

地震科技前沿快报

2020 年第 4 期 （月刊 总第 16 期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震局地震预测研究所

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、美国国家地震信息中心战略规划 2019—2023
- 2、美国加州推出首个全州地震预警系统
- 3、从室内分析动态破裂过程中能量分配的地震估计：可观测的尺度失效

美国国家地震信息中心战略规划 2019—2023

世界各地经常发生破坏性地震。20 世纪初至今，数百次地震造成了生命财产的重大损失。通过研究全球地震活动，可以更好地了解如何减轻美国本土发生地震时所受的影响。隶属于美国地质调查局（USGS）的美国国家地震信息中心（NEIC）从 1966 年开始运行，是全世界公认的地震信息领先机构。为继续发展以确保 NEIC 在地震监测方面的杰出地位，美国地质调查局在 2019 年 9 月 11 日发布《美国国家地震信息中心战略规划 2019—2023 》（National Earthquake Information Center strategic plan, 2019–23），描述了未来五年内 NEIC 的发展机遇和具体途径。

一、美国国家地震信息中心

1977 年，美国国会实施了美国国家地震灾害减轻计划（NEHRP）。在 1977 年的地震减灾法案（the Earthquake Hazards Reduction Act of 1977）中，美国国会为上述计划制定了必要框架。USGS 所负责任务中包括 NEIC 的运行。

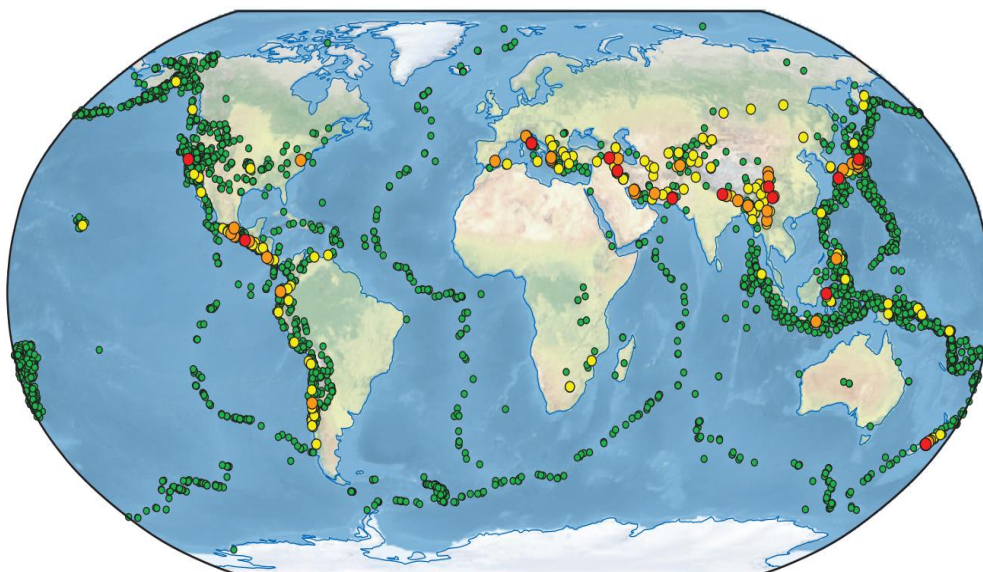


图 1 2010 年 9 月至 2019 年 4 月 PAGER 发出的警报

目前，NEIC 是唯一一个由美国联邦政府授权的地震监测组织，负责监测和传递全球地震信息。NEIC 长期与美国部分地震活动强烈地区的地震台网（RSNs）进行合作。2000 年，美国建立国家地震监测台网系统（ANSS），以为相关地震数据的收集、分析和传递提供合作保障，这促进了 NEIC 和 RSN 之间的合作。此外，NEIC 还与全球数十个地震台网进行合作，目前，其可从全球 130 多个地震台网的 2000 多个台站获得实时波形数据。

NEIC 致力于快速确定全球所有重大地震的位置和规模，并立即向有关机构、学者、关键设施和公众传递这些信息。通常，NEIC 的这个操作

至少由两名地球物理学家组成，他们负责全球所有 M5+地震发生后 20 分钟内的审查和报告。自 2006 年以来，NEIC 每周工作 7 天、每天工作 24 小时 (24/7)，每年报道约 3 万次地震。在全球重大地震发生后不久，政府代表、救援机构、媒体和公众就可以通过地震通知服务 (ENS) 以及美国地质调查局地震灾害项目 (EHP) 的网站来查看地震信息。此外，NEIC 还发展了一套实时态势感知产品，包括 ShakeMap、ShakeCast、Did-You-Feel-It，以及全球地震响应快速评估系统 (PAGER)，来描述地震造成的震动及其对附近人口和基础设施可能造成的影响。

二、未来战略目标

在 USGS 的任务范围内，NEIC 在五年后 (2024 年) 应该发展到什么程度，以及如何实现这一目标，是这一战略规划的主要出发点。应 NEIC 战略计划的要求，USGS 地震灾害项目办公室成立了 NEIC 2017 工作组 (NEIC WG17)，为实现如下目标制定计划：

(一) 保持和增强 NEIC 作为国家和全球地震信息主要来源的地位。

(二) 利用现有技术和新兴技术提高监测能力，增强地震信息和产品的及时性和准确性。

(三) 结合目标 2，NEIC 的目标应是自动编制一份权威性的、准确的、精确的和完整的全球地震活动目录，其及时性仅受地震波传播速度的限制，并且适用于所有时间尺度。

(四) 提升地震信息产品的质量、内容和用途，以便更有效地进行地震灾害评估、信息传递、交流、响应和减灾。

在美国国内，NEIC 的这一战略规划与 2017 年 ANSS 战略计划和 NEHRP 的首要目标一致。在国际上，作为国际地震信息交流的论坛，将

继续构想新型地震工具和影响评估策略。NEIC 战略优先目标分为两部分：基础行动说明了必须在未来几年继续现有业务工作以实现 NEIC 的现有目标，并为未来的工作建立基础；前沿行动说明了新技术的发展方向，这些新技术被认为是未来推动 NEIC 深入地震监测领域并保持其前沿地位的关键。

三、基础行动：应继续开展的工作

（一）区域性监测和 ANSS 的协调。NEIC 主要监测国内地震，作为没有覆盖 ANSS 的区域的权威信息来源，并为区域地震网提供支撑。

（二）地震检测及其关联性。地震检测需要复杂的工具来分析地震数据，最基本的要求是不断提高算法，以更好地检测局部、区域或者边远地区的地震。

（三）综合地震目录。其主要目的是提供关于震源参数、强震观测、影响评估等的基本信息，进一步的工作需要载入区域地震网的历史地震目录、进行质量控制、集成具体研究中的地震目录、更新单独事件等。

（四）系统基础设施。过去的 10~15 年不断地升级国家地震信息中心系统，创造了一个更加稳健、开放和模块化的环境，云数据与高性能计算将有效减少长期运行成本。

（五）校准小地震的震级。在 NEIC、RSNs 以及全球的其他地震网中有很多的方法计算小震震级，不同的方法会引起地震目录的不一致性，所以需要改进现存方法，修正这些方法使其趋于一致，并探索新的能更加准确计算小震震级的方法。

（六）预测地震影响软件的升级。NEIC 发展了一套地震情景预测产品，需要进一步升级这些产品或者开发新产品，提高软件之间的兼容性，

可信度，从而提高对地震本身和其产生影响的认识。未来需提高 ShakeCast 和 PAGER 对滑坡以及土壤液化的评估，并设计可信的地震方案以便能够更加准确的评估和预测一些高危地区的地震风险。

（七）ANSS 在危急时刻的表现。NEIC 的一个重要角色就是与 RSNs 相配合，并在危急时刻进行后援，未来需要进一步提高 RSNs 响应能力降低情况下，其二者间的协调及支撑的规划。

（八）加强国际地震网之间的合作。需进一步提升不同国家之间地震信息、数据和技术的交流。

（九）加强便携仪器部署。为了更好地记录余震，识别持续的地震活动，以及近场移动，需要加强仪器部署，同时探索使用更小或者更便宜的仪器。

（十）提前定位地震范围。对于特殊区域的历史地震以及地震构造和影响范围应该提前定位，以便提高这些事件之间的关联分析和认知。

四、前沿行动：机遇与创新

（一）利用机器学习提高监测能力。NEIC 雇佣了一批人进行地震分析，但机器学习算法已经展现了监测地震的能力，机器学习还能准确区分构造地震以及其他地震信号，所以需要进一步完善这种方法并使其成为一种常规方法。

（二）改善地震定位。地震阵列是由地震仪规则排列形成的，其目的是提高对地震信号的敏感性，需要进一步加强地震阵列的部署，并建立三维速度模型来改善地震定位。

（三）系统基础设施扩展。探索利用基础设施资源开发大数据，这对机器学习的发展具有重要意义，例如机器学习需要 GPU、最先进的传感器

以及高性能的计算。

（四）对公众公布地震信息的时间线。现在 NEIC 对全球地震一般需要 20 分钟才能公布，这一时间可以更加精确地确定地震位置和大小。平衡准确性和速度非常重要，为更加快速地做出响应，要探索自动公布地震信息的能力，减少人的干预。其次，应确定公布的地震信息应该包含哪些内容。

（五）大地测量数据。通常用来检测地震的地震设施会在大地震近场遭受倾斜、旋转等，而地形观测提供了地震静态或动态地表位移的直接测量，实时 GPS 数据则可以被用来监测地震以及地震大小，因此需要将地形观测和实时 GPS 数据纳入目前的地震分析。

（六）加强余震序列的地震构造研究。研究活动地震序列或具有特殊意义的地震序列可改善社区的减灾行动，并可应用于可操作性余震预报。随着资金水平的提高，可以评估生产和提供与余震序列监测和余震预测有关的新信息产品的可行性，并将其传达给用户。

（七）基于事件的产品。对于一个给定的中等或者大地震，NEIC 有一套描述震源特征、地震可能影响的软件，但仍需要更多资源来扩展这些产品，以便更有效地关联地震灾害的分析和研究，并促进相应的减缓行动。

（八）事件信息和产品的发展。加强对地震详细信息和产品发展的力度，以便能够了解一次地震的更多信息，同时随时间更新这些信息。

（九）影响评估产品的发展。震后响应型产品的准确性和使用方面的潜在突破在于直接结合地表真实信息来进行评估，未来需要加强对震后影响数据的采集。

（十）外部事件的特征研究。例如，滑坡、核爆、矿震等，需要加强

对这些非地震事件的地震波的研究，以便在这些事件发生时能够提前得知。

（十一）加强对俯冲带的研究。俯冲带产生了全球最大的地震，也带来了巨大的破坏，例如火山，滑坡和海啸，提高对俯冲带及其带来破坏的研究有助于减轻损失。

（十二）实时地震再定位。最近 NEIC 聚焦于提高对余震序列的识别及其与主震关系的研究，相关方法的改善可能会大幅提升地震实时定位的精度。

五、小结

整体而言，该规划列出了 NEIC 未来 5 年的优先战略目标，以下几个关键方向对其目标实现来说尤为重要：

（一）提高区域监测能力，同时调查并实施最先进的地震检测和关联算法。

（二）利用机器学习改善地震检测和震源表征，推动地震监测能力的进步。

（三）当公众需要准确而快速的信息时，结合实时 GPS 将很有必要。

（四）大幅提高震后信息内容，以及相应产品的质量。

来源：Hayes G P, Earle P S, Benz H M, Wald D J. & Yeck W L. National Earthquake Information Center strategic plan, 2019–23: U.S. 2019, Geological Survey Circular 1457, 17 p, doi:10.3133/cir1457.

美国加州推出首个全州地震预警系统

2019 年 10 月 17 日，美国加利福尼亚州州长加文·纽瑟姆（Gavin Newsom）宣布推出美国第一个全州范围的地震预警系统，该系统将通过加州大学伯克利分校开发的应用程序向人们的手机发送警报。

移动电话应用程序 MyShake 可以在地面受附近地震的影响而开始晃动之前发出几秒钟的警告。Newsom 表示，当人们知道大地震即将来临时，没有任何东西可以取代家庭制定地震和其他紧急情况计划，他鼓励每个加利福尼亚人下载此应用程序，并确保家人已做好地震准备。

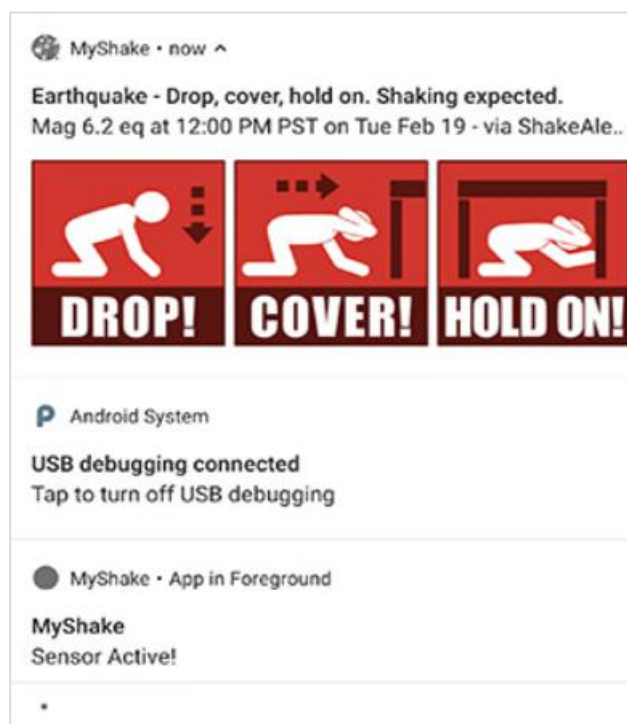


图 1 Myshake 软件

由加州大学伯克利分校地震学家和工程师设计的 MyShake 现在可通过 iTunes（适用于 iPhone）和 Google Play 商店（适用于 Android 手机）下载到手机或平板电脑上。MyShake 通过美国地质调查局运营的 ShakeAlert 地震早期预警系统提供警报。ShakeAlert 系统利用来自加利福尼亚、俄勒

冈和华盛顿的地震网络的数据，可计算初步的震级、然后估算用户所在位置的震动程度。在加州，三年多来，**ShakeAlert** 一直在发出附近地震引起的地面震动警报，以帮助城市、公交系统，公用事业，警察局和消防局做好准备。

现在，在加州的每个人，无论是居民还是访客，只要允许 **MyShake** 应用程序获取地理位置，都可以通过其获得相关服务。发生地震时，人们的电话会发出警报音频消息：“地震！趴下、稳住、掩护。震动将至”。

作为一个原型，**MyShake** 将不断得到公众的反馈意见而进行改进，成为每个居民可靠且必不可少的一个救生工具。该州范围的计划由加州州长紧急服务办公室（**Cal OES**）根据加利福尼亚地震预警（**CEEW**）计划进行管理。加州大学伯克利分校的地震学家 **Richard Allen** 表示，提供警报在技术上仍然具有挑战性，既要迅速发现地震，又要及时提供警报。现实是，警告会在震动开始之前、之中或之后到达，但在所有情况下，它们都使人们能够更好地应对地震并在地震中生存。

墨西哥和日本等地震多发国家早就拥有地震预警（**EEW**）系统，通常通过手机或公共广播系统发出警报。十多年来，来自美国地质调查局、加州大学伯克利分校、加利福尼亚理工学院、俄勒冈大学和华盛顿大学的地震学家一直在开发由公共和私人资金支持的美国西海岸的 **ShakeAlert**。自 2016 年以来，已邀请相关单位对该系统进行了测试，如旧金山湾区捷运系统（**BART**）。

在洛杉矶的许多人出于预警目的而下载了 **ShakeAlertLA** 应用程序，但该程序并未设置为警告人们远处的地震，使许多人对建筑物开始摇晃感到惊讶。此后，降低了区域震动的阈值。作为官方的 **EEW** 应用程序，**MyShake**

将首先在南加州提供与 **ShakeAlertLA** 目前在洛杉矶提供的相同的信息。此外，**MyShake** 会将有关地震动强度的信息（该信息由手机的内置加速度计获得）发送回加州大学伯克利分校，还将提供有关如何为地震做准备的建议，并为人们提供一种简单的方式用于进行有关地震发生时的经历反馈。

原文题目： **California rolls out first statewide earthquake early warning system**

来源： <https://news.berkeley.edu/2019/10/17/california-rolls-out-first-statewide-earthquake-early-warning-system/>

从室内分析动态破裂过程中能量分配的

地震估计：可观测的尺度失效

研究者在实验室中通过亚微米级别的滑移，使用地震破裂的地震学方法研究能量分配。从记录的地震波推断出的估计值是基于实验室中的微观现象摩擦实验建立的，它似乎受到固有假设的限制。在这项协同研究中，研究者基于直剪试验机中完全校准压电换能器阵列的方法展开研究。研究发现，平坦宽带传感器的特性使人们能够使用频谱源模型研究震源参数，该模型通常用于解释中小型地震。研究者使用单站假设计算了拐角频率、低频平稳期和高频频谱衰减指数。矩震级在 $-9 < M_w < -7.5$ 范围内，滑动范围从纳米到微米，通过地震波研究扩展了人们对震源参数的理解。主要发现包括：① 频谱衰减随拐角频率的变化遵循自然条件下的观察结果；② 观察到拐角频率偏移现象 ($\frac{f_{cp}}{f_{cs}} \sim 1.34$)，这归因于源有限性，而不是波传播效应；③ 地震是应力过冲的，因为它由 Savage-Wood 效率决定；④ 断裂能与滑移之间的经验幂律比例关系，表示为 $G_C \propto \bar{u}^{n_G}$ ，其中 $n_G=1.28$ 会在采矿规模 ($n_G=1.86$) 和实验室规模 ($n_G=2.35$) 上进行地震估算时失效。这种尺度上的异常可能与断裂能地震学解释中固有的断层外能量阱 (energy sink) 的类型有关。相关成果发表在 2019 年 11 月的 Journal of Geophysical Research: Solid Earth 上。

理解地震领域的最新进展在很大程度上依赖于各种规模的、高质量的地震数据的分析。裂缝生长和所产生地震波的解析与数值研究提供了用来解释地震过程中能量分配的许多模型。人们认为，地震是通过涉及弹性作用的能量平衡和通过非弹性过程的耗散来控制的。弹性存储的应变能进入这些能量阱之间的反馈直接影响地震源参数。能量分配对于理解造成损坏

的发射波的高频部分、破裂停止、其几何尺寸以及标量地震矩等一些参数具有重要意义。在破裂传播方面，就断裂力学而言，已经存在了许多年。但是，一些允许使用地震波来量化震源特性（例如，断裂能）的假设可能会限制人们的理解，特别是对于较小到中等大小的破裂。

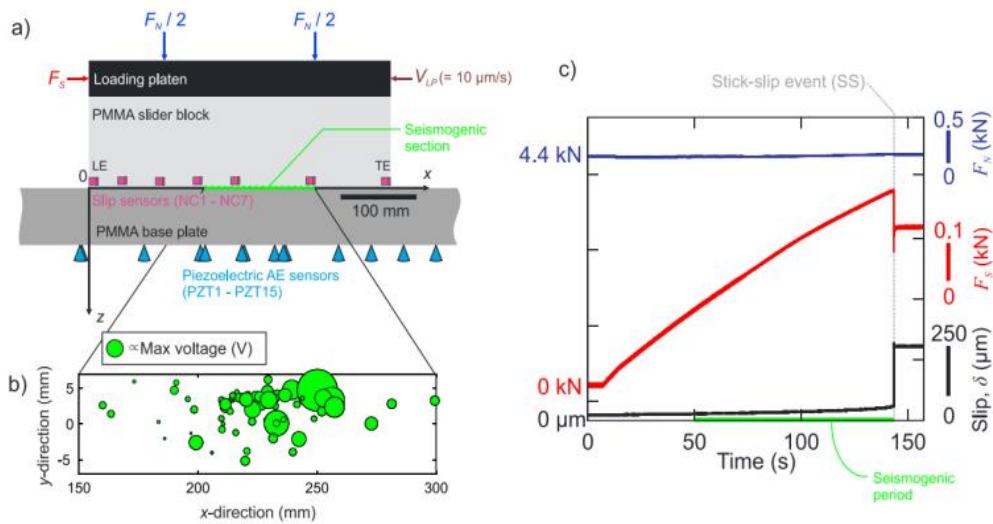


图 1 (a) 直接剪切摩擦实验的一般配置。(b) 在 Selvadurai 和 Glaser 文章中详细介绍的、在地震段发生的可定位离散声发射 (AE) 的位置 (绿色圆圈)。(c) 根据 Selvadurai 和 Glaser 修改的，在加载周期内发生的粘滑破坏的一般特性，显示出典型的滑移缓慢累积和伴随的孕震期

定量测量断裂能的实验室研究在发展人们对动态破裂和能量流的理解中发挥了作用。摩擦滑移的实验室研究表明，滑移不是瞬间发生的，而是随着抵抗应力的减小而逐渐增加到残余水平的。对于线性滑移的简单情况，可以考虑将有效的断裂能 G_c 作为将应力降低到残余水平所需的总能量。正如许多实验室研究中所证明的那样，可以直接测量 G_c ，但是在扩大的规模和自然条件下不可能进行类似的测量。如果 G_c 与尺度有关，那么人们对摩擦破坏的低估会更加复杂。Ohnaka (2013) 指出，如果一个表面完全平坦 (无限薄)，则 G_c 无疑将与尺度无关，其单位是能量/面积。但是，裂

缝表面具有可测量的几何异质性，实际上以分形的方式变化。这种默认假设使实际（波纹）区域在各种尺度下都大于名义（平坦）平面，并且从简单的几何学论点来看，这意味着在平坦平面上解释的断裂面积会导致 G_c 的尺度依赖性。目前，已经提出了其他机制来解释这种尺度依赖性，由于其在动态破裂过程中对能量分配的影响，因此进一步研究很重要。

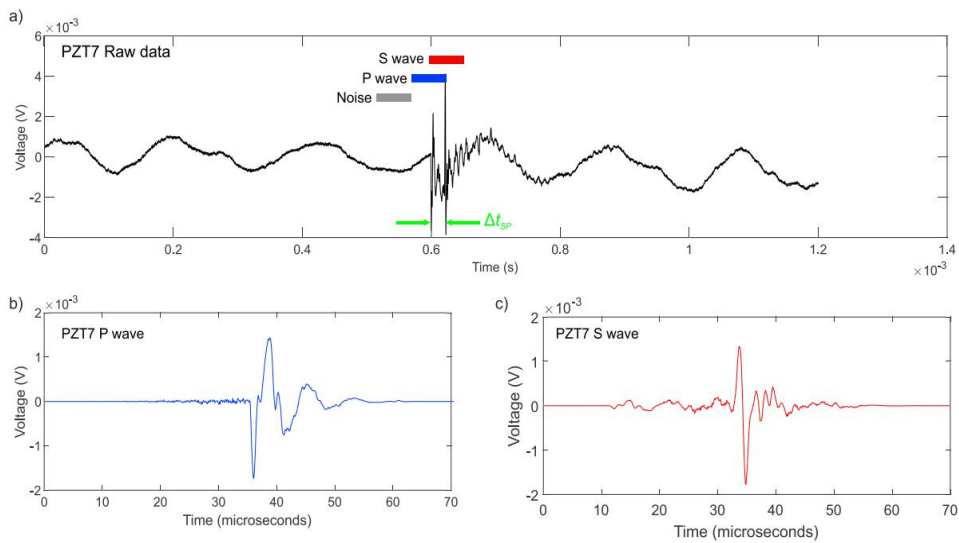


图 2: (a) 使用 PZT7 得到的来自声发射的原始数据；
(b) (a) 经过滤波的 P 波；(c) (a) 经过滤波的 S 波

目前，通过研究携带有关震源信息的地震波来进行原位 G_c 测量。 G_c 的地震学估算只能通过简化来进行，这可能导致过于简化。这些简化措施很强大，尤其是对于不可能进行有限源研究的中小地震。实验室研究在调查负责能量分配的机制中发挥了重要作用。他们提供了对滑移和滑移率水平的能量流的认识，这类似于使用有限源模型计算的中到大地震。但是，当前对实验室测试的能量流的理解仅限于在实验过程中对滑移的最低可能的测量，能量如何在断层上分配以及断层上地震事件期间哪里平均滑动为亚微米级，这些都尚不清楚。因此，在这项研究中，研究者试图将对

Gc 地震估计的理解扩展到较低的滑动水平,其推断的滑动水平在纳米水平上。

另外,使用一个连续的框架来表征断裂和摩擦的动态特征,这已在众多科学学科中被证明是成功的。但在实验室中发现,滑移弱化摩擦可以很好地证明基本的断层行为,却无法模拟速度相关特征。依赖速率和状态 (RS) 的本构摩擦的引入抓住了这一特点,并且由于其对材料不敏感以及在很大范围内预测摩擦的能力,而在许多学科中获得了广泛的成功。

通过试验,研究者部署了压电换能器 (PZT) 阵列,以准确地解释地震活动。研究者首先描述了实验装置和材料特性,并详细介绍了在这种独特的直剪摩擦配置中“绝对”校准传感器所需的方法。通过仔细考虑 PZTs 仪器的响应,研究者能够利用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 样品的各向同性、均质性来研究源特征。然后,研究者使用没有散射或其他与天然材料不均匀性相关的波传播效应影响的 Omega-square 和 Omega-n 模型研究了 P 波和 S 波。使用这些模型,研究者首先在时域和频域上分析了局部地震活动性,然后研究了震源参数的地震学估算:半径 (a),地震矩 (M_0),应力降 ($\Delta\sigma$),辐射能 (E_r) 和有效断裂能 (G_c)。最后,研究者比较 18 个地震研究,以调查由地震学估算得到的滑移和断裂能之间的尺度关系存在的偏差。这些地震研究分为三个长度尺度类别:实验室、采矿和自然环境。

研究者通过详细分析显示出在直剪实验室实验中采用压电 AE 传感器的绝对和原位校准方法的关键方面。进而,强调了两种校准方法以及具有平坦的宽带传感器响应的重要性,以便更好地了解传统上使源特性与地震估计难以隔离的波传播效应。

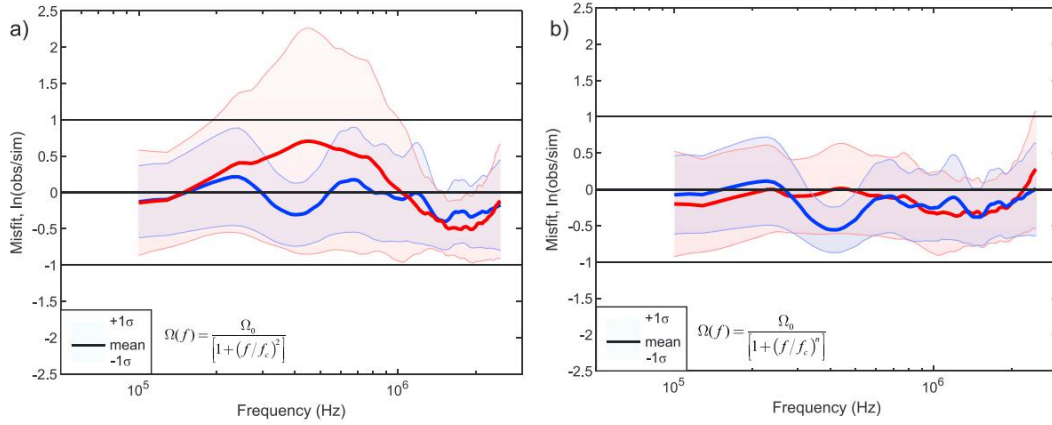


图 3 对于使用 PZT7 检测到的所有事件，(a, 左图) Ω -squared 模型和 (b, 右图) Ω -n 模型的失配分析

研究表明，使用两个不同的频谱模型，即使对于地震矩约为 10^{-5} - Nm 的小破裂，应力降和破裂速度也可能出现变化，并且拐角频率偏移（最小）是震源有限性的结果。本研究所介绍方法的细节是为了阐明一些地震学的替代方法，特别是在非常小的长度尺度上进行震源研究。这些技术可能为研究压力、温度、摩擦非均质性以及断层能量阱的存在及其对破裂传播的反馈的影响提供有用基础。

结果表明，当试图了解在采矿规模和实验室环境中发生的地震时，用来估算自然地震的同震滑动和断裂能的经验关系就会失效。对于这种关系失效的原因，研究者提供两个假设：①断层附近的破坏不是线性扩展的，破坏区域（既存的还是由破裂引起的）提供了取决于长度尺度的能量阱；②采矿和实验室环境中的温度远低于深度上的。这可能导致更多的脆性破坏过程，其中破坏岩石所需的断裂能更接近完整岩石。这些理论似乎受到较新研究的支持，并且对这两种效应的定量表征将需要更多的实验室测试和现场测量，以了解大尺度断层带的本构特性。

来源：Selvadurai P A. Laboratory insight into seismic estimates of energy partitioning during dynamic rupture: An observable scaling breakdown. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019.

主 送：中国地震局领导