

# 地震科技前沿快报

2021 年第 6 期（月刊总第 30 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、综合模型解释大地震形成的多样性
- 2、利用长须鲸叫声进行地壳地震成像
- 3、大地震：自愈合脉冲式还是温和破裂式扩展？

## 综合模型解释大地震形成的多样性

2020 年 11 月，来自日本和美国的两名研究人员在《自然评论-地球与环境》（Nature Reviews Earth & Environment）发表文章称，他们提出了一个综合模型，可用来解释大地震形成的多样性，从渐进的体积变形一直到局部滑移。这将可能推动未来的近断层地震和大地测量研究。

尽管已经经过几十年的观测、实验室和理论研究，但大地震的发生过程仍然是个谜。近来，观测活动提供了新的视角，有望促进相关认识的发展。通过综合分析有关大地震发生过程的数据，研究人员提出一个综合模型，并称，地震是多尺度和多样化的。

该研究的主要发现包括 4 点，分别是：

- (1) 对地震和大地测量数据的分析显示，在几次  $M_w > 7$  的浅层地壳

地震发生的前几年，观测到剪切变形的逐渐局部化。同时，在一些主震发生之前，还伴有瞬时前震序列或慢滑。

(2)在俯冲带的一些大型逆冲地震之前，由迁移性慢滑瞬变(migrating slow slip transient)和前震共同驱动的断层滑动呈阶梯式增加，这可能反映了之前的破裂所引起的应力加载。同时，闭锁区附近断层的滑动荷载间歇性增加，这增加了随后发生大地震的可能性。

(3)由于强度的不均匀性、断层的粗糙度和局部载荷率的变化影响，大型自然地震的引发过程是多样的，包括变形的局部性和后续滑移的复杂性。

(4)未来，需要进行综合、高分辨率的地震和大地测量观测，包括采用更多的近断层传感器和先进的分析技术，以提高对导致大型自然地震发生的地震滑移和地震序列的综合认识。

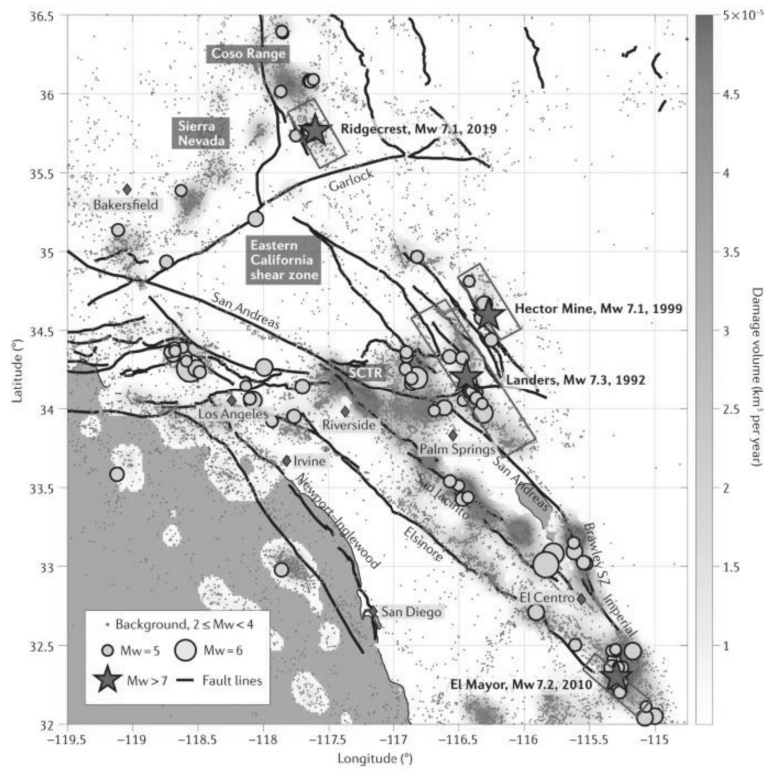


图1 未来大地震破裂带周围的背景事件导致的岩石破坏

来源：Aitaro Kato, Yehuda Ben-Zion. The generation of large earthquakes.  
Nature Reviews Earth & Environment. 2021, 2: 26–39.

## 利用长须鲸叫声进行地壳地震成像

长须鲸的叫声是海洋中可以远距离探测到的最强的动物叫声之一。美国俄勒冈州立大学研究人员分析了太平洋东北部海底地震仪记录的长须鲸的声谱。结果表明，除了水载信号（waterborne signal）外，声谱记录还包含了从台站下地壳界面反射和折射的信号。利用这些资料，研究人员限定了大洋沉积物和玄武岩基底的厚度和地震波速，以及海底地震台站周围及下部辉长岩下地壳的  $p$  波速度。全球范围内可获得的大量长须鲸叫声可以在常规气枪调查无法实现的情况下用于补充地震研究。相关成果发表在 2021 年 2 月 *Science* 上。

长须鲸的叫声是海洋中最强的动物叫声之一。长须鲸的叫声包括短的、1s 的叫声，其主导频率约为 20 赫兹。叫声的特征是一个正弦的、向下的频率扫描信号，在发声期后频率下降约 5 Hz。这些叫声每隔 7~40 s 重复一次，声谱可以持续数十个小时，当鲸鱼浮出水面时，每 15 min 就会有短暂的中断。这些声谱可能由重复的叫声组成，但通常是由两三个不同的向下扫描的交替叫声组成（图 1A 和 1B）。用于地震监测的海底地震仪（OBS）通常部署用于记录 50 Hz 或更低的振动，经常捕捉到鲸鱼的低频叫声，包括长须鲸的叫声。研究人员发现，在 OBS 观测站记录的长须鲸叫声中，除了包含水载能量外，还包含从观测站下地壳界面反射和折射的信号，这些信号可用于海洋地壳的地震成像。

2012—2013 年，太平洋东北部部署了 54 个 OBS 台站网络，以监测 Blanco 转换断层的地震活动。除了断层地震活动，OBS 台站还记录了大量的长须鲸叫声。研究人员分析了 OBS 网络 BS080、BS100 和 BS110 台站记录的长须鲸声谱

研究人员一共分析了六个声谱，每个都是由一头鲸鱼的叫声组成的。

声谱持续的时间从 2.5~4.9 h 不等。这些声谱主要由两种不同类型的叫声组成：一种是主频在 25~20 Hz 之间的向下扫描叫声，另一种是频率从 20 Hz 降到 15 Hz 的低音叫声(图 1A)。由于高频率范围内的背景噪音水平较低，研究人员只使用高音叫声。这些声谱包含 212~593 种叫声，叫声间隔时间在 30~40 s 之间。为了增强有用的信号，研究人员使用一个从 21~25 Hz 的通频带的锥形巴特沃斯带通滤波器 (tapered Butterworth bandpass filter) 来过滤数据。

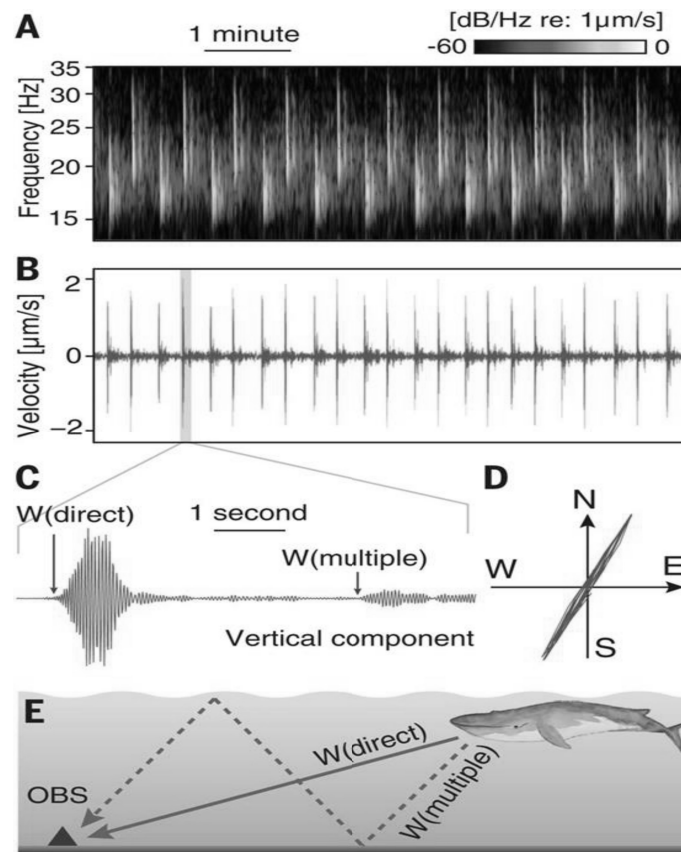


图 1 长须鲸发声特征

研究人员利用直接水波 (direct water wave) 和水上多次波到达时间的差值来确定鲸鱼 (即源头) 与观测台站之间的距离。水上多次波是到达观测台站之前在海底和海面之间反射的水波 (图 1, C 和 E)。研究人员结合鲸鱼与观测站之间的距离和方位计算鲸鱼的位置, 用于确定鲸鱼游动的真

实路径。同时，根据指向震源的直接水波的方向来确定站源方位。在合理假设鲸鱼的轨迹相对平稳且巡航速度稳定的基础上，使用移动平均滤波器对最终的游动路径进行平滑处理。海底水深的变化会影响源站距离的确定，该研究采用迭代定位方法对这种影响进行了修正。

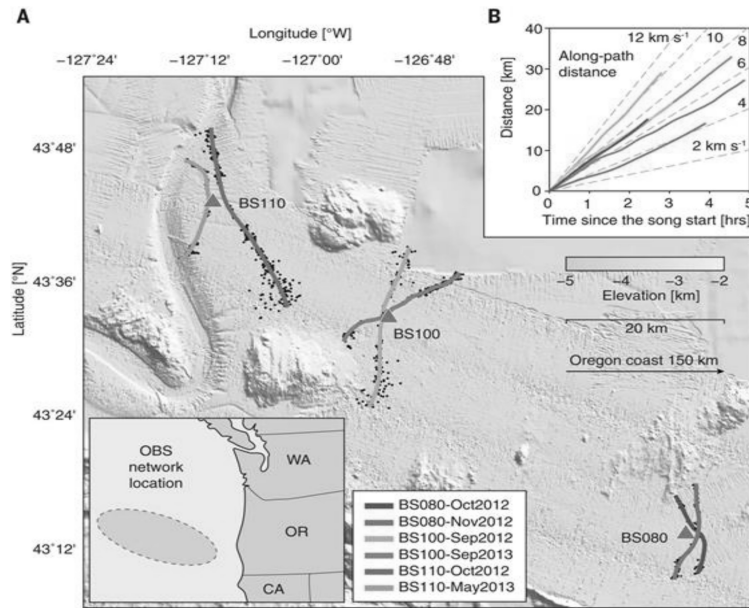


图2 鲸鱼声谱和游动路径分析结果

当长须鲸的叫声撞击到海底时，部分叫声能量在海底以地震波的形式传播。地震波穿过大洋地壳，并在那里被地壳内部的地层反射和折射。当被 OBS 记录时，研究人员便能够估计地壳结构。为了显示各个地震相位的到达，研究人员把鲸鱼的叫声组织到接收器集合（receiver gather）中。一个接收器集合表示单个鲸鱼叫声的集合（即地震道）——根据鲸鱼在发声时与接收站之间的距离（即源站偏移）被显示出来。每一个接收器集合包括鲸鱼在一个声谱期间的叫声，称之为“声谱集合”。声谱集合中个别相位的到达显示为一个相对高振幅信号的间隔。随着距离的增加，相位逐渐延迟，这一过程称为正时差（normal moveout, NMO）。通过使相位到达时间在所有距离等效，可进行介质速度的 NMO 精确修正。地震仪垂直分量

的声谱集合最能显示地震相位到达（图 3）。在声谱集合中最突出的是水载波——直接波  $W(\text{dir})$ 和反射波  $W(\text{mult})$ 。除水载波外，研究人员还在玄武岩基底（第 2 层）识别出 4 个主要的波反射和折射地震相，以及辉长岩下地壳（第 3 层）中的折射地震相。每个台站的最佳地壳拟合模型是通过回归各个阶段的到达时间找到的，并使用射线建模软件进行建模。

在直接水波  $W(\text{dir})$ 或多重水波  $W(\text{mult})$ 到达后，可以识别从基底顶部（第 2 层）的  $p$  波反射。 $WPbP$  对应直接水波反射， $W(\text{mult})PbP$  对应多重水波反射。基底反射，研究人员能够计算第 1 层海洋沉积物的厚度和  $p$  波速度。当直接水波斜向撞击水与沉积层的界面时，部分波能转化为  $S$  波。第 2 层（ $WSbS$ ）的横波反射在到达水波之间的叫声集合中到达（图 3）。 $WSbS$  提供了一个独立的沉积物厚度估计，并限制了第 1 层的  $S$  波速度和泊松比。在大于 4 km 的偏移距处，沿玄武岩基底折射的  $p$  波成为第一个到达相位，约束了第 2 层的  $P$  波速度和第 1 层的厚度。当偏移距大于 12 km 时， $WPg$  相速度增加，指示沿辉长岩下地壳（第 3 层）折射的  $P$  波的到达。 $WPg$ （第 3 层）可以计算出第 2 层的厚度和第 3 层的纵波速度。

所有台站均观测到玄武岩基底的  $WPbP$  和  $W(\text{mult})PbP$ ，在 2 km 源站偏移处分别在各自的水载波后 0.5~0.7 s 到达。当偏移距较长时，反射相位与水波到达点的时间差减小，反映了反射相位到达点的  $NMO$  速度较快。 $W(\text{mult})PbP$  相的  $NMO$  最优修正速度在 1.53~1.56  $\text{km s}^{-1}$  之间，表明沉积物  $p$  波速度在 1.9~2.2  $\text{km s}^{-1}$  之间（图 3D）。 $W(\text{mult})PbP$  与  $W(\text{mult})$ 相移时间的差值表明，BS080、BS100 和 BS110 的总沉积厚度分别为 500 m、650 m 和 400 m，估计不确定性约为 30~40 m。

横波基底反射  $WSbS$  出现在距  $W(\text{dir})$  2 km 处约 1.5~2 s 的短偏移处，是所有声谱集合上的主导相位。反射  $WSbS$  相的  $NMO$ （图 3E）表明，海

洋沉积物层的横波速度约为  $0.6 \text{ km s}^{-1}$ 。沉积物泊松比在  $0.44\sim 0.46$  之间， $p/s$  波速比在  $3.2\sim 3.7$  之间。WSbS 相到达与 W(mult)PbP 相确定的沉积物厚度一致。

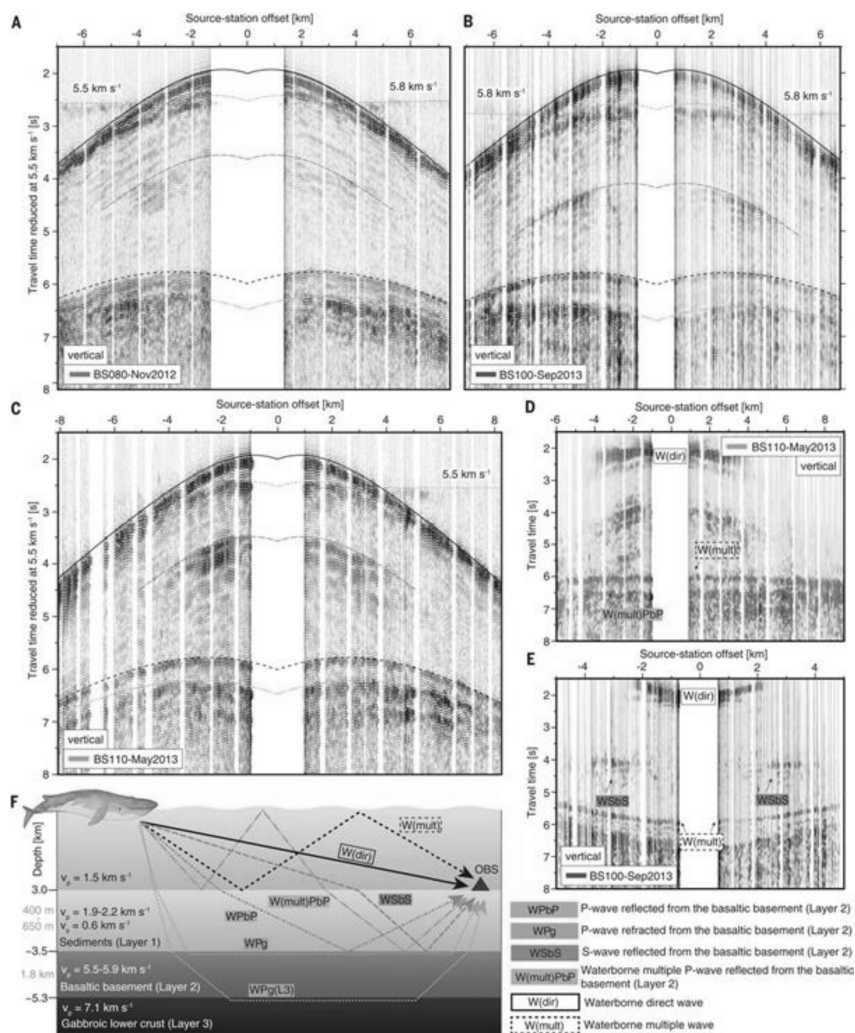


图3 BS080、BS100及BS110地震台站声谱综合解译

WPg 相位代表沿玄武岩基底（第 2 层）折射的 P 波，表明所有站点的玄武岩基底速度在  $5.5\sim 5.9 \text{ km s}^{-1}$  之间，不确定度约为  $0.2 \text{ km s}^{-1}$ 。在某台站的两侧，记录到 WPg 的坡度不同，说明第 2 层的顶部可能有倾斜。由鲸鱼潜水深度的不确定性引起的偏移不确定性对模型的影响可以忽略不计 ( $\sim 0.2\%$ )。BS110 在 2012 年 10 月的声谱集合显示，WPg 到达距离台站以南 19 km 处。在距离差大于 12 km 时，到达相位表明，速度增加到大约



$7.1\pm 0.1 \text{ km s}^{-1}$ ，这与海洋第 3 层一致。据此推算出的第 2 层厚度为  $1.8\pm 0.3 \text{ km}$ 。BS110 台站特别好地显示了直接相、反射相和转换相，它们约束了衍生出的地壳模型。

上述包含不确定性的研究结果符合海洋地壳的原型结构，即辉长岩下地壳(第 3 层)被喷出的玄武岩(第 2 层)和松散的水化沉积物(第 1 层)所覆盖。从研究地点以北约 200 km 的可控源横断面获得的地震图像显示，沉积物厚度约为 700~800 m。在 Blanco 断裂带位置，沉积物较薄约 100~300 m，这可能是由于该位置距离哥伦比亚河河口和胡安德富卡海峡的沉积物源较远。该研究中估计的沉积物 p/s 波速比低于更北侧的控制源实验，表明沉积物被过度压实，这可能是由于接近 Blanco 断层并反复暴露于强地震震动。玄武岩基底(第 2 层)厚度和 p 波速度与全球范围内观测到的该层在同一地壳时代的值匹配，第 3 层 p 波速度也在全球观察结果范围内。三个研究地点显示了一致的结果，与区域和全球观测一致，并证明，长须鲸的叫声可以用于海洋地壳的地震成像。

来源：Kuna V M. & Nábělek J L. Seismic crustal imaging using fin whale songs. *Science*, 2021, 371: 731–735.

## 大地震：自愈合脉冲式还是温和破裂式扩展？

观察表明，断层在与预期静态强度相比很低的应力状态下孕育大地震。可能的解释是，断层只是准静态的强（quasi-statically strong），在地震过程中会经历强烈的弱化；或者是断层强度一直很弱，例如由于流体超压。本研究中，研究人员利用数值模拟的方法对 1~10 兆帕的应力降，以及有限热产生的地震破裂进行模拟，以检验这两种模型。准静态下强但是发生动态弱化的断层主要孕育相对突然的、自愈合脉冲式破裂，而断层强度一直很低的断层孕育相对温和的破裂。研究发现，自愈合脉冲式破裂的动态应力变化比静态应力更强，并且导致了更强的能量释放。相反，持续性弱（persistently weak）断层上温和的裂纹式破裂产生了基本相同的静态和动态应力变化，并与地震观测一致。自愈合脉冲式破裂更强的能量释放类似于对地壳走滑断层有限区域的推测。该研究表明，要么大地震很少以脉冲式破裂扩展，要么它们的能量释放被低估，这引发了关于地震物理学和大地震预期震动分析的问题。相关研究成果于 2021 年 3 月发表在 Nature。

大量的地球物理证据表明，在地震发生深度的断层强度都在 20 MPa 及以下，而不是通常认为的 100~200 MPa 的抗剪强度。其中一个令人信服的证据是热矛盾：断层周围缺少大量异常的热流。有两种假设被用来解释地应力以及低热流的现象：断层在缓慢的准静态滑动过程中是很强的，但是会在地震的滑移速率下发生强烈的动态弱化（假设 1，简称 H1）；由于很低的准静态摩擦系数或者很低的有效围压，断层一直很弱（假设 2，简称 H2）。对大地震高频地表移动的反演结果表明，局部的滑移持续时间远短于整个破裂的持续时间，暗示大地震破裂可能是以脉冲式破裂扩展的。数值模拟以及理论研究已经表明，自愈合脉冲式滑移能够发生在准静态下

强但动态弱化的断层上。相反，简化震源理论是基于地震破裂是以裂纹式破裂的假设，局部的滑移持续时间与整个破裂的滑移持续时间是相当的。地震的有限断层反演是不唯一的，并且不能明确的区分裂纹式和脉冲式破裂。突然的脉冲式破裂可能在反演平滑的过程中被消除，而裂纹式破裂如果无法获取很低滑移速率下的拖尾，其可能看起来像脉冲式破裂。因此，有必要发展其他方法来区别这些可能性。

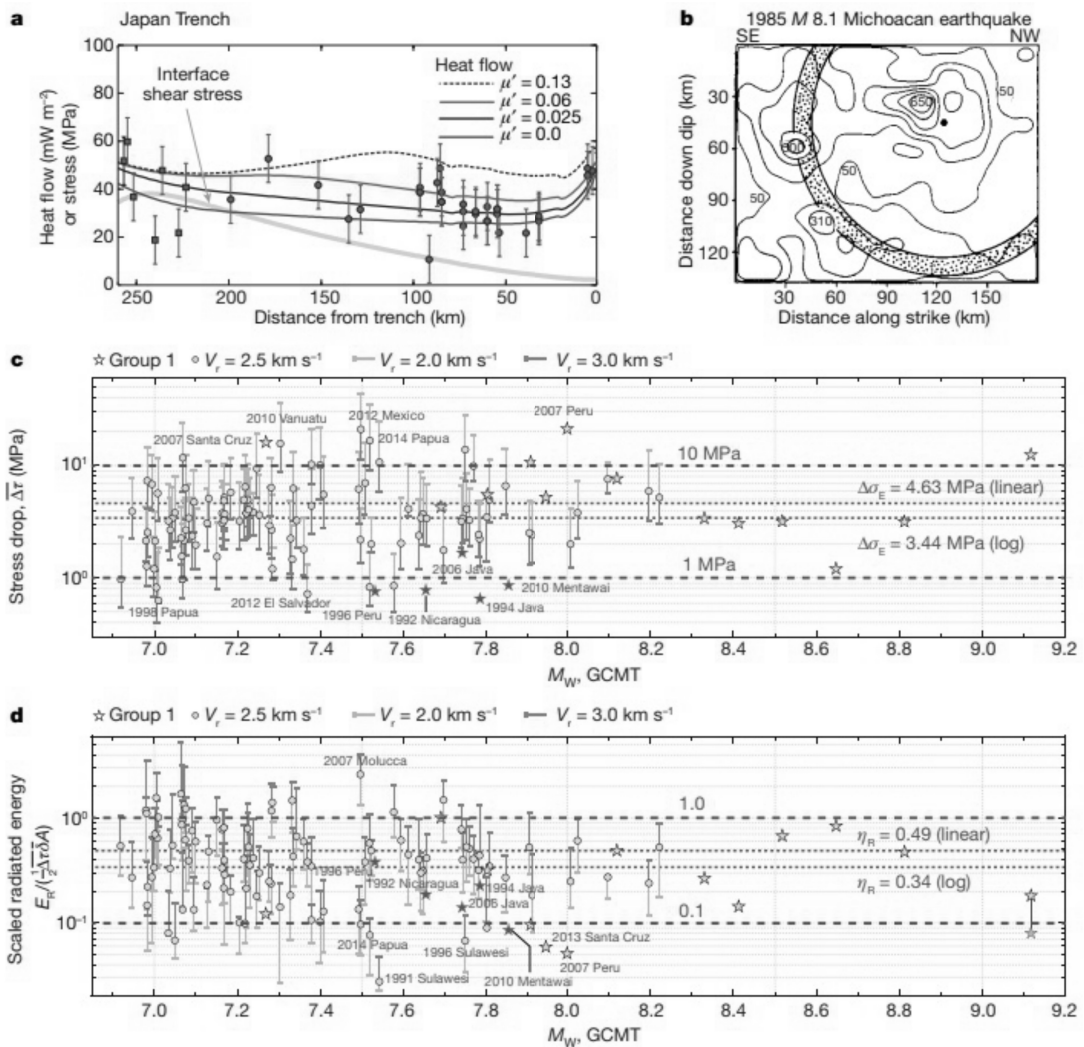


图 1 大地震的地球物理机制推测

为了确定控制地震破裂的物理机制，地震研究寻求确定的震源性质，例如静态应力降、能量释放、表观应力、释放效率以及平均破坏能量。对全球静态应力降的比较表明，地震破裂区域的平均应力改变与破裂大小无关，并且通常在 1~10 MPa。表观应力由刚度乘以  $E^R/M_0$ ，但表观应力和  $E^R/M_0$  都与震级无关， $E^R/M_0$  通常在  $10^{-5}$  左右。平均破坏能量  $G$  随着地震大小的变化而变化，这与剪切强度由于增强的动态弱化而持续下降是相符的。释放能量与破坏能量的比例  $\eta_R^{inf}$  在 0.1~1.0 之间。

为了检验不同类型破裂的地震观测结果，研究人员利用代表两个假设的低应力、低热流的震源参数模型进行数值模拟。这种方法能够模拟地震序列以及在缓慢的、构造加载背景下的慢滑移。在该模型中，断层受控于实验起源的速度-状态摩擦方程。研究所用的大多数模型中都包括由于热增加产生的增强的动态弱化，持续性弱断层模型还考虑了流体超压以及低的准静态摩擦系数。

模拟脉冲式破裂与裂纹式破裂：两种破裂具有相似的平均静态应力降（约 8 MPa）以及滑移距离（约 4m）。在给定的时间内，自愈合脉冲式破裂断层内仅有一小部分发生滑移，导致一个相对较短的局部滑移持续时间。对于裂纹式破裂，在破裂过程中破裂的大部分在大多数时间内都发生滑移，局部的滑移时间与整个破裂的活动时间相当。

两种破裂的物理过程在断层上具有显著差异。自愈合脉冲式破裂在平均剪切预应力相对较低的情况下发生，值得注意的是，为了使破裂成核，在成核区域预应力需要与准静态摩擦强度相当。但是，成核区域相比于整个断层来说很小，因此整个断层的平均预应力依然很小。在每一个初始的低应力破裂区域，断层都会经历很强的动态应力增加来克服静态强度。由于增强的动态弱化，断层强度随后快速下降（10 MPa）。随着滑移停止，断

层经历了快速的应力增加。相反，持续性弱断层上发育的裂纹式破裂具有相似的静态和动态应力变化。尤其是，滑移过程中的动态应力改变与最终的剪切应力没有明显的差异。

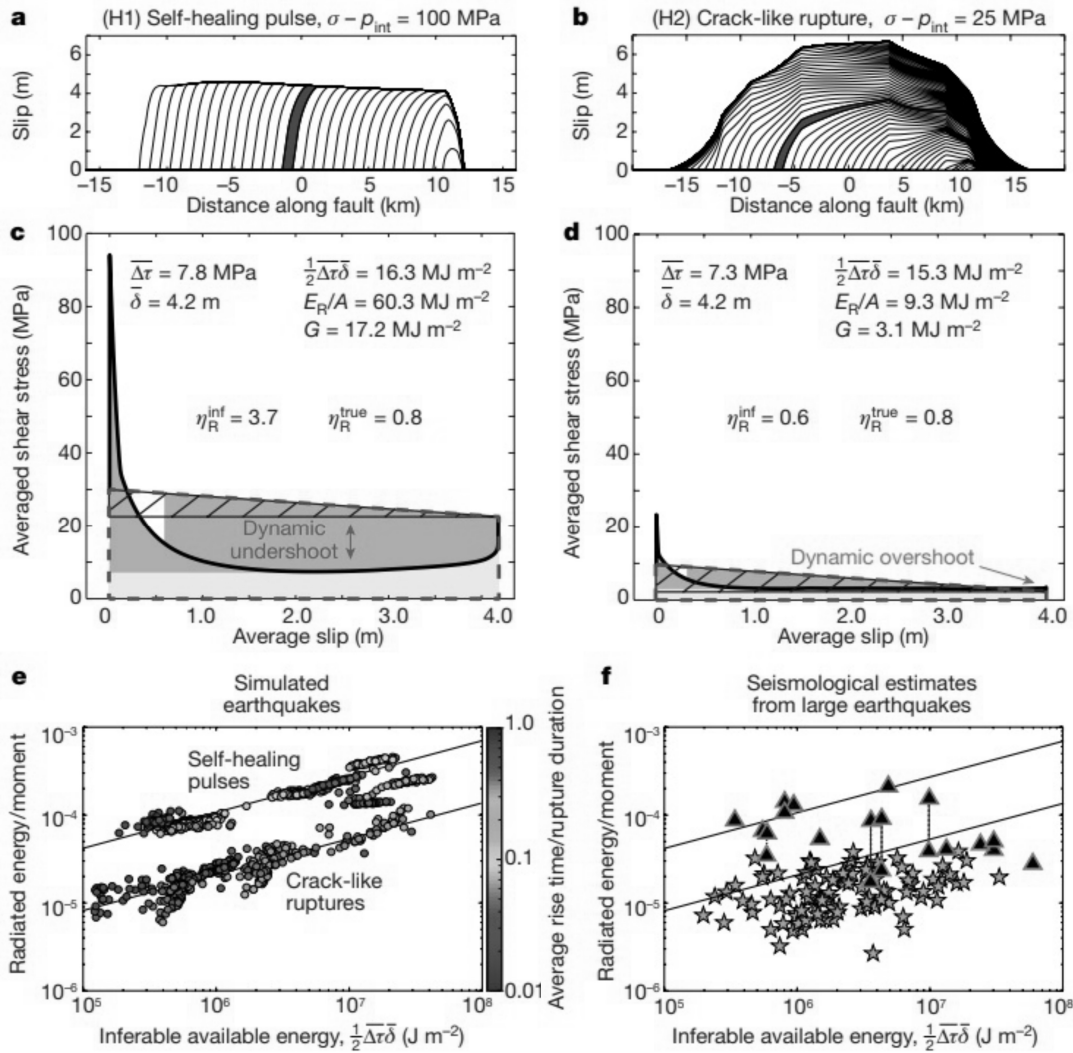


图2 模拟的自愈合脉冲式破裂和裂纹式破裂

在能量释放方面的巨大差异：虽然两类破裂具有相似的应力降以及平均滑移量，但它们的能量分配具有巨大的差异。尤其是自愈合脉冲式破裂释放的能量是裂纹式破裂的6倍。研究表明，释放的能量与震级的比值与表观应力呈正比，且自愈合脉冲式破裂的这一比值比相似应力降和滑移量的裂纹式破裂大一个数量级。裂纹式破裂产生的能量与推断的大地震能量

释放相当。然而，自愈合脉冲式破裂释放的能量要高一个数量级，这与地壳内大地震的有限估计相似。研究表明，相同或者更低的静态应力降和震级如果具有更高的下限（undershoot），可能会释放更多的能量。

自愈合脉冲式破裂和裂纹式破裂在释放能量方面的巨大差异是由完全不同的动态强度（dynamic resistance）与最终应力水平的关系决定的。地震释放了周围介质的部分弹性应变能，释放的能量分为耗散能与辐射能。自愈合脉冲式破裂的动态剪切强度比最终应力状态低很多，但是平均静态应力降和滑移量是相同的。相同平均静态应力降和滑移量的自愈合脉冲式破裂释放的辐射能要比裂纹式破裂多。

模拟结果表明，逐步锐化的自愈合脉冲式破裂经历了越来越大的平均应力下冲，从而也导致了相同应力降和震级下更多的辐射能。在自愈合脉冲式破裂过程中，滑动脉冲会变得锐化，但是动态应力降保持不变，静态应力降变小。随着脉冲滑移的扩展穿过并离开断层的一部分，滑移区域的波会重新加载于之前已经发生滑移的区域，引起最终剪切应力层次的增加。为了在这种剪切应力增加的情况下保持闭锁的状态，断层需要快速有效的愈合。

滑移阻力和最终剪切应力间的差异表明了常被用来推测地震能量平衡的方法的局限性。在常见的方法里，平均剪切应力降被假设为初始平均剪切应力与动态剪切阻力之差。释放效率为：

$$\eta_R^{ture} = \frac{E_R/A}{\left(\frac{E_R}{A}\right) + G}$$

简化的公式：

$$\eta_R^{ture} = \frac{E_R/A}{\frac{1}{2}\Delta\tau\delta}$$

$$G^{inf} = (\Delta W_0^{inf} / A) - (E_R / A)$$

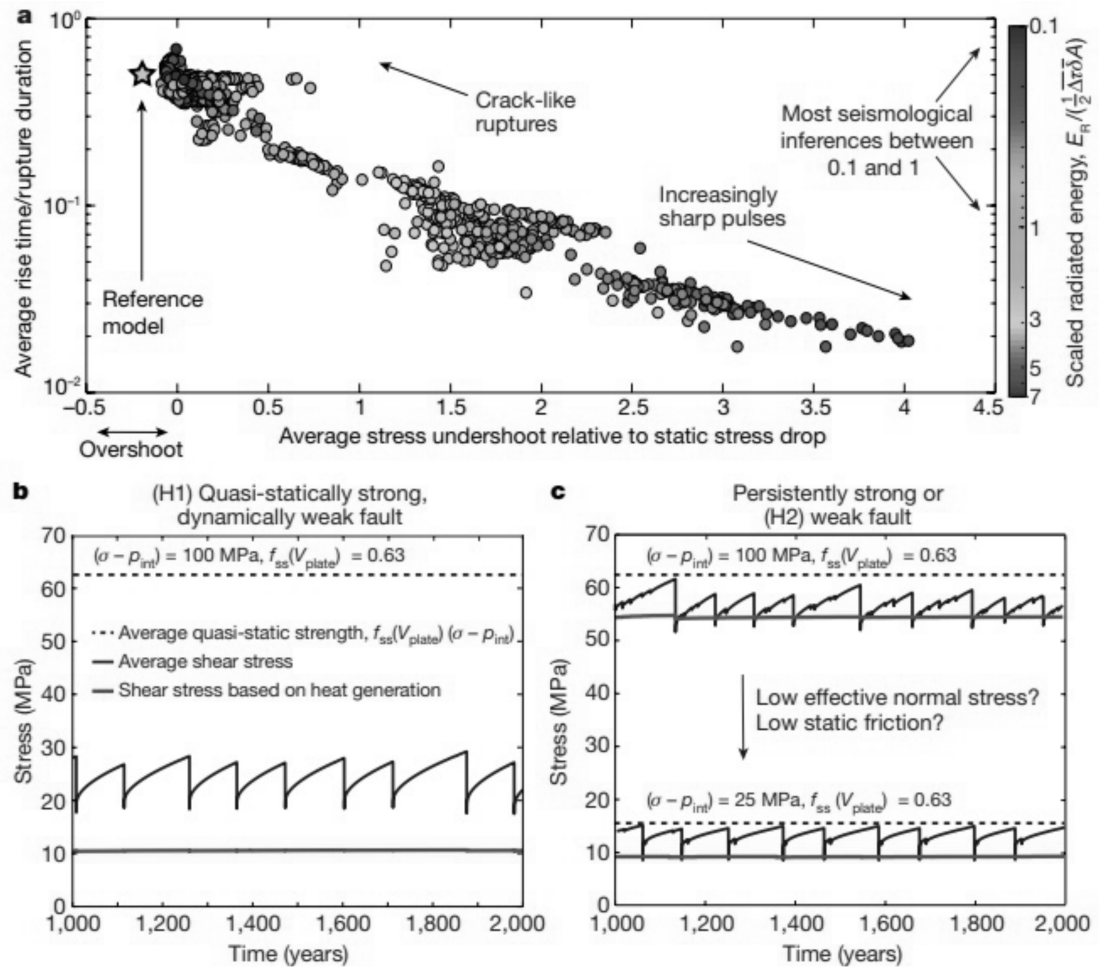


图3 模拟断层的破裂模式、辐射能和应力状态之间的关系

裂纹式破裂在破裂之后的最终平均剪切应力与平均动态剪切强度相当，而自愈合脉冲式破裂并非如此。由于自愈合脉冲式破裂的大量应力下冲，地震推测可能会低估有效能量，导致释放效率远大于 1，推测的破坏能  $G^{inf}$  为负。虽然几个地震研究已经记录了释放效率大于 1 以及负的  $G^{inf}$ ，但这种推测是不常见的。值得注意的是，一些之前对自愈合脉冲式破裂的研究假设额外的可用能量会以破坏能被释放，然而，此研究表明很多都是辐射能。模拟显示，有限断层上的脉冲是自发地震序列的一部分，导致了

脉冲形态的演化。裂纹式破裂也会发生在准静态下强但动态弱化的断层中，虽然这类模拟的破裂的静态应力降要比 1~10 MPa 大很多。

自愈合脉冲式破裂和裂纹式破裂都产生了低应力，低热流的破裂。这两者之间的一个关键差异在于断层平均剪切应力与局部准静态强度。自愈合脉冲式破裂的平均剪切应力与局部准静态强度差异很大，这提高了其地震成核的重要性。同时，持续性弱断层模型中，断层总是闭锁的。该研究中裂纹式破裂再现了对自然界地震的很多观测结果，包括 1~10MPa 的应力降，0.1~1 的释放效率，正的破坏能，辐射能与震级  $10^{-5}$  的比值。这些结果表明，裂纹式破裂是可能的，脉冲式破裂更高的辐射能则与对走滑地震的区域估计一致。

来源：Lambert V, Lapusta N. & Perry S. Propagation of large earthquakes as self-healing pulses or mild cracks. Nature. 2021, 591: 252-259.