophys Space Phys*, 1978, 16: 621—688
- 39 Sykes L R, Nishenko S P. Probabilities of occurrence of large plate rupturing earthquakes for the San Andreas, San Jacinto, and Imperial faults, California. *J Geophys Res*, 1984, 89: 5905—5927
- 40 Nishenko S P. Earthquakes, hazards and predictions. In: James D E, ed. *The Encyclopedia of Solid-Earth Geophysics*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989. 260—268
- 41 Nishenko S P. Circum-Pacific seismic potential: 1989—1999. *Pure Appl Geophys*, 1991, 135: 169—259
- 42 陈章立, 刘蒲雄, 黄德瑜, 等. 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. 北京: 地震出版社, 1981. 97—205
- 43 陆远忠, 陈章立, 王碧泉, 等. 地震预报的地震学方法. 北京: 地震出版社, 1985. 268
- 44 Reid H F. The California Earthquake of April 18, 1906. Publication 87, 2. Reprinted 1969. Washington: Carnegie Institution of Washington, 1910. 192
- 45 Reid H F. The elastic-rebound theory of earthquakes. *Univ Calif Pub Bull Dept Geol Sci*, 1911, 6: 413—444
- 46 Imamura A. On the seismic activity of central Japan. *Jpn J Astron Geophys*, 1928, 6: 119—137
- 47 Федотов С А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильский островов и северо-восточной Японии. *Тр. Ин-та Физики Земли АН СССР, Изд. Наука*, 1965, 36: 66—93

- 48 Kelleher A, Sykes L R, Oliver J. Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean. *J Geophys Res*, 1973, 78: 2547—2585
- 49 McCann W R, Nishenko S P, Sykes L R, et al. Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries. *Pure Appl Geophys*, 1979, 117: 1082—1147
- 50 Schwartz D P, Coppersmith K J. Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas faults. *J Geophys Res*, 1984, 89: 5681—5698
- 51 Gutenberg B, Richter C F. Magnitude and energy of earthquakes. *Ann Geofis*, 1956, 9: 1—15
- 52 Richter C F. *Elementary Seismology*. San Francisco: W. H. Freeman, 1958. 768
- 53 Wesnousky S, Scholz C, Shimazaki K. Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting. *J Geophys Res*, 1983, 88: 9331—9340
- 54 Wesnousky S. The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution: Which is it? *Bull Seism Soc Amer*, 1994, 84: 1940—1959
- 55 Kagan Y, Wesnousky S. The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution. Which is it? Discussion and Reply. *Bull Seism Soc Amer*, 1996, 86: 274—291
- 56 Bufe C G, Harsh P W, Burford R O. Steady-state seismic slip—A precise recurrence model. *Geophys Res Lett*, 1977, 4: 91—94
- 57 Shimazaki K, Nakata T. Time-predictable recurrence model for large earthquakes. *Geophys Res Lett*, 1980, 7: 279—282
- 58 Mogi K. Recent horizontal deformation of the Earth's crust and tectonic activity in Japan (1). *Bull Earthq Res Inst Univ Tokyo*, 1970, 48: 413—430
- 59 Mogi K. Seismicity in western Japan and long-term earthquake forecasting. In: Simpson D W, Richards P, eds. *Earthquake Prediction—An International Review*. Maurice Ewing Monograph Series 4. Washington DC: Amer Geophys Union, 1981. 43—51
- 60 Mogi K. Earthquake prediction program in Japan. In: Simpson D W, Richards P, eds. *Earthquake Prediction—An International Review*. Maurice Ewing Monograph Series 4. Washington DC: Amer Geophys Union, 1981. 635—666
- 61 Mogi K. *Earthquake Prediction*. Tokyo: Academic Press, 1985. 355
- 62 Ando M. Possibility of a major earthquake in the Tokai district, Japan, and its pre-estimated seismotectonic effects. *Tectonophysics*, 1975, 25: 69—85
- 63 Utsu T. Possibility of a great earthquake in the Tokai district, Japan. *J Phys Earth*, 1977, 25: S219—S230
- 64 Ishibashi K. Specification of a soon-to-occur seismic faulting in the Tokai district, central Japan, based upon seismotectonics. In: Simpson D W, Richards P, eds. *Earthquake Prediction—An International Review*. Maurice Ewing Monograph Series 4. Washington DC: Amer Geophys Union, 1981. 297—332
- 65 Matsumura S. Focal zone of a future Tokai earthquake inferred from the seismicity pattern around the plate interface. *Tectonophysics*, 1997, 273: 271—291
- 66 Subcommittee for Review Drafting, Special Committee for Earthquake Prediction, Geodesy Council of the Ministry of Education, Science, and Culture. *State-of-the-Art Review of the National Programs for Earthquake Prediction*. Tokyo, 1997. 137
- 67 Roeloffs E, Langbein J. The earthquake prediction experiment at Parkfield, California. *Rev Geophys*, 1994, 32(3): 315—336
- 68 Shearer C F. Southern San Andreas Fault Geometry and Fault Zone Deformation: Implications for Earthquake Prediction (National Earthquake Prediction Council Meeting, March, 1985). U. S. Geol. Surv. Open-file Rep. 85-507, Reston, Virginia, 1985. 173—174
- 69 Savage J C. The Parkfield prediction fallacy. *Bull Seism Soc Am*, 1993, 83: 1—6
- 70 Kagan Y. Statistical aspects of Parkfield earthquake sequence and Parkfield prediction. *Tectonophysics*, 1997, 270: 207—219
- 71 Jackson D D, Kagan Y Y. The 2004 Parkfield earthquake, the 1985 prediction, and characteristic earthquakes: lessons for the future. *Bull Seism Soc Amer*, 2006, 96: S397—S409
- 72 Simpson R W, Schulz S S, Dietz L D, et al. The response of creeping parts of the San Andreas fault to earthquakes on nearby faults: two examples. *Pure Appl Geophys*, 1988, 126: 665—685
- 73 Ben-Zion Y, Rice J R, Dmowska R. Interaction of the San Andreas fault creeping segment with adjacent great rupture zones, and earthquake recurrence at Parkfield. *J Geophys Res*, 1993, 98: 2135—2144
- 74 Lindh A G. Preliminary Assessment of Long-Term Probabilities for Large Earthquakes along Selected Fault Segments of the San Andreas Fault System in California. U. S. Geol. Surv. Open-File Report 83-63, Menlo Park, California, 1983. 15
- 75 Working Group on California Earthquake Probabilities. Probabilities of Large Earthquakes Occurring in California on the San Andreas Fault. U. S. Geological Survey Open-File Report 88-398, Reston, Virginia, 1988. 62
- 76 Harris R A. Forecasts of the 1989 Loma Prieta, California earthquake. *Bull Seism Soc Amer*, 1998, 88: 898—916

- 77 Harris R A, Simpson R W. Stress relaxation shadows and the suppression of earthquakes: some examples from California and their possible uses for earthquake hazard estimates. *Seism Res Lett*, 1996, 67: 40
- 78 Harris R A, Simpson R W. Suppression of large earthquakes by stress shadows: a comparison of Coulomb and rate-and-state failure. *J Geophys Res*, 1998, 103: 24439—24451
- 79 Deng J, Sykes L. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: a 200-year perspective. *J Geophys Res*, 1997, 102: 9859—9886
- 80 Felzer K R, Brodsky E E. Decay of aftershock density with distance indicates triggering by dynamic stress. *Nature*, 2006, 441: 735—738
- 81 Mallman E P, Parson T. A global search for stress shadows. *J Geophys Res*, 2008, 113: B12304
- 82 Ohtake M, Matumoto T, Latham G. Seismicity gap near Oaxaca, southern Mexico, as a probable precursor to a large earthquake. *Pure Appl Geophys*, 1977, 113: 375—385
- 83 Ohtake M, Matumoto T, Latham G. Evaluation of the forecast of the 1978 Oaxaca, southern Mexico earthquake based on a precursory seismic quiescence. In: Simpson D W, Richards P, eds. *Earthquake Prediction—An International Review*. Maurice Ewing Monograph Series 4. Washington DC: American Geophysical Union, 1981. 53—62
- 84 Habermann R E. Precursory seismic quiescence: past, present, and future. *Pure Appl Geophys*, 1988, 126: 277—318
- 85 Sobolev G A. The examples of earthquake preparation in Kamchatka and Japan. *Tectonophysics*, 2001, 338: 269—279
- 86 Sobolev G A, Chelidze T L, Zavyalov A D, et al. The maps of expected earthquakes based on a combination of parameters. *Tectonophysics*, 1991, 193: 255—265
- 87 Sobolev G A, Huang Q, Nagao T. Phases of earthquake's preparation and by chance test of seismic quiescence anomaly. *J Geodyn*, 2002, 33: 413—424
- 88 Sobolev G A, Tyupkin Y S. Low-seismicity precursors of large earthquakes in Kamchatka. *Volcanol Seismol*, 1997, 18: 433—446
- 89 Sobolev G A, Tyupkin Y S. Precursory phases, seismicity precursors, and earthquake prediction in Kamchatka. *Volcanol Seismol*, 1999, 20: 615—627
- 90 Huang Q. Search for reliable precursors: a case study of the seismic quiescence of the 2000 western Tottori prefecture earthquake. *J Geophys Res*, 2006, 111: B04301, doi: 10.1029/2005JB003982
- 91 Huang Q. Seismicity changes prior to the M_s 8.0 Wenchuan earthquake in Sichuan, China. *Geophys Res Letts*, 2008, 35: L23308, doi: 10.1029/2008GL036270
- 92 Huang Q, Sobolev G A, Nagao T. Characteristics of the seismic quiescence and activation patterns before the $M=7.2$ Kobe earthquake, January 17, 1995. *Tectonophysics*, 2001, 337: 99—116
- 93 Huang Q, Öncel A O, Sobolev G A. Precursory seismicity changes associated with the $M_w=7.4$ 1999 August 17 Izmit (Turkey) earthquake. *Geophys J Int*, 2002, 151: 235—242
- 94 Rundle J B, Klein W, Tiampo K F, et al. Linear pattern dynamics in nonlinear threshold systems. *Phys Rev E*, 2000, 61: 2418—2431
- 95 Rundle J B, Turcotte D L, Shcherbakov R, et al. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems. *Rev Geophys*, 2003, 41: 1019, doi: 10.1029/2003RG000135
- 96 Chen C C, Rundle J B, Holliday J R, et al. The 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake as a typical example of seismic activation and quiescence. *Geophys Res Letts*, 2005, 32: L22315, doi: 10.1029/2005GL023991
- 97 Wyss M, Habermann R E. Precursory seismic quiescence. *Pure Appl Geophys*, 1998, 126: 319—332
- 98 Zshau J. SEISMOLAP: a quantification of seismic quiescence and clustering. IASPEI, XXI General Assembly, Boulder, Colorado, July 2—14, 1995. A389
- 99 Keilis-Borok V I, Knopoff L, Rotwain I M, et al. Intermediate-term prediction of occurrence times of strong earthquakes. *Nature*, 1988, 335: 690—694
- 100 Keilis-Borok V I, Kossobokov V G. Premonitory activation of seismic flow: algorithm $M8$. *Phys Earth Planet Inter*, 1990, 61: 73—83
- 101 Keilis-Borok V I, Rotwain I M. Diagnosis of time of increased probability of strong earthquake in different regions of the world: algorithm CN. *Phys Earth Planet Inter*, 1990, 61: 57—72
- 102 Healy T H, Kossobokov V G, Dewey I W. A Test to Evaluate the Earthquake Prediction Algorithm $M8$. U. S. Geological Survey Open-File Report 92—401, Denver, Colo., 1992. 23
- 103 Kossobokov V G, Keilis-Borok V I, Smith S W. Localization of intermediate-term earthquake prediction. *J Geophys Res*, 1990, 95(B12): 19763—19772
- 104 Kossobokov V G, Romashkova L L, Keilis-Borok V I, et al. Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant advance

- prediction of the largest earthquakes in the circum-Pacific, 1992—1997. *Phys Earth Planet Inter*, 1999, 111: 187—196
- 105 Keilis-Borok V I, Shebalin P, Gabrielov A, et al. Reverse tracing of short-term earthquake precursors. *Phys Earth Planet Inter*, 2004, 145: 75—85
 - 106 Keilis-Borok V I, Shebalin P. Short-term advance prediction of the San Simeon earthquake, California, December 22, 2003, magnitude 6.5. Personal communication, 2003
 - 107 Shebalin P. Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquakes chains. *Tectonophysics*, 2006, 424(3): 335—349
 - 108 Peresan A, Costa G, Panza G F. Seismotectonic model and CN earthquake prediction in Italy. *Pure Appl Geophys*, 1999, 154: 281—306
 - 109 Kisslinger C, Suzuki Z. *Earthquake Precursors*. Tokyo: Japan Scientific Societies Press, 1978. 296
 - 110 Wakita H. Precursory changes in groundwater prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake. In: Simpson D W, Richards P, eds. *Earthquake Prediction—An International Review*. Maurice Ewing Monograph Series 4. Washington DC: American Geophysical Union, 1981. 527—532
 - 111 Wakita H. Changes in groundwater level and chemical composition. In: Asada A, ed. *Earthquake Prediction Techniques: Their Application in Japan*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1982. 175—216
 - 112 Asada T. *Earthquake Prediction Techniques: Their Application in Japan*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1982. 317
 - 113 Varotsos P, Alexopoulos K, Nomicos K. Seismic electric currents. *Proc Greek Acad Sci*, 1981, 56: 277—286
 - 114 Varotsos P, Alexopoulos K, Nomicos K. Electric telluric precursors to earthquakes. *Proc Greek Acad Sci*, 1982, 57: 341—362
 - 115 Varotsos P, Alexopoulos K, Nomicos K, et al. Official earthquake prediction procedure in Greece. *Tectonophysics*, 1988, 152: 193—196
 - 116 Varotsos P, Alexopoulos K. Physical properties of the variations of the electric field of the Earth preceding earthquakes. I. *Tectonophysics*, 1984, 110: 73—98
 - 117 Varotsos P, Alexopoulos K. Physical properties of the variations of the electric field of the Earth preceding earthquakes. II. Determination of epicenter and magnitude. *Tectonophysics*, 1984, 110: 99—125
 - 118 Evison F F. Earthquake prediction. *Proceedings of the International Symposium in Earthquake Prediction*. Paris: Terra Scientific Publishing Co., 1984. 995
 - 119 Varotsos P, Lazaridou M. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals. *Tectonophysics*, 1991, 188: 321—347
 - 120 Hayakawa M, Fujinawa Y. *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Co., 1994. 677
 - 121 Hayakawa M. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Co., 1999. 996
 - 122 Gokhberg M B, Morgounov V A, Pokhotelov O A. *Earthquake Prediction: Seismo-Electromagnetic Phenomena*. New Jersey: Gordon and Breach Publishers, 2000. 193
 - 123 Rikitake T. Practical approach to earthquake prediction and warning. In: Rikitake T, ed. *Current Research in Earthquake Prediction I*. Dordrecht: Reidel, 1981. 1—56
 - 124 Rikitake T. Anomalous animal behavior preceding the 1978 earthquake of magnitude 7.0 that occurred near Izu-Oshima, Japan. In: Rikitake T, ed. *Current Research in Earthquake Prediction I*. Dordrecht: Reidel, 1981. 67—80
 - 125 Rikitake T. *Earthquake Forecasting and Warning*. Tokyo: Center for Academic Publications Japan, 1982. 402
 - 126 Rikitake T. Nature of macro-anomaly precursory to an earthquake. *J Phys Earth*, 1996, 42: 149—164
 - 127 力武常次. 動物は地震を予知するか異常行動が教えるもの(日文). 東京: 東京株式会社講談社, 1982. 215
 - 128 Allen C R. Earthquake prediction—1982 overview. *Bull Seism Soc Amer*, 1982, 72: S331—S335
 - 129 Семенов А Н. Изменение отношения времен пробега поперечных и продольных волн перед сильными землетрясениями. *Изв АН СССР Физика Земли*, 1969, (4): 72—77
 - 130 Нерсесов И Л, Семенов А Н, Симбирева И Г. Пространственно-временное распределение соотношений времен пробега поперечных и продольных волн в Гармском районе. *Сб. Физические Основания Предвестников Землетрясений*. Изд Наука, 1969. 88—89
 - 131 Aggarwal Y P, Sykes L R, Armsbruster J, et al. Premonitory changes in seismic velocities and prediction of earthquakes. *Nature*, 1973, 241: 101—104

- 132 Aggarwal Y P, Sykes L R, Simpson D W, et al. 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 Geophys Res*, 1975, 80: 718—732
- 133 Nur A. Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of t_s/t_p travel times. *Bull Seism Soc Amer*, 1972, 62: 1217—1232
- 134 Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P. Earthquake prediction: a physical basis. *Science*, 1973, 181: 803—810
- 135 Mjachkin V, Brace W, Sobolev G, et al. Two models of earthquake forerunners. *Pure Appl Geophys*, 1975, 113: 169—181
- 136 Press F. Earthquake prediction. *Sci Am*, 1975, 232(5): 134—137
- 137 Press F. Heicheng and Los Angeles: a tale of two cities. *Eos Trans Amer Geophys Union*, 1976, 57: 435—436
- 138 Whitcomb J H, Garmany J D, Anderson D L. Earthquake prediction: variation of seismic velocities before the San [Fernando] earthquake. *Science*, 1973, 180: 632—635
- 139 Allen C R, Helmberger D V. Search for temporal changes in seismic velocities using large explosions in southern California. In: Kovach R L, Nur A, eds. *Proceedings of the Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System*. California: Stanford University Publications in Geological Science 13, 1973. 436—452
- 140 Rice J R. Theory of precursory processes in the inception of earthquake rupture. *Gerlands Beitr Geophys*, 1979, 88: 91—127
- 141 Rice J R, Rudnicki J W. Earthquake precursory effects due to pore fluid stabilization of a weakening fault zone. *J Geophys Res*, 1979, 84: 2177—2193
- 142 蒋锦昌, 陈德玉. 地震生物学概论. 北京: 地震出版社, 1993. 346
- 143 Wyss M. Second round of earthquake of proposed earthquake precursors. *Pure Appl Geophys*, 1997, 149: 3—16
- 144 Wyss M, Booth D C. The IASPEI procedure for the evaluation of earthquake precursors. *Geophys J Int*, 1997, 131: 423—424
- 145 Wyss M, Dmowska R. *Earthquake Prediction—State of the Art*. Basel: Birkhäuser Verlag, 1997. 284
- 146 吴开统, 岳明生, 武宦英, 等. 海城地震序列的特征. *地球物理学报*, 1976, (2): 95—109
- 147 Bowman J R. Case 22: a seismicity precursor to a sequence of M_s 6.3—6.7 midplate earthquakes in Australia. *Pure Appl Geophys*, 1997, 149: 61—78
- 148 Matsu'ura R S. Precursory quiescence and recovery of aftershock activity before some large aftershocks. *Bull Earthq Res Inst, Univ Tokyo*, 1986, 61: 1—65
- 149 Wakita H, Nakamura Y, Sano Y. Short-term and intermediate-term geochemical precursors. *Pure Appl Geophys*, 1988, 126: 267—278
- 150 Wakita H, Nakamura Y, Sano Y. Short-term and intermediate-term geochemical precursors. In: Wyss M, ed. *Evaluation of Proposed Earthquake Precursors*. Washington DC: American Geophysical Union, 1991. 15—20
- 151 Roeloffs E, Quilty E. Case 21: water level and strain changes preceding and following the August 4, 1985 Kettleman Hills, California. *Pure Appl Geophys*, 1997, 149: 21—60
- 152 Dieterich J H. Preseismic fault slip and earthquake prediction. *J Geophys Res*, 1978, 83: 3940—3948
- 153 Lindh A G. The nature of earthquake prediction. *Seism Res Lett*, 2003, 74: 723—735
- 154 Bakun W H, Aagaard B, Dost B, et al. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. *Nature*, 2005, 437: 969—974, doi: 10.1038/nature04067
- 155 Lindh A G. Success and failure at Parkfield. *Seism Res Lett*, 2005, 76: 3—6
- 156 Rong Y, Jackson D D, Kagan Y Y. Seismic gaps and earthquakes. *J Geophys Res*, 2003, doi: 10.1029/2002JB002334
- 157 Stevenson D J. Mission to Earth's core—A modest proposal. *Nature*, 2003, 423: 423—424
- 158 Галицын Б Б. Работы по сейсмология. Б. Б. Галицын Избранные Труды, Том 2, 1912. 231—465, Издательство Академии Наук СССР, Москва, 1960
- 159 Саваренский Е Ф, Кирнос Д П. Элементы Сейсмологии и Сейсмометрии. Государственное Изд., 1955. 543
- 160 陈运泰, 刘瑞丰. 地震的震级. *地震地磁观测与研究*, 2004, 25(6): 1—12
- 161 赵纪东, 张志强. 地震能否预测. 见: 中国科学院, 主编. 2009 科学发展报告. 北京: 科学出版社, 2009. 195—201
- 162 Sornette D, Sammis G G. Complex critical exponents from renormalization field theory of earthquakes: implications for earthquake prediction. *J Phys Int*, 1995, 5: 607—619
- 163 Sornette D, Knopoff L. The paradox of the expected time until the next earthquake. *Bull Seism Soc Amer*, 1997, 87: 789—798
- 164 Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation. *Phys Rev Lett*, 1987, 59: 381—384
- 165 Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Phys Rev*, 1988, A38: 364—374
- 166 Bak P, Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J Geophys Res*, 1989, 94: 15635—15637
- 167 Bak P. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Springer-Verlag, 1996. 226

- 168 Knopoff L. Earthquake prediction is difficult but not impossible. *Nature*, March 11, 1999. http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake_6.html (Debates)
- 169 Scholz C H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 439
- 170 Burridge B, Knopoff L. Model and theoretical seismicity. *Bull Seism Soc Amer*, 1967, 57: 341—371
- 171 Otsuka M. A chain-reaction-type source model as a tool to interpret the magnitude-frequency relation of earthquakes. *J Phys Earth*, 1972, 20: 35—45
- 172 Otsuka M. A simulation of earthquake recurrence. *Phys Earth Planet Inter*, 1972, 6: 311—315
- 173 Ito K, Matsuzaki M. Earthquakes as self-organized critical phenomena. *J Geophys Res*, 1990, 95: 6853—6860
- 174 Brune J N. Implications of earthquake triggering and rupture propagation for earthquake prediction based on premonitory phenomena. *J Geophys Res*, 1979, 84: 2195—2198
- 175 Kittl P, Diaz G, Martinez V. Principles and the uncertainty principles of the probabilistic strength of materials and their applications to seismology. *ASME Appl Mech Rev*, 1993, 46: S327—S333
- 176 Geller R J. Shake-up for earthquake prediction. *Nature*, 1991, 352: 275—276
- 177 Geller R J. Unpredictable earthquakes. *Nature*, 1991, 353: 612
- 178 Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Earthquake cannot be predicted. *Science*, 1997, 275: 1616—1617
- 179 Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Cannot earthquake be predicted. *Science*, 1997, 278: 488—490
- 180 Hamada K. Unpredictable earthquakes? *Nature*, 1991, 353: 611—612
- 181 Turcotte D L. Earthquake prediction. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1991, 19: 263—281
- 182 Knopoff L. A selective phenomenology of the seismicity of Southern California. In: Knopoff L, Aki K, Allen C R, eds. *Earthquake Prediction: The Scientific Challenge, Colloquium Proceedings*. *Proc Nat Acad Sci USA*, 1996, 93: 3756—3763
- 183 Knopoff L. The organization of seismicity on fault networks. In: Knopoff L, Aki K, Allen C R, et al, eds. *Earthquake Prediction: The Scientific Challenge, Colloquium Proceedings*. *Proc Nat Acad Sci USA*, 1996, 93: 3830—3837
- 184 Knopoff L, Aki K, Allen C R, et al, eds. *Earthquake Prediction: The Scientific Challenge, Colloquium Proceedings*. *Proc Nat Acad Sci USA*, 1996, 93: 3719—3837
- 185 Kerr R A. Seismology: continuing Indonesian quakes putting seismologists on edge. *Science*, 2007, 317: 1660—1661
- 186 Kerr R A. After the quake, in search of the science—or even a good prediction. *Science*, 2009, 324: 322
- 187 Johnson B F. Earthquake prediction: gone and back again. *Earth*, 2009, 4: 30—33
- 188 Linde A T, Sacks I S. Slow earthquakes and great earthquakes along the Nankai trough. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 203: 265—275
- 189 Thanassoulas C. Short-term Earthquake Prediction. Greece: H. Dounias & Co., 2007. 374
- 190 Crampin S, Gao Y, Peacock S. Stress-forecasting (not predicting) earthquakes: a paradigm shift. 2008, 36: 427—430
- 191 Beroza G C, Ide S. Deep tremors and slow quakes. *Science*, 2009, 324: 1025—1026, doi: 10.1126/science.1171231
- 192 Bromirski P D. Earth vibrations. *Science*, 2009, 324: 1026—1028
- 193 Liu C C, Linde A T, Sacks I S. Slow earthquakes triggered by typhoons. *Nature*, 2009, 459: 833—836
- 194 Borghi A, Aoudia A, Riva R E M, et al. GPS monitoring and earthquake prediction: a success story towards a useful integration. *Tectonophysics*, 2009, 465: 177—189
- 195 Aki K. Possibilities of seismology in the 1980s. *Bull Seism Soc Amer*, 1980, 70: 1969—1976
- 196 Aki K. 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, et al, eds. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*. San Diego: Academic Press, 2002. 39—49
- 197 石橋克彦. 大地動乱の時代——地震学者は警告する(日文). 岩波新書, 1994. 235
- 198 刘瑞丰, 吴忠良, 阴朝民, 等. 中国地震台网数字化改造的进展. *地震学报*, 2003, 25(5): 535—540
- 199 Rikitake T. Earthquake prediction. *Bull Seism Soc Amer*, 1975, 65: 1133—1162
- 200 Rikitake T. Earthquake precursors in Japan: precursor time and detectability. *Tectonophysics*, 1987, 136: 265—282
- 201 Rikitake T. Earthquake prediction: an empirical approach. *Tectonophysics*, 1988, 148: 195—210
- 202 Simpson D, Richards P. *Earthquake Prediction—An International Review*, Maurice Ewing Series 4. Washington DC: American Geophysical Union, 1981. 680
- 203 Kisslinger C, Rikitake T. *Practical Approaches to Earthquake Prediction and Warning*. D Reidel Pub. Co./Dordrecht/Boston, 1985. 685
- 204 Mazzella A, Morrison H F. Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San Andreas fault. *Science*, 1974, 185: 855

- 205 Mizutane H. Earthquakes and electromagnetic phenomena. In: Asada A, ed. *Earthquake Prediction Techniques*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1982. 217—246
- 206 Zhao Y L, Qian F Y, Xu T C. The relationship between resistivity variation and strain in a load-bearing rock-soil layer. *Acta Seismol Sin-Engl Ed*, 1991, 4: 127—137
- 207 King C Y. Radon monitoring for earthquake prediction in China. *Earthq Predict Res*, 1985, 3: 47—68
- 208 King C Y. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview. *J Geophys Res*, 1986, 91: 12269—12281
- 209 车用太, 鱼金子. 地震地下流体学. 北京: 气象出版社, 2005. 498
- 210 Sacks I S, Suyehiro S, Linde A T, et al. Slow earthquakes and stress redistribution. *Nature*, 1978, 275: 599—602
- 211 Sacks I S, Suyehiro S, Linde A T, et al. Stress redistribution and slow earthquakes. *Tectonophysics*, 1982, 81: 311—318
- 212 Linde A T, Gladwin M T, Johnston M J S, et al. A slow earthquake sequence on the San Andreas fault. *Nature*, 1996, 383: 65—68
- 213 Crampin S. The basis for earthquake prediction. *Geophys J R Astr Soc*, 1987, 91: 331—347
- 214 Crampin S. Developing stress-monitoring sites using cross-hole seismology to stress-forecast the times and magnitudes of future earthquakes. *Tectonophysics*, 2001, 338: 233—245
- 215 Crampin S, Evans R, Atkinson B K. Earthquake prediction: a new basis. *Geophys J R Astr Soc*, 1984, 76: 147—156
- 216 Crampin S, Volti T, Stefánsson R. A successfully stress-forecast earthquake. *Geophys J Int*, 1999, 138: F1—F5
- 217 Crampin S, Zatsepin S V, Browitt C W A, et al. GEMS: the opportunity for forecasting all damaging earthquakes worldwide. *Proc Evison Symp, Pure Appl Geophys*, 2009, in press
- 218 Gao Y, Crampin S. Shear-wave splitting and earthquake forecasting. *Terra Nova*, 2008, 20(6): 440—448, doi: 10.1111/j.1365-3121.2008.00836.x
- 219 Gao Y, Wang P, Zheng S, et al. Temporal changes in shear-wave splitting at an isolated swarm of small earthquakes in 1992 near Dongfang, Hainan Island Southern China. *Geophys J Int*, 1998, 135: 102—112
- 220 Wu J, Crampin S, Gao Y, et al. Smaller source earthquakes and improved measuring techniques allow the largest earthquakes in Iceland to be stress-forecast (with hindsight). *Geophys J Int*, 2006, 166: 1293—1298
- 221 Wu J, Gao Y, Chen Y T. Shear-wave splitting in the crust beneath the southeast Capital area of North China. *J Seismol*, 2009, 13(2): 277—286
- 222 Varnes D J. Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity. *Pure Appl Geophys*, 1989, 130(4): 661—686
- 223 Migna A, Bowman D D, King G C P. A mathematical formulation of accelerating moment release based on the stress accumulation model. *J Geophys Res*, 2007, 111: B11304
- 224 Ogata Y. Space-time point models for earthquake occurrences. *Ann Ins Statist Math*, 1998, 50: 379—402
- 225 Field E H. Overview of the working group for the development of regional earthquake likelihood models (RELM). *Seism Res Lett*, 2007, 78: 7—16
- 226 EarthScope Working Group. *EarthScope Project Plan*. *EarthScope: A New View into the Earth*, 2001. 36