

震前物理过程,我们可捕捉吗?

李 娟

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京,100029

2008年7月10日,国际知名科学刊物《自然》上发表了一项有关圣安德列斯断层主动源探测的实验结果。恰逢汶川大地震发生2个月,一些媒体毫不严谨地报道了该项研究成果,将其错误地等同于对地震的预测。笔者曾和该文作者之一钮凤林教授共事过,有机会了解了他们的整个研究思路和研究结果。他们摒弃了传统的前兆观测手段,利用高精度的尾波干涉技术从地震数据中**观测**到了震前地下介质信息的变化。这并非是对地震的预测,但却是探索震前物理过程的一次崭新、有益的尝试。

毫不夸张地说,对地震的预测是地震学者们孜孜以求的“神圣”目标。除了一次成功的经验与运气相结合的辽宁海城地震预报外,后来的地震总是以“新面孔”给经验性的短临预测“重重一击”。在挫折面前,地震工作者们没有放弃对地震预测的努力,并试图在众多扑朔迷离的现象中捕捉地震前的物理和化学现象及其背后的机制。地震前兆究竟存在吗?除了可能会以极低概率出现的前震现象外,至今还没有任何确凿无疑、可用仪器重复观测到的前兆现象。然而近期,国际著名科学刊物《自然》上发表了美国莱斯大学、卡耐基研究所和劳伦斯伯克利国家实验室的联合研究小组在圣安德列斯断层 SAFOD 钻井中进行的主动源探测实验结果 (Niu *et al.*, 2008)。利用高精度的走时分析和尾波干涉技术,在震前数个小时监测到了由震前微破裂引起的地下介质的波速变化。这似乎给地震前兆的找寻带来了一丝暖风。

1. 圣安德列斯断层 & 帕克菲尔德地震实验场

实验观测数据来源于“圣安德列斯断层深部探测计划”(SAFOD, San Andreas Fault Observatory at Depth)。圣安德列斯断层(图1)位于太平洋板块和北美板块的交界处,横跨加州西部、南部及墨西哥的下加利福尼亚州北部,沿美国西海岸蔓延上千公里,是地震活动强且“规律性”比较明显的地区。1906年旧金山7.8级大地震就发生在这一断层上。现今广为接受的解释地震成因的“弹性回跳”理论就是通过对旧金山地震后圣安德列斯断层的地表观测,由美国工程师里德于

1911 年提出的。

圣安德列斯断层上最著名的一段恐怕就是位于其中部的长约 40km 的帕克菲尔德 (Parkfield) 断层段了 (图 2)。自 1881 年有可靠记录以来, 至 2004 年 9 月最近的一次地震, 帕克菲尔德附近共发生了 6 次 6.0 级左右地震 (分别发生在 1881, 1901, 1922, 1934, 1966 和 2004 年)。由于地震具有大小、破裂尺度相当, 发生地点相近以及约 22 年的复发周期等特征, 导致了描述特定断层上地震发生时空模型的“特征地震”概念的诞生。

帕克菲尔德断层段上地震发生的“简单”、“明显”的规律性使其成为科学家们建立地震实验场的首选场所。实验场建立之初的目的有两个: 通过对地点已知的“预期”地震的长期观测捕捉地震发生的细节; 为建立地震短临公众预警系统服务。大量不同的监测地震活动、断层面滑动, 探测前兆的仪器开始高密度布设, 各种地震、地球物理实验室相继建立, 帕克菲尔德成为一时最鼓舞人心的地震预测实验场。然而, 地震却与实验场开了一个玩笑: 1985 年, 美国地质调查局 (USGS) 发布了一项“1993 年前发生 6 级地震”的长期预测 (Bakun *et al.*, 2005)。事实上, 这次预测失败了, 期盼的地震 11 年之后姗姗迟来, 事前也没有观测到任何前兆现象。

2. 圣安德列斯断层深部探测 (SAFOD) 计划

预测的失败让科学家们认识到有关特征地震机制的假设也许并不正确, 对地震的预测也远非想象中那么简单。为了回答在板块边界控制断层和地震产生的物理、化学过程究竟如何这一基本问题, 在美国基金委支持下, 2002 年科学家们在帕克菲尔德展开了新的一场“零距离”接触断层, 小尺度观测地震的尝试——圣安德列斯断层深部探测 (SAFOD) 计划。SAFOD 将在震源区打一个横跨圣安德列斯断层、深至 3.2km 的倾斜钻井, 通过在井中安置各种仪器, 来构建深入到活动断层内部, 揭示地震产生机理的深部“探测网”。

钻孔由“先导孔” (Pilot Hole) 和“主孔” (Main Hole) 构成。作为 SAFOD 主孔的前期准备, 先导孔已于 2002 年夏季完成, 垂直深入地下 2.2km (图 3)。先进的定向打孔技术成功用在 SAFOD 持续的钻井作业中。井中取出的断层带岩石和流体样本被送至实验室进行分析; 钻井周围及 2-3km 的深部则布设了各类

仪器，包括监测中、小地震活动的地震计和测量岩石形变的应变仪等，都在长期不间断地测量着断层区附近的各种变化。

3 可控震源、尾波和地下微弱变化的检测

应力积累是地震发生的直接原因，就像一把尺子在力的作用下会断裂一样。然而，直接监测地球深部介质应力的变化却不是一件易事。岩石力学实验表明，受应力变化的影响，岩石内部的微裂纹会张开或闭合，从而使地震波速发生变化。因而对地震波速的精确、连续观测就构成了一个灵敏的，监测地下状态变化的“应力计”。这项工作其实早在上个世纪 70 年代就开始了，当时主要是利用一些爆破或非爆破地表震源，但对震源可重复性以及高精度地震波到时测量的要求大大限制了在实地应力测量中的应用。

近年来，以上两个方面出现了突破性进展。可控震源的特性极大改善，特别是在震源的可重复性上。高重复性震源可以在高频范围及长时间内作业，像现代压电钻井源，比起过去的气枪源、地表震动源等具有更优良的可重复性和持续性。另外，先进的数据采集系统可以对信号进行过高速采样，以及海量数据叠加对信噪比的提高等都使地震波走时差的测量精度飞跃了几个数量级。

另外，对尾波的认识又提供了一种检测微弱变化信号的有利工具。尾波（Coda wave）是地震图中直达 P 或 S 波之后的长尾状震相，是地震波在复杂地球介质中多次反射散射形成的。由于其貌酷似噪音，一度被地震学家们当作无用信号而滤掉。然而正是由于介质中小尺度非均匀微小颗粒的“散射”，地震波在这些散射体之间不停“弹跳”，对介质的采样次数成倍增加，使得介质内部的微弱变化被尾波放大。因而尾波中包含了丰富的传统方法中无法检测的介质细微变化信息，特别是新近发展的尾波干涉方法可以在很高的精度上检测到介质特性的微小变化。

4. 有益的尝试

已经开展的地表浅部主动源应力监测结果表明，地震波速度（主要是指沿固定路径上的地震波走时）会随加载应力，如潮汐（Yamamura *et al.*, 2003）、大气压（Silver *et al.*, 2007）等的变化发生微弱的变化。随着深度的增加，介质内部

裂纹会逐渐闭合，数量也会大大减少。这些观测到的应力导致的波速变化，在地球深部，特别是数公里到数十公里的孕震深度上，是否会因为围压的增加而消失？

由美国莱斯大学、卡耐基研究所和劳伦斯伯克利国家实验室的联合研究小组在 SAFOD 钻井中开展的一项为期 2 个月的主动震源实验(图 4)回答了以上问题(Niu *et al.*, 2008)。在并行的先导孔和主孔 1km 深度处分别安放了一台压电陶瓷震源以及一台三分量地震加速度计，后者以 48000Hz 的采样频率连续接收源脉冲信号，实现了不间断的井间波速测量。通过数据叠加及互相关技术，时间测量精度可以达到 10^{-7} s。研究发现深部剪切波沿井间固定路径的传播时间变化（微秒量级）与大气压变化呈现很好的负相关性。更重要的是，在对观测点影响最大的两次地震（震级分别为 3 级和 1 级）发生前 10 个和 2 个小时，地震波速出现明显的变化（图 5）。在排除了降水、仪器等影响因素外，研究人员认为这两次地震波速的变化与两个地震破裂过程有关。研究人员还发现波速变化除了包含同震及震后信息外，它们还含有重要的震前信息。帕克菲尔德地震实验场虽然具有多种不同的测量手段，但只有个别应变仪和倾斜仪记录到了明显的同震变化，并且所有仪器数据都没有显示出任何震前变化的痕迹。

有多种手段可以间接监测地下的应力状态，但在流体充盈的多孔介质中，由应力导致的介质弹性性质变化只会在应变仪、GPS 等记录中留下微弱的印记。目前常规的测量主要为仪器附近的点测量，而主动源观测则充分利用了尾波对地球介质多次采样、放大介质变化的特性，能够充分反映从震源到接收仪器之间及其邻近地区地下的平均应力状态。

5. 结语

SAFOD 钻井主动震源探测实验**并非是对地震的预测**，但却为探寻震前物理过程提供了一条可行的思路。地震破裂发生之前震源至接收点附近介质的弹性特征会发生变化，例如微裂纹密度的增加，地震波速的变化等，即便是在孕震的深度上。如果把这种变化看成是地震的一种前兆，那么完全可以利用高性能、可持续的主动源探测来捕捉地下应力变化的信息，也许就可以为随之而来的地震活动提供某种程度上的预测。

人类在多大程度上能够预测地震，最终将取决于对地震发生物理条件和过程

的理解。只是现有的认识还都局限在精确界定的地震实验场中,无论从时间尺度、空间范围还是设定模型来说,各种主动震源探测结果都与真实地震的发生,特别是破坏性大地震的发生相距甚远。但这并不意味着实现真正意义上的**物理预测地震**没有可能。新的世纪里,面对一次又一次巨大的地震灾害,人类显得渺小而脆弱,但又不乏勇气和信心。在烙上与“灾害共存”的理念,走“预防为主、综合减灾”道路的同时,人们不应该放弃对地震预测、震前物理过程探寻的努力,哪怕暂时只有点滴的希望。

致谢

感谢美国莱斯大学钮凤林教授提供相关照片和研究结果。

参考文献

- Bakun W., Aagaard B., Dost B. et al., Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake, *Nature*, 2005, 437, doi: 10.1038/nature04067.
- Niu F., Silver P., Daley T. et al., Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site, *Nature*, 2008, 454, doi: 10.1038/nature07111.
- Silver P., Daley T. Niu F. et al., Active source monitoring of cross-well seismic travel time for stress-induced changes, *Bull. Seismo. Soc. Amer.*, 2007, 97(1B), 281-293, doi:10.1785/20060120.
- Yamamura K., Sano O., Utada H. et al., Long-term observation of in site seismic velocity and attenuation, *J. Geophys. Res.*, 2003, 108 (B6), 2317, doi:10.1029/2002JB002005.

关键词

震前物理过程 主动源探测 圣安德列斯断层 尾波干涉

英文题目

Preseismic physical phenomena, can we detect?

英文摘要

Can we detect the subtle physical changes in the earth before an earthquake occurred? An article about the preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield, SAFOD drill site published recently seems to give a clue to that question. Here we outlined the stories happened on the San Andreas fault and the famous Parkfield Earthquake Experiment, and reviewed the techniques which might bring us new insight to the further study of seismic prediction.

作者信息

李娟: 副研究员, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

Li Juan: Associate Professor, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing, 100029

题注

- 图 1 圣安德列斯断层的航空照片 (资料来源: 美国地质调查局 USGS)
- 图 2 帕克菲尔德地震实验场位于圣安德列斯断层的中部。图中还给出了历史上几次主要地震的发生位置 (资料来源: ICDP - International Continental Scientific Drilling Program)
- 图 3 圣安德列斯断层深部探测计划示意图。垂直的先导孔于 2002 年完成, 其右边是深至 3.2km 的 SAFOD 主孔, 各种观测仪器 (红色小点) 将布设在 2-3km 的深度上 (资料来源: 美国地质调查局 USGS)
- 图 4 圣安德列斯断层 SAFOD 钻井主动源探测实验现场 (钮凤林教授提供)
- 图 5 地震波传播时间的变化和当地地震活动性的比较。(a) 实验期间 (10/29/05 ~ 11/29/05 和 12/11/05 ~ 01/10/06 两个观测段) 地震活动的深度分布。红色方框给出了 SAFOD 钻井位置, 红色和绿色圈分别代表震级为 3 级和 1 级的两次地震。(b) 计算得到的 SAFOD 实验场静态同震应力变化 (上图); S 波及其尾波沿固定路径传播时间的变化曲线 (下图)。(c) 图 (b) 中阴影部分的局部放大。黑色实线给出了 11/02/05 日起第 50 ~ 60 天的 S 波及其尾波传播时间变化; 空心圈为计算得到的应力变化; 红色和绿色实心圈分别对应两次地震导致的应力变化; 红色和绿色箭头分别指示了观测到的两次地震前 10 个和 2 个小时, 尾波传播时间出现了明显的“偏离”, 包含了重要的震前物理过程信息 (钮凤林教授提供)

图 1



图 2



图 3

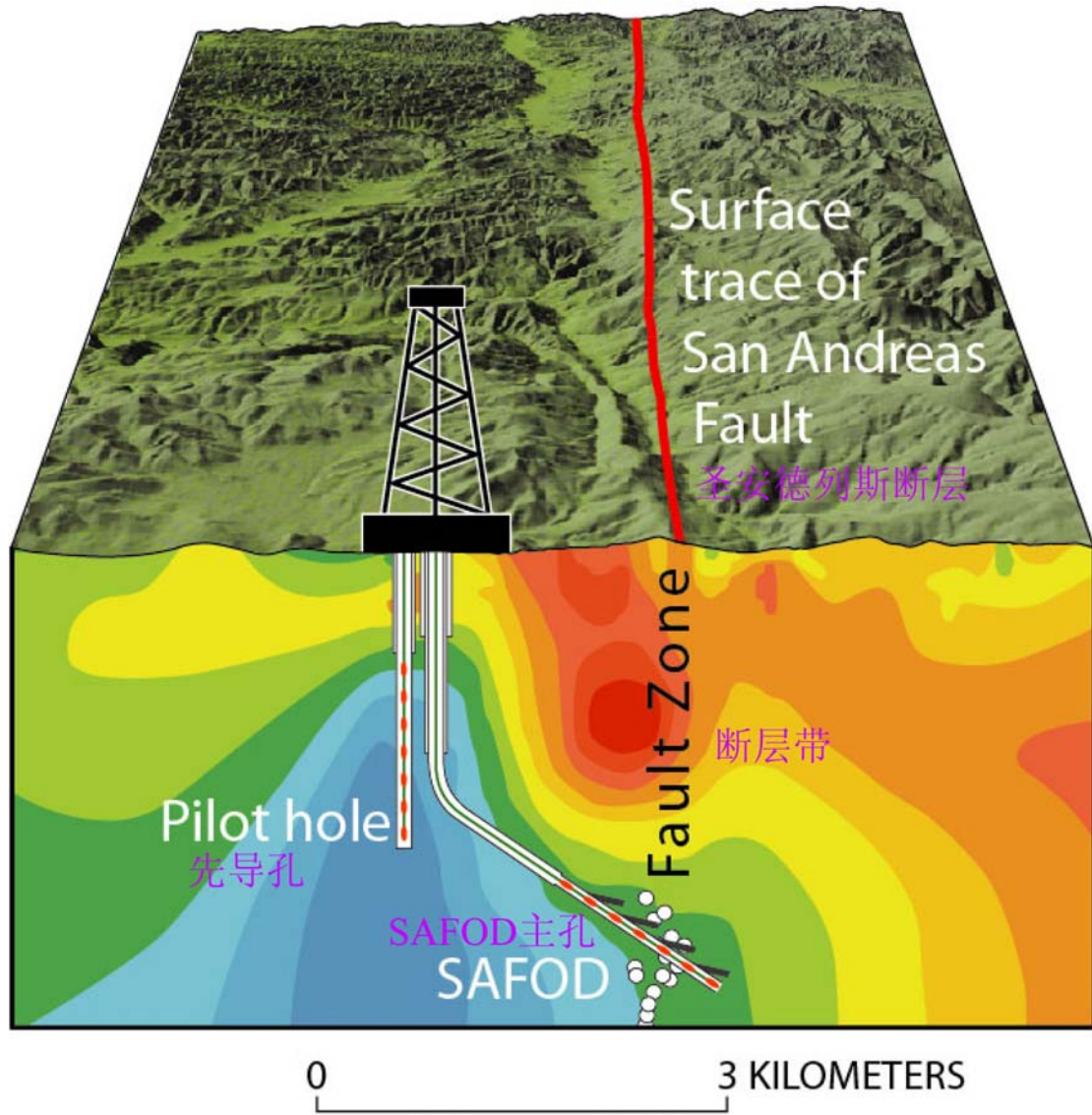


图 4



图 5

