地震科技前沿快报

2019 年第 5 期　（月刊 总第 5 期）

中国地震局科学技术委员会　　中国科学院兰州文献情报中心
中国地震科学实验场　　中国科学技术信息研究所

本期概要

1、美科学家通过机器学习预测了断层的缓慢滑动
2、科学家利用历史地震数据开展印尼地震灾害风险评估
3、新建模方法发现大地震前有可察觉的震颤活动变化
4、德国科学家发现岩浆迁移引发深低频地震

基于原位实验预测流体注入所诱发地震的能量

预测由深部流体注入导致的地震的震级对于评估储库安全性和预防地震灾害具有重要意义，但是利用现有模型进行预测往往具有较大误差。来自法国尼斯大学等机构的五位科学家通过整合注入参量、诱发的非地震变形、震源与注入点之间的距离等提出了评估液体注入过程产生地震能的新方法。研究者利用在灰岩和页岩地区的断层带附近开展的十次注入实验获得的数据发现，地震能和液压能（hydraulic energy）依赖于注入流体的体积（V），与 $V^{3/2}$ 成正比，但是由于大量非地震变形的存在，两者有很大差异。为了更好的预测地震能，需要通过测量注入点残余变形而对非地震变形进行约束。同样的，将震源位置与注入点之间的距离、激活断层所需

临界流体压力考虑到模型中会得到更好的预测效果。相关成果发表在 2019 年 3 月的 Scientific Reports 上。

在过去的几十年，人类活动导致的地震频繁增加，在这其中由于流体注入而诱发的地震占了很大一部分。为了降低地下流体储库造成的地震风险，需要对由于流体注入而产生的地震能做出合理预测。前人的模型指出地震距（M_0）和注入流体体积（V）成正比，但是最近的研究结果指出前者和 $V^{3/2}$ 成正比。而且近期无论是实验室研究还是原位注水实验获得的数据，均表明计算得到的地震距存在几个数量级的偏大。造成这种偏差的原因之一是所有的失稳只会造成地震变形，但事实上地震变形只占了一小部分。此外，研究表明地震能不仅和注入流体体积相关，还受储库地质构造、注入深度、应力状态、断层密度与摩擦特征等变量的影响。因此，在预测流体注入诱发的地震能时要综合考虑这些变形的影响。

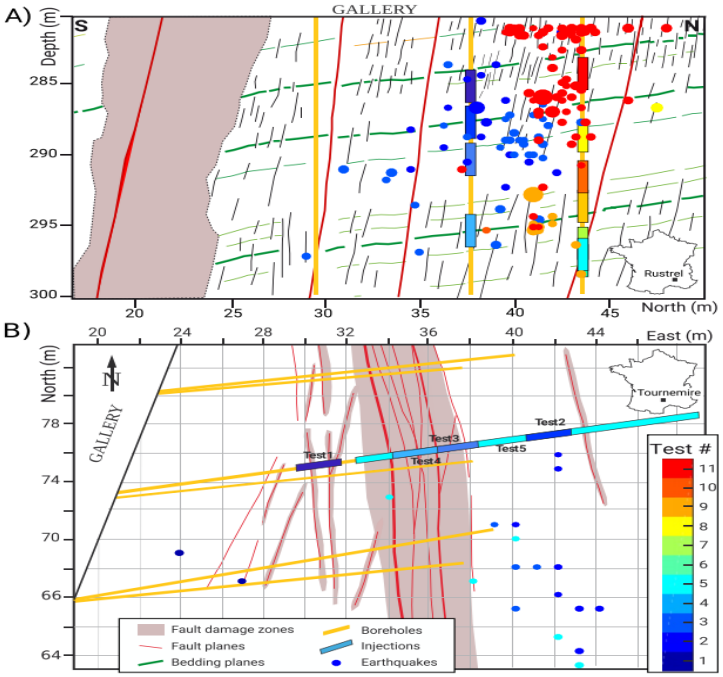

图 1　实验设置。地震位置的颜色代表测试次数，大小代表地震震级。

A：Rustrel 实验的垂直剖面；B：Tournemire 实验的简图。

研究者在低渗透率页岩地区和高渗透率灰岩地区开展流体注入实验，获得流体压力、变形、地震等相关数据。实验分别在位于法国 Tournemire 的法国辐射防护与核安全研究所（IRSN）的实验平台和位于 Rustrel 的低噪声地下实验室进行。这种原位实验既能满足了真实情况的复杂性又得利于严密的数据监控网络，可以准确的表征地质状况、液压机械状况和地震状况。实验在地下 200~300 m 之间进行，流体注入位置与断层带距离几十米不等。之后，利用获得的数据评估地震距与注入参数以及诱发变形之间的关系。

能量平衡。总地震距 M_0^{tot} 和液压距都与 $V^{3/2}$ 成正比。这也很容易理解，液压距代表了注入的总能量，注入的总能量越大产生的地震能也就越大。而地震距和液压距之间有八个数量级的差距，此外研究者的结果与前人的模拟结果也有五个数量级的差异。造成这些差异的主要原因是之前普遍认为，由于液体注入导致的变形全部是地震变形，但事实上地震变形只是其中的一小部分（在 4e-3%和 4e-1%之间），而绝大部分变形其实都是非地震变形。

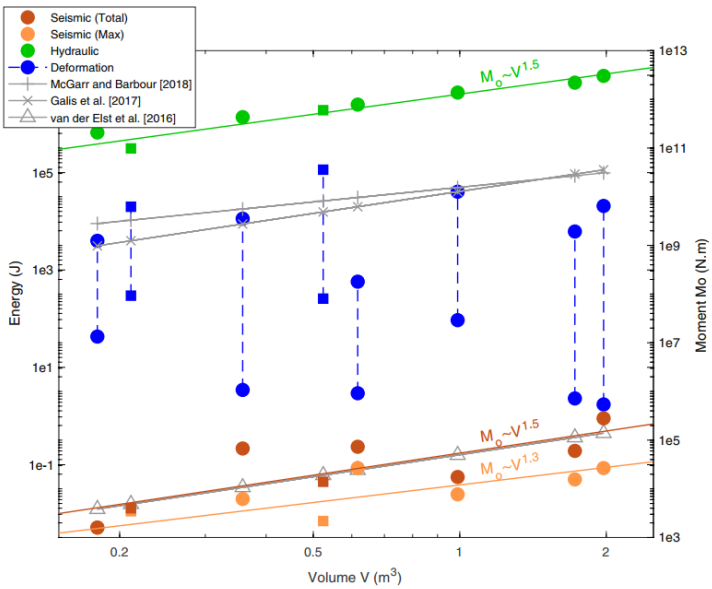

图 2　地震能-注入流体体积关系图。圆：Rustrel 实验结果，方形：Tournemire 实验结果。

能量对注入参数和储库参数的敏感度。由于液体注入释放的地震能不仅和注入液体的体积相关，也受其他注入相关参数和储库相关参数的影响。数据拟合结果表明，M_0^{tot} 与注入压力（P）和液压能（Eh）均成正比关系，拟合系数分别为 R^2=0.68 和 R^2=0.72。而总地震距和最大注入流速之间并没有显著相关关系。

M_0^{tot} 和地震与注入点的位移之间的关系是令人惊奇的。首先，前者与注入点最大位移没有显著关系（包括多孔弹性位移和塑性位移），但是与残余位移（U_{res}）即塑性位移存在以下关系：M_0^{tot}~$U_{res}^{-1.3}$。这是由于塑性位移代表了非地震变形，而一次地震产生的能量是一定的，非地震变形越大，地震变形量就越小，其所释放的地震能就越少。

M_0^{tot} 与临界压力（Pc）之间也存在一定关系：M_0^{tot}~$Pc^{2.25}$ 临界压力是指发生弹塑性失稳时所需要的压力。也就是说，激活断层构造所需要的压力越大，其诱发地震所释放的地震能也就越大。

尽管随着孔隙度增加，M_0^{tot} 有着减小的趋势，但是两者之间并没有明确的函数关系。因此在储库检测中并不能用 M_0^{tot} 推测孔隙度的变化，但是孔隙度的变化可能在非地震变形和地震的时空分布演化中扮演重要角色。

M_0^{tot} 与震中距注入点的最小距离存在以下关系：M_0^{tot}~$D_{min}^{-1.5}$，由于将注入点的变形考虑成非地震变形，因此 D_{min} 代表了注入点附近非地震变形的体积，它和残余变形之间存在正相关关系。D_{min} 与注入体积 V 存在反比关系，但是拟合程度较低。而 M_0^{tot} 与震源到注入点的平均距离也存在较差的拟合，但和最远距离之间没有显著关系。

M_0^{tot} 与多监控参数之间的关系。上述是地震距与单参数之间的关系，但是这些参数之间可能不是相互独立的，也就是说一个参数的改变可能会引起另外一个参数的变化，因此需要查明 M_0^{tot} 与 2~3 个参数之间的关系。由于 M_0^{tot} 与各单参数之间存在指数相关关系，因此同时取 log 后便存在线

性关系。

来源：Louis D B, Frédéric C, et al. Energy of Injection-induced seismicity predicted from In-situ experiments. Scientific Reports, 2019, 9(1):4999.

美科学家通过机器学习预测了断层的缓慢滑动

2018 年 12 月，Nature Geoscience 在线发表了两篇涉及机器学习与地震研究的论文。这两篇论文的主要研究者来自美国洛斯阿拉莫斯国家实验室（Los Alamos National Laboratory），同时还有来自宾夕法尼亚州立大学（Pennsylvania State University）的合作者。研究人员利用机器学习方法检测地震信号，准确地预测了卡斯卡迪亚（Cascadia）断层的缓慢滑动——这种破裂在其他俯冲带发生大地震之前曾观测到。

洛斯阿拉莫斯国家实验室的研究人员利用机器学习分析来自卡斯卡迪亚断层的数据，并发现大型逆冲断层不断引发震颤——这是断层发生位移的信号。更重要的是，研究者发现断层声音信号的响度与其物理变化之间存在直接的平行关系。以前，卡斯卡迪亚的“呻吟”被称为毫无意义的噪音，现在则预示着它的脆弱性。

之前，卡斯卡迪亚断层的运动特征被淹没在了数据中。在机器学习发现精确模式之前，连续信号被认为是噪声而丢弃，但实际上，它含有丰富的信息。洛斯阿拉莫斯国家实验室的科学家 Paul Johnson 表示，他们发现了一种高度可预测的声音模式，其指示着断层的滑动和破裂，同时，还发现了断层脆弱性与信号强度之间的精确联系，这可以帮助人们更准确地预测大地震。

机器学习通过自我调整算法创建决策树来选择和循环测试一系列问题与答案，从而探测大量地震数据集并找到不同的模式。去年，该团队在实验室使用与岩石和活塞相互作用的钢块来模拟地震，并记录下声音，然后通过机器学习进行分析。这一研究发现，当模拟断层滑动时，会有大量的地震信号（以前被称为无意义的噪声）被确定。这是地震预测的重大进展，因为更快、更大的地震有更响亮的信号。

之后，该团队决定将他们的新发现应用于现实世界——卡斯卡迪亚断层。最近的研究表明，卡斯卡迪亚断层一直活跃，但其活动似乎是随机的。之后，该团队分析了该地区地震台站 12 年的实际数据，发现了类似的信号和结果：卡斯卡迪亚断层的恒定震颤量化了俯冲带缓慢滑动部分的位移。在实验室中，研究者发现了一个类似的信号，准确预测了大范围的断层破裂。研究人员认为，在卡斯卡迪亚进行仔细监测可以提供关于闭锁区域的新信息，进而为早期预警系统提供关键帮助。

来源：Machine learning-detected signal predicts time to earthquake

Hulbert C, Rouet-Leduc B, Johnson P A, et al. Similarity of fast and slow earthquakes illuminated by machine learning. Nature Geoscience, 2019, 12(1): 69.

Rouet-Leduc B, Hulbert C, Johnson P A. Continuous chatter of the Cascadia subduction zone revealed by machine learning. Nature Geoscience, 2019, 12(1): 75.

https://www.lanl.gov/discover/news-release-archive/2018/December/1217-machine-learning.php

科学家利用历史地震数据开展印尼地震灾害风险评估

利用历史地震数据，科学家可以确定印尼所发生的最具破坏性的地震的来源，进而可以对印尼2010年和2017年地震灾害风险评估能力开展独立检验。相关研究进展发表在新近出版的《美国地震学会通报》（BSSA）。

自2004年印尼苏门答腊—安达曼群岛发生9.1级强震之后，地震风险预测就成为印尼关注的优先方向。但是到目前为止大部分有关区域地震灾害的相关研究都集中于苏门答腊群岛，因此研究人员呼吁需要将相关研究扩展至爪哇岛等地区。印尼有超过57%的居民（约1.4亿人）生活在爪哇岛，该地区日益面临严重的自然灾害风险。而确定区域灾害风险等级对于印尼这样一个人口众多并伴随着经济与城市化快速发展的国家而言显得至关重要。

研究人员采用地震灾害概率评估（PSHA）方法对印尼过去历史时期的地震数据进行分析。PSHA 是一种用于计算在特定位置和时间范围内地震震级超过特定强度可能性的方法。研究人员分析了 1681—1877 年发生在印尼爪哇、巴厘以及努沙登加拉群岛的地震记录，以确定上述地区历史上所发生的破坏性地震的来源及其地震强度。

分析结果表明，印尼地区的主要构造特征表现为印度板块和澳大利亚板块之间的碰撞和俯冲，这是引发类似2004年苏门答腊强震的原因所在。但是，研究发现爪哇发生大型逆冲区地震缺乏证据支持。相反，研究表明，历史上在爪哇群岛发生的大地震主要集中于板块内（即地震发生在俯冲板块内部）。此外，研究还发现在爪哇以东的弗洛雷斯断层上存在大规模地震群，分别发生于1815年、1818年 和1820年，同时，发生在爪哇浅表地壳断层的地震此前从未在地图上被标注。

研究人员指出，板块内地震在爪哇地区十分普遍，包括在 2009 年所

发生的造成重大人员伤亡的西苏门答腊 7.6 级地震和爪哇中部 7.0 级地震，但是未能发现大规模逆冲区地震的证据令人意外。尽管数据分析难以区分大型逆冲区地震和板块内地震，但研究人员利用俯冲板块模型实现了数据与地震之间的良好匹配（如发生于 1699 年和 1867 年的地震）。

此前的研究表明，发生在苏门答腊的不同大型逆冲区地震之间间隔时间很长，因此在过去几个世纪爪哇南部鲜见大规模俯冲板块事件仅仅说明该地区一直处于地震活动非活跃时期，并非意味着不会有大规模地震的发生。

来源：Historic earthquakes test Indonesia's seismic hazard assessment

Griffin J, Nguyen N, Cummins P, et al. Historical earthquakes of the eastern Sunda arc: source mechanisms and intensity-based testing of Indonesia’s National seismic hazard assessment. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 109(1): 43-65.

https://www.seismosoc.org/news/historic-earthquakes-test-indonesias-seismic-hazard-assessment/

新建模方法发现大地震前有可察觉的震颤活动变化

在 2011 年东日本大地震发生之前的几年，地震附近的地壳已经开始骚动。在美国国家科学基金会（NSF）和日本文部科学省（MEXT）的资助下，德克萨斯大学奥斯汀分校的研究人员使用计算机模型研究在这个地点附近发现的微小震颤是否可以与灾难本身联系起来，相关研究成果于 2018 年 12 月 15 日发表在《地球与行星科学通讯》（EPSL）上。该研究有助于提高科学家对驱动巨型地震的力量的理解，并改善地震灾害评估。

杰克逊地球科学学院教授、德克萨斯大学地球物理研究所研究员 Thorsten Becker 表示，这一首次全面的研究，显示出在日本东北大地震之前出现了可察觉的震颤活动的变化。地壳的一部分即靠近最终破裂的地方的应力状态会在事件发生前几年出现改变，通过证明这一点，该项工作补充了地壳变形研究和人类对地震驱动力的理解。虽然震颤的位置引发了人们对其与地震有潜在关系的疑问，但 Becker 表示，目前还不清楚这两个事件是否相关。然而，地震的特征有助于改进计算机模型，从而有助于理解和认识其相关性。

新的建模技术使科学家能够创建地壳四维图像并分析构造板块之间的相互作用，从而显示推动断层的力量的时间变化。一旦输入地震数据，该模型就会匹配地震前后板块变形情况的观察结果，这使得科学家们可以推断出板块边界的力学特征，进而有助于识别大地震前后断层所受压力之间的联系。

该研究中的模型使用不同的数据集（关于地球表面形状的大地测量信息）开发而成，通过使用不同的数据集获得类似的结果（地震波和地球形状的变化），科学家们对地震模型的准确性更加自信。

目前，科学家们可以提供显示已知地震带的最佳危险性地图，以及未来几十年内地震的模糊概率。了解更多此类地震可能发生的时间和地点，

即使在几年之内，也将代表当前地震预报的重大改进，并且可能允许政府和行业有足够的时间来为这样的事件做出准备。为此，研究人员希望该研究能够为改善地震灾害评估的全球努力做出贡献，如由 NSF 资助、德克萨斯大学奥斯汀分校主导的新的研究合作网络“俯冲带建模合作实验室”的建设。

来源：New Computer Modeling Approach Could Improve Understanding of Megathrust Earthquakes

Becker T W, Hashima A, Freed A M, et al. Stress change before and after the 2011 M9 Tohoku-oki earthquake. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 504: 174-184.

https://www.jsg.utexas.edu/news/2019/01/new-computer-modeling-approach-could-improve-understanding-of-megathrust-earthquakes/

德国科学家发现岩浆迁移引发深低频地震

岩浆可以从上地幔上升到 Laacher See 火山（德国莱茵兰-普法尔茨州）下的中上部地壳”，这是德国西南地震调查局（Erdbebendienst Südwest）、德国地学研究中心（GFZ）、卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）和北莱茵-威斯特伐利亚地震调查局（Seismological Survey of North Rhine-Westphalia）所进行的共同研究的发现。

通过该研究，科学家们第一次揭示了由 Laacher See 火山下的岩浆运动引起的深部低频地震的证据。但是，目前没有任何迹象表明，在不久的将来会有任何即将发生的火山活动。相关成果于 2019 年 1 月 7 日发表在《国际地球物理杂志》（Geophysical Journal International）。

KIT 地球物理研究所（GPI）的 Joachim Ritter 教授称，检测到的地震是在很大的深度产生的，其特点是频率异常低，低于人类感知的极限。“深低频”（DLF）地震产生于 10~40 km 的深度，即在地壳和上地幔中；主要振荡频率在 1~10 Hz 之间，明显低于相同大小的构造地震。

深低频地震在世界范围内被视为岩浆流体在极深处移动的指示。GFZ 地震和火山物理部负责人 Torsten Dahm 教授表示，这种地震经常在活火山下观测到，如冰岛，日本或勘察加半岛。东埃菲尔地区的研究结果表明，来自地球上地幔的岩浆流体可以上升到 Laacher See 火山下的地壳——可解释为火山下地壳中岩浆房的存在和持续的缓慢补给。

由于莱茵兰—普法尔茨及邻近地区地震监测网络的广泛改善，2013 年首次检测到了 Laacher See 火山下的深低频地震。在过去的五年里，在东埃菲尔地区共检测到四个空间受限的深低频地震群。这些地震群沿着 Laacher See 火山以南大约 80°的东南倾斜线排列。除了空间分离外，深低频地震的发生时间也受到严重限制：到目前为止，专家观察到 8 次持续 40 秒至 8

分钟的深低频地震。

研究人员并未将观测到的深低频地震解释为近期即将发生的任何火山活动的直接前兆信号，主要是因为：岩浆在浅层地壳中的上升通常伴随着成群的高频地震，而这种活动在东埃菲尔地区尚未观察到；同时，地表没有变形的迹象（在大规模的岩浆上升过程中一般会清楚地发现地表形变）；此外，12 900 年前的最后一次喷发所产生岩浆的年代表明，再次喷发前，Laacher See 下的上部岩浆室的填充和分化可能需要大约 3 万年。

由于东埃菲尔地区深低频地震探测和定位的技术水平在过去几年中仅达够用程度，因此无法对该地区过往的深低频地震进行回溯性分析。为了更好地研究深低频地震与东埃菲尔地区下可能的岩浆活动的相互关系，研究人员建议加强地球化学监测以分析排放气体，重复大地测量以检测地表可能的形变，开展具体地球物理调查以绘制和描述 Laacher See 火山下可能的岩浆储层。此外，科学家还建议重新评估埃菲尔的火山灾害。

来源：Hensch M, Dahm T, Ritter J, et al. Deep low-frequency earthquakes reveal ongoing magmatic recharge beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany). Geophysical Journal International, 2019, 216(3): 2025-2036.

https://www.kit.edu/kit/english/pi_2019_003_deep-low-frequency-earthquakes-indicate-migration-of-magmatic-fluids-beneath-laacher-see-volcano.php

---

主　送：中国地震局领导
联　系：中国地震科学实验场管理部　Email:sycglb@ief.ac.cn