

地震科技前沿快报

2019 年第 4 期 (月刊 总第 4 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、2018 年汤加-斐济两次深部地震的复杂多样的破裂过程
- 2、2017 年黄石枫树溪地震群的断层复杂性
- 3、用具幂律蠕变特征的快速地慢流动解释 2011 年 Tohoku 震后变形

2018 年汤加-斐济两次深部地震的复杂多样的破裂过程

深部地震在破裂和余震特征方面表现出很强的变化，它们的物理破裂机制仍不清楚。2018 年 8 月 19 日汤加发生了瞬时震级达到 8.2 级的深部地震，18 天后另一个瞬时震级达到 7.9 级的深部地震在 280km 之外发生，这两个地震是这个俯冲带所记录的两次最大地震。研究人员通过进行波形分析，远震 P 波反投影以及余震位置的变化来研究这些事件。研究结果表明，8.2 级地震发生了快速 (4.1 km/s) 破裂并且引起频率相关的地震辐射，而 7.9 级地震发生了缓慢破裂 (2.5 km/s)，两者都持续了约 35s。8.2 级地震发生在高度孕震的、板片较冷的核部，之后破裂向周围热的物质扩展，而 7.9 级地震的破裂在一个耐震域中经历了一个耗散过程。通过对地震运动学与余震发生能力的对比表明，这一区域至少有两种主要的破裂机制。

相关研究成果发表于 2019 年 3 月的 *Geophysical Research Letters*。

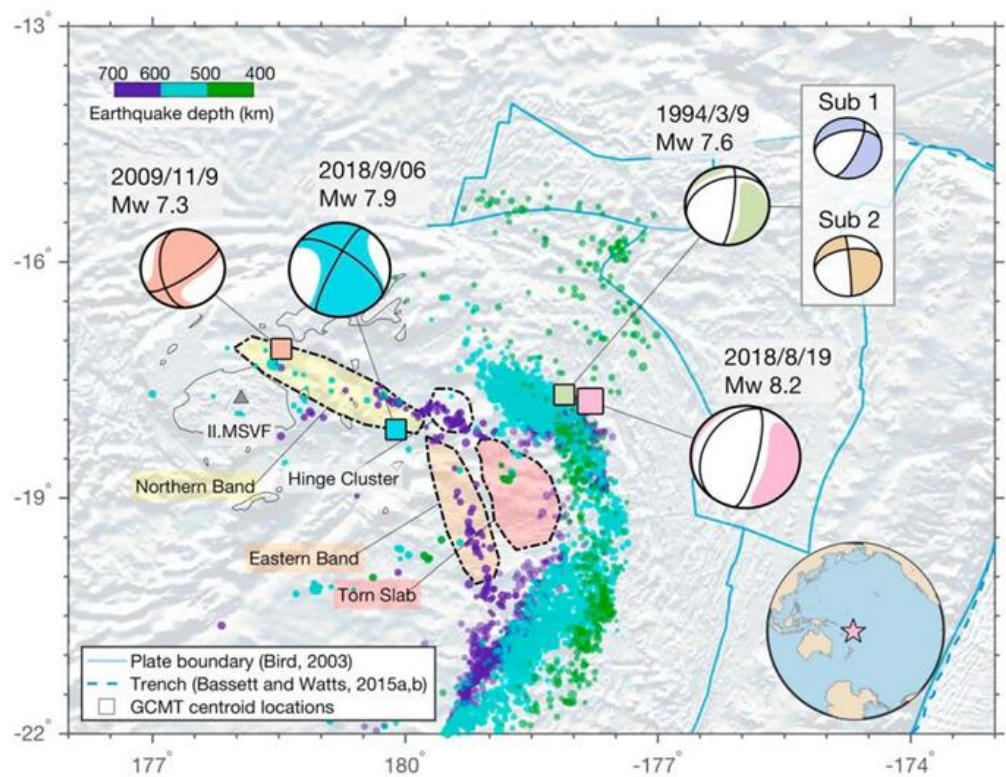


图 1 汤加-斐济地区地震概况

发生在大约 350 km 以下的地震被称为深源地震。在很大的深度，由于围压很大，浅源地震中发生的脆性破裂过程在这里很难发生。由于这些深源地震发生的频率低，且对它们的观测也很有限，所以这些深源地震破裂的物理机制仍然不清楚。已经有几种机制被提出解释深源地震，包括脱水脆化、亚稳态橄榄石的转换断层和热剪切失稳。区分这些机制的关键在于高分辨率地震观测。例如，对汤加和南美俯冲带的深部地震的有限震源模型分析表明，冷板片和热板片具有完全不同的破裂特征。

世界上大约三分之二的深部地震发生在汤加俯冲带。该地区的大型深部地震通常表现出快的破裂速度，较高的地震效应，并有丰富的余震。2018 年 8 月 19 日，距离 1994 年 7.6 级汤加地震发生地约 30 km 处发生了 8.2 级的强烈地震。十八天后，在距离这次 8.2 级地震 273 km 处发生了一次

7.9 级地震。8.2 级深部地震似乎开始于约 580 km 的深度，这一区域具有密集的背景地震活动。地震产生了最大的深部地震余震序列总数，如在 34 天内发生了超过 250 次余震。相比之下，7.9 级地震在斐济南部盆地下方的外侧区域约 680 km 深处开始，背景地震活动相对较少，随后的余震序列稀疏。它有一个走滑机制，具有大补偿线性矢量偶极子（a large compensated linear vector dipole），表明可能是涉及多个子事件的复杂破裂过程。

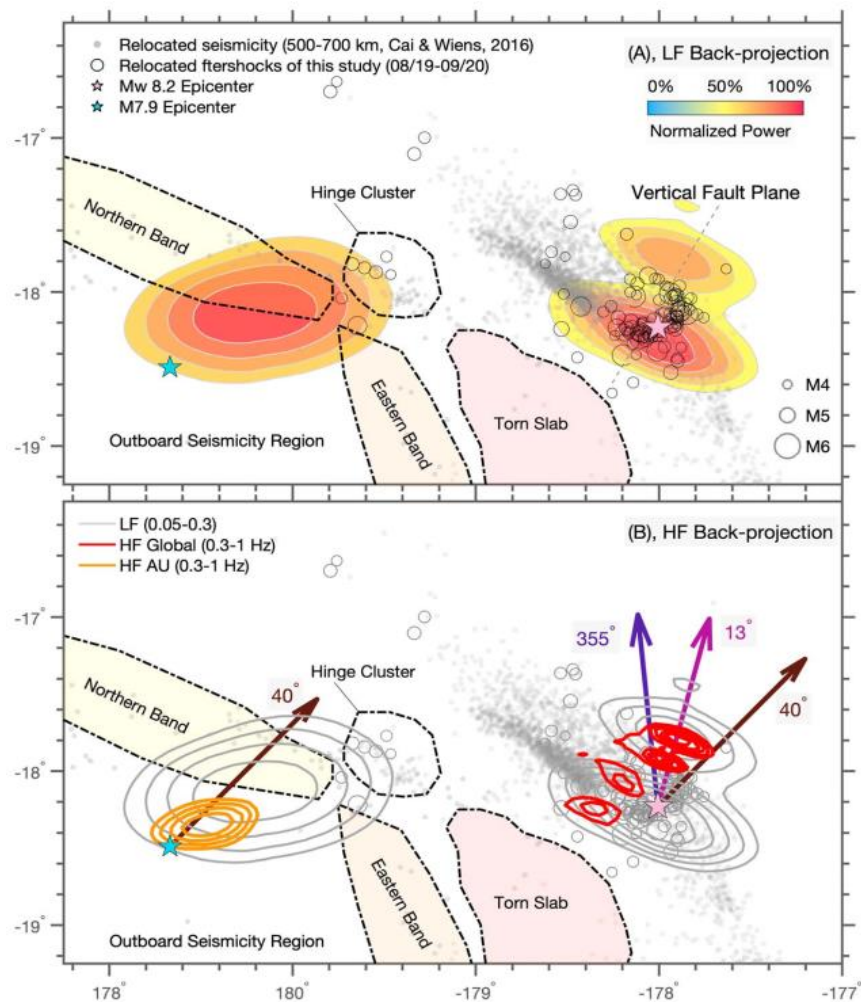


图 2 两次深部地震的综合反投射图

研究方法主要涉及波形分析、反投射、余震再定位。深部地震破裂过

程通常很复杂，并含有多个子事件，这些子事件可以通过波形分析或者源时间函数直接确定。对 P 波极性进行分析可推断地震震源机制。为了避免过滤过程中可能的人为影响，对未经过滤的位移记录进行了分析。两次地震的波形显示出很大的复杂性，包括由于可能的具有不同震源机制的多个子事件导致的 P 波极性反转。为了研究破裂过程，将 8.2 级地震未经过滤的位移记录显示为 0-8、8-22 和 22-37 s 的分段，7.9 级地震显示为 0-6、6-23 和 23-35 s 的分段。通过目视检查确定每个时间窗的主要 P 波极性，然后使用这些极性通过网格搜索过程推断可能的震源机制。对于大地震，可以从 P 波持续时间估计破裂方向性。首先通过方位角堆叠 0.05-0.3 Hz 的位移包络函数，然后通过拟合余弦曲线估计破裂方向，持续时间，长度和破裂速度。

反投影是研究大地震破裂传播的主要成像工具之一。反投影假设 P 波记录提供相对不失真的地震辐射记录，并利用源-接收器互易性。通过叠加 P 波记录，可以在地震震源附近提取相干强信号作为破裂前沿来绘制地震破裂传播图。使用震源分解相对再定位算法重新定位 8.2 级地震附近的事件，但是，重新定位的地震具有较低的深度不确定性，最终的地震重新定位在垂向和横向具有 8 km 的不确定性。

研究表明，8.2 级地震震源重新定位在 $18.23^{\circ}\text{S}/178.01^{\circ}\text{W}/576\text{ km}$ ，并被余震所包围。密集的余震区域沿 NNE 方向跨越约 80 km 深度和 50 km 长度。这些余震主要发生在以前的地震活动区域内，勾画出了汤加板块的核心。此外，余震带表明一个近乎垂直的断层面面向东倾斜。方向分析表明，地震向 10° 方向破裂，持续约 37 s，并以 4.1 km/s 的破裂速度传播，破裂长度约为 152 km。全球阵列第 N 根低频（LF）反投影结果显示，8.2 级地震向东北方向破裂，长度约为 110 km。LF 辐射的前 22s 被限制在大部分余震发生的约 50 km 范围内，而 22-28 s 的 LF 辐射发生在余震区之外，位于

震中约 102 km 处。LF 反投影快照表明,对于 8.2 级地震,平均速度为 4 km/s,北向破裂传播。来自多个子阵列的集成高频(HF)反投影结果独立地表明,大部分 HF 辐射在余震区内释放。7.9 级地震可能发生在汤加板块以西的一块独立板块内。地震在其震源附近几乎没有余震。方向性分析表明,地震向 40°方向破裂。地震破裂长约 88km,持续约 35s,并以平均破裂速度 2.5km/s 的速度传播。两个频带的第 N 个根集成反投影结果表明,大部分地震辐射都是在震源的东北方向释放的。然而,相干函数表明大多数 LF 能量释放发生的时间远晚于 HF 辐射。LF 反投影快照与方向性分析吻合,将最具活动性的部分定位为距离 7.9 级地震震中约 70 km 处。HF 反投影快照显示出一种类似的但更紧凑的破裂模式。

8.2 级和 7.9 级地震都破裂了多个断层。从 P 波位移极性推断出的震源机制表明,8.2 级的地震开始于一个走向 40°的断层,并向 13°演化。对于 8.2 级地震,在澳大利亚和东亚地区的整个破裂过程中,P 波极性仍为负值,南极洲地区的极性从大约 8 s 由正到负反转。北美约 22 s 发生了负极转为正极的反转。因此,8.2 级地震的走向旋转了 27°。震源机制表明,7.9 级地震有 20°左右的倾角变化,倾角从向西北倾斜变为南东,走向发生了约 15°的旋转。

2018 年 8.2 级和 1994 年 7.6 级汤加-斐济地震之间有许多相似之处。两次事件都产生了许多余震,这些余震沿陡倾的 NNE 走向震源平面排列,其方向几乎垂直于 SE 向的汤加板片。此外,两个破裂都发生在靠近其 SW 边缘的具有高度地震活动性的、接近垂直的板块内部,然后以约 4 km/s 的破裂速度主要向北破裂,同时涉及至少三个具有不同震源机制的子事件。1994 年的 7.6 级地震终止于一个约 200°C 的地区,温度高于划分板片的正常发震部分的温度,在这里破裂似乎能够传播,但地震成核却受到抑制。同样,2018 年汤加 8.2 级地震的最后一次 LF 子事件也集中在热晕区,那

里发生的余震很少。结合两次地震的观测结果，较热的晕区破裂很难成核，但是大的破裂有可能以与板片较冷的核心中成核机理不同的物理机制传播到这个区域，并产生相对不足的 HF 辐射。余震分布表明，沿倾向破裂程度约为 80 km。从上行和下行 P 波推断的持续时间大致相同，表明 8.2 级地震沿倾角双向破裂，上倾和下倾破裂程度相对对称。2018 年 8.2 级和 1994 年的 7.6 级地震中多个子事件的不同震源机制证实局部应力场高度不均一。

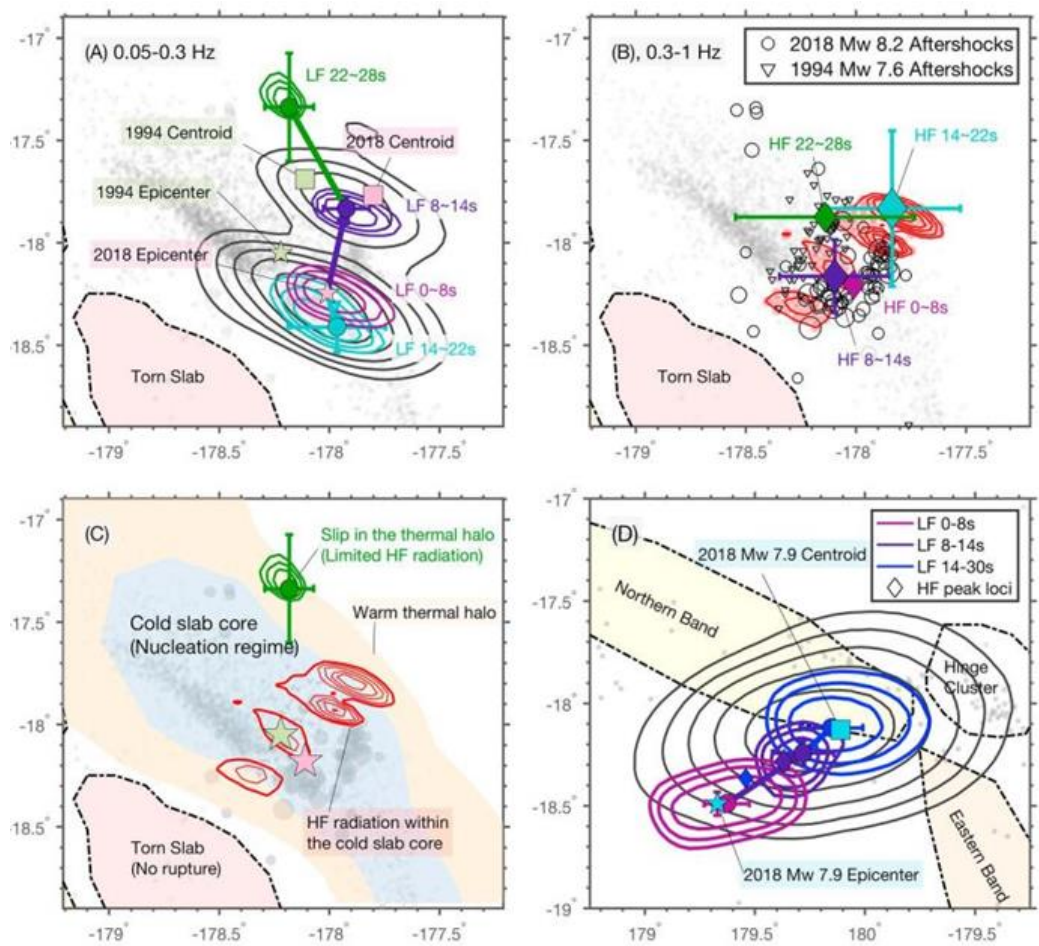


图 3 反投射快照 a: 8.2 级地震低频反投射快照; b: 8.2 级地震高频反投射快照;
c: 解释 8.2 级地震辐射的概念模型; d: 7.9 级地震的低频与高频快照

2018 年 8.2 级和 7.9 级汤加-斐济深地震在 18 天内相继发生，相互间隔 270 km，因此可能相关。为了测试静态触发可能产生的影响，用 8.2 级地震的垂直断层面 USGS 有限断层模型计算局部库仑应力变化。计算在 670 km 深度在 $207^{\circ}/77^{\circ}/149^{\circ}$ 断层面上引起的库仑应力变化，结果发现 7.9 级地震位于应力扰动超过 10 kPa 之外的区域。这表明仅由 8.2 级地震引起的静态库仑应力不足以驱动 7.9 级地震的破裂。据报道，附近地区发生了深层地震的动态触发。对于其他大的深地震序列也观察到了断层系统之间的这种相关的地震活动。鉴于汤加俯冲带在这些深度的复杂应力场，7.9 级地震可能由 8.2 级地震动态触发。然而，对于浅层地震，动态触发通常与大幅度地震波到达一致，或者在地震波通过后很快发生。18 天的延迟时间异常长，表明可能与之前观测到的深地震动态触发有所不同。

2018 年 8.2 级汤加地震与 2013 年 8.3 级鄂霍次克海的最大深部地震有相似之处，这可能反映出汤加和千岛俯冲带都处于相对冷的热状态，地震破裂过程受当地物理环境控制。汤加和南美洲发生大型深部地震，代表两个最终端元的破裂情况。该变化被认为是这些俯冲板块的局部热结构的表现。在汤加俯冲带，大的深部地震常常在板块的冷的核部发生，导致快速破裂、大破裂程度和高余震产生。在南美俯冲带，大型深部事件通常相当孤立，余震很少，地震频率低，破裂空间受限，并且在同震破裂期间缓慢传播。南美俯冲带的一个例外是 1991 年的阿根廷 7.2 级地震，该地震的断裂特征更类似于典型的汤加大型深震。这表明南美俯冲带可以承载两种类型的深部地震，而局部小尺度结构对于调制大型深地震破裂传播至关重要。2018 年汤加-斐济深震双峰的破裂过程表明，汤加俯冲带也可以承载这两种类型的深部地震。根据震源成像和余震分布，8.2 级地震的应力下降可能为 2.6 MPa，这与浅层地震相当。

2018 年汤加 8.2 级地震与 1994 年汤加 7.6 级地震之间类似的破裂传播

模式表明，它们可能受到相同物理机制的控制。破裂以在冷板片核部通过转换断层或热逃逸之后破裂扩展到相对较热区域的方式形成，其中滑动由韧性断层或剪切失稳机制维持。2018 年的 8.2 级和 1994 年的 7.6 级汤加地震的余震分布表明，它们发生在两个彼此平行的不同断层上。因此，亚稳态橄榄石转变形成的断层可能是破裂开始的原因，因为两个平行的雁列断层可能分别承载了这次地震。另一方面，2018 年斐济 7.9 级地震附近区域不太可能有足够数量的亚稳橄榄石来调节整个破裂过程。因此，7.9 级地震可能通过一个或多个热剪切失稳机制破裂。7.9 级地震的成核机制尚不清楚，因为源区的结构及其与任何板块碎片的关系在很大程度上是未知的。

来源：Fan W, Wei S S, Tian D, et al. Complex and diverse rupture processes of the 2018 Mw8.2 and Mw7.9 Tonga-Fiji deep earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(5): 2434-2448.

2017 年黄石枫树溪地震群的断层复杂性

2017 年枫树溪 (Maple Creek) 地震群是过去几十年黄石地区发生的最丰富的地震群之一，在 2017 年 6 月至 9 月发现了近 2500 次震级达到 4.4 级的常规地震。为了深入了解该地震群的力学行为和潜在机制，研究者增加了地震目录，检测并精确定位了近 16000 次地震，同时估算了 30000 多个事件的震级。研究者进一步利用从该处理得到的互相关测量来确定地震的相对极性，并分析了重新定位的地震群的震源机制。相关结果揭示出在地震群期间逐渐被激活的复杂的断层网络，以及流体压力通过这些构造的扩散。流体驱动的地震序列可能会自然地产生比应力转移主导的地震更复杂的断层几何学形态。该研究成果发表于 2019 年 3 月的 *Geophysical Research Letters*。

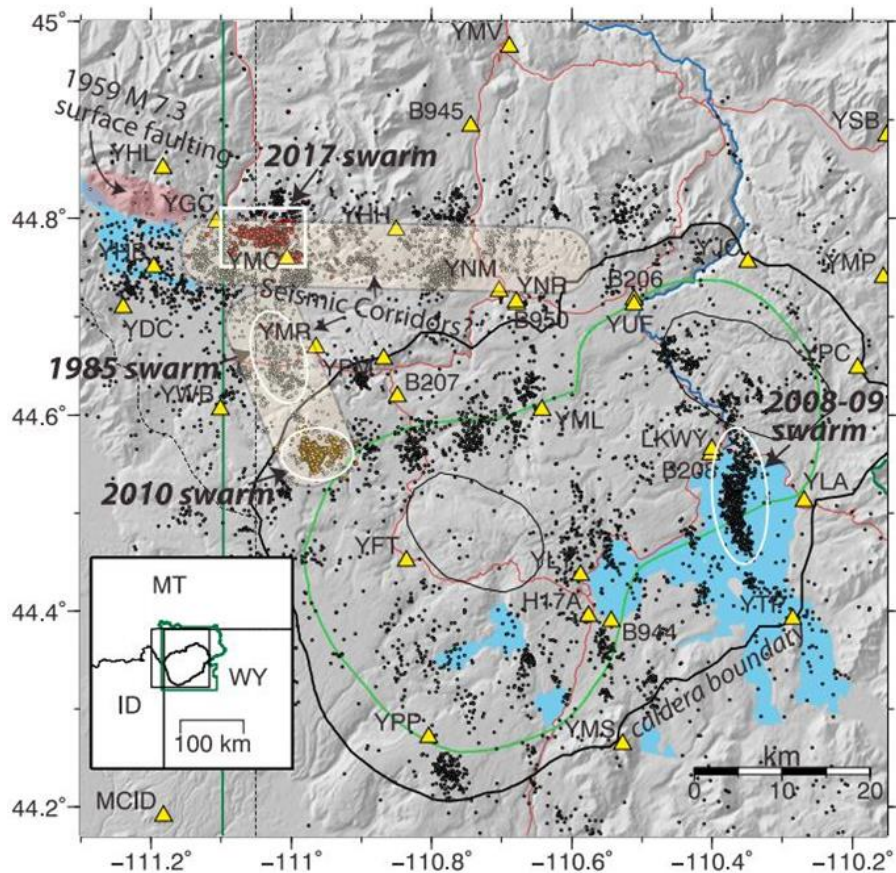


图 1 黄石地区的地震监测网以及地震活动

地震群是与典型的主震-余震模式不同的地震活动序列，是一个长期研究的话题。一个反复出现的问题是地震群维持其活动速率的物理机制。最常提出的地震群行为机制是通过耐震滑动和/或流体压力的瞬时增加来触发。对于大多数地震群而言，这两种机制的证据在很大程度上是间接的，主要依赖于地震活动时空模式的推断。地震群在火山和热液发育地区尤为常见，如冰岛、西波希米亚和日本。美国黄石火山和周围的火山群是另一个值得注意的地区，在 1985 年、2008—2009 年和 2010 年成为主要的地震群发育地区，并且频繁出现小的地震群。尽管这里经历了长时间的喷发静止，黄石火山口和周围环境仍然具有很强的活动性，具有强烈的热液活动、地表变形和大型岩浆体下的地震活动。

为了研究 2017 年枫树溪地震群，作者增加了地震目录，以揭示地震活动详细的时空演化。为实现这一目标，他们利用连续地震数据以及犹他大学地震监测站的常规地震目录和相关的相位选择。然后进行了一系列分析，包括基于波形的地震检测，再定位和震级的估计。处理产生了共 3410 万个相关导出的微分时间，然后输入到 hypoDD 双差重定位算法以及从目录相位选择得到的 130 万个微分时间。总共有 15912 次地震通过反演保留了至少 50 P 和 50 S 相关观测值。为了确定新检测到的地震震级，遵循类似于 Shelly 等人描述的程序。对于模板震级 (template magnitude)，使用犹他州大学地震监测站报告的 coda 震级。研究人员测量了每个数据通道的模板和相应的检测波形之间的相对振幅 α 和相位，其相关值超过当天该通道的中值绝对偏差的 7 倍。与其他处理步骤一样，使用数据带通滤波 2~15 Hz 测量相对振幅。使用适合整个模板窗口的主成分 (P 为 2.5 s 或 S 为 4.0 s) 确定波形之间的最佳比例。该过程避免了峰值振幅测量中固有的不稳定性，并且主分量拟合保持了互易性 (即，如果模板和新检测到的事件被交换，则振幅比被简单地反转)。

根据经验确定 c 的适当值，以与在目录量值中观察到的比例一致。斜率约为 1.0，与 M_L 在这个震级范围内的预期相同，也就是说， M_c 和 M_L 都直接与地震矩的对数成比例，与力矩大小形成对比。由于约束事件振幅所需的数据少于事件位置，因此研究人员使用不太严格的标准来保留至少 15 P 和 30 S 的观测值，从而产生 30411 个事件的振幅目录。最后使用 3410 万个有符号的相关性测量来对整个网络中具有相似极性模式的事件进行分组，并根据 Shelly 等人描述的程序估计相关的震源机制。

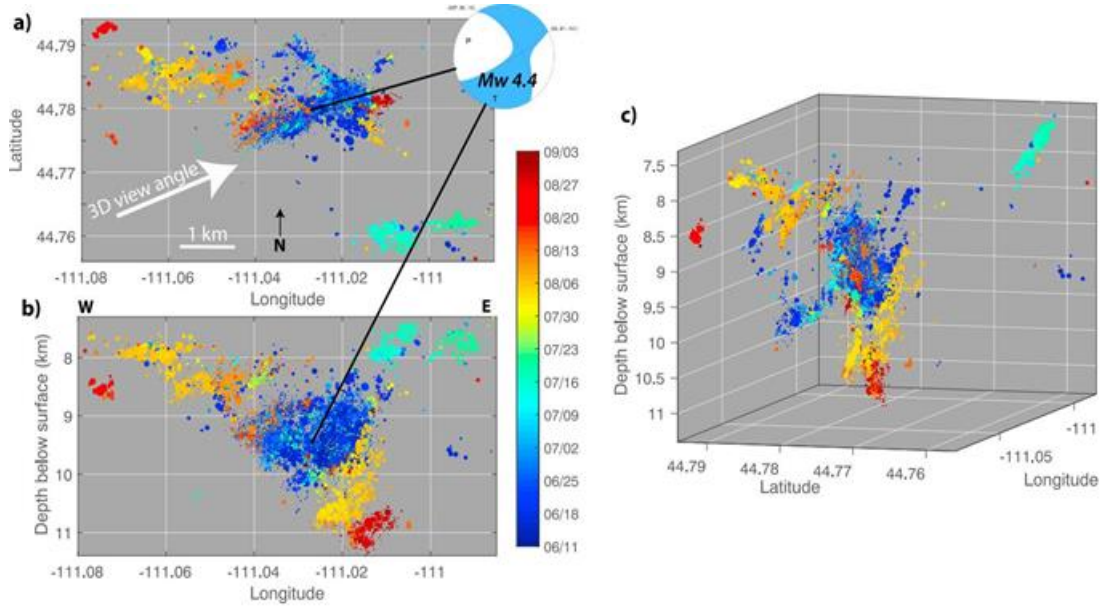


图 2 地震群随时间的演化

结果表明，基于相关的事件聚类和相关震源机制增强了这些双重断层方向之间的区别。图 2 显示了聚类事件的位置以及为每个聚类估计的相应机制，突出显示了八个数量最多的聚类。绝大多数事件属于这八大集群中的一个，而 81% 属于集群 1-3。集群 1、2、5 和 7 似乎反映了具有 ENE 走向的断层，具有右旋走滑和/或正断层特征。相比之下，集群 3、4 似乎向 NW 延伸，具有左旋走滑和/或正断层特征。地震群于 2017 年 6 月 12 日 16:46 开始，在前 10 s 内发生两次 $M_L 3$ 事件，深度接近平均表面高度之

下 10 km（平均表面在该区域海拔约 2 km 处）。在此次启动之后，在 6 月 16 日 $M_w4.4$ 的最大地震之前的这段时间，地震活动在空间范围内扩大，大多数较浅，并且朝向 ENE。在最大地震之后，地震活动率增加，激活了明显共轭的 NW 走向的断层以及主要的 ENE 走向的断层带。在接下来的几天和几周内，地震活动继续扩大，沿着主要的 ENE 走向的断层带横向移动，并在更深和更浅的地方激活了一个的复杂构造序列。值得注意的是，地震群在 8 月初重新活动，几乎同时激活了走向 WNW 的浅部（约 8 km）断层以及几乎直接位于主要地震群区域下方的较深活动。这种几乎同时激活的原因尚不清楚。较浅区域的 3.1 级地震事件可能触发了较深区域的活动，或者流体压力瞬变可能在短时间内同时影响了浅层和深层区域。尽管如此，不能排除随机巧合。在这一阶段，较浅区域的活动横向迁移回主要地震群区，显然在该过程中激活了一系列的雁列断层。相比之下，较深区域的活动向下迁移到 11 km 深处，远离主要区域。零星活动持续到 8 月底和 9 月初。总体而言，晚期地震活动主要在先前活动区域的边缘激活区。

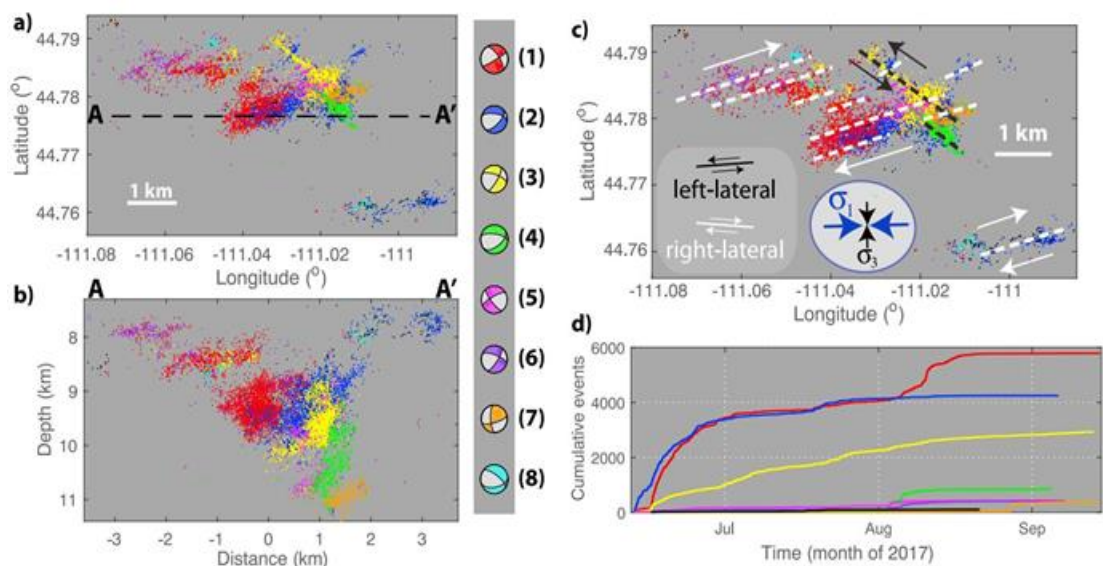


图 3 基于相关性的震源机制组及相应机制

断层复杂性似乎是流体诱发地震活动的一个反复出现的特征。这些地震群经常激活具有不同取向和震源机制的多个断层。在流体诱发地震群的情况下，复杂的断层可以通过具有复杂的渗透性结构的地壳流体的扩散来激活。复杂性也可能来自可以适应混合剪切-膨胀失效的断层网状结构。虽然地震群随着时间的推移表现出明显的迁移，但是时间扩散模式的简单平方根没有很好地描述扩展。地震群表现出向上和向下的迁移。对于流体驱动的地震群而言，向下迁移似乎违反直觉，但这与对流体压力的大幅变化的预期一致。在这个地震群中看到的深度约为 8~11 km，产生的压力差可能远大于局部压力梯度。由于不均匀和动态的渗透性，这些压差可导致局部向下的压力扩散。在此后检查的三个月后的活动事件发生在主要地震群区域附近，这种持续的活动可能反映了地震群区域内流体压力的持续升高。地震群发生在两个高地震活动通道的交汇点：一个从黄石火山口 NW 向延伸，另一个从酸溪穹隆（Sour Creek Dome）N 向延伸。这些区域可以描绘从破火山口输送流体的途径，其中富含水的流体可能从结晶的岩浆房中释放出来。如上所述，地震群的时空模式强烈暗示流体压力触发。

这些地震群可能在产生富集矿床方面发挥重要作用，也许是由于非平面断层上滑移空隙增加、压力突然下降导致突然蒸发。如果是这样，蒸发可能是推动持续地震群活动的重要过程。流体在黄石地区的地面变形和地震活动周期中可能起主要作用，实际上，之前的主要地震群伴随着从隆起到火山口沉降的过渡，这可以通过与火山口周边的与群体活动有关的渗透率增加和流体扩散增强来解释。然而，2017 年的地震群并没有明显影响变形模式。与 1985 年和 2010 年的地震群相比，距离火山口稍远一些，2017 地震群可能没有与火山口本身的流体系统建立直接的液压连接。2017 年地震群表面变形的缺乏在地震群的更广泛背景下并不是异常的，因此，地震活动和流体可能具有共生关系，地震活动性增加渗透性和流体压力，减少

有效的断层摩擦，促进地震活动，并相互促进。

来源：Shelly D R, Hardebeck J L. Illuminating faulting complexity of the 2017 Yellowstone Maple Creek earthquake swarm. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 2544– 2552.

用具幂律蠕变特征的快速地幔流动解释 2011 年 Tohoku 震后变形

大型俯冲带震后的变形瞬态被认为源于同震应力改变所加速的软流圈地幔中粘弹性流动与巨型逆冲断裂滑动的相互作用。结合实验室固态蠕变和摩擦实验可以成功地解释 2011 年 $M_w9.0$ Tohoku-Oki 地震之后最初几年表面变形的空间分布。由软流圈中的位错蠕变引起的有效粘度的瞬时降低解释了海底大地测量揭示的特殊逆行位移，而巨型逆冲断裂的滑动加速解释了破裂区域外陆地和海上的表面位移。研究结果表明，在软流圈中发生了快速的地幔流动，并且响应于大的同震应力，粘度暂时降低，可能是由于震后的幂律蠕变的激活。相关研究成果于 2019 年 3 月发表在 Nature Communications 上。

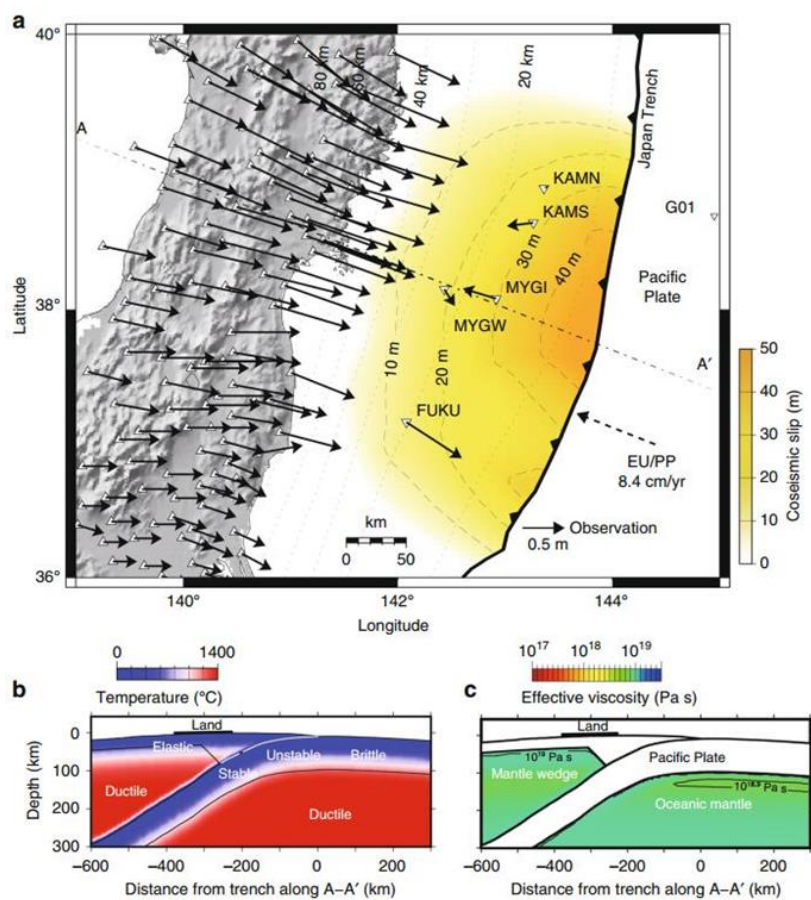


图 1 2011 年 Tohoku-Oki 地震之后 2.8 年的变形以及周围物质的性质

震后变形可以解释为缓解释放地震破裂所引起应力扰动的过程。它通常由连续变形引起，主要是巨型逆冲断裂的滑动和软流圈中的粘弹性释放。震后滑动通过围绕地震破裂的断层的局部化变形来释放应力扰动。粘弹性通过在周围地幔中弥散的韧性变形来释放同震应力变化。2011 年 $M_w9.0$ Tohoku-Okai 地震的震后变形被大量陆地和海洋中的仪器检测到。这种广泛的观察网络捕获了一个复杂的震后变形场。一些靠近海沟的海底基站向海洋方向移动，与长期观测到的俯冲方向相反，同时其他一些向陆地方向移动。震后垂直运动也很复杂，许多海底基站与陆地基站的移动方向相反。一些研究表明，粘弹性释放在很大程度上导致了这些情况的出现。

2011 年 $M_w9.0$ Tohoku-Okai 地震引起周围岩石圈巨大的应力扰动，加速了大洋软流圈和地幔楔的流动。在高温和高压条件下，可以通过橄榄岩的本构特性来描述震后的粘弹性释放。同样，震后滑移可能受到巨型逆冲断层摩擦特性的控制。实验研究表明，地幔岩石的塑性变形受到热量的影响，其应力-应变曲线遵循幂律关系。俯冲板块和上覆板块之间的摩擦由实验得出的动摩擦定律控制。结合实验得出的粘弹性流动和震后滑动本构特性成功地解释了 2012 年印度洋 $M_w8.6$ 地震后的变形。相比之下，大多数 Tohoku-Okai 地震的研究采用简化的流变模型，即在地幔和震后滑动中采用线性粘弹性流动，或在二维模型中采用更真实的岩石属性。这种方法的限制是难以处理几何复杂性和非线性控制方程的组合。从 Tohoku-Okai 地震推断的几个线性粘弹性模型包括沿上地幔的岩石圈-软流圈边界 (LAB) 的较薄的低粘度层。LAB 地震速度急剧下降是由于水或熔体的存在，这支持了低粘度层作为永久流变构造而存在的观点。

研究人员考虑了 2011 年 $M_w9.0$ Tohoku-Okai 地震后岩石圈-软流圈系统的三维响应，其中包括地幔中的幂律粘弹性流和巨型逆冲断层的震后滑动，并结合了日本大陆边缘的真实速度结构，地球的球度和实验室得出的非线

性岩石本构特性。研究人员假设上地幔的粘弹性流动受到稳态位错蠕变的影响，具有应力-应变率关系。此外，考虑到在地震后瞬变过程中发生的瞬态蠕变。研究人员使用包含位错蠕变的瞬态效应的模型，如：研究人员将位错蠕变与扩散蠕变结合起来，但后者在短期模拟中没有发挥重要作用。出于同样的原因没有包括扩散蠕变的瞬态效应。假设巨型逆冲断层的震后滑动受速率依赖性和状态依赖性的摩擦力支配，给出本构方程。目前，模拟具有真实弹性，摩擦力和粘弹性的三维非线性系统的动力学要求最先进的建模策略。根据这种方法，研究人员展示了由于同震应力导致的粘度暂时降低，以及软流圈快速流动引起的 **Tohoku** 震后变形。

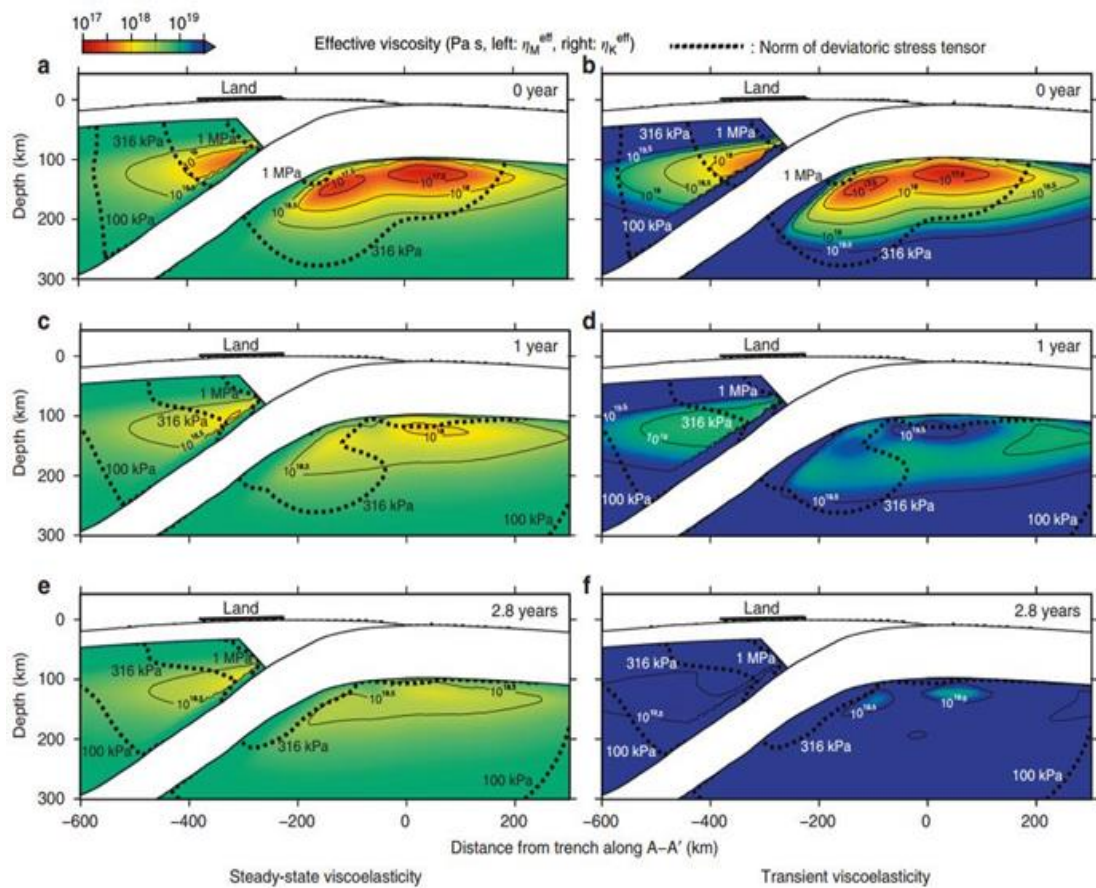


图 2 有效粘度的分布

累计 2.8 年的震后位移。方程式使用的温度曲线基于 **Tohoku** 地区的二

维模型。将背景缩短率变为 10^{-8}y^{-1} ，根据流变定律确定背景应力。设定模拟初始条件时，利用了 **Tohoku** 地区一个大地震模拟的同震滑移和断层本构性质。研究者将该地区划分为三块板块：一块包括北美和欧亚板块的大陆板块和两块大洋板块，即太平洋板块和菲律宾海板块。每个构造板块由靠近表面的弹性层（地壳和岩石圈地幔）和下面的粘弹性地幔层组成。三个板块中的弹性和粘弹性层具有相同的弹性。选择一定的岩石特性，模拟变形显示出与水平方向上震后 2.8 年累积位移的观测数据所类似的模式。为简单起见，假设海洋软流圈和地幔楔中的平均含水量相似，即使由于板块脱水导致地幔楔角的水浓度可能更大。活化能和活化体积所采用的值完全落在实验约束的不确定性中，这表明，具有适当原位条件的实验室得出的流变和摩擦模型使人们能够对岩石圈-软流圈系统如何响应大地震进行一阶预测。

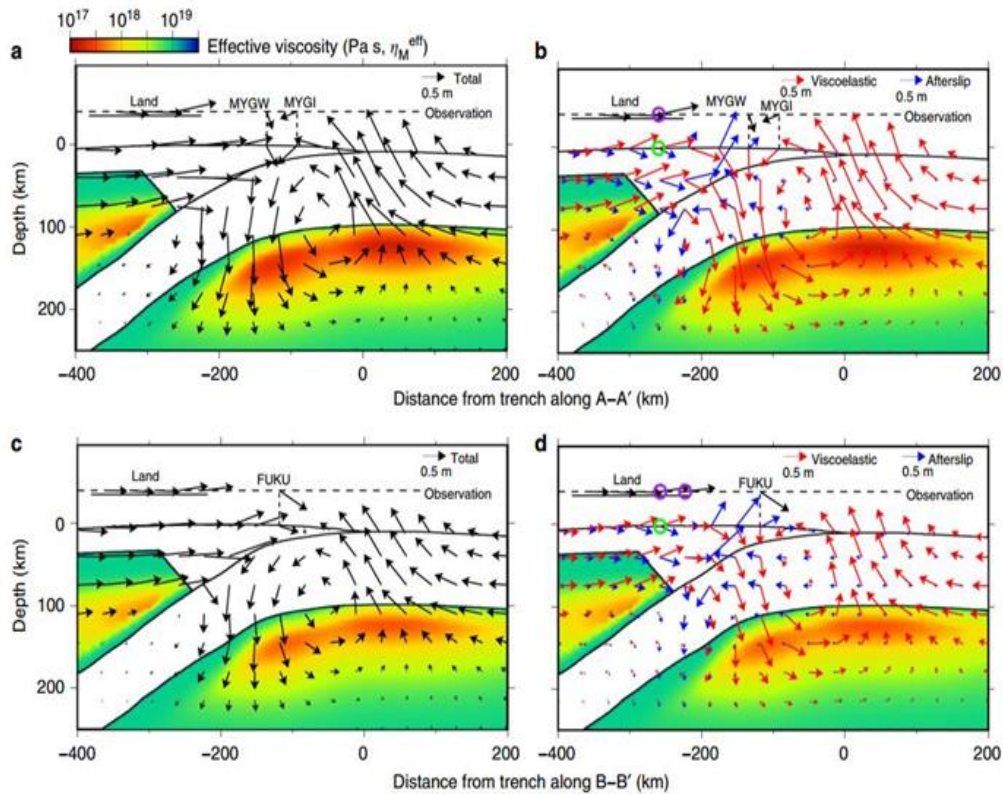


图 3 平行于板块汇聚方向垂向剖面的模拟结果

有效粘度和位移的时间序列。大地震后有效粘度的时空演化自然是由非线性本构关系引起的，并且在震后期间发生的快速复杂变形中起着重要作用。为了应对上地幔中的大应力扰动，地震后有效粘度不久在 100~200 km 深度的大洋地幔和 80~180 km 的地幔楔中大大降低。有效粘度的时间增加很好地解释了 MYGI 基站和从震中出发垂直于海沟排列的陆地基站的水平位移。

源机制和诱发变形分解。震后位移是由机械耦合的震后滑移和韧性流动引起的，这两种机制最初都是由同震应力变化驱动的，但它们随后便相互影响。尽管存在这种耦合，但变形的运动学可以唯一地归因于源机制。因为位移是滑移和粘性应变分布的线性函数，可利用这些关系来揭示俯冲带内的震后滑移和粘弹性流动的相对贡献。在海沟轴线下方的低粘度地幔物质流动推动了海沟周围的向西运动，解释了位于同震破裂上方的海底基站的持续位移。地幔楔的加速流动有助于陆地上 GPS 站的东移。巨型逆冲断层的震后滑移对于解释陆地上的变形，以及海底基站位移的空间分布模式是非常重要的。这两个基站都位于粘弹性流动产生很少水平位移的位置。

值得注意的是，从实验室数据和同震应力变化得到的有效粘度的空间分布类似于简化线性粘弹性模型的优化推断。震后不久，有效粘度在地幔楔和大洋地幔中最小约为 2×10^{17} Pa s。这相当于线性瞬态蠕变模型中的粘度，该模型适合早期阶段观察到的震后变形。最初被确定为低地震速度层的 LAB 也与永久性低粘度构造有关。然而，结果表明，LAB 具有快速的地幔流动，其粘度随着大的同震应力而暂时降低，而不是永久性的低粘度层。最近的一项实验研究表明，水的存在与低地震速度不相容。

尽管与远场的许多台站都非常吻合，但是近场数据仍然存在一些差异，可能是因为模型没有包括海上同震破裂的一些细节。例如，尽管在方位角方向上具有良好的一致性，但在 FUKU 站的模拟水平位移几乎是所测量的

水平位移的一半。在垂直于海沟的 MYGI 和 MYGW 基站中，虽然粘弹性流动在模拟中产生了隆起区域，但由于震后滑移而导致的下沉抵消了它。粘弹性流动中这种隆起的很大一部分是由于与震后滑移相关的应力变化。如果没有震后滑移和粘弹性流动之间的相互作用，一些陆地站计算的 2.8 年水平位移将减少 10% 以上，而陆地和海底的许多台站的垂直位移变化将超过 30%。由于近场中的震后滑移可能对同震破裂的细节高度敏感，这些残差可能由主震的尚未理解的滑动模式引起。然而，研究人员的结果突出了同震滑动、震后滑移和粘弹性流动之间的显著非线性相互作用。

研究表明，基于独立的地质和地球物理数据的板块边界流变模型可以对大地震后岩石圈的瞬态响应进行一阶预测。通过利用三维结构模型中的由实验得出的摩擦力和粘弹性流动定律，可以很好地解释大型俯冲带地震的复杂震后变形。模拟结果和数据之间的差异，特别是垂直运动和某些海底站的差异，原则上应该通过确定同震破裂的精细模型和原地条件来减少。该方法通常适用于其他大洋-陆地俯冲带，意味着对粘弹性和岩石摩擦的理解可能已经足够详细，进而可预测在震后和震间岩石圈的缓慢变形。

来源：Agata R, Barbot S D, Fujita K, et al. Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake. Nature communications, 2019, 10(1): 1385.

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