

# 地震科技前沿快报

2021 年第 2 期（月刊总第 26 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、迷途中的地震预测：急需解决的课题
- 2、巨型俯冲地震最大震级的控制因素
- 3、深度学习发现滑坡发生前的微弱地震信号

## 迷途中的地震预测：急需解决的课题

### 1. 成为重大转折点的报告书

1976 年学界提出东海地震问题，国家甚至专门制定了相关法律(大规模地震对策特别措施法=大震法)，目标是在东海大地震发生之前发布地震预警。之后，我渐渐明白了准确地震预报的极端困难性。现在，以捕捉“高地震危险性”为目标的南海海沟地震临时信息收集组织的结构大幅度改变了。由于新机构的机制越来越复杂，地方自治团体和居民都感到困惑。另一方面，在这段时间里，民间无科学根据的预报预测开始猖獗，给人一种地震预测预报持续迷失方向的印象。为什么会变成这样呢？

笔者一直在追踪《每日新闻》记者和大学教师在相关方面的一系列动向,能够理解中央防灾会议、南海海沟巨大地震对策研究委员会于 2013 年

5月发表的“南海海沟大规模地震预测的可能性调查小组(南海海沟调查小组)”总结报告成为重大转折点这一事情。这份报告给出如下结论：“南海海沟大地震地震震级和发生时间的预测均具有不确定性,根据捕捉所有的临震前兆来对地震的发生进行预测的方法可知,对地震发生时间等要素进行高准确度预测,通常是很困难的。”迄今为止,以预报为目标的只有东海地震,包括东海地震在内的地震预报都是困难的。这是专家首次得出这一结论。

但报告书也有如下论述：“若观测到慢滑移的逐步扩大,板块间耦合状态跟平时相比发生变化等现象,这种时候,虽然不确定,但可以得出发生地震的危险性正在变高的结论。”其中,“危险性”一词后来被“可能性”所取代。“高地震危险性”是报告书中关于真正的地震预测预报仅剩的论述。不能就此得出地震预测终结的结论,但能感觉到地震预测的复杂性。

## 2.南海海沟“高地震可能性”的3个例子

即使不是预警宣言,政府若发布任何形式的“高地震可能性”的信息,海啸等危险地区的人们都存在逃往安全的地方、以减轻地震损失的可能性。进一步说来,虽然不是对东海地震预测的全盘否定,制定大震法对政府应该是件好事。难以置信!“高地震可能性”这种论述,是追求地震预测梦想为己任的内阁府(负责防灾)、气象厅等部门在逃避责任。这样的想法在笔者的脑海里闪过。

于是,“高地震可能性”在此后的讨论具有重要的意义。从最初的白皮书的提出,到一系列报告书的受理。政府在2019年3月,制定了“应对南海海沟地震多种发生形态的防灾指南(第1版)”,取代大震法,制定了南海地震发生的可能性增大时,地方自治团体、企业和居民应如何防灾,为定点以及地区今后的防灾讨论提供参考。



图1 南海海沟大地震的预测震源区(摘自“现在询问地震预报”(化学同人))

作为防灾应对措施的一个案例,指南讲述了如下三种情况:①半破裂情况:南海海沟假想震源域内发生大规模地震(M8级),剩下领域内大地震发生的可能性加大。②部分破裂情况:与大规模的地震相比,一次小地震(M7级)发生后,可能会发生更大的M8级地震。③慢滑移情况:倾斜仪观测到超过基准的倾斜变化,板块边界观测到大的滑动,史无前例的事例在学术上备受关注,在社会上也引起人们的关心。

半破裂情况是气象厅针对南海海沟地震发表的临震信息(巨大地震警戒),部分破裂情况和慢滑移情况本身就是临震信息(注意巨大地震)。半破裂情况下,海啸危险性高的地区被认定为“事前避难对象地区”,号召该地居民进行1周左右的避难。部分破碎情况下,防灾应对基本方针是,部分沿岸地区的居民开始实施避难等措施1周。慢滑移情况下,居民在一定期间内,要进行地震再次确认等应对措施。

南海海沟调查小组的报告中,“高地震危险性”只给出了慢滑移的情况。之后,尚无半破裂情况和部分破裂情况讨论的加入。慢滑移情况代替半破裂情况成为主角,占据了指南中叙述的大部分。

### 3. 疑问众多的半破裂情况

假想震源区的东侧(或西侧)发生 M8 级的巨大地震，这就是半破裂情况，伴随好几个问题。首先，这是地震预报的失败，但这仅仅是表面上的问题。若一个南海海沟地震已经发生，太平洋一侧全域都发出了大海啸或者海啸警报，各地都有严重受灾的报告，余震也频繁发生，整个日本一片混乱。在这种时候发布“剩下的一半也很危险”的临震信息(警戒)有意义吗？

而且，气象厅发出临震信息的时间最短也是在第一次地震发生后 2 小时。专家们在南海海沟地震评价讨论会上的讨论、等待临震信息的地方自治团体等启动防灾应对，均需要时间，但存在距离下一次大规模地震的时间差太小的可能性，因此 2 小时的时间延迟，会导致海啸危险地区居民避难的推迟，从而可能造成致命的后果。这是半破裂情况下“高地震危险性”中包含的弊端吧。考虑到半破裂情况随时可能发展成 M9 的南海大地震，气象局也应该视作具体的业务来应对。那样的话，问题就不大了。

部分破碎情况是导致日本大震灾的东北地方太平洋海域地震(9.0 米)的 2 天前发生了里氏 7.3 级地震的教训。本来，南海海沟假想震源区内 M7 级地震一旦发生，其与南海海沟大地震的关系将引起极大的关注，但不一定有这样的地震前兆。慢滑移情况是气象厅捕捉地震前兆现象的机会，也是东海地震宣布停止警戒的缘由。本来“高地震危险性”的主角，慢滑移的扩大和加速即使被观测到，大地震前兆滑移的评价也很难明明白白地得出，从而变成了配角，进而得出“地震预报通常很困难”的结论。静冈县等地方自治团体期待着通过缓慢的滑移来获得对防灾有用的信息，可谓是吃了哑巴吃黄连，有苦说不出。

### 4. 举步维艰的地方自治团体的防灾应对

2019年5月,国家中央防灾会议(首相任会长)制定了防灾应对检讨基本准则,修改了南海海沟地震防灾推进计划的基本方针。南海海沟地震发生时,灾害应急对策的基本方针从“初动体制的确立”项目,修改为“南海海沟假想震源区内发生了里氏8.0级以上的地震时,内阁总理大臣立即召开内阁会议,设置紧急灾害对策总部”等记载,指定行政机关或都道府县等地方自治团体制定推进计划的基本地震防灾对策事项中,添加了新的“基于时间差等灵活的确保避难的相关事项”。市町村推进计划中,事先疏散对象地区需要圈出的同时,应对后发地震的一定期间内避难生活的避难所,避难路径,避难实施负责人等在内的应对海啸灾害特性的避难计划也需要明示。

推进基本计划中包含了详细的准则细节,但却给地方自治团体的工作带来了困难。南海海沟地震引起的海啸灾害程度被深刻地预想,被指定为海啸避难对策特别加强地区的14府县139市,被要求于2020年3月为止,指定事前避难对象地区,重新制定推进计划,但直至4月,还有6成避难区域尚未指定(朝日新闻2020年4月27日早间新闻)。新避难所的新型冠状病毒对策问题也浮出水面。另一方面,这些地方自治团体为了灾后的城镇建设,有必要事先制定“复兴事前准备”的体制和程序等。但据了解,截至2019年末,尚有8成未制定(每日新闻2020年4月10日早间新闻)。

### 5.村井等人猖獗的民间预测

从基于临震预测的警戒宣言,到捕捉“高地震危险性”的临时信息,应对这一变化的人手和没有经验的地方自治团体都绞尽脑汁,应对南海海沟地震冲击的体制也不健全,是地震预测走进迷途的一个侧面。这个变化的间隙,被地震危险性任意加减的、蹩脚的民间地震预测所填充。依据推特等媒介发布的地震预测,如“1周以内M地将发生地震”、“哪里哪里很危险”等信息满天飞,而且很多人以“点赞”或“评论”的方式做出反应。

“研究地震的学生”也有以英雄的姿态发表地震预测的例子。

民间预测的代表应该是东京大学名誉教授村井俊治，由他担任会长的有限责任公司——地震科学探测机构(JESEA)拥有收费会员约 5 万人。该公司成立于 2013 年 1 月，当年 9 月开始正式进行地震预测，这与南海海沟调查总部发表“地震预测通常很困难”报告书出台的时间(同年 5 月)相吻合。测量工程专业出身的村井先生根据国土地理院的电子基准点数据，通过定位卫星来预测地震。其数据会因各种噪音(天气和周边树木的影响)而变动，他将噪声的影响看成实际的地壳变动，列举出“地震危险区”，最近他对地震的 AI 预测和地震云也很着迷。

当然不符合事实,但《邮报》周刊、富士晚刊,富士电视台等部分媒体纷纷为村井的预测助威,“命中率 85%”等描述也报道出来,让很多人上当。另一方面,正规大报、NHK 电视台等由于不了解村井预测的可信度,没有进行报道。日本地震学会和气象厅视而不见,被恶意利用数据的国土地理院也不闻不问。村井长期担任会长的日本测量协会将他的地震预测演讲会作为 CPD(技术人员继续教育)认证项目。NTT Docomo、Maurukou 等机构也在侧面支持村井。

我觉得该做点什么来解决村井的问题了。我提出申请,参加 2020 年 2 月读卖电视台的综艺节目“说到这里委员会 NP”(关东地区没有播出),希望以地震预测为主题进行讨论,并作为嘉宾出场。笔者的主要任务是讲述民间的棕平广吉先生看到榆树预测地震的把戏在 1976 年被识破的故事。和棕平广吉相比,我认为利用东京大学名誉教授头衔的、现在的村井先生更为恶劣。录音中我发表了上述观点,但是正式播放中,上述部分被删减了,赞扬他的媒体的名字也没有出现。“明明说了那么多”,虽然感到很遗憾,但电视台方面大概是不想引起风波吧!切身感受到了横亘在村井告发案上

的“厚墙”。



照片1 “说到这里委员会NP”的一个场面(中央为笔者)



照片2 报道椋平榆树的1976年9月26日《毎日新闻》早间新闻

## 6.彻底的“地震无法预测”论

因地震不可预测论而闻名的东京大学名誉教授罗伯特·盖勒是该节目的准常规嘉宾，当天也出席了该节目。我们国家把南海海沟地震在今后30年内的发生概率定为70—80%，他对此持否定态度，认为完全没有意义，批评从事预测预报的专家是“御用学者”。笔者反驳说“御用学者还是不要做了吧”，电视台方面则是打出“激烈!盖勒 vs 横山”的字幕。笔者认为，村井先生、盖勒教授，东京大学这两大名誉教授对地震预测实情的认知相当扭曲。

气象局于2020年6月开始使用日本产业技术综合研究所在和歌山、高知县12处设置的倾斜仪的数据，仅仅依据东海地方周边地区的倾斜仪数据，发出慢滑移发生的临时信息，应该是理所当然的措施吧！内阁府和气象厅表示，从临震的确定性预测到“高地震可能性”的不确定性预测的变化，已经变成了社会共识。防灾应对指南的内容和难题也应该考虑这一点，并应该进行充分的说明。对事前避难对象区域的指定缺乏经验的自治团体的支援也是必要的吧。

大震法自不必说，与新的南海海沟地震评价研讨会一体运用的地震防灾对策强化地区判定会应迅速废止。早一步，气象厅地震预测信息科已经消失了，基于大震法的地震防灾对策加强地区的指定也应该尽早解除了吧。曾经的特定日期的地震预测只是一个梦想，这样的地震预测是不可能做到的。国家应尽快和地震学家合作，力争让普通民众好好理解并接受这一点，现在所做的工作还是有所欠缺的。希望这种努力能使民间预测失去市场。如果不加改变，南海海沟周围若频繁发生小地震等异常现象，可能会引发社会混乱。



来源：横山裕道. 迷走する地震予知:課題の解決急ぎたい. 地震ジャーナル, 2020, 70: 55-58.

## 巨型俯冲地震最大震级的控制因素

8.5 级以上的大地震只发生在俯冲带。尽管在用地球物理仪器观测俯冲带大地震方面取得了进展，但对控制这些地震最大震级的因素仍然知之甚少。以往的研究表明了板片形状、板块界面粗糙度、上覆板块应变状态、填充海沟的沉积物厚度和俯冲速率等因素的重要性。在此，研究者针对不同几何形状、不同俯冲隧道摩擦构型和俯冲速率的俯冲带提出了地震周期 2D 跨尺度数值模型。结果表明，俯冲隧道（subduction channel）内的低角俯冲和厚沉积物是产生大地震的必要条件，而俯冲速率的影响可以忽略不计。研究者认为，这些关键参数通过控制发震带的宽度和俯冲界面的平滑度来决定俯冲地震的最大震级。这一解释支持了先前基于观察和标度定律的研究。模拟研究还表明，对于低角度俯冲带发生的巨震，俯冲隧道（有沉积物填充）中的低静摩擦力会导致上冲板块发生中性或中度挤压变形。这一模拟结果与最大地震的观测结果吻合得很好。根据该模型，研究者预测了世界范围内俯冲地震的最大震级，结果与 20 世纪和 21 世纪所有特大地震的震级相吻合，并与基于观测数据的预测高度一致。相关成果发表在 2020 年 9 月的 *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 上。

关于俯冲带参数在大地震中的作用，有不同的假设。根据 1970 年代的观察，Kelleher 等（1974）提出控制地震大小的关键因素是发震带的宽度。后来，Ruff 和 Kanamori（1980）提出地震的最大震级由两个参数控制：俯冲板块的年代和板块的收敛速率。其主要假设是，地震震级与俯冲板块和上冲板块之间的机械耦合强度直接相关。

关于巨震（GEQs）与海沟沉积物和上冲板块应变关系的研究，Ruff

(1989) 认为, 海沟沉积层的厚度也是控制 GEQ 发生的重要因素。关于俯冲带沉积物与大地震和 GEQs 相关的影响的讨论表明, 仅在海沟沉积物的厚度大于 0.5 km 的俯冲带观测到震级  $\geq 8.5$  的地震。观察结果表明, 所有历史地震超过 8.5 级以上的俯冲带都具有相当平滑的俯冲海底。可以推断, 厚的沉积物形成了一个横向均质层, 使正在下行的大洋板块上部的凹凸体 (asperities) 变得光滑, 从而形成了一个较大的耦合带。对安第斯山脉和全球俯冲带活动大陆边缘的力学平衡分析与地球动力学建模表明, 俯冲隧道中的沉积物通过降低静摩擦系数来润滑俯冲界面。Sobolev 等(2006) 估算了海沟沉积物厚度与俯冲隧道静摩擦系数之间的关系。由于认为沉积物的作用是使断层表面光滑, 因此也有必要考虑引入海底粗糙度。

关于 GEQs 和俯冲带倾角的关系, Heuret (2011) 以及 Schellart 和 Rawlinson (2013) 发现, 观测到的最大震级与俯冲倾角和发震带宽度之间的相关性较弱。但是, 对于最大观测震级大于 8.5 的地震, 这种相关性会变得明显。能影响地震最大震级的另一个参数是俯冲速率。尽管在 Corbi 等 (2017) 的简化模型中, 俯冲速率与地震的强度没有任何关系, 如果考虑俯冲界面的温度, 它可能仍然会起作用。使板片以更高的速率运动, 可能会导致脆韧转换向更大的深度转移, 这反过来又会扩展发震带的宽度。因此, 需要通过数值建模进行更好的研究。

在这项研究中, 研究者为了弥补 GEQs 统计信息有限的观测差距, 采用基于物理的建模方法, 使用具有热机械粘弹塑性标准的 SLIM3D 建立俯冲地震数值模型——此方法的主要优点是可在板片界面和上冲板块中再现真实的应力和温度分布。以此为基础, 研究者分析了控制 GEQs 发生和

震级大小的参数,同时,分析了上述观察到的 GEQs 大小与俯冲带的倾角、光滑度和进入海底的沉积物及上盘变形形式之间的关系。

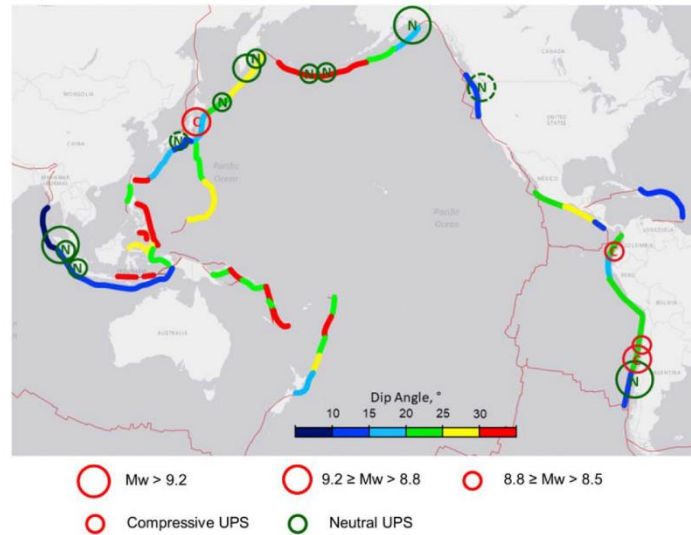


图1 倾角沿海沟的变化,圆圈表示  $M_w \geq 8.5$  的俯冲界面地震的位置  
(圆圈大小表示震级大小,颜色表示上覆板块的应变状态)

首先,研究者模拟了一个长期的俯冲过程,一个大洋板块在  $5 \sim 10 \times 10^6$  年的时间里在大陆板块下俯冲,时间步长 (time step) 跨越数千年且取决于模型的几何设置。接下来,在建立了具有真实应力、温度和所期望的板片几何分布的俯冲模型后,采用自适应时间步长程序并根据剪切区域的应变率,以 40 s 到 5 年的时间步长模拟震后松弛。采用最近开发的跨尺度建模技术,研究者针对具有各种几何形状、摩擦参数和收敛速度的俯冲带,分析了俯冲倾角、界面摩擦和收敛速率对地震震级和上冲板块形变状态的影响。

研究者使用二维跨尺度数值建模技术对大型俯冲地震及其地震周期进行建模,以识别控制最大地震震级的因素。同时,使用 GEQ 的破裂长度与矩震级之间的经验比例关系,将 2D 模拟结果外推到 3D,并测试了俯

冲带倾角、俯冲隧道摩擦系数（与俯冲沉积物的厚度有关）、俯冲速率，以及 **RSF**（速率-状态摩擦）参数深度分布的影响。最后，研究者分析模拟结果，以找出地震最大震级、俯冲隧道中的剪应力与上覆板块变形形式之间的关系。

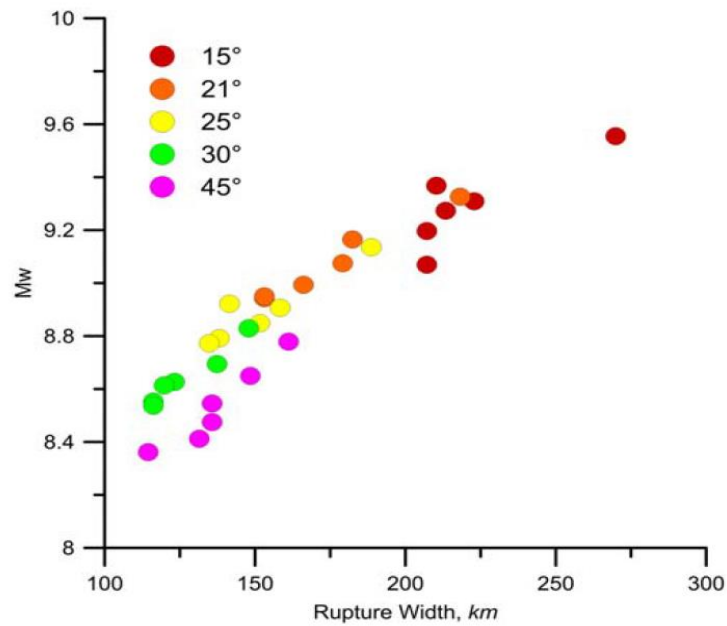


图2 所有模型中的最大模拟震级与破裂宽度的关系

模拟研究表明，板片几何形状对最大地震震级影响最大。板片的倾角越小，最大地震震级越大。仅次于板片倾角，俯冲隧道中的静摩擦系数对最大地震震级也有重要影响。俯冲隧道内的有效摩擦系数较低（较厚的沉积物），俯冲带的地震矩将较大。这些结果在很大程度上不依赖于  $RSF(b-a)^*$  参数的深度分布类型，但与不受深度限制的速率弱化和比  $325^{\circ}C$  等温线更深的速率强化模型基本相似。

该研究还表明，在假定断裂长度与断裂宽度成比例的前提下，地震的最大震级完全由可增加断裂宽度的因素控制。这些因素是：①较低的板片

倾角（影响最大）；②俯冲隧道中的低摩擦系数（影响相对较小）。板片几何形状对断裂宽度的影响是显而易见的。俯冲隧道的摩擦系数通过改变脆韧转换的深度来影响断裂宽度。如果摩擦系数较低，则俯冲隧道中的脆性（摩擦）屈服应力也较低，因此隧道中的脆性变形会更深。因此，破裂可传播得更深，破裂宽度增加。另外，地震的最大震级与俯冲隧道中的平均切应力之间存在不是很明显的负相关关系。与观察结果一致，模拟研究表明，最大震级的地震应该发生在上覆板块的中性（最频繁）或中等压缩（不太频繁）形变状态的俯冲带中。

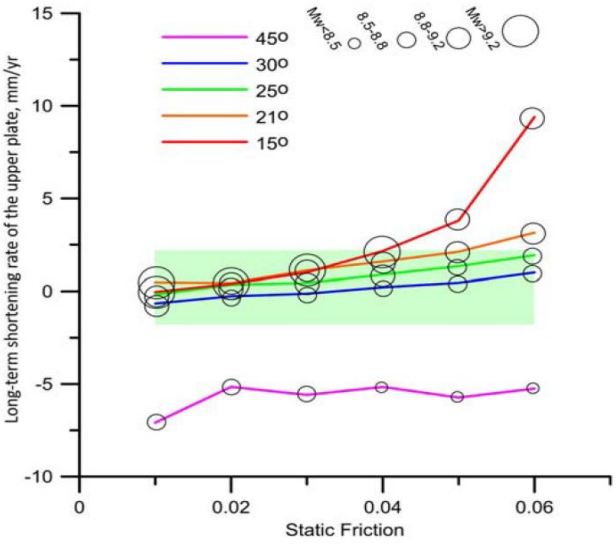


图3 在倾角为 15°、21°、25°、30° 和 45° 的模型中，200 kyr 俯冲期间的平均速度（正值表示压缩状态，负值表示扩展状态）与静摩擦的关系

根据研究者的模拟结果，俯冲地震的最大震级是板片倾角的函数。假设俯冲隧道中的有效摩擦系数为 0.01，历史上所有观测到的最大地震震级将均小于或接近由该假设得出的预测结果。

模型还预测，在俯冲隧道中，摩擦系数较高（即沉积物厚度较小）的

俯冲带，其所发生地震的震级应较小，这与利用地热观测估算俯冲带摩擦系数所得出的结论相一致。

来源：Muldashev I A. & Sobolev S V. What Controls Maximum Magnitudes of Giant Subduction Earthquakes? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2020, 21(9): e2020GC009145.

## 深度学习发现滑坡发生前的微弱地震信号

美国莱斯大学布朗工程学院开展的一项研究表明，深度学习方法能够快速处理地震监测工具提供的大量数据，从而预测相关的灾害事件。有关成果发表在 2020 年 8 月的《自然—通讯》上。

2017 年，格陵兰发生一起致命滑坡，造成 4 人死亡，9 人受伤，11 座建筑物被冲入大海。通过对滑坡发生之前所收集到的地震数据的分析，研究人员发现，在即将发生的灾难事件前存在微弱的信号，但没有人类分析员能够及时将这些线索组合起来做出预测。

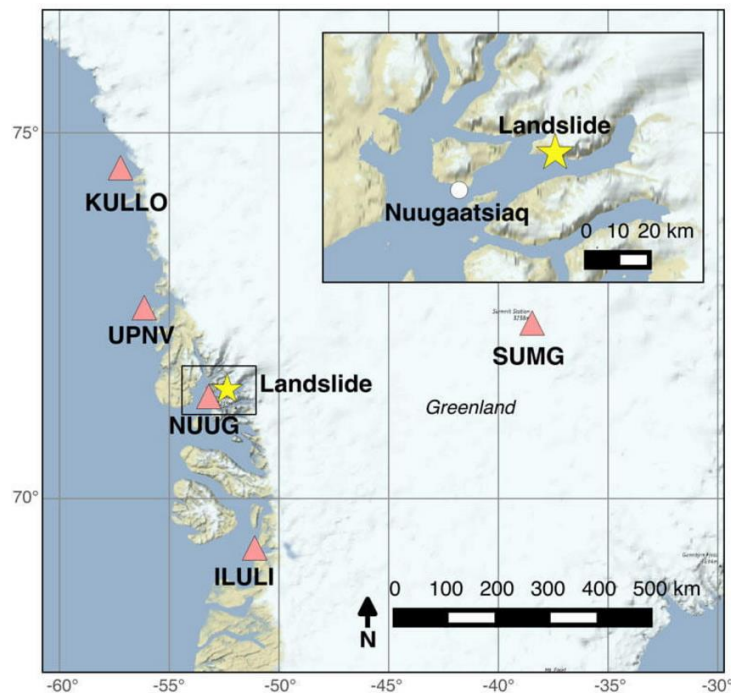


图 1 滑坡的位置（相对于地震台站）

基于新开发的无监督机器学习框架发现，在滑坡发生前几个小时，附近地震台站收集的数据中出现了一些微小的信号。具体而言，新算法揭示出了原始地震记录中人类无法发现的微弱但重复的隆隆声（小震群），这些隆隆声在滑坡发生前大约 9 小时开始，并随着时间的推移而加速，最终



导致了滑坡。同时，也表明该方法将来可以对发震区的地震活动进行更为翔实的预测。

该研究的参与者、莱斯大学地球、环境与行星科学系的专家 De Hoop 主要从事逆向问题的数学分析和深度学习，其表示，人工智能（AI）的进步非常适合独立监测大量且不断增长的地震数据，其有能力识别地震事件群，并检测背景噪声，从而建立人类专家由于其模型中的偏见而可能无法识别的关系。

目前，De Hoop 正在继续测试分析哥斯达黎加火山活动的算法。此外，其还参与了美国国家航空航天局（NASA）InSight 着陆器的相关工作，该着陆器在约两年前向火星表面发射了一个地震探测器。

此外，从开展研究的角度来看，De Hoop 带来了解决反问题的专业知识，这些问题包括从数据中逆向寻找原因，而另外一些研究人员则是机器学习和压缩感知领域的领先者，这有助于从稀疏样本中提取有用的数据。此二者的结合，真正推动了该项工作的开展。

来源：Small quake clusters can't hide from AI

<https://news.rice.edu/2020/08/24/small-quake-clusters-cant-hide-from-ai/>

Clustering earthquake signals and background noises in continuous seismic data with unsupervised deep learning

<https://www.nature.com/articles/s41467-020-17841-x>

---

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所