

# 地震科技前沿快报

2023 年第 12 期（月刊总第 59 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、台湾地震监测台网评估

一个地区的地震监测网络从建立到完善需要几年到几十年的时间，应当定期对地震监测台网进行质量评估，评估网内节点的分布是否符合最终目标、台网的薄弱处及优势等。研究人员评估了台湾地区的地震监测台网，调查了实时地震监测网和强震观测网，将两个网络分别与地震活动、完整震级、震源、地震危险性和人口分布等多种数据集进行比较。

评估结果表明：①在大尺度上，台湾的实时地震监测网和强震观测网都没有出现任何薄弱区，它们都与各自的地震监测和密度/危险性评估目标相一致；②目前的地震台网甚至延伸到显然不合理的地区；③对于实时地震监测网和强震观测网，台湾地区只有部分区域显示台站与相关信息之间的部分一致性，不具有同时与多个参数之间的相关性。

### 2、意大利的可操作地震预报：运行 10 年后的验证

意大利的研究人员收集并评估了意大利可操作地震预报（OEF）系统在第一个 10 年期间运行的结果。该系统实时运行：每天午夜以及每次  $ML \geq 3.5$  地震之后，都会生成每周的地震预报。研究人员汇集并总结了意大利 OEF 实验的前 10 年（2010—2020）所获得的结果，与同期记录的实际

地震目录进行比较，评估预报的可靠性。结果突显 OEF 概率预报实验在意大利短期地震预测方面的潜力。

### 3、通过分布式声传感对地震凹凸体破裂进行成像

没有超密集的台阵很难实现准确的破裂成像。美国的多名科学家采用光纤传感技术对高频地震破裂辐射体进行了成像，他们通过将一条 100 km 长的光纤电缆转换成一个 10 000 通道的地震阵列，获得了 2021 年加州羚羊谷 Mw6.0 地震的图像。通过将获得的结果与长周期地震矩释放和动态破裂模拟进行比较后，研究人员发现子事件是由于断层凹凸体的破裂所导致的，该凹凸体实质上调节着整体破裂行为。该研究表明，可以利用广泛存在的光纤网络来系统地研究区域性、中等规模地震的破裂过程。结合动态破裂模型，将可以提高对地震破裂动力学的认识。

## 台湾地震监测台网评估

一般台网的性能是合适数量的最佳分布节点的函数。来自意大利的科学家对台湾地区的地震监测台网进行了评估，该评估采用统计方法进行，其中包括描述性空间统计与点模式技术的结合。研究人员分析了地震监测台网节点的空间分布，并与地震活动分布、完整震级、活动震源、地震危险性和人口分布进行了对比。所有这些数据都可以与地震监测网的目标联系起来，因此，可以反过来使用它们来检索有关台网本身一致性的信息。研究人员特别关注了“实时地震监测网”和“强震观测网”，每一个台网都有自己的目标，因此分别与地震活动、震源、地震危险性和人口分布等与其目的相关的外部信息进行了比较。这种简单可靠的方法显示了台湾所建立网络的高质量，这种评估方法能够为任何类型台网提供定量信息，并确定潜在的关键区域和未来发展方向。相关研究发表在 2023 年 7 月的 *Journal of Seismology*。

一个地区的地震监测网络通常会覆盖  $10^5 \sim 10^6 \text{ km}^2$  的区域，从最初的规划到最终的配置完成可能需要几年到几十年的时间。另一方面，在某些情况下，由于传感器、传输系统等领域的技术改进，建立网络所需的长时间跨度将变成一种优势。无论如何，应当定期验证给定网络内节点的分布是否符合其最终目标，这主要是因为随着时间的推移，关于给定区域地震活动的认识会不断发展。

台湾地区具有较强的地震活动，其仪器地震监测可以追溯到 1897 年第一台地震仪的部署。此后，主要依靠 20 世纪 70 年代和 90 年代的技术进步（如数字信号、实时数据传输），在整个台湾地区建立和扩展了一个地震监测台网（图 1）。但是，对台湾地震监测台网的最新评估研究也要追溯到 1997 年。因此，现阶段需要对其进行进一步的评估。

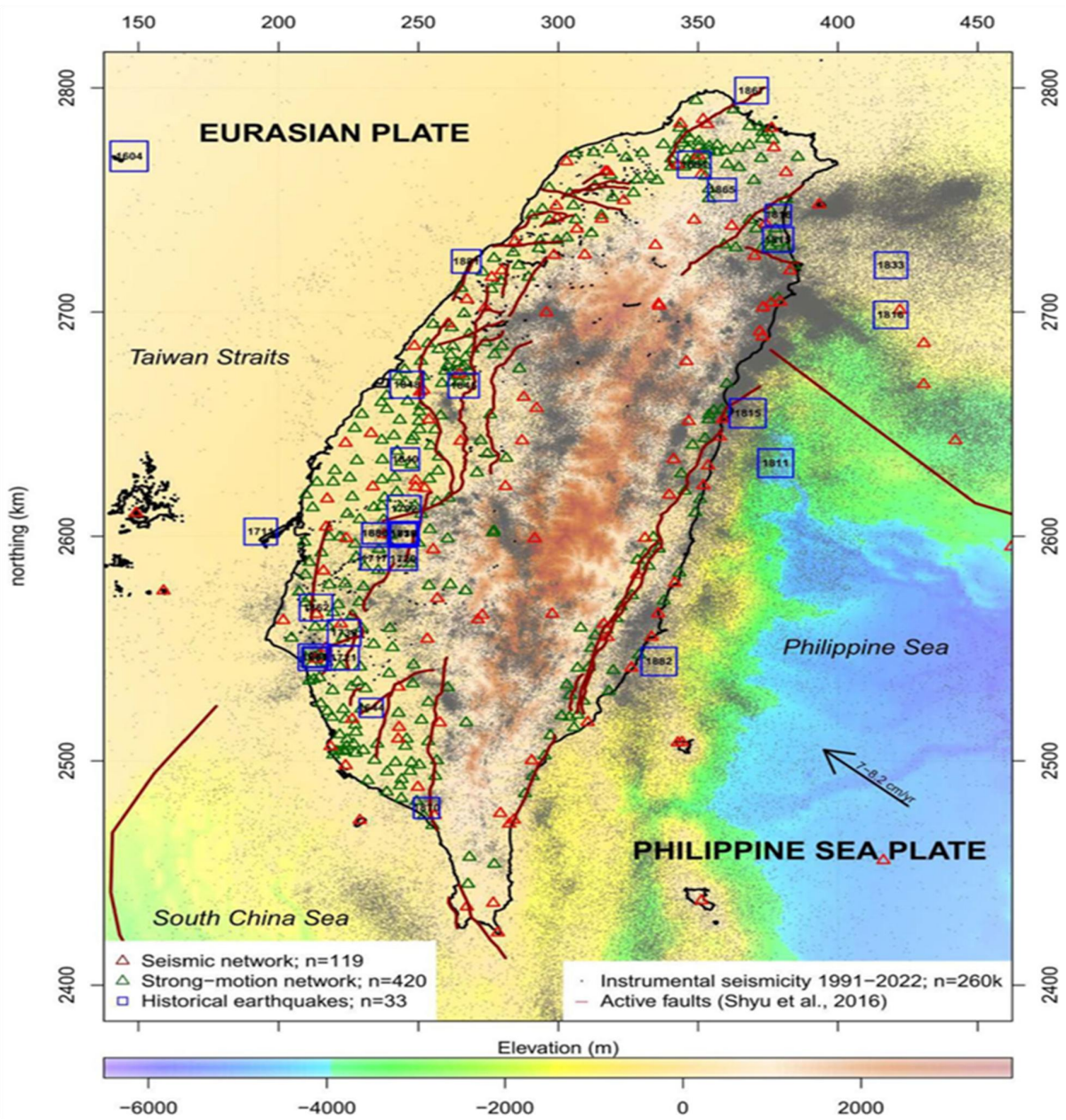


图 1 台湾地区的地震和地震监测网分布

研究人员应用前人提出的方法对台湾地区的地震监测台网进行了评估。该方法考虑了网络节点的空间分布以及与网络本身目标相关的辅助信息。研究人员分别调查了实时地震监测网和强震观测网，然后，将两个网络分别与各自的多种数据集进行比较，例如地震活动、完整震级、孕震源、

地震危险性和人口分布等。选择的地震目录为发生在 1991 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日的 259 290 次地震，震级在 2.2~7.3 级之间。

### 1. 实时地震监测网

图 2 为实时地震监测网的核密度图 (kernel intensity)，结果显示，台湾本土地区台站的密度几乎是一致的，北部和西部部分地区台站的密度值相对较高。地震活动密度图显示了东部沿海部分地区的高密度地震。地震台站的密度图与仪器地震活动之间的关系显示，正相关和负相关的区域都有出现。正相关表明台站密度和地震活动密度之间具有一致性，而负相关则表明两者间的不一致性。

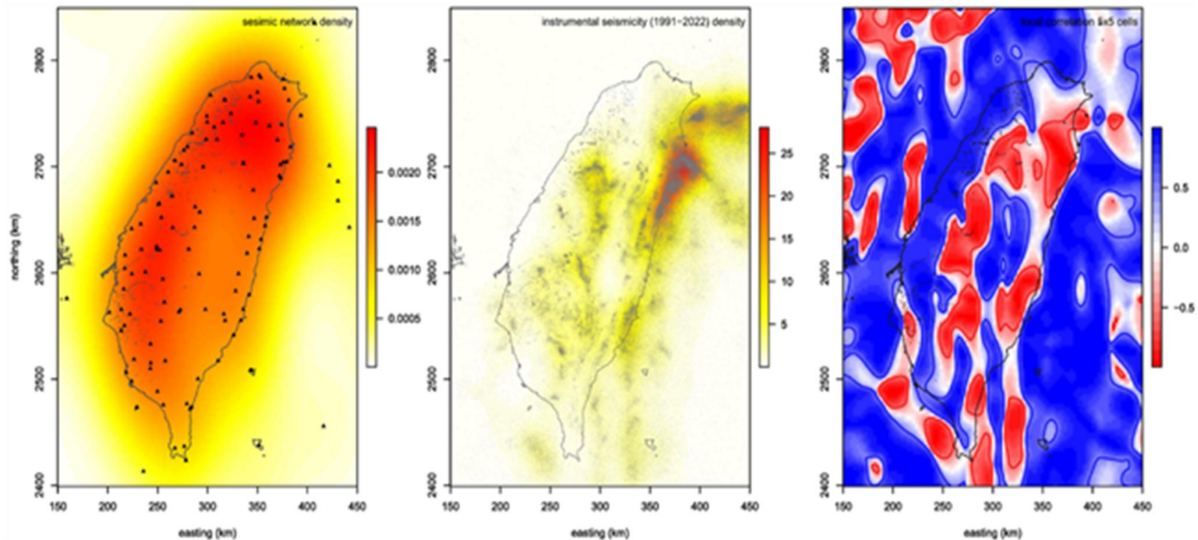


图 2 左：地震监测网的核密度图；中：仪器地震活动的核密度图；  
右：两种核密度的局部相关系数图

此外，研究人员选择了 5 km 距离内 (图 3 绿色三角) 地震数量最多的 10% 的台站和 100 km 距离内地震数量最少的 10% 的台站 (图 3 红色三角)，计算了每个台站周围随距离增加的累积地震数。根据 50 km 范围内的累积地震数排列的所有监测站显示在图 3 中。为了进一步研究地震台网与地震活动之间的关系，研究人员绘制了研究区域的完整震级 ( $M_c$ ) 图。 $M_c$  在陆地区的范围为 1.8~2.0，向外递减，在外围地区达到大于 3.5 的值。

此外，在所有地震台站中，大约 55%的台站位于距离断层 10 km 以内，大约 90%的台站距离最近的断层不到 25 km。总的来说，大约 70%的断层受到至少一个地震台站的密切监测，90%断层的监测距离小于 10 km。

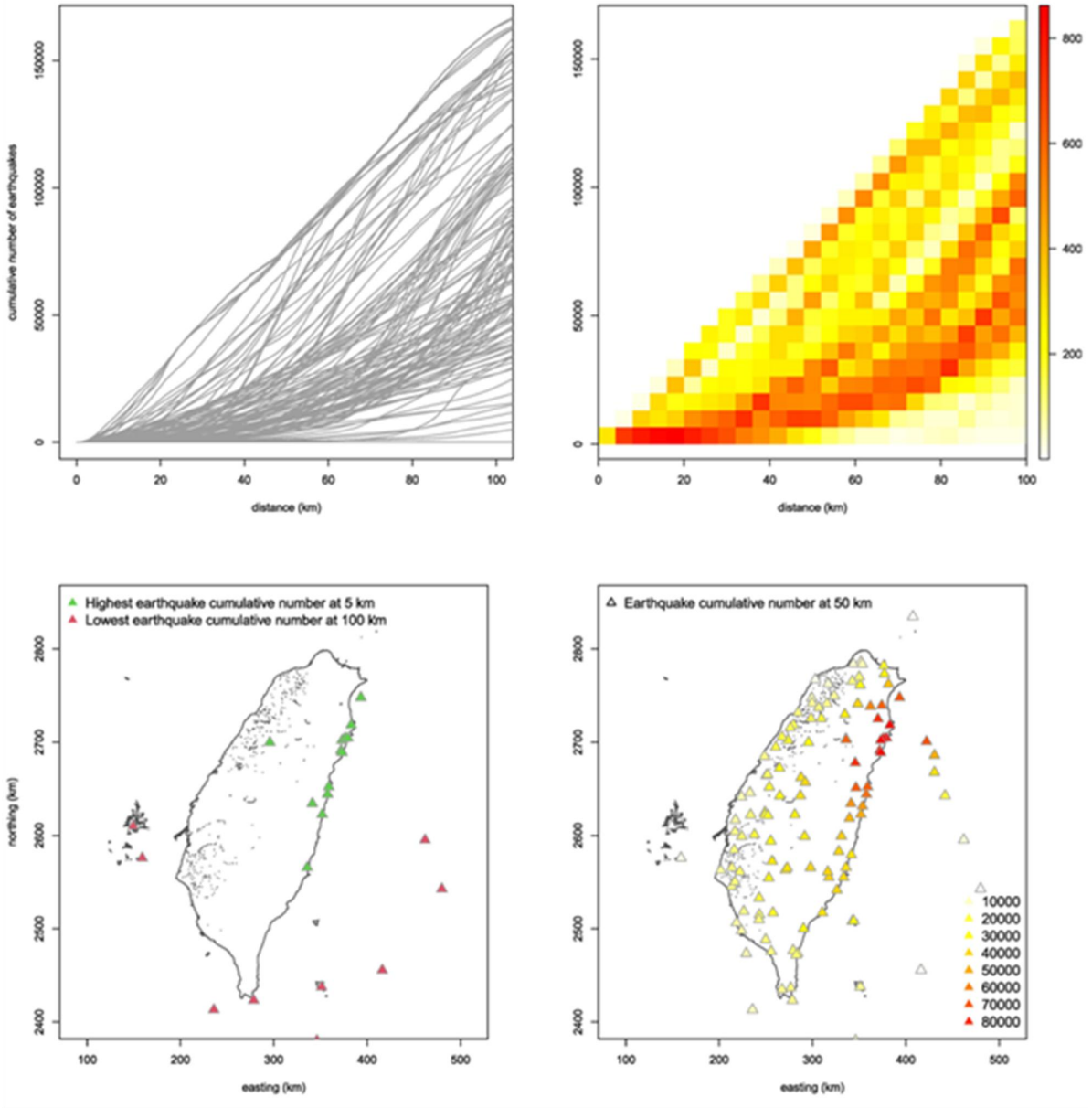


图 3 上：随着与地震台站距离的增加，仪器地震的累积次数和相应密度；下：5 km 范围内累积地震次数最多的前 10%台站（绿色三角）和 100 km 范围内累积地震次数最少的前 10%台站（红色三角）

## 2. 强震观测网

图 4 显示了强震观测网的台站核密度，西部和北部地区的台站密度明显较高，而内陆和南部地区的密度则明显较低。大于 5.5 级地震的密度图显示了从西向东的梯度。与实时地震监测网类似，强震台站的密度图与仪器地震活动之间的关系显示，正相关和负相关的区域都有出现。同时，研究人员也计算了强震观测网各节点周围随距离增加的累积地震矩 ( $M_0$ )，以及距台站 50 km 的累计地震矩。

此外，研究人员还调查了强震观测网台站密度与人口密度之间的关系。结果显示，与短波长呈正相关和负相关的地区具有较高的空间变化性。强震台站密度与 50 年内预期峰值地面加速度之间的局部相关关系表明，两者之间存在普遍的正相关关系，而小范围的负相关很多出现在台湾岛的北半部。

## 3. 讨论

对地震监测台网进行质量评估，要认识到地震监测网的薄弱处及优势所在。实时地震监测网的台站密度与仪器地震活动的局部相关结果突出显示为负相关带（图 2），由于台站密度几乎是均匀的，这些负相关区域中的大多数可能是在仪器地震活动有限的地区存在大量网络覆盖的结果。台站位置与地震分布的对比表明，最佳位置台站（即在 5 km 距离内地震数最多的台站）与仪器地震活动的密度匹配良好（图 3）。相干度较低的台站（即 100 km 距离内事件数最少的台站）位于外围地区，其中一些是海底地震仪（OBS）台站。

此外，研究人员发现，地震监测台网节点分布与活动断层分布之间具有很好的相干性。然而，均匀的台站分布导致一些没有断层的地方同样分布有许多台站。从长远来看，这种配置可以被认为是一个优点，因为断层

数据库不能被认为是绝对完整的，在一些没有断层的地方将来也有可能发现断层。

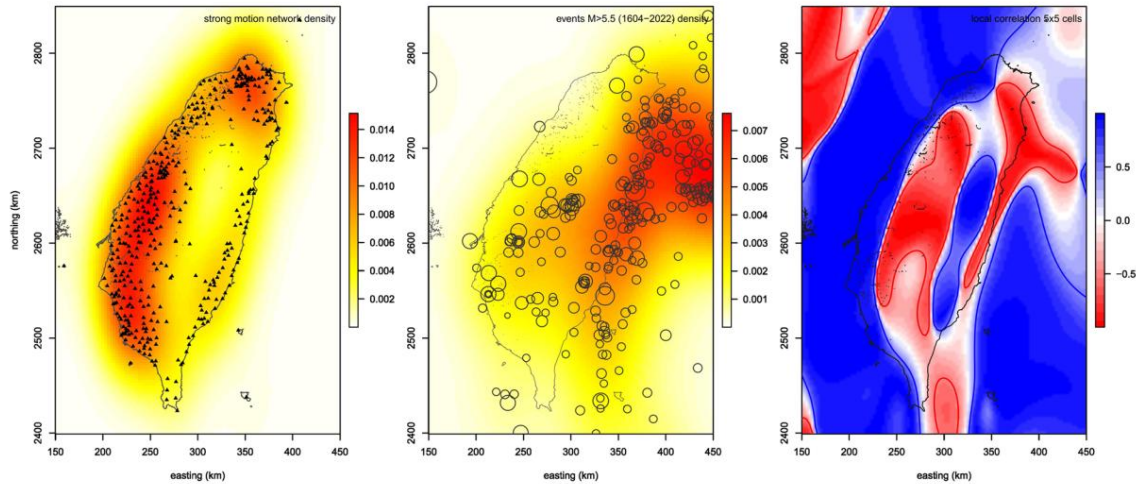


图 4 左：强震观测网的核密度图；中：5.5 级以上地震的核密度图；右：两种密度的局部相关系数图

对强震观测网的评估考虑到了最强地震 ( $M \geq 5.5$ ) 的分布及其相关地震矩释放、人口和地震灾害模型。台站密度与 5.5 级以上地震密度的相关性分析发现，大部分地区表现为负相关（图 4 右侧红色区域）。岛内大片红色区域表明，该地区经历过相对丰富的强震活动，但相对缺乏强震台站。作为对照，这个地区对应的是一个人口稀少的地区。梯度较高、累积地震矩（50 km 处）较大的台站布置在了地面运动期望值最大的地方，而布置位置最差的台站则准确分布在地面运动期待值最低且人口稀疏的地方。

台湾人口分布极不均衡，有人口密集的小区域，也有人口稀少的大区域。相对于人口分布而言，位置最好的强震监测站集中在与台北相对应的一个非常有限的区域，而位置最差的监测站位于东部沿海下游和一些岛屿。强震台站与地震危险性模型的局部相关性总体为正值，负值集中在研究区北部的小范围内——这也是地震危险性较低的地区，而强震台站与地震危险性不相关的地区则可能是由于具有较多台站所导致。



上述分析结果表明：①在大尺度上，台湾的实时地震监测网和强震观测网都没有出现任何临界薄弱区，它们都与各自的地震监测和密度/危险性评估目标相一致；②目前的地震台站甚至延伸到显然不合理的地区，也就是缺乏断层的地区，如果将来的研究能够揭示未曾识别的断层，这种台站配置会成为一种优势；③对于实时地震监测网和强震观测网，台湾只有有限的部分地区显示台站与相关信息之间的有限一致性，而不具有同时与多个参数之间的相关性。

来源：Scudero S, D'Alessandro A, Figlioli A. Evaluation of the earthquake monitoring network in Taiwan. *Journal of Seismology*, 2023, 27(4): 643–657.

## 意大利的可操作地震预报：运行 10 年后的验证

意大利的研究人员收集并评估了意大利可操作地震预报 (OEF) 系统在第一个 10 年期间运行所产生的结果。该系统实时运行：每天午夜以及每次  $M_L \geq 3.5$  地震之后，都会根据空间网格（覆盖整个意大利领土）中每个单元的集合模型生成每周的地震预报。为了评估 OEF-Italy 预报的表现，研究人员考虑了地震可预测性合作研究 (CSEP) 计划的标准测试，这些标准测试已被适时调整，适合重复性的每周 OEF 预报。此外，研究人员还采用从其他研究领域（例如气象学）借用的新绩效衡量标准，专门通过二元标准（预报：是/否；发生：是/否）来验证基于警报的系统。本研究最终目标是：①调查 OEF-Italy 随机模型中可能存在的弱点和改进空间；②为通过布尔逻辑（采取或不采取行动）进行行动的利益相关者提供有帮助的性能衡量标准；③进一步认识意大利构造地震活动的可能特征。相关研究成果发表在 2023 年 9 月的 *Geophysical Journal International*。

2009 年，意大利政府委任的国际地震预报委员会 (ICEF) 为保护民众引入了可操作地震预报 (Operational Earthquake Forecasting, OEF) 的概念，在考虑到持续的信息提供以及测试预报结果的重要性后，完全符合 ICEF 要求的模型于 2014 年发布。该模型在一个特定的  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  网格上执行，该网格由  $N_c=8993$  个单元组成，这些单元被有意放置在覆盖整个意大利领土的区域内——这是在地震可预测性合作研究 (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability, CSEP) 计划提出的标准下，根据意大利情况作出的选择。

在与意大利民防部门达成的协议下，选择一周的时间窗口是出于实际的便利性考虑，但该系统能够提供更短的预报（例如每日）。总的来说，

预报窗口的适当长度与预报的预期用途有关。过去几年，意大利民防部门使用了 1 周的时间窗口，这主要是出于内部组织的原因。

OEF-Italy 的地震预报基于统计地震学的数学模型，并通过基于所获得预期概率着色的、与时间相关的地震图来发布。该系统不仅可以计算并储存每次模型运行得到的预期概率，还包括一个交互式的传单地图（leaflet map），显示目标事件的当周概率。此外，还有一个交互图，可显示每周概率的时间演变，并根据需要查看特定时间段的变化。

2009 年，OEF-Italy 系统开始在意大利国家地球物理与火山研究所（INGV）的计算机上运行。2013 年 1 月，该系统开始实时运行。自 2015 年起，其开始向意大利民防部门的风险委员会提供地震信息。尽管该系统在实时运行，但由于意大利法律中科学家的角色和责任模糊，公开传播信息面临障碍，因此没有对外公开。

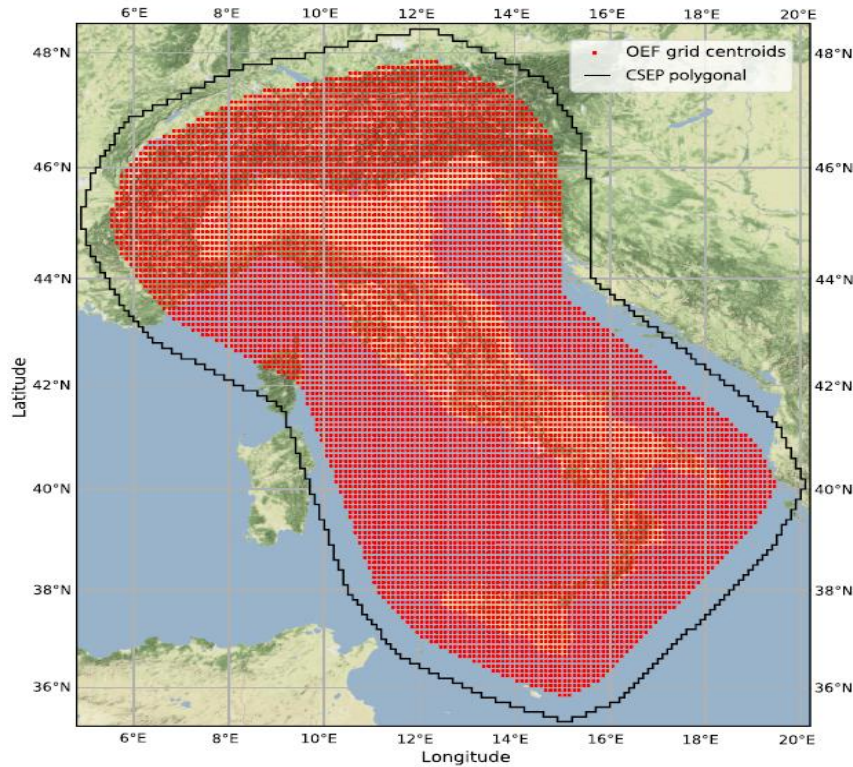


图 1 包围意大利领土的 CSEP 多边形（分段黑色曲线），以及进行 OEF 实验的  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  网格的质心（红点）

在这项工作中，研究人员汇集并总结了意大利 OEF 实验的前 10 年（2010—2020）所获得的结果，目的是与同一时期记录的实际地震目录进行比较，评估所产生预报的可靠性。研究过程中的分析是通过几种统计测试来进行的，旨在为 OEF-Italy 系统的可能改进及对意大利地震活动的见解提供线索。在方法上，基于 CSEP 框架补充了一个额外的方法，即通过不同和互补的统计方法分析时间重叠的集合预报。特别是，研究人员测试了对强聚类事件的重度重叠预报。为了最小化强聚类（strong clustering）的影响，研究人员将观测值转化为二分观测值，最终通过可靠性图（reliability diagram）评估 OEF-Italy 系统的预报能力。

研究人员将图 1 所示覆盖整个意大利领土的网格中发生的所有深度  $\leq 30$  km、地震震级  $M_L \geq 4.0$  的地震事件作为目标，测试时间为 2013 年 1 月 1 日至 2020 年 5 月 26 日。预报由 OEF-Italy 系统在每天午夜以及任何  $M_L \geq 3.5$  地震发生后发布，其中包含集合模型对目标事件每周的预报。

值得说明的是，为了正确解释 OEF 预报，系统中包含的模型需要快速更新，以整合任何序列期间发生的可能地震影响。在大地震发生后，确实可能产生大量的触发地震，这些地震在实时地震目录中基本上是不完整的。因此，这不可避免地导致对大地震后地震活动的低估。

为了评估这种概率预报的可靠性，研究人员考虑了每个  $N_t \times N_c$  时空箱中的合成和真实二分观测，其中  $N_t$  是 OEF-Italy 系统在测试时间窗口内产生的预报的数量， $N_c$  是进行分析的空间网格单元的数量。

用于评估 OEF-Italy 系统性能的所有统计方法都表明，预报与观测到的地震活动性总体上具有良好的 consistency。但是，存在一个与意大利中部序列有关的例外。这种情况下的差异主要是由于序列引入的强烈不完整性，

以及目前 OEF 中涉及的概率模型的属性——这些模型依赖于逐渐发生的地震，并需要时间来掌握任意余震序列的发生潜力。

需要明确的另一个重要问题是，在相关序列中，实时记录在罗马的 INGV 地震监测室的最低报告阈值被提高到  $M_L$  4.0。但是，只有在后期的修订中才会在数据库中包括较小的地震。因此，可能会发生这样的情况： $M_L$  在 3.5~4 的地震，在初步阶段没有被记录。所以，系统不会运行，但在某个修订期后，此地震会被加入到目录中。这可能会影响系统预报能力的回顾性分析。

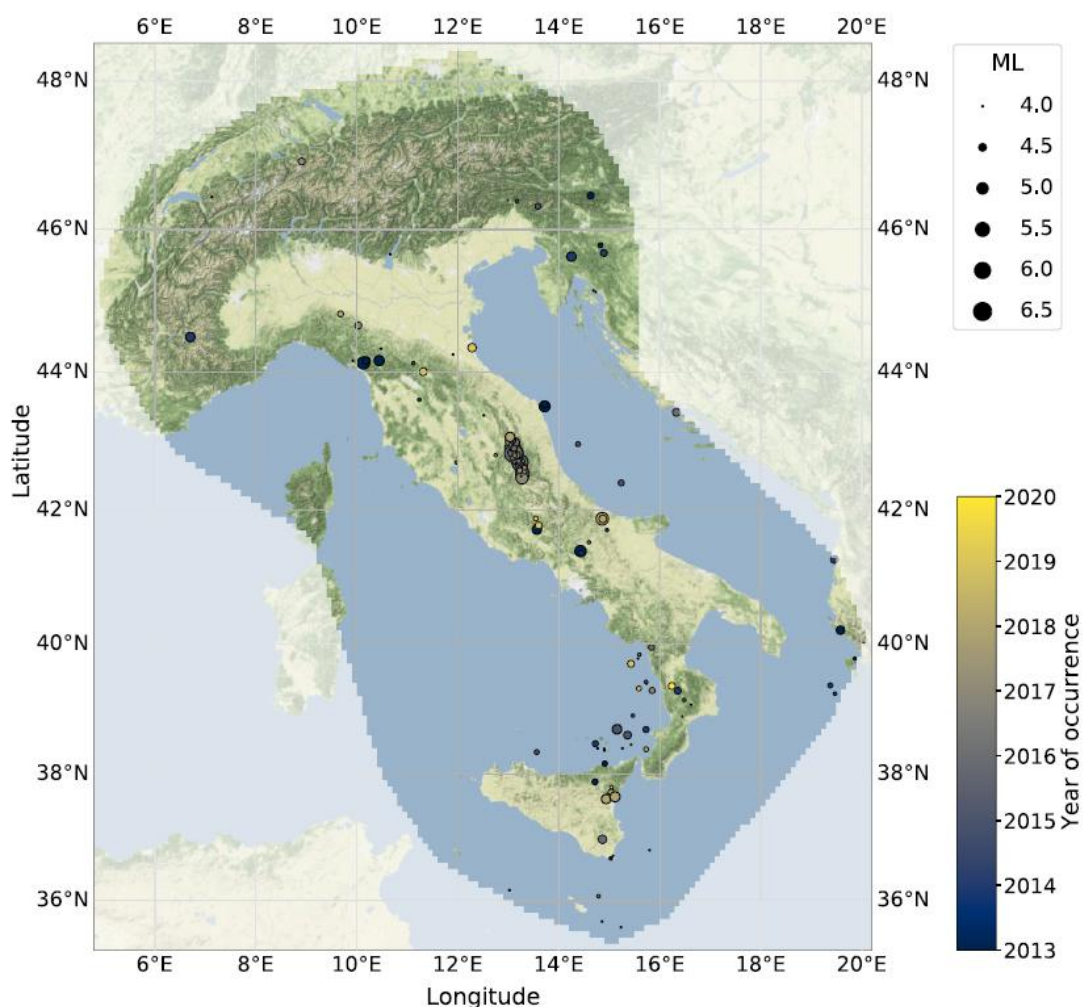


图2 2013年1月1日至2020年5月26日，意大利地震目录中记录的172个目标地震（深度 $\leq 30$  km， $M_L \geq 4.0$ ）的地图

研究人员获得的结果突显了 OEF 概率预报实验在意大利短期地震预测方面的潜力。同时，它们在两个主要方面显示出一些改进的空间。首先，OEF-Italy 系统在高能地震序列的最初几个小时内仍然需要一些手动修正，以考虑目录的严重不完整性，这会导致对预期地震活动的严重低估。其次，加入其他模型，最好是基于不同的假设，可以对迄今为止使用的聚类模型提供额外帮助。

除此之外，与计算时间相关的技术问题也需要被克服。迄今为止，系统每 15 分钟检查一次地震目录，以识别  $M_L \geq 3.5$  地震。这意味着，如果最后一次检查发生在 00:00，并且强震发生在 00:01，则该地震将在 00:15 被记录，从而导致时间延迟可能被低估。

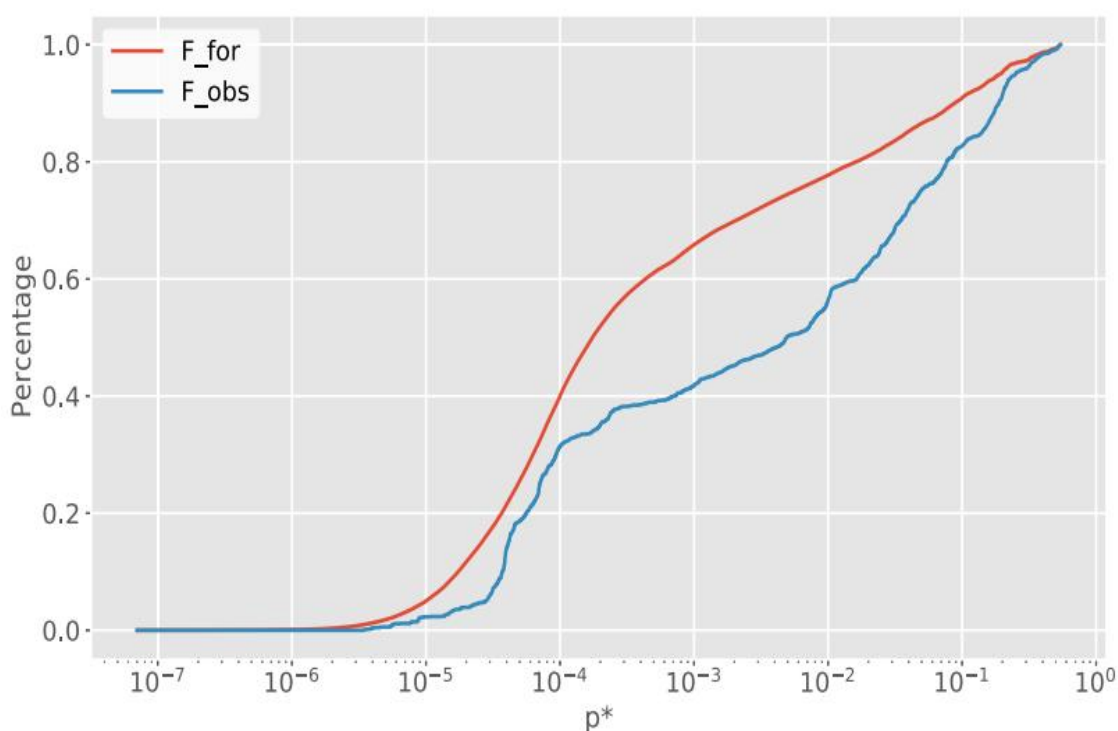


图 3 比较 OEF 所预期地震活动和实际观测地震活动的累积分布的可靠性图

目前，研究人员正在努力，以在不久的将来对系统进行一些调整。为了解释短期余震不完整性(STAI)，可以将 RESTORE 算法包含在 OEF-Italy

中，这将实现一种随机间隙填充方法，可检测 STAI 间隙，并重建时-空-震级域中的缺失地震。

同时，研究人员也分析了在 OEF-Italy 中通过贝叶斯方法估计模型参数的可能性。在 2009 年的拉奎拉序列和 2012 年的艾米利亚序列中，研究人员首次尝试了 OEF-Italy 模型的日常校准。结果发现，在这两种情况下，都观察到序列尾部地震数量的高估。这可能是因为参数是基于大量数据估计的，导致估计非常稳定，使模型的时间衰减低于序列的实际进程。未来，对特定区域参数估计可能是 OEF-Italy 系统参数更新的第一步。需要特别注意解决实时校准 OEF-Italy 模型的问题，因为这意味着巨大的计算成本。

此外，研究人员还计划在 OEF-Italy 系统中加入不同的模型，以明确地考虑不完整性，同时将更基于物理的模型纳入其中。所有这些改进都将有助于提高 OEF-Italy 的可靠性，并揭示这一用于意大利短期地震预报的实验比目前具有更大潜力。

来源：Spassiani I, Falcone G, Murru M, *et al.* Operational Earthquake Forecasting in Italy: validation after 10 years of operativity. *Geophysical Journal International*, 2023: ggad256.

## 通过分布式声传感对地震凹凸体破裂进行成像

利用全球地震阵列对特大逆冲地震进行破裂成像可揭示与频率相关的破裂特征，但高频辐射体起到的作用目前仍不清楚。对大量地壳地震的类似观测可以提供关键约束，但如果没有超密集的地区阵列则很难实现。来自美国的多名科学家采用分布式声传感技术对高频地震破裂辐射体进行了成像，他们通过将一条 100 km 长的暗光纤电缆转换成一个 10 000 通道的地震阵列，获得了 2021 年加州羚羊谷 (Antelope Valley)  $M_w6.0$  地震的四个高频子事件 (subevent) 的图像。通过将获得的结果与长周期地震矩释放和动态破裂模拟进行比较后，研究人员发现成像的子事件是由于断层凹凸体 (断层上更坚固的点) 的破裂所导致的，该凹凸体实质上调节着整体破裂行为。在级联序列中，断层凹凸体的破裂可以促进原本快要停止的断裂继续扩展。该研究表明，可以利用广泛存在的光纤网络作为高频地震天线，来系统地研究区域性、中等规模地震的破裂过程。结合动态破裂模型，将可以提高对地震破裂动力学的认识。相关研究成果发表在 2023 年 8 月的 *Nature*。

更好地了解地震破裂和断层物理特征需要不断改进地震成像技术，这是一个具有挑战性的遥感技术问题。利用跨大陆的密集地震阵列对远场波 (远震) 进行反向投影 (back-projection)，可以对大地震的复杂破裂传播过程进行详细研究。对于更频繁的小地震，高频信息在远场记录中丢失，而由于小地震波形复杂，近场成像同样具有挑战性。在活动断层周围特别设计的超密集地震阵列使反向投影成像能够分辨中等规模地震的较精细特征，但是这种情况是罕见的，因为地震附近通常没有超密集的地震阵列。因此，目前尚不清楚高频子事件在地壳地震中的频率，以及它们是否以及如何影响整体破裂过程。



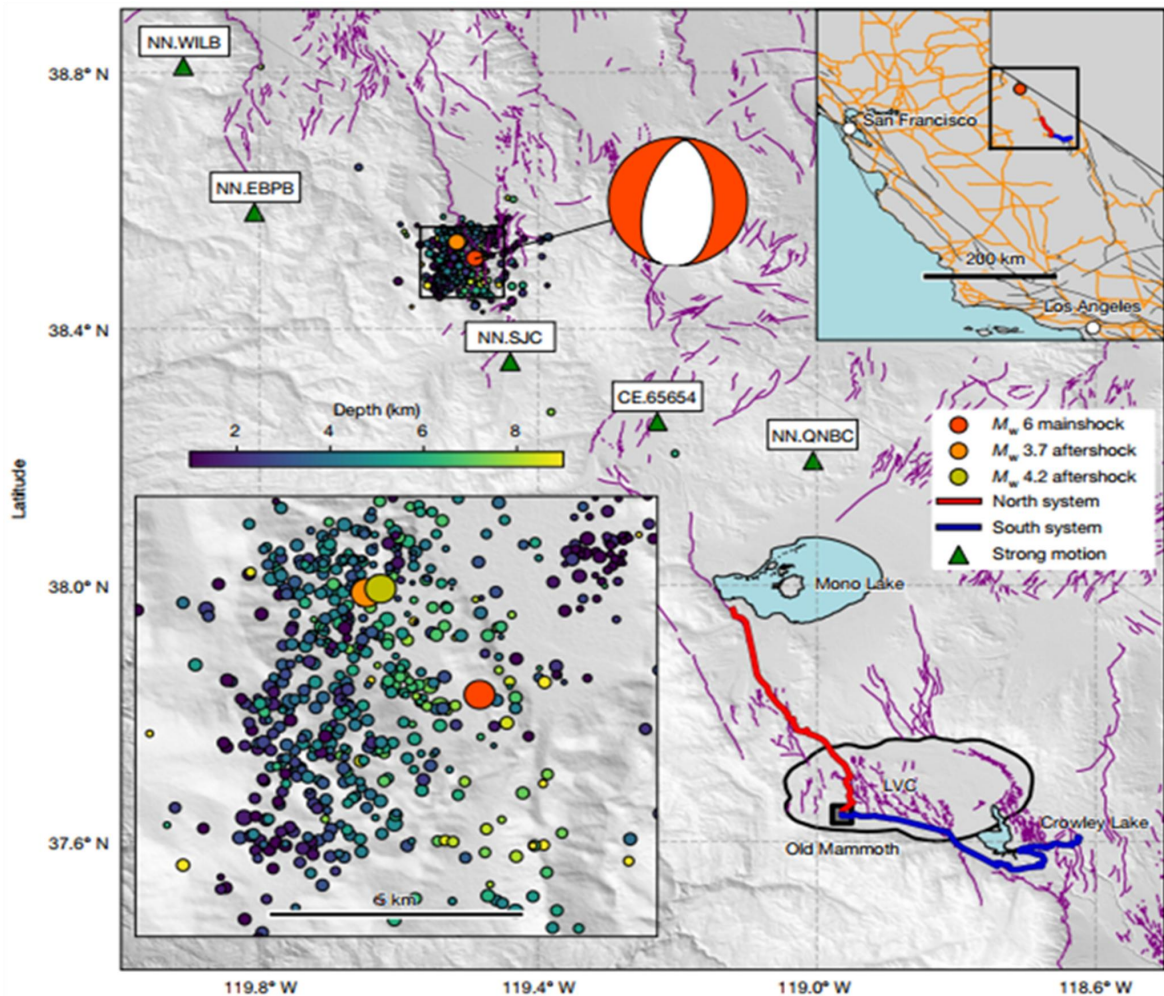


图 1 长 100 km 的光纤电缆作为密集 DAS 阵列，用于区域中等规模地壳地震成像

研究人员使用超密集分布式声传感（DAS，由预先存在的电信光缆转换而来）阵列记录的信息来对地震破裂过程进行成像，进而识别了 2021 年 7 月 8 日发生在靠近加州-内华达州边界，位于北加州羚羊谷 7.5 km 深度的 6.0 级地壳地震的高频辐射体。长 100 km 的长谷（Long Valley）DAS 阵列记录了这次地震，该阵列由两个 50 km 长的电信暗光纤组成，分别位于老猛犸镇（Old Mammoth）的北部和南部。该阵列的 10 000 个通道以 200 Hz 的频率连续采样，这些通道分布在 Mono 湖和 Crowley 湖之间的 10 米间隔内，主要沿着 US-395 高速公路。M<sub>w</sub>6.0 主震的 DAS 记录显示主要为不饱和的 P、S 波场（图 2a）。

成像结果显示了 6.0 级地震期间的四个高频子事件。相对较弱的第一个子事件 S0 与美国地质调查局 (USGS) 地震目录记录的主震震源时间和位置相似。第二个子事件 S1 发生在 S0 之后约 0.6 s, 在相关函数曲线中表现为一个明显的峰值。当反向投影到 S1 优选震源位置时, 峰值堆栈相干性最高。同样, 对于子事件 S2 和 S3, 在长孔径范围内的大量通道反向投影有助于很好地识别和定位它们, 尽管来自早期子事件的尾波导致相关峰不那么强。由于主震震源机制和余震分布表明存在一个明确的断层面, 研究人员通过对三维反向投影体进行切片, 进一步将子事件约束在断层面上。结果表明, 子事件位于 USGS 有限断层模型滑动分布范围中  $3\text{ km} \times 5\text{ km}$  的区域内 (图 3b)。

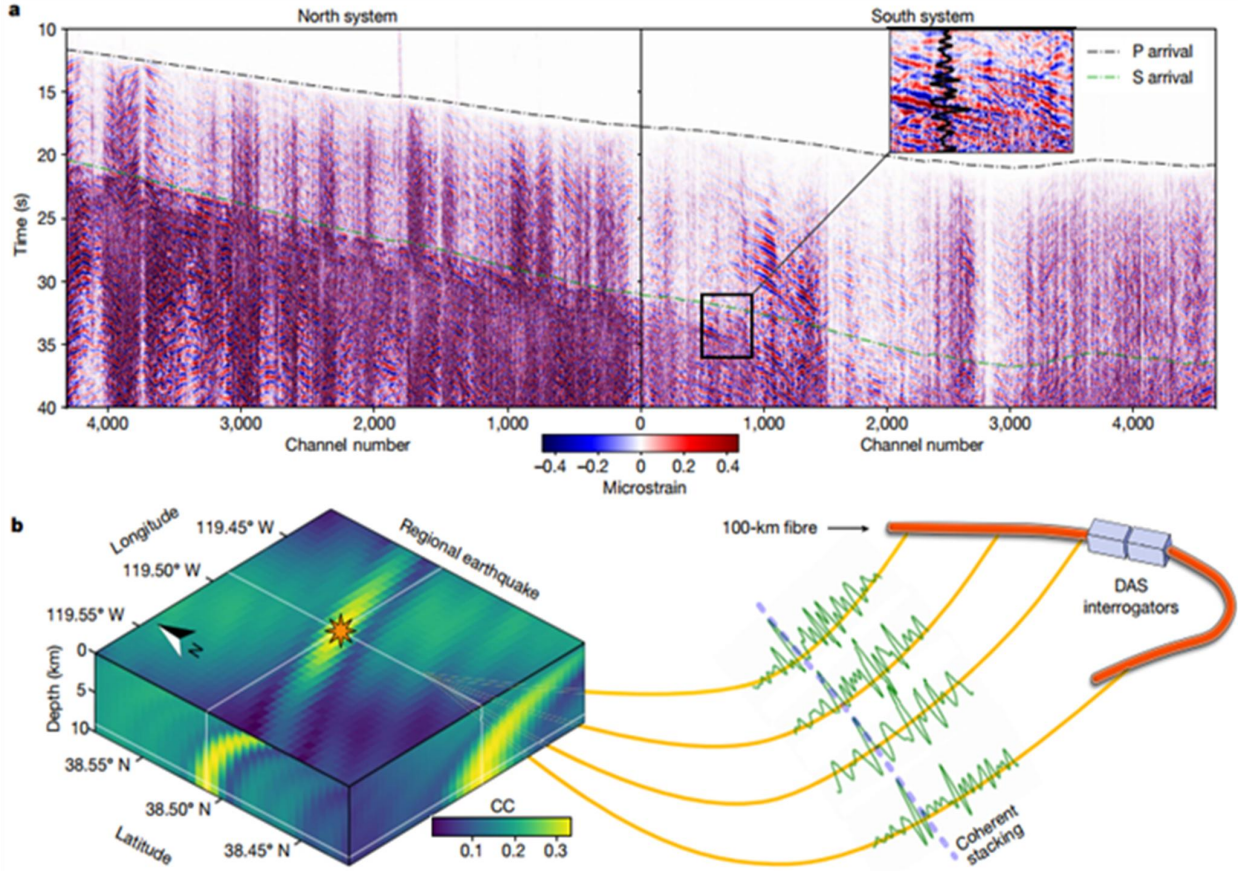


图 2 DAS 阵列的地震记录揭示了 6.0 级地震中子事件的存在

## 1. 所成像子事件的验证

四个成像子事件的位置和时间可以通过附近的常规地震记录进行独立验证。具体来说，可利用震源距离 70 km 内的五个当地强震台站的 S 波到达时间来验证。速度地震图的切向分量比位移地震图更突出高频能量，显示出几个强的 S 波脉冲（图 3c）。在每个台站，考虑到一维速度模型的不确定性，研究人员将四个子事件的到达时间移动了一个共同的量后发现，子事件 S1—S3 的预测到达时间与切向峰值振幅（分布于不同震中距离和方位角的速度地震图中）的时间之间存在显著的一致性（图 1、图 3c）。

虽然传统的地震台站在确定子事件的时间和位置方面很有帮助，但仅使用传统台站无法获得  $M_w6.0$  地震的详细反向投影图。使用靠近 DAS 系统的 7 个宽频台站，子事件 S1 勉强能够被检测，但分辨率低得多，其余三个子事件被噪声覆盖。DAS 系统优于传统的局域网络，因为它有大量高密度的通道可用于成像高频源的相干叠加。研究人员发现，检测的显著性随着通道数的增加而增加，但当通道数超过 1000 个时，检测显著性的边际增益变小。

## 2. 所成像子事件的物理起源

子事件的一些特征为它们的物理起源提供了线索。子事件代表 DAS 成像的高能辐射飞溅（splash），表明破裂过程中的局部突变。这种高频辐射可能是由几种类型的断层非均质性引起的，这些非均质性会导致破裂过程中的突变，包括断层摩擦特性和断层几何形状。研究人员将来自高频 DAS 反向投影的推论与矩释放率（moment-release rate）的低频特征进行了比较，结果发现：①子事件发生在总的力矩释放率（对应于断层上的综合滑动增量）增加时，说明它们总体上促进了破裂；②最大的子事件 S3 发生在瞬间释放率显著降低之后；③子事件 S3 之前也有地震破裂速度的降

低，尽管子事件 S0 和 S1 之间以及子事件 S0 和 S2 之间的传播速度约为横波速度的 70%~80%，但在子事件 S3 之前，破裂速度减慢到横波速度的 30% 左右，说明在子事件 S3 发生之前，某些东西阻碍和延迟了破裂；④子事件 S3 之后是地震中矩释放的第二大峰值。

这些观察结果表明，子事件的发生是由于较强断片（即凹凸体）的破裂。这些断片可能先作为临时的凹凸体或破裂障碍（取决于它们的震间载荷大小），随后受到附近动态滑移的载荷而突然破裂，并推动能量的释放，从而促进破裂的传播。这种更强的局部断片的存在可能是由于局部断层的非平面性，被压缩的断层凸起部分导致更高的断层法向应力，因此摩擦阻力更高。

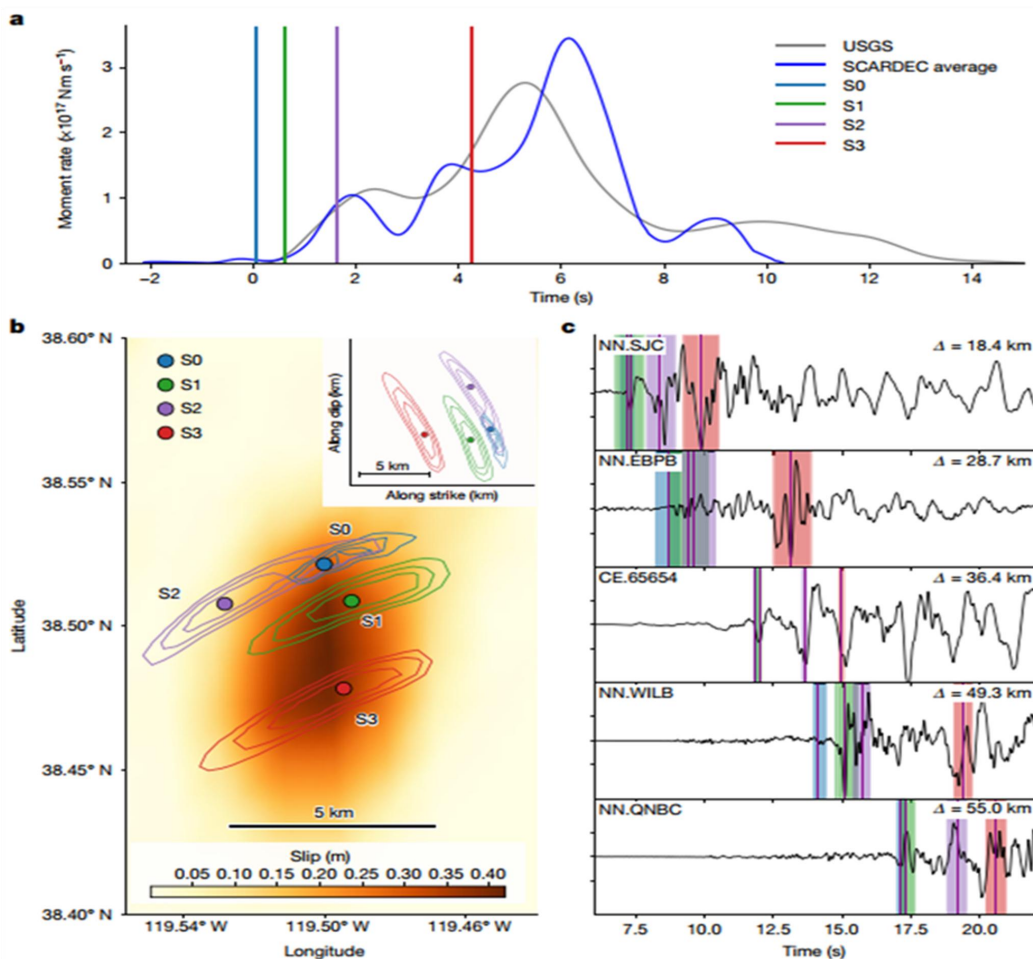


图 3 与低频有限断层反演和区域地震台站记录相关的子事件成像

### 3. 破裂动力学方面的推断

为了说明具有局部较强断片的断层如何导致具有子事件的破裂动力学，并匹配地震的整体低频特性，研究人员在速率-状态断层上进行了动态破裂模拟。结果显示，随着凹凸体大小的增加，子事件震级也越来越大。模拟结果再现了几个关键的观测结果：凹凸体的破裂辐射高频滑动扰动，这在时间上与观测到的子事件相匹配（图 4a、4b）。

模拟结果还表明，断层凹凸体（或更大范围的非均质性）可能控制破裂的传播和地震矩的释放。如果从模型中去除导致子事件 S3 的凹凸体（图 4c、4d、4h），矩释放就会失去双峰特征，变得更小。如果凹凸体改变了摩擦特性，降低了其峰值阻力，使其更接近预应力水平，则凹凸体不再阻碍破裂，将消除观察到的破裂速度和矩释放的延迟。

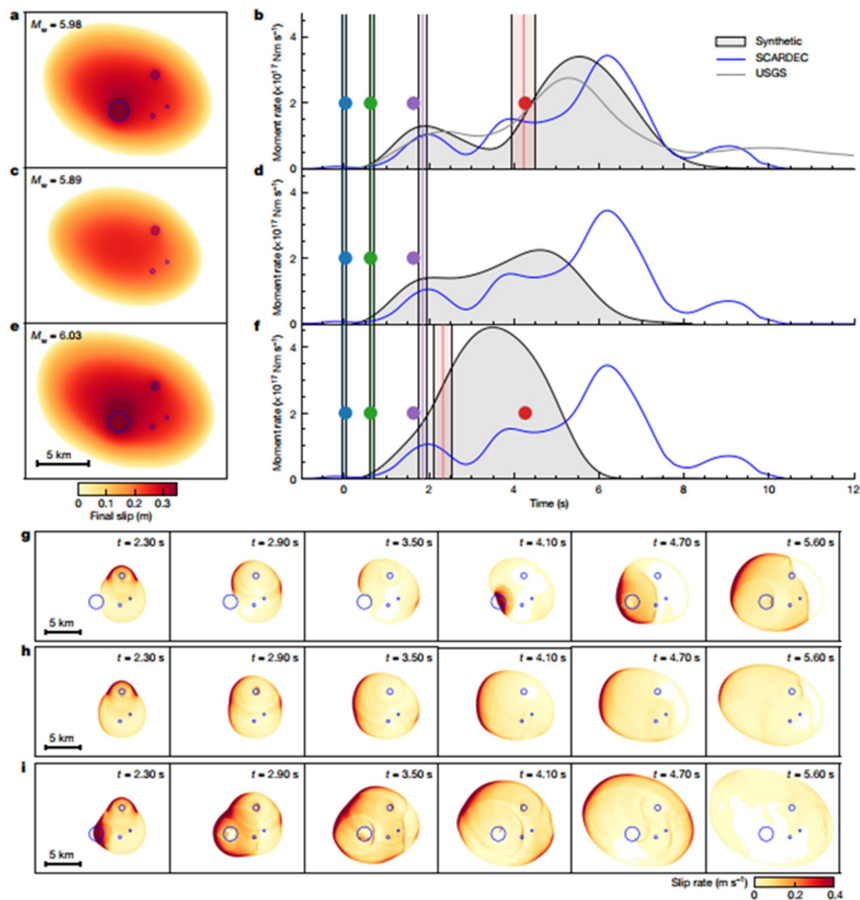


图 4 动态破裂模型揭示较强局部断片（凹凸体）断裂导致的子事件及其对破裂的影响

尽管该研究表明，具有更大凹凸体的断层模型具有与所研究  $M_w6.0$  地震的高频 DAS 反向投影、低频矩率释放、有限断层反演一致的特征，但对地震破裂研究而言，其他物理机制（如复杂的断层几何形状或多种因素的组合）也可能提供另一种解释。未来的工作需要开展动态模拟和/或地震与大地测量数据的联合反演，以进行综合测试来检验所有可能的解释。

来源：Li J, Kim T, Lapusta N, *et al.* The break of earthquake asperities imaged by distributed acoustic sensing. *Nature*, 2023, 620(7975): 800-806.

---

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所