

张国民、钮凤林、邵志刚,2009,帕克菲尔德地震预报实验场:2004年6级地震及其对地震物理和地震预测研究的影响,中国地震,25(4),345~355。

## · 综述 ·

# 帕克菲尔德地震预报实验场:2004年6级地震 及其对地震物理和地震预测研究的影响

张 国 民<sup>1)</sup> 钮 凤 林<sup>2)</sup> 邵 志 刚<sup>1)</sup>

1) 中国地震局地震预测研究所,北京复兴路 63 号 100036

2) Department of Earth Science, Rice University, Texas 77005, USA

**摘要** 介绍了美国中加州帕克菲尔德(Parkfield)地震预报实验场的建设、运行和试验场工作期间发生的2004年6级地震的情况。着重阐述了在实验场20多年的地震预测研究中遇到的一系列科学问题以及一些新的认识。这些科学认识包括:对活动构造破裂分段的研究是地震长期预测的基础;无震滑动是地震预测中的一大难点和障碍;地震复发模型具有的相当大的不确定性且在预测应用上有很大的局限性;地震前兆的复杂性、差异性及其对地震预测中常用原则——前兆异常重现性和相似性的挑战等。这些认识对地震预测研究与实验场建设有一定的启示意义。

**关键词:** 帕克菲尔德 地震预报 实验场

[文章编号] 1001-4683(2009)04-0345-11

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

## 0 引言

美国圣安德烈斯断层上的帕克菲尔德地震预报实验场是世人瞩目的地震预测研究基地之一。其以严密的科学设计和密集的地球物理观测而在各国地震预报实验场中独树一帜。实验场自1985年建设运行至今已20多年,其初期是以捕捉“1993年以前帕克菲尔德地区将发生6级地震,发震概率为95%”的长期预测给出的地震为目标的。其后期是以对帕克菲尔德下一次地震的长期观测研究为目标的。在这20多年中,美国地震学家们进行了长期的观测与研究,发表了一系列论文(Toppozada et al., 2002; Bakun et al., 1984, 1979; Shearer et al., 1985; Bakun et al., 1985; National Earthquake Prediction Evaluation Council Working Group, 1994; Langbein et al., 2005; Shakal et al., 2005; Michael et al., 1998)。令各国地震学者关注的是美国地震学家如何看待早期的长期预测在时间预测上的失败,而在姗姗来迟的2004年6级地

[收稿日期] 2009-07-09; [修定日期] 2009-08-23。

[项目类别] 国家重点基础研究973计划项目(2008CB425704)资助

[作者简介] 张国民,男,生于1942年,研究员,博士生导师,主要从事大陆强震机理与预测等研究。

震中又观测到了什么,以及他们对当前地震预测的认识。本文作者在短期的合作研究中对这些问题进行了初步探讨,尤其是对巴肯(W. H. Bakun)等 19 位著名学者的联合论文——“2004 年帕克菲尔德地震对地震预报和灾害评估的影响”(Bakun et al., 2005)作了重点研究与探讨,结合作者的理解,对帕克菲尔德地震预报实验场,尤其是对 2004 年的 6 级地震以及与地震预测研究相关的问题作一综述性介绍。

## 1 实验场简述

### 1.1 帕克菲尔德实验场的构造背景

(帕克菲尔德地震预报实验场坐落在圣安德烈斯断层的一个较小的段落——帕克菲尔德段落上。该段是圣安德烈斯断层众多分段中较小的一段,总长约 40km,与长达 1000km 的圣安德烈斯断层的总体走向一致,呈北西—南东走向。)与帕克菲尔德段落相邻的西北段是长为 150km 的以小震密集活动为特征的蠕动段,而东南相邻的则是以稀少的大地震为活动特点的长达数百千米的强闭锁段。在此强闭锁段上,上一次大地震是 1857 年发生在洛杉矶附近的 Fort Tejon 7.9 级地震,其地震破裂从帕克菲尔德段落的东南端分界附近开始,一直向南东方向扩展,破裂长达 300km 左右。

(在帕克菲尔德分段上,太平洋板块相对北美板块的运动,部分地转化为  $M_w = 6.0 (\pm)$  的重复地震。1857~1985 年,至少有 6 次这样的地震,分别发生在 1857、1881、1901、1922、1934 和 1966 年。)因此帕克菲尔德段落介于其西北的蠕动段和其东南的强闭锁段之间,其自身是以 6 级地震为特征地震活动的特殊分段。)

### 1.2 帕克菲尔德地震预报实验场的建设与运行

在短短的帕克菲尔德段落上有规律地发生震级同为 6 级的地震,这在当时(1980 年代初)的许多地震学家中形成了两点共识:①在  $1988 \pm 5$  年内,即 1993 年以前帕克菲尔德将发生 6 级地震、发震概率可达 95%;②在该段落上建设密集地震监测台网,多学科地监测和观测地震孕育发生过程,并捕捉一切可能的前兆以开展短期(几周内)地震预报。

基于上述两点共识,美国在 1985 年正式建立帕克菲尔德地震预报实验场。实验场的目标是:①获取对所预测的目标地震的加载过程(即通常所说的孕震过程)的详尽理解,包括对孕震过程中的现象和机理的详尽理解;②在 6 级地震发生前发布短期公众警报。为实现这两个目标,采用了专门设计的针对地壳应变的稠密观测台网,以监测地壳应变、地震活动和断层滑动,并探测任何可能利于预测大震的前兆,如地磁、地电、地下水位、水化学等。与此同时,在一系列科研工作的基础上,研究并制定了捕捉短临前兆异常和作短临预报的预案,还制定了发布公众警报的科学依据、警报级别与发布程序,以及警报过程中的社会行动等。

然而,在预报的时间窗内(1985~1993 年)未发生地震。在预报窗关闭后,美国“国家地震预报评审委员会”组织专门工作小组,对帕克菲尔德地震预报实验进行了独立评判。该小组提出尽管在预报期内未发生地震,但实验场的各种观测应继续下去,作为对帕克菲尔德未来地震的长期观测(National Earthquake Prediction Evaluation Council Working Group, 1994)。由此,实验场的观测与研究一直在继续。

### 1.3 实验场工作的主要贡献

(1)各级政府通力合作,共同建立帕克菲尔德地震警报预案。帕克菲尔德地震预报实验

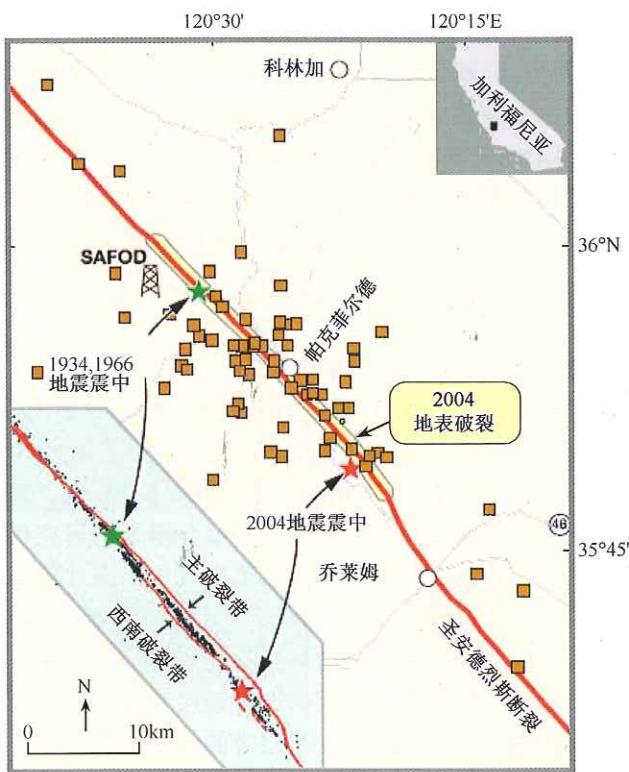


图1 帕克菲尔德地震预报实验场与2004年6级地震(Bakun et al., 2005)

圣安德烈斯断裂(红线)上地震破裂带(黄色区域),方块表示地震仪、应变仪、蠕变仪、电磁仪和连续GPS站;左下角为2004年帕克菲尔德6级地震(黄色破裂带内)余震(黑点)的分布

场有意义的工作进展之一是在建立发布地震警报的预案上,联邦政府、州政府和地方政府的通力合作,预案提供了科学家和应急反应部门之间的实时通讯联络。并以此作为火山灾害预警的范例。

(2)建立了地震资料收集、传输、贮存等实时数据流程及其公共信息服务系统。在帕克菲尔德实验场,数据的收集、传输、贮存等方面取得了开拓性进展,包括公共信息服务、准实时地球科学资料的网内数据流程等。实验场开发的数据系统已成为全美国地震监测的标准,并为美国地质调查局建立“国家级地震系统”(ANSS)奠定了基础。

(3)实验场的科学工作启发并催生了美国一系列科学项目的建立和实施。如在帕克菲尔德段落的西北部安排了地震科学深钻;实施了地球透镜(Earth Scope)计划中的圣安德烈斯断层深部探测计划;实验场的应变观测台网作为板块边界观测(PBO)计划的组成部分和地形变观测台网的向导。

(4)尽管在预报的时间窗内未发生6级地震,但由于实验场的监测工作继续进行,大量观测仪器一直在持续运行,因此实验的基本目的——在破裂区附近观测地震过程的目的已经实现,而且对震后形变和其他过程提供了许多重要资料。这些记录前所未有的地提供了2004年6级地震发生前、发生时和发生后的基本图像。这些资料将提供给全球地震学家作各方面的长期研究。且现已证明,这些观测不仅对地震预测研究,而且对近场地震危险性分

析和地震减灾都有重要意义。

(5)推进了地震预测新方法、新技术的研究。如美国莱斯大学、卡耐基研究所和伯克利劳伦斯国家实验室等单位的联合研究小组的钮凤林、Panl G.S. 和 Tomas M.D. 等人在帕克菲尔德的 SAFOD 钻井中开展主动源探测实验, 利用高重复性的井下压电震源、先进的数据采集系统和高精度的走时分析与尾波干涉技术, 使地震波走时的测量精度实现了几个数量级的提高, 并在 2005 年观测到 2 次小震前的临震波速异常 (Niu et al., 2008)。

## 2 实验场地震预测研究中的某些科学认识

### 2.1 活动构造的破裂分段: 地震长期预测的基础

地震长期预测是以对未来地震的地点和强度的预测为主要目标的。由此, 活动构造的破裂分段就成了长期地震预测中的重要课题。1985 年以前帕克菲尔德 6 次地震的震级和破裂长度的一致性导致了一个基本概念, 即断层的分段性、分段界限及其科学依据是决定地震破裂长度和震级大小的基本因素。然而关于活动断层分段性的研究仍然具有很强的探索性, 断层几何学、介质流变性、断层摩擦特性、孔隙流体以及应力条件等都被用以解释分段特性。其中断层几何学在分段应用中最为直接。在帕克菲尔德段落, 其西北端点和东南端点均存在细小的断层弯曲, 看起来符合断层活动的障碍体认识, 并由此限制了断层破裂的扩展。但应用小震重新精确定位却未能给出断层的这种表层弯曲向深部延伸的图像。

对帕克菲尔德分段性的另一种解释是基于断层带的流变特性。帕克菲尔德分段邻近北端的具有强蠕动特性的西北段, 该段上稳定的滑动也许可以替代大震的发生。同时, 帕克菲尔德东南部又邻近长达数百千米的强闭锁段, 其以稀少的大震为特点。帕克菲尔德段落正处在两者间的过渡性区域。其西北段蠕动和东南段闭锁的依据和成因均尚需深入研究, 介质特性和流体高压注入等被用于解释蠕动段和闭锁段, 由 SAFOD 计划所获得的对断层带内介质性质和环境条件等的进一步认识将有助于对这些可能性的研究和识别。包括滑动、断层几何学、断层流变性和应力水平等的多因素联合研究对于解释为什么断层是蠕动的或是闭锁的, 以及是哪些因素构成了断层分段的条件等都是必要的。

### 2.2 无震滑动: 地震预测中的一大难点

地震学家和地质学家都已经认识到, 沿着象圣安德烈斯断层这样的板块边界带的有震滑动和无震滑动共存的现象符合板块之间的相对运动。因此, 为了对地震预测建立地震应变积累和释放的哪怕是最简单的模型, 都必需计算断层上发生的无震滑动。无震滑动无论是在旧金山湾地区走滑断层的滑动预估方面, 还是在美国阿拉斯加至日本的西北太平洋地区的板块俯冲带的巨型逆冲断层的滑动预估方面, 都被认为是非常重要的问题。然而, 地震滑动和无震滑动在断层上是如何分布的, 在两次大震之间的时间段内有多少无震滑动以及在何处存在无震滑动等问题仍是当今难以解决的。在 1966 年帕克菲尔德地震后很快开始的滑动测量有可能对这些问题提供某些方面的认识。例如钮凤林等利用密集的井下地震台网, 通过对帕克菲尔德段落上中北部 9 个小震群的重复地震波形的精细对比研究, 应用固定时间窗滑动的相关分析, 给出在 1992 ~ 1993 年发生过一次弥散型的无震滑动事件, 其释放的能量相当于一次 5.5 级地震。这样的无震滑动事件是否确凿无疑? 类似的事件是否还有? 这些无震滑动事件是否是使预测中的 6 级地震推迟到 2004 年姗姗来迟的原因等一系列问题, 目前还无法回答。

列科学问题均有待地震学家们去一一揭示。然而,已经可以看到,无震滑动研究对于地震预测有多么重要的意义。

此外,由于在1966年帕克菲尔德地震时就开始了该地区的地形变测量,并随着实验场建设使地形变台网不断完善,从而积累了1966年6级地震的震时、震后和1966~2004年两次强震间的滑动资料,以及2004年6级地震震时和震后的资料。这些资料显示,2004年6级地震事件的最大滑动地区看起来较好地填补了1966年地震后两次大震间积累的滑动空区,但是有一些滑动空区依然保持着。

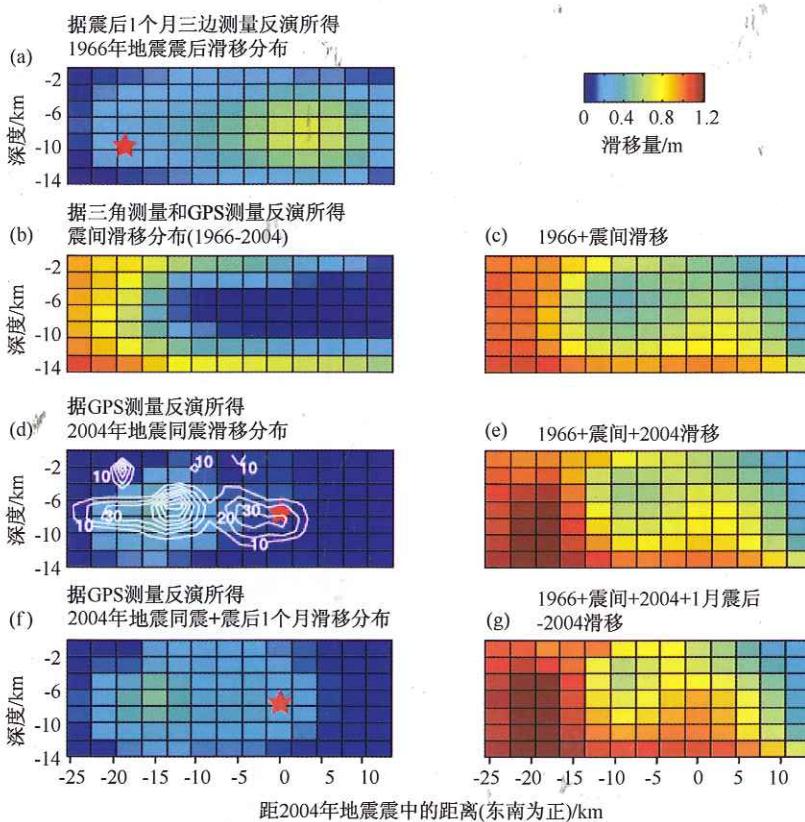


图2 由大地测量数据反演所得1966年以来圣安德烈斯断裂滑移位移分布(Bakun et al., 2005)

图中(a)、(b)、(d)、(f)为位移;(c)、(e)、(g)为累积位移,2004年同震位错(图2(d))发生在位移亏空区(图2(c)、(d));图2(d)中的位移等值线根据大地测量和地震学数据联合反演所得的高精度位错分布结果绘成,其中最大位错77cm。这些位错模型表明地震引起的位错(同震和震后)与震间无震滑移共同作用构成了断层两侧累积位移分布

### 2.3 地震复发模型:具有相当大的不确定性

大地震可能在断层固定段落以相同的“尺度特征”发生,而这些断层分段的段落可以从地质学和地球物理资料中识别的观点是1980年代形成的,并在长期地震预测和地震危险性分析中得以广泛应用。在帕克菲尔德,在地震台网日趋完善过程中的1934、1966、2004年3次6级地震资料给出的破裂尺度和破裂位置非常一致,尽管震中位置和破裂传播方向并不一样。尤其是1966年和2004年的两次地震的余震勾划出了非常一致的断层结构(图3)。

而且对帕克菲尔德 1881、1901、1922 年的 3 次早期地震的有限观测也支持它们与后期地震有相同的破裂尺度和破裂位置的假设。随着基础资料的不断积累与丰富, 地震复发模型作为地震长期预测的模型得以广泛应用。

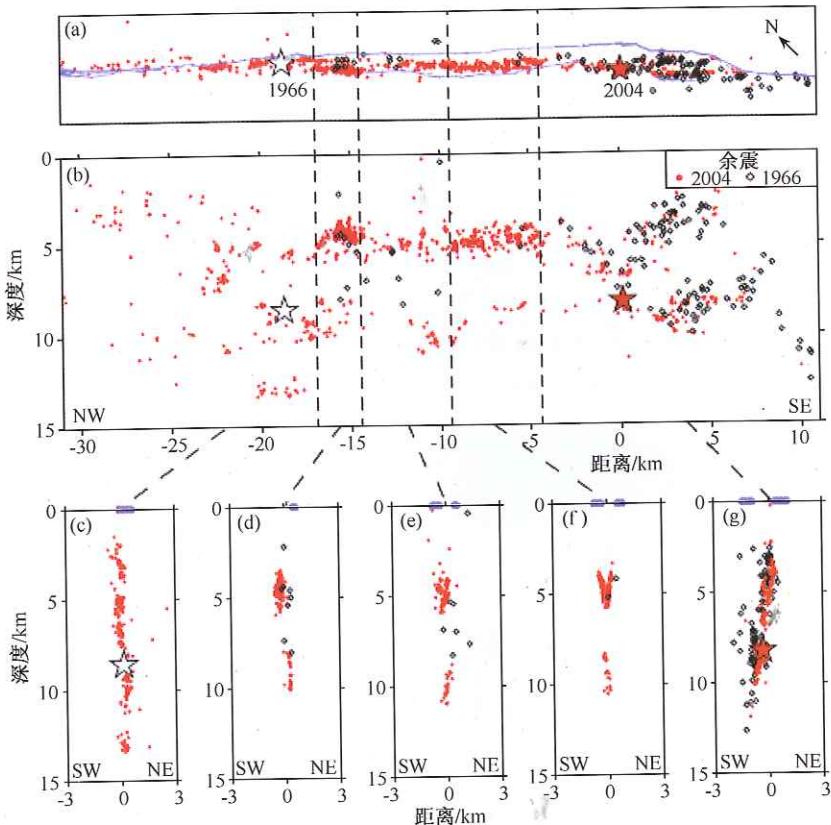


图 3 1966、2004 年两次 6 级地震及其余震分布 (Bakun et al., 2005)

红色点为 2004 年余震, 黑色菱形为 1966 年余震; 基于三维速度模型利用双差对余震重新定位; (a) 为平面示意图; (b) 为沿断层的剖面; (c) ~ (g) 为图(a)和(b)中所示断层正交剖面, 浅兰色点为(a)中所示地表断层, 图(f)中的余震表明主震破裂有多个分支

然而地震学家们注意到, 从 1857 年开始的帕克菲尔德 6 级地震序列, 仅具有统计意义上高于随机分布的时间规律, 其并不具备任何实用的完备周期规律。帕克菲尔德 6 级地震序列有限的规律性构成了长期地震预测模型的基础, 因此其预测的偏差是可以想象的。偏离地震统计规则的原因可以用特征地震模型的物理基础的变化来解释。例如, 在 1985 的实验场开始时所使用的帕克菲尔德重复地震模型, 是假定了定常的加载速率和固定的失稳门槛, 即孕震过程的稳定应力加载和固定的极限应力, 而且还考虑到主震将被前震所激发。然而后来的地震并非如此。当时作为重复地震模型所给出的长期预测, 被 1966 年与 2004 年两次主震间的长时间间隔所推翻。众所周知, 在时间可预测模型中, 相邻两次地震的时间间隔与上一次地震的滑动量成正比, 而在震级可预测模型中, 后一次地震的震级与上一次地震

以来的时间成正比。然而帕克菲尔德地震序列,尤其是2004年6级地震既不符合时间可预测模型,也不符合震级可预测模型。于是就提出了断层相互作用理论以解释地震重复间隔的复杂变化。

在应用地震复发的多种统计模型来分析帕克菲尔德地震序列时发现,震间时间的可变动性可达45%,这个数量的不确定性与当前其它地区地震长期预测的不确定性相当,但明显高于1980年代的早期模型对帕克菲尔德地震序列所评估的不确定性。

为了减小和改善地震复发模型中的不确定性,科学家们尚需进一步通过对断层变形的精细观测和地震学方法(如具有重复破裂和相同波形的重复小震研究等)来探测断层滑动的时空变化图象,并通过无震滑动及其对地震的孕育、发生和影响的研究,从物理基础上不断改进模型,提高地震预测的水平。

#### 2.4 前震和短临前兆:重现性和相似性的挑战

地震预测是地震学的圣坛(Bakun et al., 2005),而地震预测必须依据某种前兆(傅承义等,1963)。因此,探测地震前兆以预测地震是一种由来以久的期望,科学家们并为此作了长期的努力。美国地震学家特别注重对大震前直接前震的探测与研究,认为这种直接前震是与主震失稳破裂相关联的有过多次重复性的准确短临前兆。特别是在1934年和1966年两次帕克菲尔德6级地震前的17分钟,有完全相同的前震活动出现。因此在1980年代设计的帕克菲尔德未来6级地震的短临预报方案中,既包括了断层蠕动、钻孔应变、倾斜、地磁、地电、地下水、水化学等多种前兆,又突出地强调了前震活动的作用,使其在短临预报的警报发布中占有了至关重要的地位。1992年和1993年,在实验场发生了4级地震活动,地震学家曾根据当时的观测资料,尤其是以4级地震为主要依据(判定为直接前震)而发布了短临预报,并采取了包括小学放假、救援准备等社会行动。然而短临预报后并无主震发生。而在2004年9月28日的6级地震前,却没有期望中的4级前震发生。而且根据密集地震台网的记录,在主震前6天甚至连震级 $M=0$ 的微小地震,在震中地区都未观测到。这就使地震学家把短临预报的主要依据建立在前震活动上(当然也包括其他学科前兆),并建立主震将被前震触发的模型等前兆现象的重现性和相似性的期望受到了严重的挑战。

2004年6级地震后,美国地震学者对各种资料进行十分细致地研究,给出的结果是,除了十分模糊的微量应变异常( $<10^{-8}$ )在主震前24小时出现之外,未见到无论是地震学还是其他学科的短期前兆信息。除了无前震活动之外,前兆信号在地磁场、地电场、视电阻率和蠕变观测中均无明显显示。因此美国地震学家们认为,这种短期前兆的无明显显示再次突出了实用的短期预报(震前几周内)的困难性。

震前24小时在几个应变台站仪器上记录到了非常微弱的仅为 $(1 \sim 10) \times 10^{-9}$ 的应变变化。这些变化在地震物理的研究方面也许是重要的。但由于其太小,与固体潮汐应变、大气压力应变的变化处同一量级而难以确认,因而很难作为发布地震马上来临的短期警报的实用基础。与此同时,密集的仪器台阵还揭示了某些新的事件,如在帕克菲尔德东南断层闭锁段下的深部颤动(Tremor),这些事件到底是6级地震的前兆还是正常的扰动尚待继续观测和研究。

#### 2.5 2004年地震后美国学者对地震预测研究的思考

2004年帕克菲尔德地震的震级和地震破裂的位置被准确地预测,但对发震时间的预测

显然不准。这意味着地震学家尚须从更高的科学层面理解地震孕育发生过程的物理本质。尽管 2004 年 6 级地震十分理想地发生在实验场密集台网的中心,且该台网是为捕捉直接前震和其他可能的短期前兆而专门设计的,然而却没有观测到有意义的信息。震前短期内前兆异常的缺失对地震预测和震前过程研究提出了非常严峻的挑战。近些年来,美国加利福尼亚和日本的一些  $M_w = 5.3 \sim 7.3$  地震的短期前兆探测结果也大多不尽如人意。这些经验说明,可靠的短临预测是非常困难的,因此地震学家必须在地震前兆探索和地震预测研究中作坚韧不拔地长期努力,同时也需要努力探究减轻地震灾害的多种途径。

在地震长期预测方面,帕克菲尔德地震的历史和对 2004 年地震的详尽观测已经揭示了地震时间间隔的可变异性、大地震滑动分布的可变异性、以及强地面运动的可变异性。综合考虑这些真实的可变异性将需要研究并建立复杂的三维数学模型,以模拟研究多个地震轮回、板块运动中的应变积累、破裂过程中的动态应力变化和震后变形等等。模型须能解释无震滑动和地震滑动的相互影响与相互作用、断层的分段性以及强震动的空间异常,并从最新的地球科学成果中重构断层活动的条件和环境,且以连续的地球物理场观测来约束数值模型。

帕克菲尔德地区以地壳形变为中心的多学科地震监测的价值在于统一观测记录的长期持续性。这种科学设计的密集台网对于其他构造区的断层活动和地震监测同样也能提供极有价值的资料。因此美国地震学家认为,在中国、日本、土耳其以及其他地区,大地震也被预测在某些已知断层的段落上,为了发展这些地区的综合观测、前兆探测和地震预报探索,国际合作已成共识。为了将特别设计的台网坚持到大震发生,以求观测到大震孕育发生的震间、震前、震时和震后的全过程,为此而付出勤勉、辛劳和坚韧对于推进对地震的理解是多么地有价值。

### 3 讨论

经过严谨地科学设计并开展了多学科密集观测的帕克菲尔德地震预报实验场在 2004 年的 6 级地震中没有捕捉到理想的地震前兆,这一结果给地震学家和地震预测研究带来了巨大的挑战。一方面一些学者仍不囿于没有前兆的结论而继续对帕克菲尔德实验场 20 多年的观测资料作全时程的研究,以进一步检验并论证 2004 年 6 级地震到底有无前兆异常变化。另一方面,还有一些地震学者认为,鉴于目前还未观测到任何一种前兆异常存在于每次地震的孕育过程中,因此不能因为帕克菲尔德 6 级地震前未观测到前兆异常而否定所有前兆的存在。然而,不管怎样,帕克菲尔德 2004 年 6 级地震前未观测到原先所预料的显著的典型异常这确是至今一致的看法。为什么如此,其中是否具有特殊的构造物理原因和动力成因,这是值得进一步探索的问题。

日本学者茂木清夫通过岩石力学实验,研究了取自不均匀复杂断层的岩石样品内产生滑动(地震)时的前兆现象,并将该成果用于对美国中加州地震、日本内陆地震和中国大陆地震的前兆差异性讨论(Mogi, 1984)。茂木指出,美国中加州构造的特点是沿着直线型的圣安德烈斯断层带的剪切运动,这个滑动已持续很长年代,由此推断断层可能是平滑均一的,没有显著的应力集中就可以发生断层运动,在这均一的断裂带内,前兆现象可以很弱。日本列岛位于消减带附近,受到高度压缩且构造破碎,应力集中在许多点上,在这些点上可以出现

较明显的前兆,如前震和前兆性地形变。中国则具有大尺度的大陆构造,并处于高度受压的状态,地震前可能有显著的应力集中,可能出现较明显的前兆,有时还观测到远距离前兆(图4)。

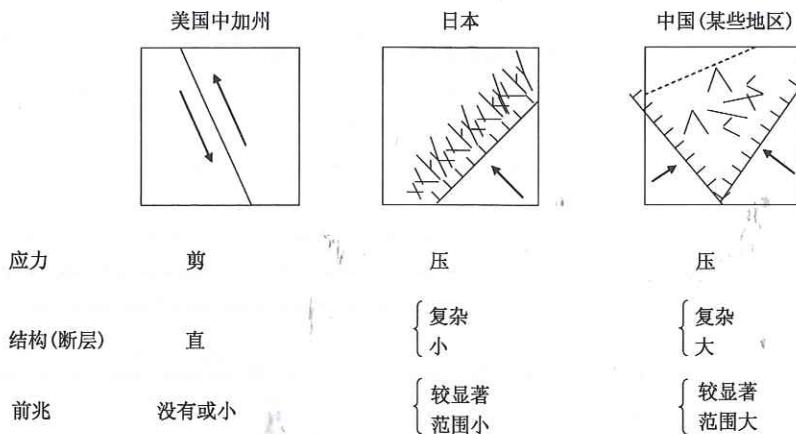


图4 美国中加州、日本、中国简化构造与前兆现象的本质(Mogi, 1984)

对于同一地区在数十年内(尤其是在一、二十年内)发生的强度相近的地震,人们认为应该具有相似性和重现性前兆,但实际往往并非如此。梅世蓉等(1993)曾给出一系列震例,表明同一地区前后地震间前兆现象有很大差别,后者的前兆显著弱于前者。对此,陈颙等(1984)提出可用重复载荷下岩石微破裂特点不同来解释,被称之为应力历史对前兆的影响。首次对岩石样品加压,当应力水平为 $\sigma_0$ 时出现微破裂并随应力增加而发展,直至应力为 $\sigma_1$ 时发生破裂。那末在卸载后第二次加压时,不但应力水平到达 $\sigma_0$ 时未出现微破裂,而且在应力水平一直增加到 $\sigma_1$ 前都没有微破裂发生。由于微破裂的发育和发展以及伴随此过程的流体运移和多种物理、化学效应可能是多种前兆的重要成因,因此这种源于前后加载过程的微破裂特性的差异可能导致同一地区前后地震之间前兆现象的显著差别(图5)。

总之,围绕帕克菲尔德地震预报实验场及其所发生的2004年6级地震,尚有一系列科学问题需要地震学家深入研究和探讨。应该说,帕克菲尔德是地震预测研究和地震预报最理想和最典型的实验场所之一,因而其显现的科学问题也具有相当的普遍性。因此,围绕着对地震孕育发生过程的观测和科学揭示,通过建立地震预测预报实验场,强化地震观测、地震基础

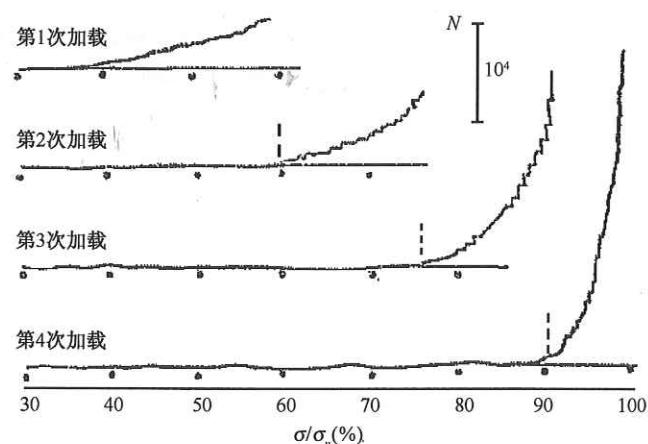


图5 大理岩单轴反复加载时的声发射总数N  
随 $\sigma$ 的变化(陈颙等,1984)

探测和基础研究,开展地震预测理论、方法和技术等方面的实验场研究,是推进地震预测研究的一条重要途径。

### 参考文献

- 陈颙、于小红,1984,岩石样品的变形与声发射,地球物理学报,27(4):86~95。
- 傅承义、刘恢生,1963,有关地震预报的几个问题,科学通报,30~36。
- 梅世蓉、冯德益、张国民等,1993,中国地震预报概论,北京:地震出版社。
- Bakun, W. H. & McEvilly, T. V., 1979, Earthquakes near Parkfield, California; comparing the 1934 and 1966 sequences, Science, **205**, 1375~1377.
- Bakun, W. H. & McEvilly, T. V., 1984, Recurrence models and Parkfield California earthquakes, J. Geophys. Res., **89**, 3051~3058.
- Bakun, W. H. & Lindh, A. G., 1985, The Parkfield, California, earthquake prediction experiment, Science, **229**, 619~624.
- Bakun, W. H., Aagaard B., Dost, B. et al., 2005, Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake, Nature, **437**, 969~974.
- Langbein J., Borcherdt R., Dreger, D. et al., 2005, Preliminary report on the 28 September 2004, M6.0 Parkfield, California, earthquake. Seismol. Res. Lett. **76**, 10~26.
- Michael, A. J. & Jones, L. M., 1998, Seismicity alert probabilities at Parkfield, California, revisited. Bull. Seismol. Soc. Am., **88**, 117~130.
- Mogi, K., Fundamental studies on earthquake prediction, 1984, A collection of papers of international symposium on ISCSEP, Seismological Press.
- National Earthquake Prediction Evaluation Council Working Group, 1994, Earthquake research at Parkfield, California, 1993 and beyond-report of the NEPEC working group to evaluate the Parkfield earthquake prediction experiment. US Geol. Surv. Circ. **1116**, 1~14 (USGS, Reston, Virginia).
- Niu F., Silver, P G., Daley, T. M., et al., 2008, Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site, Nature, **454**, 204~209.
- Shakal A., Graizer V., Huang M et al., 2005, Preliminary analysis of strong-motion recordings from the 28 September 2004 Parkfield, California earthquake. Seismol. Res. Lett. **76**, 27~39.
- Shearer, C. F., 1985, Southern San Andreas fault geometry and fault zone deformation: implications for earthquake prediction (National Earthquake Prediction Council Meeting, March, 1985). US Geol. Surv. Open-file Rep. **85~507**, 173~174 (USGS, Reston, Virginia).
- Toppozada, T. R., Branum, D. M., Reichle, M. S. & Hallstrom, C. L., 2002, San Andreas fault zone, California;  $M_S$  5.5 earthquake history. Bull. Seismol. Soc. Am., **92**, 2555~2601.

# The Parkfield Earthquake Prediction Experiment: 2004 M6.0 Earthquake and Its Impact on the Earthquake Physics and Earthquake Prediction Study

Zhang Guomin<sup>1)</sup> Niu Fenglin<sup>2)</sup> Shao Zhigang<sup>1)</sup>

1) Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China

2) Department of Earth Science, Rice University, Texas 77005, USA

**Abstract** It describes the construction and operation of Parkfield earthquake prediction experiment in California, USA and circumstance about the 2004  $M6.0$  earthquake during the experiment. Focuses are given on a series of scientific problems and their new understandings in the 20 years of earthquake prediction research. These scientific understandings include the sub-ruptures of active geological structure, which is the base of long-term earthquake prediction, the aseismic slip, which is one of major difficulties and obstacles for earthquake prediction, earthquake recurrence models, which arouse considerable uncertainty and have significant limitation in forecasting application and the complexity and the differences of earthquake precursors which are challenges to principles usually used in earthquake prediction, such as reproducibility and similarity of precursor. These understandings have certain significance to earthquake prediction research and the construction of experiment.

**Key words:** Parkfield Earthquake prediction Experiment