

地震科技前沿快报

2021 年第 11 期（月刊总第 35 期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震局科技与国际合作司

中国科学院兰州文献情报中心
中国科学技术信息研究所

本期概要

- 1、洛杉矶最大的地震风险在圣安德烈斯断层被忽视的部分
- 2、机器学习与地震预报的下一步
- 3、利用基于过程的方法来理解和管理诱发地震活动

洛杉矶最大的地震风险在圣安德烈斯断层被忽视的部分

2021 年 3 月，美国科学家发表文章称，他们确定了圣安德烈斯断层南部一个长期被忽视的断裂，其可能会对洛杉矶地区造成严重的地震风险，研究表明，该断裂早在 80 年前就应该发生地震了。

圣安德烈斯断层是一条大约 800 英里长的断裂带，延伸到加州的大部分地区。当太平洋板块向北美大陆板块俯冲时，圣安德烈斯断层的南部承载了该运动所产生应变的一半，每年超过 24 mm。最终，这种应变会通过地震释放出来，产生一场令人恐惧的大地震。

但是，并非断层的每一部分都能承受同样的压力。在南加州，圣安德烈斯断层系统由许多较小的“分支断裂”（strand）组成。但是，地震研究人员很难确定断层系统的哪些部分最容易破裂。长期以来，科学家们一直认为

圣安德烈斯断层南部的地块滑动大部分发生在 Banning 断裂和 Garnet Hill 断裂，而 Mission Creek 断裂根本没有承受太大的应力。

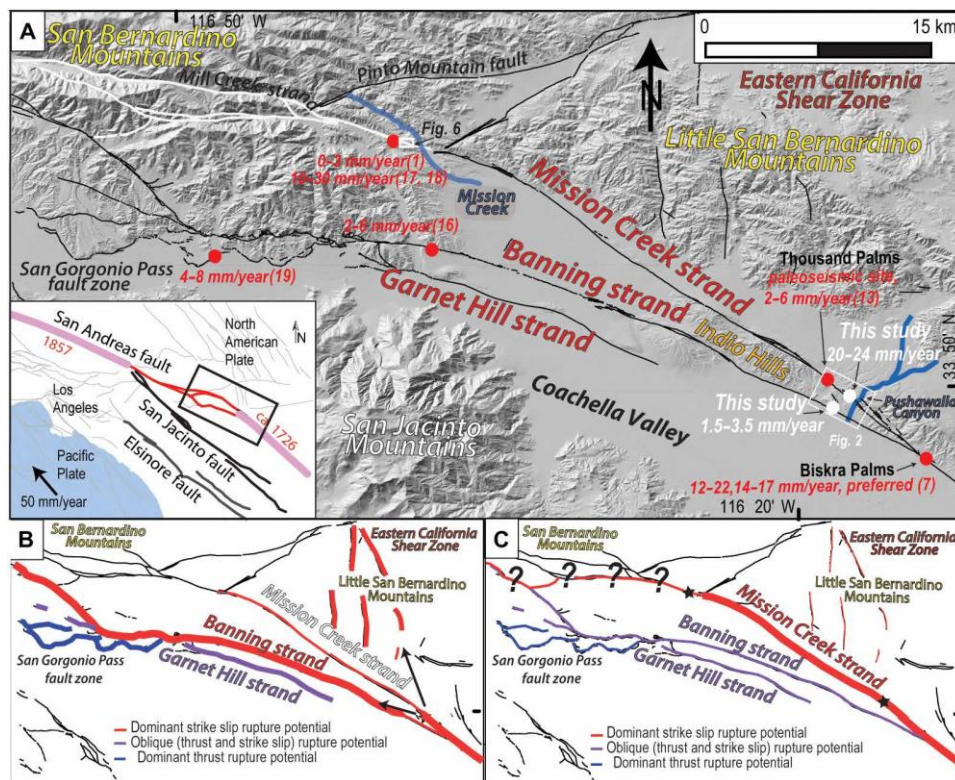


图 1 研究区地图

为了克服现有模型的局限性，美国圣何塞州立大学（Sanjose State University）的地震地质学家分析了 Mission Creek 和 Banning 断裂的长期变形率，并用利用附近地形中保存的断层移动的累积记录计算了其滑动率。基于激光雷达数据进行的野外测绘，研究人员选择了 Pushawalla Canyon 作为测量滑动率的最佳地点。最终，研究人员确定，Mission Creek 断裂占了圣安德烈斯断层每年 24.1 mm 滑动中的约 21.5 mm。但是，Mission Creek 断裂比 Banning 断裂、Garnet Hill 断裂所受到的关注要少。这一发现表明，Mission Creek 断裂的危险可能比以前认为的要更大。

自上一次地震以来，圣安德烈斯断层沿线可能累积了大约 6~9m 的弹性应变，这意味着当它最终释放时，地面可能会移动大约 20~30 英尺。之

前的预测表明，圣安德烈斯断层可能发生 7.8 级地震，这将造成 1800 多人死亡，5 万人受伤，2000 亿美元的损失。

对此，美国地质调查局的退休专家 Lucy Jones 表示，如果破裂沿着 Mission Creek 断裂传播，其西北部将从洛杉矶盆地转移一部分能量，从而避免一些破坏。总体而言，这是一个正在进行中的辩论，问题尚未完全解决，直到地震发生。

来源：LA's biggest quake threat sits on overlooked part of San Andreas, study says. That may be good

<https://www.latimes.com/science/story/2021-03-24/los-angeles-biggest-earthquake-threat-san-andreas-big-one>

Kimberly Blisniuk et al. A revised position for the primary strand of the Pleistocene-Holocene San Andreas fault in southern California, Science Advances (2021). DOI: 10.1126/sciadv.aaz5691

机器学习与地震预报的下一步

通过监督式机器学习开发的新一代地震目录以前所未有的细节阐明了地震活动，应用无监督式机器学习来分析这些目录中更完整的地震活动表现可能是改进地震预报的最快途径。相关分析与讨论于 2021 年 8 月发表在 *Nature Communications*。

在过去 5 年中，将机器学习应用于地震学研究的的活动不断增加。地震监测工作的流程包括：检测、到达时间测量、相位关联、定位和表征。由于机器学习方法的有效应用，所有这些任务都快速地取得了进展。它们已被证明是地震学中应用机器学习的合适目标，这主要是由于大量的标记数据集的存在（这些数据集通常是公开、可用的，并且是由熟练的专业技术人员通过数十年的专注工作构建的），这正是构建复杂监督模型的基本要素。在地震发生后，分析地震活动细节的研究模式已经取得进展，机器学习技术有望在实时监测中获得应用。人们很快就会拥有包含更多信息的下一代地震目录，这些更完整的目录通常至少包含 10 倍以上数目的地震（图 1），并提供地震活动断层的更高分辨率图像。

下一代地震目录将不会是地震学家习惯使用的单一静态对象。例如，在 2019 年加利福尼亚州里奇克莱斯特 (**Ridgecrest**) 地震发生后不到 2 年，已经存在四个下一代目录，每个目录都使用不同的增强检测技术开发。现在和将来，这将成为常态。随着时间的推移，地震目录随着时间的推移将得到显著的更新和改进。基于地震信号特征专门设计并模仿专业技术人员手动处理的第二代深度学习模型，可以带来超越早期模型（采用了来自其他领域的神经网络架构）的性能提升。那些对使用地震目录进行预报感兴

趣的人将发现，更多的改进将不断出现。

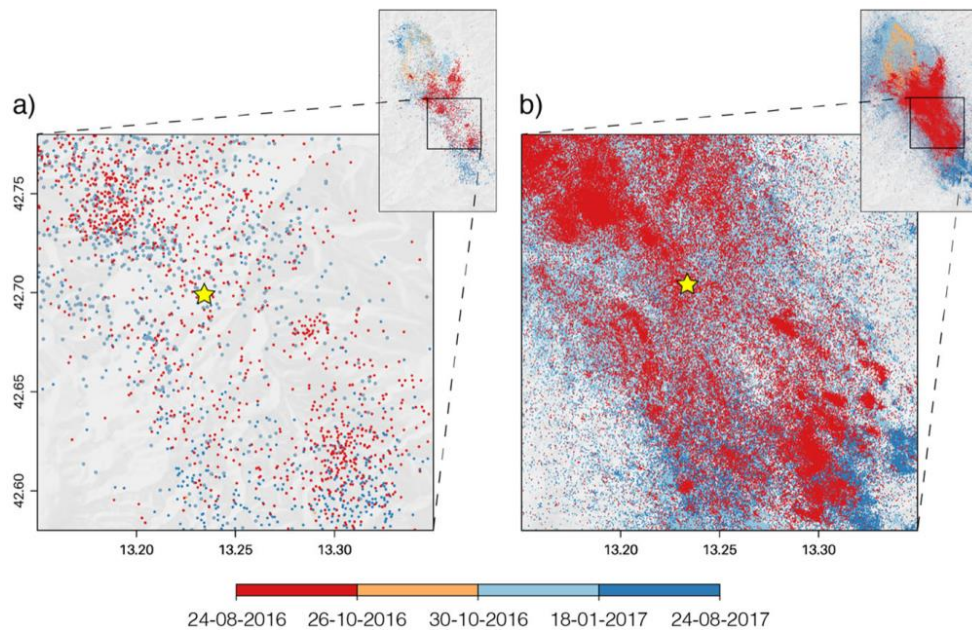


图 1 2016 年意大利 Amatrice M 6.0 地震震中区一年内的地震活动

虽然这些改进令人印象深刻，但它们提供的额外信息的价值仍不清楚。研究人员将从这些更深层次的目录中了解到地震行为的哪些方面，而这又如何改善地震预报这一难题呢？

短期确定性地震预测仍然难以实现，也许是不可能的。然而，概率性地震预报是另一回事，其依然是重点和持续关注主题，可为地震灾害表征提供信息，从而为制定政策减少地震风险提供支撑。一个关键认识是，从基于人工智能的目录中新发现的小地震中可获得新的知识，这将为所有震级的地震预报提供信息。已观察到的地震行为的尺度不变性表明，这是一个合理的预期。

经验地震学关系在地震预报的发展中发挥了关键作用，包括描述余震率随时间衰减的大森定律（Omori's Law）、震级-频率分布、描述小地震

与大地震相对数量的 b 值，以及传染型余震序列模型（**ETAS**）——该模型中，地震被视作一个自激发过程，大森定律控制其发生频率，古登堡-里克特（**Gutenberg-Richter**）关系控制其震级。这些经验法则仍在继续证明它们的效用，在过去几年中， b 值的时间依赖性已被用于尝试预测正在进行的地震序列后续发生大地震的可能性。并且，还改进了 **ETAS** 模型，以更好地预测未来的大地震。因此，将这些法则应用于改进地震目录似乎很有价值，但研究人员认为还需要做更多的工作。

有迹象表明，这种方法可能会带来新的认识。在双直剪实验中（**double-direct-shear experiment**），背景信号一般（被认为是无用的随机噪声）已被证明可能隐含着实验室环境下有关断层摩擦状态和最终破裂时间的信息。控制良好的实验室模拟断层缺乏地球的地质复杂性，然而，在卡斯卡迪亚（**Cascadia**）俯冲带的慢滑移事件中，类似类型的微弱自然背景振动以往被认为是随机噪声，但目前已被证明包含可用于预测地震开始时间的信息。最后，无监督深度学习（其中算法可用于在没有先验标签的情况下辨别数据中的模式）被应用于地震波形数据分析后，揭示出了 2017 年格陵兰岛大规模和破坏性山体滑坡和海啸之前的前兆信号。

这些例子很有说服力，但需要注意的是，它们并不代表社会关注的构造断层上典型的快速破裂地震。然而，对于此类地震，最先进的预报方法也表明，下一代地震目录可能包含将产生重大进展的信息。基于物理的预报模型解释了“先行”地震（有利于后续地震发生）导致的库仑破坏应力的变化。现在，这类模型已经显示出良好的潜力，将可以与统计模型竞争，并开始超越统计模型。库仑破坏模型尤其受益于更深层次的目录，因为它

们包含更多的小震级地震。这些小地震通过次级触发效应反映小尺度应力场的演变，这些应力场最终控制前震和余震序列中的地震成核。因此，这些小地震可增加预测能力。此外，这些小地震还可用于定义包含断层网络的新活动构造探测，进而清晰地了解会引发地震的应力的分布情况。二次触发和背景应力的异质性被证明可以改进应力触发模型，但如果结合来自序列的近实时余震数据，将更为有效。研究人员注意到，随着地震序列的展开，成为可能实时创建更完整的地震目录（使用预训练神经网络模型开发而成）。最后，尽管寻找前兆的历史令人失望，但职责要求地震学家考虑尽一切努力寻找可能的前兆信号。

整体而言，现在可以以前所未有的空间分辨率对活动断层系统的活动进行成像。这将能够使用熟悉的假设进行实验，并能够提出新的假设。可以肯定的是，下一代地震目录中隐含了驱动地震发生的潜在过程，而无监督学习方法特别适合这项工作。

来源：Beroza G C, Segou M.& Mostafa Mousavi S. Machine Learning and Earthquake Forecasting—Next Steps. Nature Communications, 2021, 12(1): 1-3.

利用基于过程的方法来理解和管理诱发地震活动

因为应力的小幅增加往往会导致断层发生破裂，所以由人类活动诱发的地震活动越来越多地引起了人们的担忧。在对诱发地震过程缺乏足够信息的情况下，政府部门已经建立了基于监测的经验性控制框架，并取得了不同程度的成功。美国麻省理工学院的研究人员介绍了一种多学科方法的研究、测试和实施情况，该方法使用全面且详细的地下信息来校准地质力学和震源物理模型，可用于管理诱发地震活动。通过比较模型的预测结果和后续观测结果，研究人员对这些模型进行了验证。在意大利南部地震活跃的 Val d' agri 油田，研究人员展示了如何将这样一种基于过程的方法成功应用于生产油气田的诱发地震活动管理。相关研究成果发表在 2021 年 7 月的 Nature 上。

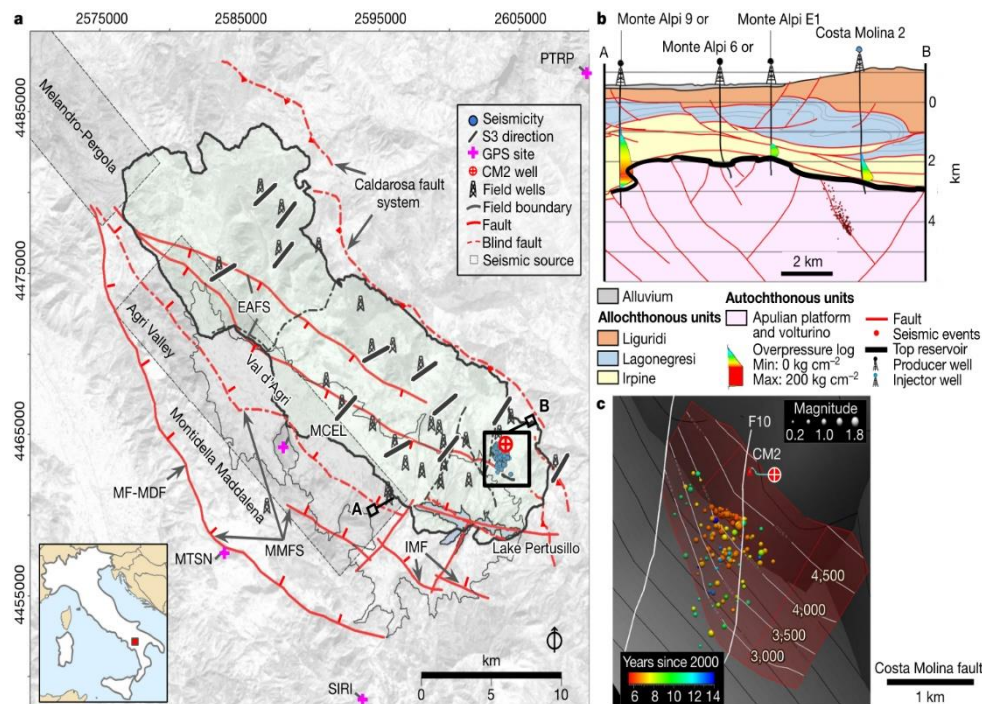


图 1 2016 年意大利 Amatrice M 6.0 地震震中区一年内的地震活动

意大利南部的 Val d' agri 油田是西欧最大的陆上油田（图 1），位于一个正在活动的构造区域。GPS 测量表明，这片区域正在经历北东-南西向的

伸展，地震活动主要沿着一个小断层即科斯塔莫利纳断层（Costa Molina Fault, CMF）发展。油田的 Costa Molina 2 号井（CM2）开始注入流体与地震活动开始之间存在明确关联，表明这些地震活动是诱发的。Val d' agri 油田的背景构造应力、地表形变、地下结构、流体压力以及采出水和注入流体的作用力等参数均已知，这使其成为一个独特的天然实验室，为地震科学和油田管理提供了非常好的研究条件。

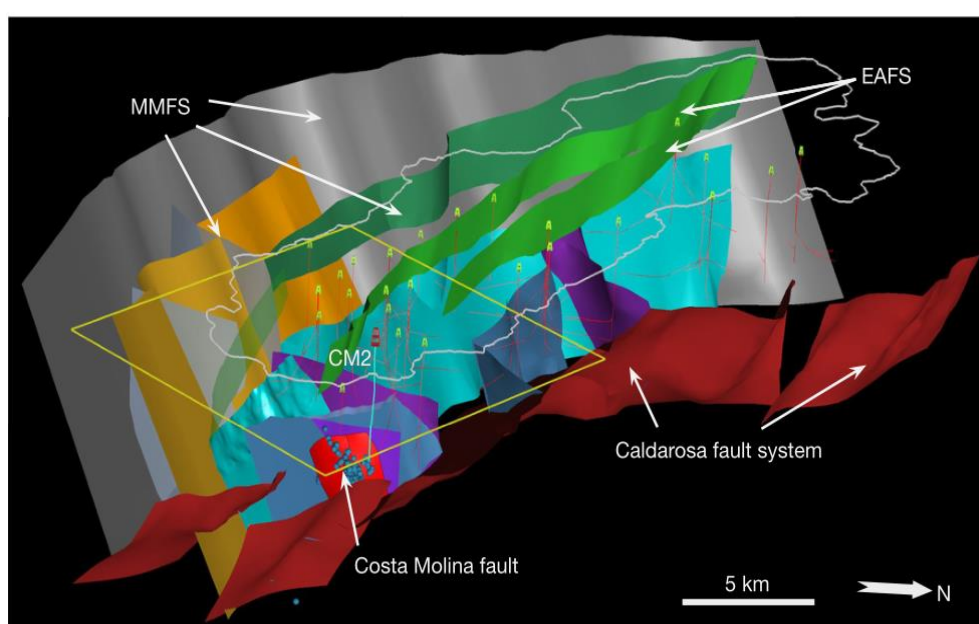


图2 Val d' Agri 油田三维结构模型

基于过程的方法

研究者利用多种信息构建模型，包括井眼破裂应力方向和震源机制、大地测量获得的应力速率、地震成像和测井资料，油气开发和流体注入的详细记录，以及与之相关的流体压力变化等。通过区域和局部耦合的流体-地质力学模型整合这些信息，并将来自流体模拟的压力作为地质力学模型的输入参数。采用历史拟合方法预测流体压力和应力的演化，将典型断层上的压力和应力变化与地震物理模型相结合，计算区域大断层和 CMF 上地震风险的变化。然后，量化各种注入方案的影响，并确定和实施不太可

能诱发大量地震活动的方案。模型校正后，将模型预测和现场观测结果进行比较，以对模型进行验证。

模型的校准、验证和预测

研究者利用 1993 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日期间的油田产量和注入速率，以及对应的井底压力、地表形变和地震活动等参数对模型进行了校准。在已校准模型的基础上，预测 2017 年 1 月 1 日至 2025 年 12 月 31 日期间三个不同注入速率（2000、2500 和 3000 m³/d）下的地震活动情况。2000 m³/d 的注入速率也正是在模型校准之后的 30 个月（2017 年 1 月 1 日至 2019 年 6 月 30 日）所采用的实际注入速率。

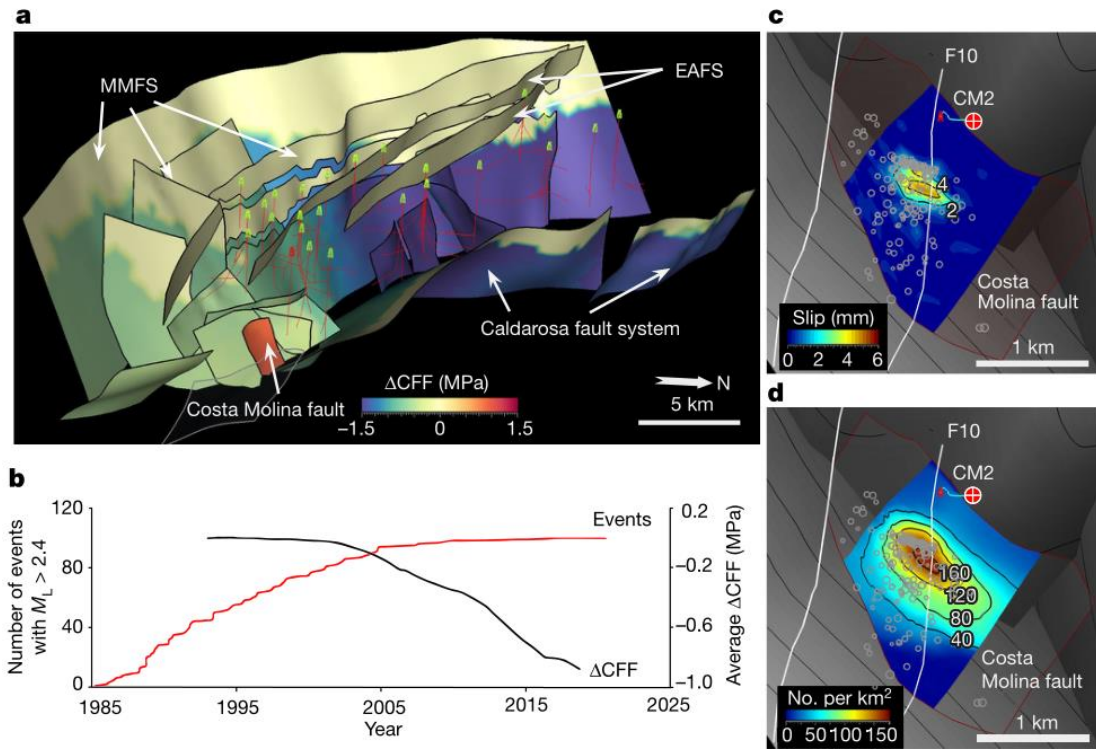


图 3 模拟的库仑应力变化、断层滑动和地震密度与观测到的地震活动。a: 所有模拟断层的 Δ CFF (1993—2016) 向西的透视图；b: 区域断层上的累积地震数量 (红色, 左 y 轴) 和平均 Δ CFF (黑色, 右 y 轴)；c: 2006 年 6 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日, 局部模型的累积滑移；d: 2006 年 6 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日, 速率-状态模型中的累积地震密度

研究结果表明，油气生产导致大部分储层和地下含水层的压力下降，几乎稳定了所有的断层段。区域模型预测 CFF (Coulomb Failure Function,

库仑破裂函数) 从南部的 0.5 MPa 上升到北部的 1.5 MPa (图 3a), 同时, ΔCFF 的变化速率达到构造加载速率的 10 倍以上。观察结果表明, 该油田附近的地震活动随着储层压力的下降而降低 (图 3b)。

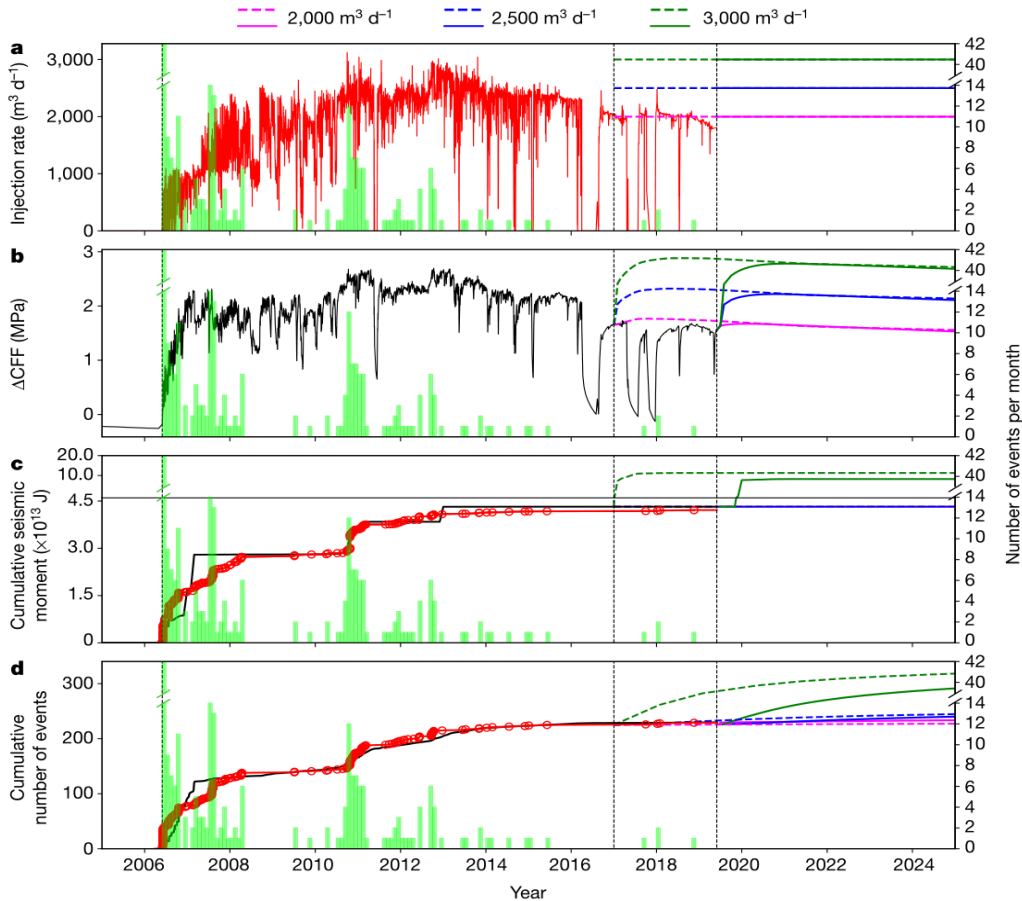


图 4 油田流体注入速率、应力变化、地震矩释放和地震活动随时间的变化。a: CM2 流体注入速率的变化, 红色 (左 y 轴) 为 2005 年初至 2019 年 5 月的实际值, 预测值 (2017 年初至 2025 年, 虚线; 2019 年 5 月至 2025 年, 实线); b: 局部模型中 CMF 上 ΔCFF 的平均变化 (黑色) 和模型预测情况; c: 实测累积地震矩释放量 (红色) 与模型的预测情况 (黑色); d: 预测的地震事件累积数量 (黑色) 与观测数量 (红色)

2005 年至 2025 年间, 实际的和预测的注入速率以及 CMF 上观测到的地震活动绘制在图 4a 中。计算出的 CMF 上的 ΔCFF 的平均变化、累积地震矩释放和累积地震活动分别绘制在图 4b-d 中。流体注入 CM2 井会导致附近 CMF 的不稳定, 但区域断层的变化可以忽略不计。在流体注入初期, ΔCFF 的跳跃与地震活动的突然爆发是一致的。大多数地震活动发生在

CMF 压力增加时(例如 Δ CFF 高于之前的最大值), 而地震活动随着 Δ CFF 降低而降低, 大致与 Kaiser 效应一致。2012 年之后, 地震活动大幅放缓。

只有当模型预测的注入量为 $3000 \text{ m}^3/\text{d}$ 时, 后续计算的 Δ CFF 会超过之前的最大值, 这可能会引发地震活动。在验证过程中, 当实际注入速率约为 $2000 \text{ m}^3/\text{d}$ 时, 仅记录到 4 次小地震。

图 4c 显示了所观测到的累积地震矩的最佳估计值, 以及校准、验证和预测阶段的模拟结果。断层上的 CFF 随着剪切应力和有效应力的变化而变化, 如果 CFF 超过 0, 就会发生滑移, 使得断层上各处 CFF 值返回到 ≤ 0 的情况。虽然模型的地震矩释放发生得更突然, 但总地震矩的释放被很好地捕获到。预测的最大滑动区(图 3c) 靠近最密集的地震群, 利用校正后的模型发现, 注入量在 $2500 \text{ m}^3/\text{d}$ 或更少时, 不太可能触发额外的断层滑移, 这与验证中缺少大量的地震矩释放相一致。

使用速率-状态模型, 研究者获得了与观测到的地震活动情况更好的一致性, 这使得模型能够模拟地震活动和地震序列的空间演化。虽然实际观测到的地震活动情况略高于预测值, 但该模型做出了预测, 在 2011 年关井后, 压力迅速增加, 地震活动会增加。同时, 预测的地震活动空间变化(图 3d) 与观测到的地震活动情况一致。观测到的和模拟的地震活动最初都集中在 CMF 的中心附近, 然后向外扩散(图 1c, 3c)。2013 年 1 月 1 日之后, CFF 下降到之前的最大值以下, 但由于速率-状态摩擦, 模拟的和实际的地震活动都以低速率继续。这种情况不能单独用 CFF 来表示, 但对控制诱发地震有重要意义, 其表明在流体压力开始下降后, 地震活动不会立即或完全停止。在验证阶段, 模型预测 $M_L \geq 0.5$ 的地震活动为 0.44 次/年。从 2019 年年中到 2025 年初的速率-状态模拟表明, 流体持续注入 $2000 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $2500 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $3000 \text{ m}^3/\text{d}$ 将导致 5.5 年间隔内的平均地震活动分别为 0.73 次/年、

2.2 次/年和 13 次/年。

对诱发地震活动管理的启示

对 Val d' agri 油田诱发地震的模拟研究表明：①油气生产导致大部分储层孔隙流体压力降低，此外，由于断层能够促进其上孔隙压力的平衡，油气作业通常会稳定储层内部和周围的断层；②在 CM2 井注入流体，靠近与 CMF 在水文上相连的断层时，会导致局部压力增加，使 CMF 不稳定，诱发一系列 $ML < 2.2$ 的事件；③模型预测，大多数地震事件发生在 CMF 上的压力增加到 ΔCFF 超过之前最大值时；④不同方法的地震活动预测结果非常一致，当 CM2 井的注入速率约为 $2000 \text{ m}^3/\text{d}$ 时，预计不会导致额外地震活动，大幅上升的注入速率会提高引发更多地震活动的可能性。

来源：Hager B H, Dieterich J, Frohlich C, et al. A Process-Based Approach to Understanding and Managing Triggered Seismicity. Nature, 2021, 595(7869): 684-689.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所