

地震科技前沿快报

2023 年第 3 期（月刊总第 50 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、断层与剪切带的相互作用控制地表断裂地震聚簇

土耳其北安纳托利亚断裂带和巴颜喀拉活动地块边界带上的强震发生特征表明，地表破裂型地震在时间上有群集发生的特征，但对群集的机制（如断层相互作用、应变累积、地形变化）的量化解释程度非常低，而这对判断例如强震主体活动区什么时候结束等非常重要。

英国研究人员近期在 *Nature Communications* 上发表文章，展示了在意大利的研究成果。研究人员针对 6 条正断层，在计算过程中将应力传递与粘性流动定律联系起来，结果表明，断层相互作用时，应力差发生波动，这些波动的幅度足以在断层上产生应变率的变化，从而解释了断层的滑移速率变化。上述结果表明断层相互作用是地震群集的合理原因，这为过程导向的地震危险性评估开辟了道路。

2、全球大洋和大陆超剪切地震的频率

超剪切地震，即地震在断层面上的破裂速度超过地震波横波速度的地震。更快的破裂速度会产生更强的地面运动，导致更严重的灾害。但仅有 11 次浅层走滑地震有令人信服的超剪切证据，而深层超剪切地震只报道了 1 次。可见，目前观察到的超剪切地震很少，这阻碍了对其机制的系统分

析，同时给人留下了它们在自然界中很少见，甚至在海洋中更罕见的印象。并且，这使得难以验证理论发现和解决以下问题：构造特征是否控制超剪切破裂的发生？是否更常发生在孕震宽度较宽的断层上？是否具有优先传播方向？能以亚 Eshelby 的速度传播吗？

为了研究这些问题，近期 Nature geoscience 发表综述文章，通过分析 2000—2020 年发生的所有大型 ($M_w \geq 6.7$) 浅层走滑地震的数据，对超剪切地震进行了系统总结。结果发现，至少 14.0% 的大地震是超剪切的，海洋超剪切地震发生的频率与大陆一样。超剪切事件的速率取决于应力加载速率和成核速率之间的平衡。

3、多孔岩石剪切破裂中受运动学制约的晶粒尺度的地震机制

在稳定的裂隙生长向动态断裂过渡的过程中，小规模裂缝沿着新出现的断裂带局部出现，此时脆性多孔材料开始发生破裂。由于这一关键转变十分快速，人们对所涉及精确微观机制知之甚少，也难以直接成像。

研究人员开展了一个独特的岩石变形实验，通过控制微裂速率来观察这些微机制，实验结合了声音监测和微构造的原位 x 射线成像。研究发现，地震振幅并不总是与局部成像的应变相关，大的局部应变经常与小的声发射一起发生，反之亦然。局部应变主要是无震的，部分原因是晶粒/裂纹沿新出现的剪切带的旋转，根据断层上的局部膨胀和剪切应变计算出的剪切破裂能是体变形推断出的一半大小。

断层与剪切带的相互作用控制地表断裂地震聚簇

历史和古地震研究表明，地表断裂型地震在时间上是聚集的，但对导致聚集的机制（如断层相互作用、应变累积、地形变化）的量化程度很低，因此还不能很好地理解。英国研究人员展示了在意大利中部观测到的地震集群的定量分析，他们利用 ^{36}Cl 宇宙成因定年法研究了 6 条活动正断层，揭示了相邻构造或高或低的地表滑动速率的异相期，并将其解释为地震聚簇和反聚簇。研究人员在计算过程中将应力传递（由耦合断层/剪切带构造上的聚簇和反聚簇的平均滑移引起）与粘性流动定律联系起来，结果表明，断层/剪切带相互作用时，应力差发生波动，这些波动的幅度足以在粘性剪切带上产生应变率的变化，从而解释了其上覆脆性断层的滑移速率变化。上述结果表明断层/剪切带相互作用是聚簇的合理解释，为过程导向的地震危险性评估开辟了道路。相关研究成果发表在 2022 年 11 月的 *Nature Communications*。

地震的重复发生并无严格周期。有证据表明，地震在时间上的聚集和滑动速率的上升可持续数百年到数千年，并且在单个断层上包含了多个高震级 ($M_w > 6$) 地震（它们被断层的相对静止时间分开）。目前，对控制这种非周期性的因素缺乏了解。这种情况下，研究人员理解不确定性与时变地震危险性之间的尝试变得混乱，因为非周期性的不确定性越大，复发间隔的不确定性就越大，后者是时变概率地震评估的重要参数。驱动滑移速率变化（与地表断裂地震的时间聚集相关）的过程存在争议，但主要包括断层相互作用，地壳应变累积和地形变化。这三个因素对地震聚簇的相对贡献尚不清楚，这对开发一个包括聚簇在内的、过程导向的地震危险性分析方法构成了挑战。

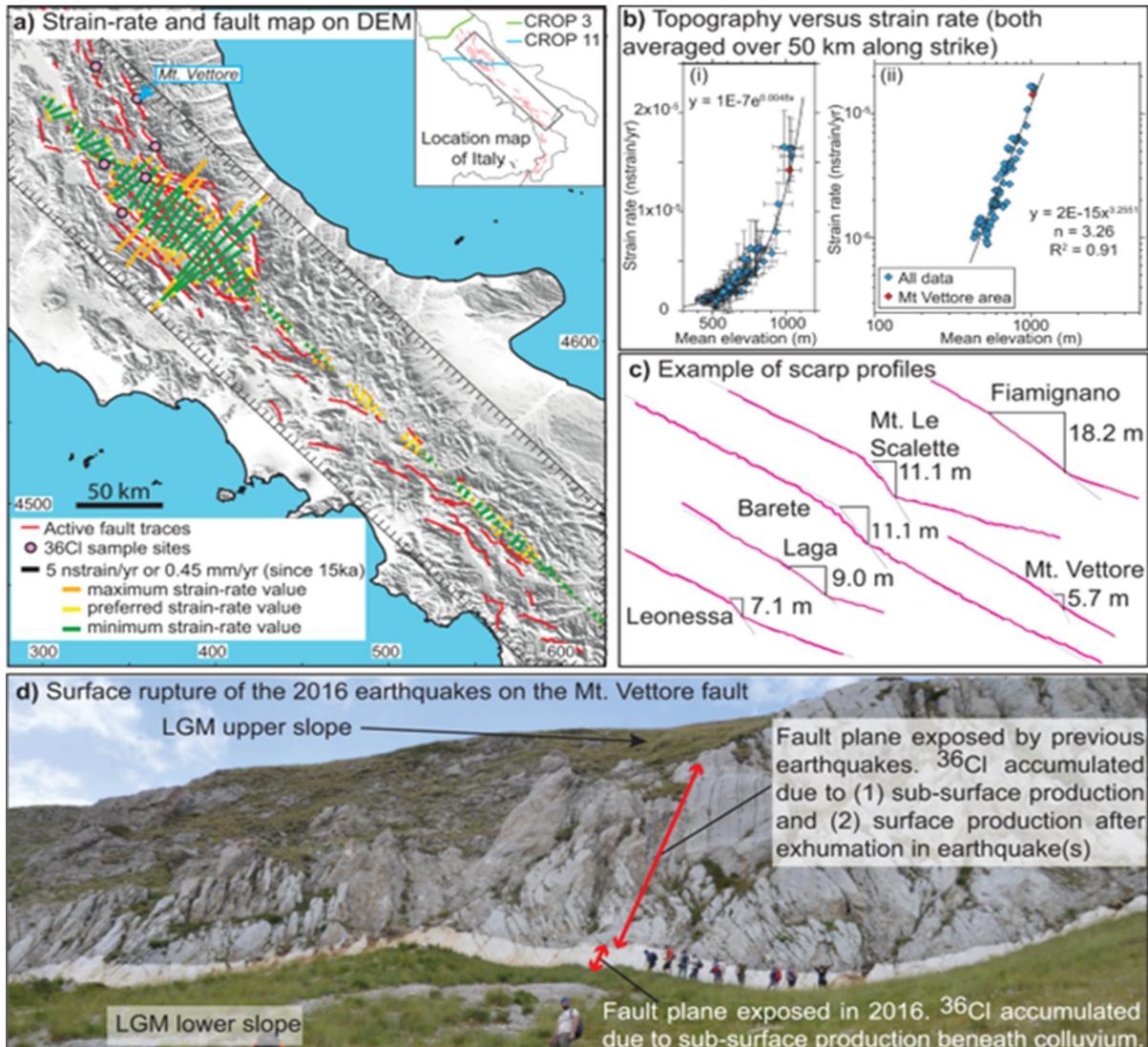


图 1 亚平宁山脉中部的断层和剪切带的相互作用

本研究的假设是：断层/剪切带相互作用产生的差应力（最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 之间的差）的变化是否足以驱动粘性剪切带应变率的变化，这反过来又在聚簇（滑动快）/反聚簇（滑动慢或无滑动）过程中驱动了上覆脆性断层的快速或缓慢滑动期的出现。对地震聚簇产生的潜在原因的解释是，上地壳脆性断层的滑移是由中部地壳下粘性剪切带的滑移驱动的。因此，在包含多个地震周期的时间内的应变，以及比单一地震的震后变形更长的时间内的平均应变速率，在上地壳和中地壳是相同的。由此产生的

重要问题是，如果由于与附近断层/剪切带的相互作用，下伏剪切带内的差应力在较短的时间尺度上发生变化，而不是简单地受到多个地震周期的体力（body force）和区域构造应力的控制，会产生什么结果。

研究中的测量数据来自意大利亚平宁山脉，该地区自 2~3 Ma 以来伸展，活跃的正断层使先前存在的高山褶皱和冲断带变形。历史地震活动和仪器地震活动表明，该地区发生过大的（ M_w 5.5—7.0 级）正断层地震，且形成地表碳酸盐岩断层陡崖。利用 ^{36}Cl 宇宙成因暴露分析对这些陡坡进行原位研究，研究证实了后末次冰盛期（last glacial maximum, LGM）斜坡稳定年龄和断层滑动速率在全新世是变化的。研究人员试图通过将粘性剪切带和脆性断层的差应力纳入模型，以重现 ^{36}Cl 关于地震聚簇的发现。在具体过程中，重点研究了在 2016 年 8 月至 10 月序列中破裂的 Vettore 山断层周围的 6 个 ^{36}Cl 样本点，其中包括 M_w 6.2、6.1 和 6.6 级地震。对 6 条断层进行了采样，采样平行于断层平面上的滑动矢量，并在浅沟（ $<1\text{ m}$ ）内进行。

研究人员使用加速器质谱法测量了 ^{36}Cl 浓度，并使用马尔科夫链蒙特卡洛方法（MCMC）从统计上推断了基于 ^{36}Cl 数据的滑移情况。此外，对整个陡坡高度进行建模，并允许模型在需要重现测量值时启动 ^{36}Cl 的生成（使用允许聚簇的布朗通道模型），而不是通过添加任意的预暴露值，或搜索单个恒定的冰缘断层滑移速率。

研究人员还开发了一种检验断层/剪切带相互作用的建模方法，将断层滑移的三维弹性半空间模型、剪切带滑移的三维弹性半空间模型联系起来，还纳入了由位错蠕变流动定律所定义的粘性滑移。用于建模的总滑移大小由标度关系和 ^{36}Cl 滑动历史确定，同时该滑移还被应用于脆性断层和下伏

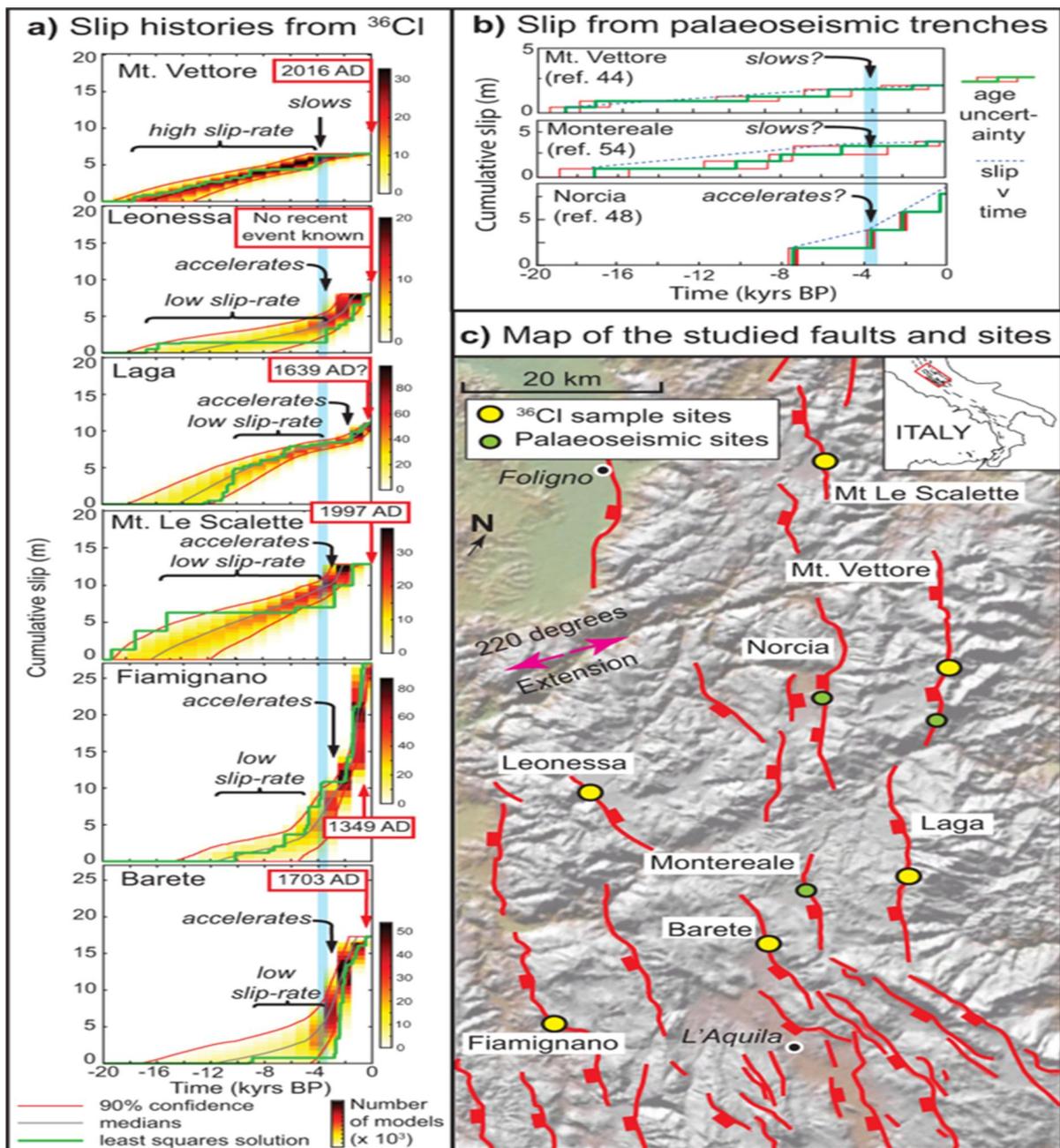


图2 研究区单个断层的滑移历史

剪切带。研究人员假设，脆性断层聚簇上的快速滑动脉冲所指示的应变与其下伏剪切带有关的应变相匹配，即剪切带中的应变率是不同的。

为了量化断层、剪切带和邻近断层/剪切带之间的相互作用，以及它们对应变率、滑移速率和聚簇的影响，研究人员提取了 3.5 ka 到 2015 年以及 3.5 ka 之前每个断层上的滑移量。之后，模拟了接收断层/剪切带的库仑应

力传递 (CST) 和差分应力传递 ($\Delta\sigma_{diff}$)。为了计算两个反聚簇内每个剪切带的隐含应变率变化, 研究人员将差分应力的减小输入到公式中, 并对其他变量使用适当的值。为了将隐含应变率变化的影响与研究人员对自然系统的 ^{36}Cl 测量结果进行比较, 将剪切带中的应变率转换为上覆脆性断层上的隐含滑移速率, 并将其与观测到的滑移速率进行比较。

调查证实, 暴露的断层陡坡完全是由构造滑动形成的, 而不是由侵蚀/沉积过程形成的。通过对 ^{36}Cl 数据的建模, 研究人员发现: ①Vettore 山断层的滑移速率在 4 ka 时减小, 而与它直接相交的 Leonessa 断层在 3.5 ka 时增加, 这种差异暗示了构造之间的相互作用; ②该地区其他断层的滑移也在 3.5 ka 时增加; ③在 4 ka 之前, Vettore 山断层经历了 15±3 ka 以来平均滑移速率较高的滑动阶段; ④在 3.5 ka 之前, 其他断层的滑移速率相对较低; ⑤亚平宁山脉的西南侧和东北侧同时发生了快速滑动。

在 2016 年之前, Vettore 山断层的地表断裂经历了相对较长的时间, 而在全新世晚期, 其他断层的地表断裂经历了相对较长的时间。总的来说, ^{36}Cl 的结果显示了滑移速率随时间的明显波动。对于断层, 没有发现反聚簇期间 CST 增加或减少的一致模式。整体而言, 脆性断层上的 CST 似乎不能直接解释脆性断层经历反聚簇然后破裂的原因, 因为由于断层相互作用, 应力加载可以是正的, 也可以是负的。相反, 对于剪切带, 确实发现了反聚簇期间应力加载的一致模式。在研究的两个聚簇中, 剪切带的应力差变化大多为负值。除模型中剪切带深度相交处外, 剪切带各处的差应力值均为负。

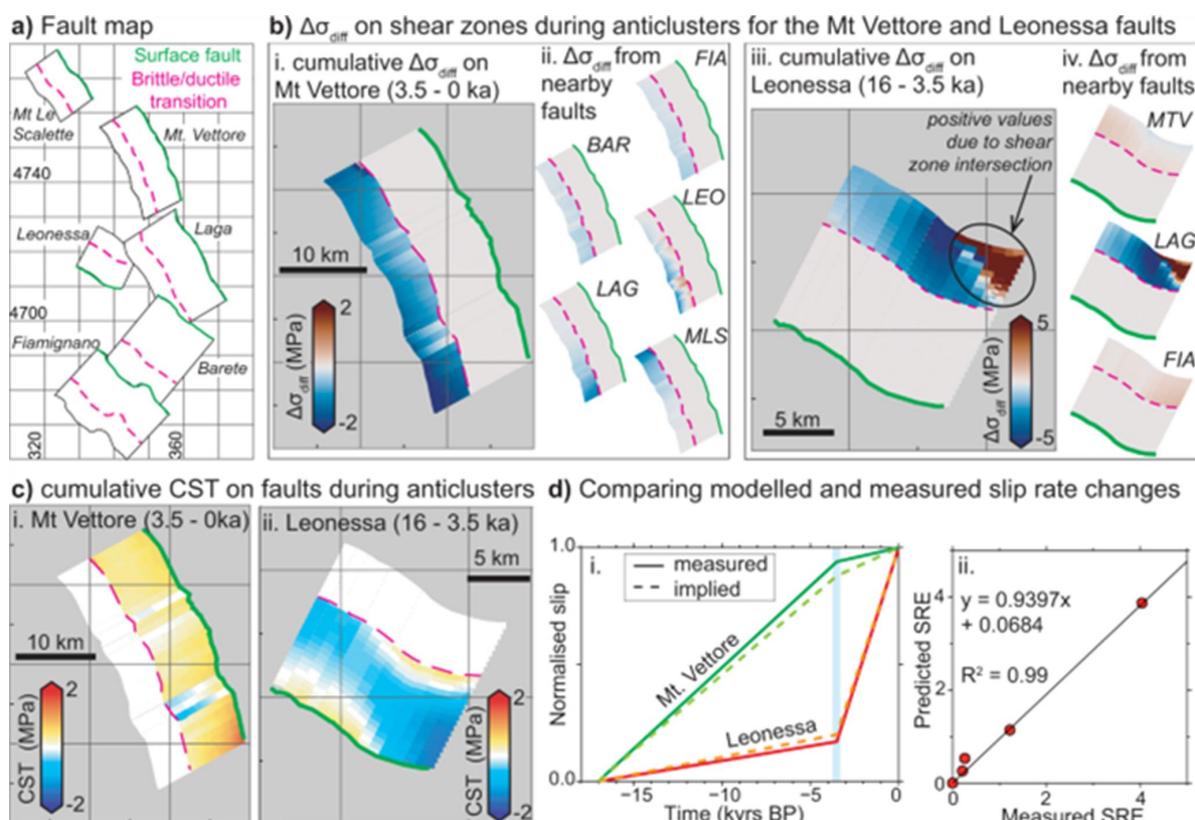


图 3 Vettore 山断层和 Leonessa 断层在平静期的应力变化及其对滑动速率的影响

当两个上覆断层都具有非常低的滑动速率（反聚簇）时，下伏剪切带的差应力变化为负，这促使研究人员分析差应力减小的幅度是否会产生与 ^{36}Cl 结果相当的应变率变化。隐含的滑动历史与 ^{36}Cl 分析测得的滑动历史有很好的 consistency，这意味着本文相对简单的模型（加上上面所述的假设），可以定量地重现自然系统调查中的关键滑动速率，从而深入了解推动地震聚簇和反聚簇的过程。结合地表发现（由 ^{36}Cl 导出的滑动历史）、应力模拟和岩石力学实验结果，以本文所述为例，研究人员认为，相邻断层/剪切带之间的相互作用可能是地震在时间上聚集的主要控制因素。

来源：Mildon Z K, Roberts G P, Faure Walker J P, *et al.* Surface faulting earthquake clustering controlled by fault and shear-zone interactions. *Nature Communications*, 2022, 13, 7126.

全球大洋和大陆超剪切地震的频率

当地震的破裂速度比产生的地震横波快时，地震是超剪切的。这些事件非常罕见，但由于与之相关的强烈地面震动，它们可能具有高度破坏性，而理解它们发生的原因可能有助于提供对断层力学特征的认识。以前只报道过几次超剪切地震，其中大部分发生在大陆。本研究通过分析 2000—2020 年发生的所有大型 ($M_w \geq 6.7$) 浅层走滑地震的数据，对超剪切地震进行了系统的全球搜索。基于慢度增强反投影 (**slowness-enhanced back-projection**) 所确定的破裂速度和瑞利马赫波 (**Rayleigh Mach wave**) 的识别，本文确定了四次与超剪切事件相一致的海洋地震。在研究期间，至少有 14.0% 的大地震是超剪切的，海洋超剪切地震发生的频率与大陆一样。在超剪切事件中，稳定破裂速度的范围比二维断裂力学理论预测的范围更广，研究人员将其归因于断层破坏带或滑移倾角的存在。由于海洋环境中较厚的地壳孕震带和洋-陆边界上的物质差异，可能会促进超剪切地震的转换和传播。相关研究成果于 2022 年 11 月发表在 *Nature geoscience*。

超剪切地震，即破裂速度超过横波速度的地震，仅在 11 次浅层走滑地震中有令人信服报道。除了这些浅层地震外，只报道了 1 次深层超剪切地震。破裂速度是控制地震影响的主要震源属性之一。如果震源复杂性和路径效应没有削弱这种影响，那么更快的破裂会产生更强的地面运动。目前所观察到的超剪切破裂很少，这阻碍了对其机制的系统分析，同时留下了它们在自然界中很少见，甚至在海洋中更罕见的表象。更具体地说，缺乏统计分析使得难以验证理论发现和解决以下问题：构造特征是否控制超剪切破裂的发生，例如它们是否更常发生在孕震宽度较宽的断层上？由于双材料效应 (**bimaterial effect**)，它们是否具有优先传播方向？它们能

以亚 Eshelby 的速度传播吗？为了研究这些问题，研究人员对超剪切地震进行了系统的全球搜索。

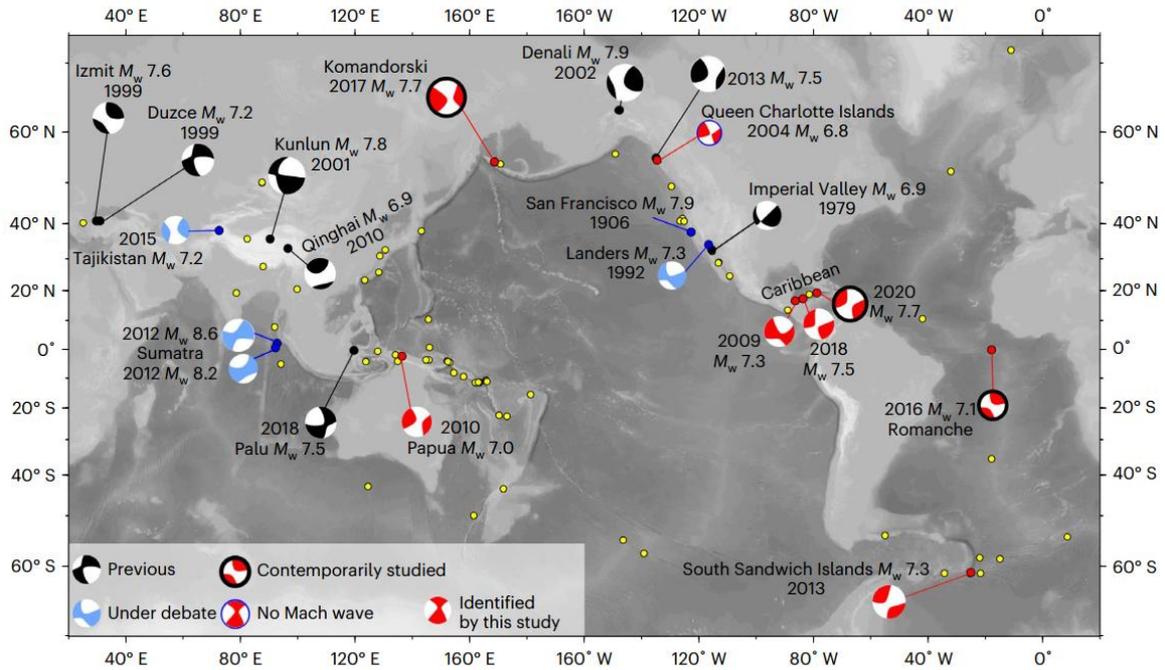


图 1 全球超剪切地震的分布

对超剪切地震的全面调查需要对破裂速度进行可靠的估计，这主要通过结合最新的地震学分析方法来实现。基于方向效应和远震震源反演的研究受到震源大小和破裂速度之间的权衡、相对低频 (<0.1 Hz) 内容的使用和平滑约束的挑战。远震或区域反投影破裂成像有可能在全球范围内限制大地震的破裂速度，该方法通过使用附近已准确定位事件的记录来校准路径效应，从而减少空间偏差。由于常规海洋地震目录的位置不确定性往往很大，研究人员进行了远震双差 (DD) 重定位来校准慢度增强反投影 (SEBP)。此外，为了正确识别成像伪影并量化破裂速度估计的不确定性，进行了一系列全面的反投影 (BP) 综合测试，该测试考虑了各种破裂场景、滑动分布、波形复杂性、断层几何形状等因素。研究发现，跟踪领先的 BP 辐射器 (BP radiator) 显著减少了影响破裂速度估计的“阴影”和“拖尾”

伪影, 并且由于直达波和尾波的平均效应, SEBP 始终低估破裂速度 5~15%。因此, 从 SEBP 推断的破裂速度是超剪切破裂的保守指标。此外, 通过识别瑞利马赫波 (超剪切地震的一个独特特征) 可独立验证超剪切破裂速度。

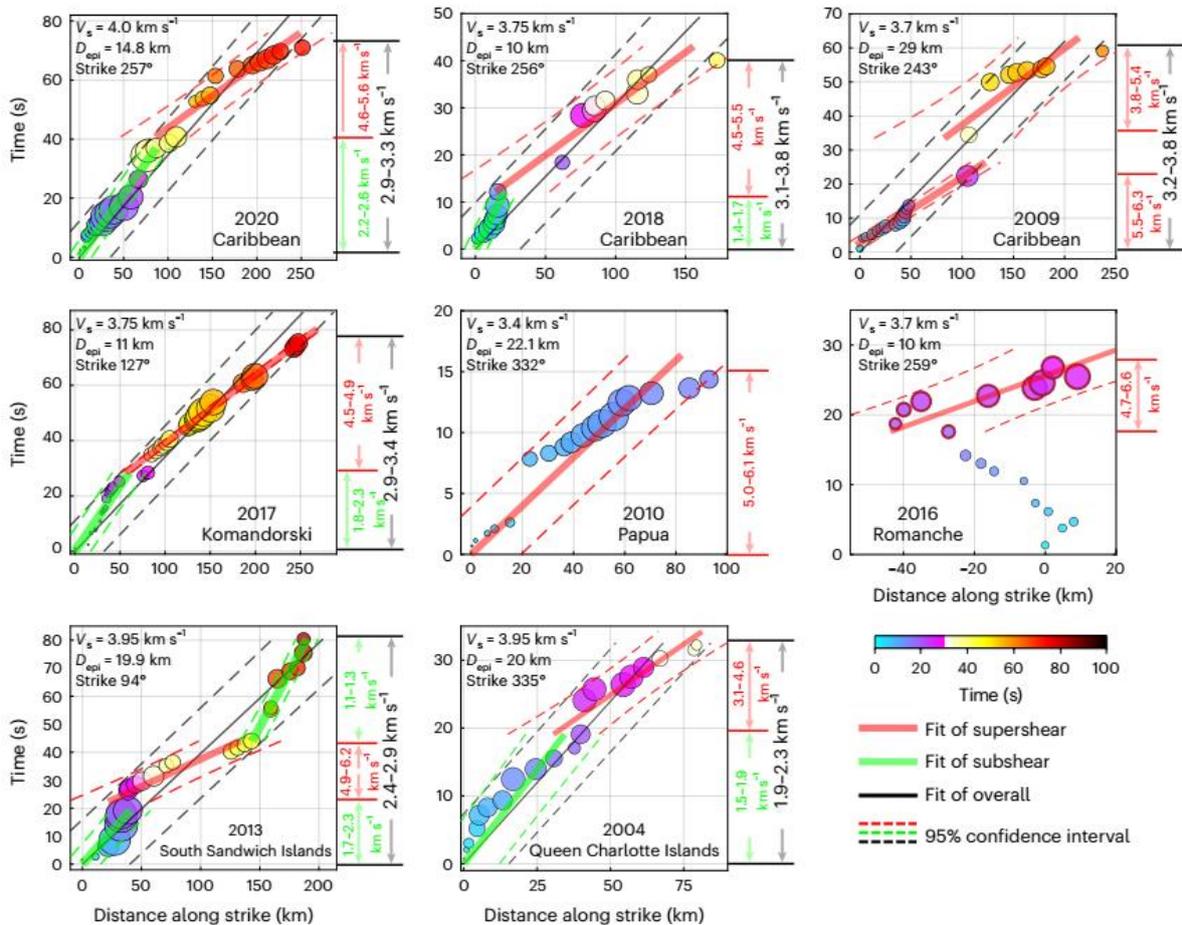


图 2 超剪切地震的破裂速度

之前未报到的超剪切地震: 一些断层系统特别容易发生超剪切地震。在北美和加勒比板块之间的转换边界上, 11 年内在加勒比海下方发生了 3 次超剪切地震, 主要向南西西方向传播。据估计, 北美和加勒比板块之间沿该部分的板块运动速率每年约为 19 mm。大地测量和历史记录表明, 该地区类似规模的地震的重现间隔很短, 为 40~50 年。这一超剪切序列强调, 对于沿板块边界的大规模成熟转换断层, 重复性超剪切地震的潜在危险及其相关的强烈震动应该引起高度关注。

在一个转换板块边界上发生多个超剪切事件的类似情况是加拿大皇后群岛（Queen Charlotte Islands）的超剪切序列，包括 2013 年的 Craig 地震和 2004 年 6 月 28 日发生的 M_w 6.8 事件（位于 2013 年地震南部 50 km 处）。本研究确定的另外两次超剪切地震也发生在海洋转换断层中，分别是 2010 年的 M_w 7.0 巴布亚地震，其发生在 Birds Head 和 Maoko 微板块边界以西的一个不明断层上，该断层每年可调节约 80 mm 的左行运动，另一个是 2013 年的 M_w 7.3 南桑威奇岛（South Sandwich Island）地震，此次地震是南美洲和南极洲板块之间每年 14 mm 的快速运动的结果。

超剪切地震的启示：对于先前报道的超剪切事件，研究人员对其破裂模式进行了确认或进一步深入分析，发现 SEBP 很好地描绘了破裂过程的时空特征。在最初的 25 s，以初始亚瑞利波速度传播 50 km，然后是 4.5~4.9 km/s 超过 200 km 的超剪切传播。本结果与该事件的第一份报告不同，后者显示了一个更晚且更短的超剪切段，只有 50 km 长。

研究认为，超剪切地震比以前认为的更常见，特别是发现了以前海洋中未记录的案例。事实上，在 2020 年之前，发生在 2000 年之后的地震只有 5 次被确定为浅层超剪切地震，其在大型 ($M \geq 6.7$) 走滑地震中的占比仅为 5.8%。本研究表明，在 2000 年至 2020 年间，86 次大型 ($M \geq 6.7$) 浅层走滑地震中有 12 次为超剪切事件 (14.0%)。这是一个保守的估计，没有考虑不确定的超剪切地震。

本研究中首次发现的所有超剪切事件都是海洋超剪切地震 (OSE)，之前可能由于缺乏近场地震数据，以及缺乏利用远震数据检测超剪切破裂的有效方法而被遗漏，同时由于距离人口中心较远且伤亡人数较少，公众和科学界的关注较少。研究检测到的 OSE 证明了 SEBP 和瑞利马赫波方法在识别远震距离的超剪切破裂方面的有效性。同时，OSE 与大陆超剪切地

震的概率基本相同。反投影在识别从亚剪切破裂到超剪切破裂的转变时，需要超过 50 km 的持续超剪切传播，因此正如综合测试所表明的那样，实际超剪切地震的比率可能高于此保守估计。

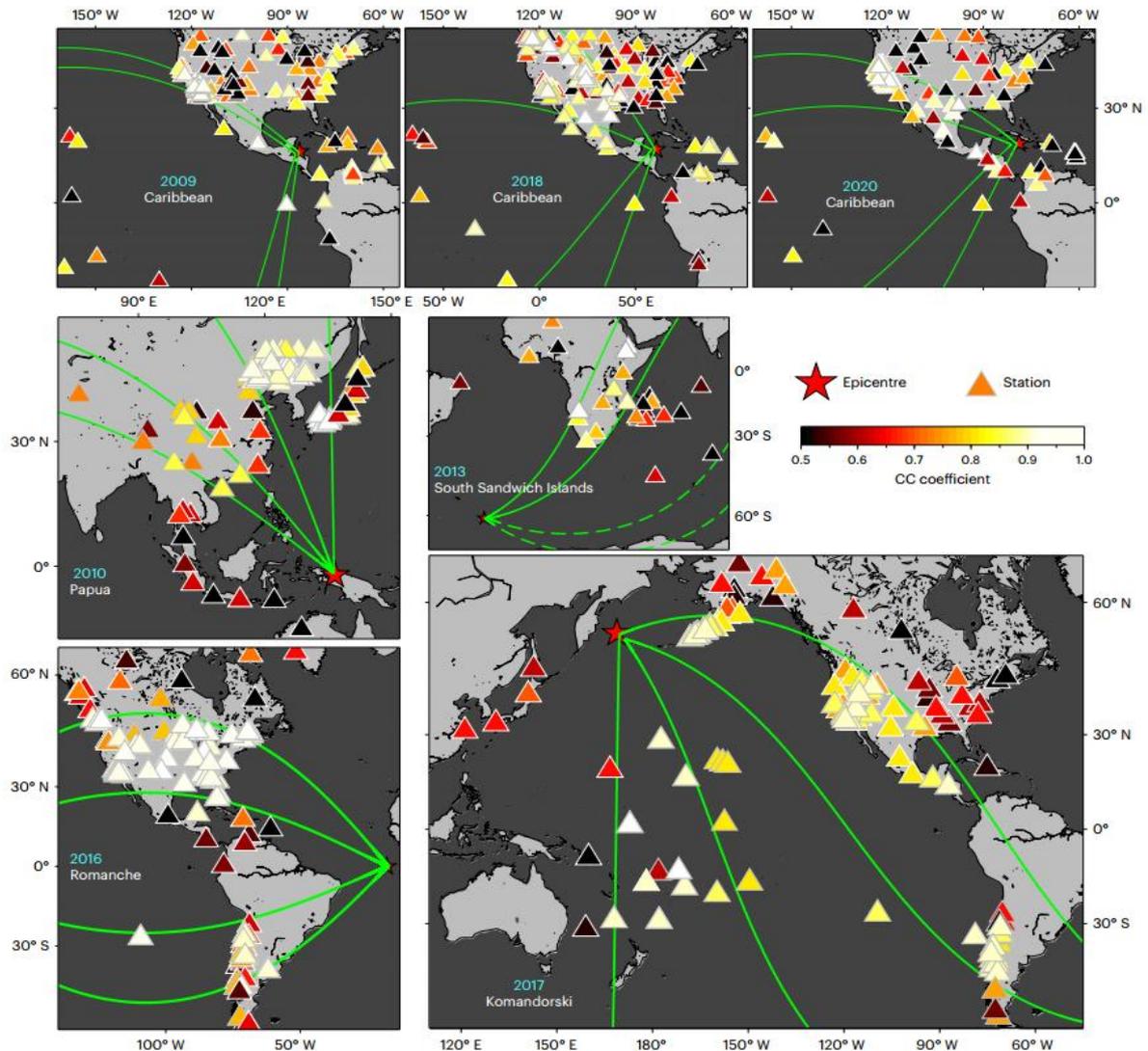


图3 远场瑞利波马赫锥的证据

超剪切地震的机制：许多物理机制可能是引发超剪切破裂的原因。对于一些超剪切机制，可以确定哪些可观察到的因素在原则上可以解释自然界中超剪切地震发生率很低的原因。在 Burridge–Andrews (1973、1976、2007) 和 Weng–Ampuero (2019、2020) 的理论中，超剪切破裂需要足够

高的断层应力，分别表现为强度过剩与应力降的低比值、断裂能 G_c 与应变能释放率 G_0 的低比值。在间震期，随着断层应力的增加，超剪切破裂的可能性随时间增加。然而，如果成核经常发生，大地震很可能在断层达到允许超剪切破裂的应力之前就开始了。因此，超剪切事件的速率取决于应力加载速率和成核速率之间的平衡。

双材料断层对超剪切地震的发生和破裂方向具有一定影响。沿双材料断层的滑动产生法向应力变化，这有利于破裂沿特定方向传播，因此超剪切破裂倾向于沿断层较硬侧的位移方向（“负方向”）传播。最近，解决真实接触面积的双材料界面实验发现，在超剪切破裂速度下，由于滑移和法向应力的耦合效应，接触面积的动态减少是弱化的主要来源。研究人员将浅层走滑事件分为三组：陆-陆边界（CCB）、洋-洋边界（OOB）和洋-陆边界（OCB）地震。跨 OCB 断层预计会出现更系统的物质差异。OCB 事件（83.3%）的超剪切率比 CCB 事件（13.5%）或 OOB 事件（4.7%）大得多。因此，双材料对比引起的动态弱化可能有助于 OCB 超剪切破裂的持续发生。事实上，6 次 OCB 超剪切地震中有五次向“负”方向破裂，2020 年加勒比事件除外。

更大的孕震宽度和更大的断层成熟度促进了超剪切破裂的可持续性。垂直边界断层的能量比 G_c/G_0 （控制断层破裂速度）与孕震宽度成反比。对于浅层走滑事件，孕震深度受地壳厚度的限制。统计数据表明，所有已识别的超剪切地震的孕震带都较宽。此外，超剪切多的断层往往具有每年大于 1.9 cm 的滑动，长度超过 800 km 且几何形状相对笔直，表明这些条件有利于超剪切传播。二维断裂力学理论预测超剪切破裂速度的稳定范围在 Eshelby 速度和 V_p 之间。然而，根据 CRUST1.0 模型，与 10 km 深度的参考 V_s 相比，超剪切破裂速度低至 1.15 V_s ，或者与全球质心矩张量(GCMT)

质心深度的参考 V_s 相比，则为 $1.11 V_s$ 。这种“缓慢”稳定的超剪切破裂可能是由于浅层或断层破裂区的波速降低或滑动倾斜造成的。

来源：Bao H, Xu L, Meng L, *et al.* Global frequency of oceanic and continental supershear earthquakes. *Nature Geoscience*, 2022, 15: 942–949.

多孔岩石剪切破裂中受运动学制约的晶粒尺度的地震机制

在稳定的裂隙生长向动态断裂过渡的过程中，小规模裂缝沿着新出现的断裂带局部出现，此时脆性多孔材料开始发生灾难性破裂（catastrophic failure）。由于这一关键转变十分快速，人们对所涉及的精确微观机制知之甚少，也难以直接成像。研究人员开展了一个独特的岩石变形实验，通过控制微裂（microcrack）速率来观察这些微机制，实验结合了声监测（声音）和微构造的原位 x 射线成像（视觉）。研究发现，地震振幅并不总是与局部成像的应变相关，大的局部应变经常与小的声发射一起发生，反之亦然。局部应变主要是无震的，部分原因是晶粒/裂纹沿新出现的剪切带的旋转，根据断层上的局部膨胀和剪切应变计算出的剪切破裂能是由体变形推断出的一半。相关研究成果于 2022 年 10 月发表在 *Nature Communications*。

从自然地震和诱发地震到合成材料和工程结构的破裂，多孔材料的灾难性破裂对于广泛的、各种规模的应用具有重要意义。了解这些材料在弱化和破裂过程中发生的微观构造过程，以及地震和无震组分之间的应变分配，对于减少局部变形和应变速率推断时（以地震或大地测量数据为基础）所涉及的重大不确定性至关重要。

三轴压缩下灾难性破裂的关键驱动机制是先兆破坏沿局部变形区的集中，最终导致沿明显和突然出现的不连续面发生系统级破裂。平均场模型解释了所观察到行为的某些方面，但依赖平均属性，而无法解释局部化或详细的微观力学机制。它们通常仅来自记录的声发射（AE）特性，这些特性被假定为代表局部应变，但不能解释构成总累积应变能 >99% 的局部无震机制。地震和无震应变的划分直接限制了流变学和地震前兆破裂的可检

测性，是目前地下工程项目地震风险预测中最大的不确定性来源。对大尺度应变分区演化的限制有限，而在微观尺度上则没有。

单个微裂事件的大小、位置和破裂模式通常是从 AE 波形中推断出来的，有时会根据实验后的薄片校准微观过程。开裂 (**cracking**) 是局部破裂的一种形式，是由于局部较弱材料或几何形状变化导致的局部应力集中。在恒定变形速率下，峰值应力通常与 AE 速率的快速、非线性加速同时发生，导致剧烈、突然的破裂和快速的应力下降。由于非线性流变学和短时间尺度，从稳定裂纹成核（沿局部剪切带）到系统破裂的转变所涉及的微观机制难以实时捕获和表征。但是，可以通过控制加载速率以保持恒定的 AE 速率来延长破裂持续时间。此过程可防止裂纹破裂的加速，并且可以将通常发生在几秒钟内的微观过程延长到几分钟，甚至几小时，从而能够在准静态条件下研究峰值后的应力区。最近，岩石变形实验的原位高能 X 射线显微断层扫描 (μ CT) 延时成像使微构造破裂和局部应变的非破坏性表征成为可能。然而，迄今为止，此类研究仅限于恒定的应变速率，无法捕捉到峰值应力后发生的快速变化。

研究人员在新型 X 射线透明三轴变形单元中开展实验，获得了苏格兰 Clashach 砂岩破裂的详细原位图。该变形单元首次将声学监测与 μ CT 相结合，使用 AE 速率的反馈来减缓破裂，将破裂时间从 1 min 延长到 50 min，并在一系列 18 个 3D μ CT 体中捕获样品弱化和破裂，以及超声波速度变化和 AE 源的位置及振幅。这使研究人员能够分析震源、局部应变和相关的潜在微观机制之间的关系。

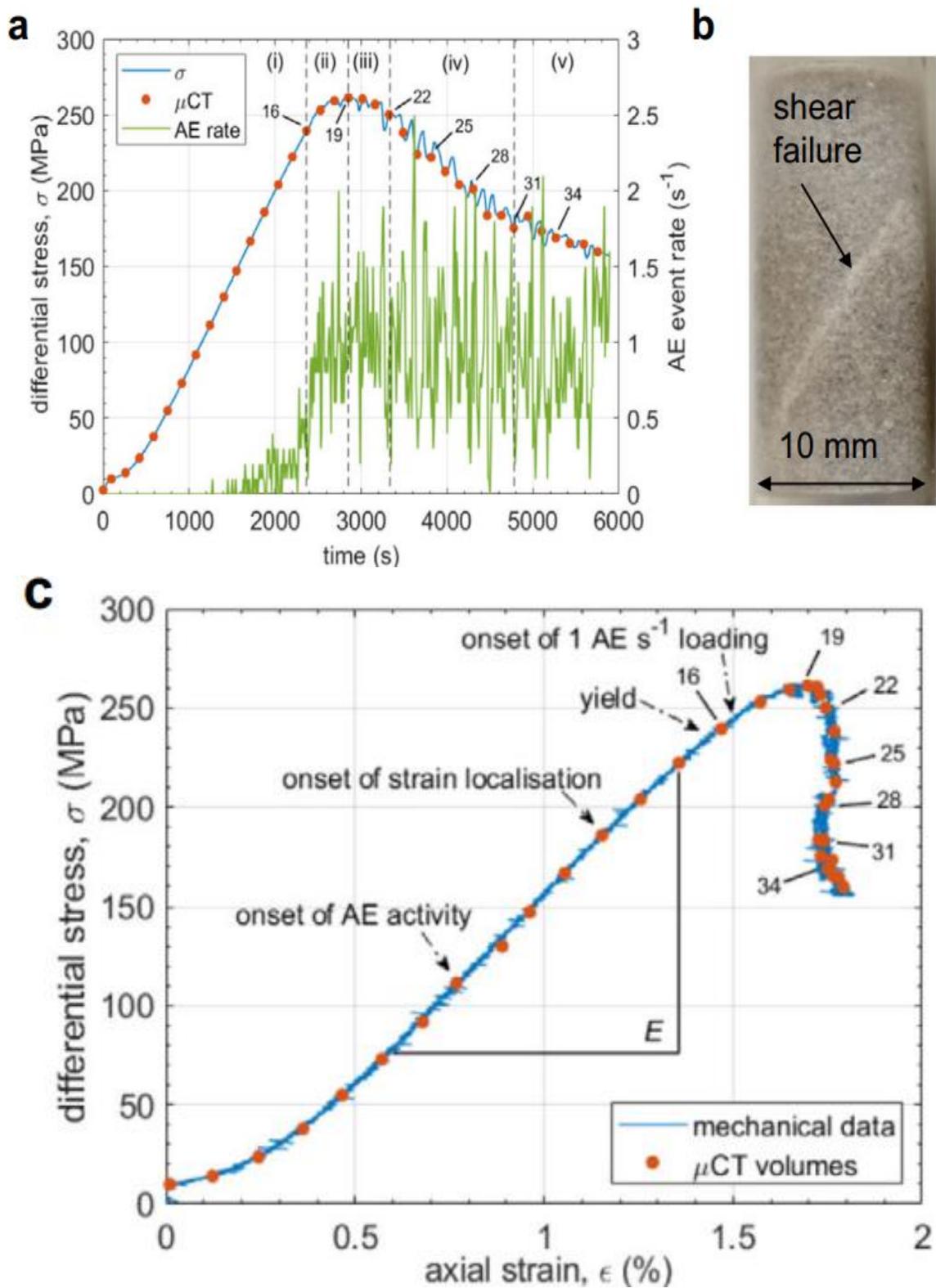
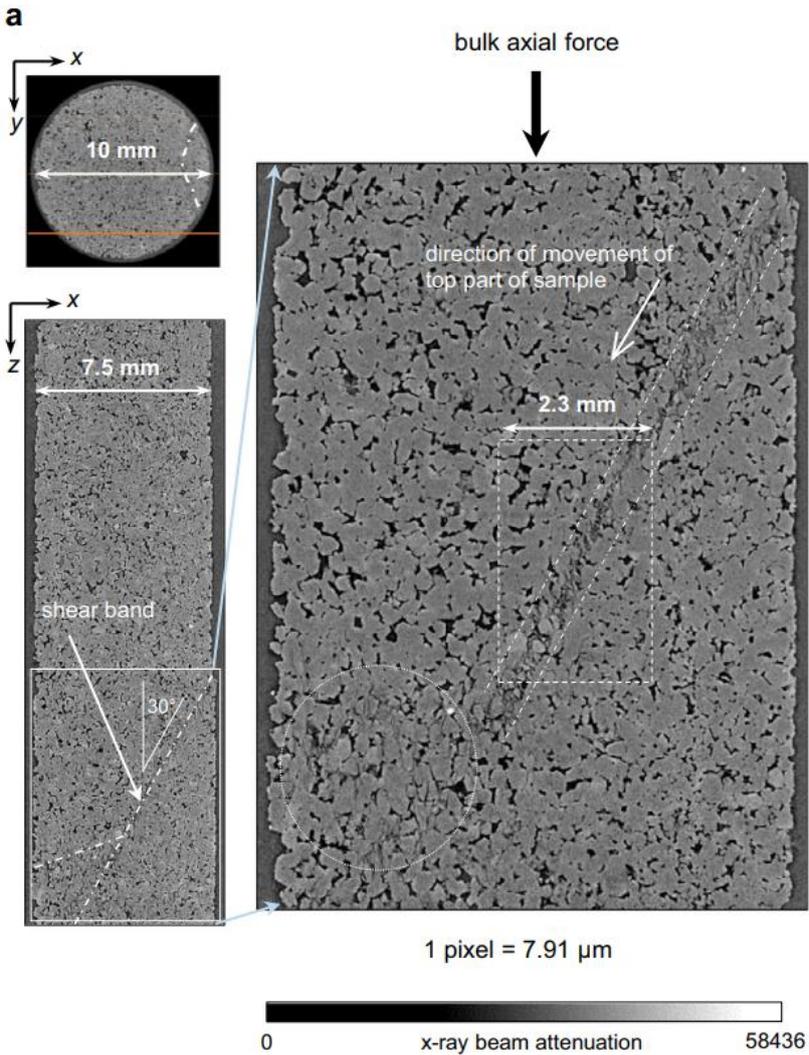


图1 Clashach 砂岩的整体力学行为（分为5个阶段）

μCT 反映的应变局部化和破裂的微观机制：最初，在整个显微构造中观察到弥漫的弹性压实。在早期加载过程中（阶段 1），AE 活动先于张性和剪切应变局部化。在应变增加接近峰值应力的过程中（阶段 2），微裂纹破坏从样品的底端开始，导致一些孔隙的坍塌，并促进了孔隙所产生微裂纹的后续成核。其中一些裂纹沿晶界（晶粒边界）延伸，而另一些则侵入整个晶粒。与加载轴近平行的微裂纹，不超过两个晶粒直径，并且在接近峰值应力的能干性应变簇区域中向样品的底端聚集。这部分微观构造中增强的垂直位移促进了样品顶部向弱化区域（压实孔隙、拉伸微裂纹）的整体剪切运动。反过来，这导致进一步的应变局部化。



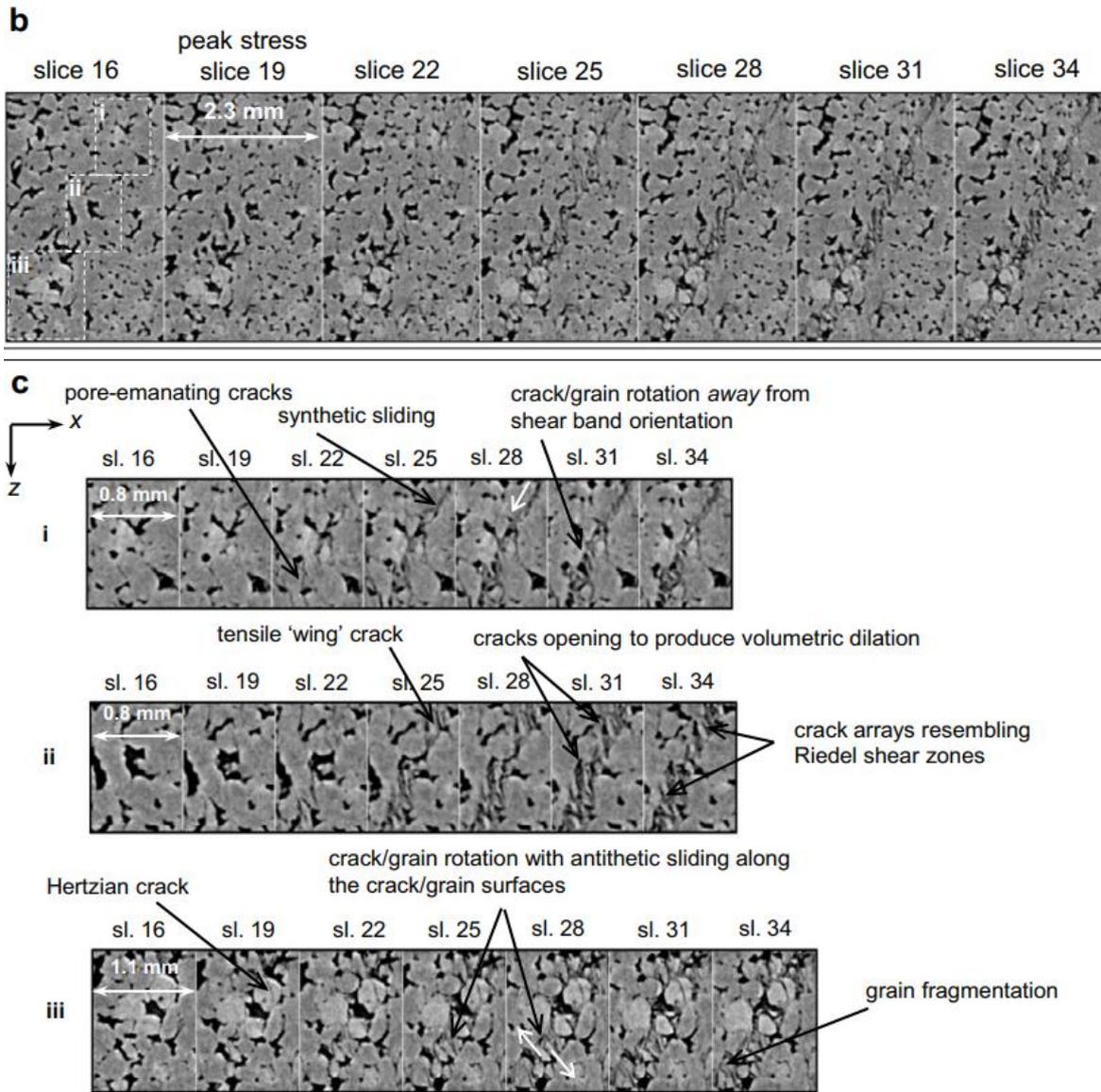


图 2 峰值应力前后微观尺度的破裂演化

在阶段 3 中，张、剪应变在峰值应力后不久就集中在临界方向的剪切带上。由于局部的高振幅膨胀和剪切应变，众多窄的雁列式微裂纹（沿整个新出现的剪切带同时成核）的自组织局部化使临界方向的剪切破裂带自发地出现。这些雁列式微裂纹主要局限于单个晶粒，起源于孔隙和赫兹接触（hertzian contact）。随着拉伸破坏机制越来越多地集中在剪切带上，整个样品的初始扩散压实被剪切带上的局部膨胀和剪切所取代。

在阶段 4 中，剪切带沿走向发育。剪切带中的膨胀和剪切应变高度相关，这与几种微观机制共同调节整体剪切运动相一致。这些裂缝的张开导致一些新的张裂隙变宽，产生膨胀和新的孔隙空间，并促进裂纹上的合成滑动。这反过来又导致在这些滑动剪切裂纹的尖端形成拉伸翼裂纹（tensile wing crack）。除了剪切带内膨胀所产生新孔隙空间的压实之外，晶粒/裂纹旋转是剪切带压实的关键促进因素。旋转增加导致裂纹倾角减小，阻碍了晶粒碎片之间的持续剪切运动，同时促进了滑动过程中低倾角裂纹的压实和闭合。相对于地震机制，这些观察突出了无震应变对整个破裂过程的重要贡献。最终，在一个连续的断层平面（四面都到达了样本边界）上发生了连贯的滑移（阶段 5）。

整体而言，研究人员观察到了一个破坏序列，从由于点载荷、孔隙变形和局部剪切滑动导致的单个晶粒的破坏，到由于晶粒旋转和碎裂而导致的原始碎裂岩的形成，再到由于进一步的晶粒碎裂、晶粒流和压实增强而导致的超碎裂岩的形成。

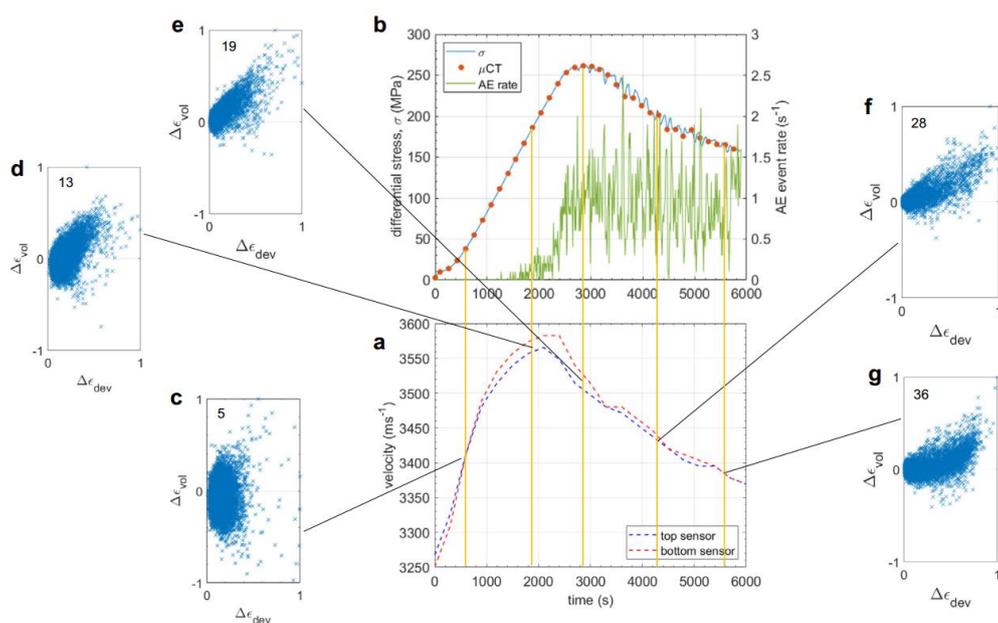


图 3 速度、应力和 AE 速率随时间的变化

地震信号：在整个实验过程中，每五分钟进行一次超声波速度测量，以表征沿加载方向的压缩波速度 V_P ，并定位声发射。 V_P 最初响应于压实而增加，然后在应变硬化期间减少，这与观察到的屈服点处局部应变的转变（从压实主导变为膨胀主导）一致。除了峰值应力之外，应变软化和剪切带传播的特点是 V_P 持续下降，这主要归因于发生膨胀的微裂纹和沿剪切带新生成的孔隙空间。 V_P 在阶段 5 中持续下降（下降速率略有减少），表明膨胀在持续，但有所减弱，因为局部变形机制变为以剪切为主，压实的贡献增加。

研究人员使用轴向定位的 P 波传感器记录了约 3600 个高于环境噪声的 AE 事件。由于两个应变场之间的高度相关性，在张、剪切应变场中发现被定位的 AE 事件中有 85% 具有相同的独特位置。即使有最大应变约束，最大的 AE 事件也不会发生在局部应变高的位置，这意味着地震应变分配系数在空间上是高度可变的。许多小事件发生在局部应变高的区域，表明剪切带内的变形主要是无震变形，而许多大事件发生在局部应变低的区域。张、剪切应变在整个实验中呈正相关，而这种正相关在 AE 发生位置更强。通过对推断的标量地震矩求和，推断出体积变形的地震应变分配系数为 0.5%，从而验证变形主要是无震的。这远低于 Dresen 等（2020）推断的 1%，很可能是由于在准静态而非恒定应变率加载下使用了脆性较小的材料（砂岩）。由于有限的信噪比，这两个估计都是下限。

破裂能：剪切破裂能或能量释放率 G_c 是模拟剪切破裂传播的关键参数。它表征了应力-应变曲线的应变软化区域，是破裂过程中每单位面积所需的能量（以产生新的断层面）。研究人员根据体积和剪切带局部应变来估计 G_c ，发现体积估计值偏大，并且局部临界滑移距离小于体积模型预测的值。通过整合剪切应力与断层滑动记录来计算三种情况下的 G_c ：（i）体轴向

应力和应变引起的样品大小断层上的均匀滑动；（ii）在每个 μ CT扫描时间，来自体轴向应力和应变的均匀滑动；（iii）直接从剪切带内的局部张、剪切应变测量中观察到的总的局部滑移。局部滑移（0.14 mm）的临界滑移距离 Δu^* 比均匀滑移（0.165~0.2 mm）更小，而综合曲线产生 $G_{c-i}=5.06 \text{ kJm}^{-2}$ 、 $G_{c-ii}=3.72 \text{ kJm}^{-2}$ 和 $G_{c-iii}=2.53 \text{ kJm}^{-2}$ 。

总体而言，该研究结合原位 X 射线 μ CT 和原位声学数据，提供了裂纹局部化和剪切带发展的综合观察。它验证了来自经典声发射实验的许多推论，如由于膨胀微裂纹的自发局部化所导致的剪切带（包含最终断层面）的成核和生长。它还表明，剪切和压实的微观机制在剪切带的发展过程中变得越来越重要。观察到的几种变形的微观机制，如通过孔隙扩张和赫兹接触机制在晶粒内和晶粒间产生的拉伸微裂缝，以及膨胀和剪切应变之间的强关联，与先前在峰值应力之前的原位 μ CT 研究中观察到的一致。

来源：Cartwright-Taylor A, Mangriotis M D, Main I G, *et al.* Seismic events miss important kinematically governed grain scale mechanisms during shear failure of porous rock. *Nature Communications*, 2022, 13, 6169.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所