

地震科技前沿快报

2020 年第 6 期 (月刊 总第 18 期)

中国地震局科学技术委员会
中国地震局地震预测研究所

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、利用 2011 年东日本大地震断裂带生物标志物的热成熟度确定地震滑动面
 - 2、地震通过局部应力放大在下地壳成核
 - 3、卡斯卡迪亚幕式震颤与滑移的长期分析
-

利用 2011 年东日本大地震断裂带生物标志物的热成熟度

确定地震滑动面

俯冲带断层浅深度的极端滑移是地震引起海啸的主要原因。改善地震和海啸风险评估需要了解促成地震传播到海沟的物质和结构条件。研究者使用了新的生物标志物热成熟度指标来识别从日本海沟俯冲带中获得岩心的地震断层，日本海沟俯冲带在 2011 年 9.1 级东日本大地震中产生了 50 m 的浅层滑动。研究表明，多处断层曾引起位移 ≥ 10 m 的地震，并且每条断层都可能引发了许多大地震，这说明历史上发生过造成大的、浅层滑动的大地震。研究还发现，摩擦性质下的岩性对比并不一定能够确定

大的浅层滑移或地震灾害出现的可能性。相关成果发表在 2020 年 1 月的 Nature Communications 上。

在大的俯冲地震中，同震滑动会传播到海上，产生与地震有关的海啸等灾害。2011 年 3 月 11 日的 9.1 级东日本大地震即为此类事件。地震和随之而来的海啸在日本造成了严重破坏，夺走了 15 000 多人的生命，并导致福岛第一核电站的泄露。陆上海啸沉积表明，在日本海沟的这一部分至少发生了 3 次类似的海啸，周期约为 1000 年。满足浅层同震滑动的条件尚不十分清楚，但可能取决于诸如与海底的相互作用，断层带的摩擦特性和快速滑动过程中断层的动态弱化等。改善地震风险评估需要了解促使地震传播到海沟的条件。

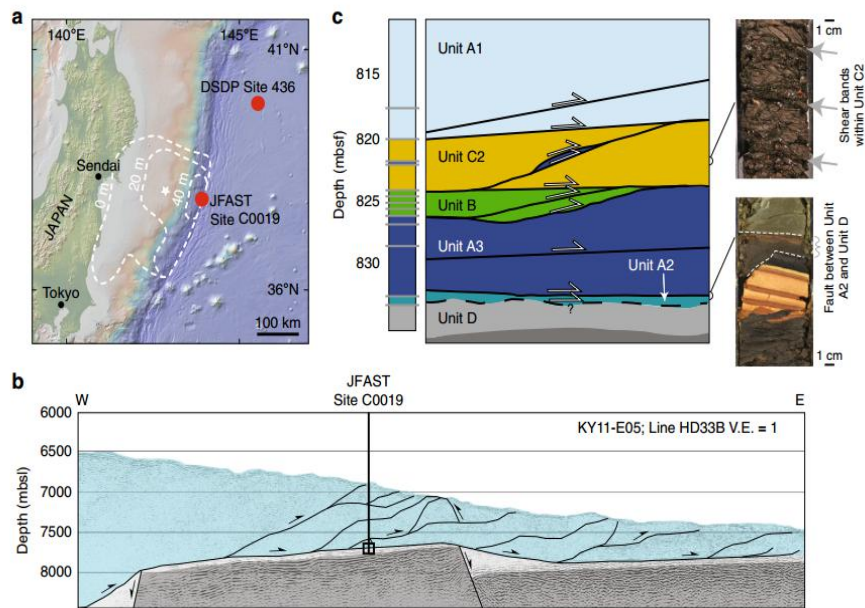


图 1 JFAST 岩心的位置和结构。a: JFAST 所在的日本海沟；
b: 垂直于在 JFAST 所复原海沟的增生棱柱的构造；c: JFAST 地层图。

国际大洋发现计划 (IODP) 375 航次，日本海沟快速钻探项目 JFAST 在东日本大地震发生最大滑动的海沟中钻探，以研究浅层地震滑动的物理控制因素。结构和地层特征表明，采出岩心中的地层由泥岩和大洋粘土组

成。从断层的一侧到另一侧，构造特征和沉积年龄也显著变化。基于这些观察，估计俯冲大洋板块 3.2 km 位移中的大部分（包括地震）都可被定位在该断层上。但是，还存在其他断层，它们构成了俯冲界面断层系统的一部分，仅凭结构性证据很难确定断层是否产生地震。

地震滑动的最可靠、最独立的指标是沿断层的温度升高，因为仅在快速滑动即地震发生时才出现明显的温度升高（ $>100^{\circ}\text{C}$ ）。JFAST 探险队安装了一个温度观测台，以监测东日本大地震期间由摩擦加热产生的热信号衰减。测得的温度异常表明，震源深度约为 820~822 mbsf。但是，在岩心底部 15 m（820~835 mbsf）内有几个间隔较近的断层，由于测得的温度异常的弥散性，Fulton 等（2013）无法约束哪个特定断层在地震中滑动，或者是否还有几处滑动且产生热量。

确定 JFAST 的断层是否经历了高温的另一种方法是在断层岩石中寻找证据。断层内部或附近相对于围岩的热变化提供了地震滑动的证据。这种方法为断层在地震滑动中达到的最高温度设定了界限。因此，热变化可以确定哪些断层曾引发地震。学者们通过各种方法研究了俯冲带中的同震温度升高，包括镜质体反射率、粘土蚀变和磁化率变化等。

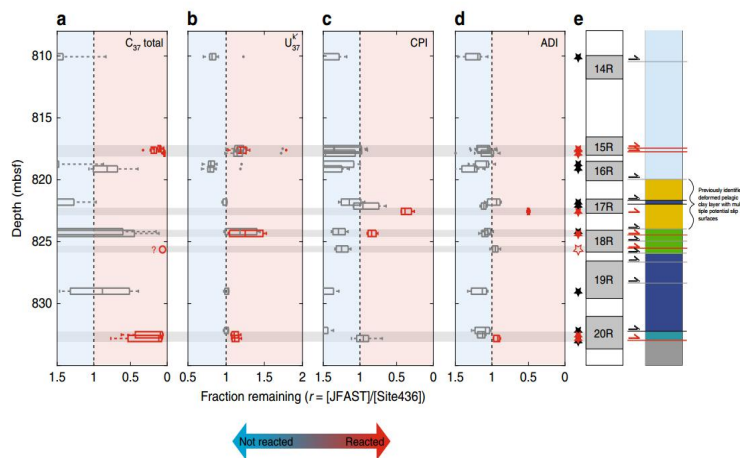


图 2 JFAST 岩心升温的生物标志物指标。(a)总体 C_{37} ;(b) $U_{37}^{k'}$;(c) CPI;(d)ADI 和(e)取样位置。

研究者分析了 JFAST 岩心内部及其周围断层周围有机物(分子生物标记物)的热成熟度。样本选自 JFAST 岩心的整个恢复深度(183~833 mbsf, 样本间距为 0.7~507 m),在岩心底部附近有更细的样本间距(817~833 mbsf, 样本间距为 0.12~1.6 m),使用来自颗石藻的长链不饱和酮(这里是烯烃)的热变化和源于植物的长链正烷烃分布来识别升温异常。为地震引起温度升高的过程使用动力学参数,以从反应程度推断地震滑动期间的升温情况。同时,分别从生物标志物分析、地震滑动的正演模拟、生物标志物反应动力学模拟、同震升温等方面展开研究,并将地震滑动产生和消散热量的模型与由实验室实验得出的生物标志物热成熟度参数反应动力学结合起来,以模拟不同地震条件对这些热成熟度参数的影响。在研究过程中,为了确定哪些断层可能是东日本大地震的根源,研究者使用从 JFAST 温度观测站推断出的剪应力(0.54 MPa)和滑动速度 1 m/s 对 50 m 滑动进行地震建模。为了了解可能产生观测异常的绝对最小地震规模,研究者对多个滑动相同的地震进行建模,直到地震数量总计达到板块边界总位移 3.2 km。

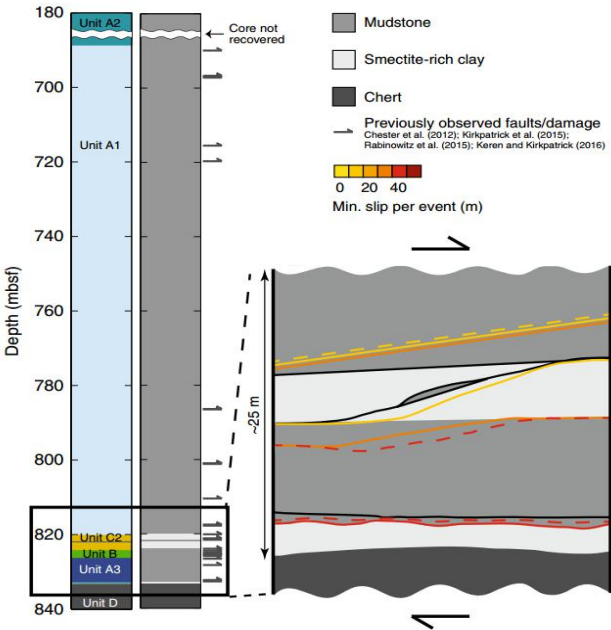


图3 JFAST 恢复结构的示意图

研究表明，所有已建模的生物标志物成熟度异常都是由大地震引起的，而不是许多小地震的累积。合理地假设剪切应力与东日本大地震相似，这些结果显示在日本海沟的浅层地区大地震是经常发生的。

研究者的分析表明，评估日本海沟发生浅层滑动的位置时，有哪些（如果有的话）断层参数起控制作用。尽管 JFAST 岩性之间的摩擦值有很大差异，但在 JFAST 岩心中，几乎所有恢复的主要岩性中都存在地震断层。快速滑动开始时，其强度的低峰值也被认为是传播浅层滑动的一种方式。日本海沟只有两种岩性的高速测试（可测量摩擦峰值）实验表明，大洋粘土（单元 C2）的强度峰值比泥岩（单元 A1）小。然而，研究结果表明，两种岩性都存在地震滑动，这说明峰值强度的差异可能无法控制日本海沟中浅层地震破裂的传播。

理论预测表明，滑移将在边界处发生。在日本海沟一个 15 m 厚断层的多个结构中发现了局部的地震滑动，断层本身位于富粘土沉积物与下伏硅质岩（可能还有玄武岩）的边界之上。这个边界是物质特性中最大的不连续点，可能是对板块界面出现位置的总体控制。同时，几何、物质特性和相互作用效应可能会决定在地震中哪个断层会在这个空间中滑动。在这种情况下，不应该单独考虑每个断层的强度。传播断裂的能量来自于被拉紧的断层周围的地壳，它比断层带要宽得多，而且多条断层可能在一次地震中发生滑动。断层之间的相互作用可以增强或延缓任何特定断层的浅层滑移。这可能意味着能量在系统级别上最小化，而不是在单个断层级别上最小化。

日本海沟的收敛速度约为 9 cm/yr，JFAST 岩心在岩石中钻孔取得，经历了约 3.2 km 的收敛，表明其变形约有 3.6 万年。研究者的生物标志物分

析独特地表明，大地震在俯冲带浅部的传播是反复发生的，这是建立在该地区三个古海啸证据基础上的，并暗示存在长期的地震风险。确定其他俯冲带断层岩石的热历史将需要新的断层带钻探来提供类似的古地震记录，这些记录对理解浅层海啸导致的地震滑动非常有用。

来源：Rabinowitz H S, Savage H M, Polissar P J, et al. Earthquake Slip Surfaces Identified by Biomarker Thermal Maturity Within the 2011 Tohoku-Oki Earthquake Fault Zone. Nature Communications, 2020, 11(1):1-9.

地震通过局部应力放大在下地壳成核

尽管深部陆内地震可能引发重大破坏，但人们对其却知之甚少。下地壳的强度至今仍然是一个富有争论的话题，在高温环境下，干的大陆下地壳的强度可能很大。如此强度可能使地震滑移在韧性域内高差应力环境下发生，但是这需要得到自然界的验证。研究人员分析了剥露的下地壳岩石的地震构造。在挪威北部罗弗敦（Lofoten）一个麻粒岩相的剪切带切穿一个斜长岩侵入体，并将其分割成了基本未变形只发生微破裂的块体。在这些块体内，假玄武玻璃出现在断层内。这些古地震断层很少超过 15 m，并且记录了数十厘米的单一滑动事件，滑移距离/断层长度的比值暗示 $>1\text{GPa}$ 的应力降。这些假玄武玻璃是持续的、局部的无震蠕变诱发的地震成核的直接地质证据。相关研究成果发表于 2020 年 3 月的 Nature Communication。

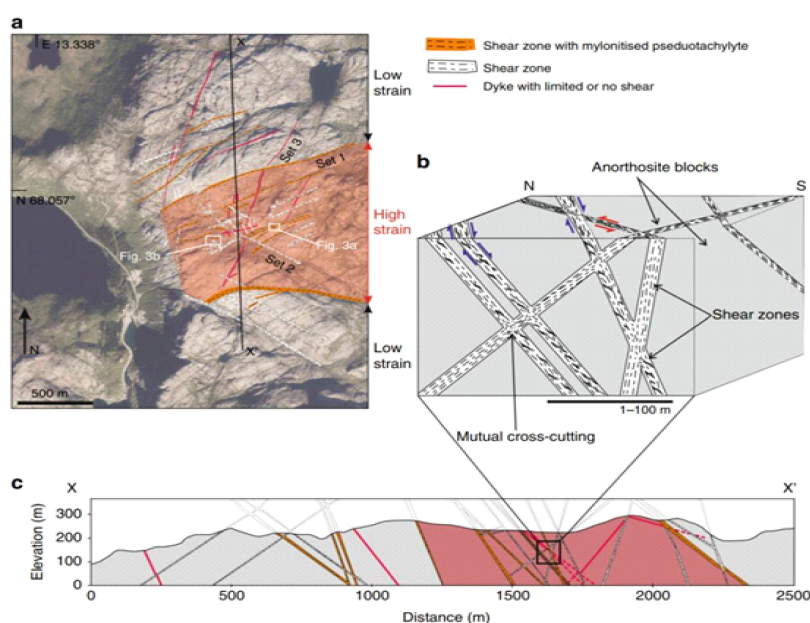


图 1 Nusfjord 地区的构造

由于地震主要发生在上地壳，所以地震机理的研究大多都集中在上地壳。然而，地震也发生在高岩石强度的下地壳。陆内地震倾向于沿断层发

生，并且引起了比板块边界地震更大的伤亡。因此，彻底地理解陆内地震周期是非常重要的，但这需要了解下地壳的力学行为以及地震潜力。下地壳的假玄武玻璃被认为是典型地震带下高岩石强度环境中地震破裂发生的直接证据。对下地壳的地震观察以及地质研究表明下地壳是干的，亚稳定的、高强度的、孕震的。

干的下地壳内的地震需要瞬间的高差应力和局部的弱化机制。对高差应力的一种解释是浅部地震带地震破裂向下传播。这些应力峰值导致高的震后应变速率以及主震破裂区域下方余震的聚集。上地壳成核的大陆地震向下传播到 20~25 km 的深度非常常见，但下地壳的地震成核机理依然争论颇多。目前，已提出的机制包括热失稳、液压致裂、局部的应力再分配、榴辉岩化反应等。这些机制都需要同变形的变质反应，然而，并不是所有发生地震的下地壳岩石都发生了变质反应。本研究中，研究人员提出了一种在干的、强的下地壳内并不需要变质反应或者浅部地震加载的地震成核机理。

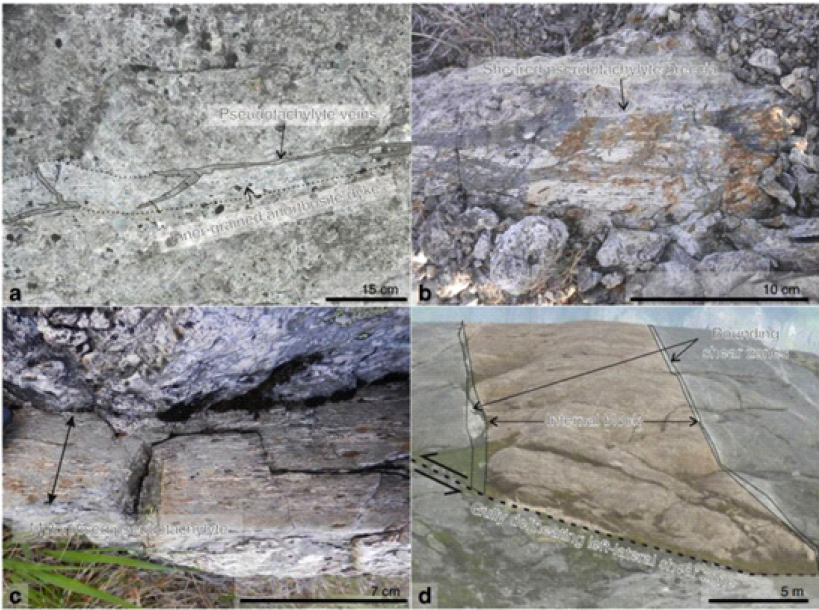


图2 在 Nusfjord 斜长岩内的剪切带和遭受剪切的假玄武玻璃

研究人员对挪威 Lofoten 地区一个具有高度局部化剪切带（记录了在下地壳环境发生的韧性变形）的剥露网络以及伴随出现的假玄武玻璃进行几何学、运动学、动力学观察研究，证实假玄武玻璃所代表的地震活动与韧性剪切带的变形是同时发生的，通过测量断层长度以及位移计算了这些地震活动的矩震级以及静态应力降。

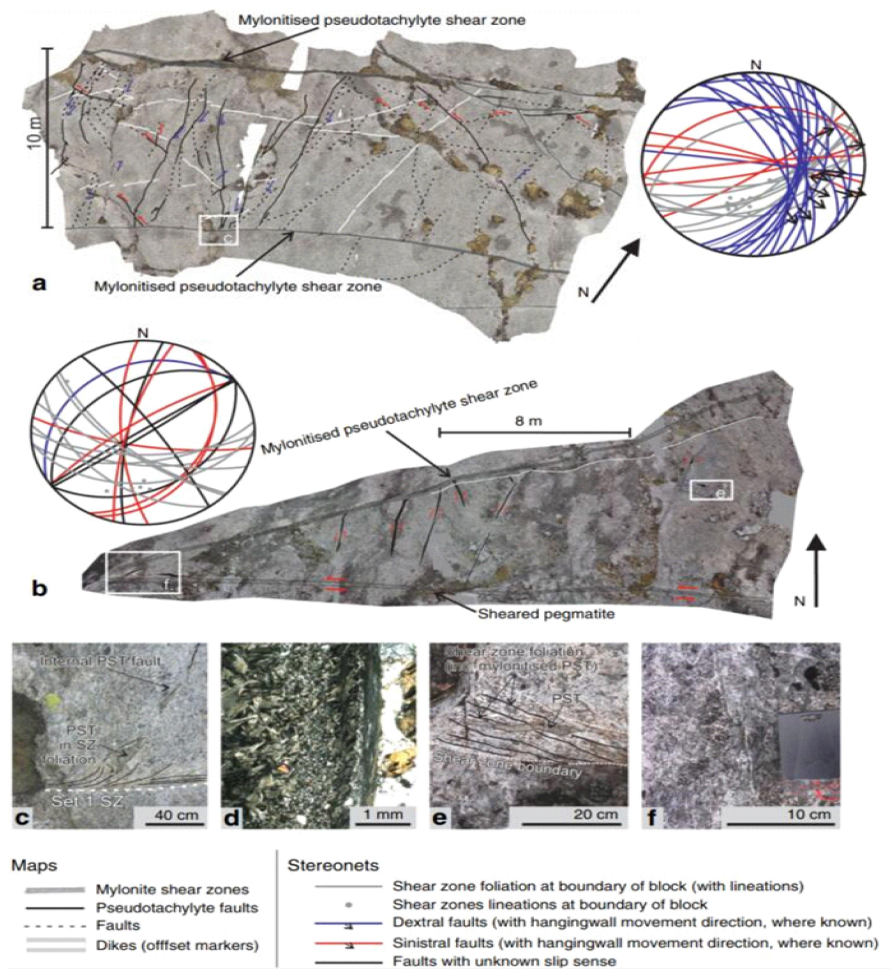


图 3 剪切带围限块体中的 Type2 型假玄武玻璃断层

Nusfjord 剪切带：该剪切带在 0.7~0.8 Ga 期间活动，变形温度约为 650~750℃，围岩主要为 1.7~1.9 Ga 的斜长岩。糜棱岩化的剪切带集中在厚约 1km、E-W 走向的高应变带内，它们可分为三组：1 组：面理产状 54°

$\angle 156^\circ$ 、线理产状 $48^\circ \angle 184^\circ$ ，大多含有糜棱岩化的假玄武玻璃，具有明显的斜滑位移；2组：走向 NW-SE，含很少量 type1 型的假玄武玻璃，具有左行走滑的特点；3组：主要为走向 N-S 到 NE-SW 的次级构造。剪切带主要沿着之前的岩脉以及含有 type1 型的假玄武玻璃发育，应变局部化主要是由于对颗粒粒径敏感的蠕变和含水量增加引起的。被剪切带所分割的斜长岩块体并没有表现出明显的韧性变形特征。

假玄武玻璃与剪切带：type1 型假玄武玻璃主要为发生糜棱岩化的假玄武玻璃。Type2 型的假玄武玻璃主要为未变形、未蚀变的、原始的假玄武玻璃，它们常沿着斜长岩块体内的小位移断层出现。

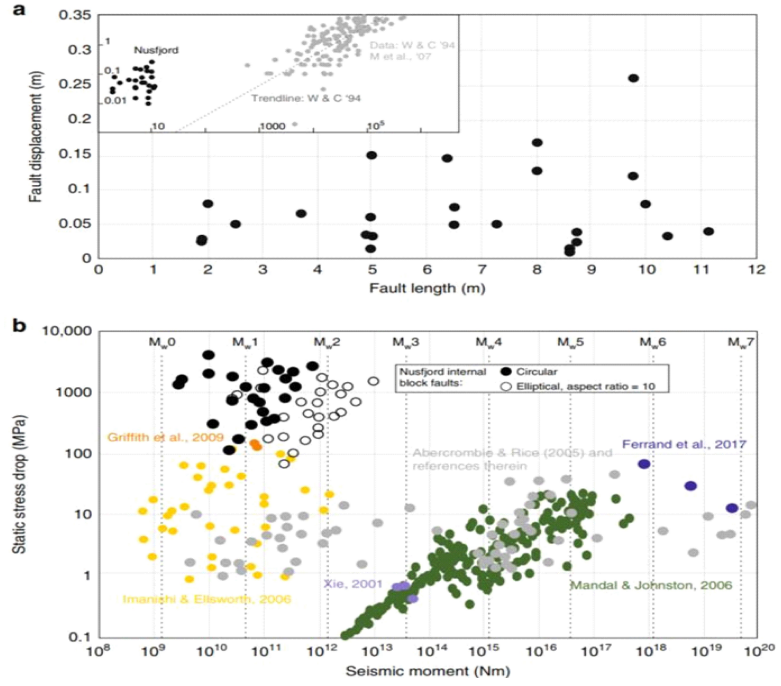


图 4 Type2 型假玄武玻璃的震源参数

地震成核于下地壳的证据：这些地震断裂被两侧完整的韧性剪切带所围限，并且靠近边界剪切带（bounding shear zones）的假玄武玻璃发生了韧性变形，说明地震破裂与韧性变形是同时发生的。利用斜长石-角闪石温

压计以及热力学模型证实边界剪切带发生在下地壳 650~750℃ 条件下，因此可以推测 type2 型的假玄武玻璃也形成在相同的条件下。所以，type2 型的假玄武玻璃代表了下地壳的地震活动。Type2 型的假玄武玻璃出现在剪切带相互截切的位置，表明地震滑移受控于剪切带的形态以及它们之间的相互作用。

震源参数：type2 型的假玄武玻璃记录的破裂长度多小于 15 m，单次位移多在 1~26 cm 之间，断层位移/断层长度比在 10^{-3} ~ 10^{-1} 之间，超过了千米级地震破裂的典型值 10^{-7} ~ 10^{-4} 。这可能说明，由于与边界断裂的相互作用，破裂永远停止。假设一个圆形的破裂区域，type2 型的假玄武玻璃记录了 0.2~1.8 的矩震级以及 0.1~4.2 GPa 的应力降，如果是一个长轴为断层测量长度十倍的椭圆形破裂区域，则矩震级为 0.8~2.6，应力降下限为 0.06~2.5 GPa。这一计算的最低应力降仍然比上地壳和陆内下地壳地震记录的应力降的值高，同时，也比其他一些含有假玄武玻璃断层计算的应力降的值要高，包括大陆下地壳和地幔地震。应力降的升高可能是由于破裂面积受限与块体大小。大的应力降说明完整的斜长岩发生剪切破裂可能需要 1GPa，这与斜长岩的实验研究以及斜长岩在下地壳高压环境下发生破裂并发生滑移所需的应力值相一致。高强度的斜长岩使得弹性应变能得以积累并最终发生地震破裂。

这些结果说明，干的下地壳内的地震成核可能是沿着剪切带的粘性蠕变与边界剪切带之间的块体应变不相容的结果。局部高应力是由于下地壳局部的韧性剪切带之间的相互作用，高粘度的块体由于周围弱的物质的流动加载产生了应力放大。沿着变形系统的应变不相容被强斜长岩块体内发育在应力放大位置的新断层成核通过瞬时地震破裂调节。在很长的时间尺

度，这种幕式的地震活动足以保证应变相容，最终促进持续的韧性变形。应力放大幅度的增加会随着块体与剪切带比例以及粘度差异的增加而增加。应力放大的空间各向异性可能受控于边界剪切带和内部块体的几何形态。

来源：Campbell L R, Menegon L. & Fagereng A. Earthquake Nucleation in the Lower Crust by Local Stress Amplification. *Nature Communication*, (2020), 1322.

<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15150-x>

卡斯卡迪亚幕式震颤与滑移的长期分析

在卡斯卡迪亚俯冲带，幕式震颤与滑移(ETS, Episodic Tremor and Slip)是一种公认的现象。精确限定 ETS 过程中滑移的大地测量位置对揭示滑移与震颤的关系、确定 ETS 滑移相对于强闭锁区的位置，以及反映 ETS 在整个滑移量估算中的作用具有重要意义。美国加州大学的研究人员提出一种新的研究方法，将卡斯卡迪亚的全球导航卫星系统的时间序列分解成 ETS 和 ETS 间(inter-ETS)两个部分，从而推导出每个点的长期平均 ETS 速度，然后将这些速度转换为板块界面上平均时间下的 ETS 滑移速率。结果发现，ETS 及其在滑移量估算中的作用沿走向是多变且分段的。这一反演代表了迄今为止从大地测量数据得到的 ETS 区域的最高分辨率图像。同时，滑移与震颤位置有很好的相关性，并探测到可能存在的次级上倾 ETS 区域。相关成果发表在 2020 年 2 月的 *Geophysical Research Letters* 上。

美国西海岸外的卡斯卡迪亚俯冲带，系胡安·德富卡板块在北美板块下的分支。缓慢滑移事件指的是地质断层在几天到几年的时间里缓慢滑动，释放的能量相当于一次大地震，但没有强烈的震动，这类事件自 2001 年以来一直被发现存在于卡斯卡迪亚俯冲板块的深俯冲界面。人们发现，一种被称为震颤的低振幅地震信号伴随着这些慢地震——即幕式震颤与滑移(ETS 事件)。最大的 ETS 事件以 8~22 个月的半规则间隔发生，在不同的地点观测到不同的间隔周期。随着连续运行的地球物理全球导航卫星系统(GNSS)站的大量安装，以及地球透镜板块边界观测(PBO)计划的启动，使得对个别的 ETS 事件进行详细的研究成为可能。目前，在整个卡斯卡迪亚有超过十年的连续 GNSS 数据，部分站点有超过 20 年的数据。此外，可在线获得太平洋西北地震网(PNSN)从 2009 年或 2012 年开始

的连续地震目录。利用这些数据可以研究 ETS 事件在一个十年周期尺度上的累积效应，特别是，使得研究卡斯卡迪亚俯冲带 ETS 事件在调节在板块会聚过程中所起的作用成为可能。

该研究将卡斯卡迪亚地区独立的经过处理的每日 GNSS 时间序列组合在一起。初始处理步骤从每日位置时间序列中删除异常值和偏移量，移除由于天线改变和附近地震造成的偏移。与天线和其他设备变化相关的偏移时间由中央华盛顿大学太平洋西北大地测量阵列网和内华达州-雷诺数据库 (UNR) 处理过的 GNSS 时间序列文件信息确定。对于地震偏移，额外从美国地质调查局的地震目录中获取了研究区内或区外 $M > 6.0$ 的所有地震目录，对于目录中的每次地震，求解并移除半径为 $10^4/15\ 000\text{ km}$ 范围内的所有台站的偏移量。在不需要了解区域应变场物理性质的前提下，假设在 GNSS 站的 ETS 运动与附近地区的震颤在时间上是相关的，并确定与每个 GNSS 站点相关的 ETS 周期和 ETS 间周期。经过上面描述的初始处理后，使用一个震颤目录识别每个站点的 ETS 信号的时间。

根据特定的标准将每个台站时间节点分为属于 ETS 周期或 ETS 间周期。如果在一个站点指定半径(R_T)内的修正过的太平洋西北地震网(PNSN)目录中发现一个连续天数最少 (ETS_L) 的最小地震探测数 (T_{min})，将这些天数归类为这个特定站的 ETS 周期，其他的天数被划分为 ETS 间周期。ETS 周期不仅包括持续数周的大型 ETS 事件，还包括持续时间短至 4 天的小型震颤事件。在先前的研究中，这些小的事件有时被称为 ETS 间震颤。然后，从每个时间序列中删除 ETS 周期的数据，只留下 ETS 间周期的数据。利用最小二乘方程 (1) 调整 ETS 间周期，其中包括估算一个 ETS 间速度 (v)，年度振幅和半年度季节性信号——建模为正弦和余弦 (A, B, C ,

D), ETS 时的偏移量 (ΔX_M)。

$$X_{(t)} = X_0 + vt + A\sin(2\pi t) + B\cos(2\pi t) + C\sin(4\pi t) + D\cos(4\pi t) + \sum_{M=1}^N \Delta X_M H(t - t_M)$$

其中, N 为该站的 ETS 周期总数, $H(t - t_M)$ 为海维赛德阶跃函数。然后, 使用最小二乘法来反演长期平均 ETS (LTA-ETS) 速度在板块界面之上的滑移速率。由此产生的滑移速率估计值应被视为 ETS 滑移速率的时间平均估计值, 该估计值不适用于单个 ETS 事件, 但可直接与板块收敛速率相比较, 以确定 ETS 在俯冲带总体滑移量中的作用。

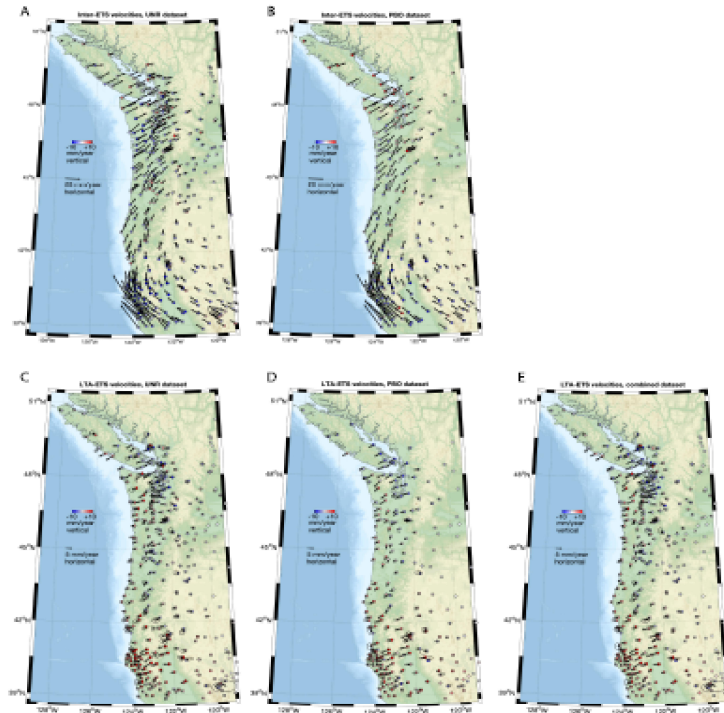


图 1 UNR 和 PBO 数据集中 ETS 间速度 (a 和 b) 和 LTA-ETS 速度 (c 和 d), 以及 LTA-ETS 速度场整合 (e)

图 1 显示了 UNR 和 PBO 数据集的 ETS 间隔和 LTA-ETS 速度分离结果, 以及合并的 LTA-ETS 速度场。所有速度场在台站之间都表现出显著的区域一致性。在 PBO 和 UNR 数据集之间, LTA-ETS 速度场基本一致。在卡斯卡迪亚北部和中部地区, 可以看到 LTA-ETS 垂直速度的标记从内

陆到海岸的隆起。图 2 显示了 LTA-ETS 速度的反演结果，所示的不确定度只包括站点几何和 LTA-ETS 速度产生的不确定性。研究发现，ETS 滑移与震颤在时间上是一致的，震颤和滑移在空间上也是相关的，但仅在约 200 km 范围内，难以明显观测到 ETS 滑移和震颤之间的空间相关性。沿走向来看，ETS 在俯冲带总滑移量中的作用变化较大。在三个地方，约 N42.5°、N46°和 N49.8°监测到俯冲板块，几乎没有监测到在震颤带的 ETS 滑移。但是，在检测阈值以下的区域可能存在 ETS 滑移。中心部位，在 N42.5°和 N46°，ETS 滑移调节了约 0%~70%的板块收敛速率，同时伴随强烈的分带。

研究以震颤为指导，在估算 ETS 滑移的累积作用时，将较小的 ETS 事件包括在内。ETS 的最高滑移速率出现在 ETS 区域的最南端，在那里 ETS 可调节大约 35~40 mm/yr 的滑移，比前人预测的板块收敛速度要快得多。前人利用欧拉极导出的收敛速率，不能解释胡安·德富卡板块中戈尔达板块的内部强烈变形。戈尔达板块经历复杂的内部变形，主要是南北向的缩短和东西向的伸展。这种内部变形可能导致在海沟处的板块收敛速率比预期的要快。在研究期间，ETS 滑移速率可能超过这个地区板块收敛速率，说明在地震周期的其他时间中 ETS 滑移速率更低，但是，ETS 滑移速率似乎更可能代表板块收敛率的下限。

在长期闭锁模型中，ETS 区域处于全蠕滑区，那么 ETS 区域内的长期平均滑移速率必须等于多个 ETS 周期内的板块平均收敛速率。因此，在卡斯卡迪亚俯冲带中，当 ETS 滑移速率小于板块收敛速率时，ETS 事件间的界面必须以低于板块速率的速度蠕变。因此，ETS 事件可视为蠕变加速事件。

与前人研究结果相比，ETS 主震区内的滑移并没有显著地从震颤区延伸上倾（图 2a）。虽然发现来自于 ETS 区的上倾滑移板片，但却与 ETS 区不相连。这些近海板片的峰值 LTA-ETS 滑移速率处于不确定性水平（图 2b），可能是不精确的弹性参数、板块界面模型或其他不确定性所致。也有可能代表了对一个连续上倾滑移带的不完整检测。为了用本研究中的方法进行探测，这一上倾滑移带必须至少在某些时间与主要的 ETS 区同时滑移。这意味着在上倾滑移带和主 ETS 带之间存在某种力学联系，可能涉及到连接这两个区域的高渗透、连接良好的流体通道中的流体压力变化。

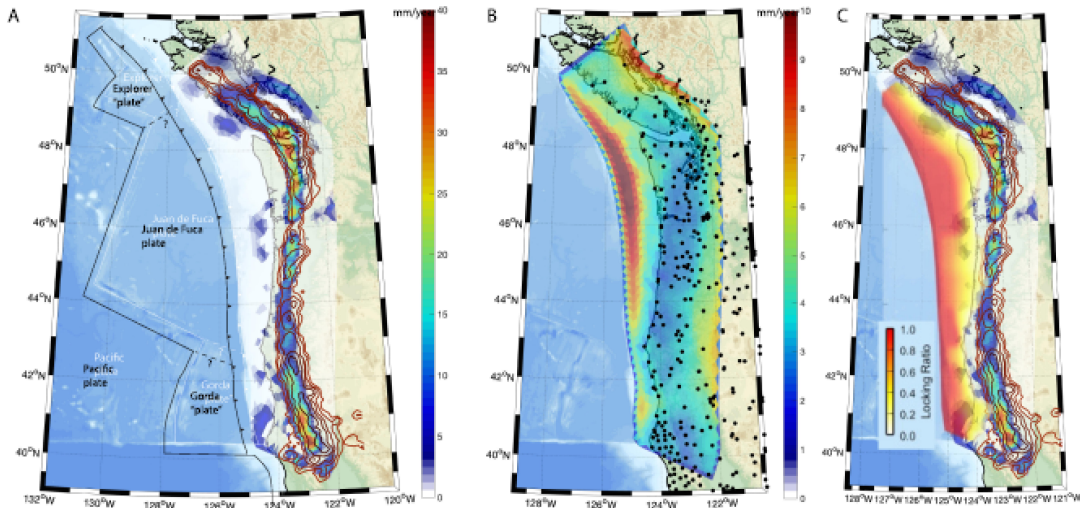


图 2 PBO 和 UNR 数据集中 ETS 速度场的反演结果

该项研究中，每个模型都检测到了近海板片，说明这些板片的检测对于 GNSS 处理中心、平滑及弹性特性的变化是稳健的，可能是预期中板块界面闭锁相与蠕变相过渡的缓慢滑移。这些潜在的浅层板片的存在及其性质值得利用海底大地测量技术做进一步研究。ETS 滑移集中在地震区的上倾边缘，意味着浅层震颤相对于深层震颤而言，与更慢的滑移更为相关。也可能是，在接近震颤下倾极限的站点分离 ETS 和 ETS 间速度时存在困

难。还有可能是，自身特征决定的滑移位置和地震决定的震颤位置之间存在系统性偏差。

来源：Bartlow N M. A Long-Term View of Episodic Tremor and Slip in Cascadia. *Geophysical Research Letters*, (2020), 47, e2019GL085303.

<https://doi.org/10.1029/2019GL085303>

主 送： 中国地震局领导