

地震科技前沿快报

2019 年第 1 期 （月刊 总第 1 期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震科学实验场

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、地震学中的机器学习：将数据转化为认识
- 2、断层带中纳米颗粒的形成环境及其对断层滑移的影响
- 3、基于观测地震矩-重现关系的重复地震预测模型
- 4、美科学家借助超算模拟多断层地震破裂

地震学中的机器学习：将数据转化为认识

机器学习（ML）在地震学中的应用愈加广泛，包括识别不可见的信号和模式、提取那些能够改善物理认识的信号等。本文作为一篇综述性质的文章，概括论述了 ML 的相关方法（包括分类、回归以及聚类算法）在地震学中五个主要研究领域的应用-地震探测和相检、地震早期预警（EEW）、地面运动预测、地震层析成像和地震大地测量。最终讨论了对于同时结合数据依托的 ML 和传统物理模型的综合方法的需求。这是加州大学伯克利分校、洛斯阿拉莫斯国家实验室以及加州大学圣地亚哥分校的科学家们调查的结果，相关成果发表在 2018 年 11 月的 *Seismological Research Letters* 上。

ML 通过利用精确的优化准则而直接从数据中提取信息，目前已经在多个领域中成功应用。ML 主要可以被分为两大类：监督学习和非监督学习。主要包括以下几个工作步骤：①数据采集，数据被采集并且划分为训练组和测试组；②预处理，整理和格式化数据，将遗失的数据移除或修复；③根据具体问题训练模型，迭代确定模型参数；④利用测试组数据评估模型表现；⑤完成训练模型，应用于新数据。

地震学拥有庞大的数据系统，尽管已经发展了多种数据处理技术，但是 ML 能够从不同角度提供互补的有用工具，例如发现未曾见过的模式或者数据库中新的、重要的特征。最近的例子是机器学习通过利用之前被当作噪声的低振幅声信号预测滑坡实验中下次滑坡事件发生的时间。因此这项研究希望通过全面论述 ML 在地震学中几个重要研究领域的最新应用及成果，一方面激励地震学家进一步探索更前沿的 ML 理论，另一方面鼓励技术和数据专家将最新的 ML 算法应用到地震学的相关研究中。

1、ML 在地震探测及相检中的应用

ML 应用到地震学中最早是为了对地震事件进行判别和分类，最近几年，该项研究被扩展到利用 ML 提高地震探测和相检的能力。这些进展表明了 ML 的巨大应用潜力，尤其是在深度学习方面。更重要的是，ML 的相关算法很可能会首次超过人类专家的能力。

近期，人们开始将 ML 和数据挖掘算法应用到基于相似性的地震探测中。例如，基于单站波形分类，利用卷积神经网络（CNN）同时探测地震和锁定地震位置。同样的，指纹和相似性阈值算法（FAST）也是一种数据挖掘算法，它能够将整个连续的波形数据库转化为二进制的指纹数据库。FAST 的特征在于其非监督性（无需地震的先验知识）和计算高效性。广义相检测（GPD）也是一种最近出现的地震探测算法。它的优势是模型一经训练便可应用到不同构造模式的数据中。

而在相检方面，模糊聚类法被应用于检测地震波的到达时间；此外，基于在北加利福尼亚州人工选择的数百万的震波图，全卷积网络被应用于检测 P 波和 S 波的到达时间。

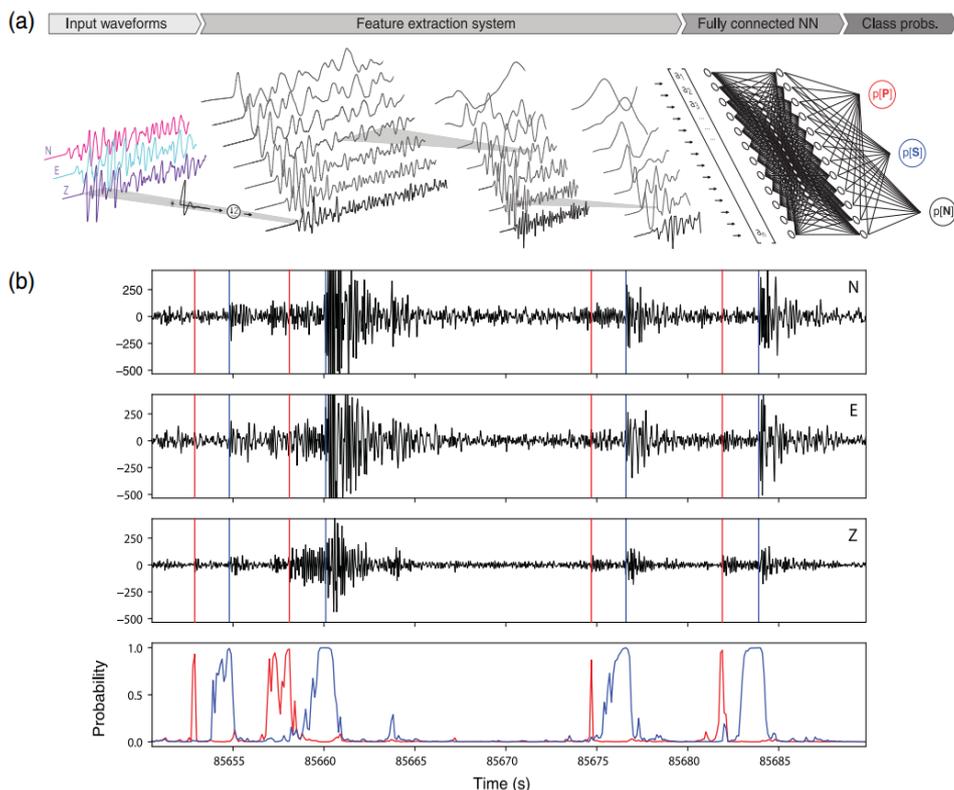


图 1 一般相检示例

2、ML 在 EEW 中的应用

EEW 利用电子信号比地震信号传播快、造成最大震动的 S 波和面波比 P 波传播快的特点，可以在主震发生之前几秒到几分钟内提供预警。近些年将 ML 算法应用于 EEW 已经取得很大进展。生成对抗网络 (GAN) 通过学习地震 P 波和背景噪声的特征，从而减少警报的错误处触发。支持向量机回归算法和神经网络 (NNs) 也被应用到估计振幅、震中距等相关参数。最终，一个统一的 EEW 框架被构建，包括实时震源估计和基于贝叶

斯算法的预警决策等。通过将站台位置、之前观测到的地震活动性以及已知断层活动迹线作为先验信息可以提高该系统的表现，尤其是在低站台密度地区。

ML 应用到 EEW 中的另外一方面进展是通过智能手机软件(MyShake)向公众提供地震预警。当一部手机检测到类似地震波形的信号时，它将包括时间戳、位置、振幅等信息的触发消息上传到云服务器，然后通过分析一个区域内大量手机数据来进行地震的进一步确认。这些触发信号被聚集起来，通过结合了噪声的基于密度的空间聚类应用算法 (DBSCAN) 来确定哪些手机触发信号确实是由地震引起的，并进一步估算地震位置和震级。

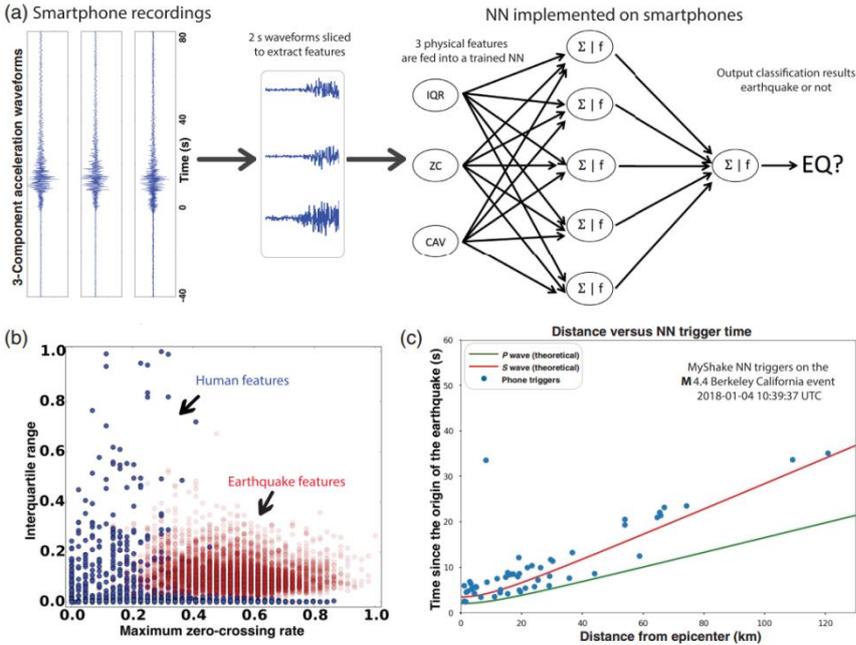


图2 神经网络在 MyShake 预警系统中的应用

3、ML 在地面运动预测中的应用

地面运动预测的核心是要回答这样一个问题：给定一个假设的震源，地表的摇晃会有多强烈？通常认为地面的活动是震源、传播路径以及场地效应的卷积，可以表示为线性地面运动预测方程 (GMPE)。在方程中预测

的地面运动是震级和震源距离的线性函数，其偏差遵循正态分布。偏差由两部分组成，认知不确定性和随机偏差，前者可以通过更加精细观察以及高级模型减小，后者不可减小。利用 GMPE 综合研究复杂参数的影响是困难的，一个可靠的方法是将其视作监督学习问题。

最早的 ML GMPEs 应用浅度神经网络 (NN)，将震级、震中距、震源深度、近地面剪切波速和接受点共振频率作为输入量，利用单隐层神经网络预测峰值地面加速度 PGA，以及通过多目标变量预测 PGA 和峰值地面速度等。除了 NN，多种监督学习方法都被用来预测地面运动，例如通过随机森林监督学习算法量化地震应力降和 PGA 之间的关系。

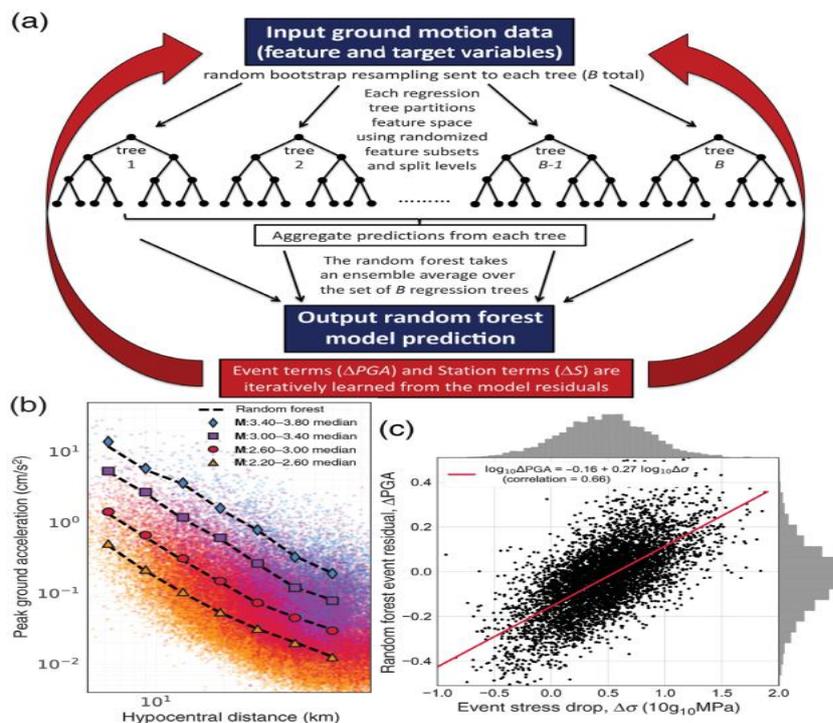


图 3 随机森林地面运动预测和地震应力下降与峰值地面加速度的关系

4、ML 在地震层析成像中的应用

地震层析成像对于探测地球物理构造和表征地震灾害情况是至关重要的，但是简单的 ML 算法应用到地震层析成像问题中是十分困难的，因

为在区域到全球尺度，地球物理地表真实数据是不存在的，因此就需要发展更加高级的 ML 算法——自适应、非监督的学习框架，这些方法结合了稀疏建模和非监督学习。例如，有的学者利用这种模型通过迭代学习地震特征的检索而实现全波形反演（FWI），还有的学者通过这种框架实现 2D 走时层析成像，又称局部稀疏走时层析成像（LST）。另外，利用 NN 同样取得了许多模型结果，例如实现速度模型反演等。

5、ML 在震地大地测量学中的应用

整个地震周期不仅包括高频的惯性变形，还包括了延长的非惯性变形，例如震后变形、震间变形以及慢地震。它们是通过大地测量学的方法进行观测的，但是由于精度问题，观测到的地震要比实际发生的少几个数量级。由于缺少典型的标记数据，将 ML 应用到非惯性变形中变得异常困难。但是，对于震后变形而言，它是由震后滑移、空隙弹性、粘弹性等多种机制控制，而 ML 能够直接利用观测数据解主要的偏微分方程，这对于衡量各种机制的贡献度是非常重要的。

ML 也能够为构建地震周期变形的加速增殖模型提供可能性，即通过训练深度学习系统来模拟计算高精度的地震物理代码，使它们能够以紧凑的数学形式表达，就像神经网络一样。整体而言，ML 应用到地震学能够起到两者相互促进的作用。地震学中的问题和庞大的数据库为各种 ML 算法提供真实世界的测试基础，甚至驱动新算法的发展。尽管 ML 有如此多的优点，将其与经典的地震学技术结合更可能实现新的突破。

本研究得到了戈登和贝蒂摩尔基金会、洛斯阿拉莫斯国家实验室研究和开发计划、美国国家科学基金会和美国海军研究办公室的共同资助。

来源：Kong Q, Trugman D T, Ross Z E, et al. Machine learning in seismology: Turning data into insights. *Seismological Research Letters*, 2018, 90(1): 3-14.

断层带中纳米颗粒的形成环境及其对断层滑移的影响

高速旋转剪切实验表明，球形纳米颗粒会在地震滑移过程中极大地降低断层摩擦阻力，从而促进大地震的形成。但是，纳米颗粒的形成环境以及对断层活动的影响依然存在争论。中山大学的几位科学家通过对红河剪切带的研究发现，自然界的断层中有两类纳米颗粒，分别为伴随韧性剪切带出现的团块状纳米颗粒以及靠近脆性断层的球状纳米颗粒。他们通过高温高压模拟试验证实，球状纳米颗粒会在低温条件下产生，并在断层活动过程中起到润滑的作用，明显降低动态摩擦系数。随着剪切生热、温度升高，球状纳米颗粒遭受变形，形成团块状的纳米颗粒簇，这一变化导致纳米颗粒不再具有润滑作用，使得断层减速，并最终停止。相关成果发表在2019年1月的 *Tectonics* 上。

一直以来，速度弱化以及断层滑移的形成机制都是地质学领域的热点话题。断层通过什么过程来克服巨大的摩擦阻力并快速滑移而引起大地震是一个重要的科学问题，科学家们针对上述问题提出了一系列的机制，包括弱物质的出现、热增压、流体增压、熔体的润滑等。最近，通过断层中纳米物质的研究来解决这一问题的新观点被频频提及，同时，人们在断层中发现了大量的纳米物质并认为它们与断层的弱化有关。为证实这一观点，人们做了大量的摩擦实验，很多实验表明，球形纳米颗粒的出现会润滑断层、在断层开始滑移的时候降低摩擦阻力，导致断层弱化。

纳米物质在自然界的剪切带以及实验变形中被大量发现，但是关于它们的形成依然存在争论，对于它们如何影响断层活动也不清楚。研究人员首先展开自然界断层带中纳米物质的特征研究，并对它们进行划分。然后，进行高温高压试验模拟，通过改变实验条件来产生与自然界中类似的纳米物质，进而阐述自然界中纳米物质的形成环境，并通过实验过程中纳米物

质的出现及其变化对应力的影响来探究它们在整个断层滑移过程中的作用。

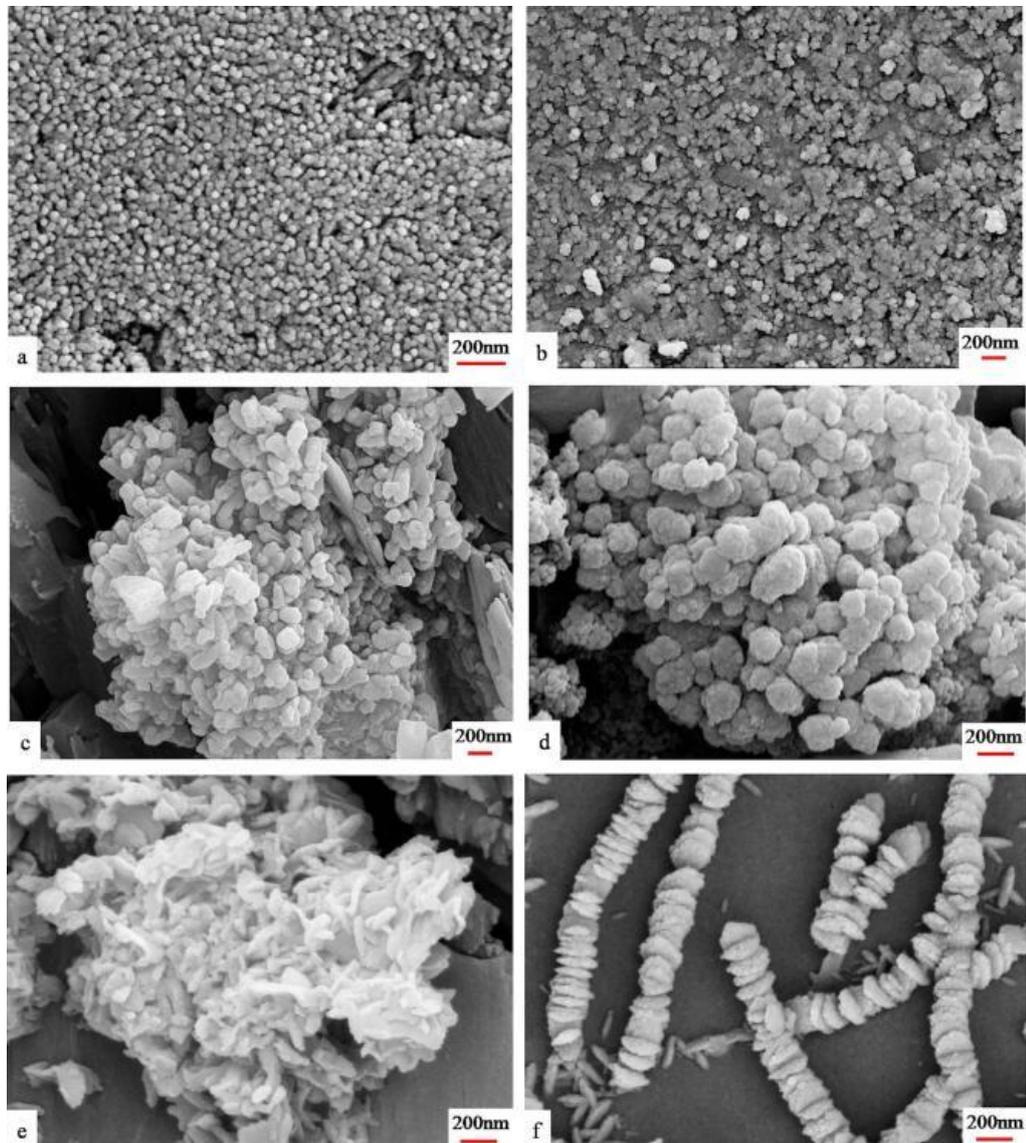


图1 a、b: 靠近脆性断层的岩石中的纳米颗粒;

c: 团块状纳米颗粒; d: 草莓状纳米颗粒;

e: 花状纳米颗粒; f: 硬币状纳米颗粒

红河剪切带主要位于我国云南省境内，是一条现今仍在活动的巨型走滑断裂带。研究人员通过对横跨断层带岩石的系统取样，通过扫描电镜的

观察发现岩石中存在两种纳米物质：在靠近脆性断层的地方，纳米颗粒呈弥散分布，它们具有统一的粒径（ $<50\text{nm}$ ），形态近球形，没有经历后期的生长以及变形，他们可能形成于岩石破裂的初始阶段；在韧性剪切带中的纳米物质则与脆性断裂中的纳米物质大不相同，大多数单个的纳米颗粒（ $50\sim 100\text{nm}$ ）都经历了拉长以及变形，形成团块状的纳米颗粒簇，这些纳米颗粒簇具有多种形态，有团块状、草莓状、花状以及硬币状。这些特征表明，它们都经历了后期的塑性变形以及生长过程。这两类纳米颗粒形成于不同的环境中，具有完全不同的特点。

通过对红河剪切带中的花岗质混合岩以及大理岩进行高温高压试验模拟发现，不同的温度和压力下产生了不同特征的纳米颗粒。

A1（原岩：花岗质混合岩，围压： 200MPa ，温度： 27°C ，最大差应力： 500MPa ，应变： 1.8% ）：在破裂中物质都发生了碎裂，粒径明显减小。扫描电镜的观察发现有很多纳米物质的产生，它们呈近球形，粒径在 $10\sim 30\text{nm}$ ，呈弥散状分布，与自然界脆性断层中的纳米物质相似。

A2（原岩：花岗质混合岩，围压： 200MPa ，温度： 600°C ，最大差应力： 550MPa ，应变： 3.1% ）：与 A1 相比产生了更多的纳米颗粒，单个纳米颗粒粒径增加到 $50\sim 120\text{nm}$ ，并相互聚合，球度和圆度依然较高。

A3（原岩：花岗质混合岩，围压： 200MPa ，温度： 700°C ，最大差应力： 700MPa ，应变： 4% ）：纳米颗粒呈团块状，发生弯曲和拉长，集合体表现为花状（直径在 $100\sim 400\text{nm}$ ），表明经历了塑性变形。

B1（原岩：白云岩，围压： 300MPa ，温度： 27°C ，最大差应力： 743MPa ，应变： 5.3% ）：球状的纳米颗粒呈弥散状分布，球度和圆度都很高，纳米颗粒具有统一的粒径（ $30\sim 50\text{nm}$ ），与 A1 中产生的纳米颗粒相似。

B2（原岩：白云岩，围压： 300MPa ，温度： 500°C ，最大差应力： 815MPa ，应变： 12.8% ）：与 B1 相比产生了更多的纳米颗粒，它们相互聚合，单个

纳米颗粒的粒径在 30-50nm，与 A2 中产生的纳米颗粒相似。

B3(原岩:白云岩,围压:300MPa,温度:800°C,最大差应力:479MPa,应变:5.6%): 纳米颗粒呈团块状,形成纳米颗粒簇,单个颗粒的粒径约 300nm。

纳米颗粒的形成过程。高温高压实验表明,纳米颗粒在低围压条件下不会产生,同时更高的差应力以及应变会产生更多的纳米颗粒,这说明纳米颗粒的产生需要足够高的应力以及应变。在不同的温度条件下都能产生纳米颗粒表明,纳米颗粒的初始形成与温度无关,但是温度会影响纳米颗粒的形态特征,在较低的温度下纳米颗粒为细粒的球形,在较高的温度下表现为聚合的复杂形状,这一实验结果与自然界中产生的纳米颗粒特征吻合。研究人员提出,纳米颗粒的形成要经历的三个阶段:①成核:矿物由于内部位错的滑移在矿物表面形成很小的颗粒,这些颗粒可能并未脱离母矿物。②球形纳米颗粒的形成:矿物表面形成的小颗粒经历强烈的变形,从母矿物颗粒脱离,形成球状的纳米颗粒。③纳米颗粒的生长以及聚合,高温的条件导致纳米颗粒的生长以及聚合。

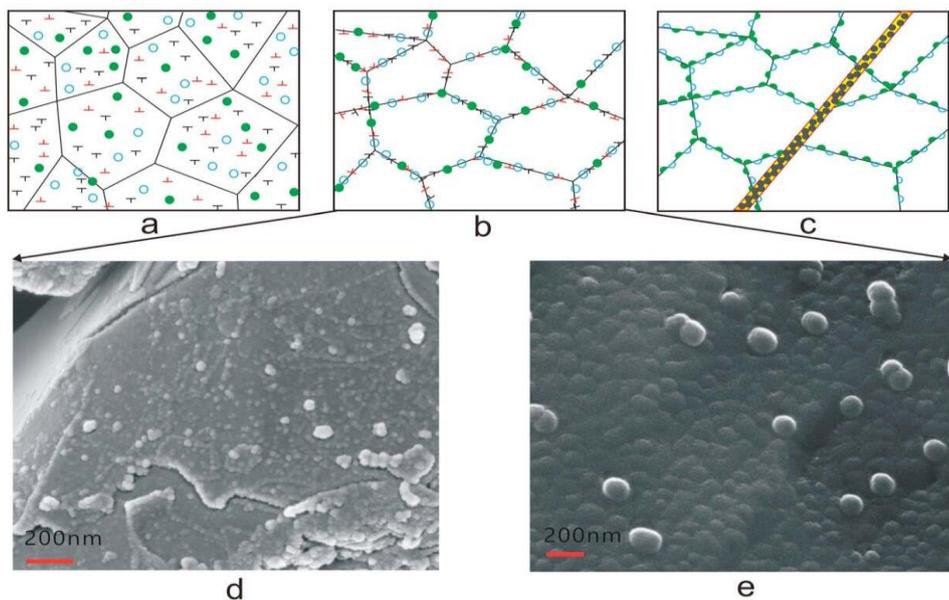


图2 纳米颗粒的形成过程

纳米颗粒对断层活动的影响。第一阶段，断层处于一个低温高压的环境中，应变决定了了纳米颗粒的产生。第二阶段：由于断层研磨和摩擦，产生了更多的纳米颗粒，并润滑断层，摩擦系数快速降低，断层滑移速度加快，这可能是浅源地震的主要成因。第三个阶段：由于剪切生热，温度迅速升高，引起球形纳米颗粒的结晶生长，产生了不同类型的聚合纳米颗粒簇，这些纳米颗粒簇并不能润滑断层，因此摩擦系数开始增加，导致断层滑移的减速，并最终停止。很多弱的活动断层可能只经历了第一个阶段，滑移过程中温度并不会升高，所以保留了球形纳米颗粒，这与晚期阶段红河剪切带的脆性断层活动相似。一些强烈的活动断层，可能经历了所有的三个阶段。

本研究得到中国科学院战略先导科技专项 B，广东省自然科学基金以及国家自然科学基金的资助。

来源：Cai Z, Lu L, Huang Q, et al. Formation Conditions for Nanoparticles in a Fault Zone and Their Role in Fault Sliding. *Tectonics*, 2019, 38(1): 159-175.

基于观测地震距-重现期关系的重复地震预测模型

小的重复地震被认为代表了由于周围障碍蠕变导致的间隔较大的凹凸体的断裂。其重现期与地震矩的关系为 $T_r \sim M_0^{\frac{1}{6}}$ ，相比之下在假设连续的应力降和没有无震滑动的情况下则是 $T_r \sim M_0^{\frac{1}{3}}$ 。新的研究证实了在速度增强断层的速度弱化段的简单裂纹模型为 $M_0^{\frac{1}{6}}$ 的尺寸关系，但这个方法取决于凹凸体的半径。对于小的凹凸体 ($R_\infty < R < 2R_\infty$, R_∞ 指成核半径)，数值模拟显示了从边界向内穿透的地震蠕变，地震在中心成核并使整个凹凸体破裂。蠕变穿透约占整个滑移的 25%，而成核阶段则占据更大部分。有限的成核尺寸导致其缺乏自相似性，应力降随着 R 的增加而增加。当 $2R_\infty < R \leq 6R_\infty$ ，数值模拟显示出从边界成核产生的简单破裂周期。在 $R > 6R_\infty$ 则表现了部分或完全破裂的复杂周期。尽管震源尺度在行为上存在变化性，但是 T_r 和应力降 $\Delta \tau$ 、成核尺度、蠕变速率 v_{pl} 满足 $T_r \sim \sqrt{R_\infty} \Delta \tau^{\frac{1}{6}} M_0^{\frac{5}{6}} / v_{pl}$ ，这就支持了以重复地震作为蠕变仪 (creepmeter) 的观点，也为自然观测结果提供了物理解释。这是斯坦福大学和波斯坦大学的科学家共同得出的研究结论，相关成果发表在 2019 年 1 月的 *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*。

虽然大部分地震序列都有很复杂的时间分布模式，但有些小地震还是可以预测的：因为他们会定期重复出现。其重现期随着地震的增大而增加，直观的说，需要更长时间去为大地震累计机械能。然而，重现期和地震矩的尺度关系并不仅仅是基于物理上的预测。假设两次地震发生之间断层是闭锁的，因此地震滑动必须跟上长期的板块运动。通过这个可以推出 $T_r \sim M_0^{\frac{1}{3}}$ ，但是观测结果是 $T_r \sim M_0^{\frac{1}{6}}$ 。事实上在地震发生之间板块并不是完全闭锁的：它们可以慢慢地滑移，或者在较小的地震中释放能量。研究人员用数值模拟以及断裂力学的观点来分析是什么控制重复地震的重现期，主要发现有：①用地震大小表达的函数作为解析表达式，可预测观察得到的尺

度关系；②发现解释小震和大震得到的周期差别（缓慢滑动的组分，破裂传播的方向，以及大的地震之间较小地震的发生情况）和决定这些转变的物理量。

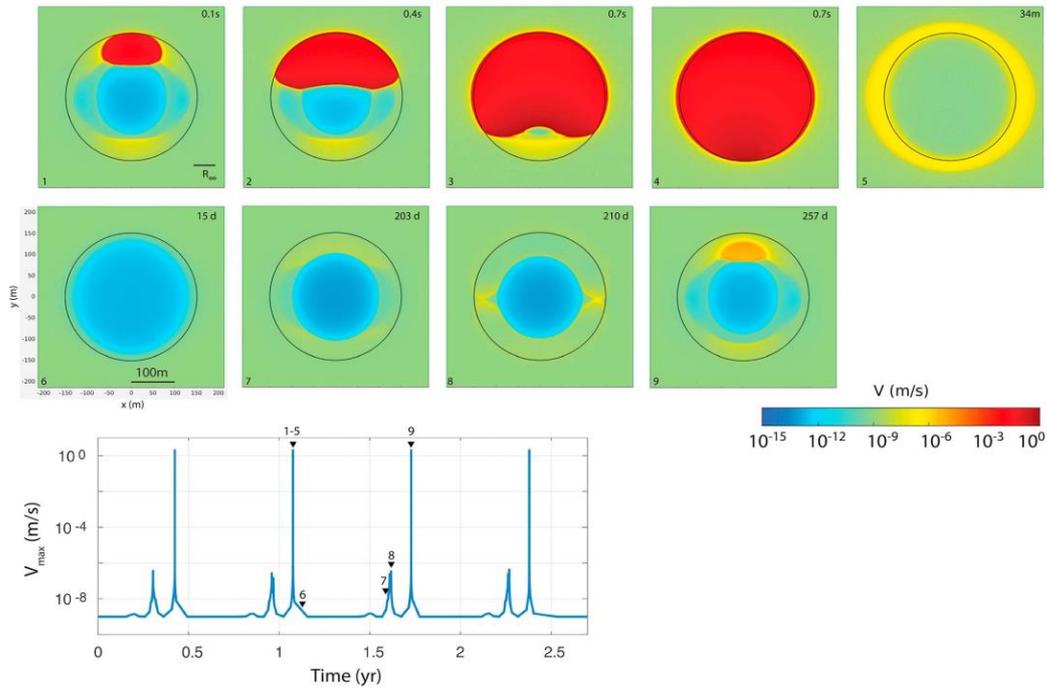


图 1 $R = 38Lb (3R\infty)$ 情况下的地震周期示例

已有研究表明，不同于大地震，小地震是可以预测的：全球多个地点已检测到具有相似波形的“重复地震”序列。他们通常被认为是由于无震蠕动以一个恒定的速率加载到闭锁区而产生的破裂。其重现期与地震矩的关系是值得关注的，Naedau 和 Johnson（1998）通过研究圣安德烈斯断层上的“重复地震”提出对于该地震带的小地震重现期与地震矩的比例关系为 $T_r \sim M_0^{\frac{1}{6}}$ ，后被 chen 等在其他断层的研究中确认。但 Naedau 和 Johnson(1998) 预测标准关系是 $T_r \sim M_0^{\frac{1}{3}}$ ，这一标准关系是基于一些假设得到的：假设 S 和 R 成线性关系（ S 是在恒定应力降下的地震滑移， R 是断裂尺度），同时假设 $S = v_{pl}T_r$ ，其中 v_{pl} 是断层滑移速率， S 是同震滑动），因此可以得出 T_r 和

R 是线性关系, 由于 $M_0 \sim \Delta\sigma R^3$ 而应力降是常数, 因此得出上述标准预测。为解释观测的不同, 他们放弃应力降是常数, 这样就会使小地震有较高的应力降。Beeler et al. (2001) 和 Chen and Lapusta (2009) 也通过别的假设进行了解释。

研究者用断裂力学的概念, 通过速率-状态摩擦断层的数值模拟来进一步了解控制重复地震的重现期的因素。先从数值模拟开始, 推导出控制重现期的表达式, 然后实现双重目标: 首先, 通过制定与应力下降和成核长度有关的物理量问题。研究者开发了一个模型, 可以应用于不同的选择或参数, 甚至可能不同的摩擦行为。其次, 研究者探索了比成核尺寸大得多的凹凸体行为, 它们没有经历显著的无震滑移。在这种情况下, 研究者为观察到的尺度关系提供了不同的物理解释。通过进行一系列类似于 Chen and Lapusta 模拟, 然后选取具体的关系式, 设置区域大小和参数值, 测试了 $6R$ 到 $100R$ 之间的距离, 结果发现了和 Chen and Lapusta 相同的结论, 并且模拟结果显示出 Chen 和 Lapusta 观察到的结果。

该研究证明, 在某些假设下, 应用于圆形凹凸体的这种能量参数导致圆形裂缝的相同尺度, 然而, 数值模拟显示这种关系仅在高于临界半径(成核半径的两倍)时成立, 并且对于小于该尺寸的凹凸体, 应力降不是恒定的。因此, 研究者建立裂纹模型来解决以下问题: ①对蠕变荷载来说, 使动态破裂成核需要多长时间? ②一旦成核, 在什么条件下它会使整个凹凸体破裂? ③应力降如何随着凹凸体尺寸的变化而变化?

研究发现, 这些问题的答案取决于凹凸体的尺寸 R 相对于 R_∞ 的大小。此外, 随着 R 向 R_∞ 减小, 经典的圆形破裂地震学模型背后的假设将不成立。不能假设破裂开始于随后在地震破裂速度下膨胀的点。在这个限制中, 破裂不是自相似的, 并且应力下降随着 R 的增加而略微增加。通过将凹凸体的无震和地震滑动处理为裂缝来估计重现期, 并基于能量平衡概念确定

它们的传播或阻滞，研究者认为应力强度因子包含凹凸体周围的蠕变，以及由于强度随滑移速度的变化，裂缝内的应力变化。并且认为，如果总应力强度因子至少等于韧性，则裂纹可以增长。结合这些结果，研究者获得了重现期的分析估计，该估计是凹凸体的函数，其预测接近于在自然中观察到的尺度关系。总之，该研究表明在一定范围的凹凸体半径上，大约是 $T_r \sim M_0^{\frac{1}{6}}$ ，然而，凹凸体的大小会决定物理机制的不同。

具体而言，研究者开发了一个嵌入了蠕变断层的圆形凹凸体的裂纹模型，发现它可以成功的表示重现期和地震矩之间的尺度关系，蠕变前侵蚀凹凸体的时间演变也适用于该模型，还可以具体的量化在地震周期的不同阶段无震滑动的贡献。该模型通过凹凸体的尺寸相对于成核半径的函数关系，详细地预测了它们的地震行为。这个模型在 $0.3 < a/b < 0.75$ 严格有效，在此范围内，模拟出相同比率 R/R_∞ 表现出相同的行为。对于较小的 a/b ， R_∞ 应替换成一定值才可更好地估算成核半长；而对于较大的 a/b ，研究观察到类似的尺度关系，但是在破裂类型和循环间的水现期上有更多变化。

研究者定义了一系列的破裂从中心处成核的凹凸体。尽管对低于 M_5 的地震的震源模型我们假设其为中心断裂，但研究者预计这种情况相对较少，因为出现这种断裂类型的 R/R_∞ 的范围很小。研究者也注意到由于有限成核尺寸的存在使自相似性中断，导致应力降随着 R 的减小而降低。这导致在较小的凹凸体会有 $T_r \sim M_0^{\frac{1}{6}}$ 。对于大的凹凸体，由于应力强度因子和半径之间的关系也会产生相同的尺度关系。特别是，研究者根据能量平衡的论证推测了在一定条件时充分破裂是有可能的，于是 $T_r \sim M_0^{\frac{1}{6}}$ 。根据分析，该准则解释了高于越 4.3 倍成核半径的凹凸体的再现间隔，根据观测证据，最大的重复地震就属于这种情况。

对于所有情况的尺度关系而言，可以近似表达为 $T_r \sim \sqrt{R_\infty} \Delta \tau^{\frac{1}{6}} M_0^{\frac{5}{6}} / v_{pl}$ 。该表达式对蠕变速率的依赖验证了小的重复地震可作为蠕变仪来应用，同

时也强调了断层特性的作用，可以影响在不同断层上的再现时间的测量。

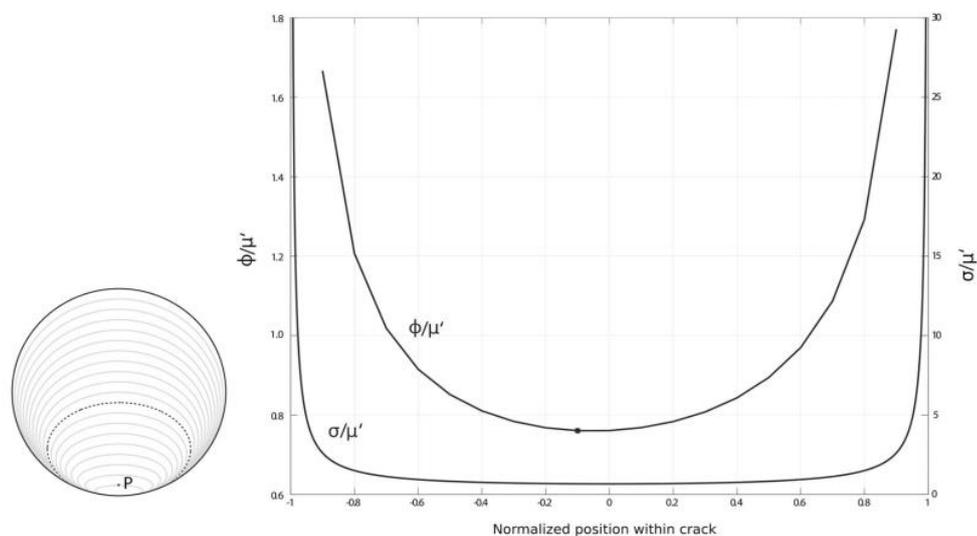


图2 侧面成核破裂的应力强度

本研究得到了德国联邦教育与研究部和欧盟第七框架计划的资助。

来源：Cattania C, Segall P. Crack Models of Repeating Earthquakes Predict Observed Moment - Recurrence Scaling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(1): 476-503.

美科学家借助超算模拟多断层地震破裂

一些最强地震涉及多个断层，这些多断层地震跨越数十至数百公里的断层系统，同时，破裂会从一个区段传到另一个区段。在过去的十年中，科学家们观察到了几次这种复杂地震，如 2010 年新西兰 Darfield 7.2 级地震及墨西哥 El Mayor-Cucapah 7.2 级地震，2012 年印度洋 8.6 级地震，2015 年新西兰 Kaikoura 7.8 级地震。

2019 年 4 月，加州大学河滨分校的研究人员在《地球物理学研究：固体地球》（*Journal of Geophysical Research: Solid Earth*）上发表文章，介绍了他们的主要发现——涉及南加州布劳利（Brawley）地震带假定断层网络的动态相互作用。该研究的主要作者、加州大学河滨分校的地球物理学家 Christodoulos Kyriakopoulos 表示，基于物理的动态破裂模型，使其能够使用超级计算机模拟复杂的地震破裂。在具体研究过程中，研究者运行了数十个数值模拟，并记录了其使用高级可视化软件分析的大量交互。

动态破裂模型可以让科学家研究地震中发生的基本物理过程。通过这种类型的模型，超级计算机可以模拟不同地震断层之间的相互作用。例如，这些模型可以研究地震波如何从一个断层传播到另一个断层，以及另一个断层的稳定性。Kyriakopoulos 表示，一般情况下，这一类型的模型对于分析过去的大地震非常有用，但可能更重要的是，其可以帮助预测未来的地震情景。

Kyriakopoulos 开发的数值模型由两个主要部分组成。首先是有限元网格，再现了布劳利地震带中的复杂断层网络。第二个组成部分是一个有限元动态破裂代码，称为 FaultMod，其允许研究者模拟地震破裂、地震波和地面运动随时间的演变。Kyriakopoulos 称，他们所做的是在计算机中创建地震——通过改变模拟地震的参数来研究它们的属性。基本上，研究者创

造了一个虚拟世界，在那里他们创造了不同类型的地震，帮助人类了解现实世界中正在发生的地震。

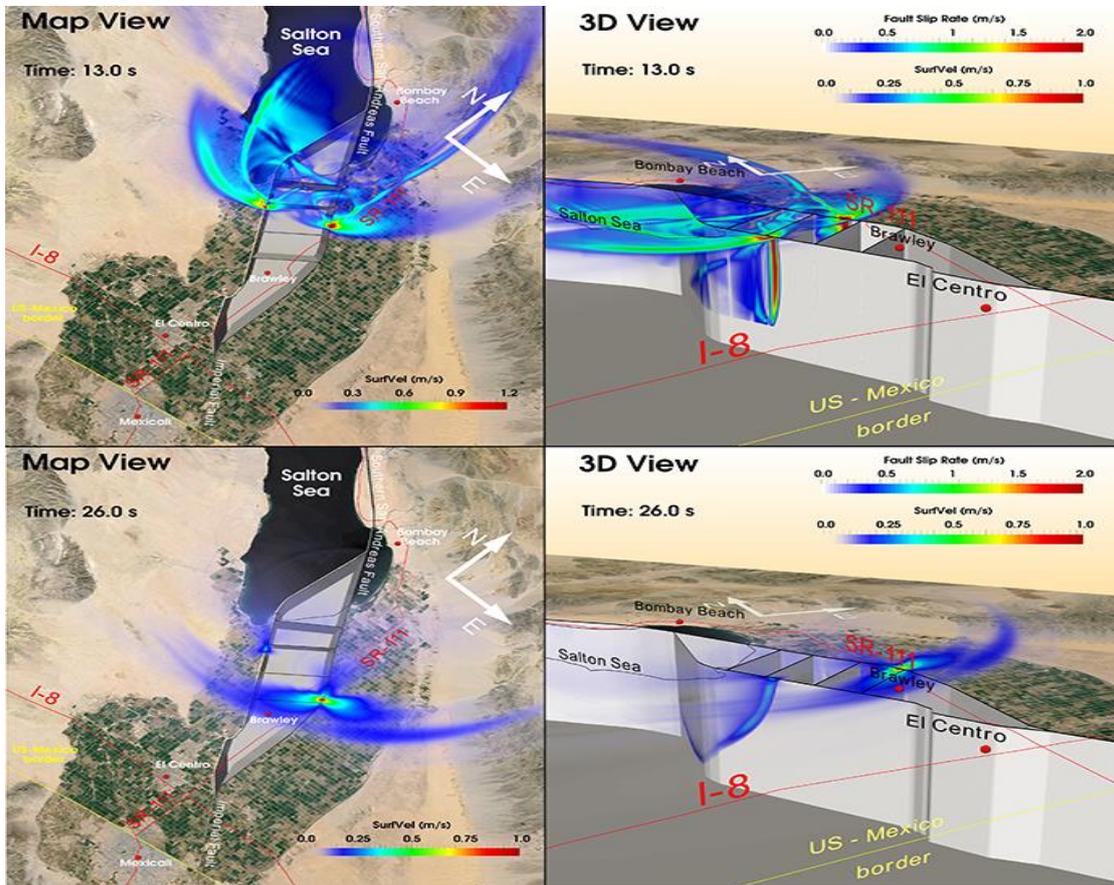


图1 利用超级计算机预测世界上最大的多断层地震

为了克服模拟过程中的相关挑战，研究者使用了 XSEDE——美国国家科学基金会（NSF）资助的极限科学与工程发现环境（Extreme Science and Engineering Discovery Environment）。他们在德克萨斯高级计算中心使用了超级计算机 Stampede，在圣地亚哥超级计算机中心（SDSC）使用了超级计算机 Comet。同时，相关研究还涉及 XSEDE 的 Stampede2 系统。

Kyriakopoulos 称，这项研究有助于更好地了解多断层破裂，从而更好地评估地震灾害。该研究的一些结果表明，南加州可能发生多断层地震，而这可能产生可怕后果。其次，研究发现，在其中一个交叉断层上正在成

核的中等地震可能引发圣安德烈斯断层上的重大地震事件。

来源: Kyriakopoulos C, Oglesby D D, Rockwell T K, et al. Dynamic rupture scenarios in the Brawley Seismic Zone, Salton Trough, southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019.

<https://www.tacc.utexas.edu/-/supercomputing-dynamic-earthquake-rupture-models>

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