

地震科技前沿快报

2020 年第 1 期 (月刊 总第 13 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、MyShake 智能手机地震网络检测和表征地震的灵敏度与准确性
 - 2、从缓慢到快速的控制型实验室地震
 - 3、地震和卡斯卡迪亚慢滑移事件之间的相似关系
-

MyShake 智能手机地震网络检测和表征地震的灵敏度与准确性

利用私人和个人智能手机来建立全球地震网络 (global seismic network)。它使用嵌入在所有智能手机中的加速度计来记录地震引起的地震动,并将记录的波形返回到中央存储库进行分析和研究。MyShake 展示了全民科学的力量。MyShake 手机记录的数据有可能通过补充当前的地震网络而被用于科学应用,在本研究中,研究者①通过分析 MyShake 收集的地震波形来报告智能手机传感器检测地震的能力;②确定借助 MyShake 手机可以检测到的地震的最大震中距离与震级的函数关系;③然后确定 MyShake 网络估算地震的位置、开始时间、深度和震级的能力。对于 MyShake 提供了四个或更多相位 (P 或 S 波信号) 和方位角间隙 $<180^{\circ}$ (21

次事件) 的地震, 其位置的中值 ($\pm$ 标准偏差)、起始时间和深度相对于美国地质调查局全球目录位置的误差分别为 2.7 ($\pm$ 2.8) km, 0.2 ($\pm$ 1.2) s 和 0.1 ($\pm$ 4.9) km。也估计了震级, 其平均误差为 0.0, 标准差为 0.2。这些结果表明, MyShake 可以在当前没有传统网络的地区提供基本的地震目录信息。随着 MyShake 网络的不断扩展, 研究者希望地震检测功能能够改善并提供有关地震活动性和危险性的有用数据。相关成果发表在 2019 年 9 月的 *Seismological Research Letters* 上。

大地测量仪器和干涉合成孔径雷达使人们对地震物理和活动构造有了新的发现和认识。全民科学扩大了评估和应对地震灾害的能力。美国地质调查局地震调查平台“您感觉到了吗?”收集互联网用户的宏观地震烈度数据, 然后将其用于立即生成强度图。来自感到地震的用户的推特消息可用于实时检测和表征事件。通过监视其网站上的访问量, 欧洲-地中海地震中心 (European–Mediterranean Seismological Centre) 可以在几分钟内检测并评估地震的影响。可以放在计算机内, 也可以放在家庭或办公室中专门安装的独立盒中的低成本微机电系统 (MEMS) 传感器可被用来监视和研究地震。分布式声学感应器将电信光纤电缆转换为地震阵列, 从而可以在数千米的线性光纤长度上进行米级记录。

现在, 越来越多的人可以使用智能手机, 这些小型设备构成了全球范围内越来越广泛且密集的传感网络。地震学家了解到, 可以通过不同方式使用智能手机来检测地震。例如, 通过监视用户何时在其手机上打开特定的地震应用程序, 地震可在几分钟之内被识别为应用程序的集中活动。智能手机内部记录加速度的 MEMS 传感器也已被证明能够检测地震。

MyShake 由加利福尼亚大学伯克利分校于 2016 年发起, 是一项全民

科学项目。其旨在建立可用于研究的全球智能手机地震网络，最终有助于减轻地震危害。现在，在启动 2 年后，已经有 40000 部手机安装了该应用程序，并且在任何一天中，大约有 7000 部手机提供数据。MyShake 的核心是内置在手机应用程序中的人工神经网络，该网络经过训练可以识别类似地震的运动并将其与人类日常运动区分开，并且提供了一系列支持地震确认和估计的机器学习模型。每当手机检测到类似地震的移动时，带有触发位置、时间和震级的实时消息就会发送到服务器，以进行地震预警。同时，在手机上存储了一个 5min 的三分量加速度数据段，然后将其上传到 MyShake 服务器，在手机接通电源和 Wi-Fi 时进行分析。时间序列在检测到触发之前的 1min 开始，并在触发后持续 4min。来自 MyShake 用户的实时触发数据分析表明，可以使用智能手机完成地震预警，波形数据还可以潜在地用于监视建筑物的结构健康状态。此外，使用 MyShake 序列，系统可以潜在地检测微震并监视市区的噪声。

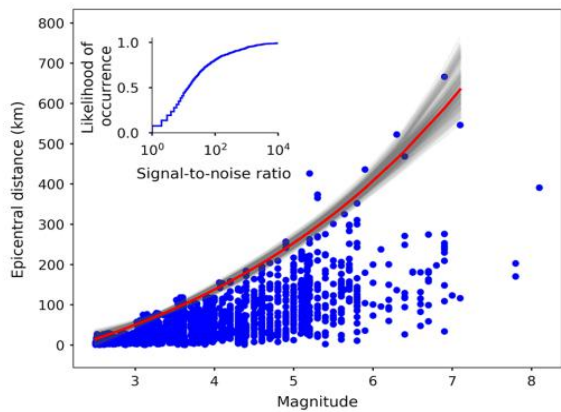


图 1 所有 MyShake 地震波形记录的震中距离与震级的关系

研究者中，研究者通过挖掘迄今记录在档案的波形来探索 MyShake 智能手机地震网络的功能。将这些数据与全球地震目录进行比较，探索了智能手机网络的检测能力，并采用最小二乘回归法对每个强度等级中最远记

录的解析表达式进行拟合，得出了地震震级与以千米为单位的可以检测的距离函数关系，进而探索 MyShake 网络的敏感性。然后，研究者着重于地震波形具有良好方位角覆盖的事件，采用 Hypoinverse 程序 (Klein, 2002) 和 Bakun 和 Joyner (1984) 的震级关系来确定地震参数，展示了 MyShake 手机记录的波形如何用于估算基本地震参数，包括位置、开始时间、深度和地震强度。

目前，将智能手机用作全球地震网络仍然是一个相对较新的概念，是要全面了解此类网络的功能，仍然有许多挑战需要探索：①首先，当前数据处理的许多元素仍涉及人机交互，地震学家需要检查波形以确认它们是有用地震记录，并手动选择 P 波和 S 波到达，为了建立一个功能全面的全球地震网络，所有这些步骤都需要自动化；②其次，改善位置、开始时间和震级的估算需要更好地权衡和改善波形数据质量；③最后，MyShake 项目的公民科学性质给地震网络的运行带来了固有的挑战。智能手机网络的配置和密度在不断变化、夜间的检测能力比白天要强得多。MyShake 用户将倾向于聚集在人口集中的大城市，当在人口中心以外的地方检测到地震时，所覆盖的站点只有狭窄的方位角覆盖范围，会出现较大的误差，值得探索的一种可能解决方案是结合传统地震台站的信息或使用永久性低成本传感器来补充网络。

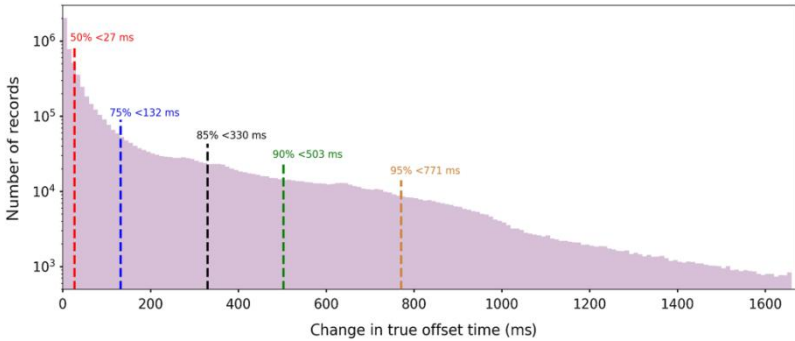


图 2 MyShake 波形和触发时间戳的准确性

整体而言，作为全球智能手机地震网络，MyShake 现在已经运行了好几年。尽管在手机上运行 MyShake 的人员的量一直保持不变，但在任何给定时间，全球用户数量已稳定在 40000 左右。该网络记录了有用的地震波形，可用于数百次地震，震级范围从小于 2 级到 7.8 级，从地表直到 350km 深处。MyShake 用户记录的地震波形表明，MyShake 手机可以触发并检测出 50km 范围的 3 级地震，250km 范围的 5 级地震，500km 范围的 7 级地震。

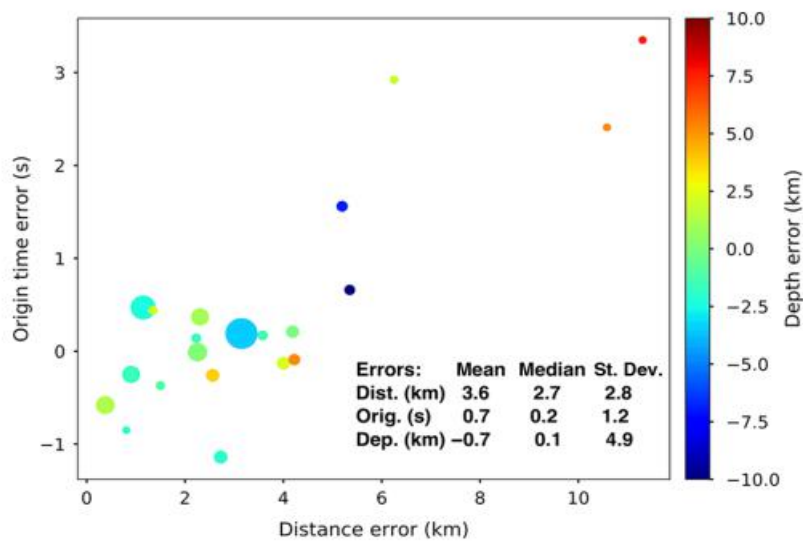


图 3 具有良好方位角覆盖和至少四个相位拾取的 21 个事件的距离、发震时间和深度误差，以及所有误差的平均值，中位数和标准偏差位置和时间信息的准确性决定了数据的科学用途，采样的全球数据集中有 50% 的时间戳的精度优于 0.03s。根据对建筑物内电话的有限测试，50% 的位置在水平距离 14m 内和垂直距离 4m 以内。这使其可以被用于估计相关记录的来源，如来自哪个建筑，哪层楼。

将标准的区域地震网络技术应用于 MyShake 数据，可以确定 MyShake 表征事件的能力。使用一组 21 个事件，其中有四个或更多个 P 波或 S 波，最大方位角间隙 $<180^{\circ}$ 。研究发现，中间位置、深度和开始时间误差分别为 2.7km、0.1km 和 0.2s。震级误差的平均值和标准偏差分别为 0.0 和 0.2。当地震发生在市区下方时，位置误差较小。

这些初步结果表明，通过提供更多数据来检测地震和限制震源特征，MyShake 网络有可能为地震学做出贡献。特别是在传统地震台站很少但人

口稠密的地区，MyShake 可以提供有价值的数据来控制地震危害。虽然有许多挑战和局限性需要解决和克服，但是 MyShake 这样的网络可以增强人们更好地了解全球地震和灾害的能力，以及在這些地震发生的地方与公众建立互动的能力。

来源：Kong Q, Patel S, Inbal A, et al. Assessing the sensitivity and accuracy of the MyShake smartphone seismic network to detect and characterize earthquakes. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(5): 1937-1949.

从缓慢到快速的控制型实验室地震

一些断层缓慢而且无声地滑动，而其他断层则被锁定，然后以突然的方式自发滑动。关于慢速滑移和快速滑移是不同的过程，还是自然界中的连续断层滑动模式，一直存在争论。最近的实验室观察表明，单个断层可以在两种模式和某些中等速度下滑动，从而形成了从慢到快的地震谱。研究者通过装载一个包含锯齿状模拟断层的 3m 花岗岩板，产生了滑移地震，这些滑移地震在到达样品末端之前自发地成核、传播和停止。这项工作表明，在同一断层面上可能同时发生缓慢（0.07mm/s 的滑动速度）和快速（100mm/s）的滑动地震。研究者还提出了时域和频域上辐射地震波的系统变化。慢地震的持续时间为 100ms（毫秒），辐射震颤状的信号叠加在地震动的低频分量上。它们通常先出现缓慢滑动（蠕变），并且地震辐射具有 ω^{-1} 频谱形状，类似于自然界中观察到的缓慢地震。最快的地震具有与典型的 M2.5 地震相似的滑移速度、应力降和地震视应力（分别为 0.2m/s, 0.4MPa 和 1.2kPa），并且在高频处出现单个拐角频率和 ω^{-2} 频谱衰减，非常适合 Brune 地震震源模型。慢速和快速地震间的间隙被一些中间的地震填充，其震源谱在拐角频率附近被耗尽。这项工作表明，由于 p/h^* 的微小变化，具有有利于破裂条件的长度为 p 的断层可以以很不同的方式辐射。相关成果发表于 2019 年 10 月的 Journal of Geophysical Research: Solid Earth。

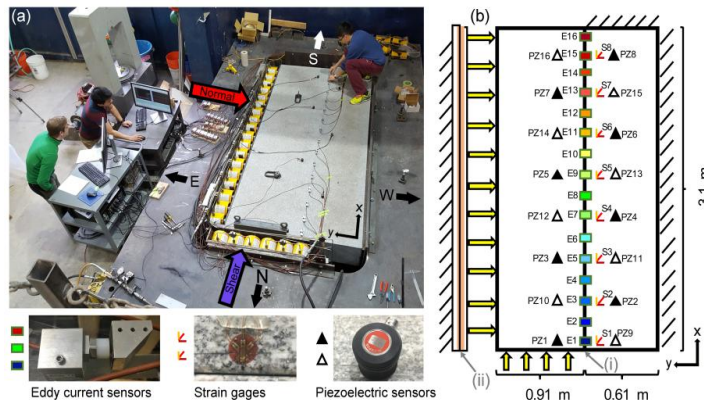


图 1 (a) 带注释的照片以及 (b) 样品和设备示意图

自从 Brace 和 Byerlee (1966) 首次提出将粘滑摩擦不稳定性作为地壳地震的一种机制以来, 实验室实验就开始探索摩擦特性、破裂动力学和地震成核等主题。在实验室实验中, 断层稳定性由与临界刚度(critical stiffness) k_c 和与临界成核长度 h^* 有关的加载系统刚度 k 以及样品长度 l 控制。当 $k > k_c$ 时, 实验室样品将稳定滑动; 当 $k < k_c$ 时, 会发生两种类型的粘滑; 当 $l/h^* \ll 1$ 时, 样品像刚性块一样滑动并均匀加速; 当 $l/h^* \gg 1$ 时, 从缓慢滑移到快速滑移的过渡通常被模拟为扩张的剪切破裂。在此模型中, 断层上 h^* 大小区域内的局部缓慢无震滑动发生在快速地震滑移开始之前, 即所谓的成核过程。

在过去的 20 年中, 连续 GPS 记录系统以及高灵敏度井眼地震仪和应变仪的发展得以观测到一系列缓慢的地震。在日本和卡斯卡迪亚定期发现的深部震颤和慢滑地震 (SSE), 促使 Rogers 和 Dragert (2003) 认识到它们的联系, 并命名为幕式震颤和滑移 (ETS) 现象。慢地震族的其他成员包括低频地震 (LFE)、超低频 (VLF) 地震和无声地震。雪莉等表明构造性震颤是一群低频地震。所有这些地震都与板块界面上的滑动有关, 但是相对于标准地震, 它们的应力降较低, 并且在预期会于不稳定和稳定摩擦特性之间发生过渡的区域中, 引起发震区的倾角下降或倾角上升。

最近的实验室实验已经探索了稳定行为与不稳定行为之间的过渡, 以探究慢速地震的机理。当机器的负载刚度达到临界刚度时或样品长度接近临界成核长度时, 实验室中发生了缓慢的地震。在后者中, 当成核滑动事件在破裂到达样品末端之前没有加速到完全地震的速度并且不能进一步传播时, 产生了滑移事件。

研究者设计了一个 $l > h^*$ 的 3m 双轴直剪岩石摩擦机。除了传统的“完全破裂”粘滑地震外, 它还产生了控制型破裂地震, 这些破裂地震在样品内成核并在到达样品末端之前停止。据现在所知, 除了通过孔隙流体注入外,

没有其他岩石摩擦装置能够产生控制的破裂地震。控制型地震是通过指定的加载过程生成的地震，该加载过程沿 3m 断层产生了不同的应力状态。断层必须包含一段长度为 p 的块，其应力条件有利于破裂的传播，而在长度 p 之外，由于不利的应力条件，破裂会迅速终止。仅当 $h^* < p < l$ 时，才会发生动态滑动地震。而在模拟断层上，控制型地震提供了独特的机会来研究实验室地震的震源参数（弯矩、应力降和辐射能）。

在这项研究中，研究者首先描述了实验材料和装置、典型的加载顺序以及如何根据滑移的空间分布和最大滑移率对地震进行分类。然后，介绍分析方法，主要分析参数为弯矩、震源谱、和静态应力降。通过局部断层滑移测量的大地测量和地震辐射波谱两个方面来确定控制型地震的弯矩和应力降。接着，提供了从缓慢到快速地震的示例，并说明了它们的起始过程、地面运动和频谱形状的系统变化。最后，研究者提供一个模型来解释其变化背后的机理，并比较自然界中观察到的实验室地震。

通过在大型岩石样本上建立非均匀应力分布，研究者生成了控制型滑移事件，这些滑移事件在到达 3m 岩石的末端之前会形核、传播和停止。在许多方面，这些事件比在整个样本中破裂的标准“粘滑”事件更接近自然地震。它们的动力特性是由岩石的弹性特性和模拟断层的摩擦特性来控制的，而不是由装载机控制的。

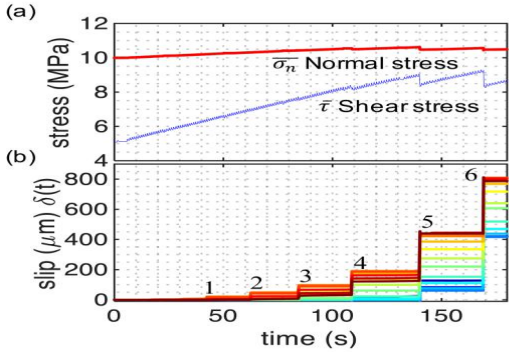


图2 实验中的加载过程和滑动时程。(a) 由液压产生的样品平均法向应力和剪切应力；
(b) 从涡流传感器 (E1-E16) 记录的滑移时程

研究者测量了控制型滑移事件期间发生的滑移的空间分布，以便估算其弯矩和静应力降。之后，将这些量与同时从测量地面运动的辐射波谱得出的力矩和应力降估算值进行比较。对于生成的最强最快的 $D_{max} \approx 0.1\text{m/s}$ 的控制型事件，对震源特性的地震和大地测量估计进行了比较：这些事件的 $\Delta\sigma = 0.4\text{MPa}$ ，震源谱与标准 M2.5 地震一致。此外，研究者发现滑移速度和应力降遵循 Brune (1970) 提出的 $\Delta\sigma = \mu D_{max} / 2\beta$ 。对于较慢事件 ($< 10\text{mm/s}$)，与 Brune 的尺度不一致，并且应力下降和源持时类似于低频地震。缓慢事件辐射波的频谱在拐角频率附近被耗尽，这将它们的辐射能量降低为微弱的信号，使人联想起有时伴随自然地震的震颤状信号。由于研究者生成了快速到缓慢事件的频谱，因此研究者的工作支持这样的思想，即快地震和慢地震不是不同的机械过程，而是在一个频谱上。

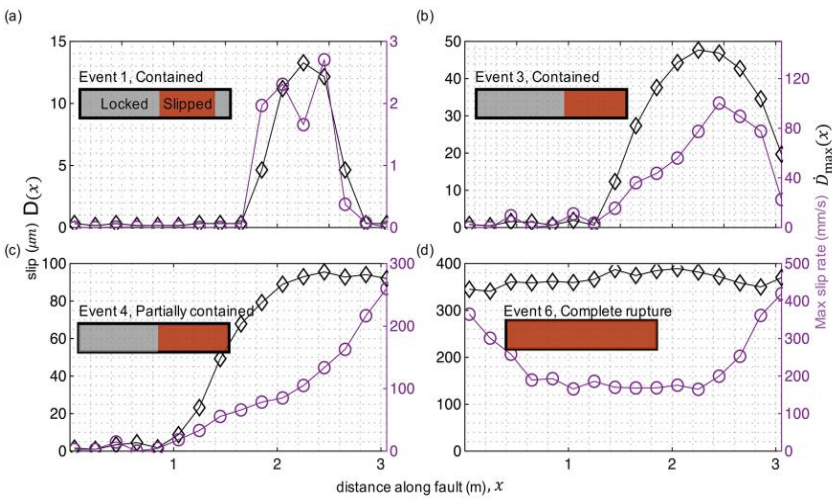


图3 根据 $D(x)$ (菱形) 和 $D_{max}(x)$ (圆形)，可以分为三种实验室地震。(a) 控制型事件，(b) 控制型事件，(c) 部分控制型事件，以及 (d) 完全破裂

仅当沿断层的应力状态足够不均匀，可支持一个有利于破裂（长度为 p ）的断层条件时，控制型实验室地震才发生，同时，该断层被不利于破裂扩展的断层所包围。连续的滑动事件起到平滑非均匀应力分布的作用，

并为沿断层全长传播的破裂开辟了道路。为了使所含事件接近地震速度 ($D_{max} \approx 0.1 \text{m/s}$)，长度为 p 的有利破裂块必须比临界成核长度尺度 h^* 大 5 倍左右。研究者发现，比率 p/h^* 对滑移事件的速度（以及因此的 $\Delta\sigma$ 和辐射能）有很大的影响。这项研究以及最近的其他工作表明，由于负载扰动， h^* 可能会有很大变化。因此，长度为 p 的单个断层面可能由于的载荷相关变化而强烈或较弱地辐射。如果适用于自然断层，这种机制可能有助于解释震颤辐射令人困惑的行为。

来源：Wu B S. & McLaskey G C. Contained Laboratory Earthquakes Ranging from Slow to Fast. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019.

地震和卡斯卡迪亚慢滑移事件之间的相似关系

断层不仅可以在地震期间发生幕式滑移，也可以在瞬时的无震滑移期间发生滑移，后者常被称为慢滑移事件。之前基于不同构造环境的观察研究表明，慢滑移事件的地震矩与它们的持续时间呈线性相关，而地震的地震矩与它们的持续时间呈立方相关。这一发现驱动人们去解开这种差异出现的原因。基于 2007—2017 年间卡斯卡迪亚大型逆冲断裂的慢滑移事件目录，研究人员发现慢滑移事件的地震矩和持续时间更接近立方关系。像常规的地震一样，慢滑移事件的地震矩与破裂面积 $A^{3/2}$ 呈正相关，并且频率和震级之间遵循 Gutenberg-Richter 关系。最后，慢滑移事件表现出与地震破裂相似的脉冲式破裂。慢滑移事件的性质与常规地震非常相似，暗示它们可能受到相似的动力性质的控制。相关研究成果于 2019 年 10 月发表在 Nature。

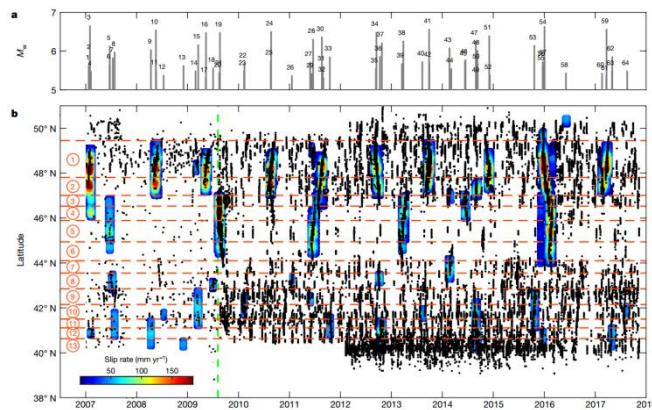


图 1 慢滑移事件的时空分布和分段

通过利用大地测量检测很多俯冲带的应变积累和释放已经表明，沿着大型的逆冲断裂发生了幕式的慢滑移事件。这些慢滑移事件常伴随着震颤的发生。对很多俯冲带的研究表明，慢滑移事件的地震矩 M_0 和持续时间 T 遵循 $M_0 \propto T$ ，而地震遵循 $M_0 \propto T^3$ ，它们的滑移模式完全不同。立方关系被认为是具有恒定应力降的圆形破裂以恒定的速率扩展形成的，而这种圆形的动态破裂模型常与地震破裂匹配良好。对于跨越整个地震带沿倾角宽度

的较大有界破裂，地震矩和持续时间关系会过渡到 $M_0 \propto T$ 。这种转换通过地震目录是很难发现的。相比之下，仅大的慢滑移事件可以通过大地测量技术检测到，并且他们通常表现为拉长的而非圆形的滑移区域，由此表明是一种有边界的破裂。这种想法暗示着常规地震和慢滑移事件之间的差别是由于地震目录主要是无边界的破裂，而慢滑移事件是有边界的破裂。另一种观点认为，这种差异反映了不同的动力学过程。

在该研究中，研究人员利用了最近卡斯卡迪亚慢滑移事件的目录。在从时间序列中通过 SSE 提取了长期趋势平均值，从中推导了代表板界面锁定程度的耦合模式之后，校正了流体效应以及同震和震后变形的数据。这些被校正的时间序列被用来反映沿着大型逆冲断裂滑移模式的时空变化。在整个大型逆冲断裂上，通过滑移模式提取了 64 个慢滑移事件，类似于之前的研究，它们都伴随着震颤现象。单独的时间表现为单向的或双向的破裂，破裂速度在 5.5~11km/d 之间。较大的慢滑移事件表现为与地震相似的脉冲式破裂，但是具有非常低的扩展和滑移速率。图 1 展示了慢滑移事件的分布，类似于之前的研究，它们分布在弧前地幔和逆冲断裂相交的位置，并被更浅部的锁定域分隔。

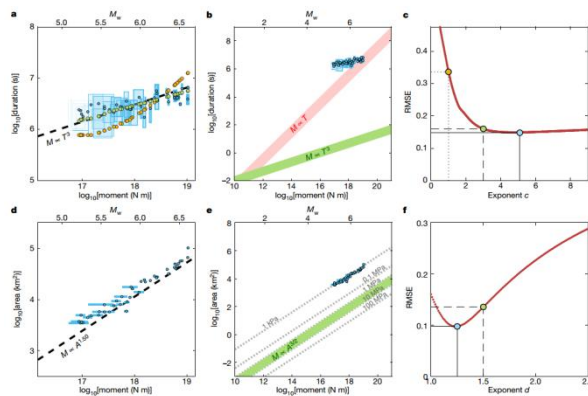


图 2 地震矩-持续时间、地震矩-破裂面积关系

在该研究中地震矩和持续时间更接近于与地震类似的 $M_0 \propto T^3$ 关系。但是，此数据集存在偏差，因为对时间序列应用了截止时间约为 30 天的

低通时间滤波器。为了完善分析并减轻自动选择 SSE 的起点和终点所引入偏差的可能性，使用时间序列进行了手动测量，并以较短的截止时间（约 9 天）进行了过滤。为谨慎起见，删除了 17 个可疑的事件，并且由于时间和空间的紧密性，合并了 7 对事件。最终修订目录包括 40 个事件。

对于每个事件，估计最小和最大持续时间，并找到与原始目录相同的趋势。接下来，考虑到持续时间和幅度的不确定性以及滤波器的影响，使用修改后的数据集搜索最适合的比例关系。 $c=3$ 的关系指数 ($M_0 \propto T^c$) 的均方根误差 (RMSE) 约为 $c=1$ 所得值的一半，而对于 $c \geq 3$ 则变化不大。根据滑动模型，使用来自震颤爆发的 SSE 持续时间估算值和相关的力矩释放。在此情况下，不需要滤波器校正。结果证实， $M_0 \propto T^3$ 比线性比例更有可能，RMSE 降低约 68%。研究人员得出的结论是，SSE 在狭窄的条件范围内发生，就像这里分析的卡斯卡迪亚的深部 SSE 一样，遵循近似立方矩的持续时间关系，就像常规地震的比例关系一样。由于目录中的大多数 SSE 都使幕式慢滑移带的整个宽度破裂，因此轴比比较大，这一发现更加令人意外。它们将遵循线性比例关系，但值得注意的是，尽管通常认为常规地震的立方比例关系反映了自相似性，并且基于圆形裂缝模型是合理的，但在本数据集中却观察到了相同的比例关系，其中大多数破裂是拉长的，且纵横比大，在 2~12 之间。

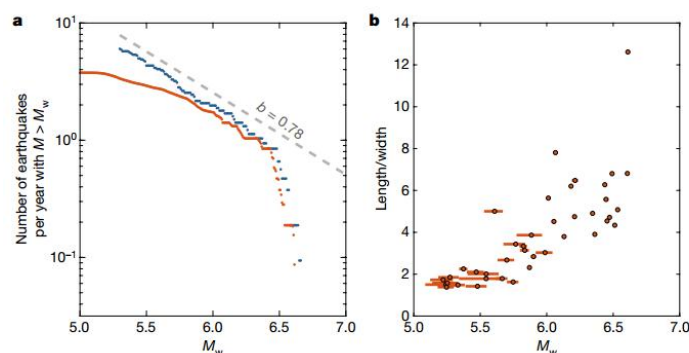


图 3 频率-震级分布、卡斯卡迪亚慢滑移事件的轴比

地震矩与破裂区域之间的严格比例关系，大致遵循常规地震 $M_0 \propto A^{3/2}$ 的比例关系。然而，基于通常用于量化地震破裂的相同圆形破裂模型，比值 $M_0 \propto A^{3/2}$ 小三个数量级，这意味着应力降约为 $4.3 \pm 2.0 \text{ kPa}$ ，而常规地震为 $1 \sim 10 \text{ MPa}$ 。但是，由于破裂区域相当长，这种对平均应力下降的估计值得怀疑。因此，研究者使用 Noda 等人（2013）的方法基于滑动模型估算了每个 SSE 的平均应力降，并使用 Meade（2007）的三角形子断层分析解决方案。应力降的值范围在 $0.9 \sim 18.0 \text{ kPa}$ 之间，平均值约为 5.8 kPa ，标准偏差为 2.0 kPa 。基于 1998—2008 年之间，16 个 M_w 在 $6.2 \sim 6.7$ 范围内的 16 个事件的滑动模型，平均应力降大约比 Schmidt 和 Gao（2010）提出的值低 10 倍。因为滑动分布相似，研究人员怀疑这种差异是 Schmidt 和 Gao 测量破裂面积的方式。事实上，滑动模型未考虑在 SSE 期间平衡地震载荷所需的滑动，以及滑动模型在空间上的平滑，因为反演的正则化更强。

研究人员还检查了 SSE 的频率-震级之间的关系。修订目录中的数据选择会导致较低幅度的翻转，但无论如何 SSE 近似显示出 M_w 和 b 值（地震大小的平均分布）具有线性相关。大于 $M_w=6.4$ 的事件频率突然下降表明出现了截断效应。截断不能用从无界破裂到有界破裂的过渡来解释，因为在给定破裂的长宽比的情况下，这种转变发生的震级要小得多， $M_w \approx 5.7$ 。由于只有 11 个事件的 $M_w > 6.4$ ，因此应谨慎考虑此观察结果。先前的研究也认为，SSE 遵循 Gutenberg-Richter 定律，但使用了从持续时间推断出的地震矩，并假设地震矩和持续时间之间呈线性比例关系。尽管比例关系假设可能不正确，但结论似乎成立。

累积滑动分布和子断层滑动的次数，定义了 13 个分段，分段 1 和 2 是非常强耦合的。除 2014 年 7 月仅限于第 2 段的破裂外，它们大部分一起破裂。2014 年第 7 段与第 6 段和第 8 段一起破裂，但从未单独发生破裂。

卡斯卡迪亚 SSE 带的分段已经引起注意，在日本也观察到类似的分段。从本质上讲，这种分段与常规逆冲断裂地震定义的分段相似。

总之，Ide 等人 (2007) 提出的 $M_0 \propto T$ 的比例关系可能是由于在不同条件下发生的 SSE 引起的。针对卡斯卡迪亚 SSE 的特殊情况，在类似条件下的 SSE 的任何子集都会产生立方比例关系。因此，在卡斯卡迪亚俯冲带上，SSE 沿着地震的分段、频率-震级分布和比例关系与常规地震非常相似。单个事件的脉冲状传播看起来也非常类似于墨西哥俯冲背景下大型 SSE 的地震破裂。研究人员推断，控制地震 SSE 的动力学与控制地震破裂的动力学并没有很大的不同，这是一个令人惊讶的结果，因为地震破裂通常被认为是由惯性效应控制的，这是解释辐射地震波所必需的。出乎意料的是，研究者的结果要求重新检查 $M_0 \propto A^{3/2}$ 关系的原因，因为似乎至少在 SSE 中，基于自相似性和圆形破裂模型的解释不成立。可能需要重新检查几何边界对常规地震和 SSE 的比例关系的影响。SSE 和常规地震的相似比例关系表明，SSE 在开发和测试难以从常规地震观察中约束的地震序列动态模型方面可能是有用的，特别是考虑到大地震的长返回期。

来源：Michel S, Gualandi A. & Avouac J P. Similar scaling laws for earthquakes and Cascadia slow-slip events. *Nature*, 2019, 574(7779): 522-526.

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