

地震科技前沿快报

2019 年第 12 期 （月刊 总第 12 期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震科学实验场

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、地震中的地震：破裂复杂性中的模式
 - 2、速率-状态模型对 Cascadia 幕式震颤和慢滑变化的新认识
 - 3、海底研究首次证实伊斯坦布尔的地震风险
-

地震中的地震：破裂复杂性中的模式

震源时间函数携带有关地震破裂复杂性的信息。研究人员通过震源时间函数的数据库发现它们由不同的子事件组成。研究人员观察到，以子事件数量为代表的地震复杂性随地震震级增长。破裂复杂性的模式来自于子事件地震矩和主事件地震矩之间的比例关系。这些结果可以通过简单的二维动态破裂模拟来解释，其中断层预应力具有自仿射（self-affine）非均匀性。研究结果表明，可以在仅观察前几个子事件后估计主事件震级。相关研究成果于 2019 年 7 月发表在 *Geophysical Research Letters*。

地震复杂性是否反映了潜在的组织性或随机性是地震物理学和可预测性的一个基本问题。最近的工作表明，在地震开始时短时间内进行的观测可能被用于推断整个事件的大小和类型。以前的研究发现，早期到达的

P 波带有关于整个地震大小的信息，但是这种相关性具有很大的不确定性，需要额外的信息来进行有意义的早期震级估计。然而，直接到达的 P 波仅代表可用和潜在确定性信息的一小部分。地震过程的地震特征在源时间函数 (STF) 中被捕获。估算 STF 的常规方法分为两类。第一类反演了记录体和面波的断层滑动的运动演化，并产生了时间速度函数，这种方法适用于大地震。第二类使点源近似于破裂，并且直接对具有格林函数的记录地震波进行去卷积。这种方法假设远场脉冲与站点平均时的力矩率函数成比例，适用于小、中等地震，并导致更大的 STF 集合。

本研究中，研究人员使用了 SCARDEC 1992—2017 年包含震级在 M5.5~9.0 之间的 3395 个 STF 以及 USGS 1990—2017 年震级大于 M7 的数据集。STF 具有基本结构，包括地震矩的初始加速度和随后的减速度。当对许多事件进行平均时，STF 的最大值约为其持续时间的 30~50%。尽管形状的这种一阶相似性，STF 之间的差异对于大型事件变得明显。在下文中，将利用 STF 形状的粗糙度作为地震复杂度的度量。

研究人员构建了一个源自动态破裂模拟的合成 STF 数据库。这些模拟解决了两个空间维度的弹性动力学方程，其中线性滑动弱化了摩擦沿着一维断层的作用。同时，使用光谱边界积分方法解决了这种耦合弹性-摩擦问题。本研究的目标是测试预应力中的异质性是否解释了观察到的 STF 特征。断层预应力被定义为具有空间均匀的平均值加上遵循幂律谱密度 $P_m(k) \sim k^{-\gamma}$ 的空间变化的扰动。通过随机选择成核位置产生 600 个预应力分布并运行动态破裂，只保留其中的 499 个破裂（没有超出自仿射预应力区域），这产生了超过 2 个数量级差异的地震。对于这些模拟地震，通过积分断层维度上的力矩率来计算 STF。因为模拟的 STF 包含比观察到的 STF 的数据集更高的频率，所以通过将模拟的 STF 与宽度 $\sigma = 2s$ 的高斯卷积来平滑模拟的矩速率函数。

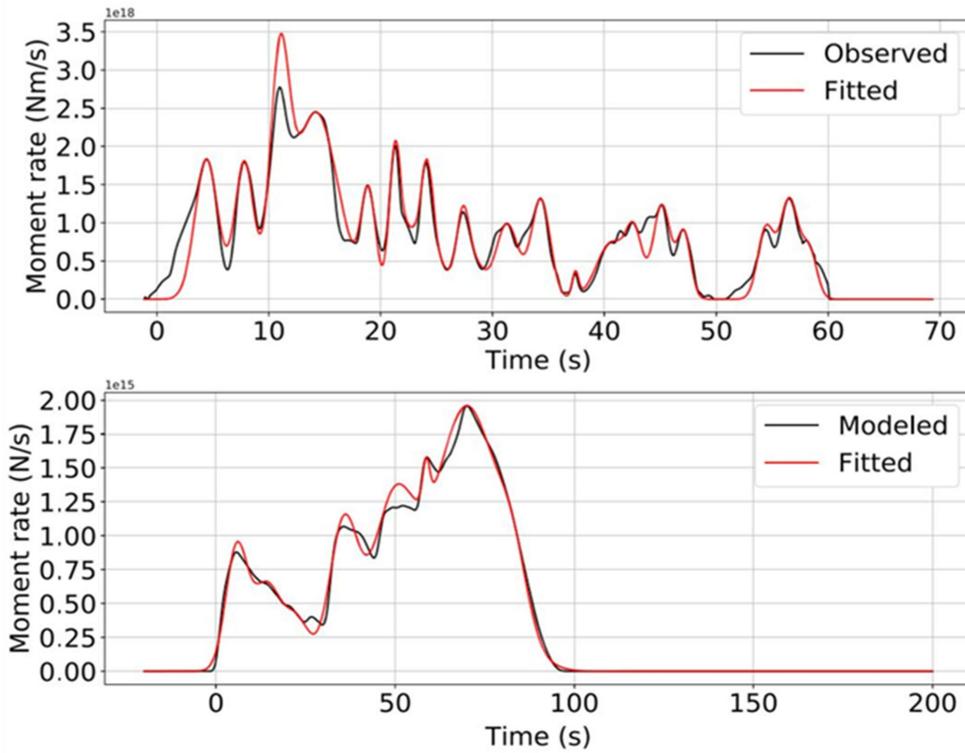


图1 1994年大西洋中脊7.1级地震观察到的STF(黑)和格林函数建立的STF(红);
以单位断层宽度(黑色)的力矩率建模的STF和相应的拟合高斯STF(红色)

在子事件分解时,观察到的和模拟的STF的粗糙度可以用几种方式描述。本研究中,研究人员将STF分解为高斯脉冲的“子事件”的总和。发现高斯子事件最适合SCARDEC STF的形状。从破裂开始执行子事件分解如下:

- ①及时前进并在时间 t_s 检测到满足 $S_s > 0.1 \max(\text{STF})$ 的峰值 S_s ;
- ②拟合以 t_s 为中心的高斯函数到 STF, 幅度为 S_s , 宽度 σ 使用网格搜索估计, 最小化 11 个网格线上的均方根残差, 或 $0.77s$;
- ③如果 $4\sigma > 1s$, 则将检测计为子事件并向前移动, 否则返回步骤 1;
- ④从 STF 中减去拟合的高斯函数;
- ⑤如果 STF 中剩余更多时间, 则返回步骤 1。

研究人员将相同的算法应用于所有 STF。基于 STF 的最大峰值选择的阈值对于忽略数据无法解析的杂散残差是必要的。其他阈值导致检测到解

释为过度拟合的较小子事件。

相关研究结果主要包括以下方面：

(1) **地震复杂性**。通过利用子事件数量来度量地震复杂性，发现地震复杂性随着地震大小的增加而增加。一般来说， $M_0 < 4 \times 10^{19}$ 的地震有 1~4 个子事件， $M_0 > 4 \times 10^{19}$ 的地震具有 4~10 个子事件。对于走滑断层上的地震来说，这种特征更加明显，对于 $M_w > 6.75$ 的地震，较小和较大的地震分别具有 2.5 subevents/ $\log(M_0)$ 和 3.3 subevents/ $\log(M_0)$ 的斜率。这些地震的震源约 15km，是地壳地震的典型深度。大的倾滑地震表现出更小的地震复杂性。对于 $M_0 \geq 6 \times 10^{20}$ 的地震具有 2.5 subevents/ $\log(M_0)$ 的斜率。深度对倾滑地震的影响很小，地壳和深部地震都有接近 3 个子事件。研究人员在数值模拟中发现了子事件数量的单调增长模式：预应力变化之间存在密切关系，而破裂速度本身就是弹性动力学破裂扩展的基本方面；当破裂前沿由于有利的预应力区域而加速时，子事件便会成核，反之则会消失。

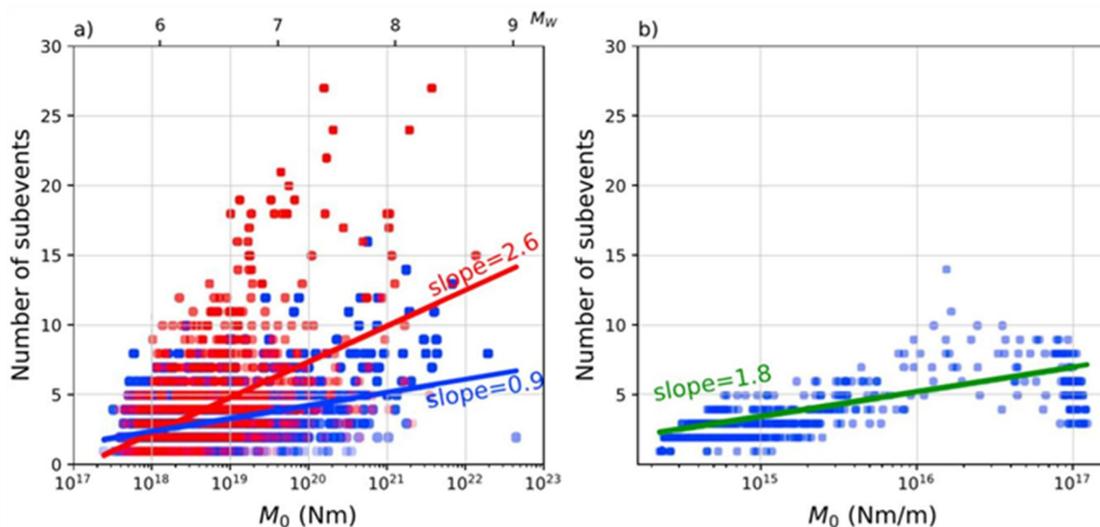


图 2 子事件数量随主事件地震矩的变化

(2) **子事件比例关系**。子事件地震矩与主事件总地震矩相关，与事件大小无关，主事件地震矩与子事件地震矩的比率在 1~100 之间。这种分

布的下限源于这样一个事实，即很少发现子事件大于主事件，这在定义上是正确的，但是高斯函数与局部力矩率函数的近似有时会带来误差。这种分布的上限来自于选择检测子事件的阈值和忽略持续时间短于 1s 的子事件。在 3395 个 STF 中，19 个被排除在后一个标准的分析之外。通过改变阈值，比例关系保持不变。在 USGS 数据集中看到了类似的比例关系。另一个支撑证据是没有在大型 $M_w 8+$ 地震中检测到小的子事件：这些地震的子事件要么埋在最大子事件的信号中，要么在分解中检测不到，或者他们不存在。对于观察到的 STF，子事件地震矩 M_S 和主事件 M_0 之间的比例关系是 $\log_{10}(M_S) = 0.79\log_{10}(M_0) + 3.22$ ，并且对于模拟的 STF， $\log_{10}(M_S) = 0.8\log_{10}(M_0) + 2.30$ 。自然界中的真实地震发生在三维断层上。因此，预期两个比例关系不相同。然而，低于 1 的比例关系斜率是观察到的和模拟的 STF 的强大特征。

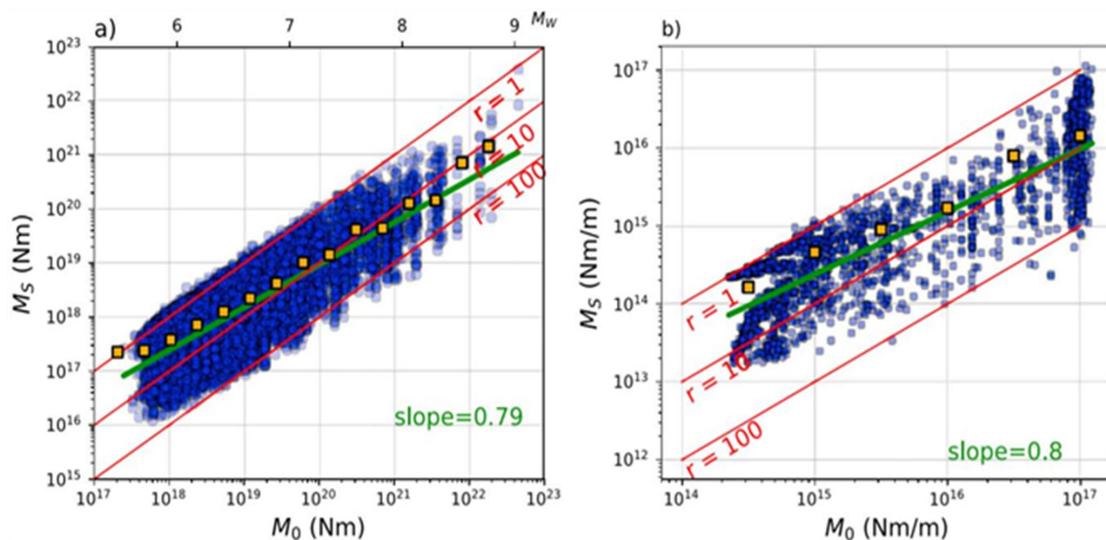


图 3 单独的子事件地震矩与主地震矩的关系

(3) 对于地震早期预警的可能应用。子事件与主事件之间的时间关系有可能通过对开始几个子事件的观察来预测主事件的时间。研究人员利用 2018 年的帕鲁 (Palu) 7.5 级地震中建立的源时间函数检验了这一想法。采用之前分析的采样率对 STF 插值。在破裂时开始扫描 STF，并在 $t = 1.8s$

处拟合第一个子事件，这是第一个检测到峰值的时间。通过拟合高斯函数来估计子事件地震矩和持续时间，然后应用从上述比例关系略微修改的算法来估计最终事件地震矩。在破裂时间内预测到 1.8s 的 7.2 级地震，但只发生了 6.3 级地震，最终的震级为 7.5 级。地震预警（EEW）系统由于数据限制、网络延迟、数据解析和解释数据的不确定性而具有延迟。此外，还没有实现实时源时间函数反演。对整个 SCARDEC 数据库进行计算，发现可以预测最终震级，偏差为+0.03，并且在破裂持续时间的前 20% 中，瞬时震级的不确定度为 0.52。研究人员发现，在破裂时间的 30~50% 内可检测到最大的子事件。然而，存在系统偏差，可能原因是破裂过程中尚未探测的子事件的大小分布结构。但是，这些偏差可能在未来被改进，并在这种比例关系的应用中得到解决。

来源：Danré P, Yin J, Lipovsky B P. & Denolle M A. Earthquakes within earthquakes: Patterns in rupture complexity. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46, 7352–7360, doi:10.1029/2019GL083093.

速率-状态模型对 Cascadia 幕式震颤和慢滑变化的新认识

大地测量和地震观测的进展导致了幕式震颤和慢滑（ETS）的发现。卡斯卡迪亚（Cascadia）俯冲带中的 ETS 是半规则的，并且显示出有趣的时空变化，据报道与断层摩擦性质和应力条件有关。然而，复杂的 ETS 行为的起源还是未知的。本研究中，研究人员开发了一个基于实验室的俯冲断层速率-状态凹凸体基质模型（rate - and - state asperity - in - matrix subduction fault model）来再现与观察结果相符的所有 ETS 变化，这一模型得到对剥露断层的地质观测的支持。结果表明，孔隙压力在影响断层行为中起着至关重要的作用。具有被降低孔隙压力的凹凸体的震颤增加。研究表明，ETS 的变化可用于探测其他未知的断层带性质。相关研究成果于 2019 年 7 月发表在 *Geophysical Research Letters*。

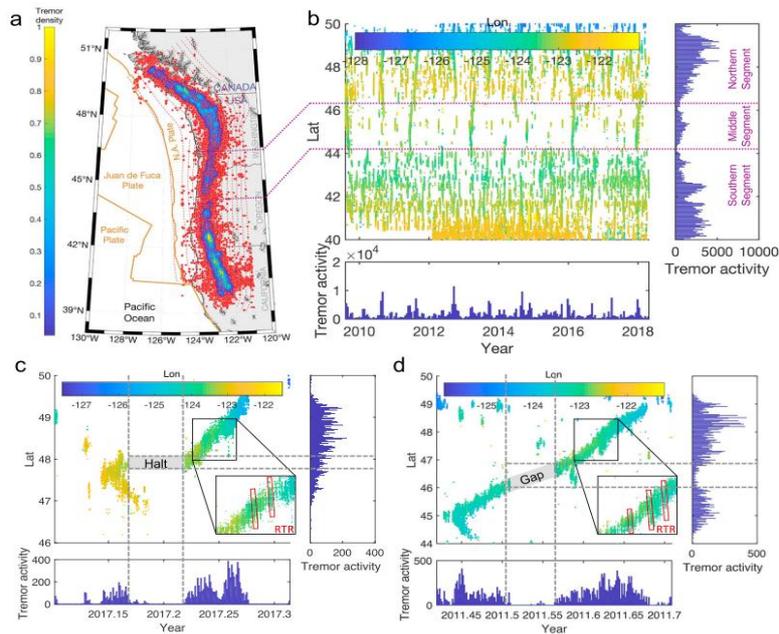


图 1 沿着卡斯卡迪亚俯冲带的震颤的时空分布

大地测量和地震观测技术的进步使人们发现了各种各样的断层滑动行为，包括慢滑事件（SSE）、非火山震颤、低频地震和甚低频地震等慢地震。这些慢地震具有与传统地震不同的比例关系和破裂特征。震颤、低频

地震和甚低频地震通常被称为慢地震。同时，SSE 代表非常缓慢的滑动瞬态，不会辐射地震能量，通常由大地测量仪器检测。这些缓慢的地震通常可在较年轻俯冲带断层的孕震-耐震过渡带附近观察到。

卡斯卡迪亚俯冲带尤其见证了一系列慢地震行为。特别是，发生的幕式震颤和慢滑（ETS）事件改变了人们对构造灾害和地震周期的看法。ETS 事件具有震颤和 SSE 的时空并发特征，并且是偶发性的。卡斯卡迪亚俯冲带的 ETS 事件显示出大规模的沿走向分段，这些分段具有数月至数年的不同间隔。ETS 事件通常以每天几公里的速度稳定传播，沿着走向可以达到数百公里。这些事件在相对较小的尺度上也显示出一些有趣的行为。值得注意的特征包括：

(1) ETS 暂停：ETS 事件传播然后在某个位置暂停。它大致在同一地点延迟几天恢复。图 1c 显示了卡斯卡迪亚北部 2017 年 ETS 事件中典型的 ETS 停止情况。

(2) ETS 间隙：ETS 在事件发生期间的某些位置和时间缺乏伴随的震颤活动。然后，震颤活动在不同位置恢复，大致遵循原始 ETS 传播方向，但传播速度降低。图 1d 显示了 2011 年 ETS 事件期间的典型 ETS 间隙。

(3) 快速震颤逆转（RTR）：前向震颤迁移有时伴随着震颤的稀疏分布向后传播，其速度高得多且接近恒定速度，比向前迁移快约 5~50 倍。

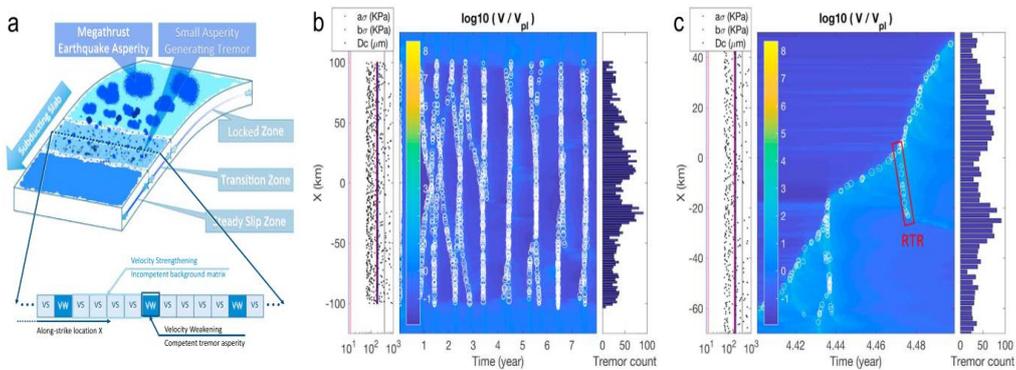


图 2 异质俯冲带模型和 ETS 基准模型的原理图

在过去的几十年里，人们已经模拟了 ETS 的物理过程。但是对 ETS 变化的理解仍然有限。这些模型的一个共同特征是在孕震-耐震过渡区中非常低的有效正应力，这可能是由于流体超压造成的。以前的研究表明，SSE 和震颤活动对压力扰动很敏感。震颤和潮汐应力之间存在很强的相关性。此外，地质、实验室和理论研究表明，断层上的孔隙压力可能因不同的时空尺度而显著变化。除此之外，非构造载荷也影响断层上的应力条件。之前的研究表明，由于它们的低应力性质，这种应力变化可能显著影响 SSE。另一方面，在模拟震颤活动的过程中，Luo 和 Ampuero (2011, 2018) 开发了一种基于凹凸体基质模型 (asperity - in - matrix model) 来重现 ETS 事件中的大规模前向传播和 RTR。该模型得到了剥露的俯冲断裂带的地质观测支持。在该研究中，研究人员建立在先前的建模基础上，结合地质约束、ETS 观测和基于实验室的速率和状态摩擦模型来解决两个问题：

(1) 什么物理过程可能导致 ETS 在时空上的丰富变化？

(2) 可以从 ETS 变化中了解到关于断层性质和应力状态的什么信息，这些信息对断裂过程和大地震成核都至关重要。

主要研究方法涉及速度-状态摩擦模型和以异质断层特性模拟的俯冲带 ETS。

(1) 速度-状态摩擦模型：速度-状态摩擦定律很好地模拟了断裂过程，在这一模型下断层被当作一个摩擦面，剪应力为：

$$\tau = \sigma \mu$$

摩擦系数是滑移速度 V 和状态 θ 的函数：

$$\mu = \mu^* - a \ln \frac{V^*}{V} + b \ln \frac{V^* \theta}{D_c}$$

状态变量 θ 随时间演化，本研究中研究人员采用了滑移律：

$$\dot{\theta} = -\frac{V\theta}{D_c} \ln \frac{V\theta}{D_c}$$

参数 a 、 b 决定了材料的性质，当 $a-b>0$ 时，发生速度强化 (VS)，断层稳定，反之，发生速度弱化 (VW)。速度弱化可能会因其“临界”而产生不稳定性。临界定义为它是否能够产生自发事件，受其大小和相应的摩擦特性和应力条件控制。在这里，将自发事件称为滑动瞬变的自激活序列而没有任何外部扰动。对于均质断层，如果它是“超临界”，将产生不稳定性，其中断层的大小超过某一临界尺寸 L_c ——由摩擦性质和有效正应力 σ 乘以与断层几何相关的常数 C_g 确定。

$$L_c = C_g \frac{GD_c}{\sigma(b-a)}$$

如果断层大小小于 L_c ，则它是“亚临界的”，并且不会发生自发事件，尽管出现速度弱化。对于非均质断层，其稳定性由与方程 L_c 相同的物理性质控制，但具有更复杂的形式而“临界”的概念仍然适用。

(2) 以异质断层特性模拟俯冲带 ETS：凹凸体基质模型是具有明确物理基础的最常用模型之一。该模型将异质俯冲界面视为能干的发育震颤的凹凸体，并嵌入在非能干的基质中，它们的相互作用导致重复的 ETS 事件。在速率和状态摩擦框架下，能干的速度凹凸体被建模为 VW 斑块，而非能干的基质被建模为 VS 材料。在先前的研究中已经使用这种 VW-VS 混合断层材料来产生由震颤、慢滑动和稀疏分布的 RTR 组成的 ETS 事件。

在这项研究中，研究人员专注于卡斯卡迪亚北部的 ETS。模型沿着走向 250km。中心 200km 的断层具有嵌入在 VS 背景中的 VW 震颤凹凸体。在断层的两端，施加 25km 的纯 VS 边缘，以减轻周期性边界的影响；模拟区大小与卡斯卡迪亚 ETS 段的沿线长度相当。在之前的研究中发现震颤凹凸体的间距（密度）和断层的整体有效正应力可以共同影响断层的行为。

鉴于震颤凹凸体与基质之间的有效正应力的固定关系，如果震颤凹凸体彼此相距太远，则断层将是亚临界并且自发事件将不会持续。随着凹凸体间距的减小，最终断层将在地震作用下破裂。

在这项研究中。VS 基质被设置为具有 1MPa 的低有效正应力，因此它像 SSE 一样断裂。单独的 VW 震颤凹凸体具有更高的有效正应力，因此它们可以发生地震破裂并发出地震信号以被检测为震颤。震颤凹凸体具有随机 D_c 分布，导致凹凸体临界值 $dx/L_c=0.02$ 至 0.6 的均匀分布。所有的凹凸体都是亚临界的，所以它们只有在与基质相互作用时才会集体破坏，从而再现了幕式震颤和 SSE。模型能够重现复发性 ETS，复发间隔约为 1 年，ETS 持续时间接近 1 个月。前向 ETS 偏移的平均传播速度约为 5km/天，稀疏分布的 RTR 向后传播的速度比向前迁移快几倍到几十倍。所有这些都与卡斯卡迪亚北部的观察结果非常吻合。大规模 ETS 传播显示近似线性模式；在较小的尺度上，前向震颤偏移在每个 RTR 之后显示抛物线模式，其中 ETS 传播速度随距离减小。

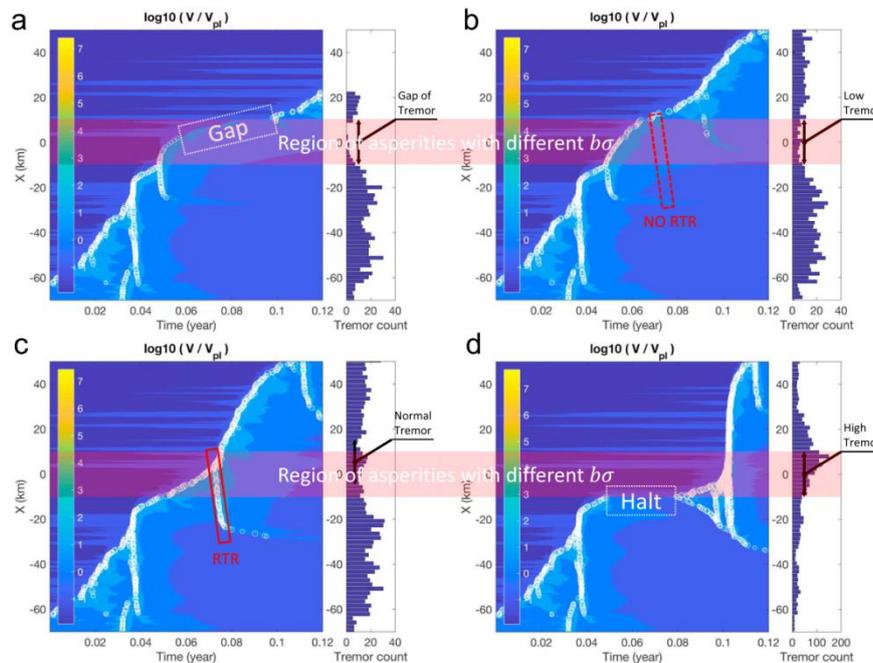


图 3 ETS 的变化

该研究取得的一些主要发现如下：

(1) 具有最低相对强度的震颤凹凸体区域显示“ETS 间隙”行为，其中震颤活动暂时暂停，而 SSE 继续传播，最终震颤恢复。

(2) 相对强度较低的震颤凹凸体区域震颤活动减少且无 RTR。

(3) 具有中到高度相对强度的震颤凹凸体区域将具有 RTR 的 ETS 事件，与 ETS 期间 RTR 有稀疏分布的观察一致。

(4) 强度增加的震颤凹凸体区域将具有增加的震颤活动，更快的传播 ETS 和更多 RTR。在大约 $R_b > 30$ 时，“ETS 停止”开始出现，震颤活动停止，然后在同一地点恢复。在速率-状态模型中，“ETS 停止”之后恢复的 ETS 显示震颤活动的显著增加，其对应于具有高相对强度的变化区域中的 ETS 的再激活，与卡斯卡迪亚中的观察一致。

这一建模结果可以用非均质摩擦性质和震颤凹凸体之间的相互作用和/或背景基质来解释，并与实际观测结果相符，它还提供了对观测到的 ETS 时间变化的解释。尽管这个模型侧重于卡斯卡迪亚中的小规模 ETS 的变化，但该模型适用于更广泛的范围，可以解释更持久的 ETS 变化，并且还可被用来探测断裂带性质和应力条件，时间依赖的 ETS 变化也可以提供关于断层应力条件演变的重要信息。

来源：Luo Y. & Liu Z. Rate-and-state model casts new insight into episodic tremor and slow-slip variability in Cascadia. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46, 6352–6362, doi:10.1029/2019GL082694.

海底研究首次证实伊斯坦布尔的地震风险

倒塌的房屋、破坏的港口设施和成千上万的受害者——1766年5月22日，一场大约7.5级的地震和随后的浪涌引发了伊斯坦布尔的灾难。此次地震的起源位于马尔马拉海的北安纳托利亚断层。

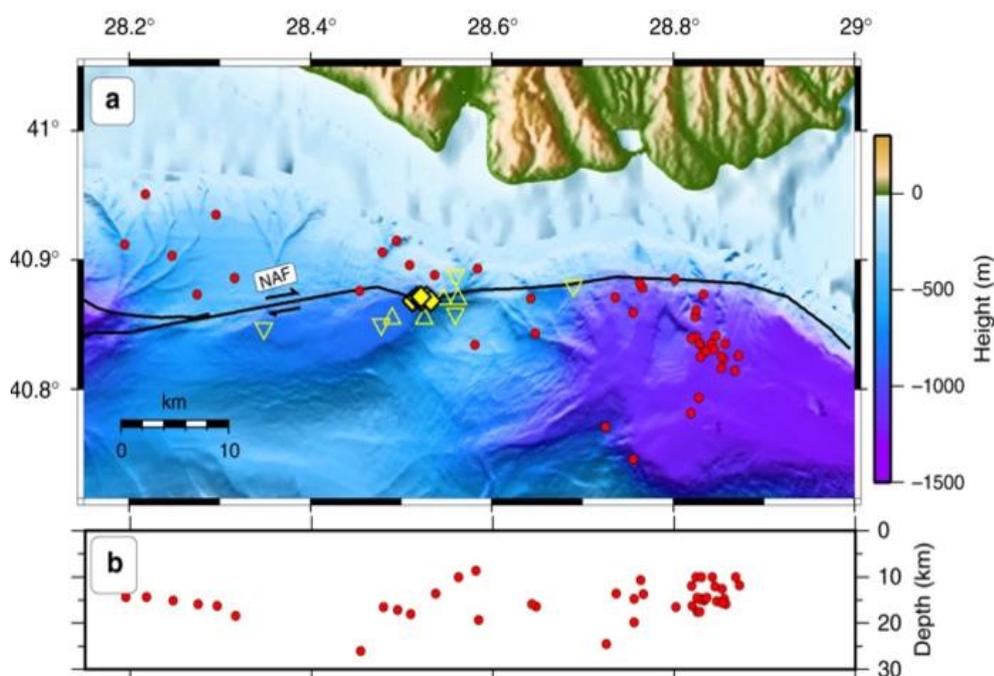


图1 由海底地震数据定位的地震活动

近日，德国亥姆霍兹海洋研究中心（Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, GEOMAR）的研究人员以及法国和土耳其的同事对海底进行的首次直接测量证明，马尔马拉海下的北安纳托利亚断层的构造应变再次累积，已经相当大。GEOMAR的地球物理学家 Dietrich Lange 博士表示，触发另一场震级在7.1~7.4之间的地震已经足够。2019年7月，相关成果发表在 Nature Communications 上。

北安纳托利亚断层带标志着欧亚板块和安纳托利亚板块之间的边界。当断层带被锁定时会发生强烈地震。最近一次地震发生于1999年，位于

伊斯坦布尔以东约 90 km 的伊兹米特附近的北安纳托利亚断层的一段。沿着陆地断层带积累的构造应变已被用 GPS 或陆地测量方法定期监测了多年。由于 GPS 卫星信号在水下的穿透深度较低，因此这在海底断层带中是不可行。然而，北安纳托利亚断层对伊斯坦布尔大都市区构成巨大威胁的部分位于马尔马拉海的水下。

到目前为止，只能使用陆地观测来推断板块边界是否在移动或锁定。然而，这些方法无法区分蠕动和构造板块的完全锁定。GEOMAR 开发的新型 GeoSEA 系统可测量海床上的声学距离，现在科学家们首次以毫米精度直接测量地壳变形。在两年半的时间里，在断层两侧的水深 800 m 处安装了十台测量仪器。在此期间，他们进行了超过 650 000 次距离测量。

测量表明，马尔马拉海的断层带被锁定，因此构造应变正在增加。这是伊斯坦布尔南部海床应变积聚的第一个直接证据。Heidrun Kopp 教授表示，如果在地震中释放累积的应变，断层带将移动超过 4 m，这相当于 7.1~7.4 级的地震。这样的事件很可能对附近的伊斯坦布尔产生深远影响，此前，1999 年伊兹米特地震造成 17 000 多人伤亡。

来源：Istanbul: Seafloor study proves earthquake risk for the first time

https://www.eurekalert.org/pub_releases/2019-07/hcfo-iss070819.php

Interseismic strain build-up on the submarine North Anatolian Fault

offshore Istanbul

<https://www.nature.com/articles/s41467-019-11016-z>

主 送：中国地震局领导

联 系：中国地震科学实验场管理部 Email:sycglb@ief.ac.cn