

# 地震科技前沿快报

2023 年第 11 期（月刊总第 58 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、利用地震阵列数据识别俄乌冲突中的攻击

地震仪的记录不仅包括地震，还包含爆炸等，这可以用来更好地分析战争的激烈程度。国际监测系统使用地震、次声和水声技术监测核爆炸，但要检测和定位低当量的军事攻击，就需要一个离爆炸源更近的地震台阵。来自挪威的科学家在 *Nature* 上发文，展示了由乌克兰当地的地震台站记录下的乌克兰北部爆炸产生的地震波，其可以被用来自动识别接近实时的袭击，这提供了一个前所未有的冲突活跃地区的观察方式。在 2022 年 2 月至 11 月，在基辅、日托米尔和切尔尼戈夫等检测到 1200 多次爆炸，同时还识别出了准确的爆炸时间、地点和规模。研究结果表明，地震数据可以成为客观持续监测战争的有效工具。

### 2、前震特性揭示实验室慢速和快速地震的成核过程

了解地震活动与地震成核过程之间的关系是地震学的一个基本目标，这对地震预警系统和地震预测具有重要意义。来自美国的多名科学家利用实验室粘滑实验进行了跨越慢速和快速滑移速率频谱的高分辨率声发射波形测量，以此来探测实验室前震和成核过程的时空特性。结果显示，在

慢速粘滑过程中，波形相似度在整个地震周期中没有演变。相反，在快速实验室地震之前，波形相似度在地震周期的后期快速增加，表明断层随着滑动速度的增加开始失稳。这些观测结果表明前震的时空演化与断层滑动速度有关。

### 3、地震群内的快速迁移幕

自然震群和注入诱发地震的震源通常表现出系统性迁移，这被认为是地震触发机制的一种表现。来自捷克和德国的多名科学家分析了这些迁移幕的可能触发机制，并提出了一种区分内部和外部触发力的图像方法。研究人员提出了两种解释震源扩展的模型：裂缝模型和破裂前缘模型。研究人员开发了一种自动算法来检测地震活动中的快速迁移幕，并将其应用于加利福尼亚、西波西米亚和冰岛的自然震群目录。结果显示，与流体引起的地震活动相比，快速迁移幕在天然震群中相对频繁。地震矩增长和激活断裂区与模型预测结果比较发现，破裂前缘模型和裂缝模型都能很好地解释观测到的迁移，且破裂前缘模型与实际数据更加吻合。在动态孔隙形成导致的无震滑移或流体流动的协助下，相邻地震事件之间的应力传递可以驱动快速迁移幕的出现。

## 利用地震阵列数据识别俄乌冲突中的攻击

地震仪通常被学术界用来研究当地或远处的地震，但同时它也包含了区域和全球爆炸的重要观测结果，这些观测结果可以用来更好地分析地区冲突。国际监测系统使用地震、次声和水声技术监测核爆炸，但要检测和定位低当量的军事攻击，就需要一个离爆炸源更近的传感器网络。因此，获取可用于有效监测冲突活跃地区的全面、客观的数据仍然是一项重大挑战。来自挪威的多名科学家展示了由乌克兰当地的地震台站网络记录下的乌克兰北部爆炸产生的地震波，其可以被用来自动识别接近实时的单独袭击，这提供了一个前所未有的冲突活跃地区的观察方式。在 2022 年 2 月至 11 月，在基辅、日托米尔（Zhytomyr）和切尔尼戈夫（Chernihiv）检测到 1200 多次爆炸，同时还识别出了准确的爆炸时间、地点和规模。研究人员确定了一系列与各种类型的军事袭击有关的地震声信号。研究结果表明，地震数据可以成为客观持续监测地区冲突的有效工具。相关成果发表在 2023 年 8 月的 *Nature*。

尽管许多媒体报道了乌克兰战争造成的破坏，但要全面、公正地了解持续不断的军事袭击是一项重大挑战。卫星图像可以提供乌克兰军事袭击的高分辨率图像，但是，这需要事先了解图像的时间和位置，并且该技术无法提供实时的、大范围的覆盖图。目前，地震和次声数据具有较强的适用性，可以用于地区冲突的监测。然而，到目前为止，由于缺乏合适的数数据，还没有研究人员对正在发生军事冲突地区的地震和声学信号进行实时分析的案例。

国际监测系统在乌克兰基辅西北约 100 km 处有一个由乌克兰国家数据中心运营的地震阵列，名称为 Malyn AKASG。研究人员利用该阵列记录的地震信号，实施了一个连续监测方案，以自动检测和定位爆炸。数据

不断传输到维也纳的国际数据中心，然后从那里传输到挪威进行自动处理，产生接近实时的结果。基于地震信号，研究人员进一步在基辅西北部地区获得高精度的爆炸事件位置和时间，从而能够以前所未有的精度观察冲突的发展。

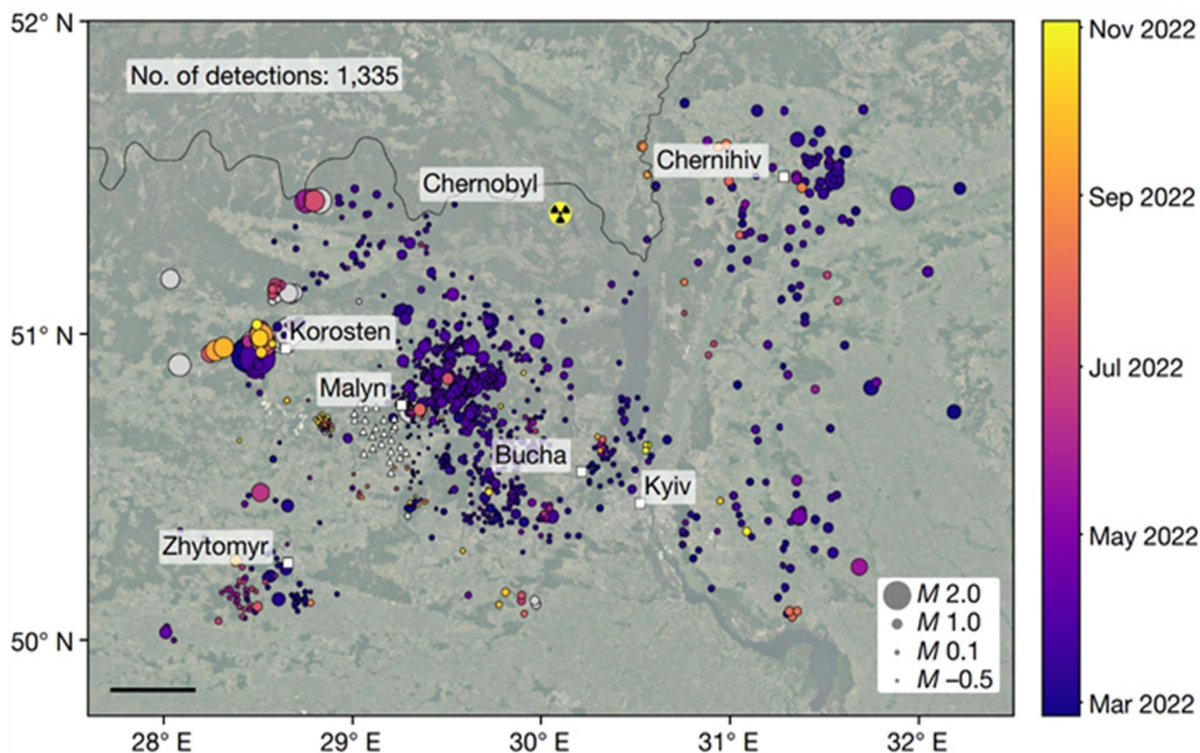


图1 2022年1月至11月的自动地震检测图

### 1. 在乌克兰北部监测到的爆炸

从2022年2月24日至11月3日，研究人员在马林（Malyn）阵列周围（包括日托米尔、基辅和切尔尼戈夫州部分地区在内）约300 km×222 km的区域自动检测和定位了1282次爆炸（图1）。为了建立检测基线，研究人员处理了战争开始前的数据（从2022年1月1日开始至2022年2月24日的数据），从中观测到53次日间爆炸，这与该地区的采矿和采石场活动有关。俄乌冲突发生后，在日托米尔、科罗斯滕、基辅西北部、切尔尼戈夫和马林等的大都市区周围有大量爆炸发生。最激烈的爆炸发生在马林的东北部。在2月24日至3月31日期间，平均每天观测到29起爆炸，3

月 7 日爆炸活动最多，共发现 64 起。最后一次猛烈轰炸发生在 3 月 31 日，而在 4 月 1 日仅发现两次爆炸。图 3 显示了从战争前的采矿爆炸到激烈的军事冲突情况。

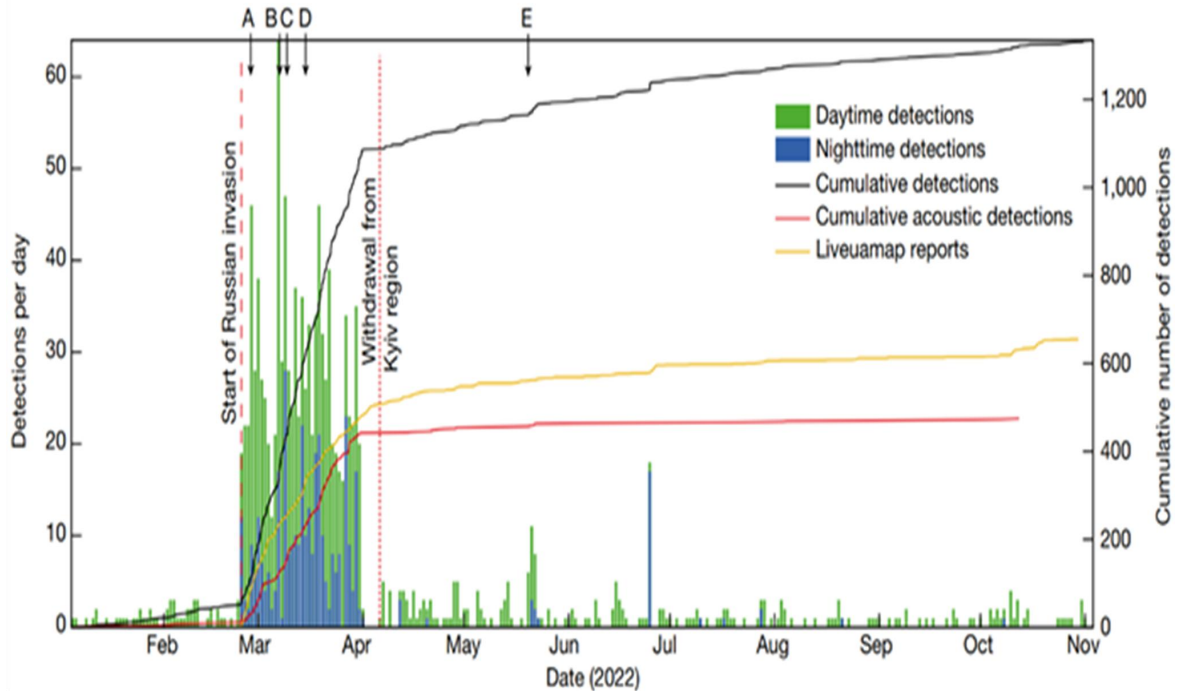


图 2 自动地震检测的时间线

爆炸产生的声波提供了对爆炸源参数的关键约束。通过在受声波传播速度限制的时间窗口内叠加地震包络线，研究人员确定了 29% 的地震事件的清晰声学特征（图 2 中的红线和图 4f 中的绿点），并进一步约束爆炸的空间和时间信息（图 4a 和图 4e 中的内置图）。值得注意的是，并非所有在波形数据中观察到的事件都能被接收到地震信号，有些事件只能从它们的声学特征中检测到。这类事件最可能对应了在更高的高度、距离震源较远的地方 (>100 km) 或具有较低当量的爆炸。

## 2. 数据检验

检测到的爆炸信息能够被用来证实已报道的爆炸，或为未报告的爆炸提供全新的资料。例如，5 月 20 日 09:37（世界标准时间）的导弹爆炸。

在这些报告发布前大约 4 小时，研究人员已经自动识别出在 05:39:59，05:40:11 和 05:40:23（世界标准时间）同时发生的三起爆炸。尽管自动定位的位置误差为 1.4 km，但是手动信号分析定位误差被控制在 100 m 以内（图 4e）。

对监测到的爆炸目录与公开报道进行比较后，发现两者在时间轴上具有非常相似的趋势。在最初的冲突之后出现了爆炸高峰（图 2）。除 2022 年 2 月 25 日至 27 日外，在该地区冲突最活跃的时期（2 月至 3 月）检测到的爆炸数量总是超过报告的袭击数量。尽管报告的袭击事件与检测到的爆炸事件大体一致，但值得注意的是，报告中数据的时间和地点都存在很大的不确定性，因为它们通常基于轨事数据源。

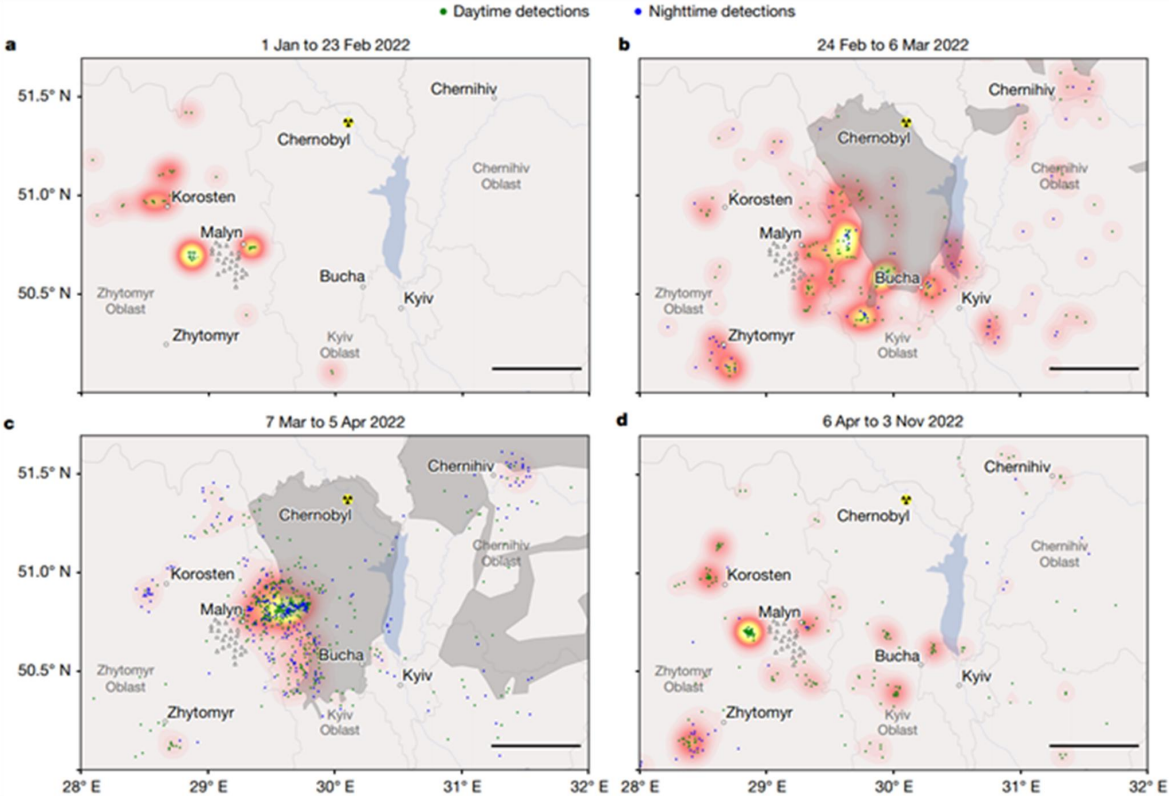


图 3 自动地震检测各时间段的密度图

### 3. 爆炸规模

根据地震数据估计爆炸当量是一个具有挑战性的研究领域，目前有一些基于经验观察和基于物理模型的方法。最近，结合地震和声学观测的方法在解决爆炸的规模和高度方面取得很大进展。但是，由于马林阵列包含除一个站点之外的所有站点的垂直分量数据，这种方法受到了限制。研究人员通过自动计算地震震级来提供爆炸强度的快速评估，自动获得的局部震级在-1.25~2.24 之间（图 1）。使用人工分析对自动获得的震级进行抽样检查，结果大致一致，具有大约 0.3 个震级单位的误差。在人工分析中，震级的下限估计值似乎更接近-0.6，对应的爆炸当量在 0.03~9.00 kg TNT 之间。

OF45 型 152 mm 炮弹的爆炸当量为 7.65 kg TNT，这表明估计的震级上限更接近事实。最大爆炸震级为 1.7，对应于 2022 年 3 月 10 日空袭（图 4c）。这次爆炸的当量估计在 352~3083 kg TNT 之间。考虑到伊斯坎德尔弹道导弹的爆炸当量约为 700 kg TNT，估算的最大当量过高，但估计的较低值对于这样的空袭肯定是可行的。

### 4. 冲突监测的新工具

研究人员对 2022 年俄乌战争期间收集的地震数据进行了分析，这是使用地震数据近实时监测冲突的第一个案例。检测到的与军事有关的爆炸分布也完全符合军事活动密集区或单独炮击和导弹袭击地区的分布。尽管获得的爆炸目录并不详尽，但全面程度超过了公开报道的事件，表明了这种方法在验证报道和作为原始数据源方面的价值。这种自动化地震相位检测方法提供了乌克兰北部区域（距离马林阵列<100 km）爆炸的精确空间（误差小于 5 km）和时间（误差小于 1 s）信息。在后处理过程中，对声相位进行自动检测和分析进一步提高了空间精度。同样的方法可以应用于

其他冲突地区附近的阵列或密集传感器网络。这一独特数据集还可以应用于火炮或弹药类型的自动表征。

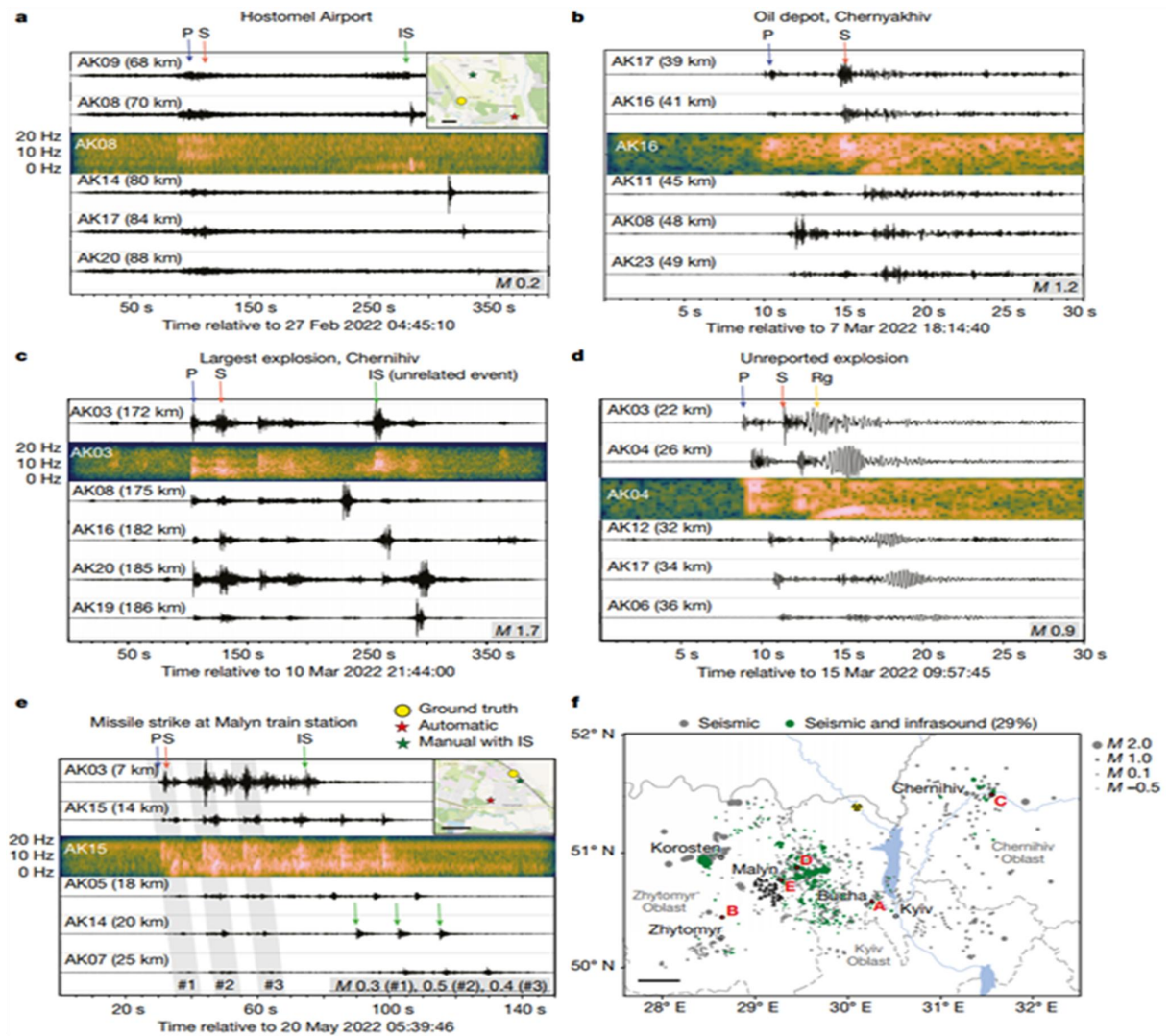


图 4 来自单个爆炸的数据示例

来源：Dando B, Goertz-Allmann B, Brissaud Q, *et al.* Identifying attacks in the Russia–Ukraine conflict using seismic array data. *Nature*, 2023: 1-6.



## 前震特性揭示实验室慢速和快速地震的成核过程

了解地震活动与地震成核过程之间的关系是地震学的一个基本目标，这对地震预警系统和地震预测具有重要意义。来自美国的多名科学家利用实验室粘滑实验进行了跨越慢速和快速滑移速率频谱的高分辨率声发射（AE）波形测量，以此来探测实验室前震和成核过程的时空特性。研究人员测量了整个地震周期中 AE 之间的波形相似性，以及成对差分走时（DDT）。结果显示，相对于快速地震，慢速地震之前的 AE 具有较小的 DDT 和较高的波形相似性。在慢速粘滑过程中，断层从未完全闭锁，波形相似度和 DDT 在整个地震周期中没有演变。相反，在快速实验室地震之前，波形相似度在地震周期的后期快速增加，DDT 减少，表明断层随着滑动速度的增加开始失稳，AE 开始聚结。这些观测结果指出了实验室慢速地震和快速地震成核过程的关键差异，并表明实验室前震的时空演化与断层滑动速度有关。相关研究成果发表在 2023 年 6 月的 *Nature Communications*。

阐明地震成核的物理过程是地震学的基本目标，也是改进地震早期预警系统和了解前震序列与地震相互作用的关键。前震是主震之前发生的小地震，被认为是成核过程的标志，因此它们的特性和演化可以为即将到来的主震提供洞察。与构造地震不同，实验室地震发生之前通常会在各种条件下以震前 AE 的形式发生强烈的前震活动。AE 活动通常发生在地震周期的所有阶段，但随着载荷转变为部分无弹性（从而导致破裂），断层滑移率开始增加，AE 活动通常迅速增强。AE 特性被认为受到多种因素的调节，包括断层带非均质性、剪切应力、断层粗糙度、断层滑移速率和断层方向等。

目前，尚不清楚实验室前震序列是否描绘了演变成灾难性破坏的几何断层带的结构。一般而言，粒状断层带中剪切变形的局部化是调节摩擦行为的关键因素。然而，在实验断层带的粘滑不稳定性出现之前，这种局部化过程的证据很少。其中的问题是，对 AE 的时空特性进行成像需要精确的地震位置。由于复杂的射线几何、次优的传感器覆盖范围以及相位到达时间的巨大不确定性，声发射位置的反演具有挑战性，特别是在宽度有限的泥断层带（gouge fault zone）中。

在本项工作中，研究人员通过 500 多个实验室地震周期记录的 AE 数据来测量波形相似性和 DTT，以研究前震的演变过程。在粘滑实验中，使用双直剪（DDS）配置来剪切面积为  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  的实验断层带。另外，还将 AE 模板作为时间函数进行互相关，来测量并量化波形相似性，并通过测量地震事件对之间的 DTT 来跟踪事件位置的相对变化。

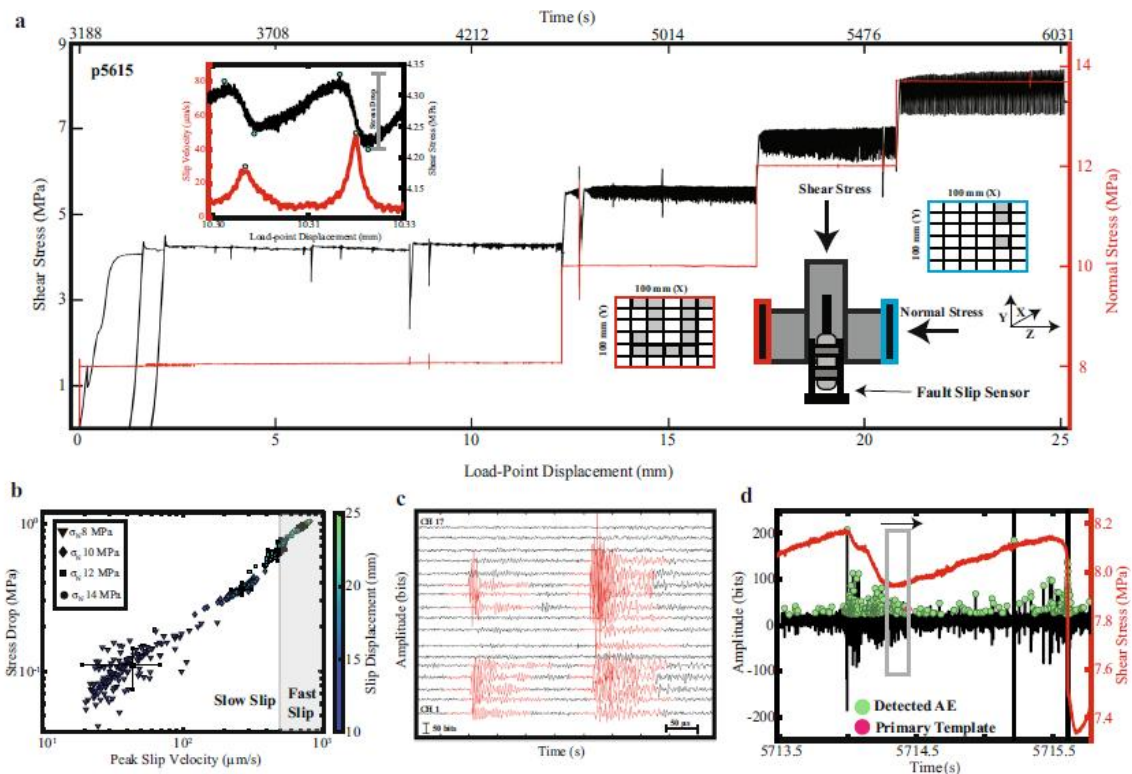


图 1 实验室地震的设置和演化。a：实验中剪切应力和法向应力随载荷点位移的变化；b：应力降关于粘滑循环中峰值滑移速度的函数；c：所有站点的连续声发射数据；d：通道 2（黑色）

的连续 AE 信号以及检测到的 AE(绿色)和剪切应力(红色)

在粘滑特征方面, 研究人员通过系统地调节法向应力, 产生粘滑不稳定性, 峰值断层滑动速度范围为 20~1000  $\mu\text{m/s}$ 。分析表明, 较高的法向应力会产生具有较大应力降和较快峰值滑动速度的事件, 这与之前的实验室研究和理论论证一致。在波形相似性方面, 对于 8 MPa 正应力下的慢速实验室地震, 波形相似性和 DTT 在整个地震周期中基本恒定, 快速地震下波形相似性和 DTT 则表现出随时间变化的特性。对于慢速和快速滑动不稳定性, 断层剪切应力和滑动速率的演化也不同。

对于构造断层, 如果波形表现出高度相似性(例如互相关系数 $\geq 0.95$ ), 则此类事件被称为重复地震, 这也同样适用于实验室地震。在实验室地震中, 有高波形相似性和低 DTT 的 AE 是前震局部化的证据。通过跟踪地震周期中 DTT 的变化和波形相似性, 可以监测事件位置的相对变化。研究人员将波形数据与断层滑移速率测量相结合, 并提出了一个微观力学模型, 以此来解释波形相似性和 DTT 的时间变化。在实验中, AE 可能是由以下微观力学过程产生的: ①岩石间凸起物的破坏; ②断层泥内形成的接触结(contact junction)的滑动。实验结果表明, 大部分声辐射很可能来自泥层局部区域(毫米大小)的接触结。

对于慢速粘滑事件, 断层在整个震间期蠕变, 并且波形相似性和 DTT 在整个地震周期中保持恒定, 这说明 AE 并未在空间中系统地演化。在慢速事件中成核的 AE 在整个地震周期中具有较低的 DTT 和较高的波形相似性。随着断层接近破裂, 沿断层带的局部化区域将不会演化。此外, 断层滑移速率在整个震间期保持较高水平。断层滑动速率、DTT 和波形相似性共同表明, 震间断层蠕变与局部剪切变形相关。

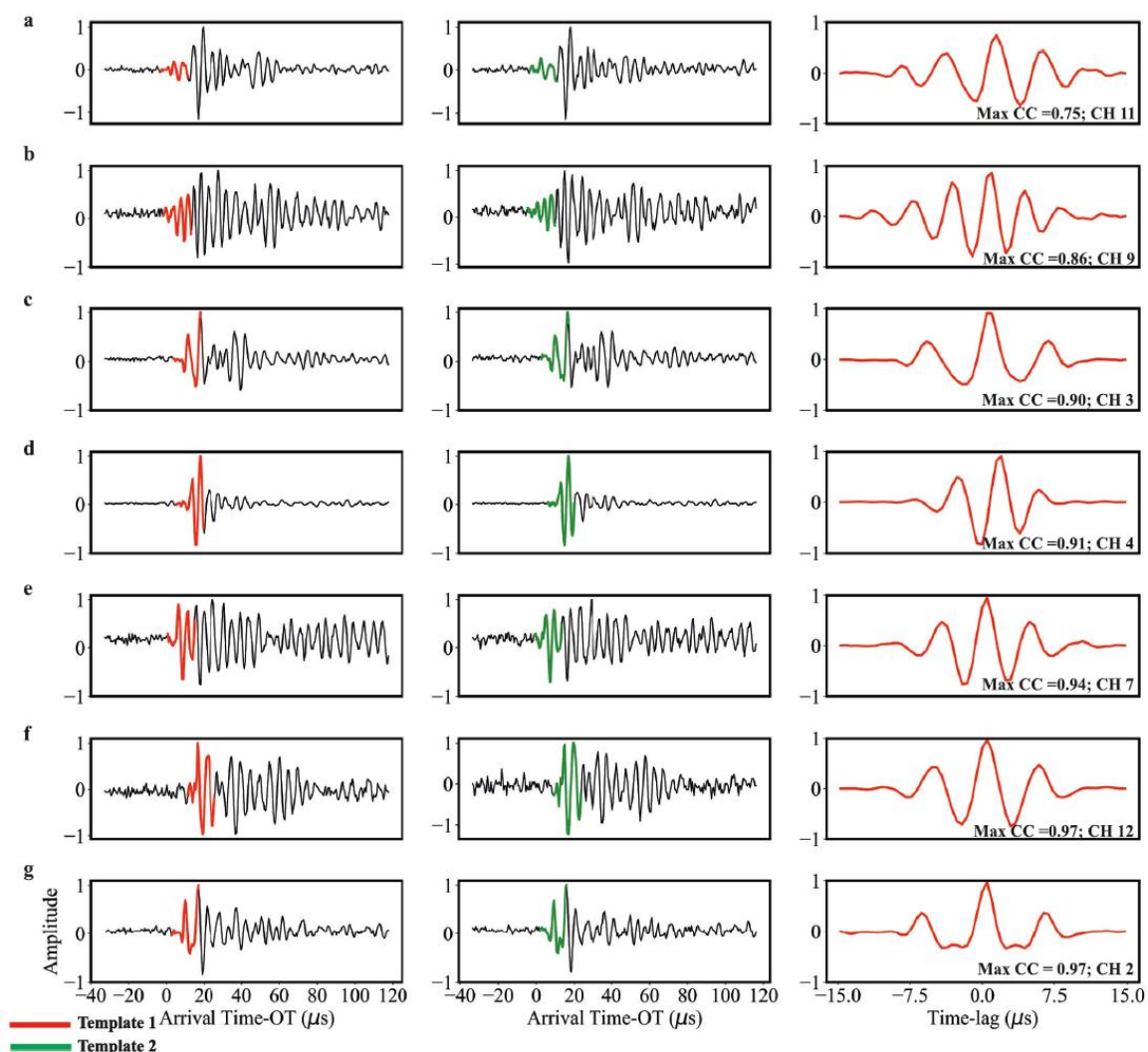


图 2 波形相似度测量

另一方面，对于快速粘滑事件，随着断层接近破裂，普遍性剪切变形转变为局部化剪切变形。在地震周期的早期阶段，DTT 增加，波形相似度降低，表明 AE 在空间上扩散。一旦断层接近破裂，DTT 就会减少，波形相似度就会增加，表明 AE 在空间上变得越来越近。低 DTT 和高波形相似性似乎与高滑动速度密切相关，并且是局部变形的指标。这些发现表明，随着破裂的临近，AE 会从更宽的破碎带迁移到断层核。本试验表明，断层滑动速度在调节声发射特性中发挥着重要作用。此外，波形相似度与震间断层滑移速率成正比，而 DTT 与震间滑移速率成反比。

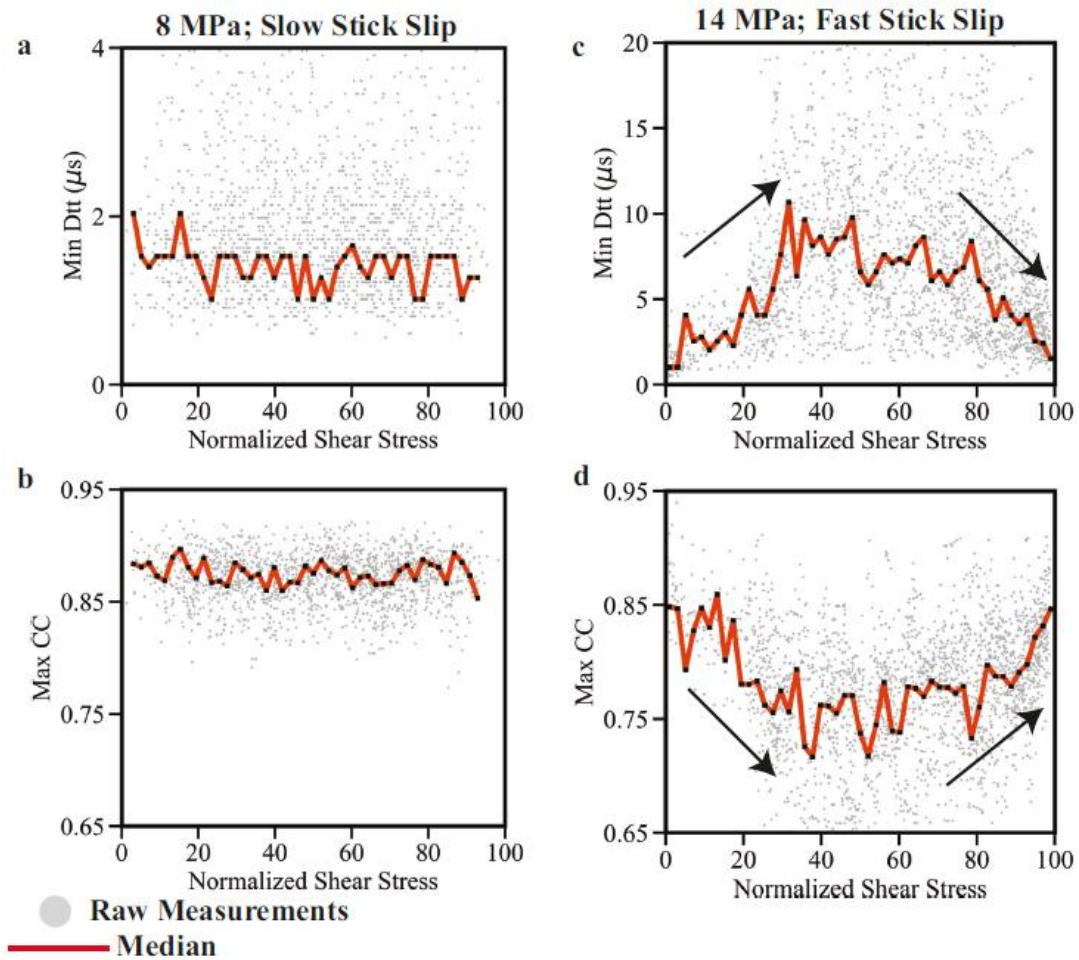


图3 整个地震周期中 DTT 和波形相似度的演变

具有低 DTT 和高波形相似性的 AE 可能代表小断片集或一个大断片的破裂。区分这两种情况的一种方法是根据 AE 的相似性来识别它们的族 (family)。如果假设波形相似性的变化是由 AE 位置的差异驱动的, 那么族的数量可以作为位置数量的代表。为了测试这个方法, 研究人员将各粘滑循环在震间期所有的 AE 对进行交叉关联, 并将这些数据输入到凝聚层次聚类 (HAC) 算法中, 以识别 AE 的族。结果表明, 在整个震间期, 对于慢速和快速粘滑事件, 存在一系列断片失稳, 同时, 慢速粘滑事件比快速粘滑事件产生更多的位置。因此, 在慢速粘滑过程中, AE 可能是从整个断层带的局部化区域集中传播出来的, 这反过来又在地震事件对之间

产生低 DTT 和高波形相似性。快速粘滑地震事件还显示，随着同震破裂的发生，族的数量略有增加。

尽管实验室中的声发射是沿着长度为几毫米结构的微观力学过程的结果，而构造地震发生在更大、更异质的断层上，然而，通过整合断层带位移和地震辐射的高分辨率测量，实验室实验提供了对控制断层上地震活动时空模式的基础机理的关键见解。实验结果表明，具有高波形相似性和低 DTT 的震前 AE 是断层滑移和实验室地震成核的特征，同时支持了预滑模型中前震是断层蠕动的表现这一观点。

震前断层带和地震特性的系统变化支持了地震发生之前有一个预备阶段的观点。本研究证明，波形相似性和 DTT 可以成为探测地震成核和前震特性的有用工具。实验室结果与几项现场研究一致，表明大的地壳地震之前存在前震/地震活动的增加和聚结。此外，越来越多的证据表明，断层滑移速率在实验室规模的前震特性调节中发挥着重要作用。同时，本研究进一步表明，高波形相似性和低 DTT 是震前断层滑动的主要特征，并且可能是跟踪断层滑移速率变化和沿构造断层带的前兆过程的有用工具。

来源: Bolton D C, Marone C, Saffer D, *et al.* Foreshock properties illuminate nucleation processes of slow and fast laboratory earthquakes. *Nature communications*, 2023, 14(1): 3859.

## 地震群内的快速迁移幕

自然震群和注入诱发地震的震源通常表现出系统性迁移，这被认为是其触发机制的一种表现。在许多情况下，地震分布的总体增长伴随着短暂的快速迁移，但其起源仍然没有得到充分的认识。来自捷克和德国的多名科学家分析了这些迁移幕（**migrating episode**）的可能触发机制，并提出了一种区分内部和外部触发力的图像方法。研究人员还分析了累积地震矩的演化与破裂区域的理论关系，提出了两种解释震源扩展的模型：裂缝模型（**crack model**）和破裂前缘模型（**rupture front model**）。研究人员开发了一种自动算法来检测地震活动中的快速迁移幕，并将其应用于加利福尼亚、西波西米亚（**West Bohemia**）和冰岛的自然震群目录（已重新定位），以及注入诱发地震活动。结果显示，与流体引起的地震活动（小于5%）相比，快速迁移幕在天然震群中相对频繁（8%~20%）。地震矩增长和激活断裂区与模型预测结果的比较发现，破裂前缘模型和裂缝模型都能很好地解释观测到的迁移，且破裂前缘模型与实际数据更加吻合。幕的迁移速度约为1 m/s，但与持续时间负相关，这导致地震簇的最终大小相近。相对较低的应力降（100 Pa~1 MPa）表明，无震过程也对地震簇的增长也有贡献。在动态孔隙形成导致的无震滑移或流体流动的协助下，相邻地震事件之间的应力传递可以驱动快速迁移幕的出现。相关成果发表在2023年10月的 *Geophysical Journal International*。

震源迁移是注入诱发地震活动和地震群的共同属性，也是它们区别于余震序列区的特征。这可能与流体侵入或无震滑动等地震驱动机制有关，然而，地震迁移模式往往不仅表现出扩展的包络线，而且还表现出嵌入整体迁移趋势的快速增长幕。绝对迁移速度并不能确定快速迁移幕，相反，

它们出现在整个迁移包络线的后面，并且迁移速度高于包络线的迁移速度。到目前为止，这种快速迁移幕的特征和物理性质还没有得到很好的研究。

研究人员首先讨论了可能的地震和无震驱动机制，并提出了两种端元模型：裂缝模型和破裂前缘模型，基于这两种模型对累积地震矩和破裂激活面积进行了预测。研究人员进一步开发了一个基于距离-指数信息的、不假设任何特定时间依赖性的全自动程序，来检测地震数据中的重要迁移特征。然后，将新的检测算法应用于加利福尼亚、冰岛和西波西米亚的地震群，以及注入诱发地震活动中。随后，系统地描述了快速迁移幕的频率、时间、空间扩展和力矩释放情况，并将它们的模式与裂缝模型和破裂前缘模型的不同期望值进行了比较。

### 1. 地震迁移

地震迁移的驱动力可以是外部的，也可以是内部的。在外部驱动力驱动的情况下，地震活动的增长受无震的、时间依赖性的驱动机制控制，流体注入或无震滑移都是可能的驱动力。而在内部驱动力驱动的情况下，地震活动的增长是由地震破裂本身控制的。这种自驱动过程可以解释余震序列和快速迁移幕，地震破裂在破裂的表面和周围产生孔隙空间和破坏，同时发生动态和静态同震应力变化。应力变化强度在破裂尖端的前端最大，因此，假设存在均匀的介质性质和预应力，新的破裂很可能在先前的破裂附近成核。

地震迁移模式通常用坐标-时间 ( $x-t$ ) 域表示，这里时间  $t$  为自变量。然而，这需要假定时间控制着地震发生的过程。因此，这些图像适合于识别和表征地震的外部驱动力。除时间外，事件顺序也可用作自变量。在这种情况下，研究生成了一个坐标-事件-指数 ( $x-N$ ) 图。这种方法假定地震破裂控制着地震活动的变化，即这个过程是自驱动的。



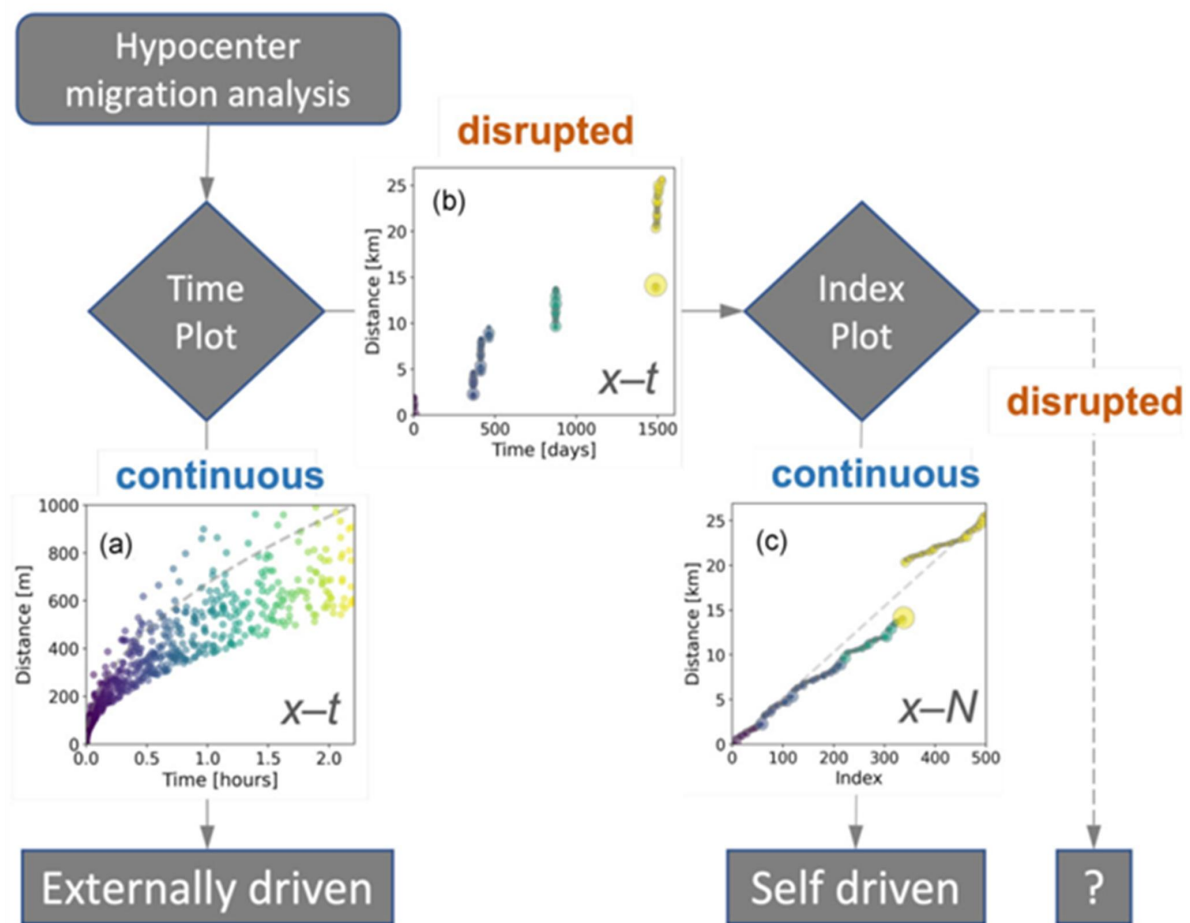


图1 利用坐标-时间 ( $x-t$ ) 和坐标-指数 ( $x-N$ ) 图识别背景驱动机制的流程

对  $x-t$  和  $x-N$  图的综合分析有助于更详细地了解具体过程，这些图还可以被用来指示无震驱动机制和自驱动过程。尽管外部驱动力驱动的地震活动增长模式在  $x-t$  图（以及  $x-N$  图）中是连续的，但是内部驱动的地震活动（自驱动）仅在  $x-N$  图呈现连续增长趋势，而在  $x-t$  图上表现为中断式增长。该观察结果可以直观地区分不同类型的驱动力。

## 2. 自驱动地震的特征

预测激活区增长的不同模型可以帮助认识自驱动地震活动的增长。研究人员讨论了以下两种端元情况，即裂缝模型和前缘模型。裂缝模型基于有效应力降法，它假设裂缝可以被地震簇取代，从而释放总应力。裂缝模型假定滑动在破裂区域内持续进行，相反，在前缘模型中，地震活动被假

定仅在裂缝尖端触发。先前研究表明，前缘模型解释了在  $x-N$  图中观察到的线性或平方根式的事件迁移模式。

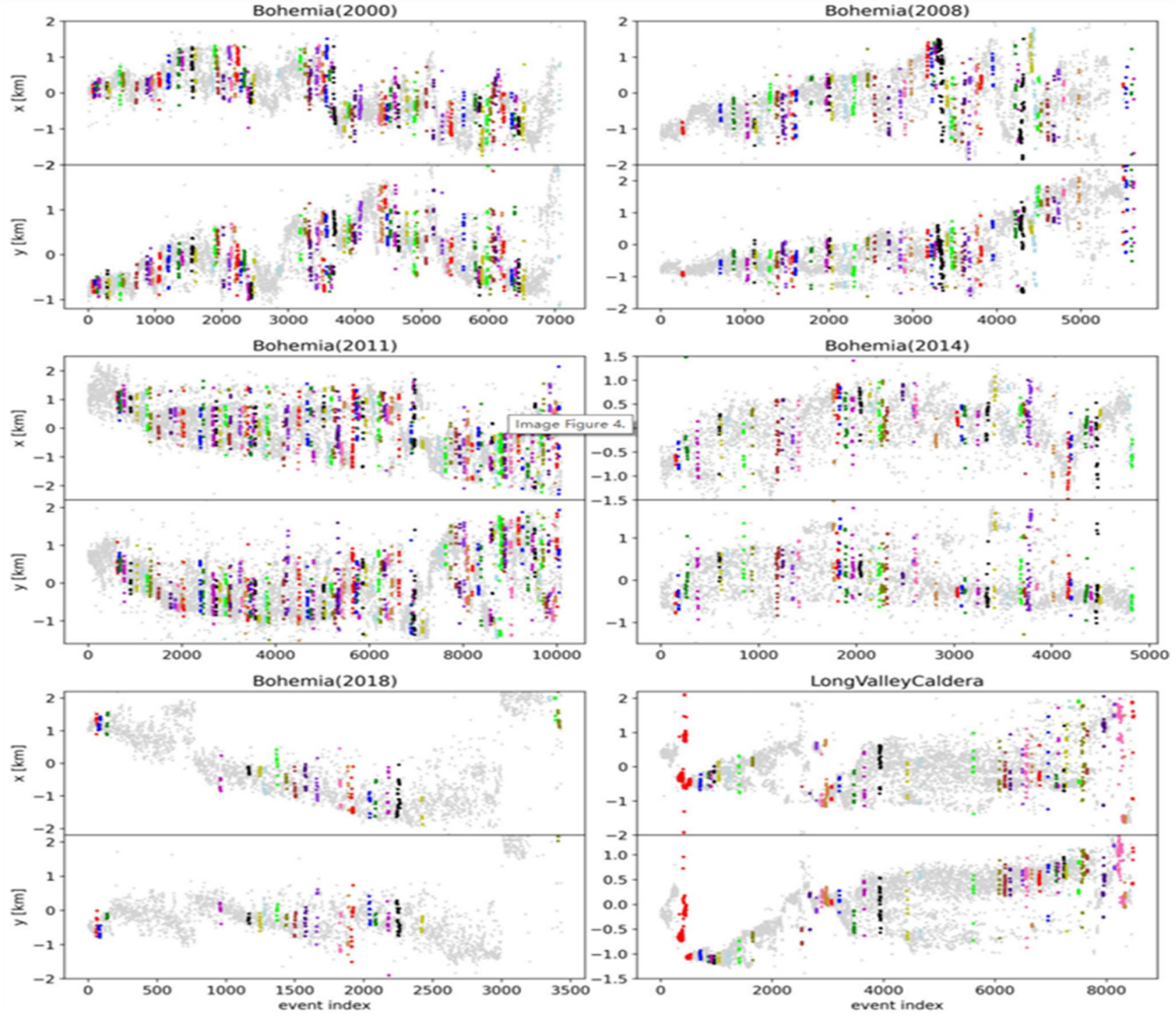


图2 自然震群中具有迁移模式的簇（冰岛除外）

### 3. 快速迁移幕分析

研究人员利用开发的自动迁移检测算法分析了两类地震数据，即在西波西米亚、冰岛和加利福尼亚观测到的自然地震群，在法国 *Soultz-sous-Forets*、瑞士巴塞尔和荷兰赫尔辛基的深层地热项目中记录到的注入诱发地震活动。算法检测到 480 次不同的迁移幕，共包含 7725 次地震。检测到的事件在图 2 和图 3 中以颜色编码，显示了所有分析过的地

震群在拟合断层面的上的投影震源，冰岛除外，因为冰岛没有平面结构。结果显示，这些事件是地震指数和时间的函数。

此外，迁移幕与总震群活动的比例在不同数据集中相差很大（图 4）。在西波西米亚、加州长谷火山口和冰岛观察到的自然地震中，这一比例最高。在西波西米亚地震群中，该比例由 2000 年的 20% 下降到 2018 年的 8%。与天然地震活动相反，在注入诱发地震活动中很少检测到这种迁移模式。

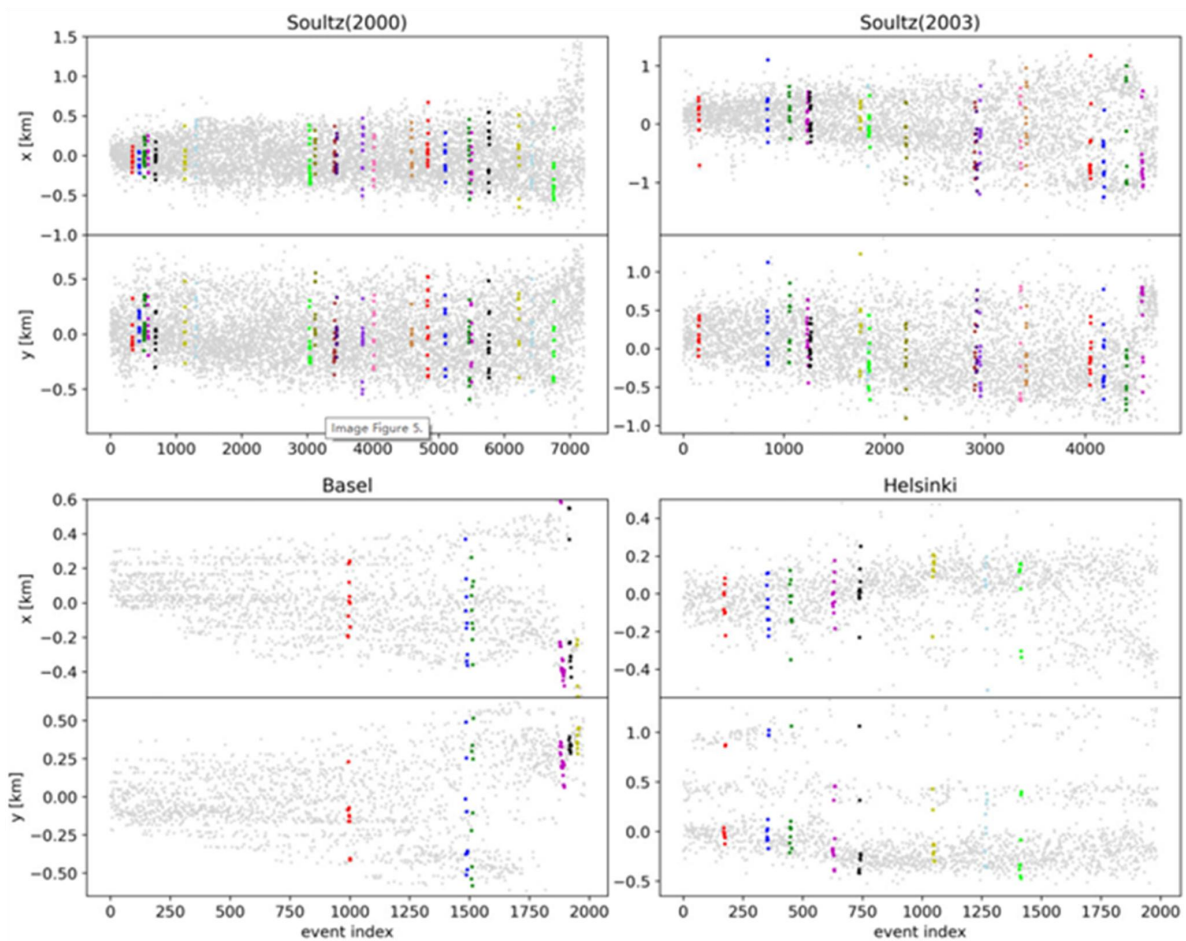


图 3 注入诱发地震中具有迁移模式的簇

为了更紧凑地分析增长模式，研究人员测量了每个幕中相对于第一个地震事件的距离和时间，然后将其堆叠在一起。为了解释不同簇的增长率，对每个迁移幕拟合了一个线性函数和平方根函数。结果显示，在很多情况下（60%），平方根函数比线性函数能更好的拟合更多的事件。在大多数

情况下，迁移速度在 0.01~10 m/s 之间，平均值为 1.8 m/s。迁移速度和迁移持续时间分析表明，两个值之间存在很强的负相关性，对数值的线性相关系数为-0.93。地震激活面积-地震矩关系分析表明，在大多数情况下(94%的迁移幕)，前缘模型拟合结果优于裂缝模型。估计的应力降主要分布在 100 Pa~1 MPa 范围内，其中前缘模型的平均值为 0.3 MPa，略大于裂缝模型的 0.2 MPa。

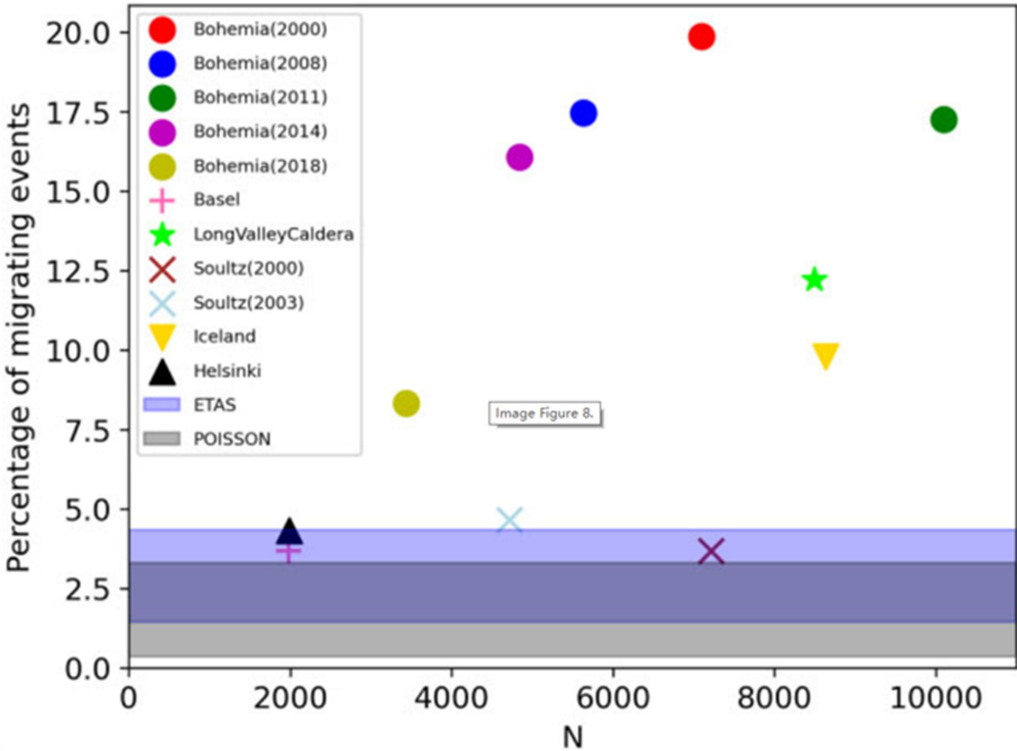


图 4 迁移事件在地震序列中的比例

#### 4. 讨论

普遍认为，流体流动和弹性应力传递被认为是造成震群迁移的原因。由于断裂带孔隙压力升高，应力传递有效地触发了 2000 年西波西米亚震群的快速亚序列。相反，注入诱发地震活动通常发生在完整的岩石或断层（未受到应力严重影响）附近。由断裂带中孔隙压力增强协助的无震滑动也可能产生所需的应力扰动，因此，也可能导致震源快速迁移，而这可能

是流体注入诱发地震活动中快速迁移幕发生频率较低的原因。流体注入通常不是沿着断层进行的，因此，缓慢滑动的可能性较小。估计的簇增长速度和持续时间之间存在明显的负相关关系，表明迁移簇的最终大小与迁移速度无关。对于不同类型的地震，无论是天然的还是注入引起的，都观察到同样的关系。这指向潜在过程的动态影响，但到目前为止其还没有得到很好的理解。

总体而言，大多数序列的地震矩与激活面积的关系可以用前缘或裂缝模型成功拟合，这表明迁移幕是由地震活动本身驱动的，并受到破裂生长之后流体流动的协助。

来源：Fischer T, Hainzl S, Vlček J, *et al.* Fast migration episodes within earthquake swarms. *Geophysical Journal International*, 2023, 235(1): 312-325.

---

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所