

地震科技前沿快报

2021 年第 1 期（月刊总第 25 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、地震信息的需求变化与应对
- 2、通过逆冲断裂地震实验探究动态摩擦的物理机制
- 3、公民科学家可帮助识别地震

地震信息的需求变化与应对

美国地质调查局（USGS）地震灾害计划（EHP）已经成功地完成了通过网络应用程序和其他方法及时提供地震信息的任务。一个月的地震数据传输可满足 36 亿次的数据请求，包括 710 万用户的 2900 万次页面浏览量，6.06 亿次自动化数据流（Feeds）和 4500 万次目录下载。然而，在一些关键时刻，包括 2019 年的里奇克雷斯特（Ridgecrest）地震，在传输过程中也出现了一些挑战和失误。USGS 地质灾害科学中心的研究人员深入分析了实时信息需求的变化，以及在日益移动化的世界中支持更多用户的技术。相关成果发表在 2020 年 9 月的 *Seismological Research Letters* 上。

2019 年 10 月 15 日，旧金山湾东边的一个小城市即加利福尼亚州普莱森特希尔（Pleasant Hill）附近发生一次地震。虽然地震只有 4.5 级，没有

造成重大损失和人员伤亡。就公共安全而言，地震无关紧要。然而，整个旧金山湾区和加州北部地区对地震有浓厚兴趣的公众都有明显震感。受到地震的惊吓，人们立即转向手机、平板电脑和电脑获取更多信息。在地面震动最初的几秒钟内，USGS 的实时地震网页被成千上万的、关于地震信息请求淹没。USGS 服务器的峰值需求达到了每秒超过 68000 个请求。大约有 74000 人在网上通过“你感觉到了吗？”（DYFI）公民科学门户网站向 USGS 报告了他们的地震经历，这些信息补充了来自湾区数百个地震台站的数据。

这次毫不起眼的地震产生了对即时信息的巨大需求。同样值得注意的是，满足了这一需求的 IT 基础设施已然存在，其可生成多种地震信息的产品，并无间断地更新和传递。所以，DYFI 能够跟上这股热潮，成功地接受了几近 100% 的申请。2019 年 10 月在加州推出的新的 ShakeAlert 地震预警系统也表现良好，其在 Pleasant Hill 地震 5.6 s 前发布了正确震级的地震预警，附近的在奥克兰和旧金山获得的地震预警时间分别为 2.3 s 和 5.5 s。

Pleasant Hill 地震数据传输的成功是多年努力的结果，满足了对实时地震信息需求的成倍增长，而这一直是美 USGS 面临的挑战。由于地震在本质上是不可预测的，在地震活跃地区，人们对个人和家庭安全的集体焦虑中，地震占据了很大一部分。信息和警报为生活在迫在眉睫的危险中的人们提供了不同程度的安全感，因此，其是高度宝贵的商品。USGS 国家地震信息中心提供 24×7 的响应能力。对于每个定位的地震，几个态势感知产品将通过自动化的网络服务（应用程序接口，APIs）生成和分发，并都在网上的“活动页面”上提供。USGS 的事件页面提供了十多种不同的态势感知产品，包括交互式地图、死亡和经济损失估计、余震预测和震源参数的技术数据。从这些产品中，人们可以快速判断地震的重要性的影响，

这使得他们通常能在地面停止晃动时先保持镇静。

因此，USGS 每个月都会收到数以百万计的请求，要求提供与地震事件相关的网页信息（按页面浏览量计算）和地震目录下载，以及超过 10 亿的自动数据传输请求。所有在 USGS 地震网页上显示的信息都是通过地震源和 APIs 提供的，并在 ANSS 的综合地震目录（ComCat）存档。这是数据优先方法的一部分，以确保地震数据可查找、可访问、可互操作和可重复使用，同时，确保第三方能够访问并在此基础上进行拓展。为了与更广泛的地震学团体协作，USGS 使用了他们的现有标准，如国际数字地震台网(FDSN)的事件 webservice 规范和 QuakeML 格式。当标准不存在时，USGS 会寻找广泛使用的替代品，如地理 JavaScript 对象符号和 Keyhole 标记语言（用于地理空间信息的数据格式）。所提供的信息流和 API 是以事件为中心的数据系统（在 USGS 内外部交换、编目和处理地震与其他信息）的公众可见部分，此外，该软件还被用于发布计划和培训的事件场景。

地震给数字产品和数据传输系统带来了一个独特的问题。由于地震波传播和地震定位需要时间，人口稠密地区对地震事件的需求激增甚至可能在地震事件页面生成之前就开始了。城市地震，尤其是发生在人口稠密地区的地震，会产生巨大的流量拥堵，这一点在加利福尼亚州 Pleasant Hill 地震中得到了清楚的证明。

USGS 第一次经历互联网流量高峰是在 2001 年 2 月 28 日对华盛顿尼斯阔利(Nisqually)地震的反应。这次 6.8 级的地震发生在奥林匹亚(Olympia)东北部普吉特湾（Puget Sound）南部的西雅图附近，但俄勒冈州、华盛顿州、爱达荷州和加拿大都有震感。在地震发生后 2 分钟，网络流量开始激增，对华盛顿大学网站请求峰值达到了 400 次/s，对 USGS 地震灾害计划（EHP）网站的请求峰值达到 1000 次/s。这两个系统在达到峰值之前就已

经饱和，所以关闭了几个小时。因此，媒体、公众甚至 USGS 工作人员都无法及时获得他们所需要的地震信息。2001 年地震后，USGS 实施了几项纠正措施来解决已发现的问题，其中最重要的是采用内容分发网络(CDN)。自 2001 年以来，USGS 的国家地震信息中心 (NEIC) 对一系列令人印象深刻的灾难性地震做出了反应。

在所有这些情况下，互联网流量在地震发生后立即飙升，因为国际社会向 USGS 寻求有关地震的信息。虽然网络反应的特征保持不变，但激增的程度取决于一些因素，如死亡人数、靠近受地震影响的主要人口中心的距离，以及外国对地震的兴趣（寻求对游客的影响、对远在海外的家人的影响、对全球经济的影响等）。对于所有这些事件和许多更小的地震，为应对 2001 年的 Nisqually 地震而实施的修订被证明足以处理激增的内容请求量级。

然而，2017 年，随着需求持续增长，情况开始发生变化。研究人员简要分析了需求激增的几个案例后发现，虽然 USGS 在过去的 2 年里在提高网站性能方面取得了长足的进步，但在满足用户未来的需求方面还有很长的路要走。

估计可能事件的峰值流量一点也不简单，这些事件既可能是震级 9.0 的卡斯卡迪亚俯冲带地震，也可能是震级 7.0 的海沃德 (Hayward) 地震，或者是完全出乎意料的事件。首先，由于大地震很少发生，几乎没有数据来估计峰值和总需求。因此，对重大但较常见的事件——规模较小但引起公众极大兴趣且发生频率高的事件，进行需求估计非常容易。目前，能够从系统调优事件中优化配置并衡量改进情况，这将提高绩效表现，但在难以预料的最坏情况下仍然可能无法满足需求。

同时，开发新的地震信息传递方法将有助于重塑对日益增长的需求的

反应。例如，很大一部分基础流量来自用户反复请求数据以查明地震是否发生。为用户提供更新通知的解决方案，以及向用户推送新事件的方法，有望降低整个站点的流量和系统运营成本。其次，利用流行的社交媒体平台发布信息也是一种选择。最近，云计算成为政府机构的一个选择，其为可靠性和可扩展性带来了新的机遇，同时，也带来了要掌握另一个技术学科所需面对的挑战。

来源：Leith W S, J M Fee, E M Martinez. & L A Lastowka. Now Trending... Earthquake Information, Seismological Research Letters, 2020, 91, 2900–2903.

通过逆冲断裂地震实验探究动态摩擦的物理机制

大的破坏性地震常沿着逆冲断裂传播。逆冲地震破裂与自由表面之间的不对称相互作用会导致突然的断层正应力变化，并影响断层的摩擦力。研究人员利用位移、颗粒速度和应力的全场测量来表征破裂与自由表面的相互作用，包括大的正应力降。利用这些测量数据分析动态摩擦对正应力瞬变的依赖性后发现，剪切摩擦阻力对正应力的变化表现出明显的滞后性，并确定了能够预测这种影响的摩擦公式。正确地考虑这种滞后性对模拟断层滑移，地表运动以及相关的海啸激发具有重要的意义。相关研究成果于 2020 年 9 月发表在 PNAS。

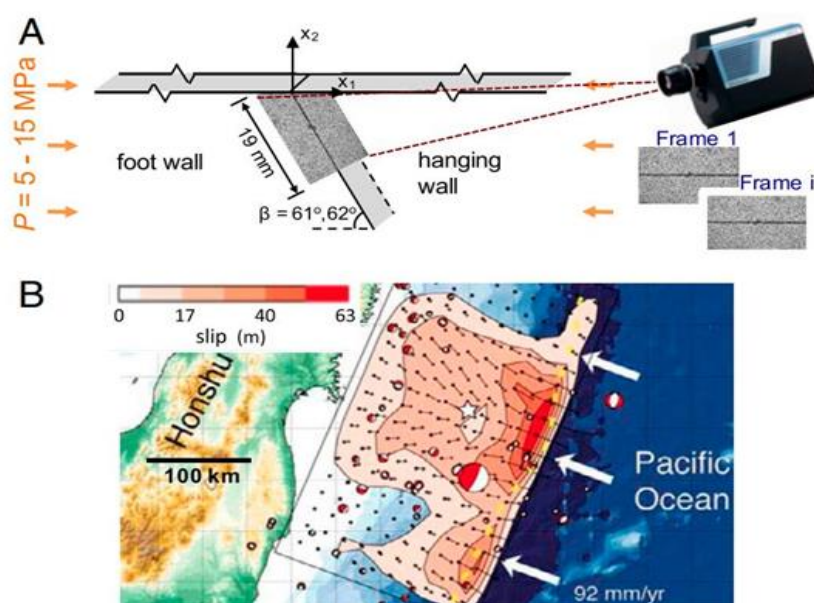


图 1 实验装置

很多大的破坏性海啸地震都沿着逆冲断裂发生，例如 2011 年 Mw9.0 东日本大地震，1999 年 Mw7.7 台湾集集地震。这两个地震一个重要的特征就是最大滑移发生在接近自由表面处，尽管断层的浅部被认为处于摩擦稳定状态。数值模拟和理论研究表明破裂和自由表面的相互影响会导致断

层正应力的突然变化，进而影响破裂过程。断层正应力控制了断层的摩擦剪切强度,而这一强度决定断层滑移有多远,以及多快。日本东北部 60~80m 的浅部滑移可能就是这种情况。传统上认为，摩擦力是正应力的函数，然而实验表明，摩擦力并不会随正应力的突然改变而发生变化，而是随着滑移逐渐改变。

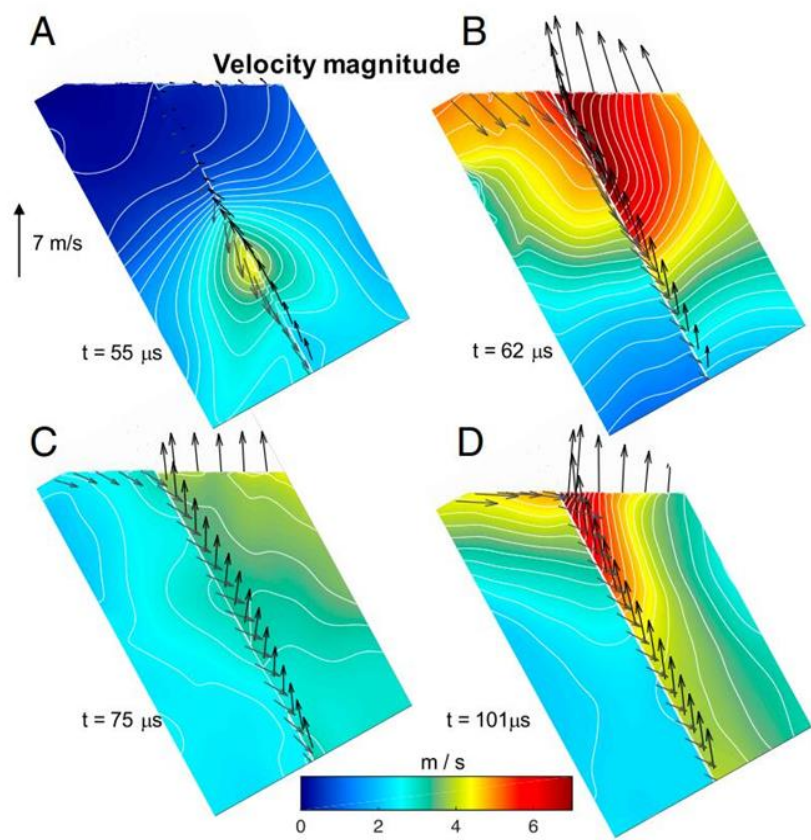


图 2 逆冲断裂实验与自由表面相互作用时的动力学

在实验室中，对自发性动态破裂成像的最新进展使研究人员能够成像和量化接近自由表面的正应力降，及其对与逆冲断裂地震相似的断层滑移的影响。研究人员报道并分析了模拟逆冲断裂地震的实验室地震测量结果，具体过程中采用了高速成像和数字成像结合的高分辨率成像技术，这一方法能够监测整个破裂过程。

动态破裂和自由表面的相互作用：实验生动的记录了逆冲破裂与自由表面的相互作用，同时，动态获取了所有需要约束断层正应力和摩擦力变化的定量信息。在一个典型的实验中，破裂在成核后 $55\ \mu\text{s}$ 以 $4\ \text{m/s}$ 的峰值颗粒速度接近自由表面。值得注意的是，在这一过程中速度图相对于断层线仍然是对称的。破裂传播的速度场显示出从破裂前缘前端垂直于断层的运动向后方平行于断层的运动转变。当破裂到达自由表面 ($t=62\ \mu\text{s}$)，速度场的对称性便被打破，峰值颗粒速度在上下盘分别增加到 8 和 $4.5\ \text{m/s}$ 。稍后 ($t=75\ \mu\text{s}$)，滑移以更小的速度继续进行。值得注意的是，上盘的移动多垂直于断层面，而下盘的移动多平行于断层面。当拖尾瑞利 (trailing Rayleigh) 信号到达自由表面时 ($t=101\ \mu\text{s}$)，下盘靠近自由表面部分几乎都是水平位移。当破裂传播超过可视范围 (FOV)，剪应力相对于断层表现出对称模式，正应力和平行于断层的速度表现出不对称样式。

靠近自由表面的应力和滑移速率随时间的演化：当破裂到达时 ($t=59\ \mu\text{s}$)，正应力从 $11.6\ \text{MPa}$ 增加到 $13.5\ \text{MPa}$ ，在 $11\ \mu\text{s}$ 之后下降到了 $8\ \text{MPa}$ 。当拖尾瑞利破裂到达时 ($t=102\ \mu\text{s}$)，正应力下降到 $5\ \text{MPa}$ 。剪切应力在超剪切到达时增加到 $7\ \text{MPa}$ ，在 $3\ \mu\text{s}$ 之后下降到了 $4\ \text{Mpa}$ 。在随后的阶段 ($t>70\ \mu\text{s}$)，剪应力变化很小。滑移速率显示，在超剪切破裂和拖尾瑞利破裂到达时分别达到 12 和 $8\ \text{m/s}$ 的峰值。

有趣的是，破裂过程后期超剪切转换引起了一个更强的近表破裂。一个具有相似加载环境，但具有更弱的成核过程的实验引起了更晚的超剪切转换，以及破裂到达表面的时间。由于更晚的转换实验 2 中的能量仍然被

拖尾瑞利信号携带，而不是超剪切破裂前缘。因此，破裂第一次到达自由表面时的峰值速度和正应力降低于实验 1。然而，由于超剪切被反射，并与到达的拖尾瑞利波相互作用，形成更强的拖尾瑞利波，峰值速度可达 16 m/s，正应力降到 2 MPa。

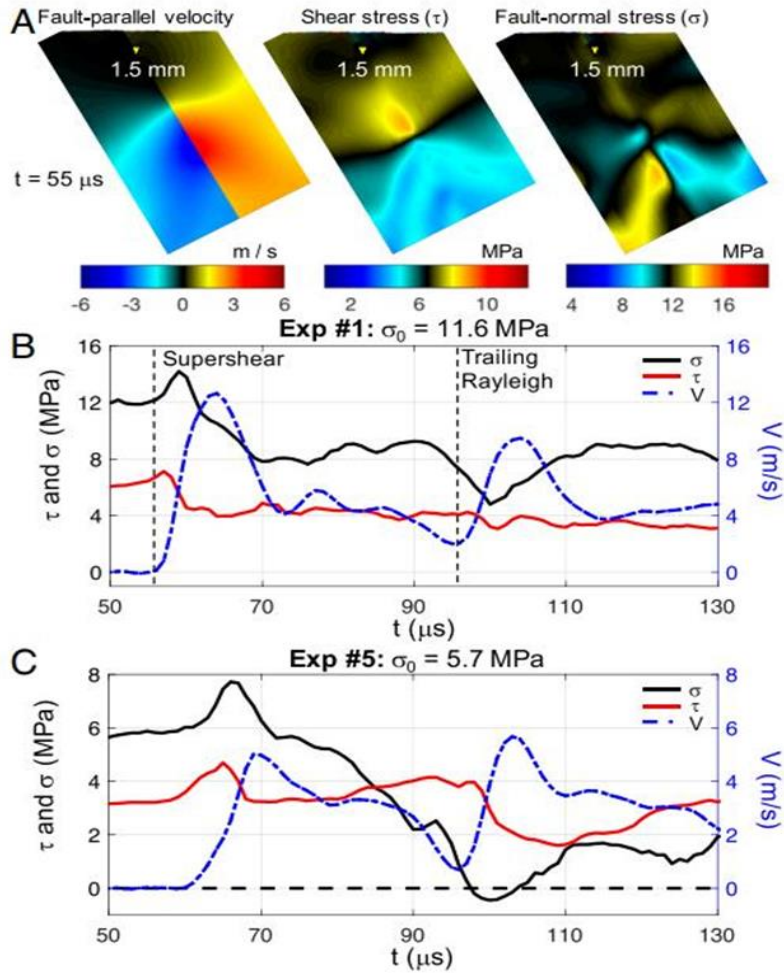


图 3 当破裂与自由表面相互作用时，平行于断裂的速度、正应力降和摩擦系数滞后

为了产生不同类型的破裂以及采集一套适合构建摩擦方程公式的数据，研究人员开展了一系列具有不同初始正应力的实验。在具有更低初始正应力的实验中，正应力在拖尾瑞利信号到达自由表面的短时间内就被完全释放。这表明，断层具有张开的潜力。然而，剪应力从未降至零，正应

力在随后也恢复到挤压值，表明断层可能并未真正的张开。

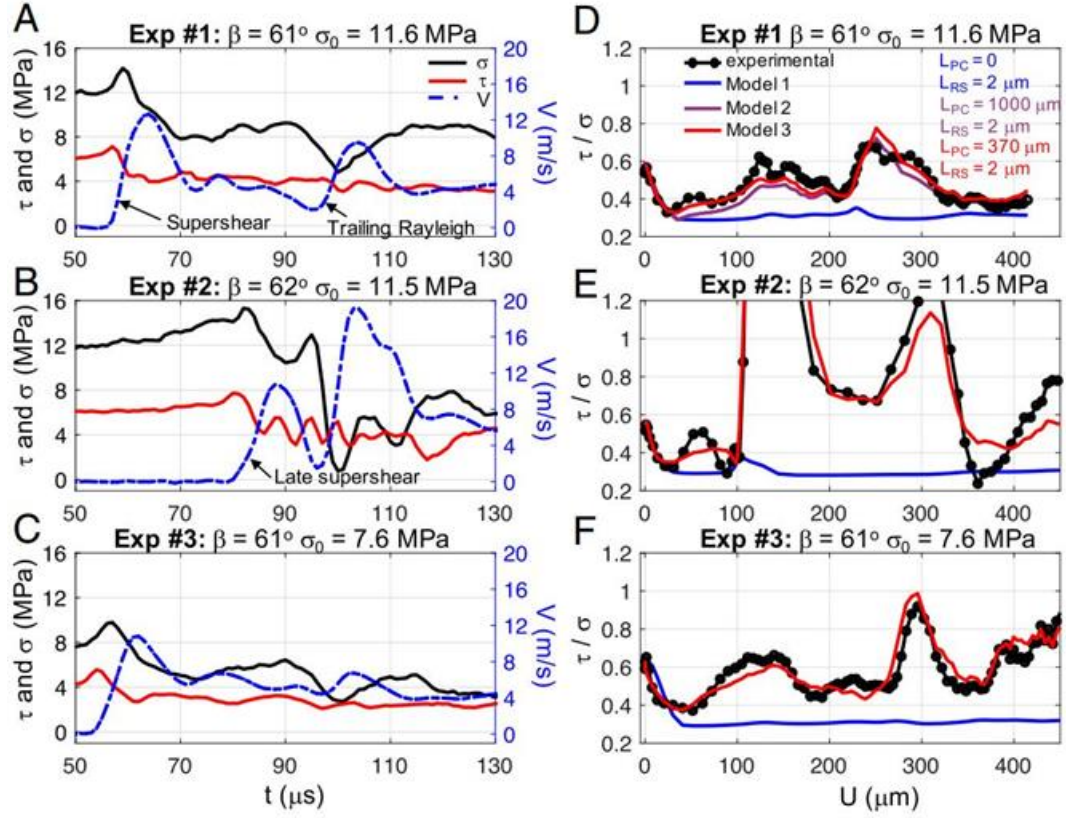


图 4 实验证据、拟合度以及预测结果

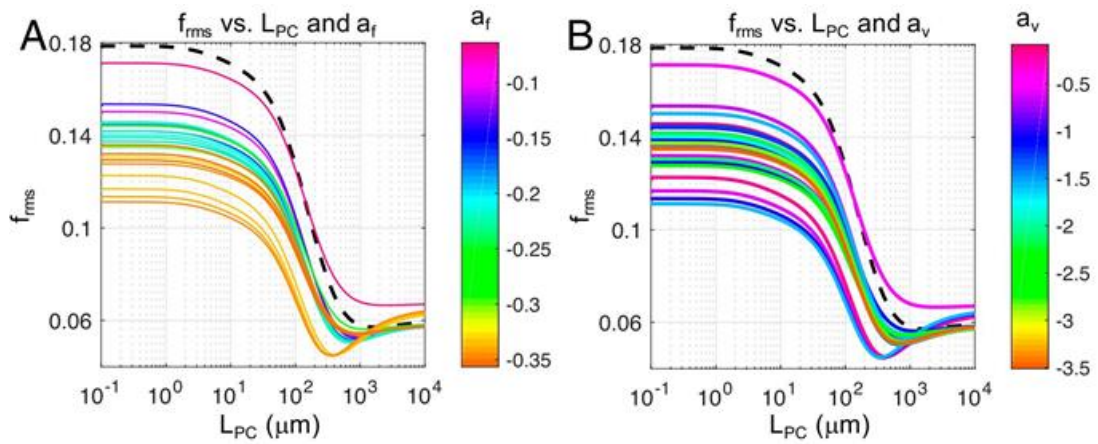


图 5 模型 1 与模型 3 的比较

快速正应力变化时的摩擦响应：实验表明，剪切阻力并不遵守传统的方程，而是会逐渐演化。这种滞后性被实验所证实。在实验 1 中，有效摩擦系数初始增加到 0.6，随后滑移 25 μm 之后降低到 0.35。当滑移达到 120 μm ，撞击破裂在自由表面被反射，应力增加，但摩擦阻力响应之后，摩擦系数又增加到 0.6。摩擦系数在更大的滑移中逐渐降低，但当拖尾瑞利波到达时，正应力突然增加，摩擦系数增加到 0.7，随后又降低到 0.4。

摩擦模型 1：在这一模型中研究人员检验了具有弱化增强但无滞后效应的速度-状态摩擦方程。假设摩擦阻力与正应力成正比：

$$\tau = f\sigma$$

之前的实验表明，摩擦系数符合：

$$f = f_w + \frac{\left[f^* + a \ln\left(\frac{V}{V^*}\right) + b \ln\left(\frac{V^*}{L_{RS}}\right) \right] - f_w}{1 + \frac{L_{RS}}{\theta V_w}}$$

$$\dot{\theta} = 1 - \frac{\theta V}{L_{RS}}$$

通过实验 1 数据的代入， $L_{RS}=2\mu\text{m}$ ，摩擦公式可以很好的拟合滑移小于 25 μm 时摩擦系数的减小。但是在更大的滑移量，当正应力减小时，由于未考虑滞后效应公式给出的值远低于实际值。

摩擦模型 2：为了考虑快速的正应力变化，研究人员根据 Prakash-Clifton（PC）定律检验了具有剪切应力滞后响应特征、弱化增强的速度-状态摩擦方程。

根据 PC 本构方程剪切阻力：

$$\tau = f\psi$$

$$\dot{\psi} = -\frac{V}{L_{PC}}(\psi - \sigma)$$

$$\psi^t = (\psi^{t-1} - \sigma^t) \exp\left(-\frac{V^t}{L_{PC}}t\right) + \sigma^t$$

这一方程与实验 1 结果很好的拟合。

摩擦模型 3: 这一模型提高了拟合度, 并与辉长岩的高速摩擦实验结果一致。

$$V_w = b_v \sigma^{av}$$

$$f_w = b_f \sigma^{af}$$

$$V_w = b_v \psi \sigma^{av}$$

$$f_w = b_f \psi \sigma^{af}$$

这一公式具有更好地拟合, 在 $LPC=370 \mu m$ 和 $LRS=2 \mu m$ 处获得最好的拟合, $af=-0.34$, $bf=85$ 。Fw 在 0.33 和 0.36 之间变化。均方根 (RMS) 从模型 1 的 0.18 到模型 2 的 0.06 变化到模型 3 的 0.045。通过模型 3, 并利用实验 1 的数据所得出的参数, 很好的模拟了其他实验。

这一研究清楚地表明, 实验中正应力和剪切阻力之间的滞后性, 对逆冲地震近自由表面动力学具有很好的指示意义。尤其是, 实验表明, 这一滞后性的演化距离比速度状态摩擦方程中的要大两到三个数量级。这一滞后对于其他包含快速正应力变化的震源问题具有重要意义。

来源: Yuval T, Vito R, Ares J R, et al. Illuminating the Physics of Dynamic Friction Through Laboratory Earthquakes On Thrust Faults, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117 (35): 21095-21100.

公民科学家可帮助识别地震

2020 年 8 月，前沿科学网（frontiers science news）发布消息称，一项新的研究表明，公民科学家可以帮助专业人士识别地震事件。公民不仅识别了地震，还集体掌握了识别地震的能力，而这在以前只能由专业的地震学家来完成。通过对地震大数据的人工分类，市民可以帮助科学家建立地震活动目录和地图，从而更好地了解地震。

目前，人类还无法预测地震，但通过对不同类型地震数据的分析，科学家们可以准确定位每一种地震的起源地和时间，从而更好地了解构造滑动可能以破坏性地震形式发生的时间、地点。世界各地数以万计的地震台站不断记录着当地的地震活动，其输出的数据远远超出了科学家们的处理能力。来自美国西北大学的研究人员召集了 2000 多名公民科学家，通过开放科学平台 Zooniverse 上的“地震侦探”（Earthquake Detective）程序，对地震记录进行基于人群的分析，并渲染成视听格式。结果表明，公民至少与机器学习一样准确，甚至可以识别构造震颤，而这在以前只有受过训练的专业人士才能做到。

在指导和实践结束后，每位公民科学家都被要求从阿拉斯加地震台站捕获的 2467 个记录中随机选择一个来听。聆听的同时，视觉轨迹显示在音频数据旁边。每个音频对应于 2013—2018 年间某次地震（世界各地发生的 30 次已知大地震中的一次）的面波估计到达每个台站后的前 2000 秒（加快 800 倍后，至可听频率）。当来自遥远地震的地震波到达一个地震活跃的地方，如阿拉斯加时，它可能会引发局部地震事件，如较小的地震或构造震颤——地壳深处一系列数千次缓慢、微小的振动，可能会持续数天或数周。震颤于 2001 年首次被发现，此后成为研究的一个重要焦点，它们向人类展示了在没有地震的情况下发生构造滑移的地方，同时，亦被

认为在地震的起源中起到了一定作用。

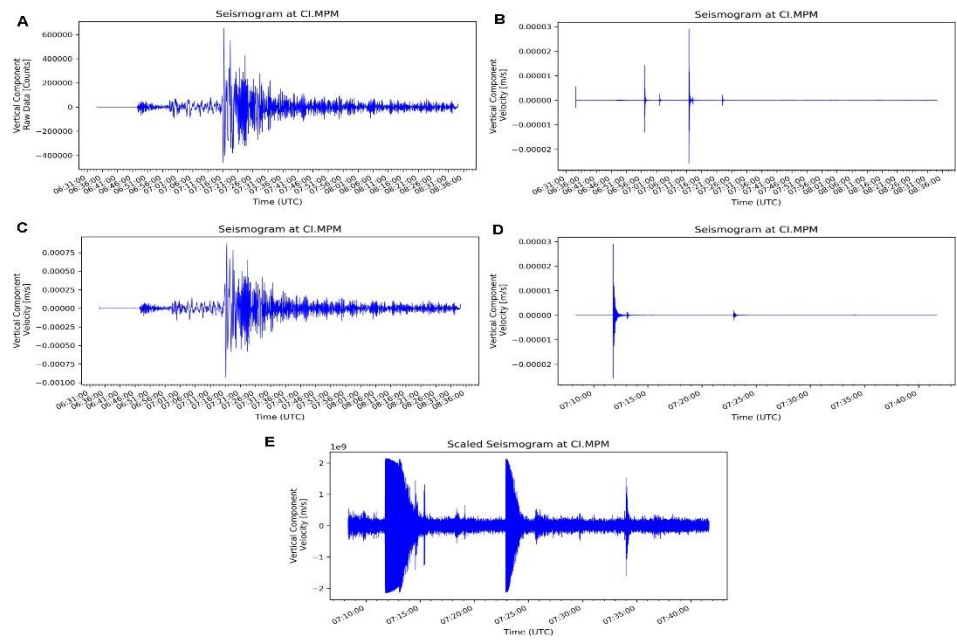


图 1 地震对示意

每一段音频都呈现给 10 位不同的市民后,他们必须将其归类为地震、震颤、背景噪音,或者以上都不是。地震录音通常听起来像关门声,而震颤听起来像火车驶过铁轨,背景噪音听起来像呼啸的风声、起皱的锡箔纸或无线电静电。研究人员将同意每种分类的公民数作为衡量共识程度的标准。同时,研究人员中经过训练的地震专家也对部分数据集进行了分类。此外,还将他们专门开发的用于识别地震的机器学习算法的结果作为评估公民表现的基准。

公民科学家对 91% 的测试记录达成了集体决定。与震颤 (51%) 和背景噪声 (66%) 相比,在对地震进行归类时,人们的共识更多 (74% 达到预设阈值)。当他们的集体决策与专业科学家所确定的正确分类相比较时,公民科学家集体识别地震的准确率为 85%, 高于机器学习算法 76% 的准确率。

研究认为，公民科学家可以对地震学做出重大贡献，使科学家能够处理比以往任何时候都多的数据，从而帮助他们更好地了解地壳深处的过程，并以更高的精度预测地震。目前，公民科学家集体识别地震的能力，是人工智能还做不到的，这对该领域来说将尤为宝贵。

来源：Citizen scientists help geologists to identify earthquakes and tectonic tremors

<https://blog.frontiersin.org/2020/08/06/citizen-scientists-help-geologists-to-identify-earthquakes-and-tectonic-tremors/>

Citizen Scientists Help Detect and Classify Dynamically Triggered Seismic Activity in Alaska

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.00321/full>