

# 地震科技前沿快报

2025 年第 2 期（月刊总第 73 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、破裂相揭示自然地震中与几何相关的破裂传播

本研究基于 2023 年土耳其地震的近断层数据与动态模拟，揭示了断层几何对破裂传播的影响。断层平坦段出现超剪切破裂，弯曲处破裂减速至亚剪切速度。该成果为近断层观测网络设计和地震动力学研究提供了重要指导。

### 2、大地震前的异常低震级地震活动

本研究利用随机森林机器学习算法分析了加州和阿拉斯加大地震前的地震活动，发现震前区域低震级地震异常增加。数值模拟表明，主断层刚度降低导致应力场非均匀变化是前兆机制。该异常活动可作为大地震的短期预警信号，但其空间扩散性要求结合区域监测数据以提高预测可靠性。

### 3、采矿诱发断层同震滑动引起的应变能变化的空间分布：来自中国跃进煤矿岩爆的启示

本研究通过中国跃进煤矿案例分析了采矿活动引起的断层同震滑动对应变能分布的影响。结果表明，断层滑动导致工作面附近应变能集中，显著增加岩爆风险。监测数据验证了断层同震滑动是煤爆的额外触发因素，本研究为优化采矿设计和灾害防控提供了关键依据。

## 破裂相揭示自然地震中与几何相关的破裂传播

长期以来，人们一直在努力理解和解读地震图中的波形，以了解地球的内部结构，并探索地震震源的特性。在这里，研究人员试图将 2023 年土耳其卡赫拉曼马拉什地震中的连续破裂相解读为东安纳托利亚断层附近的大型近断层速度脉冲。通过数据分析和动态破裂模拟，研究人员可靠地识别了断层轨迹平坦段上的瞬态超剪切破裂和断层弯曲处的破裂减速。研究中的数据分析和动态模型强调了近断层破裂相在跟踪非均匀破裂传播方面的稳健性，这一研究使人们进一步认识到了使用近断层数据在理解地震动力学时的复杂性和优越性，可为未来的地震网络设计和近断层数据分析提供指导。相关研究成果发表在 2025 年 1 月的 *Science Advances*。

从地震波中解析详细的地震破裂过程具有巨大挑战性，目前已经开发了基于地震波的方法，例如有限断层滑移反演和反投影。破裂相可以揭示断层上的滑动和摩擦演变，而无需实施反演程序。然而，对自然地震破裂相的直接观测很少，而且大多只在一个台站观测到。

此外，与实验室实验相比，大地震通常具有复杂的断层几何形状、物质特性和破裂过程。这些异质性对近断层破裂相的影响，以及是否可以使用近断层破裂相来理解这些复杂的破裂行为，目前尚不清楚。2023 年土耳其卡赫拉曼马拉什地震矩震级 7.8 级，沿 120 km 长的 Amanos 段（属于东安纳托利亚断层）的近断层强震记录提供了首次研究自然地震中相干破裂相的机会。

研究人员基于强震动数据和三维动态破裂模拟，分析了断层几何对破裂传播的影响。强震动数据来自土耳其灾难应急管理处的加速度数据库及分析系统（AFAD-TADAS），研究人员将加速度数据进行积分得到速度波形，然后将其旋转至断层平行（FP）和断层垂直（FN）方向进行分析。动

态破裂模拟采用三维垂直走滑断层模型，断层嵌入 180 km（走向）× 80 km（法向）× 50 km（深度）的弹性域中。模拟使用有限元软件 PyLith 实现。

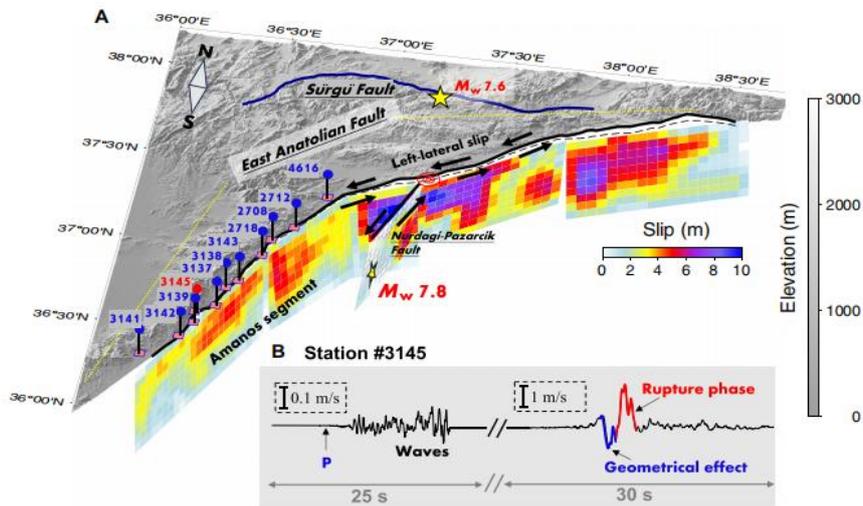


图 1 2023 年土耳其卡赫拉曼马拉什  $M_w$  7.8 级地震的近断层观测。(a) 三维地图；(b) 台站#3145 在与断层平行方向上的速度波形

### 1. 近断层破裂相在不同 FN 距离下的特征

在距离断层较近的区域（如 0.2 km），FP 和 FN 速度均表现为单一脉冲。FP 脉冲与断层浅部滑动速度脉冲类似，而 FN 脉冲主要由破裂前沿积累的 S 波能量主导。因此，FN 脉冲略早于 FP 脉冲到达，但 FP 分量对局部断层滑动更为敏感。

随着 FN 距离的增加（>1 km），FP 分量出现双脉冲现象，而 FN 分量仍保持单一脉冲，且位于两个 FP 脉冲之间。第一个 FP 脉冲与破裂前沿能量相关，第二个 FP 脉冲则主要由断层滑动主导。第二个 FP 脉冲的起始时间在不同 FN 距离下（0~3 km）基本一致，且与单一脉冲场景中的脉冲起始时间吻合。通过排除滑动不均匀性、多重破裂前沿或几何效应等潜在机制，研究认为双 FP 脉冲主要由破裂过程本身引起。

此外，在距离断层较近的#2708 台站（0.3 km）观察到了非典型的 FP 脉冲。推测其与#2708 台站以南的次级左旋滑动事件有关，该事件范围位

于#2712 和#2718 这两个台站之间。因此，将主断裂前沿的破裂时间定位于#2708 台站第一个 FP 脉冲的起始时刻。

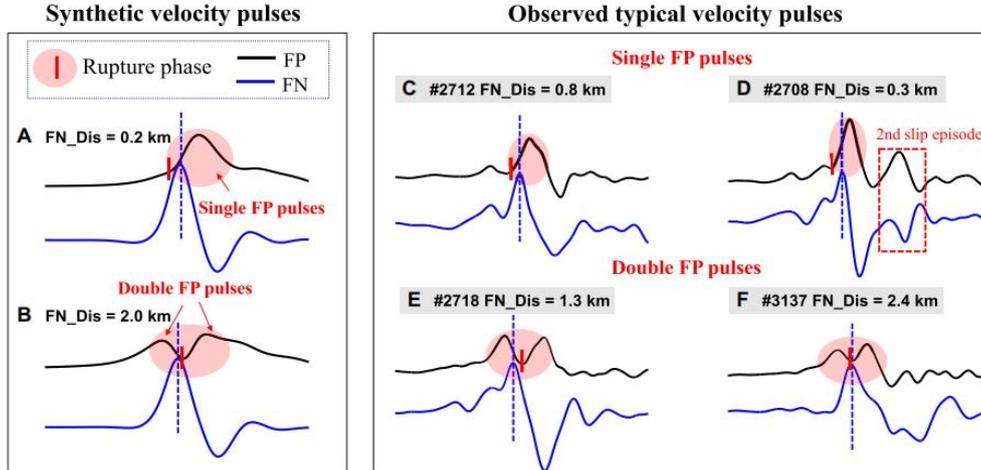


图 2 合成的和观测到的典型近断层速度脉冲。(A) 亚剪切断裂中极短 FN 距离 (0.2 km) 处的合成 FP (黑色) 和 FN (蓝色) 速度脉冲; (B) 较长 FN 距离 (2.0 km) 处的合成速度脉冲; (C、D) 台站#2712 和#2708 处的速度脉冲显示典型的单 FP 脉冲特征; (E、F) 台站#2718 和#3137 处的速度脉冲显示典型的双 FP 脉冲特征

## 2. 与断层弯曲相关的破裂相

研究发现，当破裂传播遇到断层弯曲时，原有的速度脉冲会沿原路径继续传播，但由于断层走向的变化，分解后的 FP 脉冲可能出现负值，具体取决于弯曲方向及台站相对于断层的位置。通过分解分析，发现#3145 台站记录的负 FP 脉冲和第一个 FN 脉冲由断层段#1 引起，而随后的正 FP 和 FN 脉冲则由断层段#2 和#3 引起。负 FP 脉冲比正 FP 脉冲早到 2 s，表明破裂从第一个弯曲点到#3145 台站的传播速度显著低于剪切波速。

为进一步验证多段模型的结果，研究进行了动态破裂模拟。结果显示，当破裂速度为超剪切波速时，仅观察到狭窄的负 FP 脉冲和单一 FN 脉冲；当破裂速度为亚剪切波速且速度无显著变化时，负 FP 脉冲宽度增加，并出现双重 FN 脉冲；当破裂在弯曲处减速至约 2 km/s 时，模拟结果与观测数据吻合的最好。

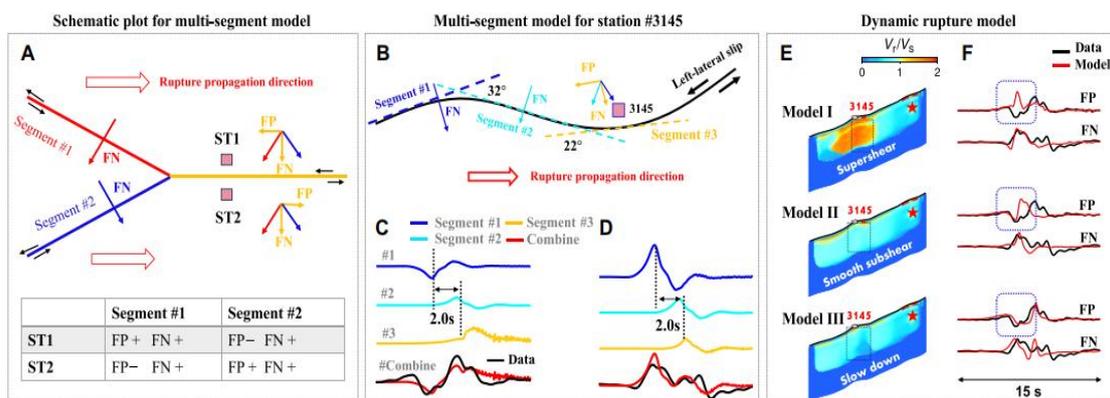


图 3 台站#3145 附近断层弯曲发生破裂的多段模型和动态破裂模型。(A) 左旋走滑断层系统中的弯曲破裂；(B) 断层轨迹（黑线）和三个断层段的走向（虚线）；(C) 三个断层段及其组合（红色）对台站#3145 的 FP 速度的贡献；(D) 与 C 类似，针对 FN 分量；(E) 三个动态破裂模型中的破裂速度与剪切波速度的比；(F) 台站#3145 的合成（红色）和观测（黑色）速度的波形

### 3. 从破裂相推断破裂传播速度

通过分析近断层速度场，研究识别了 Amanos 断层段上所有近断层台站的 FP 脉冲，并将其作为破裂相，用于计算破裂传播速度。研究将断层划分为三个子段，并根据几何变化分析破裂速度。结果表明，破裂在#4616 至#2718 台站之间以亚剪切波速传播(3.1 km/s)；经过几何弯曲后，在#2718 至#3137 台站之间加速至超剪切波速（平均 4.3 km/s）；随后，在遇到另一断层弯曲后，破裂速度在#3137 至#3142 台站之间降至亚剪切波速(2.6km/s)。

为验证破裂速度的可靠性，研究进行了动态破裂模拟。结果显示，在均匀应力条件下，破裂速度稳定在约 3.2 km/s，而观测数据中的速度变化显著大于模拟结果，表明断层几何和滑动分布的非均匀性对破裂速度变化具有重要影响。

### 4. 讨论

该研究揭示了断层弯曲与破裂减速之间的相关性。无论是拉张型还是压缩型断层弯曲，破裂均会减速，动态应力场与断层弯曲的相互作用不仅取决于弯曲方向，还可能受到剪切应力扰动和断层倾角等因素的影响。此

外，几何控制的地震事件前的应力和摩擦特性也可能导致破裂减速，这与运动学模型中断层滑动在弯曲处的减弱或不连续性一致。

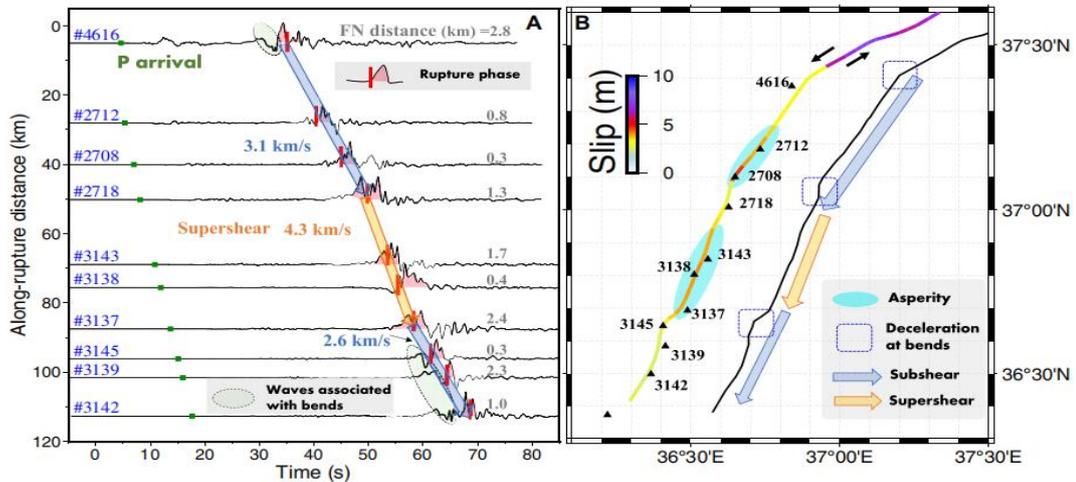


图 4 沿 Amanos 段的破裂相和破裂传播。(A) FP 速度波形，绿色方块表示所有站点的 P 到达时间，破裂相以粉色标记，短红条表示站点的破裂时间，与断层弯曲相关的波形以绿色椭圆表示；(B) 破裂轨迹以顶部 5 km 的平均滑动量表示，凹凸体位置以青色表示，弯曲处以蓝色虚线矩形表示，箭头表示破裂沿轨迹传播，速度分别为亚剪切（蓝色）和超剪切（黄色）

研究还通过近断层破裂相识别了与几何相关的超剪切破裂过渡。在 #2718 至 #3143 台站之间的高滑动（高应力降）凹凸体（asperity）上，破裂速度达到超剪切波速，但由于台站间距较大，无法精确定位超剪切过渡的具体位置。研究人员使用沿断层轨迹的连续网络来跟踪破裂，并识别瞬态超剪切速度，与传统方法相比，这避免了模糊的反演过程，并通过提取最有价值的信息（破裂相），进而提供了额外的约束。

此外，研究探讨了近断层 FP/FN 脉冲振幅比在识别破裂速度变化中的效率。动态模拟结果表明，该比值对破裂速度变化的响应存在滞后，且受 FN 距离、破裂前沿形状和几何效应等因素影响，因此未将其作为破裂速度的指标。

来源：Yao S, Yang H. Rupture phases reveal geometry-related rupture propagation in a natural earthquake. *Science Advances*, 2025, 11(4): eadq0154.

## 大地震前的异常低震级地震活动

揭示潜在破坏性地震的前兆信号对于了解地壳动力学特征和提供可靠的地震预警至关重要。地震前兆并不明显，但最近的实验研究表明，在短期（几天到几个月）内，可能出现强烈的预警信号，预示大地震即将发生。来自美国和德国的科学家指出，2019年6.4~7.1级里奇克莱斯特地震序列（加利福尼亚州）和2018年7.1级安克雷奇地震（阿拉斯加）之前，区域范围内的构造动荡（tectonic unrest）持续了约3个月，证据是南加州和阿拉斯加中南部约15~25%的地区出现了异常低震级地震活动。这种前兆动荡（precursory unrest）是通过一种算法发现的，该算法集成了创新的随机森林机器学习方法和从地震目录中构建的统计特征。在一系列新颖的有限元固体力学模型的支持下，研究发现，如果大型断层段内的孔隙流体压力在断层接近破裂时显著升高，将导致区域应力场发生重大不均匀变化，进而会出现前兆，即异常的低震级地震。该发现和研究方法可能会为监测机构开辟新的视角，使其能够在地震发生前数周至数月预测某个地区何时临近大地震。相关研究成果发表在2024年8月的 *Nature Communications*。

提高预测大规模地震时空分布的能力，是现代地震学面临的一项艰巨挑战。自上个世纪以来，人们通过多种不同的方法探索地震预报，旨在探测地球物理、地球化学甚至生物学方面的前兆。但是，地震前兆仍然不可靠，其中一些前兆受到了质疑。

此外，人们还通过追踪古登堡-里克特关系中的斜率变化以及低震级地震中的其他异常统计变化来研究大震级地震的前兆活动。因为地震事件的时空分布通常很复杂，所以特定的前兆模式很难识别。但是，随着高质量地震目录的公开以及新的监督和/或无监督机器学习框架的出现，这种情况

可能得到缓解。目前，基于监督机器学习的框架已经成功应用于实验室地震的准确预测（基于破裂前的声学信号和所模拟构造板块的时空变形）。

研究人员通过结合创新的随机森林机器学习算法和地震目录中的统计特征，分析了 2019 年加州里奇克莱斯特地震序列和 2018 年阿拉斯加安克雷奇地震前的地震活动异常，揭示了大地震前区域范围内低震级地震活动的异常模式，并提出了断层刚度降低导致区域应力场不均匀变化的机制。

研究结果以动荡程度或概率 ( $P_{un}$ ) 表示，其可以解释为未来 30 天内发生大震级地震 ( $M \geq 6.4$ ) 的概率。结果表明，目标地震的震中在事件发生前的几周内显示出不安定的迹象。具体来说，里奇克莱斯特地震序列前约 40 天，安克雷奇地震前约 3 个月，震中区域的地震活动显示出明显的异常。异常的低震级地震活动并不局限于大震级事件的震中区域，而是扩散到所研究区域的多个断层带。

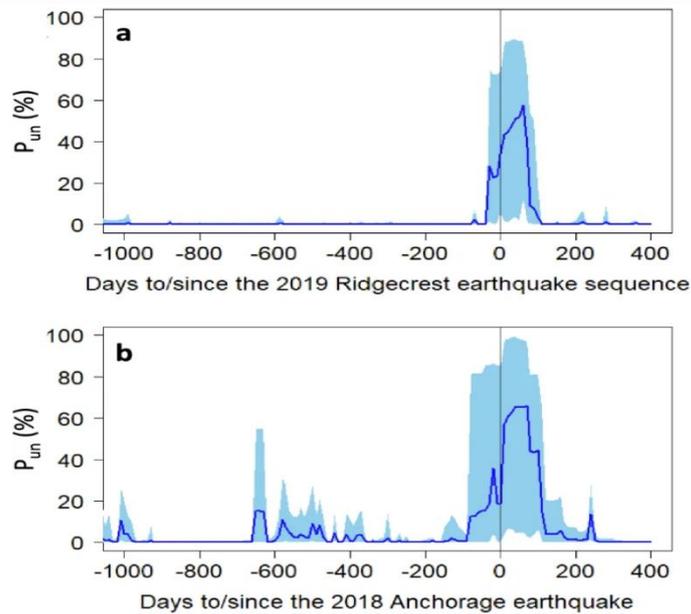


图 1 里奇克莱斯特地震和安克雷奇地震前后动荡概率的变化

对经历构造动荡的总面积（即最大动荡概率  $P_{un} \geq 50\%$  的区域）的分析获得了三个主要发现。首先，小规模、孤立的构造动荡区块在目标区域

零星出现，这些区块构成了背景噪声水平，但并不预示大震级地震的发生。其次，也是最重要的，动荡区域在大地震发生前显著扩大。再次，震中周围的动荡区域和概率在大地震发生后突然增加，但随后不久便恢复到了背景水平。

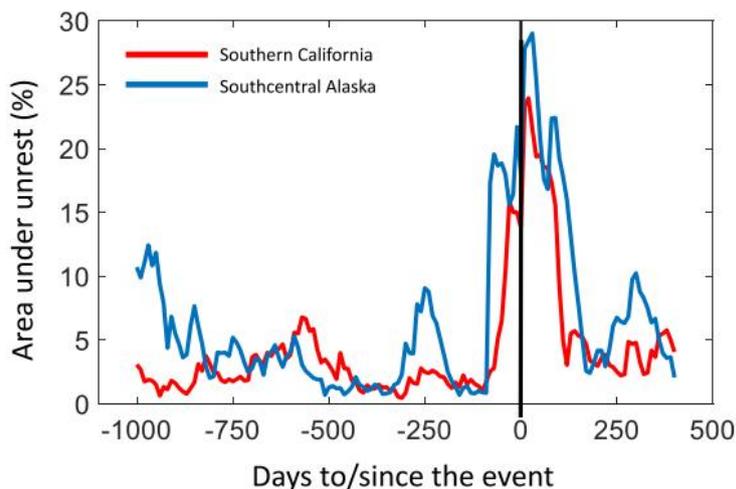


图2 南加州和阿拉斯加州中南部动荡区域的面积变化（以百分比表示）

为探讨结果对基于机器学习算法的统计特征和关键超参数的敏感性，研究进行了参数分析。分析表明：①研究结果对超参数不敏感，从而证明了该方法的稳健性；②当低震级地震活动被广泛定义时（比如  $M_{\min}=1$ ， $M_{\max}=6$ ），并且用于训练的动荡周期较短（如 30 天），同时关注区域较大时，前兆模式更为显著；③如果使用  $M_{\min} \geq 1.5$ ，前兆模式消失，说明大震前的区域动荡主要反映在极低震级的地震中；④前兆模式主要反映低震级地震在深度上的异常变化。

观测到的异常大多反映异常的、极低震级（ $1 \leq M \leq 1.5$ ）的地震活动，这一事实表明，由于目录中完整性震级的时间变化，动荡概率可能会升高——这可能是由主震之前的中等震级前震引起的。结合古登堡-里克特关系等的分析，研究人员证实了所报告的前兆异常地震活动不是目录质量下降

造成的，因此，该研究的方法确实间接识别了在大地震孕震阶段发生在浅层地壳中的区域应力变化。总的来说，这些观察结果表明，虽然前兆动荡可能在一定程度上受到当地低震级地震群的影响，但它与这些震群并没有明确的联系。相反，前兆动荡似乎与低震级地震时空分布的非线性、多变量的细微统计波动有关，而这需要进一步的研究和分析。

其中，有这样一种可能的解释。地震力学中关于断层结构的研究表明，活动断层在断裂前会发生应力的集中，导致破裂区产生相互连接的裂缝，从而增加断层的渗透性和孔隙度。这种变化会引发地壳流体的循环，增加流体压力并扩大其他裂缝的孔径。由此，形成正反馈机制，进一步降低断层的粘结力和摩擦力，最终导致断层刚度下降。因此，活动断层在断裂前通常具有较高的流体循环和较低的刚度。

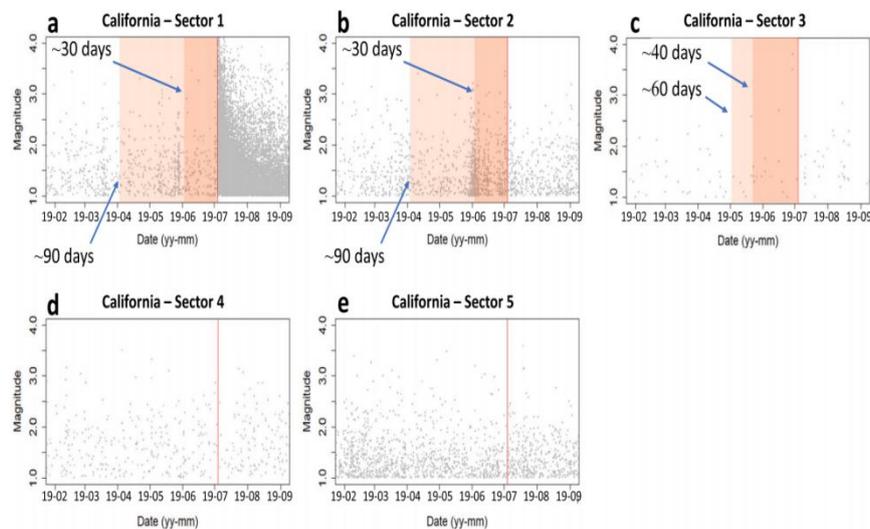


图3 南加州不同范围异常低震级地震与地震群之间的可能联系

为了探索大震级地震前可能发生的区域应力变化，研究使用了弹性包裹体断层建模方法，通过有限元法（FEM）构建二维模型，模拟不同断层刚度和区域载荷条件下的应力分布。研究主要关注两种情景：一是区域渐进加载且断层刚度恒定，二是区域恒定加载且断层刚度逐渐降低。结果表

明，在第一种情景下，随着大地震的临近，压缩会推动区域内所有小断层向破裂方向发展，导致应力线性增加。而在第二种情景下，随着断层刚度的降低，应力分布呈现出均匀和非线性的特征，某些小断层的应力增加，而另一些则减少。这种不均匀的应力积累是由于大型断层软化（刚度降低）导致的，表明大地震前的异常低震级地震活动可能与主要断层的刚度降低有关，而非单纯的区域加载。

研究还通过数值模拟的参数分析发现，当主要断层的刚度降至非常低时，附近小断层的应力积累更为显著。这表明，只有当易发生大地震的断层段高度破碎或具有可渗透核芯（如角砾岩和碎裂岩）时，才会出现异常的低震级前兆地震活动。

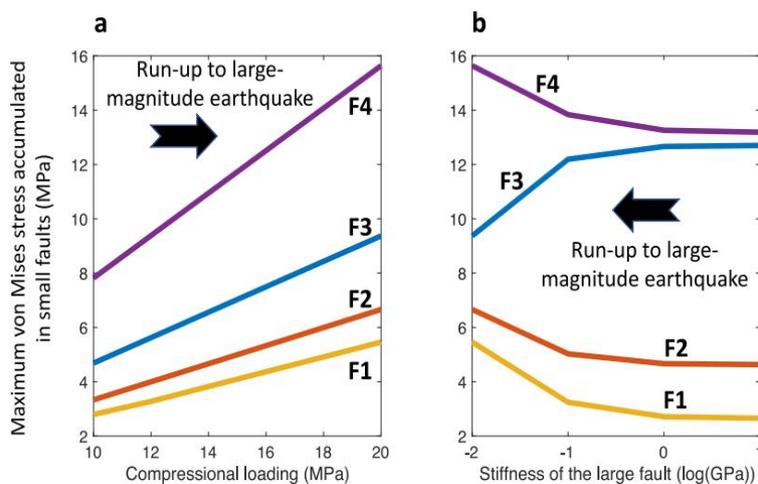


图 4 二维 FEM 数值模型的结果。(a) 在压缩载荷作用下，四个随机小断层中积累的最大冯·米塞斯应力；(b) 大断层段刚度值不同时，四个随机小断层中积累的最大冯·米塞斯应力

整体而言，2019 年里奇克莱斯特地震和 2018 年安克雷奇地震的孕震阶段与南加州和阿拉斯加中南部的地震活动在时间上具有相似性，显示出前兆活动的迹象。尽管前兆异常的空间尺度较大（数十到数百公里），但它们明显限制了大地震的潜在位置，表明该方法在地震监测和预警中具有潜力。该方法的核心优势在于其能够快速检测构造动荡，从而促进快速部

署额外仪器，以深入了解大地震的短期孕震阶段。此外，早期识别动荡有助于社会准备和警报级别的评估。然而，该方法也存在局限性，例如无法评估低震级地震活动最少地区的动荡程度，且依赖于这样一种假设，即未来地震活动与历史活动相似。

来源：Girona T, Drymoni K. Abnormal low-magnitude seismicity preceding large-magnitude earthquakes. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 7429.

## 采矿诱发断层同震滑动引起的应变能变化的空间分布：来自中国跃进煤矿岩爆的启示

应变能变化在深部采矿作业期间的地震和岩爆发生中发挥着关键作用。该研究致力于阐明河南义马跃进煤矿长壁开采背景下的应变能变化——这是优化设计和减轻岩爆与地震事件的关键步骤。来自日本的研究人员引入了创新的分析模型来量化由断层同震滑动引起的应变能 ( $E_s$ ) 变化，同时考虑了采矿引起的额外应力和背景应力。该研究在分析过程中将断层类型确定为影响应变能变化的关键参数。在不同情景下进行的计算表明，应变能分布在空间上存在很大的异质性，这取决于断层同震滑动。值得注意的是，靠近工作面的断层滑动会导致局部应变能集中。为了验证该研究的发现，将其与跃进煤矿 F16 断层附近的监测数据进行了比较。结果进一步促使该研究提出“采矿引起的断层同震滑动是岩爆或煤爆的额外触发因素”的结论，从而补充了现有的已知因素。这强调了将断层同震滑动因素纳入采矿安全规程的重要性，因为它有可能引发煤爆或岩爆。相关研究成果发表在 2024 年 11 月的 *Rock Mechanics and Rock Engineering*。

矿业活动会引起应力状态的急剧变化，进而导致断层滑移和煤矿突出 (coal outburst) 的发生。断层同震滑移是一种释放积累的弹性应变能的机制，其在裂缝启裂、断层滑动及地震波生成中起重要作用。研究表明，长壁工作面推进时，断层激活过程中释放的能量与地震矩和静态应力降密切相关。理解总应变能的释放比单纯关注可用能量更为重要，可用应变能与总应变能的区别对于准确评估断层破裂期间的能量动态变化至关重要。

传统上，应变能释放评估侧重于弹性介质中的累积体积积分，忽视了应变能在空间中的变化。评估采矿引发的地震和煤爆，需要评估断层-采矿带中应变能变化的空间分布。为了评估与断层同震滑移有关的应变能变化，

需要综合考虑同震应力变化、背景应力、采矿导致的额外应力等因素。但是，背景应力的测量存在深度和精度限制，给应变能变化的评估带来困难。

该研究评估并可视化了与跃进煤矿 F16 逆断层相关的二维应变能变化。首先，研究人员引入了一个创新的“0 模型”概念，即一个假设的断层，将应变能视为背景应力和采矿引起的额外应力条件下的基础应变能。这一方法涉及估算同震断层滑动分布，而这需要考虑采矿距离和断层类型的变化。然后，研究人员通过将断层同震滑动的静态应力变化与基线“0 模型”数据相结合，分析了同震应变能变化。最后，研究人员对 2010 年 7 月 18 日至 2012 年 9 月 14 日期间由采矿引起的同震断层滑动和冲击应变能引起的应变能波动进行了比较研究。

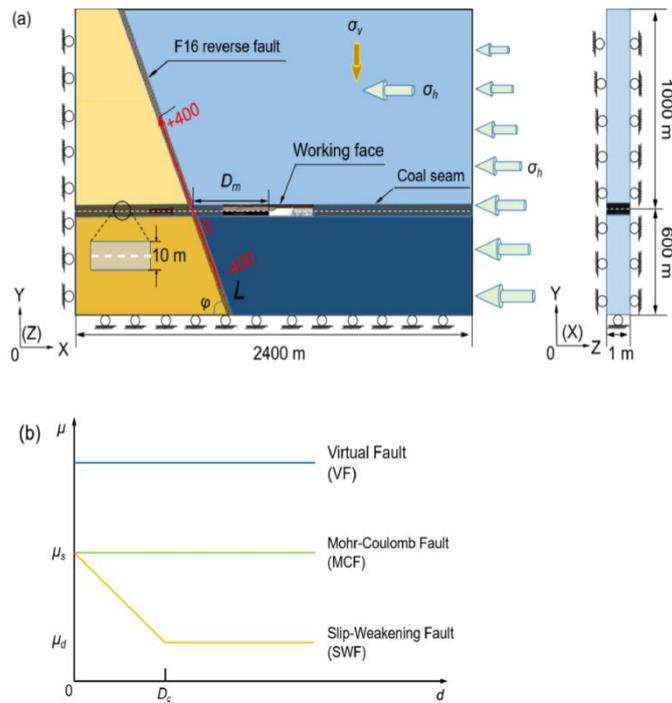


图 1 (a) 二维平面应变模型示意图，包括采煤工作面和工作面前方的断层；(b) 按摩擦参数分类的三种不同的断层类型

研究人员使用开源软件 PyLith 来分析由采矿活动引起的断层同震滑动相关的应变能量 ( $E_s$ )，并整合了一个“0 模型”来计算由断层滑动引起的

$E_s$  变化。

(1) “0 模型”与虚拟断层。通过虚拟断层 (VF) 的“0 模型”分析, 研究发现在矿距 ( $D_m$ , 断层与采矿面之间的距离) 接近断层时, 弹性应变能主要集中在水平采矿位置 ( $L=0$  处)。随着矿距逐步接近断层, 尤其是下盘开采 (footwall mining) 时,  $E_s$  的中位数显著增加。而在上盘开采 (hanging wall mining) 时,  $E_s$  的中位数也有所上升, 但变化幅度较小。随着断层倾角 ( $\varphi$ ) 从  $20^\circ$  增加至  $80^\circ$ ,  $E_s$  的分布发生明显变化。在此过程中,  $E_s$  主要集中在水平采矿位置。断层倾角越低, 对  $E_s$  不均匀分布的影响就越明显, 特别是在采矿水平位置附近的能量集中方面, 倾角越小,  $E_s$  越集中。倾角较小的断层使得矿山开采引起的应力作用范围更广, 导致矿区附近应变能在局部更为集中。

(2) 莫尔-库仑断层 (MCF) 和滑动弱化断层 (SWF)。莫尔-库仑断层分析表明, 与“0 模型”相比, 莫尔-库仑断层 (摩擦系数  $\mu=0.7$ ) 在矿距  $D_m$  为  $-60$  m、背景应力比  $r_b=2.0$  的条件下, 导致断层上的应力状态发生显著变化。特别是剪应力 ( $\tau$ ) 分布呈现出先增加后减少而后又增加的趋势, 这与“0 模型”的  $\tau$  分布不同。法向应力 ( $\sigma_n$ ) 变化较小, 符合莫尔-库仑理论, 即法向应力在断层上传递有效, 因此保持相对恒定。在滑动过程中, 表观摩擦系数  $\mu_{app}$  出现下降现象, 表明断层稳定性降低, 滑动的可能性增加, 从而提高了发生地震事件的风险。

在断层滑动过程中,  $E_s$  在不同断层类型下表现出不同的变化。对于 MCF ( $\mu=0.7$ ) 模型,  $E_s$  在矿区作业面附近显著增加, 达到约 57% 的提升, 而在滑动区外则较为均匀。不同类型断层的滑动区与  $E_s$  变化有密切相关性, 滑动区域的  $E_s$  变化表现出类似蝴蝶翅膀的对称分布, 且作业面附近的  $E_s$  变化较为显著, 提示可能增加地震或煤爆的风险。在矿区作业面附近, 不

同断层类型的  $E_s$  总释放量有所不同，在沿断层距离  $L=200\text{ m}$  时， $E_s$  总释放量最大，而其中 MCF ( $\mu=0.6$ ) 模型和 SWF 模型中的能量释放量相对较大。

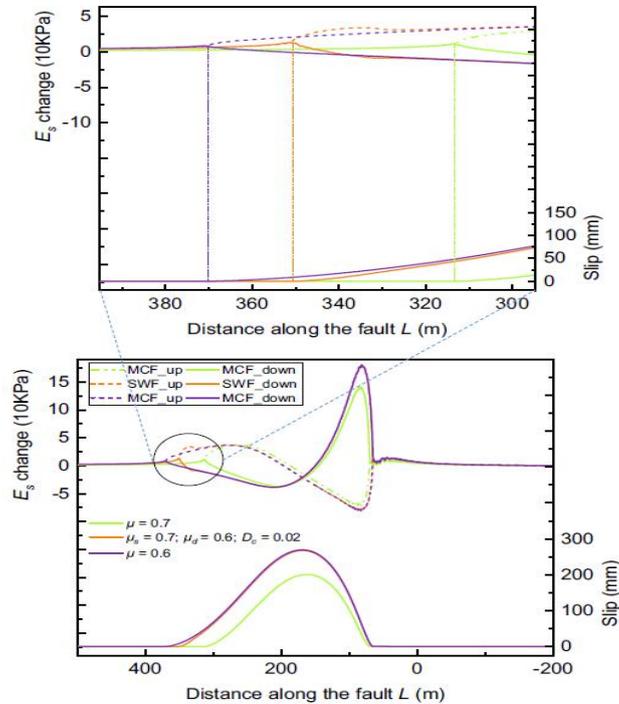


图2 当  $D_m=-60\text{ m}$ ,  $r_b=2$ ,  $\varphi=30^\circ$  时三种断层类型中  $E_s$  沿断层的变化

**(3) F16 断层附近的观测。** 研究人员对 F16 断层附近开采过程中观测到的冲击应变能的对比分析发现，自 2009 年 5 月 15 日安装 ESG 微震监测系统以来，在 LW25110 工作面采掘过程中，靠近断层的区域应变能明显高于远离断层的区域，尤其在断层-矿区交界处的能量积聚最为显著，表明断层滑动导致了工作面-断层区域附近的应变能积累。通过对监测数据的分析，研究人员提出了岩爆或煤爆的第四种可能机制——即由于断层的同震滑动引起的能量再分布，并且这种能量在靠近工作面的区域集中，可能触发岩爆。

综合上述分析结果，对各种断层类型的计算分析表明，断层滑动导致断层工作面区域的  $E_s$  变化呈现明显的蝴蝶形分布。值得注意的是，在断层上观察到总  $E_s$  与同震滑动分布之间从浅层到深层存在线性关系。研究发现

断层滑动导致工作面  $E_s$  积累，这可能会引发岩爆或煤爆。通过与 F16 断层附近的观测数据的比较分析证实了这一假设，进一步强调了采矿引起的断层同震滑动是岩爆或煤爆事件的关键因素。因此，该研究认为，断层附近的采矿作业不仅要解决诱发地震的动态影响，还要将断层同震滑动的影响纳入综合采矿安全策略中。

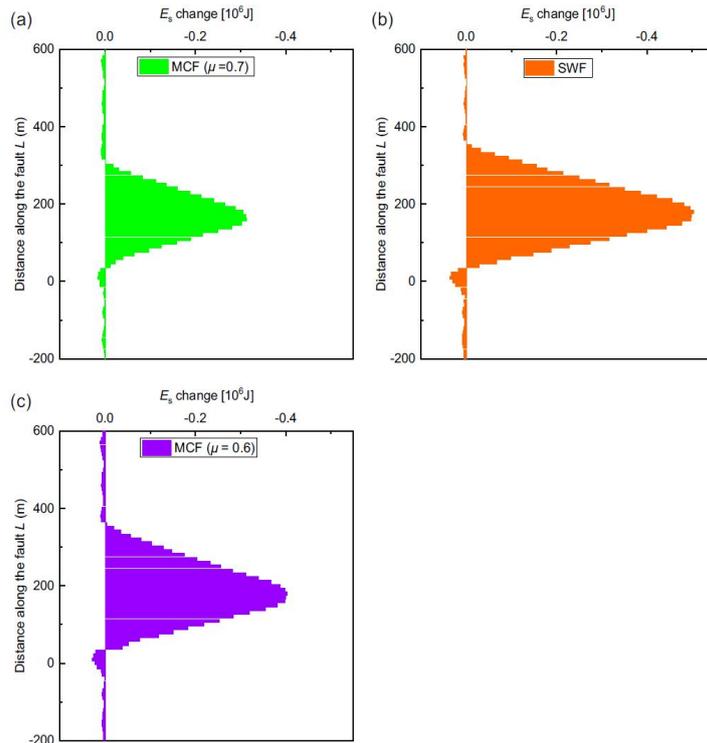


图3 按每 10 m 厚的水平层划分  $E_s$  变化总量。(a) MCF,  $\mu=0.7$ ; (b) SWF,  $\mu_s=0.7$ 、 $\mu_d=0.6$  和  $D_c=0.02$  m; (c) MCF,  $\mu=0.6$

虽然这项研究深入分析了采矿所导致断层同震滑动引起的应变能量变化的空间分布，但必须承认存在一些局限性。该研究的建模将断层滑动表示为零厚度界面上的边界条件，本质上是假设断层表现为完全弹性、无厚度界面。虽然这些假设简化了计算，并有效地捕捉了中等条件下断层的一般行为，但它们可能会限制模型在涉及大变形或非线性行为场景中的适用性，特别是在高强度地震事件期间的断层面附近。未来的研究应深入研

究断层粗糙度对断层摩擦参数和破裂准备过程的影响，特别是在采矿诱发地震的背景下。此外，未来的研究应结合热能建模，以更好地捕捉断层滑动过程中能量转换的完整范围。

来源：Li Y. Spatial distribution of strain energy changes due to mining-induced fault coseismic slip: insights from a rockburst at the Yuejin Coal Mine, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024: 1-14.

---

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所