

# 地震科技前沿快报

2022 年第 10 期（月刊总第 45 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、大数据地震学

随着高时、空分辨率地震科学观测网络的建设、各类传感器的介入，地震科学不仅步入人工智能时代，更步入大数据地震学时代。要建立理解地震过程、解释四维地球结构的能力，需要大数据地震学这场新兴革命。大数据地震学由数据密集型传感器的部署、计算能力的提升以及新型大数据算法的发展等三方面的因素来推动。大数据地震学需要传统地震学与数据科学深度融合，但数据科学成果的吸收和对地震数据集的可访问性将是大数据地震学面临的挑战。本文综述了大数据地震学的机遇和挑战，属于地震科学研究的前沿领域，值得跟踪研究。

### 2、沿南海海槽发生大地震的长期概率是否被夸大

日本地震研究委员会（ERC）在 2013 年发布了日本西南部南海海槽发生大地震的长期评估报告，认为日本西南部南海海槽未来 30 年发生 8 级地震的概率为 60%~70%。但最新研究表明，该评估存在忽视隆升数据误差、隆升速率与大地测量数据不一致、布朗过程时间模型的假设与时间可预测模型的假设存在矛盾等缺陷。对日本西南部地震危险性的评估以及对缺陷

的深入分析，对我们开展重点危险区域的危险性评估具有非常强的借鉴意义。

### 3、大型逆冲地震的应力转移使余震在破裂区停止，在周围活跃

地震在断层面的破裂区与余震的时空分布关系对强余震预测、地震空区识别等具有重要意义，是减轻地震灾害的关键环节。然而，相互矛盾的结果显示，余震要么集中在破裂面，要么集中在破裂面周边或破裂面以外。该研究发现破裂面上最初的高余震活动率迅速停止，而在它周围的区域形成了一个地震活动率增强的区域，东日本等4个大型逆冲断层的余震模式可用速率-状态库仑应力传递来解释；地震破裂后留下的余震活动空区，可用来识别史前大地震事件的破裂范围。该研究从机理上解释了地震破裂区和余震时空分布关系，结论和技术方法值得在“解剖地震”中跟踪研究。

## 大数据地震学

地震学建立在对地面运动进行观测的基础之上，这种观测在空间和时间上天生采样不足。数据量从根本上限制了人类理解地震过程和解释 4D 地球结构的能力。大数据地震学是一场新兴的革命，其涉及使用大量数据的密集调查，为在这些领域取得根本性进展提供了新的机会。在本文中，美国南卫理公会大学的研究人员综合分析了超密集观测的现状。大数据地震学是由数据密集型传感器系统的开发、计算能力的改进以及新型技术和算法的开发而推动的最新科学进展，在全球地震学和勘探地震学的背景下，研究人员探讨了大数据地震学的驱动因素，以及将长时间数据收集（全球地震学的共性）的特点与密集的传感器网络（勘探地震学的共性）相结合的合作机会。同时，借鉴其他领域面临的类似问题，探讨了大数据地震学带来的一些独特挑战和机遇。最后，讨论了密集型地震数据集促成的最新科学发现，并评估了大数据地震学可能取得的重大进展。相关研究成果发表在 2022 年 6 月的 *Reviews of Geophysics*。

地震学的进步非常依赖于基于仪器的地面运动测量的进步，以至于地震仪类似于望远镜在天文学上的意义。随着仪器仪表、新型网络和新的实验设计方面的一系列重要进展，重大发现随之而来。被称为大数据地震学的子学科应运而生，其特点是使用大数据来回答地震学中目前仍然难以捉摸或由于数据量的大幅增长而出现的基础科学问题。但是，大数据是一个相对的概念，其“大”的定义不同于被动地震学和勘探地震学领域的定义。研究人员将大数据地震学定义为由三个领域的进步所驱动的一系列地震调查，这些领域（亦称驱动因素）具体包括数据密集型传感器的部署、计算能力的提升以及新型大数据算法的发展。

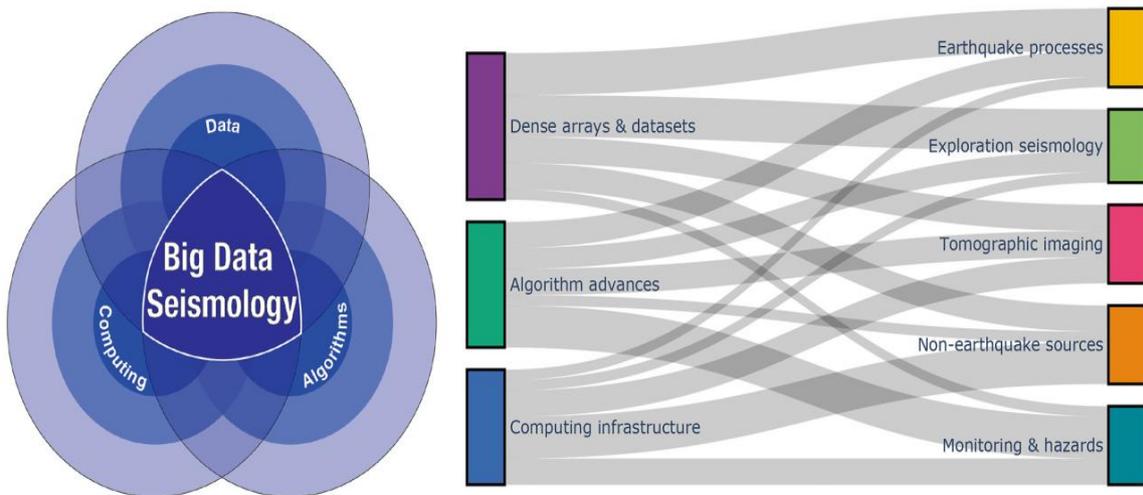


图 1 大数据地震学 3 个驱动因素的发展

大数据地震学的实践者将从被动地震学和勘探地震学领域的关键经验中受益，特别是，在稀疏但连续的数据记录方面，被动地震学领域已有几十年的经验，而在密集但持续时间短的网络方面，勘探地震学领域已有广泛的经验。研究人员探讨了大数据地震学的三个驱动因素，指出大数据地震学为研究地震和非地震过程以及成像提供了条件，最后探讨了大数据地震学的各种机遇和挑战。

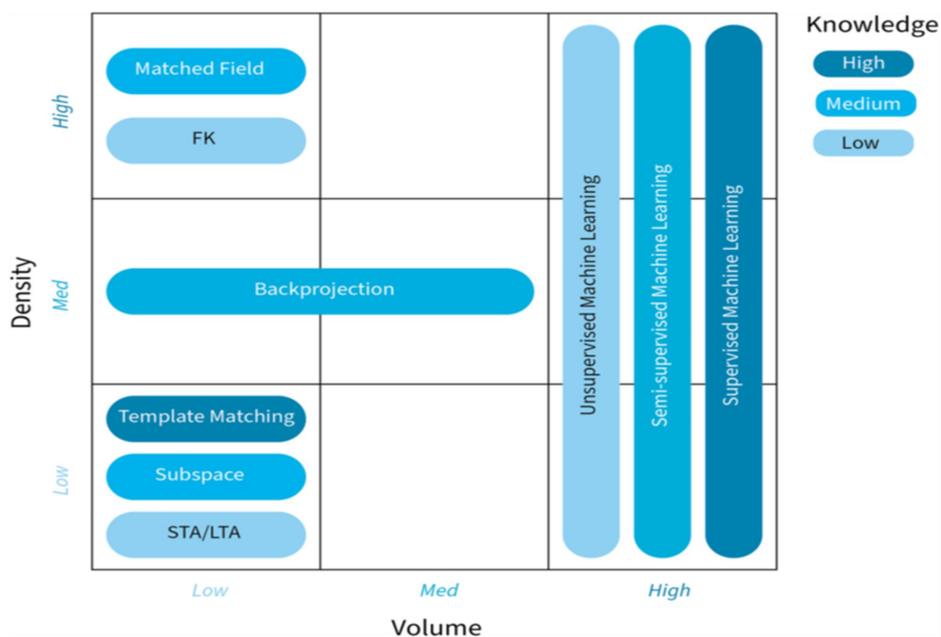


图 2 被动地震学（涉及处理数据以找到信号和事件）的关键工作流程

**驱动因素：**在过去的 5~10 年里，地震传感器系统的一些技术创新推动了空间密集型传感器网络在被动地震调查中的使用，特别是节点系统、社区传感器（**community sensors**，部署在住宅中的地震检波器）和分布式声学传感器。除了开发专门的传感器系统以获得更大的数据量外，地震学研究的一个日益增长的趋势是不同类型传感器系统的集成。随着大规模数据密集型基础设施和软件生态系统的开发和可访问性提升，传统高性能计算设施领域之外的商用硬件开始了大数据计算的重大转变。这些商业和非商业的影响产生了大量用于数据密集型分析的新开源工具，如 **TensorFlow**、**PyTorch**、**Scikit-Learn**。最后，它们塑造了（也被反向塑造）商业云计算和存储服务及平台的发展，如亚马逊云服务（**AWS**）和谷歌云平台（**GCP**）。与此同时，新技术和算法的发展也在推动大数据地震学的发展，它们允许对大数据集进行更完整的分析，针对不同级别的数据量、密度和知识设计了不同的算法（如下图）。

**震源过程分析：**大数据地震学时代一些最深刻的科学见解来自于在多个尺度上描述地震及其破裂过程的能力的提高。近年来，数据科学、信号处理和机器学习领域的先进技术在大量地震数据分析中的应用，显著提高了地震目录的完整性。这些新的高分辨率目录的一个重要应用是研究地震成核过程——地震是如何开始的，其显示出重要价值的另一个领域则是地震触发研究。此外，人们早就认识到，除了分析传统地震台网的数据之外，密集排列的地震检波器有可能提供关于地球物理过程的重要补充信息。因此，近年来阵列地震学（**array seismology**）正被越来越密集的、局部部署的地震仪所重新定义。

**成像分析：**地震学中一些最重要的发现源于利用地震波对地球内部无法到达的部分进行成像。由于地球模型的分辨率从根本上受到传感器空间

密度的限制，新的数据密集型传感器的部署允许以前所未有的分辨率反演三维地球结构，特别是地壳和近地表结构。最近在技术和算法上的创新，特别是环境地震噪声（ASN）干涉测量法的发展，对于在地震区进行短持续时间的节点阵列成像和获得浅层地球属性的时间变化特征至关重要。在利用大量数据进行地震反演（尤其是全波形反演）方面，计算能力的提升发挥了关键作用。数据、算法和计算能力的进步将使地震学家能够继续探索地壳、上地幔和深部与构造和地幔循环有关的新特征。然而，大数据地震学也提供了许多令人兴奋的科学机会，这些机会在于将发生在长时间尺度上（从小时到千年）的、有关浅层地壳属性的过程进行成像。对于使用传统地震传感器难以成像的地下环境，使用新的数据密集型传感器网络将可以更容易地进行成像分析。

**非地震源研究：**在过去的几年中，大数据地震学的驱动因素推动了地震学全新分支领域的发展，如环境地震学和城市地震学。与此同时，多年来，地震学方法一直被用于了解和监测火山。最近，人们开始尝试应用机器学习算法对火山信号进行分类，还在火山上部署了节点型传感器和分布式声学传感器，以提高对火山过程的理解。此外，核爆炸监测和法证地震学（forensic seismology）的其他应用（包括意外爆炸分析）也开始利用与大数据地震学相关的新型网络和算法。

**机遇与挑战：**地震监测实际上是地震学的公共面孔，由此，地震学这门基础科学能够最直接地影响社会。计算机和电信技术的进步，为对破坏性地震做出更快速的反应打开了大门，大数据地震学将在这些近实时分析中发挥基础性作用。除了一些出于安全和专有原因的有限特例外，大多数区域性和全球性地震数据集都可以被一般公众随时访问。这种可访问性使得在不同机构之间共享科学结果及支持这些结果的数据集变得更加容易。

随着大数据地震学的出现，访问数据在原则上仍有可能，但在实践中将越来越困难。过去，数据处理可以在个人笔记本电脑或本地计算集群上进行，现在对于那些无法随时访问高性能或云计算资源的人来说，将变得遥不可及。在未来几年，保持对地震数据集的可访问性将是地震科学发展需要解决的一个重大挑战。

学习开展大数据地震学研究所需的知识和技能是跨越传统地震学的必要条件，但这是具有挑战性的。所需技能的广度超越了传统地球科学学位课程中的地震学教学范畴，同时，批判性地思考多样性、公平性和包容性对地震学的未来也至关重要。大数据地震学位位于地球科学和数据科学之间的交叉区域，相关前沿知识和具有社会影响的研究为更广泛的探索打开了潜力之门。但是，如果地球科学或计算教育不能统一地提供和公平地分配，为实施大数据地震学研究所需的高级技术培训将面临重大障碍。随着教育价值在这个时代的不断提升，对于大数据地震学来说，牢记这些相互矛盾的考虑非常重要。

来源：Arrowsmith S J, Trugman D T, MacCarthy J, *et al.* Big Data Seismology. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(2): e2021RG000769.

## 沿南海海槽发生大地震的长期概率是否被夸大

日本地震研究委员会（ERC）根据 2011 年发生的东日本大地震，在修订日本地震应对措施的同时，于 2013 年发布了新的日本西南部南海海槽发生大地震的长期评估报告。其中的关键问题是 30 年的地震发生概率，与 2001 年发布的基于时间可预测模型的方法相比，新报告中评估地震发生概率的方法没有改变，导致未来 30 年  $M \geq 8$  事件的概率为 60%~70%。日本京都大学的研究人员认为，该评估方法存在忽视隆升数据误差、隆升速率与大地测量数据或地貌数据不一致、时间可预测模型的力学解释、布朗过程时间模型的假设与时间可预测模型的假设存在矛盾等缺陷。相关研究成果发表在 2022 年 7 月的 *Seismological Research Letters*。

南海海槽是一个俯冲带，菲律宾板块在这里俯冲到上覆板块之下。这一板块边界多次发生  $M_w \geq 8$  级大地震，对日本西南太平洋沿岸造成严重破坏。2001 年，ERC 公布了南海海槽未来 30 年发生地震的概率，其中发生  $M \geq 8$  地震的概率约为 50%。2011 年 3 月 11 日，日本东北地区发生的  $M_w 9.0$  地震引发了日本东部的大地震灾难，迫使政府改变了地震危险性评估的基本原则，包括 ERC 的长期评估。由于 ERC 在 2001 年的评估中所假设的地震是基于近期历史上的已知地震事件，因此对地震发生的长期概率进行重新评估不可避免。最终，ERC 在随后的评估中给出了 2013 年之后 30 年 60%~70% 的  $M \geq 8$  地震发生概率。这种相对较高的概率迫使日本中央政府及地方政府加快步伐，以为下一次地震做好准备。最近，日本报纸《中日新闻》（Chunichi Shimbun）对这一评估结果提出了质疑，称“可能性被夸大了”。

**ERC 评估的 30 年地震概率。**自 1996 年以来，ERC 开始发布日本及周边沿活动断层和俯冲带发生大地震的长期评估报告。自 1998 年以来，ERC 还对 30 年的地震发生概率进行了评估。2001 年，ERC 发布了南海海槽发生地震的长期评估报告，估计在未来 30 年内发生  $M \geq 8$  地震的可能性为 40%~50%。在这次评估中，ERC 首先确定了东南海地震和南海地震的特征断层，并应用了时间可预测模型（以下简称 SN80），其中连续事件之间的持续时间与前一个事件的大小成正比。ERC 将 Murotsu 的隆升、海啸淹没高度、同震断层长度或滑移等多个数据输入到该模型，并估计 1944/1946 年的地震事件与未来地震事件之间的间隔约为 90 年。利用这个临时的间隔时间和最后一次地震发生的时间，ERC 得到了相对高的地震发生概率。

2013 年，ERC 摒弃了特征地震模型，认识到历史事件中的各种破裂模式，将板块界面分成若干段，并提出了可能的断裂段组合来评估力矩的大小 ( $M_w$ )。ERC 在 2013 年的报告也基于 SN80，评估了南海海槽未来 30 年发生地震的概率，无论断裂段组合如何，均为 60%~70%。

**30 年地震概率评估中的问题。**ERC 在 2001 年和 2013 年对 30 年地震发生概率的评估中，至少存在四个严重缺陷：

(1) 历史地震中隆升测量误差的忽视

在过去的事件中，隆升的测量误差一定很大，这是计算概率的基础。不幸的是，ERC 在 2001 年和 2013 年没有认真考虑它们，这可能导致了复发间隔的错误评估。对于 1707 年 Hoei 地震、1854 年 Ansei 地震和 1946 年南海地震，ERC 依据的隆升数据分别为 1.8 m、1.2 m 和 1.15 m，这些都在 SN80 中介绍了。对于 1707 年和 1854 年的地震事件，SN80 参考了 Imamura (1930) 介绍的关于潮汐测量的旧文件。值得注意的是，Imamura

(1930) 在 1765 年或更晚的时候报告了另一次测量。SN80 没有讨论第三次测量，这意味着港口快速下沉或在其中一次或两次测量中存在较大的误差。Imamura (1930) 也没有对测量方法、天气和海洋状况以及计算太阳和月球潮汐所必需的时间和日期提供任何描述。因此，测量误差 >50 cm 是不可避免的。另一个重要的问题是测量是在 Hoei 事件约 50 年后完成的。地震之后，板块间会有大的震后形变。因此，SN80 的校正可能是错误的。对于 1946 年的地震，SN80 参考的是 Sawamura (1953) 的结果，有类似的误差，即高估了同震隆升。

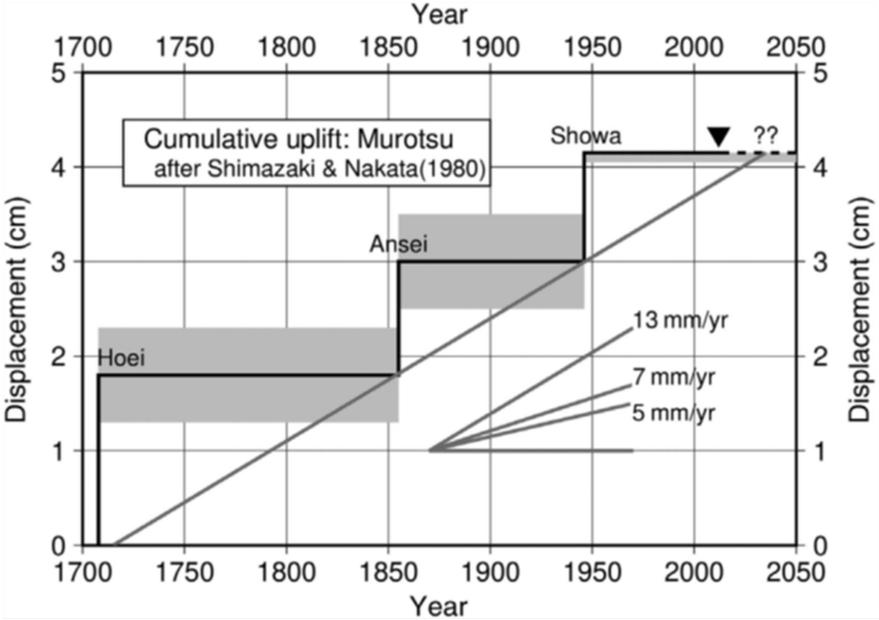


图 1 Muroto 海岬附近的累积隆升和基于时间可预测模型的复发间隔估计

图 1 显示了可能的测量误差范围。由于这些较大的误差，预计下一次地震发生的时间会有很大的变化。研究人员通过对 Hoei、Ansei 事件增加 50 cm、对 Showa 事件增加 10 cm 的正常随机误差来模拟隆升历史，并预测了下一次地震发生的时间。获得的平均分布为 98.8 年，半宽约 25 年(图 2)。研究人员统计了 67~97 年和 67 年后这两个区间的样本数，评估后得

到 53% 的条件概率。因此，测量误差可能会使平均重现间隔变长。当然，结果在很大程度上取决于假定的误差和平均隆升。

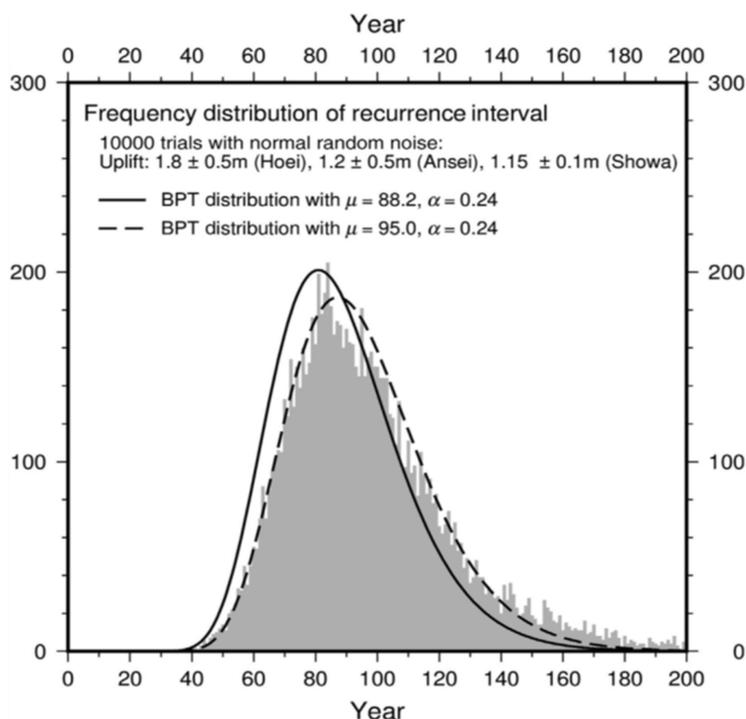


图 2 下一次地震发生时间的频率分布

## (2) SN80 中的隆升与大地测量数据或地貌数据不一致

值得注意的是，大地测量得到的平均沉降速率与 SN80 和 ERC 使用的平均隆升速率不一致。时间可预测模型假定地震间应力积累的速率恒定，然而，地震间应力积累速率可以用地震间沉降速率来测量。大地测量数据的检验对地震重现期的估计提出了质疑。SN80 使用平均沉降速率 5 mm/yr 来估计 Hoei 事件的同震隆升，与大地测量结果相去甚远，人们应该检查平均沉降速率和估计的隆升速率之间的差异。如果同震隆升和震间沉降速率的测量都是正确的，那么一定存在显著的残余隆升（residual uplift）。如果沉降速率几百年来都没有变化，那么在 1707 年和 1854 年的地震中，这一差异将分别导致约 0.9 m 和 0.6 m 的残余隆升。因此，Hoei 和 Ansei 地震可能造成的残余隆升量达 1.5 m。由于在 1361 年和 1099 年沿南海海槽

还发生了其他大型隆升事件，因此可能的残余隆升在 1000 年的时间里将超过 1.5m。所以，时间可预测模型所假定的隆升速率可能存在高估。

### (3) 时间可预测模型的力学解释

如果假设同震隆升和震间沉降都是正确的，那么可以期待残余隆升的出现。研究人员估计，Hoei 和 Ansei 地震的残余隆升占同震隆升的 50%。时间可预测模型是一种基于弹性回弹理论的简单地震周期模型，然而，残余隆升可能是塑性变形，不能按线性弹性处理数据。在弹性和完全塑性框架下，当应力超过屈服点时，应变和应力是不成比例的。因此，时间可预测模型的物理基础存在问题。

### (4) 时间可预测模型与布朗过程时间模型在假设方面的矛盾

ERC 对长期地震概率的评估基于布朗过程时间模型。在布朗过程时间模型的框架中，基本状态被假设为恒定。然而，在时间可预测模型中，应力状态随地震的大小而变化，这违背了布朗过程时间模型的基本假设。

**讨论。**前人通过将时间可预测模型和滑动预测模型拟合到地震发生的综合时间序列中，检验了时间可预测模型相对于滑动预测模型的优越性。同时，以南海海槽沿线历史地震的震源断层长度作为数据，并补充了误差。破裂模式的多样性使研究人员不得采用“特征地震”，事实上，有几项研究表明，南海海槽沿线发生了多种地震。因此，对于南海海槽地震的破裂模式，一直没有达成共识。ERC 在 2013 年介绍了由 Hori 等人 (2009) 在他们的模拟中观察到一种时间可预测方式的重现，该模拟结合了与速率状态相关的摩擦定律。这种行为是由加载速率的变化引起的，而原始的时间可预测模型假定加载速率是恒定的。因此，ERC 在 2013 年报告中的讨论并不十分科学，需要更仔细地检查这些模型中的假设。

日本地震调查研究推进本部（HERP）的基本政策之一是在全国范围内统一评估地震活动。根据这项政策，ERC 利用布朗过程时间模型分析地震发生的概率，评估了沿活动断层和俯冲带的地震活动。ERC 从地震复发历史中估计了一个简单的平均复发间隔，而南海海槽则采用时间可预测模型，这违背了全国统一评估的基本方针。

来源: Hashimoto, M. Is the Long-Term Probability of the Occurrence of Large Earthquakes along the Nankai Trough Inflated?—Scientific Review. *Seismol. Res. Lett.*, 2022, 93: 2311–2319.

## 大型逆冲地震的应力转移使余震在破裂区停止，在周围活跃

大型逆冲地震释放和转移累积了数百年的应力，导致具有高度破坏性的大型余震发生。因此，了解大型逆冲区余震的时空分布规律是减轻震害的关键。然而，相互矛盾的观测结果显示，余震要么集中在破裂面，要么集中在破裂面周边或破裂面以外，而且余震可能会持续几年到几十年。本研究分析了自 1960 年以来 4 次最大的大型逆冲地震的余震情况，重点关注了记录最好的 2011 年东日本大地震后的地震活动率的变化，发现破裂面上最初的高余震活动率迅速停止，而在它周围的 10 倍大的区域形成了一个地震活动率增强的环。进一步研究发现，东日本和其他 3 个大型逆冲断层的余震模式可以用速率-状态库仑应力传递来解释，破裂带的地震活动停止可能会持续几个世纪，留下地震活动空区，可用来识别史前大逆冲事件。相比之下，周边地区的地震活动率会在 40~60 年的时间里减弱，增加了大型逆冲地震后的地震危险性。相关研究成果于 2022 年 6 月发表在 *Nature Geoscience*。

地震灾害评估基于长期或者缓慢的地震活动率的变化，然而，大型逆冲断裂或者其他大的主震会使地震灾害突然偏离其一般特征，包括破坏性余震以及渐进式主震（progressive mainshock）。余震的分布存在差异，或集中在破裂面，或延伸至破裂面以外。大型逆冲断裂余震序列的持续时间也存在争论，其可能持续几年或者几十年，甚至更久。

为了改善地震灾害的评估，地震学家试图利用流行型余震序列（ETAS）及其之前的相关模型来区分余震和背景地震，并预测余震分布以及随时间的衰减。这些模型假设地震活动率增加，最大的增加位于或者接近破裂面。另一种观点认为，余震是由于库仑应力转移引起的，位于主震后剪应力增

加的周围断层上。本研究表明，大型逆冲断裂余震完全不同的行为可通过单独的库伦假设来解释，这可以用来预测余震并寻找史前大型逆冲断裂。

**大型逆冲断裂余震的时空分布模式。**1960年以来， $M \geq 9$ 地震的余震在破裂面高滑部分大多停止。1960年智利瓦尔迪维亚（Valdivia）地震的余震在数月之内就停止了，其他的在1~3年内停止。对于所有这些事件，周围环形区域的地震突然出现，并持续至今。由于日本高质量的地震监测网，2011年东日本大地震为研究提供了最好的例子。研究人员比较了此次地震主震之后5~10年的地震活动与背景地震活动，发现中心部位（破裂区）的地震活动率与背景地震活动率相比下降了3~5倍，并且，中心部位的余震震级小于周围区域， $M 7.9$ 余震的发生位置形成了一个地震活动率下降的小圆。

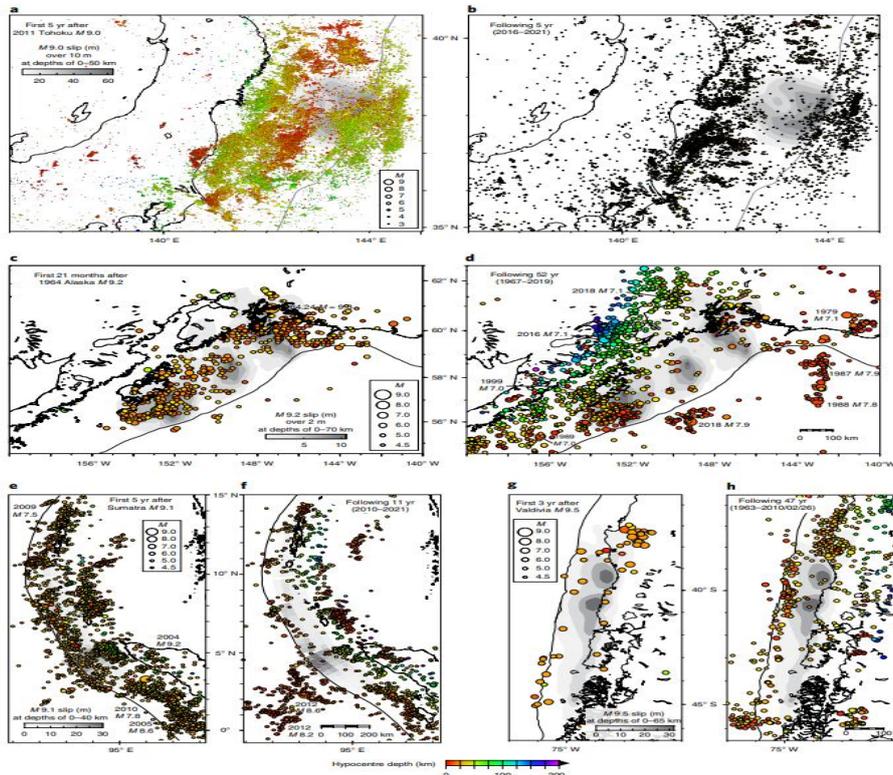


图1 1960年以来  $M \geq 9$  大型逆冲地震的余震

同时，中心部位被地震活动率增强的环所包围，环内地震活动率比背景地震活动率增加了 2~5 倍，比中心部位高 5~10 倍。环是突然出现的，主震 2 天之后环的范围仅比 5 年之后略小。主震之后 10 年内，环内发生了 22 次  $M \geq 6.7$  地震。但 10 年前，该区域仅发生了 4~5 次地震。因此，环是一个稳健的特征，不仅对于  $M \geq 3$  的地震，对于更大的、更具破坏性的地震也是如此。

从穿过破裂的剖面发现，中心部位与环延伸超过岩石圈，至少达到 50 km 深度。主震在余震震源处引起的库伦应力改变使得余震接近库伦破裂，表明环是应力由中心部位到周围断层转移的结果。对余震的应力转移大多为正值，促进了破裂，而地震之前对背景的应力转移多为负值，阻碍了破裂。这表明，在主震和地震之前不同段的断层被活化。

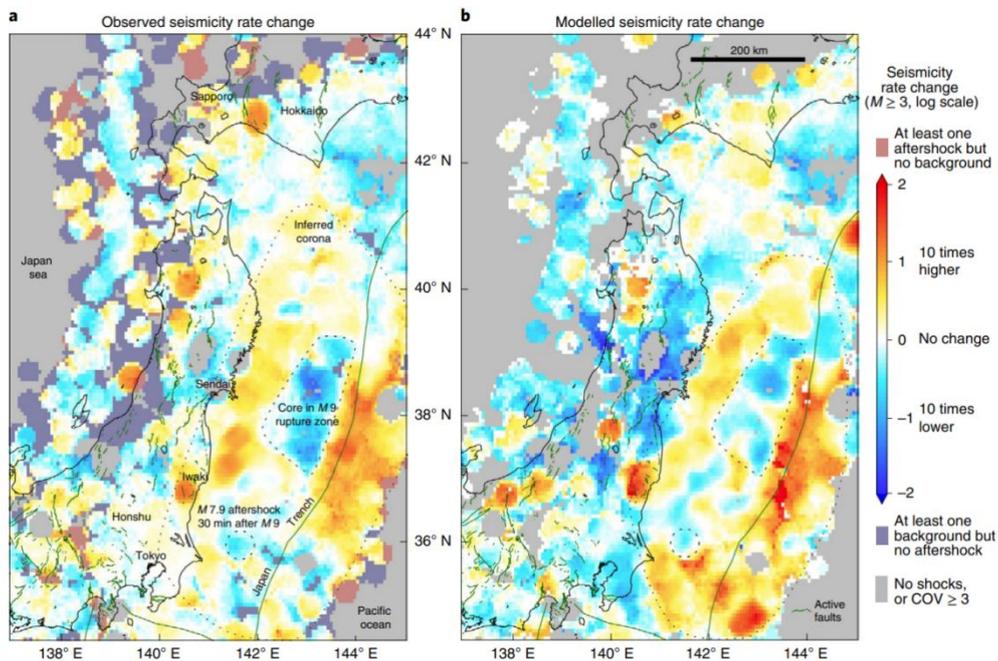


图 2 东日本大地震后最开始 5 年内地震活动率的变化

利用库伦应力转移预测地震活动率的改变。结合库伦应力转移的速率-状态摩擦理论为解释这些现象提供了框架。在恒定的构造加载环境，库伦应力增加会提高背景地震活动率，而应力降低会减小地震活动率，两种影

响都会随时间衰减。高背景地震活动率的区域会对小的应力改变发生响应，而对于低地震活动率的区域，应力改变的影响很小。研究人员使用地震震源机制作为活动断裂的替代，来捕捉他们的复杂性以及各向异性。通过调整背景地震活动率及模型，使由于主震引起的地震活动变化以及所有  $M \geq 6.5$  的余震都能在第一个 5 年内发生，从而匹配了实际观察结果。预测结果与实际观察到的地震活动相似，也出现了中心与环。

地震活动在中心与环的时间演化可以通过环中应力的增加以及中心部位应力的降低来分析。研究人员利用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟来捕捉源区断层滑动的各向异性以及接收断层的几何学形态的多样性，发现即使中心部位的平均应力下降，一些中心部位断层应力也会增加，引起地震活动率的突然增加。但是，这些位置会快速消失。

本研究忽略了几个可能影响余震活动的过程：动态应力触发可能会在中心部位与环中提高余震活动率；粘弹性释放可能会增强和延长环；震后蠕变可能会影响环，但不会影响中心部位。环在震后两天出现，在之后的数月仅增加了 10%，因此蠕变不是环形成的机制。同样，如果是由动态应力引起，则会在 10 天内发生衰减，但事实并非如此。因此，静态应力转移可能是最好的解释。

**中心部位地震停止与环内地震活动的持续性。**研究人员将文献中对于大型逆冲断裂相矛盾的余震观测结果归咎于余震相对于主震的不同时间与位置。因此，破裂面由大量余震到余震停止的转变被忽略。环的面积达到中心部位 10 倍之多，因此震后灾害增加。大型逆冲区的余震带会过高的估计它们的破裂区域，相反，中心区域与主破裂带具有很好的相关性。中心部位被预测在间震期将保持地震活动静止状态，中心部位的静止与地

震空区假设有些相似，但是该假设认为主震之后地震灾害会降低，这与本研究的结果相反。

对超过 100 个  $M \geq 7$  的主震的研究表明，余震在剪应力增加的断层上会持续 10 年以上，而在剪应力降低的断层上仅持续 1 年。应力降低发生在震源 50 km 范围内，而应力增加发生在距震源超过 75 km 的位置。因此，1 年的余震可能主要位于中心部位，而环内有持续超过 10 年的余震。

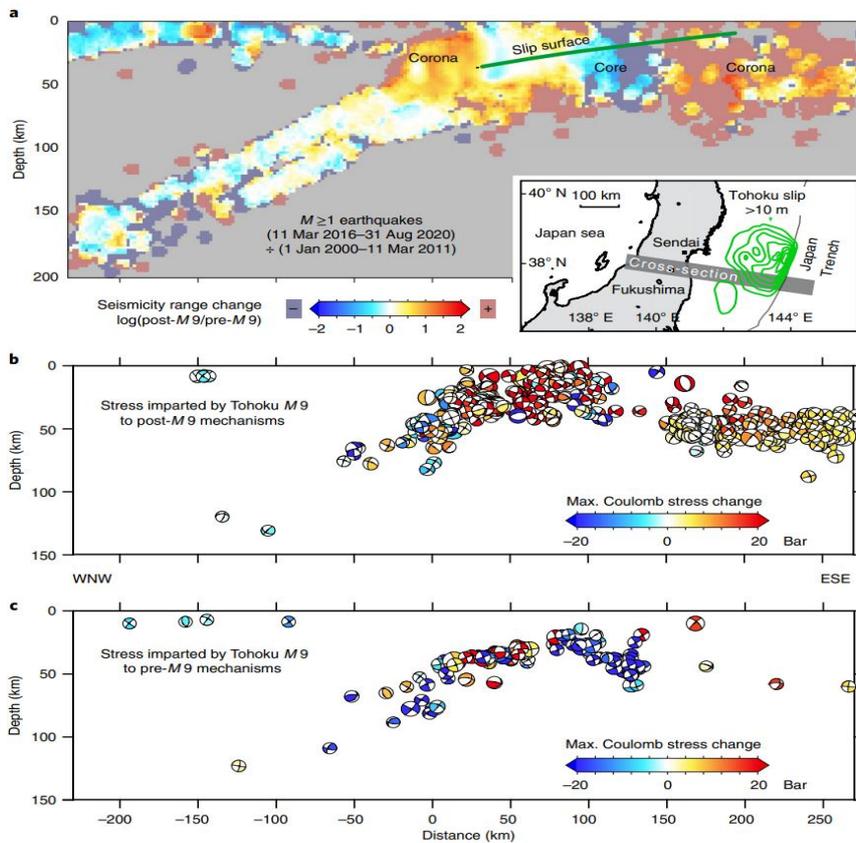


图3 东日本大地震的地震活动率和应变变化

观测结果与模拟的地震活动率改变具有一致性，表明速率-状态库伦模型具有预测能力，能够提升灾害评估。例如，4 个  $M 7$  地震在 2021—2022 年间沿日本东北海岸发生，皆位于预测的环内地震高发区。这些震源区的地震活动率在  $M 9$  事件之后经历了一个大森衰减，目前大约是  $M 9$  地震之前背景地震活动率的 5 倍，表明这些  $M 7$  事件是环内余震。

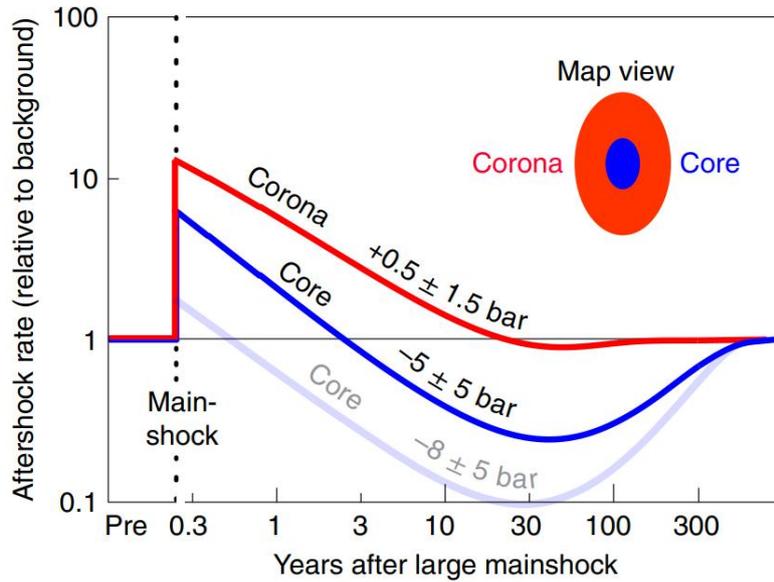


图4 地震活动性对大型逆冲地震的响应

如果中心部位预期将持续数个世纪是真的，那意味着史前大型逆冲断裂在俯冲带地震活动性上表现为一个洞。目前，所有的四个逆冲断裂表现为一个地震活动性洞。同时，洞也可能是由俯冲带蠕变部分引起的，这些蠕变通常伴随着地震活动，而非没有地震。此外，在多次地震同震滑移附近也有不同程度的洞出现。对于卡斯卡迪亚俯冲带而言，虽然其地震活动性缺失被归咎于逆冲断裂的完全愈合与锁定，但低的地震活动率以及余震发生情况表明，其仍处于震后静默状态。

来源：Toda S, Stein R S. Central shutdown and surrounding activation of aftershocks from megathrust earthquake stress transfer. *Nature Geoscience*, 2022, 15: 494–500.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所