

地震科技前沿快报

2022 年第 7 期（月刊总第 42 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、摩擦性质和岩性对 Hikurangi 北部边缘浅层慢滑移的控制

慢滑移是弹性变形和蠕滑变形之间的中间环节，文章介绍了在俯冲带采集的原岩样品的摩擦实验结果，量化了摩擦强度、稳定性和愈合能力，提出了速度相关摩擦参数（ $a-b$ ）和临界滑移距离（ D_c ）作为浅层慢地震成核的潜在重要控制因素。研究结果为慢滑移动力学研究提供了独特的见解和约束，属于慢滑移方面的前沿领域研究。

2、2019 年 Ridgecrest 地震造成广泛的岩石破坏

文章分析了地震的非弹性变形有助于断层破碎带的形成，断层破碎带构成应变能的永久汇聚，改变浅地壳的弹性特性，并放大近场地面震动。文章综合分析断裂、应变和余震等，非弹性变形随距断层距离的衰减可用反幂比定律描述，研究揭示了宏观断裂如何产生强烈的近断层破碎，以及在多个地震周期中断层刚度的变化等。文章讨论的内容涉及断裂变形导致的近场地面震动，非常重要，但在国内地震破裂带研究中还很少涉及，属于前沿领域类工作。

3、2016年熊本地震序列引起的地震活动模式变化及其对改进前震红绿灯系统的意义

了解大地震前后的变化过程非常重要，可以使用统计地震学中的相关定律：古登堡-里希特频率大小定律和欧森-乌苏后衰减定律等。文章评述这些定律，显示了日本熊本地震序列开始之前地震区域附近属于高应力带；但之后，沿 Futagawa-Hinagu 断层带应力下降。详细分析表明，存在沿发震断裂带的非震滑移，非震预滑移降低了局部的应力。因此，文章提出需要考虑地震频率大小分布的空间变化，改进前震红绿灯系统；该成果可考虑开展跟踪研究，推进在业务工作中的使用。

摩擦性质和岩性对 Hikurangi 北部边缘浅层慢滑移的控制

全球俯冲带的慢滑移事件 (SSEs) 被认为是弹性动态破裂和稳态蠕变之间的重要连接。新西兰 Hikurangi 北部边缘有大量的浅层 SSEs, 它们扩展到海底 2 km 以内, 并可能到达海沟, 这为了解 SSEs 行为的物理环境提供了机遇。本研究介绍了对 Hikurangi 边缘 SSEs 源区原岩的一系列摩擦实验 (板块运动速度从 1.6×10^{-9} m/s 到 1×10^{-3} m/s), 并量化了在不同应力下, 不同岩性摩擦速度依赖性和愈合速率。摩擦速度依赖性 (a-b) 和临界滑移距离 (D_c) 随滑移速度增加, 在滑移速度约为 $0.3 \mu\text{m/s}$ 时发生由速度强化到速度弱化的转变。 D_c 的速度依赖性是由于高滑移速率下的膨胀强化和活动剪切带的变宽引起的。粘土矿物富集的火山碎屑砾岩具有低的愈合速率, 而白垩岩具有相对高的愈合速率。将实验限定的不同岩性的愈合速率外推到 1~10 年时间尺度后, 发现与大地测量推断的 Hikurangi SSEs 的低应力降和愈合速率特征一致。相关研究成果于 2022 年 2 月发表在 *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*。

持续数天或者数月的 SSEs 已被认为是全球板块边界上一种重要的变形过程, 它构成了弹性动态破裂和稳态蠕变之间的桥梁。这类滑移在地震周期中扮演重要的角色, 调节板块运动并提供板块界面岩性的信息。在一些情况下, SSEs 会在相邻的断层触发地震; 在另一些情况下, SSEs 也会被相邻的断层触发或者停止。因此, SSEs 在地震周期中的角色并不清楚。再者, 很多 SSEs 发生在汇聚板块边缘地震带的下部, 约 30~40 km 深处, 这使得直接采样研究 SSEs 源区岩石的摩擦行为变得不可能。

Hikurangi 北部边缘发育浅层准周期 SSEs, 破裂接近海沟并具有 12~18 个月的周期。另外, 这些 SSEs 的源区曾孕育海啸地震, 并被认为有很强

的孔隙流体超压。因此，约束源区物质摩擦行为对于更好地理解控制断层滑移行为的岩石性质和过程，以及未来的地震和海啸风险具有重要意义。

前人开展了大量约束自然界断层摩擦滑移行为的实验，尤其关注摩擦强度以及滑移稳定性。后者通常在速度-状态摩擦方程（RSF）框架内开展。实验观测表明，断层会发生稳态滑移或者非稳态滑移，包括 SSEs 和地震。基于断层弹性加载刚度和临界断层刚度之间的相互作用，SSEs 自然地作为无震滑移和弹性动态破裂之间的桥梁。

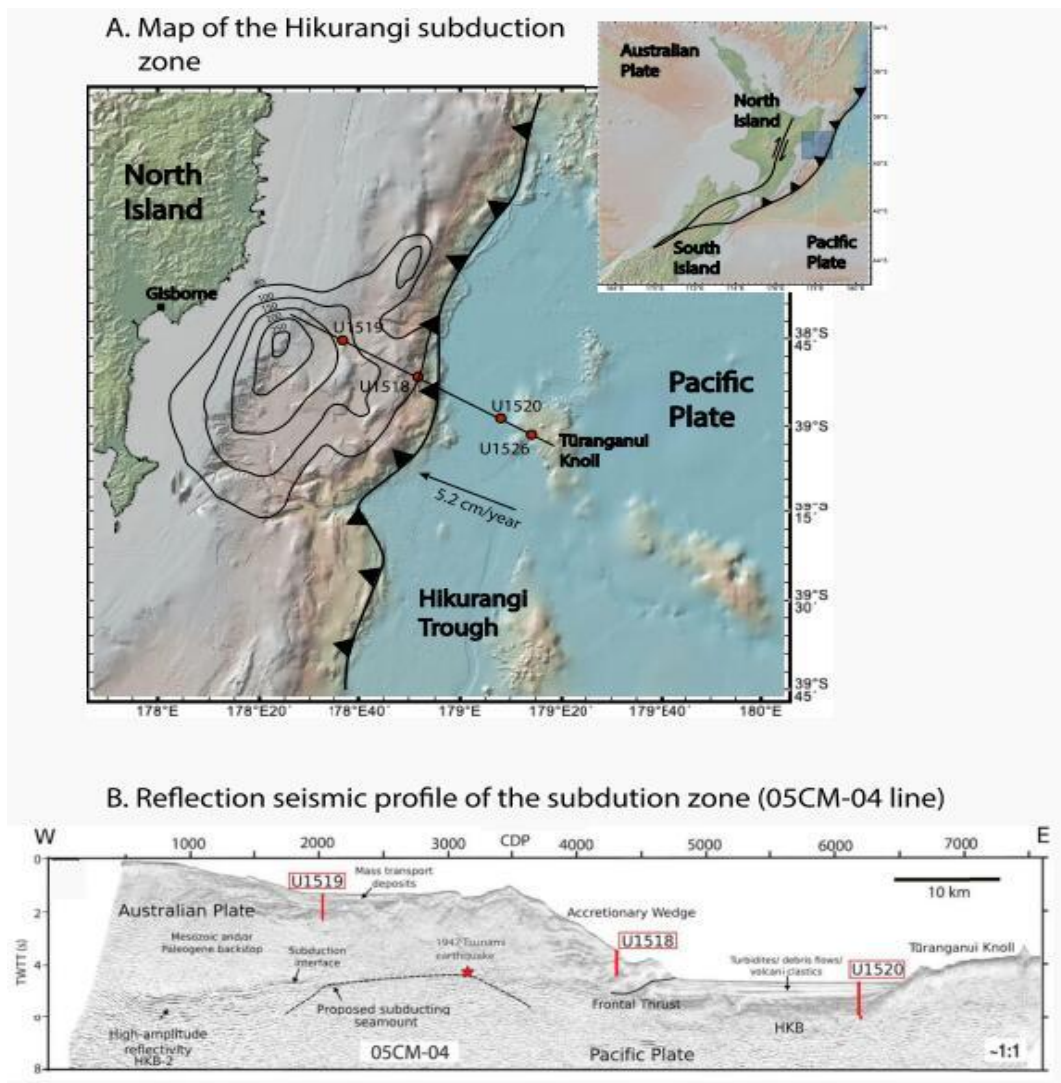


图 1 Hikurangi 俯冲带及地震剖面

最近，国际大洋发现计划（IODP）372 和 375 航次到达 Hikurangi 边缘，并采集了在俯冲到 SSEs 区域之前太平洋板块上的物质。这为量化孕育浅部 SSEs 物质的摩擦行为提供了机遇。尤其是，白垩岩与层状硅酸盐富集的火山碎屑砾岩可能是俯冲到 SSEs 区域的最重要的岩性。

Hikurangi 俯冲边缘调节太平洋板块，使其以 2~6 cm/yr 向西俯冲到澳大利亚板块之下，汇聚速率沿走向由北向南降低。Hikurangi 北部的 SSEs 更浅（<15 km），具有更短的周期（12~18 个月）和持续时间（2~3 周），其扩展到靠近海沟的位置。相反，Hikurangi 南部的 SSEs 更深（25~50 km），具有更长的周期（4~5 年）和持续时间（3~24 个月）。Hikurangi 北部浅层 SSEs 源区被认为具有岩性和几何学特征不均一性。地震反射调查和钻孔数据表明，白垩岩与粘土矿物富集的火山碎屑砾岩是 SSEs 最重要的两种岩性。粘土矿物富集的沉积岩具有低的摩擦力和速度强化的特点，而碳酸盐岩富集的沉积岩具有高的摩擦强度和速度弱化的特点。这种不均一性可为 SSEs 的形成提供解释。

研究人员设计了在 SSEs 源区环境下，滑移速率从板块运动速率约 5 cm/yr 到 1 mm/s 的双剪切（0.3~1000 $\mu\text{m/s}$ ）和单剪切（ 10^{-13} ~1 $\mu\text{m/s}$ ）摩擦实验，以测量源区物质的摩擦强度、滑移稳定性和愈合行为，并通过实验结果确定 RSF 的参数。

滑动-保持-滑动（Slide-Hold-Slide）实验表明，火山碎屑砾岩在再剪切时没有表现出“保持”后的摩擦峰值，并且具有接近零的愈合速率（ $\beta=0.0013/10$ 年）；白垩岩表现出更高的摩擦愈合速率（ $\beta=0.0123/10$ 年）。速度阶跃（velocity stepping）实验表明，RSF 中 a 表现出中等的速度依赖性，而 b 对滑移速率不敏感。从 Hikurangi 北部边缘的板块运动速率到慢滑移速率，火山碎屑砾岩大多表现出速度中性或者轻微的速度弱化。在 0.3

$\mu\text{m/s}$ 时，碳酸盐岩和火山碎屑岩都开始随断层滑移速率的增加发生摩擦参数的稳定增加。 D_c 在实验中表现出 V^n ($n=0.3\sim 1$) 式的速度依赖性，然而，在单剪切试验中， D_c 与滑移速率无关。

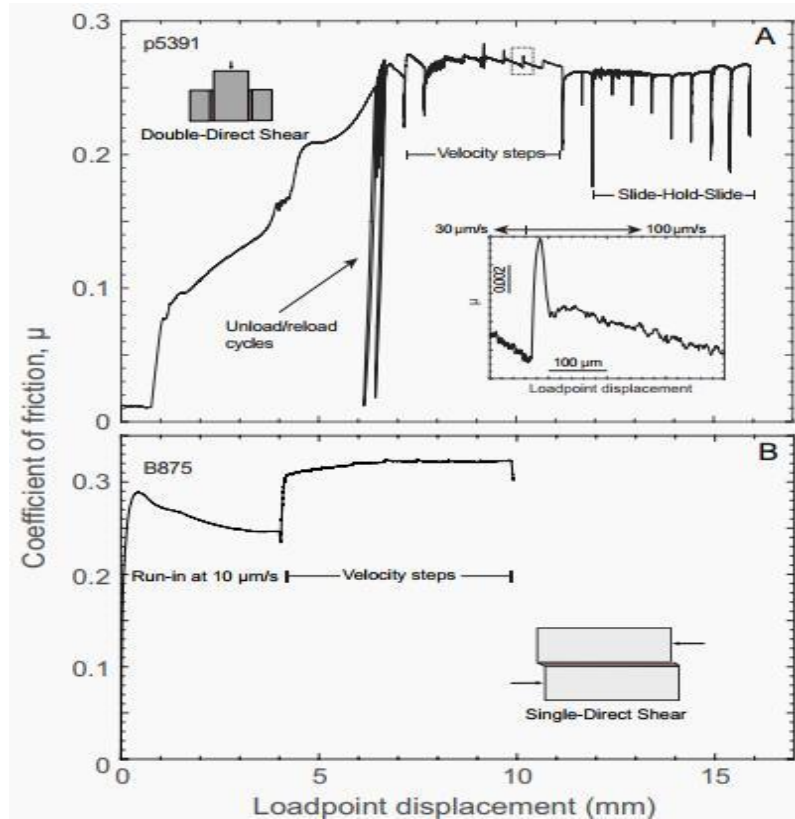


图2 试验中摩擦情况随加载位移的变化

发生非稳态滑移的必要条件是断层加载刚度 (k) 不能超过摩擦弱化临界速度时的刚度 (k_c) :

$$k \leq k_c = \frac{\sigma_{eff}(b-a)}{D_c}$$

当 k 接近 k_c 时，慢滑移发生。这一准则也可被写为临界成核长度 h^* 的函数： $k \sim G/h^*$ 。更大的成核长度，意味着更低的刚度，因此更有可能发生失稳。同时，如果断层是速度强化的，即 $a-b > 0$ ，则不会发生失稳或者破裂。

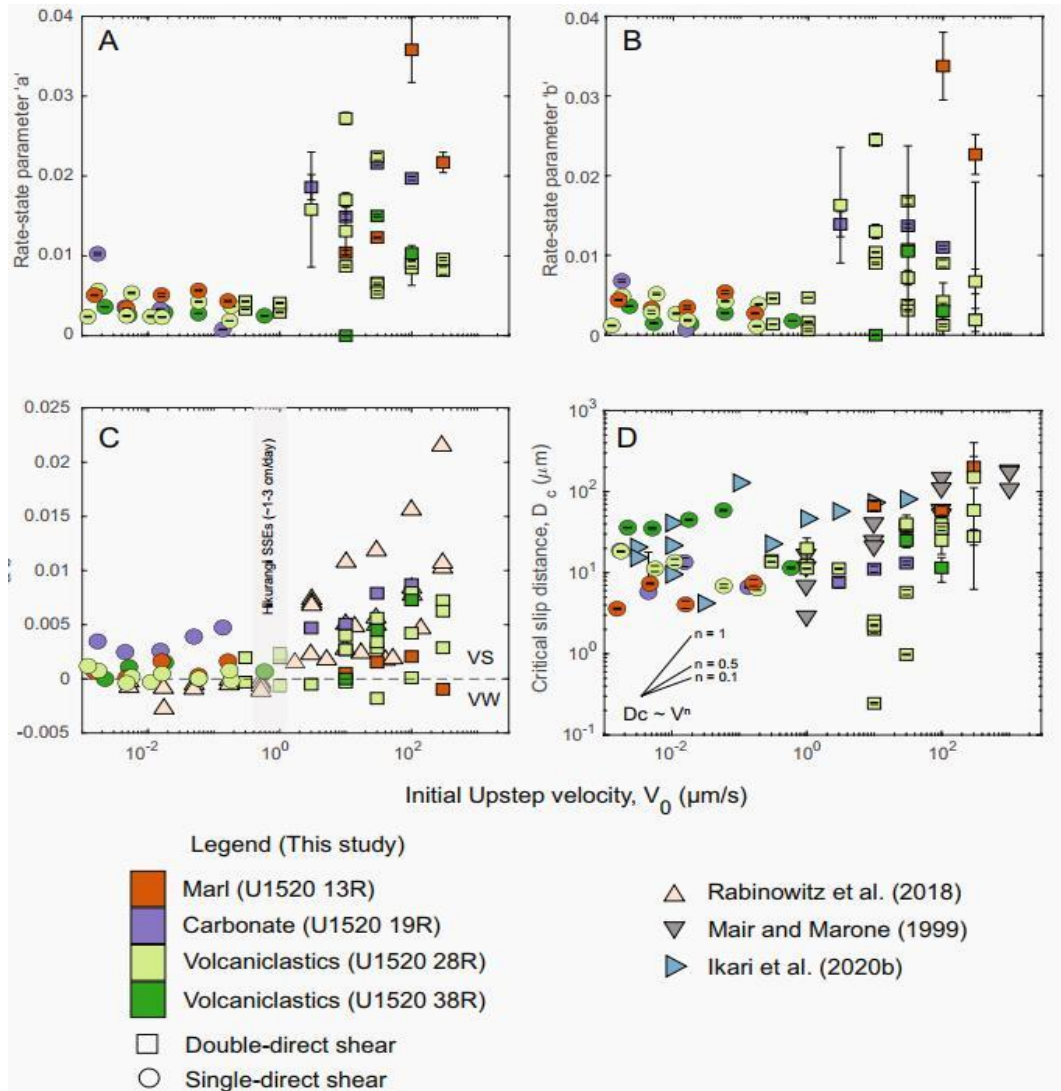


图3 速度阶跃试验中RSF参数的变化

RSF 参数随滑移距离的变化：滑移速率增加， a - b （正值）和 D_c 也增加。同时， k_c 也随着滑移速率的增加而增加，使其更加接近 k ，促进慢滑移和稳态滑移发生，而非弹性动态破裂。数值模拟表明，当滑移速率低于某一截止值时发生速度弱化，而高于这一值时发生速度强化。在该研究的试验中，这一转变速度与 Hikurangi 北部边缘慢滑移的峰值滑移速度一致。

D_c 对滑移速度的依赖机制：研究人员探究了膨胀强化和剪切带宽化对 D_c 滑移速度依赖性的作用。膨胀强化是一种机制，其中断裂带膨胀随着滑

移速率的增加而迅速增加，导致局部孔隙压下降，从而瞬间增加局部有效正应力。但实验发现，膨胀强化可能不是 D_c 速度依赖性的主要机制。结果表明，膨胀强化可能通过与滑移相关的 RSF 参数变化和流体因膨胀扩散到新孔隙而对 RSF 参数的“表观”影响发挥重要作用。因此，研究人员认为，速度相关的剪切去局部化会影响 D_c 的演变，其可能是浅层 SSEs 行为的一个重要因素。

矿物对摩擦行为的控制：俯冲界面的岩性具有不均一性，主要有两类：碳酸盐岩和蒙脱石粘土。富含碳酸盐岩的白垩岩以高摩擦强度，高愈合速率和摩擦速度依赖性（速度中性到速度强化）为特征。碳酸盐岩会在水热条件下发生由于压溶引起的断层愈合，而本实验保持的时间很短，因此获得愈合速率可能代表了实际愈合速率的下限。相反，富含蒙脱石的火山碎屑砾岩在滑移速率超过 $0.1 \mu\text{m/s}$ 时具有低的摩擦强度以及速度强化的特点。

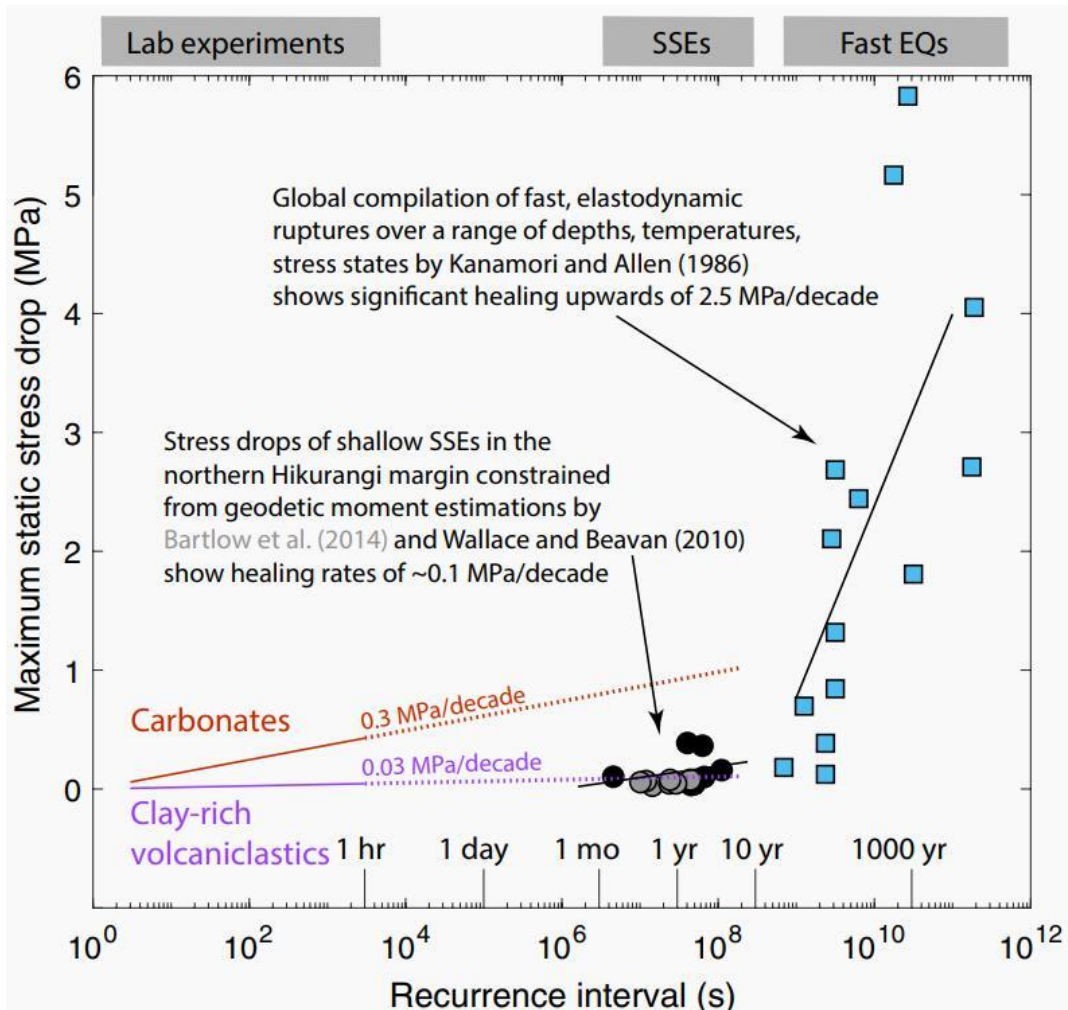


图4 实验观测的及大地测量约束的慢滑移和地震复发间隔与静态应力降

对于 M_w 5.6~7.8 的地震，其复发时间为 50~60000 年。研究人员基于静态应力降和复发时间之间的对数线性关系，估计平均愈合速率约为 1.6 MPa/10 年。对 Hikurangi 北部边缘浅层 SSEs 应力降和复发时间的观察表明，这些 SSEs 具有低的愈合速率和小的应力降。将白垩岩和火山碎屑相愈合的实验估计结果外推到与 Hikurangi 北部边缘准周期性浅层 SSEs 的复发持续时间一致时，提供了对愈合速率的深度依赖性约束。具体来说，考虑两种端元情景来估计俯冲沉积混合物的最大和最小应力愈合速率（MPa/10 年）——富含碳酸盐的断层，极少/没有孔隙流体超压，代表最高愈合速率；具有超压的富蒙脱石断层，代表在 25 MPa 有效应力下的最

低愈合速率。大地测量学定义的愈合速率（0.1 MPa/10 年）介于碳酸盐断层的高愈合速率（~0.31 MPa/10 年）和火山碎屑砾岩的较低愈合速率（0.03 MPa/10 年）之间。总的来说，研究表明，强的脆性碳酸盐岩和弱的粘性粘土矿物之间的混合可能是 Hikurangi 北部边缘愈合和浅层 SSEs 成核的重要两相矿物学控制因素。

对 Hikurangi 北部边缘浅层 SSEs 的启示： 在研究人员的模型中，俯冲板块上的摩擦和几何块体（asperity）被嵌入以速度中性、摩擦力较弱的火山碎屑砾岩为主的粘性基质。在适度升高的温度和/或应力下，浅层失稳可能会在具有高愈合速率的碳酸盐岩中成核。然而，依赖于速度的摩擦和膨胀强化（被潜在的超压孔隙流体增强）的组合可能会阻止这些失稳，从而表现为浅层慢地震。在发震深度（>7~10 km），压力-温度条件有利于碳酸盐在所有滑移速率下发生速度弱化。因此，碳酸盐和/或玄武岩可能使失稳成核发展为快速的动态地震（dynamic earthquake）。在这种情况下，动态弱化可能在较浅的速度中性/强化沉积物中占主导地位，从而防止破裂停止。

来源：Shreedharan S, Ikari M, Wood C, et al. Frictional and Lithological Controls on Shallow Slow Slip at the Northern Hikurangi Margin. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2022, 23(2): e2021GC010107.

2019 年 Ridgecrest 地震造成广泛的岩石破坏

地震的非弹性过程有助于形成断层破坏带，这些破坏带造成永久的应变能汇聚，改变浅部地壳的弹性特征，并放大近场地面震动。对非弹性形变程度的约束因所使用的数据集和方法而异，本研究结合 2019 年美国加州 Ridgecrest 地震的破裂、应变和余震图，来协调不同空间尺度和分辨率的破坏带的属性。非弹性形变从断层延伸超过 20 km，并且对岩性和滑移幅度不敏感，其随断层距离的衰减可以用逆幂律很好地描述。破坏衰减是连续的，表明由单一机制主导屈服（yielding）。根据破裂密度的分布，预测基岩的剪切刚度平均降低约 20%，紧邻断层的冲积层的剪切刚度平均降低 40%，在 100 m 处剪切刚度下降到不到 1%。研究揭示了宏观破裂如何产生强烈的近断层破坏，以及在多个地震周期中区域性地产生产广泛的破坏。相关成果于 2022 年 3 月发表在 *Nature Geoscience*。

长期构造变形通常通过地块模型来解释，其中刚性微板块由断层界定。这种地壳变形模型受到野外和大地观测的支持，即应变主要集中在沿断层的窄带内，其余应变（20%~40%）分布在相邻 0.1~1.0 km 的带内。在该破坏带内发生的非弹性应变由一系列耗散过程来调节，包括断裂、弯曲、块体旋转和颗粒屈服。这些过程解释了断层上的滑动不足，构成了应变能汇，并有助于弱化围岩，从而导致地壳物理性质的永久性变化。因此，破坏带的范围和性质是地壳形变、断层位移危险概率评估和地震震动长期预测模型的基本要素。

破坏带表现为围绕主断层面由断裂和弯曲的岩石构成的扁平带。在这个带内，破裂密度随与主断层距离的增加而减小。同时，破坏带的特征还包括断层周围地震活动的集中。在大地测量学上，破坏带被描述为剪切刚

度减小的区域。在地震学上，破坏带是围绕断层（具有导波）的剪切波速降低的带。

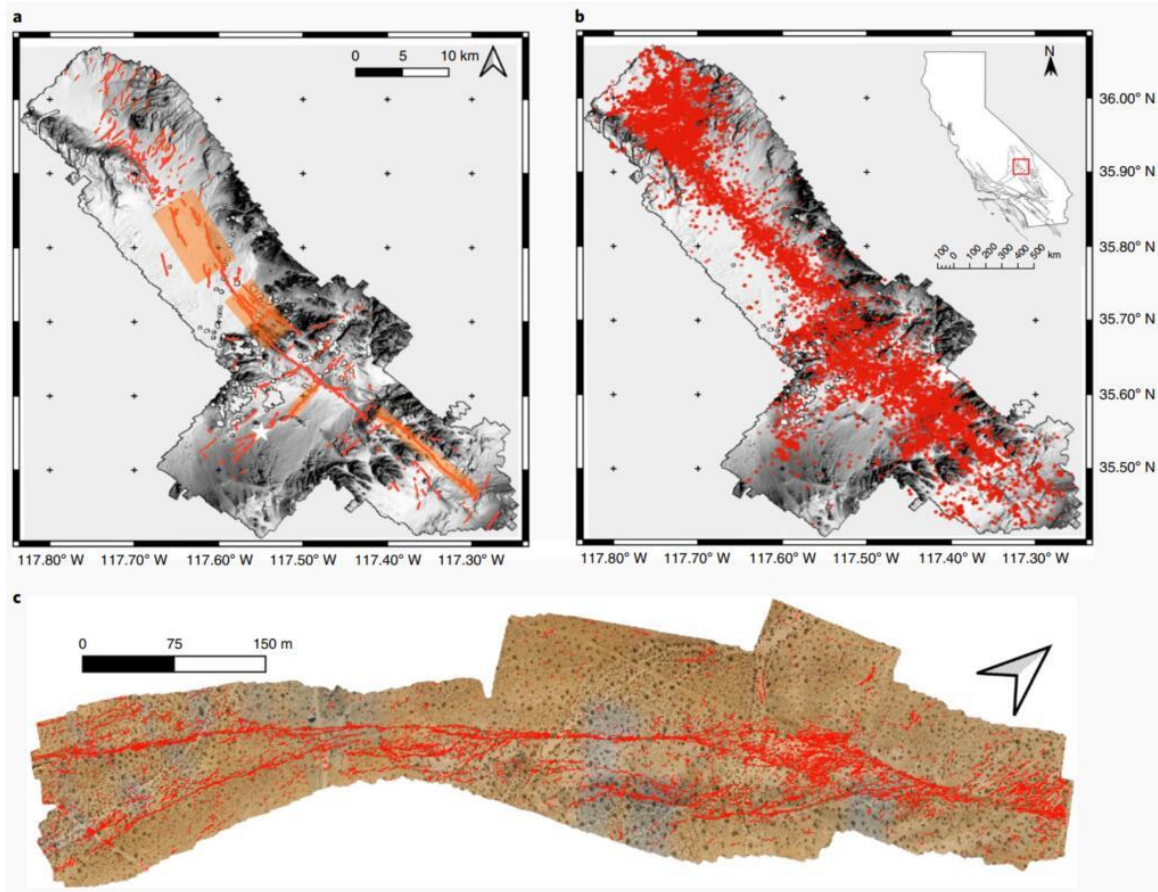


图 1 地表破裂和余震分布

2019 年的 Ridgecrest 序列在 Mw 6.4 前震和 Mw 7.1 主震中破裂了一组正交的走滑断层。该事件受到了广泛的监测，提供了通过综合方法调查破坏带范围和物理性质的机会。 Ridgecrest 地震的大地测量研究产生了对非弹性形变的不同观点；光学图像相关性定义了以破裂为中心的 30~100 m 宽的非弹性应变区域和更宽的弥散变形带（0.6~2.0 km）——经历弹性和非弹性变形；合成孔径雷达（SAR）相位梯度图展示了由库仑应力变化驱动的次级断层变形的宽带（>1km）；地震学研究显示 0.2~2.0 km 波导和沿走向变化的低速区。为了协调这些空间变量对破坏程度的限制，研究人员

结合了余震、应变图、震后激光雷达数据和破裂图。数据集的组合使研究人员能够在不同的空间尺度上详细描述破坏带，并评估其对断层滑动、岩性和数据分辨率的敏感性。

研究人员结合了三个独立的表面破裂数据集。首先，使用 2~20 cm/px (厘米/像素)的无人机(UAV)图像和 5 cm/px 的航空图像来绘制 Ridgecrest 地震的破裂。然后，根据野外观测和大地测量数据绘制地表破裂图。最后，从主震后一个月收集的 0.5 m 分辨率的激光雷达图生成第三张破裂图。为了检查深部破裂，研究人员结合了来自南加州地震台网 (SCSN) 的余震和地震模板匹配目录 (QTM)。然后，还考虑了从卫星图像绘制的地表应变分布。研究人员使用平行于断层的剪切应变 (从垂直于主破裂的剖面测量，并沿走向累积 138 m) 发现，非弹性应变 ($>10^{-3}$) 被限制在距断层 30~100 m 的范围内，超过 1 km 后，应变变得太小，无法用这种方法处理。

非弹性形变的分布：为了研究非弹性形变随断层距离的分布，研究人员量化了破裂密度、余震密度和应变强度在整个破裂处堆叠剖面的衰减，发现破裂密度与距离定义了一个逆幂律。然后，将这些破裂分布与 Powers (2010) 提出的关系拟合，得到下面的方程，其中随断层距离的衰减由断层 v_0 处的密度定义，锐度角 m 和 γ 是距离 $x \gg d$ 处的衰减斜率。

$$v(x) = v_0 \left(\frac{d^m}{|x|^m + d^m} \right)^{\frac{\gamma}{m}}$$

之后，使用马尔科夫链蒙特卡洛 (Markov chain Monte Carlo) 方法的集成采样器将方程拟合到自己的数据集， γ 的最大似然值范围从 0.8 到 1.1，并且在不确定性范围内重叠。

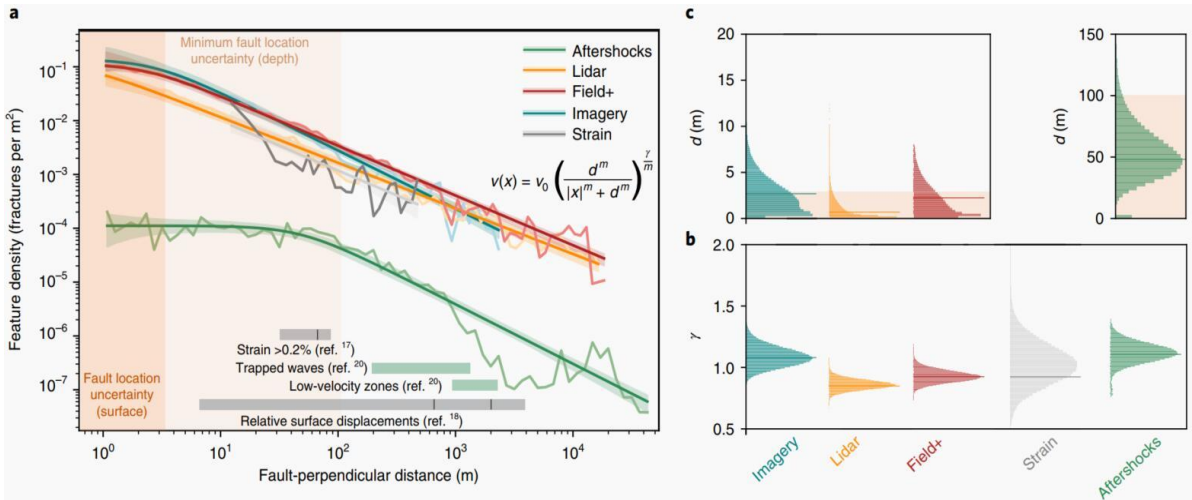


图 2 破裂密度、余震密度和应变强度在垂直于断层方向上的衰减

通过将分析获得的分布与从先前 Ridgecrest 地震研究中获得的非弹性变形程度的约束进行比较，发现由数据集捕获的角 (d) 与先前工作中估计的非弹性区域的边缘或范围不重叠。对于高分辨率激光雷达、野外和图像数据集， d 大约为主要破裂轨迹位置的空间误差，并且拟合允许不存在拐角 ($d=0$)。对于余震数据， d 与用于定义近地表断层几何形态事件约 100 m 水平位置的不确定性相当。按深度分类， d 向外迁移，这与随着与地表仪器距离的增加而增加的位置误差一致。研究认为，拐角位置是数据分辨率和断层位置不确定性的产物，并没有定义内部破坏带的宽度。相反，断层周围的破坏带是由破裂密度的幂律衰减定义的，这缺乏明确定义的边缘。用不同技术所成像破坏带宽度的变化可能至少部分反映了对破坏强度的不同程度的敏感性。

在距断层一定距离处，沉积物中的破裂密度比基岩高约 1.5~4 倍。然而，破裂密度随距离的衰减是无法区分的。基岩中破裂密度的降低可能反映了更大的内聚力，而类似的衰减指数支持导致破裂成核的机制在相同的应力条件下运行，而与材料无关。

为了评估沿走向的变化和破坏带对断层滑动的敏感性，研究人员计算了破裂密度随垂直于断层的距离的降低，以及从高分辨率图像所绘制剖面的滑移平均值和方差。尽管破裂密度存在差异，但研究发现拐角、坡度和整体破裂密度与滑动幅度没有相关性。相反，破裂密度随距离的衰减在整个破裂过程中非常一致。

将断裂图与应变图（源于光学图像相关性，应变大小使用有限应变张量的第二不变量估计）进行比较，发现破裂方向表现出可变性，但常与主断层呈小角度，这表明大部分破裂是在剪切中形成的。这与图像相关性图（image correlation map）一致，该图显示剪切主导的形变距断层小于 100 m。首先，高破裂密度和高应变区域重叠。其次，破裂图还显示出与主破裂断开的高破裂密度区域，这些区域由于累积位移太小（<20 cm）而无法通过光学匹配技术处理。这说明存在低于当前大地测量技术分辨率的非弹性形变，进而突显了震后高分辨率正射影像的价值。

对破坏带演化的启示：Ridgecrest 地震变形场的覆盖范围在数据多样性、分辨率和地表范围方面是前所未有的，观察到的广泛的非弹性形变记录可能是地震在断层演化早期阶段的一个代表性特征。

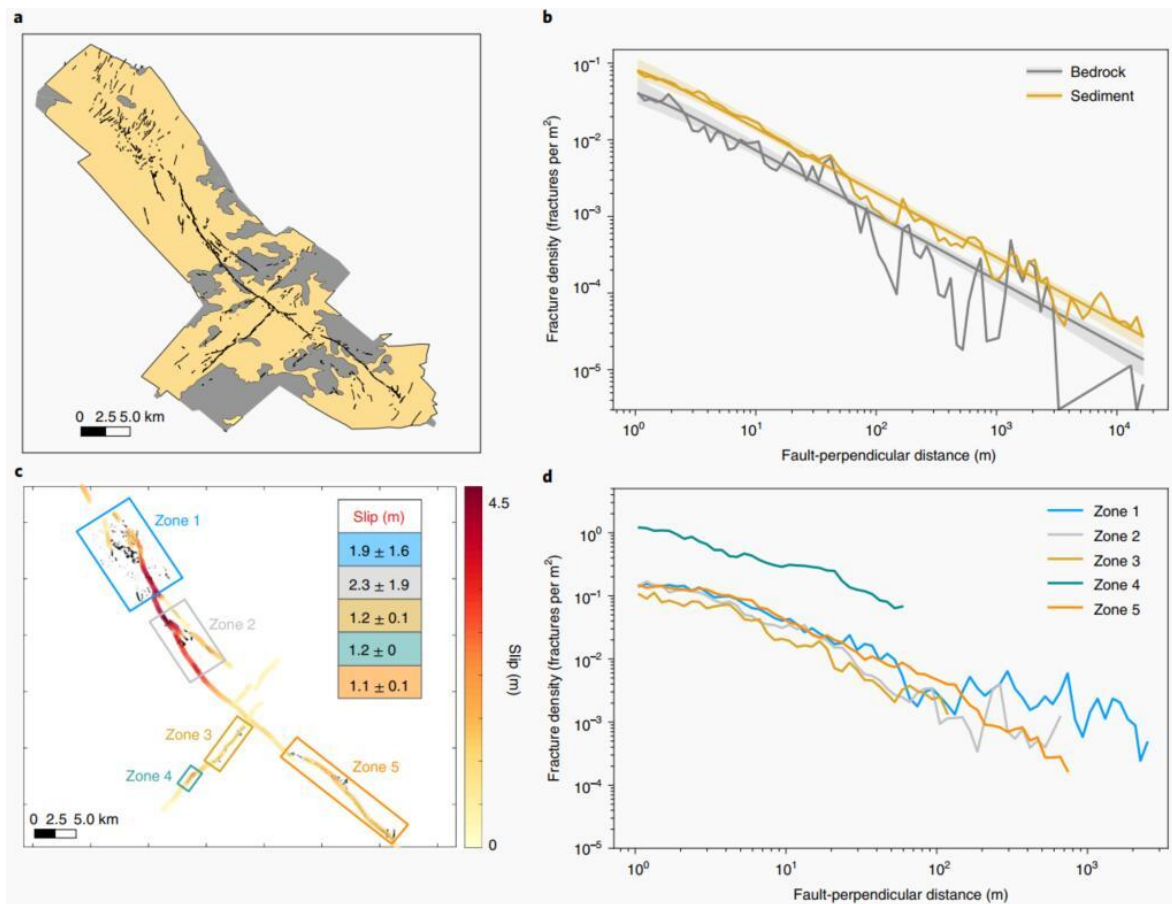


图 3 破裂密度随断层滑移和岩性变化发生衰减

对从不同分辨率数据集获得的破坏分布进行比较发现，破坏带研究中经常报告的比例中断 (**break in scaling**) 可能是数据分辨率的假象，而不是物理上有意义的参数。研究表明，破坏带表现为形变强度衰减的连续体。这需要谨慎使用单个数据集来确定数值模型和位移危险概率分析中破坏带的有效边缘。引发破裂和余震的机制是静态应力还是动态应力，不能仅从破坏衰减指数中得到答案，但所有数据集显示一致的衰减指数，表明单一机制在断层 20 km 内的屈服中占主导地位。

研究人员预测，紧邻断层的沉积物中剪切模量减少约 40%，基岩中剪切模量减少约 20%，在 100 m 处降至 <1%。虽然估算是基于在地表绘制的

破裂密度，但预测的刚度降低的宽度与在 **Ridgecrest** 地震后观察到陷波区（向下延伸 3~5 km）的宽度相当，并保持宽度不变。

分析还表明，在远离主破裂的地方，可能会出现低水平的刚度降低。这一发现得到了 **Ridgecrest** 震后剪切波速度区域性降低的支持。这些来自远场的测量显示普遍的小速度（~2%）的降低，这可能类似于在地表发现的广泛破坏。在间震期后期，沿断层在大地测量学和地震学上检测到破坏带，这表明部分同震破坏是不可恢复的。随着时间的推移，被密集断层带横切的上地壳，例如加利福尼亚东部剪切带，受到多源地震的非弹性影响，与断层带以外的区域相比变得更弱。

Ridgecrest 地震的断层和破裂测绘、余震和应变图显示了广泛的破坏，随着与主断层距离的增加呈幂律衰减。这些观察同时揭示了宏观破裂在产生强烈的近断层破坏中的作用，以及在很长的时间尺度上，广泛的破坏可能在区域内累积的程度。活动板块边界带的上地壳演变成一个受到广泛破坏的壳体，每次地震都会使其发生永久性变形。这种累积破坏降低了剪切刚度，从而将弹性形变集中到断层带，提高了断层渗透性，在断层的整个生命周期中吸收剪切应变，并可能提高分布式交叉断层网络的稳定性，例如加利福尼亚州东部很明显的剪切带。因此，已弱化板块边界带的分布式变形是局部断层上发震变形的结果，并由其促成。

来源：Rodriguez Padilla A M, Oskin M E, Milliner C W D, et al. Accrual of widespread rock damage from the 2019 Ridgecrest earthquakes. *Nature Geoscience*, 2022, 15(3): 222-226.

2016 年熊本地震序列引起的地震活动模式变化及其对改进前震红绿灯系统的意义

2016 年日本熊本地震序列导致地壳变形，其以 M6.5 地震和 28 小时之后发生的 M7.3 地震为高潮，在布田川-日奈久（Futagawa-Hinagu）断裂带及其周围形成应力扰动。监测沿该断裂带的地震活动模式变化对了解大地震前后的过程具有重要意义。统计地震学中有两个重要的应力相关定律，即古登堡-里克特定律（Gutenberg-Richter, GR）和大森-宇津定律（Omori-Utsu, OU）。日本静冈大学的研究人员总结了之前应用这些定律获得的研究结果，发现熊本地震序列开始之前，在最终的 M6.5 和 M7.3 地震震中附近产生了高应力区，同时，应力在地震序列之后沿布田川-日奈久断裂带呈下降趋势。详细分析表明，沿发震断裂带发生了无震滑动。在 M7.3 地震发生之前，震中附近局部的无震前滑降低了应力。综合前人和现今结果，进一步的研究需要考虑频率大小分布的空间变化，以改进前震红绿灯系统（Foreshock Traffic-Light System, FTLS），探索未来邻区地震发生局部前滑的可能性。相关研究成果发表在 2022 年 1 月的 *Tectonophysics*。

2016 年熊本地震序列（图 1）对日本九州中部的熊本市造成了严重破坏，4 月 14 日 21 时 26 分，日奈久断裂带北段发生 6.5 级地震。最终，4 月 16 日 1 时 25 分，布田川断裂带发生了一次 7.3 级的主震，并与日奈久断裂带北段共轭（conjugated），揭示出与 6.5 级前震相似的断层运动机制。在 7.3 级主震发生后的前三年，发生了 2.7 万多次 $M \geq 1$ 的余震，其中 $M \geq 4$ 的余震超过 100 次。

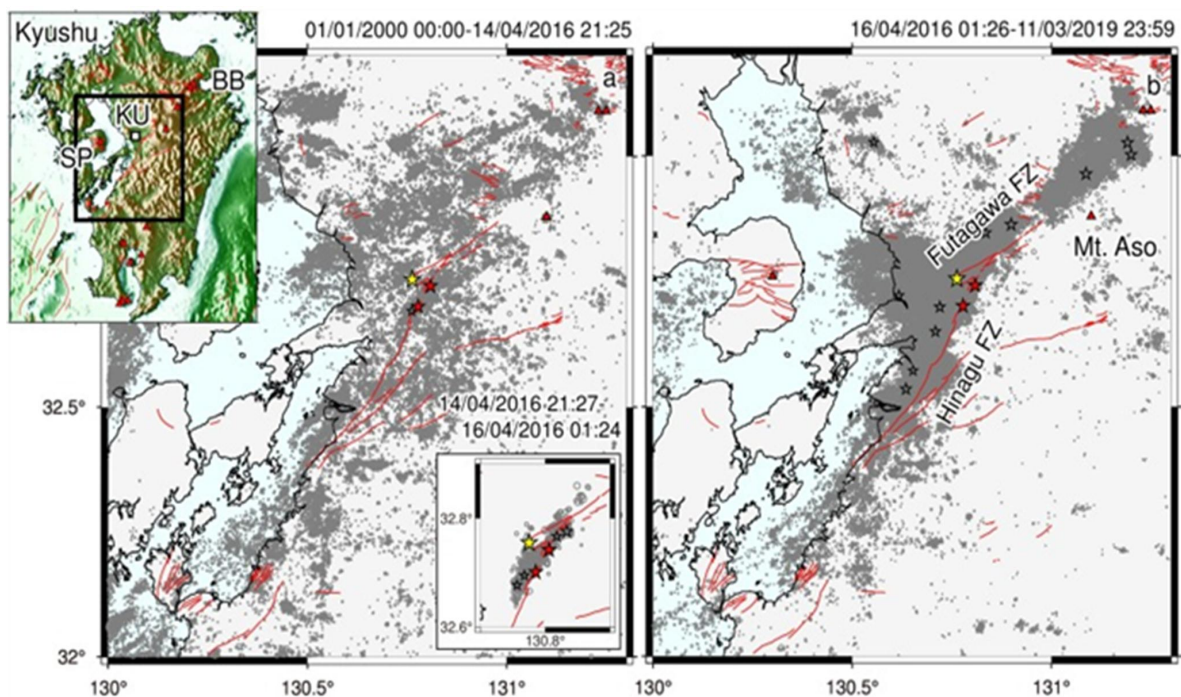


图 1 2016 年熊本地震序列 ($M \geq 0$)

沿发震断裂监测地壳形变和地震活动对了解主震前后的过程具有重要意义。数值模拟和岩石力学实验表明，地震前后均存在滑动瞬变。一些研究显示存在长期的前兆滑移加速，另外一些研究表明成核过程包括最初稳定和缓慢的破裂生长。然而，人们普遍认为大地震前的前兆滑移并不总是能观测到的。实时识别前震将提供一种有价值的预测能力，然而，之前的研究未能建立单个前震的可靠特征，使其与主震或余震区分开来。

在最近的一项研究中，Gulia and Wiemer (2019) 提出了一种前震红绿灯系统。该系统依赖于 GR 定律中 b 值相对于背景值的突变，主要利用高分辨率地震目录来监测最大地震周围的局部区域，并区分前震序列 (b 值减少) 和余震序列 (b 值增加)。本文中，研究人员分析了 FTLS 在熊本案例中的适用性，并讨论了改进 FTLS 的可能性。

先前的研究利用 GR 定律的 b 值和 OU 定律的 p 值，探讨了熊本主震前后地震活动的变化，主要发现是： b 值和 p 值随时空的变化与无震滑移和同震滑移有关的应力状态改变相关。

GR 定律为 $\log_{10} N = a - b$ ， a 和 b 为常数， N 为地震震级大于或者等于 M 的累积数。OU 定律为 $\lambda = k(c + t)^{-p}$ ， t 为主震发生以来的时间， λ 为 t 以来每个单元时间内的 M 大于或等于阈值震级的余震数， c 、 k 、 p 都是常数。 b 值与差应力呈反比，而 p 可以用来推测受压历史。在活动断层上已观察到 b 值小的区域与随后发生大地震的地点相吻合。为了在空间和时间上一致地估计 b 值，研究采用了全震级范围（EMR，entire-magnitude range）技术，同时该技术也能计算震级完整度（ M_c ），在此之上的所有事件都可以被地震台网监测到。研究人员的数据集来自日本气象厅（JMA）维护的地震目录，研究中使用了该地区 2000 年 1 月 1 日到 2019 年 3 月 11 日的地下 25 km 以浅 $M \geq 0$ 的约 10^6 个地震数据。 b 值分析在很大程度上依赖于对处理过的地震数据完整性的可靠评估。

研究人员对 2016 年 4 月开始的熊本地震之前、期间和之后的地震活动研究进行系统调查后，获得以下认识：① $M \geq 6$ 的地震震源区在熊本序列开始前应力较强，因此从 b 值和 p 值的空间分布推断，应力一般沿发震断层下降；②更详细的分析显示，这两个统计参数表明沿发震断层存在无震前滑和后滑。在震中附近发生最大地震之前，前滑减小了局部应力。

之后，研究人员利用 FTLS 的思路，分析 $M6.5$ 和 $M7.3$ 地震之间的 b 值，以反应地震活动性（图 2b），并与 $M6.5$ 地震前的情况进行对比（图 2a），表明南部地区（包括部分日奈久断裂带）的 FTLS 状态为黄色，北部地区（包括部分发生最终 $M7.3$ 地震的布田川断裂带）的 FTLS 状态为绿色。此外，一个红色信号在 $M7.3$ 主震之前被触发。

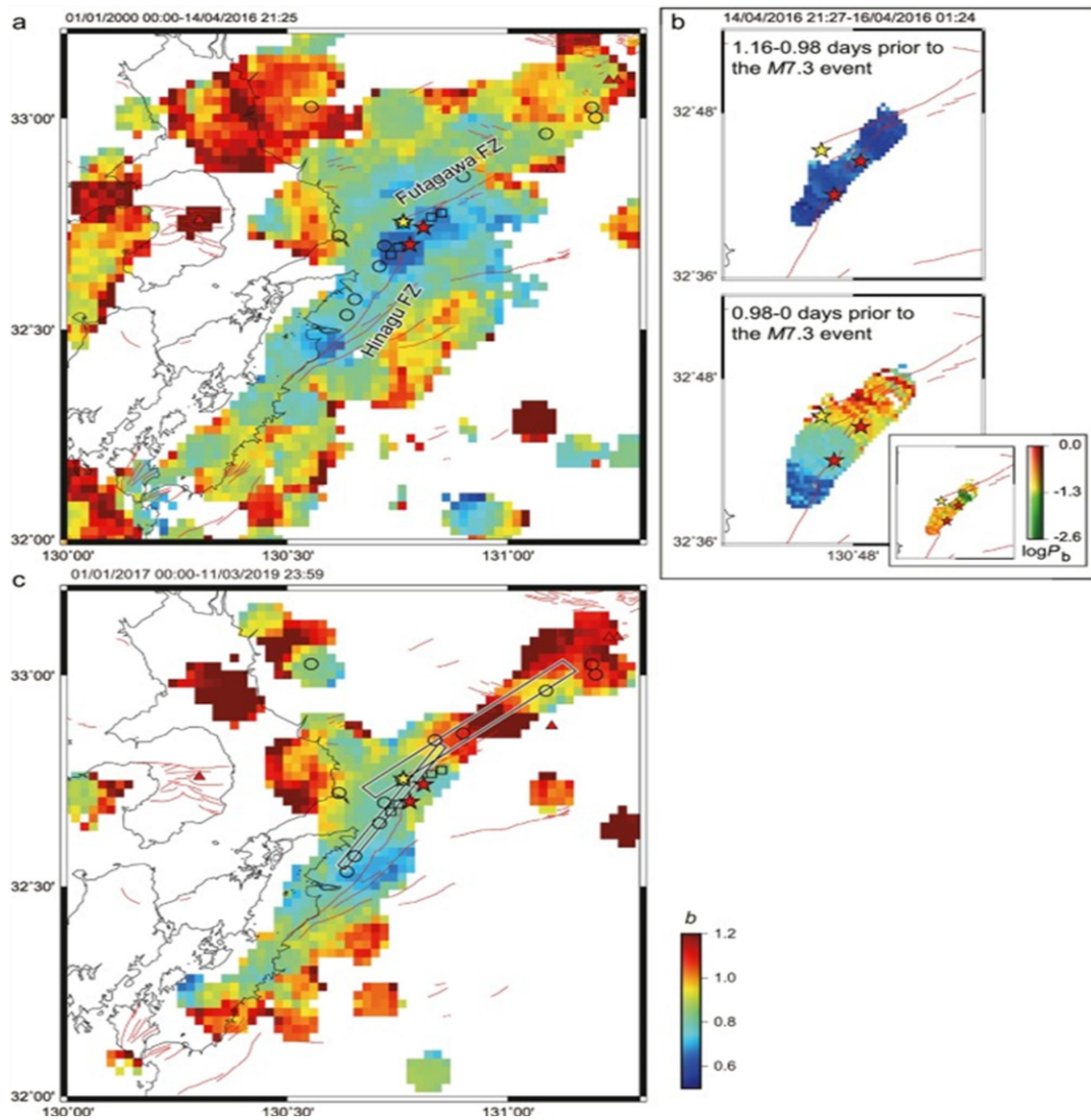


图 2 b 值分布

从图 2b 也可发现，在 M6.5 和 M7.3 事件之间 b 值总体随时间而增加。然而，如果分别考虑南部和北部地区，b 值的分析证实，南部地区的 FTLS 状态为黄色，北部地区的 FTLS 状态为绿色。对于北部地区，包括即将发生 M7.3 大震的布田川断裂带的一部分，b 值随着时间的推移而增加，超过 1.0（图 2b），明显大于区域背景值 ($b=0.81\sim 0.83\pm 0.05\sim 0.07$) 以及 M6.5 和 M7.3 震中的背景值 ($b=0.6\sim 0.8$)。另一方面，对于南部地区，包括已经发生 M6.5 前震的日奈久断裂带北段的一部分，b 值与背景水平相似。

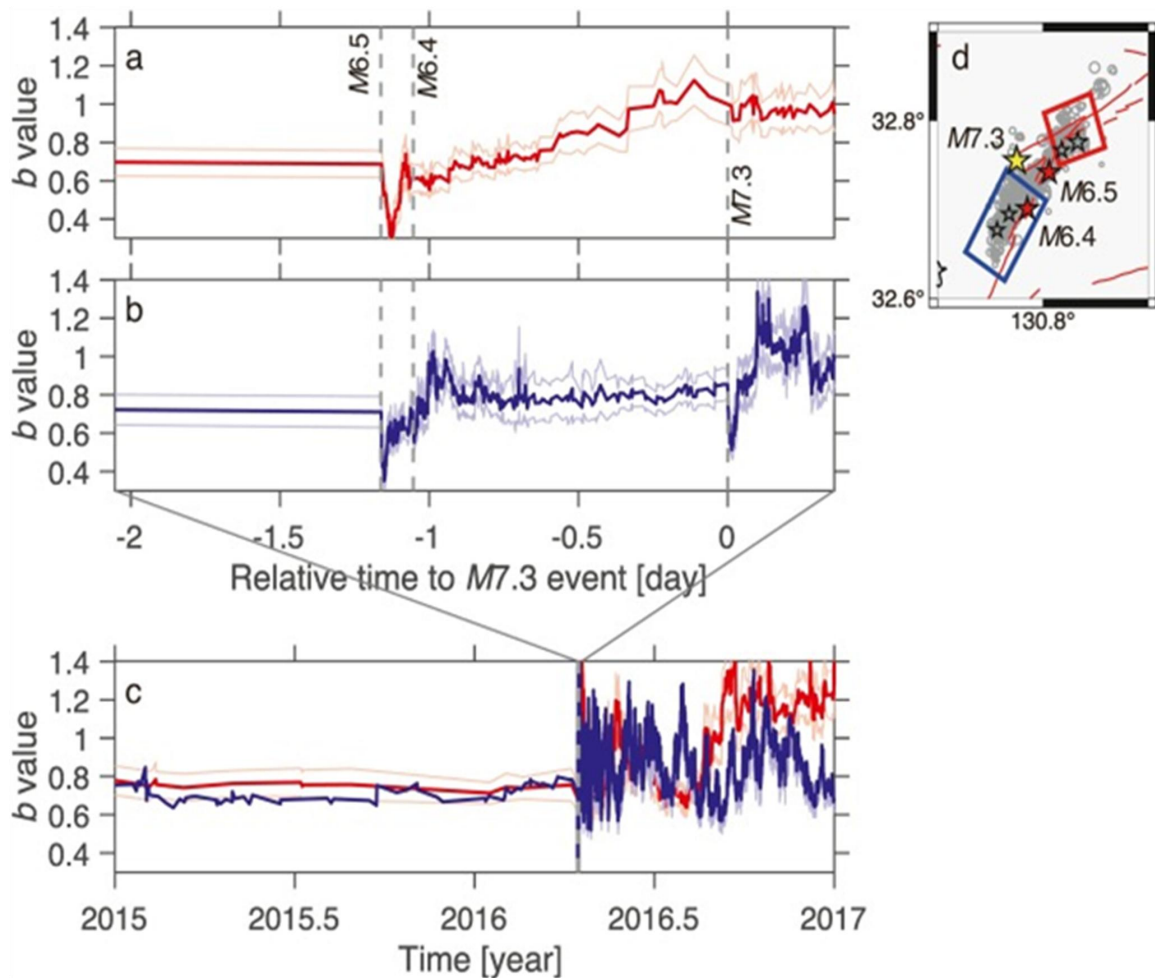


图3 b值的时间序列

网格搜索中，用于 b 值估计的地震样本（图 2）可能包含来自不同断层的事件，这可能会造成 b 值在不同断裂状态下的不同偏差。 $M7.3$ 主震和 $M6.5$ 前震属于两个不同的断层系统。为了消除对这一偏差的怀疑，研究人员基于两个互不重叠的区域进行了 b 值时间序列分析（图 3）：一个区域（蓝色）只包括日奈久断裂带的一部分，另一个区域（红色）只包括布田川断裂带的一部分。后者中，由于难以区分来自日奈久断裂带和来自布田川断裂带的事件，所以没有包括靠近 $M7.3$ 主震震中的区域。

图 4 显示了 M_c 的时间依赖性，在应用 EMR 方法获得 b 值时，同时计算了 M_c 。对于两个区域（图 3），在 M6.5 地震之前， b 值通常为 0.6~0.8，自 2015 年以来 b 值一直相对稳定。M6.5 地震后， b 值迅速下降到 0.5 以下，此后 b 值出现上升。在相对于 M7.3 主震前 0.3~0 天时，红色区域的 b 值高于 M6.5 地震前的背景水平，而蓝色区域在 0.8~0 天时 b 值在 0.8 左右，没有高于背景水平。红色区域（包括布田川断裂带的一部分）与蓝色区域（包括日奈久断裂带的一部分）的 b 值变化之间，存在明显差异。

对北部地区的研究结果（FTLS 状态显示为绿色）表明，布田川断裂带无震前滑的发展会导致一段时间的应力降低，随后导致更大的概率发生更强的 M7.3 事件。M7.3 主震之后，情况发生了显著变化，熊本震源区的 b 值在最初几个月大幅波动（图 3c），与背景值相比，明显增加。尽管熊本余震包括许多小事件，但随后发生大事件的可能性实际上很小。到目前为止，没有再发生大型事件。

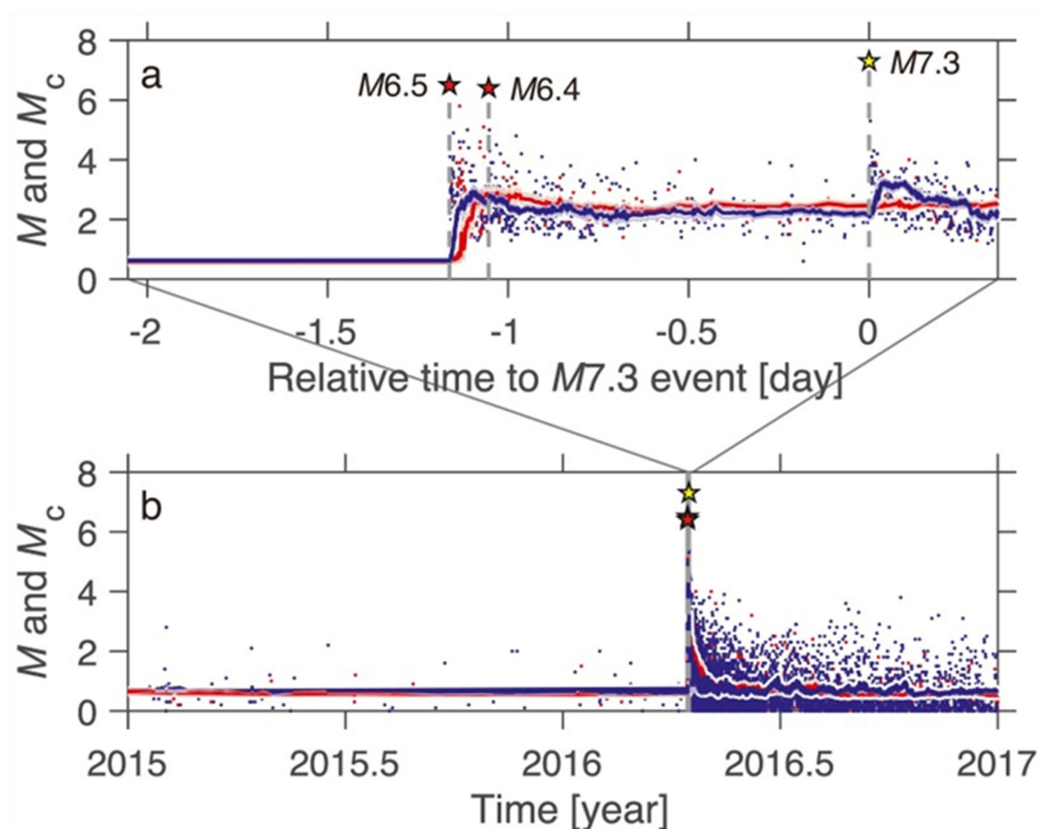


图4 M_c 的时间序列

FTLS 系统是一种全新的系统，除了熊本案例外，其他的案例都可以为其提供支持，证明其效果。研究人员认为，目前将 FTLS 的当前常规版本用于民事保护和公共通信决策还为时过早，需要更广泛的敏感性和稳健性测试。根据上述研究，通过考虑 b 值的空间变化来改善 FTLS 是非常值得的，如果出现前滑迹象，这将触发红色信号灯。

来源：Nanjo KZ, Izutsu J, Orihara Y, et al. Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving the foreshock traffic-light system. *Tectonophysics*, 2022, 822, 229175.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所