

# 地震科技前沿快报

2020 年第 11 期（月刊总第 23 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、研究地震前兆的新机遇
- 2、流体粘度对地震成核的影响
- 3、科学家发现地球深部水循环引发火山和地震的确凿证据

## 研究地震前兆的新机遇

地震预测的话题由来已久，失败的尝试比比皆是。部分挑战在于，可能的前兆信号通常是在事件发生后才报告的，而潜在的前兆和主要事件之间的系统关系（如果存在的话）并不清楚。最近的几项研究表明，在大型俯冲带地震发生前几周至几个月，通过地面变形、地震和重力瞬变有可能检测地震前兆和慢滑现象。整个国际地震研究界都应参与部署仪器、实时分享数据、改进物理模型，以了解慢滑事件和震群在多大程度上增强了之后发生更大地震的可能性（或没有）。

在 2019 年 5 月加州伯克利举行的地震学和地球动力学委员会会议上，专家们讨论了这些明显的地震和大地测量前兆，以及下一步如何分析其对地震灾害评估的影响。例如，从 2011 年东日本 Mw9 级大地震的前 23 天

开始，日本海沟大地震前震序列中发生了慢滑，并最终在主震前两天引发了 Mw7.3 级地震。同样，前震和地震滑移至少在 2014 年智利伊基克(Iquique) Mw8.1 级主震前两周就开始了。2011 年东日本大地震前的前震和地壳运动也可能与卫星测量的主震前的重力梯度变化有关，但这些结果的意义仍有争议。虽然许多震群和慢滑事件的发生并没有预示着大地震的发生（有些持续数年），但过去十年的新情况是，在两次 Mw>8 级大地震之前，地震和大地测量前兆都被联合观测到了。

经确认和可重复的前兆信号将产生重大的社会影响，但问题依然存在。类似的前兆信号发生的频率有多高，在哪些板块构造环境下发生？它们之后发生较大的地震的概率有多大？前兆是否有某些特征使它们可能或多或少地导致更大的地震？人类需要在陆上、近海、地表、地下或太空中使用哪些仪器来最好地记录前兆事件？如何改进地震预报，以纳入从改进的地震目录和从大地测量的瞬变中获得的新知识？是否存在一些情况，可由前兆信号形成时间尺度和概率水平上的预报，从而有助于拯救生命和减少地震的经济影响？如何清晰、及时地传达从可能的前兆推断出的有关潜在灾害的信息？

为了解决这些问题，显然需要更多的观测。需要在陆上和近海的一系列地点部署长期的地震仪和大地测量网，从而观测一系列的断层滑移行为。对于俯冲带逆冲断层发震带上方的海底大地测量，需要在水平和垂直方向上进行连续测量和厘米级或更高精度的测量。目前，越来越多的技术可用于此，如 GPS-声学方法、海底绝对压力计、声学测距、井眼仪，以及光纤应变仪等。对于陆上观测，在许多仪器条件较差的俯冲带，需要密集连续记录仪器网络，而跨政治边界的数据共享对于实现长波长前兆信号的探测至关重要。几十年来，实验室实验已经发现了前兆，但了解这些信号如

何扩展到自然系统一直是一个挑战。为了弥合实验室和自然地震之间的差距，研究人员正在瑞士阿尔卑斯山进行实地实验，以更好地了解地震的启动、断层破裂和人类活动诱发的地震，并建议在北美开展类似研究。

随着新的观测结果的出现，迫切需要能够吸收这些观测数据的综合物理模型，以理想地对地震灾害进行实时评估。目前，无法满足的一个具体需求是迅速将新观测到的现象纳入物理模型中，进而修改先前对地震灾害的估计。2016年新西兰凯库拉(Kaikōura)地震后，在惠灵顿(Wellington)附近断层的高应力部分观察到逆冲断层的缓慢滑动。这导致新西兰政府紧急要求将触发的地震滑动事件纳入及时和准确的预报中。在凯库拉地震发生后的12个月内，新西兰中部发生7.8级或更大地震的可能性增加了一倍多(达到5%左右)。为了更好地为未来的前兆选择做好准备，科学界应在地震预报中记录处理慢滑事件和其他可能前兆的最佳做法，并应加强努力，用基于物理模型的方法补充灾害的统计评估。为了评估预报中的不确定性，量化分析专家判断不确定参数的系统过程(称为专家启发)是这些工作的一个重要组成部分(但不是唯一的)，同时也提供了一种方法来整合和评估各种模型和预报的结果。在此类事件发生之前，帮助科学家接触专家启发的研究实践将有助于简化预报工作，但当民防部门在短时间内(例如24—48小时)需要信息时，专家启发可能具有挑战性。然而，有一些严格的方法允许快速启发，并且，如果提前制定了协议，则可以快速实现。

目前，一个活跃的研究领域集中于以下问题：前兆是否具有某些特征，使其或多或少地导致大地震发生。2011年东日本大地震的前兆是否异常到需要公开发表警告声明(仅就前震的规模和时空演变而言)，专家们曾为此进行了激烈辩论，这一问题在2009年意大利拉奎拉地震案例的分析中也较早地得到了重视。作为一个理论分析练习，可以利用现有知识，重新

审视 2011 年东日本大地震（以及其他前兆）之前的事件表，以评估不同利益相关者应该采取哪些行动。

鉴于人类对地震前兆的理解不断加深，很明显，大多数震群和/或慢滑事件不会产生大的破坏性地震，但有些会（破坏性地震的大小阈值取决于建筑物的位置和脆弱性）。根据 2016 年孟买海滩（Bombay Beach）地震群（靠近加州圣安德烈斯断层最南端），以及 2016 年凯库拉地震和慢滑事件，可以明显地发现，科学家将继续被民防部门或政府当局要求计算与地震和大地测量前兆相关的、不断增加的地震概率。一些地方已经在利用地震数据和可操作性地震预报（OEF）对余震进行计算。

在任何地震骚乱事件发生之前，有关地震的公众沟通需要政府负责人进行规划、教育和培训。从长期的灾害意识教育，到事件前的不同水平的警报、地震预警，再到对事件应急反应的指导，以及进一步的教育（尤其是在人们兴趣高涨时），任何新的事件前的危险警报（可能在事件发生前的几天、几小时和几分钟内）都应该是连续不断的信息的一部分。

很显然，短期地震预测（提供准确的时间、位置和震级）的前景仍然不乐观。然而，新的机会仍然存在，比如，可以改善陆上和海上的地震观测和大地测量、利用各种天基观测系统、通过机器学习改进数据分析，以及利用基于断层载荷的先进物理模型对地震概率进行实时评估和更新等。美国在空间和时间尺度上研究俯冲带的计划（即俯冲带四维研究计划，SZ4D）突显了许多这种机遇。例如，用于电信的光纤为与陆上和海上灾害评估相关的地球物理观测提供了诱人的新方向；最近对地震发生前地震活动率和震级-频率统计变化的分析提供了一种潜在的手段，可用于确定发生大地震后出现震群的可能性。机器学习能够在两次大逆冲事件之前检测到板块边界带的长达数月的滑移反向（slip reversal），这不仅提供了一个新的

信号，而且还为探索长波长变化的物理机制提供了动力。在某种程度上，为公众提供前震前兆通知已经通过一些政府机构的可操作性地震预报和在线服务发生了，但还有更多的工作要做，包括快速报告和整合大地观测发现的瞬变。

对俯冲带的地震与大地观测资料进行综合，并开发基于物理学的模型，以将其与预报联系起来，将是一项国际挑战。不用等待几个世纪后，大地震在某个特定地点再次发生，现在，人们可以使用遍历法来理解地震前兆，在全世界范围内对地震进行统计抽样，而不是等待一个具有统计代表性的样本在一个地区随着时间的推移而积累起来。此外，降低探测阈值也可能有帮助，因为可能有更多更小的事件可能有前兆，因此将可能增加研究的样本量，但是，必须注意要考虑小地震和大地震之间的标度。国际协调可以减轻在陆地（要求的观测密度高）和近海（目前美国的观测密度相当低）进行观测的成本，**SZ4D** 和 **USGS** 在俯冲带的计划可能是这项国际努力的重要组成部分。最后，大多数国家都有自己的机构，负责审查和进行预报，并决定如何以及何时向公众通报地震概率的变化。同样，国际研究团体应共同努力，实时分享数据，交流经验教训，以改进基于潜在前兆现象的预报。所有这些，其目标是为预测下一次地震（震群和慢滑事件耦合的结果）所需的快速反应做好准备。

来源：Matthew E P, Richard M A, Thorsten W B, et al. New Opportunities to Study Earthquake Precursors. *Seismological Research Letters*, 2020, 91 (5): 2444–2447.

## 流体粘度对地震成核的影响

研究人员进行了专门的实验来研究流体粘度对地震成核的影响。在有效正应力为 30 和 50 Mpa、流体粘度为 1~1226 mPa·s 的条件下进行了摩擦滑移实验，并使用速度-状态摩擦定律对其进行了模拟。在存在流体的情况下，状态变量定义为流体流动的能力。结果表明，静态摩擦随着粘度的增加而略有降低，动态摩擦由无量纲的索末菲数（S）控制。此外，还表明 a-b 随着粘度的增加而降低，直至 a-b<0，这可能促进了不稳定的滑移和地震成核。相关研究成果于 2020 年 6 月发表在 *Geophysical research letters*。

在过去的 30 年中，与废水处理，储气或地热开采相关的人为地震的增加已经成为一个重要的科学和社会问题。在远离活动构造边缘的稳定大陆地区，地震活动率增加了。对此的主要解释是：在先存断层附近进行长期的流体注入可以通过改变储层的体积和应力来改变断层的应力场条件，或者减小作用在断层上的有效正应力，并引起断层活化。在这种情况下，流体超压不再是控制断层活化和相关地震活动性的唯一参数。注入过程以及流体的热和物理性质也是了解断层活化的关键参数。此外，在地质工程实践中，注入流体的粘度在四个数量级上变化，从液态水的 0.001 Pa·s 到废水处理的 0.1 Pa·s，以及压裂液的 10 Pa·s。

流体注入可能涉及长期低压注入，以最大程度地减少相关的地震活动。在这种情况下，粘性流体可能有时间在断层表面的整个破裂区域中扩散和流动。此外，最近的实验研究表明，流体粘度控制着震源参数，包括应力降、弱化距离、弱化速率和地震能量。

为了模拟这些地震的力学行为，通常使用各向同性的莫尔-库仑理论（Mohr-Coulomb）来处理引发破裂的条件，其中临界切应力  $\tau_{crit}$  由  $\tau = \mu(\sigma_n - Pf)$  给出。另一方面，断层活化过程中的滑移行为，即断层的地震潜

力常用速度-状态摩擦定律模拟，从而提供了对滑移行为的综合分析。在该框架中，断层的摩擦响应随先前的加载历史而变化，并且取决于瞬时滑动速率  $V$  和状态变量  $\theta$ 。速度-状态摩擦理论表明，增加孔隙流体压力和降低注入速率有利于稳态滑动。但是，粘度如何影响速度-状态摩擦参数的演变，以及断层本身的稳定性目前尚不清楚。

研究人员在不同的有效正应力下进行了摩擦滑动实验。在干燥和低-高粘度流体饱和条件下进行了测试。此外，还根据速度-状态摩擦参数检查了在这些条件下断层的稳定性。

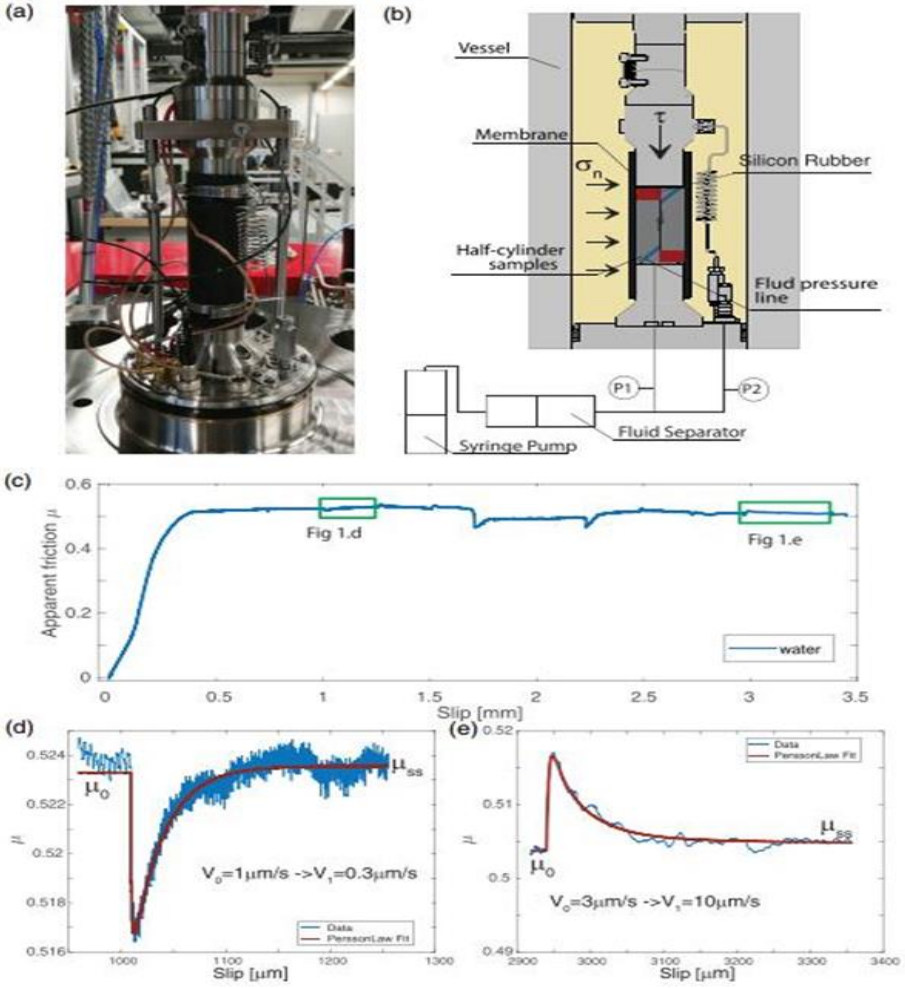


图 1 a, b: 实验装置; c: 50MPa、水饱和条件下表观摩擦的演化;  
d, e: 不同滑动速度下摩擦的演化

在实验开始时，以  $1 \mu\text{m/s}$  的滑移速率加载样品，作用于断层的切应力会增加，直到克服静摩擦并开始滑移为止。接着，这些断层表现出不同的滑移行为，这与截留在断层表面的流体有关。在室内湿度和水存在、有效正应力分别为 30 和 50 MPa 的条件下进行的实验中，观察到滑移硬化 (slip hardening) 行为。实际上，在 30 MPa 的有效围压下，在室内湿度条件下，表观摩擦已从静态值 0.481 增加到 0.531。在水的存在下，静摩擦系数从 0.451 增加到 0.540。在 50 MPa 的有效围压下，在室内湿度条和有水的条件下，滑移行为具有恒定的表观摩擦系数。相反，在存在更多粘性流体的情况下，显示出滑移弱化行为。例如，对于 glyc85 (甘油含量为 85%，含水量为 15%，以下类推)，表观摩擦在 30 MPa 时从静态值 0.409 降至 0.371，在 50 MPa 时从 0.408 降至 0.155。对于 glyc99，表观摩擦在 30 MPa 时从静态值 0.385 降至 0.108，在 50 MPa 时从 0.412 降至 0.213。

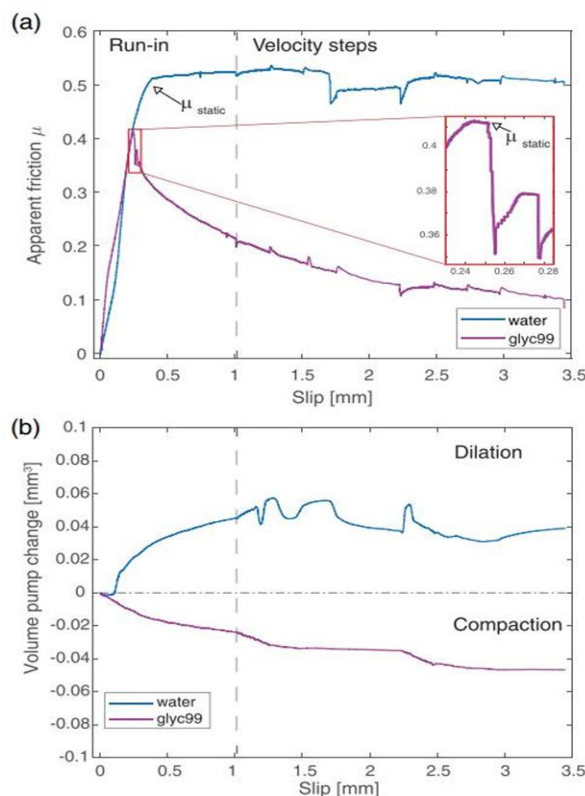


图 2 不同粘度流体的试验曲线



研究表明，随着索末菲数（S）的增加， $\mu_{ss}$ （每一速度阶跃的稳态摩擦系数）发生衰减：在边界润滑状态下，在 0.4~0.6 之间；混合润滑状态下，在 0.1~0.3 之间。重要的是，在 50 MPa 下进行的实验以及  $\eta \geq 10.8$  mPa s 的流体在加载初始阶段表现出粘滑特性。此外，为了更好地了解粘度对断层稳定性和地震成核的影响，研究人员在边界速度-状态定律下对样品在速度阶跃下的摩擦响应进行了模拟。边界润滑状态和混合润滑状态之间的界限设置为  $S < 10^{-3}$ 。

对于在 30 MPa 有效正应力下进行的实验，a-b 值介于 0.001~0.009 之间，即在室内湿度条件下进行的实验为速度强化行为；在断层水饱和条件下进行的实验在 0.003~0.009（指 a-b 值，下同）之间；在 glyc60 条件下进行的实验在 0.001~0.004 之间；在 glyc85 条件下进行的实验在 0.003~0.0049 之间。对于在 50 MPa 有效正应力下进行的实验，a-b 值在 -0.003 至 -0.004 之间，即在室内湿度条件下为速度弱化行为；在断层水饱和条件下进行的实验分别为 0 和 -0.006；在 glyc60 条件下进行的实验为 -0.001 和 0.004；在 glyc85 条件下进行的实验为 -0.001 和 0.002；在 glyc99 条件下进行的实验约为 -0.001。

剪切过程中流体体积演变显示出两种相反的行为，这与流体成分有关。用水进行的实验表明了总体的膨胀趋势，而用水与甘油或纯甘油的混合物进行的实验表明总体上是收缩的。实验过程中使用流体体积变化（ $\Delta V$ ）的演变来估算流体层厚度（ $\Delta H$ ）的变化，假设流体体积变化仅发生在断层平面上（最大可能值  $\Delta H$ ）：

$$\Delta H = \Delta V / (2r^* L_{tot})$$

与之前在室内湿度条件，在水存在和粘性更高的流体情况下进行的研究一致， $\mu_{static}$ （静态摩擦）与有效正应力无关，并且随着流体粘度的增

加而略有降低，表明高粘性流体仅对断层岩石的摩擦强度产生边际影响。

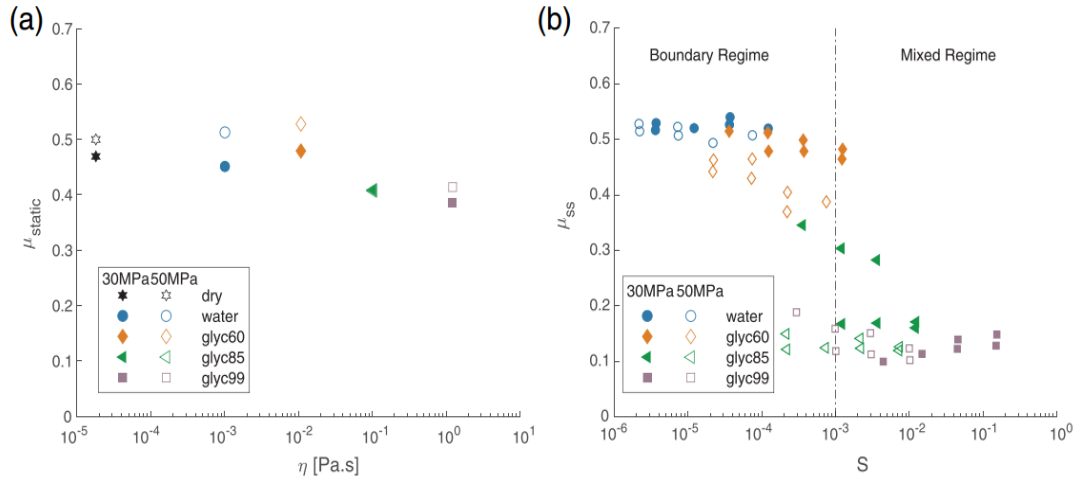


图 3 静态和稳态摩擦系数

相反，表观摩擦系数随滑移而表现出系统性衰减，具体取决于流体粘度。尤其是，随着  $S$  的增加，每个速度阶跃的稳态摩擦系数  $\mu_{ss}$  减小。这种行为可以用 Cornelio (2019) 详述的弹性流体力学理论来描述。但是，这里的数据是高度分散的，因为  $\mu_{ss}$  既受流体存在的润滑作用的影响，又受速度阶跃的控制。

在边界润滑条件下，速度-状态定律的直接影响参数  $a$  与流体粘度无关，演化影响参数  $b$  随着粘度增加，并且临界距离  $dc$  随粘度没有明显的变化。因此，对于较大的粘度值，速度-状态定律的  $a-b$  值减小。特别是，对于最高粘度 ( $\eta = 1,226 \text{ mPa s}$ )，观察到  $a-b$  向负值过渡。负值表示不稳定的滑移行为和潜在的地震成核作用。研究人员指出，流体水饱和实验是利用滑移演化相关定律和佩尔森 (Persson) 状态演化定律建模的，仅显示出很小的差异 ( $10^{-4}$ )。此外，流体粘度的增加可降低随后的断层的水力扩散率 ( $\alpha_{hy} = k/(\beta\eta)$ )，其中  $k$  为材料的渗透率， $\beta$  为存储容量。

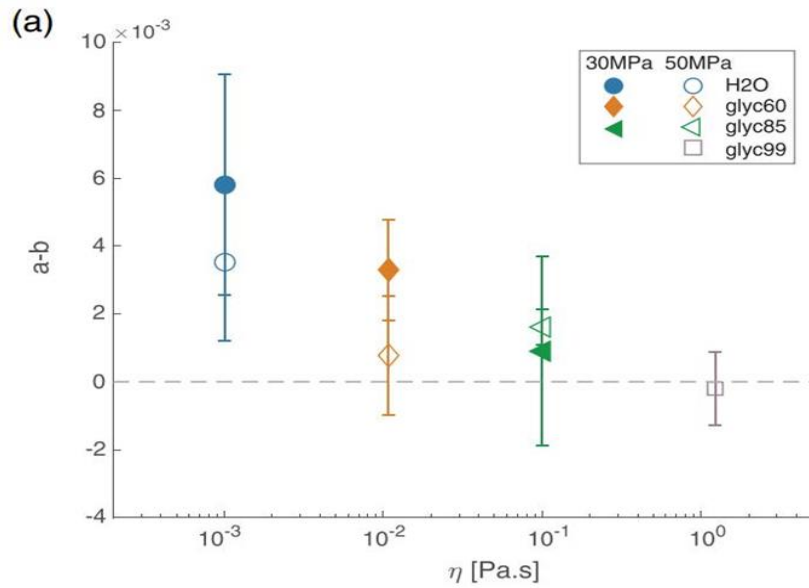


图 4 流体粘度和速率与状态参数 (a-b) 平均值之间的关系

此外，作用于实验断层的有效正应力的增加促使  $a-b$  值在 50MPa 时降为负，这与理论模型和先前对裸露表面和断层泥的实验研究相一致，并且不受流体条件的影响。这两者的滑移行为都归因于断层平面的临界刚度  $K_c$  的增加。确实，结合弹性位错理论，速度-状态公式表明，如果弹性介质的刚度  $K$  小于临界断层刚度  $K_c$ ，则可能出现摩擦不稳定。参数  $K_c$  由有效正应力和断层的速度-状态本构参数 ( $a, b$  和  $dc$ ) 定义： $K_c = ((b-a)(\sigma_n - Pf)) / dc$ ，其中  $dc$  是临界滑移距离， $(b-a)$  是摩擦速率参数。

最后，剪切过程中流体体积的演变表明，对于用水进行的实验，剪切力主要表现为膨胀。该结果与 Beeler 和 Tullis (1997) 的结果一致，并且可以解释为克服粗糙表面所必需的断层平面的垂直运动。但是，当水和甘油或纯甘油的混合物被截留在滑移表面上时，该实验仅显示出一般的压实行为。剪切增强的压实归因于滑动过程中流体层变薄，这在高粘度下非常有效。

来源：Cornelio C. & Violay M. Effect of Fluid Viscosity on Earthquake Nucleation. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47, doi/10.1029/2020GL087854.

## 科学家发现地球深部水循环引发火山和地震的确凿证据

2020年6月，Nature 文章称，一个国际研究小组发现了第一个确凿证据，直接将地球深部的水循环与岩浆的产生和地震活动联系起来。

在地球深部循环的水和其他挥发物（如  $\text{CO}_2$ ）在地球的演化过程中发挥着关键作用，如大陆的形成、生命的开始、矿产资源的聚集以及火山和地震的发生等。俯冲带是深部水循环中最重要部分——大量的水主要通过火山喷发而流入和流出。然而，有多少水、其如何通过俯冲活动进行运移，这对自然灾害和自然资源形成有何影响，在历史上一直知之甚少。

当板块从最初在大洋中脊形成的地方到达俯冲带时，海水通过裂缝、断层和与矿物结合的方式进入岩石中。一旦到达俯冲带，下沉板块就会升温，挤压作用导致其部分或全部的水被逐渐释放出来。当水被释放时，会降低周围岩石的熔点并产生岩浆。这种岩浆是有浮力的，其向上移动，最终导致火山喷发。同时，这一过程也会引发地震，并可能影响地震震级，以及引发海啸。

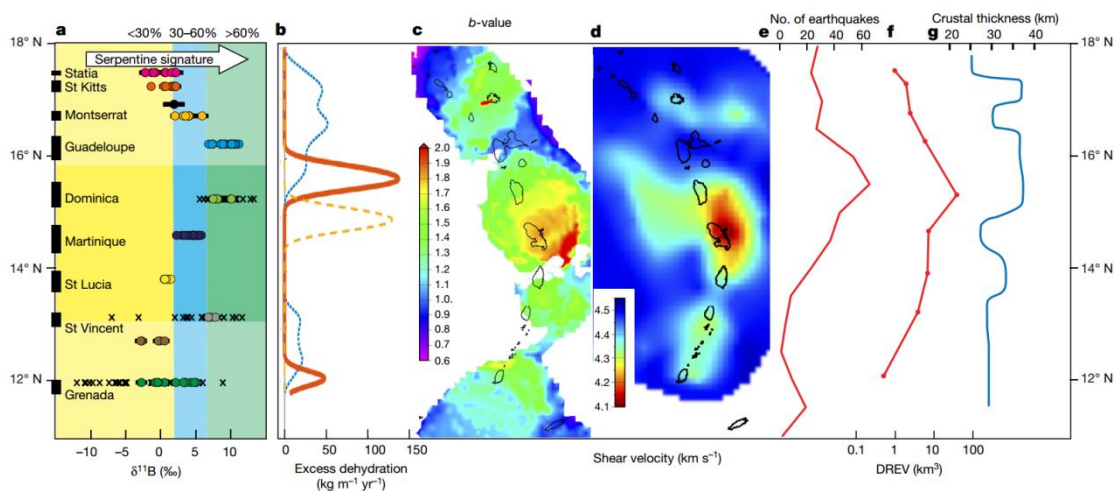


图1 小安的列斯火山弧的地球物理和地球化学概况

目前，大多数相关研究都集中于太平洋火环上的俯冲带。但是，这项研究的重点是大西洋板块，更具体地说，是位于加勒比海东部边缘的小安的列斯火山弧。来自英国布里斯托大学、杜伦大学、巴黎地球物理研究院（IPGP）等机构的多名地球物理学家、地球化学家和地球动力学学家参与了该项研究。他们收集了两次海洋科学调查的数据、临时部署的地震台站所记录的岛下地震，进行了实地地质调查、岩石样品的化学和矿物分析，以及数值模拟。

为了追踪俯冲带长度方向上水的作用及影响，科学家们重点研究了熔融包裹体中硼的成分和同位素。结果显示，下沉板块中富含水的矿物蛇纹石是小安的列斯火山弧中部地区的主要供水者。综合地球化学和地球物理数据的进一步分析清晰地表明，下沉板块的结构和水量与火山演化及其相关危害直接相关。

下沉板块最湿润的部分有大裂缝或断裂带，通过建立岛屿下方断裂带俯冲历史的数值模型，研究人员发现，小地震发生率最高的区域和低剪切波速区（说明存在流体）有直接联系。同时，富水断裂带的俯冲历史也可以解释为什么在地质历史上，它们产生了最多的岩浆。

总体上，该研究表明，在俯冲板块上发现含水断层结构，有助于了解火山和地震灾害的模式。虽然已经发现水的变化与较小地震的分布有关，但研究者又提出了新的问题：这种水的释放模式如何影响潜在的、更大的地震和可能发生的海啸，并起到预警系统的作用。

来源：New research reveals how water in the deep Earth triggers earthquakes and tsunamis

<https://www.bristol.ac.uk/news/2020/june/water-cycle-volcanoes.html>

Variable water input controls evolution of the Lesser Antilles volcanic arc

<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2407-5>

---

主送：中国地震局领导