

地震科技前沿快报

2022 年第 8 期（月刊总第 43 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、Qube：用于现场和区域地震预警的低成本物联网设备

基于地震台站的地震预警系统面临成本高、密度低、延迟长、无警戒区，难以预测用户所在地的地面运动等挑战。美国一款名为“Qube”的物联网消费设备，其造价低于 100 美元，仅一个魔方大小，可成功地探测地震，通过机载警报器进行现场警报，并向当地用户发送短信进行警报。Qube 在洛杉矶地区，2020-2021 年间进行了测试，成功处理所有 3.0 级以上地震。Qube 的低成本、高灵敏度和集成报警功能，旨在实现针对消费者的地震预警方案，有可能大规模使用。文章提出的这类地震预警设备，需要开展跟踪研究。

2、沿先存薄弱处所发育断层的地震能量耗散低：对 Bilila-Mtakataka 断层的野外和显微构造观察

地震释放储存在地壳中的弹性能量，部分能量辐射到地球表面，导致地面振动，对人类生命和基础设施构成威胁。然而，其中一些能量通过断裂和破碎断层周围的岩石被吸收。哪些断裂上发生的地震辐射到地球表面

的能量大，哪些断裂上的小，值得跨学科的分类研究，这属于从地震能量分配到地震灾害分析的前沿领域。

3、通过俯冲带边缘的同震扭转探究地震周期

评估巨型逆冲断层地震的发生时间对地震预测、灾害分析至关重要，但被认为是不可能的。文章展示了来自巨型逆冲型地震的大地测量观测结果：孕震不同阶段的运动速度会发生明显变化，可作为估计边缘未破裂段地震周期时间的标志。中国大陆发育全球大陆内部非常丰富的逆冲型断裂，文章提出的观点，可考虑开展跟踪研究，推进在业务工作中的应用。

Qube：用于现场和区域地震预警的低成本物联网设备

地震是一种主要的全球性灾害。当前，基于公共地震台站的地震预警系统面临着高成本、低密度、高延迟、无警戒区（no alert zone），以及难以预测用户所在地的地面运动等挑战。本研究旨在寻求一种基于消费者（用户）的替代方法。一款名为“Qube”的物联网消费设备，其造价低于100美元，大约有一个魔方那么大，可以成功地探测地震，通过机载警报器进行现场警报，并向当地用户发送短信进行警报。Qube灵敏度高，从2020年9月到2021年5月的九个月测试期间，检测到洛杉矶周围所有3.0级以上的地震，以及附近2.3级以下的地震。Qube使用检波器进行地面运动速度传感，并捕获与南加州地震台网附近的宽带地震仪一致的地震波形。

研究人员通过对Qube探测到的地震数据的分析，根据地面运动的振幅提出了一种基于数字计数（digital counts）的地震震级对数经验公式。虽然数字计数中，Qube对以 $\mu\text{m/s}$ 为单位的运动速度的响应还未确定，但Qube的输出与当地地震震级之间的经验公式证明了Qube在地面运动测量中的一致性。Qube具有WiFi连接，可通过智能手机或电脑进行控制。Qube的低成本、高灵敏度和集成报警功能旨在实现基于消费者的替代方案，有可能在密集网络中大规模使用，为地震网络、地震警报和教育应用创造新机会。相关成果发表在2022年3月的*Seismological Research Letter*。

作为影响最大的自然灾害，地震目前仍然无法在其发生之前被预测。但“预测”地震的另一种替代方法是地震预警（EEW），该方法在地震开始后快速检测到地震，然后在检测位置发出现场警报，以防发生额外和/或更强的震动，或者对即将受到影响的区域发出警报。该方法在日本、美国等国家得到很好的发展，但其存在无法“预测”震源周围的无警戒区、震源决定论、很难预测用户所在位置的地面运动强度等问题。基于微机电系统

(MEMS) 加速度计的地震仪在制造成本上优于传统地震仪，已被用于构建用于 EEW 或地震研究的高密度地震网络。但由于安装、操作和维护成本，基于 MEMS 的地震台站的总体成本仍然很高。此外，还有一些诸如 MyShake、基于检波器和 MEMS 加速度计的地震仪等，但都有其局限性。

为此，Qube 被设计、建造和测试，其成功地探测到地震并发出警报。Qube 包含几个关键组件：具有 WiFi 连接的树莓派 Zero W 单板计算机、用于垂直地面运动速度传感的检波器、32 位模数转换器 (ADC)、一个主动蜂鸣报警器、一个报警按钮开关、一个带有控制和信号处理电路的定制设计的印刷电路板 (PCB)，以及一个连接到树莓派的通用输入输出 (GPIO) 接口。Qube 使用定制开发的软件，其包含三个模块，均由 python 编写而成。

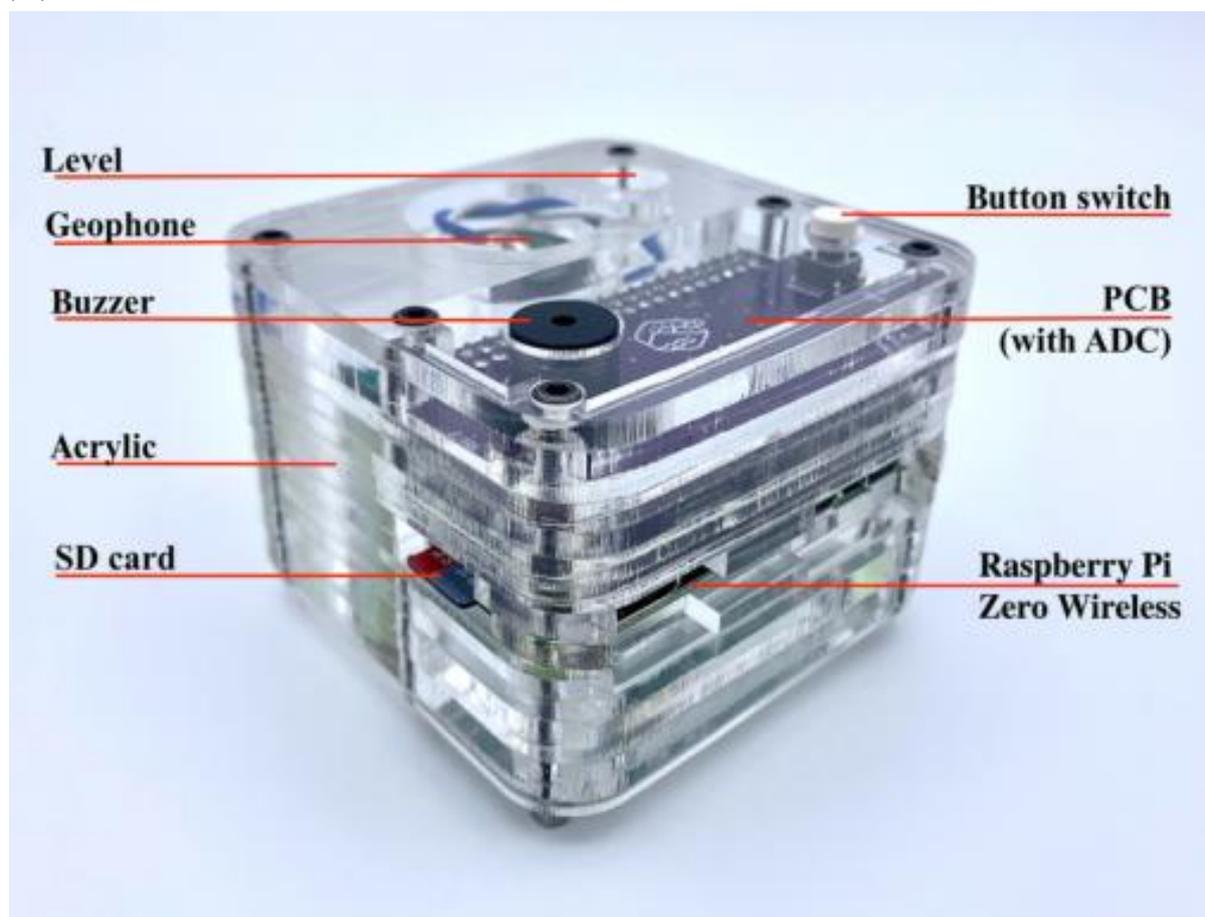


图 1 Qube 整体图 (长 7 cm、宽 7 cm、高 5 cm)

本项目研究主要聚焦三部分：设备性能测试、地震检测和预警性能、地震动振幅与地震震级和震中距的关系。

设备性能测试：首先测试 ADC 噪声级别，结果显示 ADC 测量的噪声基线水平为 $0.058 \mu\text{V}$ （均方根值），这与 ADC 的数据表一致。同时发现，检波器和电路会向系统引入噪声。在未来的研究中，应使用震动表等来表征设备对地面运动（速度）的实际响应。然后，在 24°C 的恒定环境温度下，测试 Qube 从通电到连续运行 120 分钟的温度曲线。温度测试表明，芯片和电路板在规定的温度范围内运行良好。最后，采用两种方式测量 Qube 的功耗，先使用功率计，然后使用电流和电压计。结果表明，在稳定状态下运行的功耗约为 620 mW 。这种低功耗对其实际应用有很大帮助。

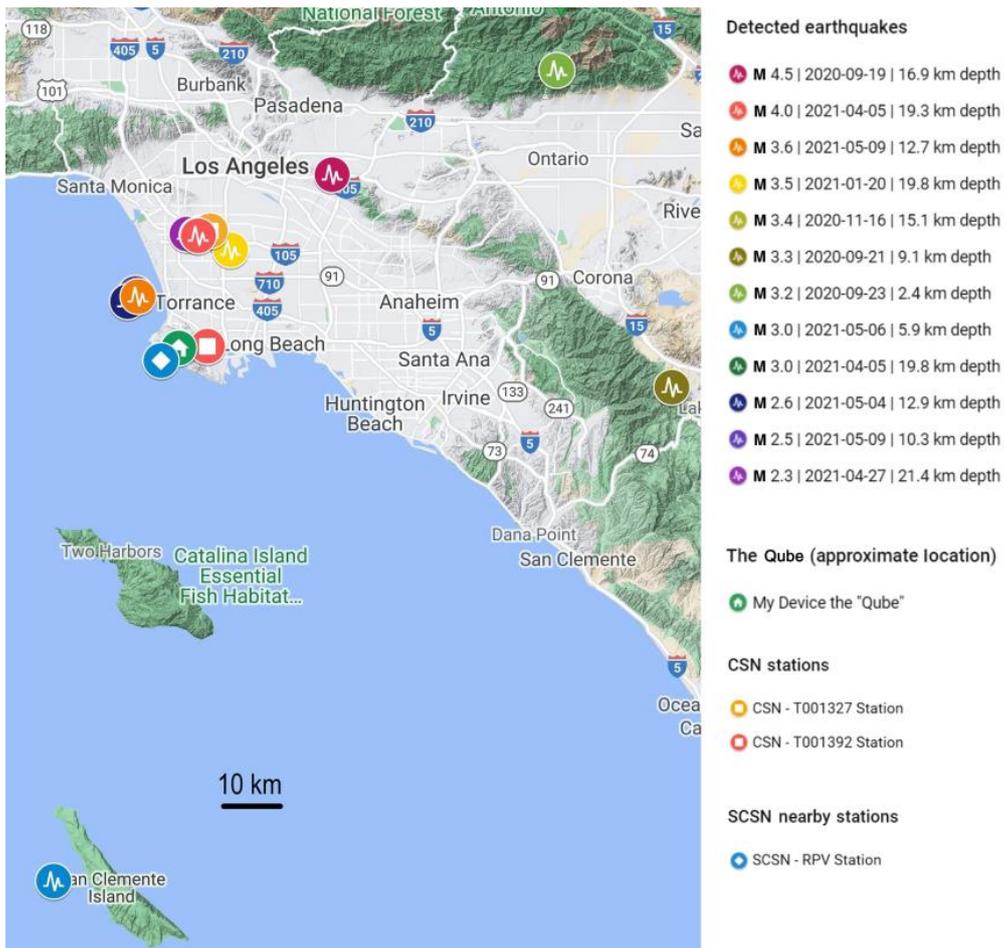


图 2 测试期间 Qube 检测到的地震

地震检测和预警性能：从 2020 年 9 月到 2021 年 5 月，Qube 被放置在加利福尼亚州洛杉矶市一幢单层房屋的一楼，进行了九个月的测试。在此期间，Qube 检测到洛杉矶周围所有震级超过 3.0 级的地震，以及附近一些小于 2.3 级的地震。同时，Qube 检测到高于用户设置的警报阈值的地震，发出车载警报，向本地警报订阅者发送文本消息。

将地震信号与人为噪声比较，结果发现地震信号明显高于 Qube 的基线噪声和用户家中或周围人类活动产生的人为噪声。因此，为了减少与人类活动相关的潜在误报，最好将 Qube 放在一楼较安静房间的一角。研究人员还将 Qube 的性能与社区地震台网 (CSN) 和南加州地震台网 (SCSN) 附近的地震仪进行了比较。距震中 20 km、T001392 附近的 Qube 记录到的波形显示出清晰的检测效果，信噪比高于 CSN 台站，看起来与 SCSN 站 RPV 的宽带地震仪相当。Qube 估计的地面运动速度比 SCSN 站 RPV 记录的速度低一个数量级，这可能是由于多种因素造成的。

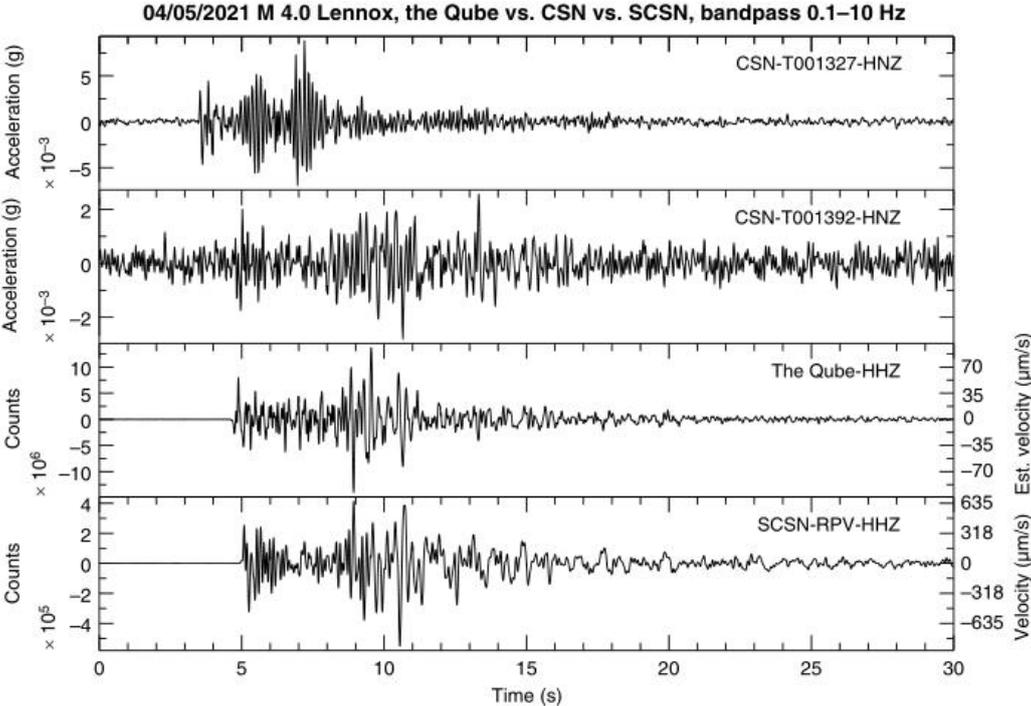


图 3 Qube 与选定的 CSN 和 SCSN 台站的比较：2021 年 4 月 5 日加州伦诺克斯 4.0 级地震

地震动振幅与地震震级和震中距的关系: Qube 检测到的地面运动振幅在很大程度上取决于地震的震级以及震中距离。比较不同震级和震中距离的多个地震探测结果有助于确认 Qube 对地震的反应是否一致，这对于在不同的地面运动输入下提供地震警报很重要。此外，该分析还可用于从单个台站估计局部地震的震级，这有助于估计局部震动强度，以提供更好的警报。利用九个月试验期间 Qube 采集的地震数据，研究人员确定了数字计数测量的地面运动振幅与地震震级之间的经验公式。洛杉矶都市区附近八次地震中的第一组显示，地震震级与地面运动振幅的对数（以计数为单位）之间存在良好的线性关系。使用导出的线性公式，可根据 Qube 检测到的地面运动来估计洛杉矶当地地震的震级：

$$\text{震级} = 1.1306 \times \log_{10} \text{振幅} - 4.3735$$

将距 Qube 较远的四次地震加入分析后，地震震级与地面运动振幅之间的关系偏离了线性公式。这意味着，远距离地震的震级被低估了，这一发现将有助于最大限度地减少误报。

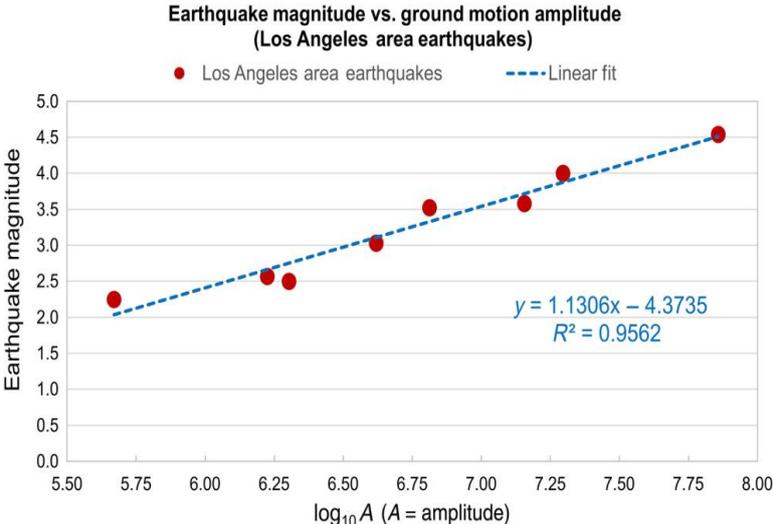


图 4 美国地质调查局报告的地震震级与 Qube 检测到的地面运动振幅的对数（log10）关系。图中地震对应 2020 年 9 月至 2021 年 5 月期间，Qube 在洛杉矶地区检测到的所有 8 次地震（震级为 2.3~4.5 级，震中距约 13~40 km）。

下一阶段，该研究将集中在以下几个方面：首先，**Qube** 对地面运动（速度）以及噪声的实际响应（计数）将通过振动台进行表征；其次，将建立和部署许多低成本的 **Qubes**，形成一个横跨洛杉矶市区的物联网 **EEW** 网络，以涵盖更多地震动数据，提高区域 **EEW** 性能；再次，**EEW** 警报信号将用于自动响应，并与用户所在位置的其他智能设备集成；最后，**Qube** 的开放式设计将为集成其他传感器创造便利。

来源：He V. Development of Qube: A Low - Cost Internet of Things Device for On - Site and Regional Earthquake Warning. Seismological Society of America, 2022, 93(2A): 975-985.

沿先存薄弱处所发育断层的地震能量耗散低：对 Bilila-Mtakataka 断层的野外和显微构造观察

相比于成熟断层，均质地壳中的低位移断层发生地震时，更多的能量会通过破裂和所形成的断层泥被消耗。为了调查在低位移断层上先存薄弱处如何影响地震能量耗散，研究人员研究了马拉维 Bilila-Mtakataka 断层（简称 BMF，长 110 km，位移 0.4~1.2 km）的断层岩。当 BMF 与变质组构平行时，破碎带集中在 5~20 m 宽的窄带中，而当断层与面理斜交时，破碎带达 20~80 m 宽。在均质地壳中，类似位移的断层破碎带可达 40~120 m 宽。在具有相似位移断层中所观察到的大量的破裂和断层泥在本研究中并未观察到。因此，尽管存在 M_w 7.5~8 地震的地貌证据，但地震能量耗散在 BMF 围岩中的证据很少。研究人员将这种差异归因于各向异性与各向同性地壳中初始断层的不同地震能量分布。相关研究成果发表在 2022 年 4 月的 *Geophysical Research Letters*。

地壳中先存的力学薄弱处（如节理、层理和变质组构）会显著影响地震破裂的扩展。在多个地震周期中，这些先存薄弱处会影响断层岩和围岩的破裂进程，进而影响断层强度和渗透性。断层带构造常被描述为：①由断层角砾、碎裂岩、断层泥构成的一个或多个断层核（fault core），可以包括一个或多个主滑动带；②以及围绕断层核的破碎带，其与围岩相比具有高的破裂密度，但剪切位移小，同时也保留了原岩。断层泥的形成以及破碎带的破裂可由多个过程导致，包括准静态的断层尖端扩展、化学蚀变、地震能量在围岩中的释放。地震能量的释放可以被描述为：

$$E_T = (E_G + E_F) + E_R$$

E_T ：地震释放的总能量； E_G+E_F ：地震过程中耗散的能量； E_R ：辐射的地震能量。

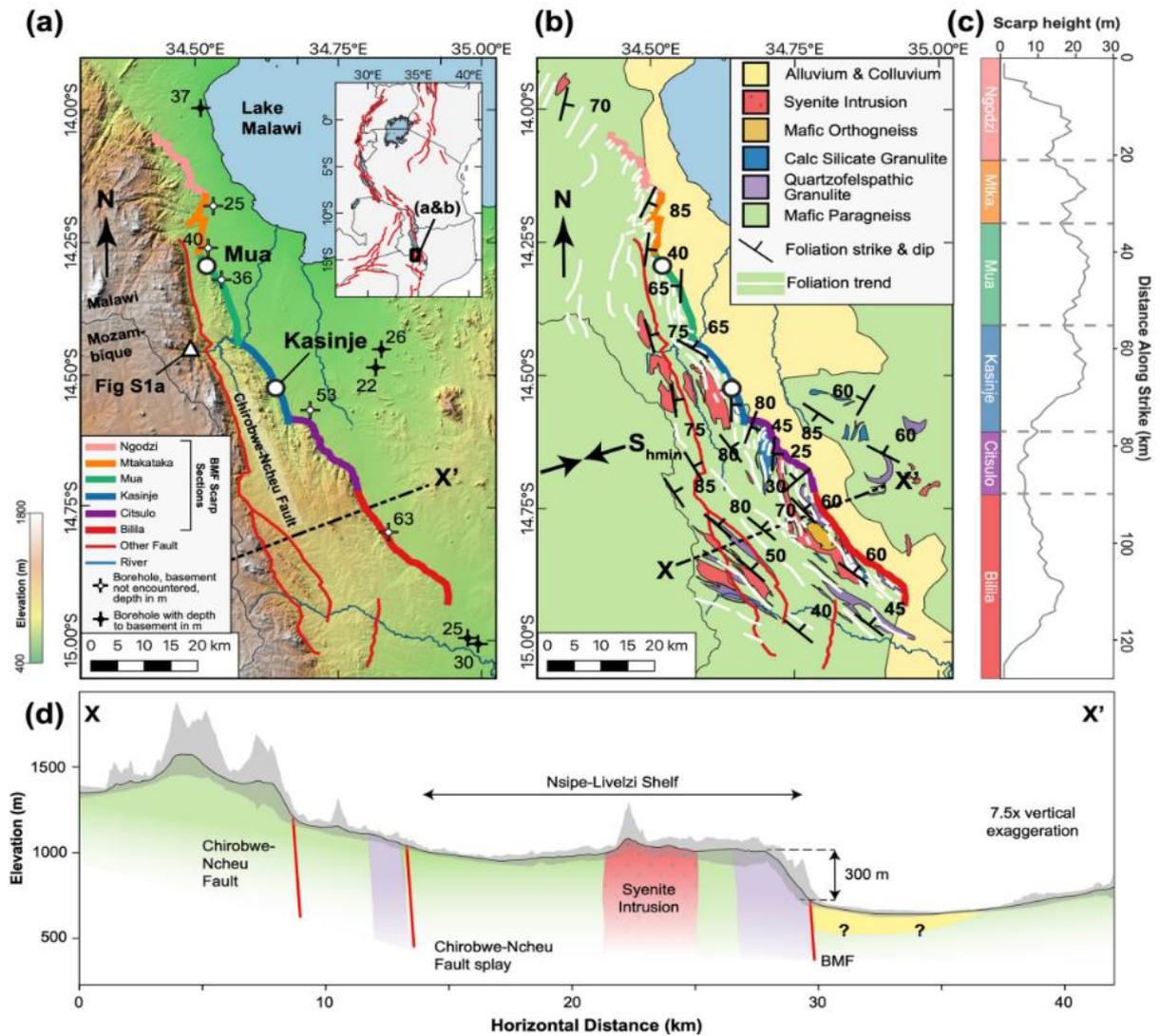


图 1 BMF 的地质地貌

多个证据表明，在均质地壳中，破碎带的破裂以及断层泥的形成主要发生在断层生长的早期。例如，在位移 $<1\sim 2$ km 的断层中，破碎带宽度与位移成正比。然而，在各向异性的地壳中，断层的演化并不清楚。例如，与具有相似位移的断层（位于均质地壳中或横切面理）相比，平行于面理的断层更窄或相当或更宽。这种差异可能反映了围压、温度、断层方向、区域主应力、间震期断层愈合、组构的成分与强度、应变强化的层状硅酸

盐的出现或者力学各向异性的碎裂岩的出现。因此，在调查断层在各向异性地壳中的构造演化，就需要区分这些不同因素的影响。

BMF 位于马拉维南部，具有 0.7 mm/yr 的伸展速率，在地表表现为断崖，断崖底部延伸达 128 km，断崖高度在 5~28 m。断崖下盘为元古代片麻岩，上盘为晚中新世沉积岩。在 0.1~10 km 的尺度上，利用断崖高度、走向以及与片麻岩面理方向的关系，将 BMF 划分为 10~40 km 长的 6 个分段。BMF 的总位移沿走向变化，最大位移为 0.4~1.2 km。

BMF 断层具有晚第四纪 M_w 7.5~8 地震的地貌证据，是一个罕见的地壳尺度的低位移断层，由于它与元古代变质岩组构之间变化的几何学关系，因此能够为近地表断层在各向异性地壳中的演化提供约束。研究人员通过对 BMF 位于 Kasinje 与 Mua 村庄附近两个剖面的野外和显微构造分析，证明了先存各向异性对一个初始的、延伸达 100 km 的断层上地震能量耗散的影响。在每个样品的三个面积为 8~15 mm² 的区域中，研究人员测量了长石和石英的粒内与粒间的微破裂长度，然后除以长英质颗粒的面积，以此来量化破裂密度。

在 20 km 长的 Mua 段，断层与面理斜交，片麻岩面理由互层的长石+石英条带与黑云母+石榴石+角闪石条带构成。在距断崖 2~20 m 范围，有一组 NE 向缓倾的节理，以及一组 NS 向近垂直的次级节理。节理间隔在 0.01~0.1 m，但在 20~350 m 距离上增加至 >0.1 m。在 2~350 m 范围内，样品中所有的长石石英颗粒均被微破裂横切，但这些微破裂未发生剪切位移，微破裂密度 (1~4 mm⁻¹) 在靠近断层方向并未增加。

紧邻断崖 2 m 厚的初碎裂岩由断层活动过程中颗粒尺度的破碎与滑动形成，沿着 BMF 发生位移的证据就在初碎裂岩中。同时，这一 2 m 厚的初碎裂岩代表了 Mua 段最小的断层核宽度。Mua 段下盘的破碎带被定义在

距断崖 2~20 m 的区域内，在这一区域没有颗粒尺度的碾磨，但有密集的节理发育。虽然上盘的破碎带未出露，但其宽度可能为下盘的 3 倍，因此整个破碎带的宽度为 20~80 m。

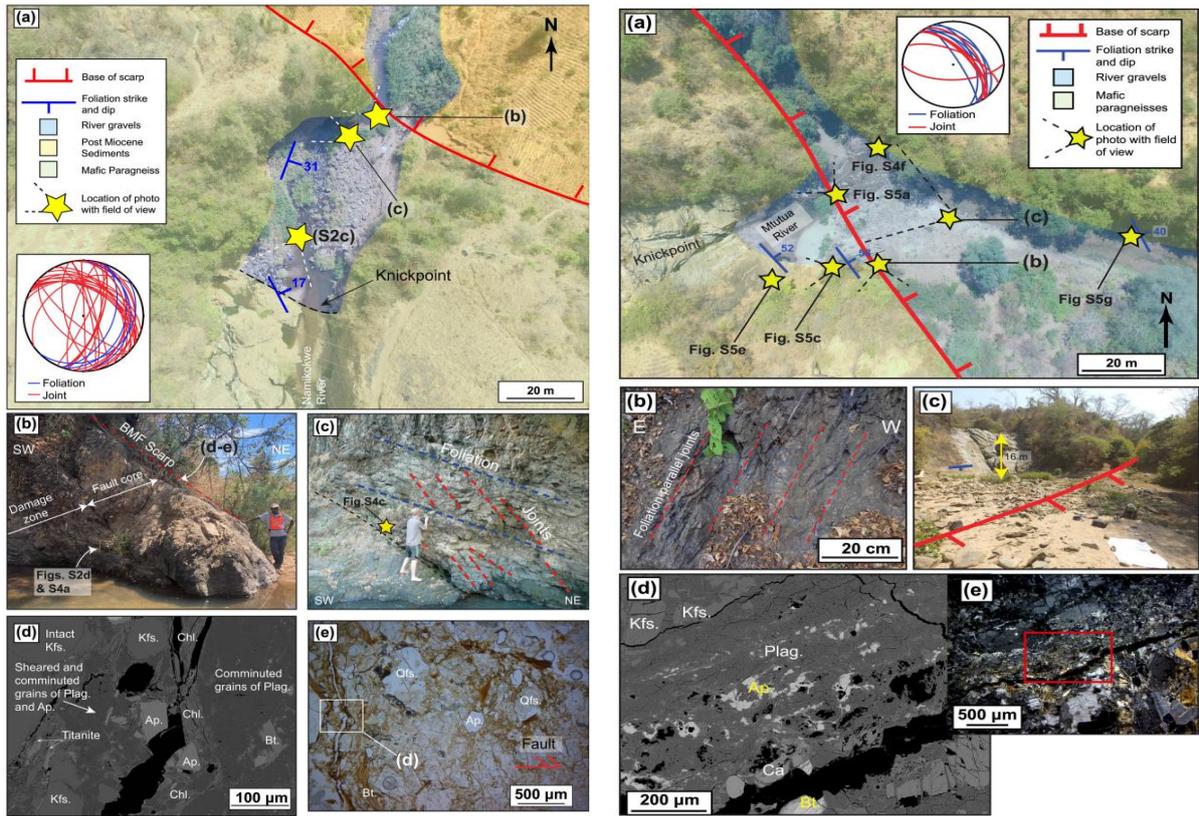


图 2 Mua 段（左）和 Kasinje 段（右）断层的野外与显微构造特征

沿 20 km 的 Kasinje 段，断层与面理平行。紧邻断崖的是 5 m 宽的破裂岩，其中有 0.1~1 m 间隔的与面理平行的节理。在这种宏观的破裂间隔中，完整的长英质区域和部分方解石脉与 10~100 μm 宽的破碎的长石、方解石呈互层关系。在上盘中，未观察到与断层相关的宏观变形。来自上盘与下盘样品中的长石石英中发育绿泥石脉，分析表明微破裂密度为 1~4 mm^{-1} ，并且没有明显的变化趋势。

同时，未观察到代表断层核的碎裂岩和断层泥。该段下盘中的破碎带延伸达 5 m，在上盘中 <16 m，在破碎带中发育方解石脉。在 Mua 段以及 Kasinje 距断崖 >5 m 的区域，有大量绿泥石和铁氧化物脉体，这些矿物并非常见的低温 (<300°C) 蚀变矿物，区域热液流体中也没有溶解的铁。因此，研究人员认为这些脉体形成于现今裂谷相关的断裂之前。

大量研究表明，与 BMF 有相似位移的断层上，断层位移与破碎带宽度的比值约为 0.1。在 Kasinje，破碎带宽度为 5~20 m，显著低于均质地壳中有相似位移断层的破碎带宽度 (40~120 m)，也低于与面理斜交的 Mua 段的破碎带宽度 (20~80 m)。

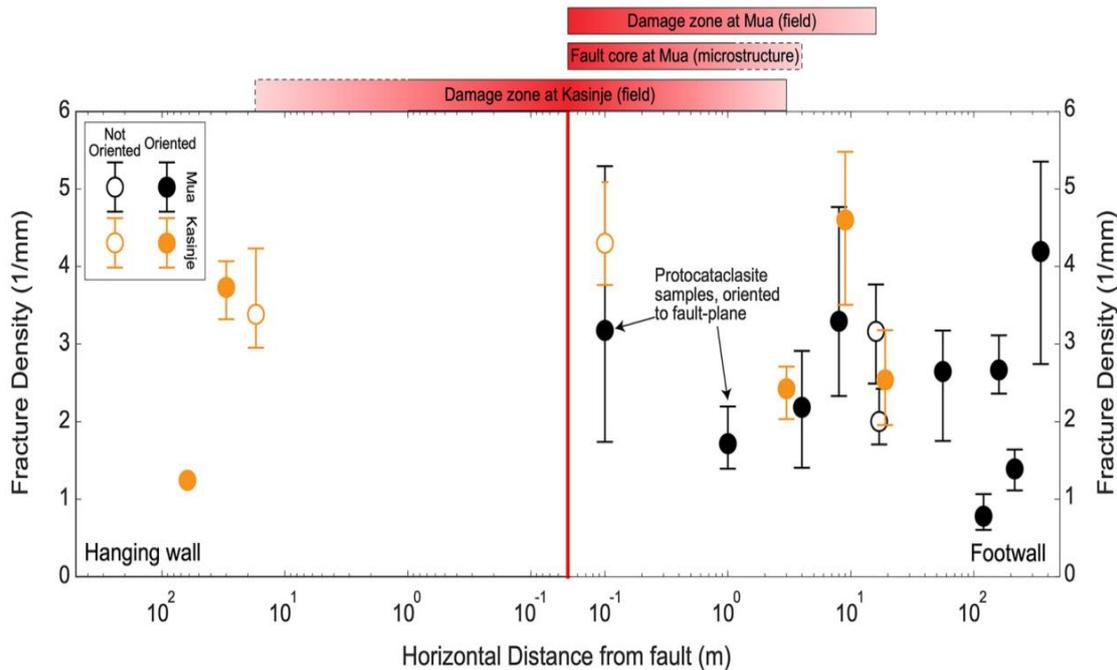


图 3 破裂密度变化

断层位移、温压条件、组构成分会影响断层与面理的相互作用。然而，BMF 在 Mua 和 Kasinje 所调节的位移相似，两个地点都反映了近地表的温压条件，它们的围岩变质组构与成分也大致相似。因此，断层宽度在 Kasinje 和 Mua 之间的差异，是由于断层与围岩面理角度的变化。如果情况真是如

此，那么与各向同性地壳中的低位移断层相比，BMF 通过围岩破碎等过程耗散的地震能量要更少。也就是说，BMF 的地震能量释放效率 (η_{eff}) 更高。具有高地震能量释放效率的破裂，同震滑移量更大，这与 BMF 相当大的单次地震滑移量一致。并非所有沿先存薄弱处发育的断层都会展现出窄的破碎带，BMF 有限的围岩破裂可能代表了在区域应力下先存薄弱处的初始存在，但其还没有形成由力学上各向同性的碎裂岩和断层泥组成的厚层序。加上面理的层状硅酸盐含量相对较低等因素，它们共同增加了地震的能量释放效率。

来源：Williams J N, Fagereng Å, Wedmore L N J, *et al.* Low Dissipation of Earthquake Energy Where a Fault Follows Pre-Existing Weaknesses: Field and Microstructural Observations of Malawi's Bilila-Mtakataka Fault. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(8): e2021GL095286.

通过俯冲带边缘的同震扭转探究地震周期

评估大逆冲地震的时间对于地震灾害分析至关重要，但被认为是不可能的。大地测量结果表明，紧邻最近大地震区的俯冲带具有异常的变形模式，即海岸的位置以比地震之前更快的速度向陆地方向移动。在本文中，研究人员展示了来自最大的、得到最好监测的大地震的观测结果和物理模型分析结果，来反映这些事件所产生的齿轮式旋转（**gear-like rotation**）的同震和震后变形模式，以下将这种变化称作扭转（**twisting**）。这种扭转在自上次地震以来的时间内改变了相邻俯冲段的震间速度场。早期的相互作用使局部运动加速，而后期的相互作用则使其减速。这一发现使利用大逆冲地震成为可能，将可以利用扭转模式的特征以及随后的大地速度变化来估计边缘未破裂段的地震周期。相关研究成果发表在 2022 年 4 月的 *Nature Communications*。

在地震周期性发生的过程中，俯冲带大逆冲断裂的变形模式已经得到了卫星大地测量的证明，该变形模式由间震期长期的向陆地方向的运动以及突然的向海洋方向的同震运动组成。在这两者之间，俯冲带经历了大逆冲断裂的再次闭锁，以及震后地幔松弛。但是，这种相对简单的模型由于瞬态扰动而变得复杂。

最近发现，紧邻的大逆冲断裂段（**receiver**，以下简称“接收者”）的测地点发生了震后向陆地方向的加速移动。例如，2011 年东日本 M_w 9.0 地震，北海道地区海岸位置相比于震前经历了更快的向陆地方向的移动。再如，智利马乌莱 M_w 8.8 地震的前震、震后地表速度变化显示出齿轮模式，破裂区一侧的海岸向陆地的移动加速。多种机制被提出了解释这种速度增加，包括大逆冲断裂耦合程度的增加、震后板片加速、板内上覆板块的弯曲、大陆尺度的粘弹性地幔松弛等。

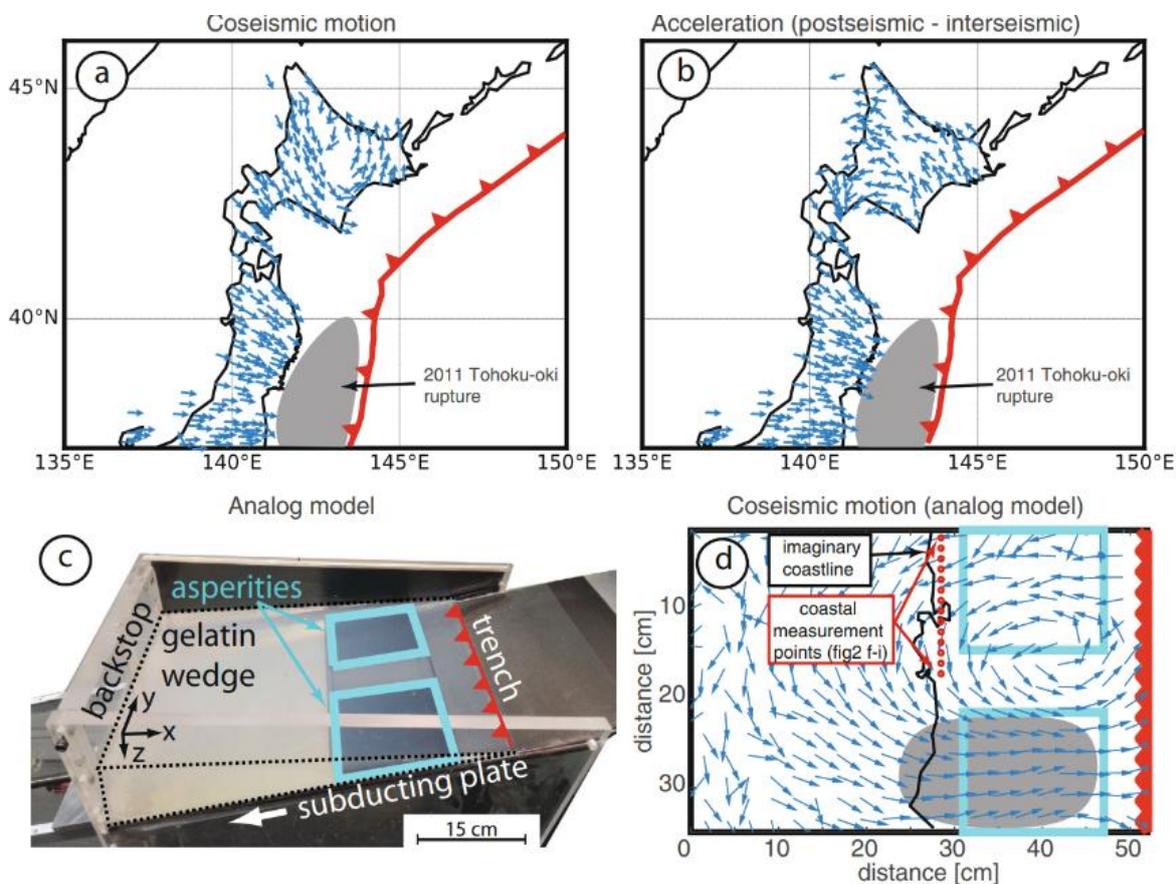


图1 自然界和实验中的扭转模式

古大地测量数据反映了震后的减速模式。在潮间带的珊瑚环礁被认为是具有年精度的全球导航卫星系统（GNSS）台站垂向分量的类似物。现今，大地测量显示的间震期向陆地方向、同震期向海洋方向的水平位错也被珊瑚环礁在间震期的淹没以及同震期的暴露所记录。

目前，缺乏一个能够协调不同“接收者”来加速和减速运动的模型，这需要对不同断裂段之间的相互作用动力学进行再次调查。然而，缺乏对自然界实例的观察以及难以区分不同时间、空间尺度相关联因素的影响，阻碍了对不同驱动机制的辨别。

在本研究中，研究人员首先分析了 2011 年东日本 $M_w 9.0$ 地震的边缘位移模式，然后与类似俯冲模型相比较，来反映“接收者”向陆地方向加速以及减速的控制因素。发现大地震产生了扭转变形模式，这种模式从同震持续到震后。对实验数据中数十个地震周期的分析表明，扭转的形态包含了紧邻俯冲段的地震周期时间。

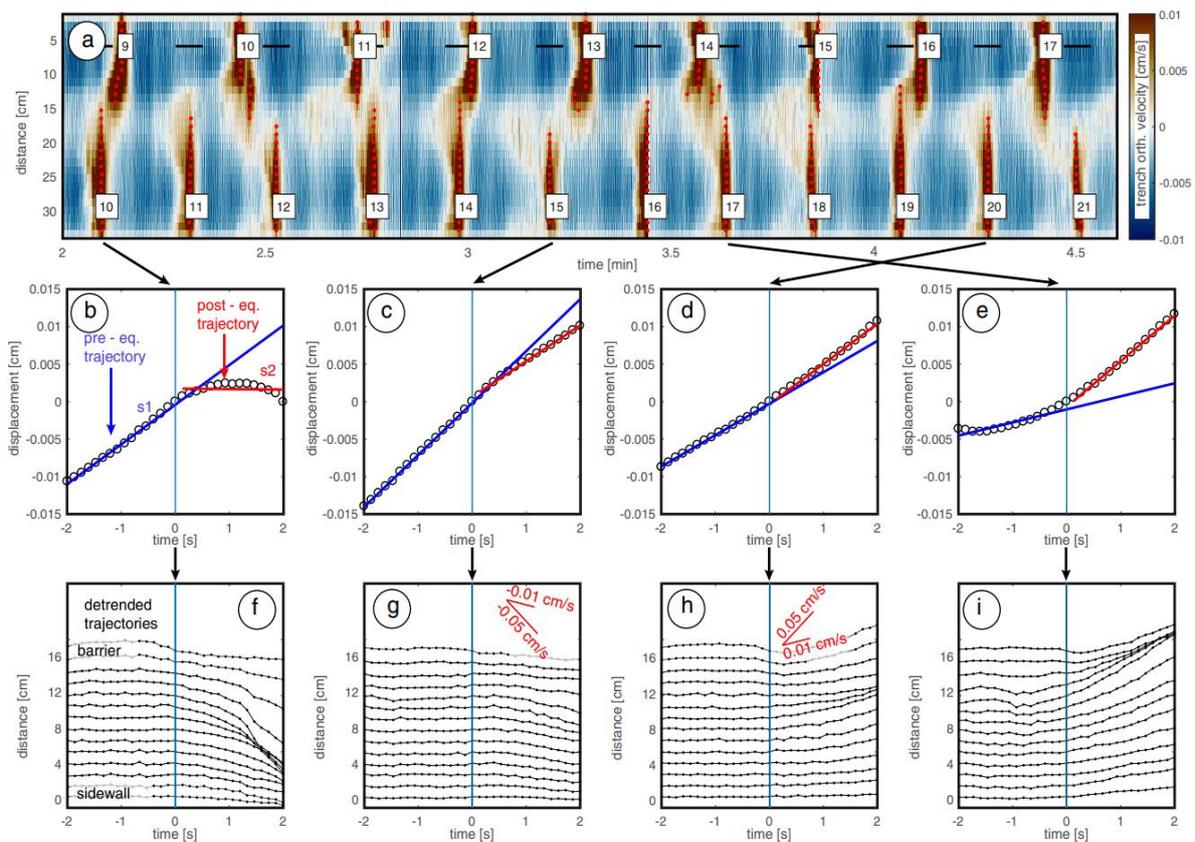


图 2 同震过程中不同断裂段间的相互作用

自然界中的同震和震后扭转变形：研究人员使用 GNSS 位移时间序列来分析大地震之前和之后大规模的变形场，同时，还分析了同震运动。结果发现，2011 年东日本 $M_w 9.0$ 地震的同震运动和震后加速显示出明显的逆时针扭转，2010 年智利马乌莱 $M_w 8.8$ 地震的同震和震后加速也显示出类似特征。

物理模型中的扭转模式：为分析多个地震周期中不同断裂段之间的相互作用，模型使用以两个速度弱化的矩形摩擦片（以下称作 **asperity**，即凹凸体）为特征的铝板来模拟俯冲板片，其可向下俯冲到以明胶模拟的上覆板块之下。该模型创建了粘滑运动，可模拟间震期陆向速度与同震期海向速度的交替变化阶段。模型可产生仅有一个凹凸体破裂或者两个凹凸体都破裂的情况，研究人员选择了主要有一个凹凸体破裂的模型，这有利于研究不同断裂段之间的相互作用，即每个凹凸体交替作为“接收者”和“触发者”。

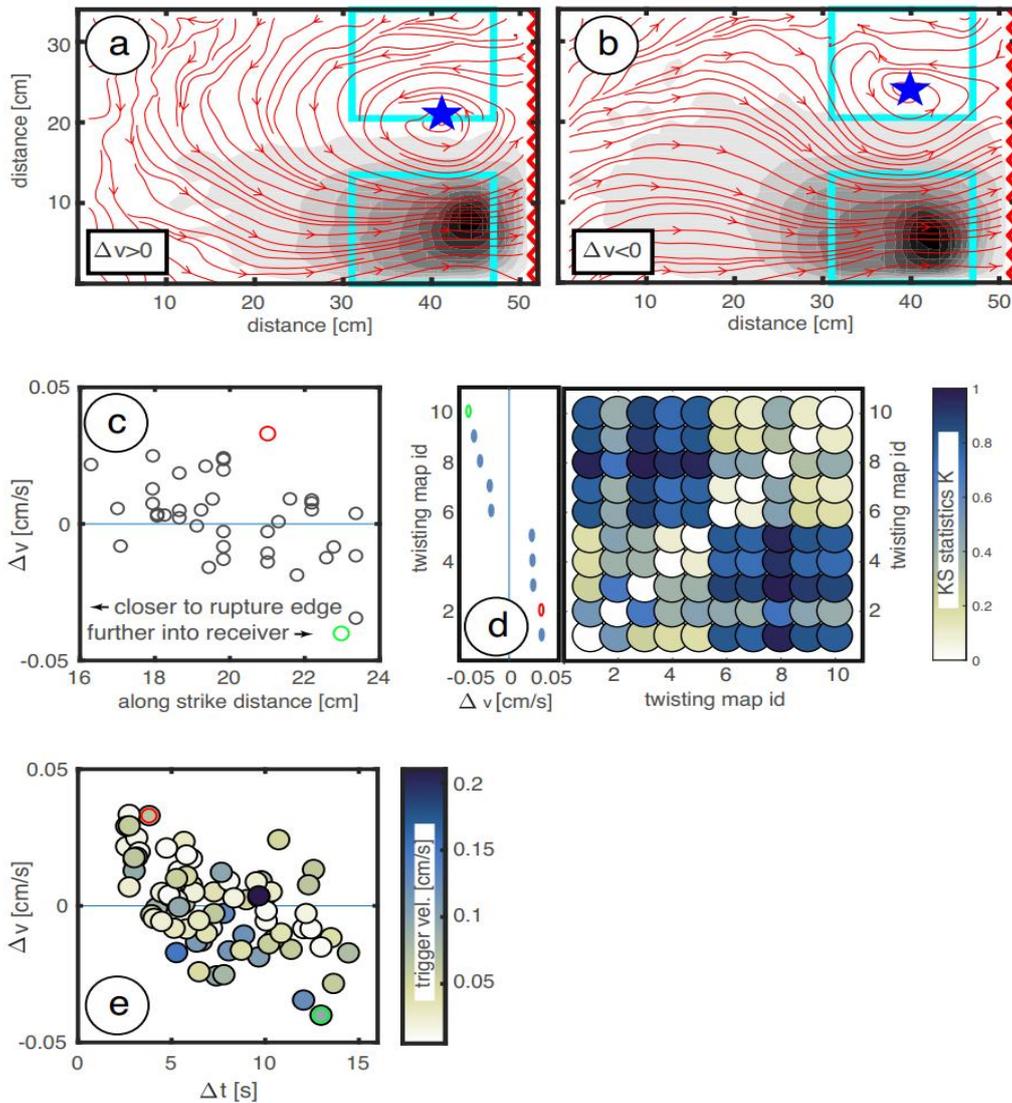


图3 扭转使“接收者”的运动加速或减速

研究人员分析了“触发者”凹凸体达到同震速度峰值时的速度变化(震前和震后), $\Delta v = s_2 - s_1$ 。结果表明,不同断裂段之间的相互作用会导致“接收者”速度的降低或增加。表面速度场表明,最大的 Δv 并没有在靠近断裂尖端的海岸位置被记录,不同断裂段之间的相互作用在“接收者”凹凸体引起的 $\Delta v > 0$ 和 $\Delta v < 0$ 具有不同的表面位移模式。

研究人员利用流线(streamline)来表征表面变形模式,流线通过速度场来限定。在两种情况下,模型都经历了逆时针扭转。然而,流线的形状是不同的。对于 $\Delta v > 0$,显示一个在垂直于海沟方向拉长的宽椭圆,旋转轴位于“接收者”凹凸体的边缘。对于 $\Delta v < 0$,显示一个更小的椭圆,旋转轴位于“接收者”凹凸体内部。 $\Delta v > 0$ 和 $\Delta v < 0$ 变形场最大的区别位于陆上,在这些区域 $\Delta v > 0$ 的流线指向陆地, $\Delta v < 0$ 的流线指向破裂凹凸体,主要是海沟方向。研究发现, Δv 与扭转中心到“触发者”凹凸体的距离之间呈负相关关系,这种负相关对单个事件的滑移分布具有次级影响。之后,研究人员利用 $K = \max(|F1(x) - F2(x)|)$ 约束扭转模式之间的相似性, $K = 0$ 代表相似分布, $K = 1$ 表示不相似分布, $F1, F2$ 代表“接收者”区域与海沟垂直的位移分量。分析表明,最大的 $\Delta v > 0$ 具有相似性,而最大的 $\Delta v < 0$ 不相似。

讨论:在“接收者”地震周期中,两个端元的 Δv 发生的很晚或者很早,相对小的 Δv 发生在地震周期的中间。对间震期轨迹的仔细分析表明,具有与观察到的相互作用幅度相近的 Δv 在间震期随机发生。因此,研究人员仅分析了相互作用时的 Δv ,并将其与相应的扭转模式相联系。研究人员将 Δv 作为相互作用使“接收者”运动发生变化的局部指标,将扭转模式作为更深层次相互作用的代表。为了分析扭转图如何代表“接收者”地震周期中的给定状态,研究人员比较了地震周期开始到相互作用发生时间段($\Delta t = t_r - t_i$)内的 Δv 。结果发现, Δv 和 Δt 呈负相关,峰值速度的大小以及触发事件的

大小对控制 Δv 具有次要作用。在实验中，触发事件的大小决定了旋转中心（vortex center）沿走向的位置，更大的震级通常与更靠近“接收者”凹凸体内部的旋转中心相关。在海岸区域，扭转模式主要受控于明胶楔的缩短量。在简化实验模型中，扭转模式有利于评估地震周期的时间。未来，需要有更复杂的实验来再现真实的俯冲环境，以将这一发现扩展到自然界。

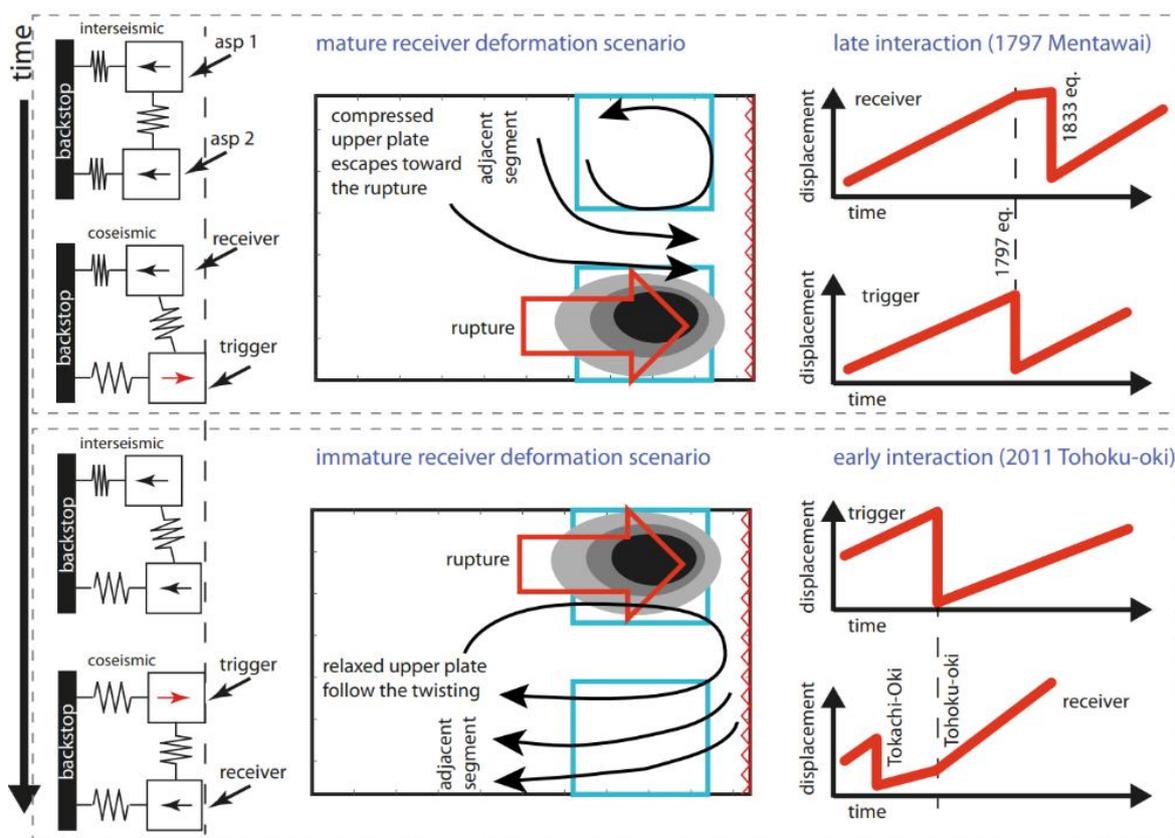


图4 在成熟和不成熟相互作用过程中地震周期的时间演化

扭转的时间依赖性有助于区别不同的驱动机制。震后变形的数值模拟结果表明，扭转模式可能是（也可能不是）粘弹性松弛的结果，这取决于模型配置等原因。但是，模拟中“震后驱动的扭转”都会很快消失。然而，在物理模拟中，以及东日本大地震和马乌莱地震中，相邻段在触发地震的瞬间都经历了速度的阶跃变化，在之后是持续的线性移动。相似的持续改

变也在早期的模拟以及对自然界的观察中出现。由于本次物理模拟没有地幔当量，明胶的变形主要为弹性，因此震后持续的扭转肯定与静态应力改变和系统中的非线性（物理摩擦滑动面引起）有关。数值模拟产生了同震和震后的持续扭转模式，表明该特征对再现持续运动的改变至关重要。

在自然界，由于俯冲边缘的不同位置常发生不同震级的地震，因此评估震后加速的驱动因素就更加复杂。结合速度分析，研究人员提出了一个概念模型来解释扭转如何指示区域成熟度。在双凹凸体物理模型中，一个成熟的、挤压的上覆板块将扭转限定在近海区域。“接收者”凹凸体在震后以异常慢的速度向陆地移动，相反，一个不成熟的、松弛的上覆板块不会对扭转产生阻碍，“接收者”凹凸体以更快地速度向陆地移动。

来源：Corbi F, Bedford J, Poli P, et al. Probing the seismic cycle timing with coseismic twisting of subduction margins. *Nature communications*, 2022, 13(1): 1-8.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所