

# 地震科技前沿快报

2023 年第 8 期（月刊总第 55 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、二氧化碳地质封存诱发地震研究概况

由二氧化碳等温室气体引起的气候变化是全球重大挑战。近年，二氧化碳的地质封存成为降低大气二氧化碳的有效手段。然而，很多二氧化碳封存项目在实施过程中都监测到了地震的发生，这对生命安全、工业设备安全以及二氧化碳封存的有效性产生了巨大威胁。因此，识别二氧化碳封存相关地震的诱发机制，预测诱发地震的时空分布以及震级十分重要。该文首先回顾了近期在二氧化碳地质封存诱发地震的概况，并总结了可用于分析二氧化碳注入诱发地震的临界压力理论等；然后，总结了基于统计模型和物理模型的最大震级预测；最后，分析了诱发地震活动预测相关的应力状态的量化、缓地震的注入方案设计等挑战。

### 2、开展背景地震监测以在挪威近海大规模封存二氧化碳

Northern Lights JV DA 公司计划在挪威大陆架上建立世界上第一个开源的二氧化碳输送和封存基础设施，2024 年将开建。为评估诱发地震风险，已采取了多项措施来评估该地区的地震危险性，但现有观测缺乏全方位的覆盖。该文整合了近海地震仪与陆地地震台站，并在 Horda 台地东部部署

了一个陆地阵列，应用阵列处理方法，解决了近海地震仪中存在环境噪声等问题，提高了地震检测能力，更准确的评估了诱发地震风险。

### 3、预报未来的地震

20年前，英国爱丁堡大学的 John McCloskey 教授利用库仑应力传递模型，确定了强震危险区域的位置；2023年2月，7.8级双强震确实发生了。1999年土耳其伊兹米特地震发生后，伊斯坦布尔技术大学的地质学家 Aykut Barka 警告称，增加的应力可能会在杜兹镇以东约 100 km 处引发类似的破裂。他的工作说服当局关闭了在伊兹米特地震中已受损的校舍。两个月后，当 7.1 级地震袭击该市时，这些建筑倒塌了。

因此，现在众多研究人员致力于预测、确定哪些断层段最危险，以及它们预计会产生多大规模的地震。实用好这些知识，也可以采取措施减少死亡和破坏。John McCloskey 认为，原则上，人们可以摆脱地震风险。

## 二氧化碳地质封存诱发地震研究综述

地质封存是减少二氧化碳排放的有效策略，然而由二氧化碳注入引起的地震活动可能成为严重的危险，也会阻碍二氧化碳地质封存项目的发展。研究人员系统总结了有关二氧化碳注入所引起地震的相关内容。首先，回顾了近期在二氧化碳地质封存项目中诱发地震的监测情况，并总结了可用于分析二氧化碳注入诱发地震的机制，包括临界压力理论、**Biot** 的增量应变理论、速率-状态摩擦理论和断裂位能理论。然后，讨论了二氧化碳地质封存过程中所引起地震活动的热-水-力-化学（**THMC**）耦合理论和建模。随后，总结了基于统计模型和物理模型的最大震级预测的优缺点。最后，分析了地震活动预测相关的挑战，包括应力状态的量化、复杂断层系统的识别和表征、减缓地震的注入方案设计，以及合理的地震风险分析模型选择等。相关成果发表在 2023 年 4 月的 *Earth Science Reviews*。

由二氧化碳等温室气体引起的气候变化正在成为全球性挑战。近些年来，二氧化碳的地质封存成为降低大气二氧化碳的有效手段。然而，很多二氧化碳封存项目在实施过程中都监测到了地震的发生，这对生命安全、工业设备安全以及二氧化碳封存的有效性产生了巨大威胁。因此，识别地震触发机制，预测地震的时空分布以及震级情况是十分必要的。本文聚焦于近年二氧化碳注入诱发地震研究中出现的突出问题和主要科学进展，以为二氧化碳封存工作提供参考。

### 1. 二氧化碳注入诱发地震的实际情况

二氧化碳地质封存项目往往在页岩等高透入性岩层开展，因此引起的地震也通常较小。绝大多数都是 3 级以下的地震，偶尔会有大地震的发生。但是，小地震也有造成二氧化碳泄露的风险。因此，了解现场情况是非常重要的。在美国犹他州的最大产油地 **Aneth** 开展的二氧化碳地质封存（**CGS**）

项目发现，2007 年底到 2009 年 7 月间共监测到大约 3800 次二氧化碳注入引起的地震，震级在 0.8~1.2 级之间。在德克萨斯州 Cogdell 油田开展的 CGS 项目，共监测到 105 次震级大于 1 级的二氧化碳注入诱发地震。而 Sleipner（挪威）、Snøhvit（挪威）和 Ketzin（柏林）等 CGS 项目，由于没有安装地震监测系统，因此没有相关的地震数据。Cranfield（美国）和 Aquistore（加拿大）的 CGS 项目的监测结果表明，孔隙压力扰动较小，没有发生地震。因此，由于现场数据有限，很难得出结论性认识。

## 2. 二氧化碳注入诱发地震的机制

二氧化碳注入诱发的地震有三种情况：①储层内没有大规模断层，二氧化碳注入导致围岩破裂，并诱发地震；②二氧化碳注入点与断层有一段距离，应力扰动传至断层，导致断层激活，在注入点或者断层处发生地震；③二氧化碳直接注入断层，使断层激活。

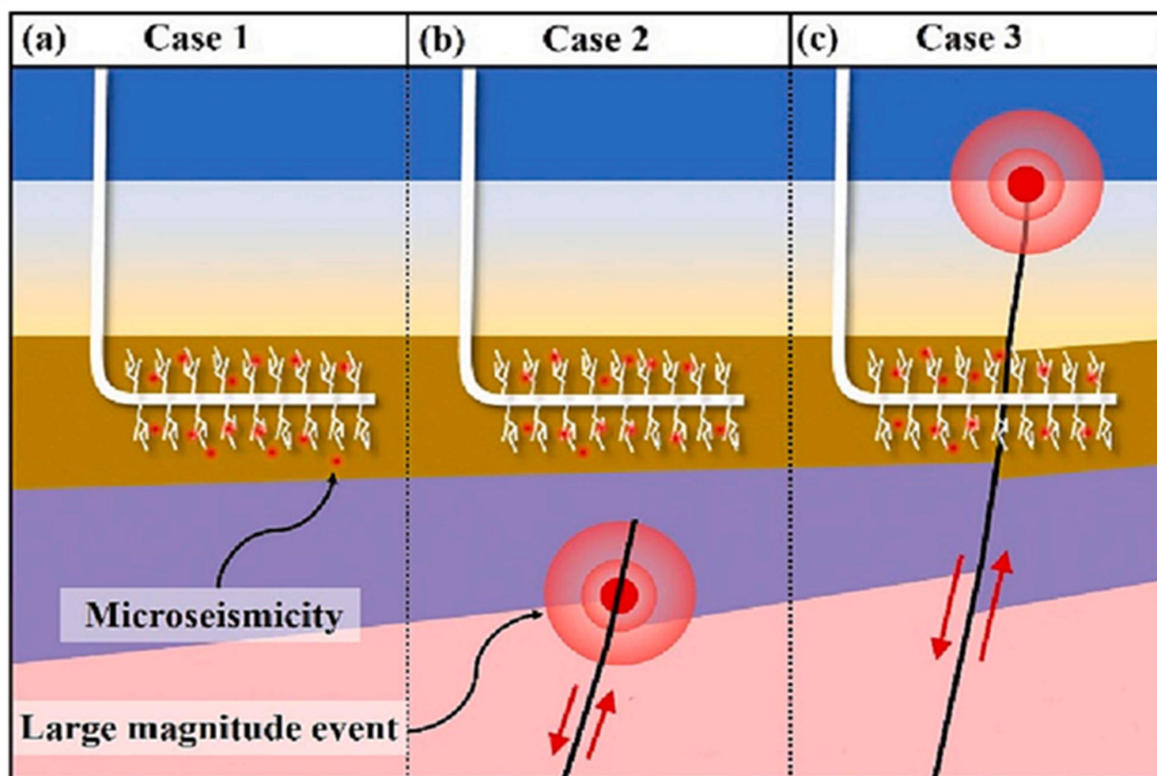


图 1 二氧化碳注入诱发地震的可能场景

地震的触发往往是由于二氧化碳注入导致了压力升高，降低了有效应力，破坏了储层原始的应力平衡状态，从而导致岩石失稳破裂。近些年提出的主要地震触发机制包括：临界压力理论（CPT）、Biot 的增量应变理论、速率-状态摩擦理论，以及破裂位能理论（fracture potential theory）。尽管提出了这些理论，但它们都依赖于假设和输入参数。有时，其中的先决条件可能与现场条件不同，这使得准确估计现场地震活动变得困难。

### 3. 二氧化碳注入导致的断层激活

许多研究结果表明，二氧化碳注入会导致断层的激活。此外，断层的激活是一个复杂的热-水-力-化学（THMC）耦合过程，主要涉及孔隙压力扰动、温度变化，以及应力腐蚀（stress corrosion）等。

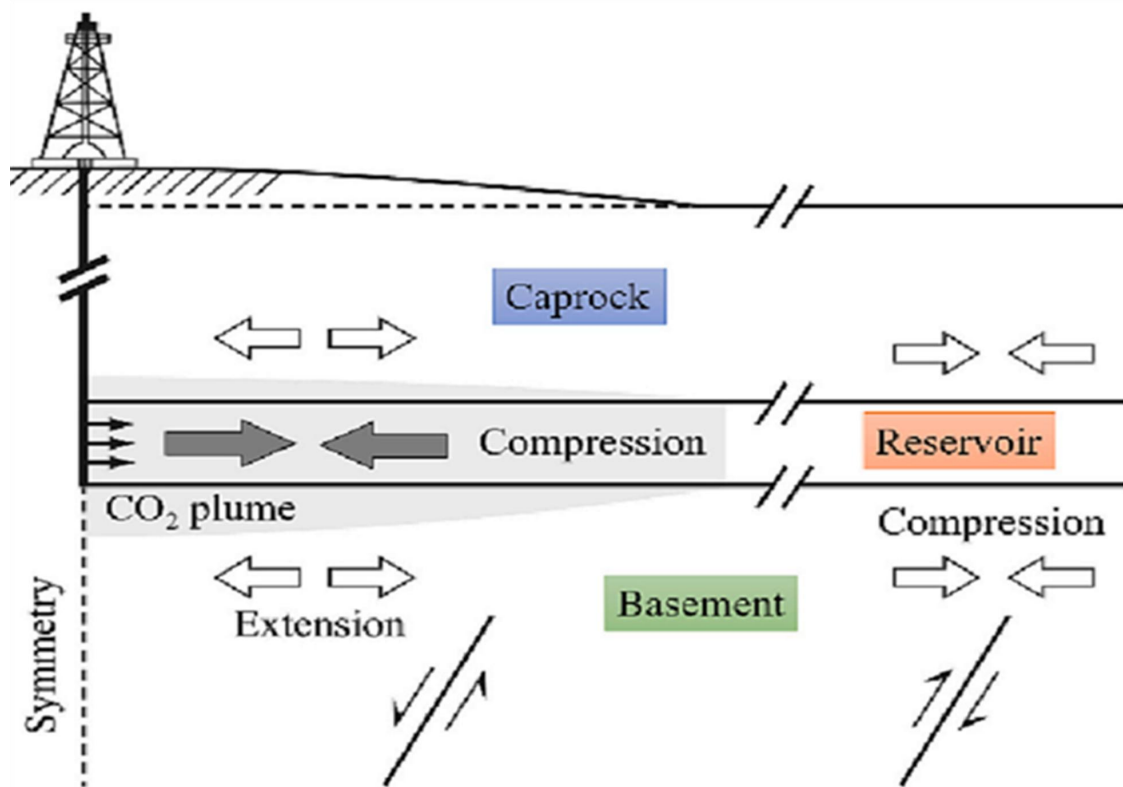


图2 二氧化碳柱扰动所导致的断层激活

孔隙压力扰动：孔隙压力扰动是二氧化碳注入诱发地震活动的主要机制，主要包括孔隙压力的积累和扩散。如果断层处于临界状态，孔隙压力的小幅增加就可以通过降低有效正应力而引起断层活化。由于注入区孔隙压力的积累，储层在受压区受到挤压，而储层孔隙压力增大会导致储层膨胀。随着孔隙压力的增大，基底和盖层发生水平伸展。同时，储层的横向扩张导致远离注入带的区域的基底和盖层发生水平挤压。此外，孔隙压力扰动还与断层形态、原位应力、注入作业（压力、持续时间、速率等）和地层孔隙弹性参数等有关。

温度变化：二氧化碳注入温度一般低于储层温度，高温储层与低温二氧化碳柱（CO<sub>2</sub> plume）的相互作用会引起岩石收缩，从而产生热应力，进而影响有效应力。有效应力的变化会改变区域应力场，产生热弹性应变和热破裂。近期的研究结果表明，由于二氧化碳的流动特征、应力状态、地层非均质性和现场操作条件等热效应因素，注入二氧化碳冷却效果难以量化。此外，在大多数情况下，与压力扰动相比，冷却作用引起的应力场变化可以忽略不计。研究发现，这种热应力变化只可能导致小裂缝的剪切和拉伸破坏，诱发小震级的微震。

地球化学效应：长期向储层注入二氧化碳会导致岩石基质和断层的化学-矿物学变化。岩石与二氧化碳和卤水的反应取决于地层类型，碳酸盐岩和长石矿物在酸性环境中更容易溶解。然而，实验室研究表明，地球化学过程对地质力学性质的影响通常很小。而且，在项目实施过程中也未发现地球化学效应导致的断层激活。尽管如此，这种效应仍应该持续得到关注，尤其是在富碳酸岩地区。

#### 4. 二氧化碳注入诱发地震的最大震级预测

到目前为止，还没有可靠的注入诱发地震的最大震级预测方法。近些年，研究人员开发了一些方法试图解决这个问题，包括统计方法、物理参数与模拟方法，以及混合预测方法。统计方法建立在注入前和注入过程中地震记录的统计关系上，包括地震事件发生的时间、地点和震级等数据。它最大的优势是方便使用，而且不需要地质信息。但是，对于孔隙压力扩散过程中遇到的地质结构突变，统计方法难以准确预测其最大震级。

基于物理的方法是统计方法的替代。数值模拟方法作为一种典型的基于物理的方法，可以模拟注入过程中储层的物理演化过程，如孔隙压力扰动、区域应力场变化、断层滑动等。但是，它的准确度很大程度上取决于输入的地质参数和工程参数。混合预测方法不仅涉及地震统计分析，还涉及储层地质特征和注入扰动情况。

#### 5. 预测二氧化碳注入诱发地震的挑战

近几十年来，现场注入工程的诱发地震监测结果表明，虽然采取了各种方法来降低发生大地震的可能性，但不能完全避免大震级地震的发生。注入诱发地震的触发机制和影响因素十分复杂，给实际预测的开展带来了挑战。不确定性主要体现在以下几个方面：

**准确表征应力状态：**应力场直接影响注入二氧化碳的分布，从而影响地震活动的时空分布，以及断层的稳定性，准确表征应力状态仍然是一个非常具有挑战性的任务。

**准确识别断层系统：**二氧化碳注入所诱发地震通常和断层相关，断层的规模决定了潜在地震的震级。先前研究表明，100 m 长断层就能产生 M2 地震。但是，只有 5 km 以上断层的地震才容易在地球物理探测中被识别。因此，断层系统的复杂性同样限制了注入诱发地震的预测。

流体注入方案：二氧化碳的注入会引起压力扰动的持续扩大，因此诱发地震活动对注入方案有很强的时空依赖性。目前，预测注入对诱发地震活动的影响主要有两种方法，即经验方法和模拟方法，但在实际情况中其预测结果难以得到保证。

## 6. 新的技术手段

图 3 总结了目前能够应用于二氧化碳注入诱发地震的预测方法。一些新的研究成果，如探地雷达和光纤传感器在地震监测中的应用，可能有助于提高对二氧化碳注入诱发地震活动的预测能力。此外，物联网以及深度学习技术在处理复杂问题上具有很强的能力，有望帮助改善诱发地震的预测水平。

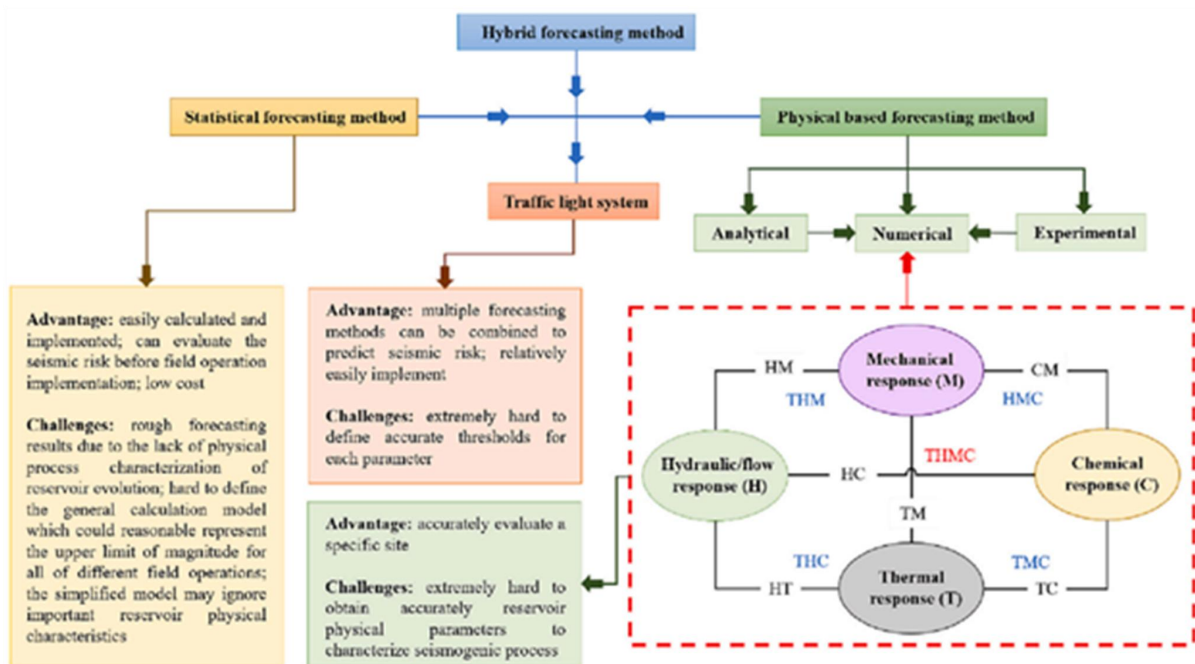


图 3 注入诱发地震的预测方法

来源：Cheng Y, Liu, W, Xu T, *et al.* Seismicity induced by geological CO<sub>2</sub> storage: A review. *Earth Science Review*, 2023, 239, 104369.



## 开展背景地震监测以在挪威近海大规模封存二氧化碳

2024 年，挪威西部海域的 Horda 台地将启动二氧化碳注入项目。在此之前，Horda 网络项目（Horda Network project）采取了多项措施来评估该地区的地震危险性。一项对 Horda 台地区域的断层面解的研究确认了最大水平应力的方向，其在整个区域内主要是北西-南东至东-西向。相对应力比在东南部（靠近挪威板块）较高，在西北部较低。对 Horda 台地区域的地震目录（2001—2021）进行分析后发现，地震活动速率适中， $b$  值约为 1，完整性震级为 1.5（以  $M_L$  衡量）。在挪威大陆架（NCS）监测近海地震活动的主要挑战之一是：使用位于近海事件东部的挪威国家地震网络（NNSN）的陆地永久地震台站时，其数据缺乏方位角覆盖。为了改善方位覆盖，研究人员将挪威大陆架上选定油气田（Grane、Oseberg）的永久油藏监测系统、有限数量的近海地震仪与陆地 NNSN 地震台站进行了整合。这种整合具有挑战性，因为近海地震仪中存在一定水平的环境噪声。为了进一步提高检测和定位能力，研究人员在 Horda 台地东部的 Holmsnøy 岛部署了一个由宽频地震仪组成的陆地阵列（HNAR）。通过在 HNAR 上应用阵列处理方法，信噪比得到改善，可以检测到一些以前未记录到的地震。近海传感器通常受到来自地震干扰和台地或船只等噪声源的噪声影响，因此研究者还在部分近海部署的地震仪上应用了阵列处理方法，大大减少了这类噪声，从而提高了地震检测能力。相关研究成果发表在 2023 年 3 月的 *Seismological Society of America*。

欧盟的气候变化减缓目标是到 2030 年将温室气体排放量减少至少 55%，并在 2050 年实现碳中和。为实现这一目标，需要使用可行的封存技术将二氧化碳注入地下储层。最近，Northern Lights JV DA 公司计划在挪威大陆架上建立世界上第一个开源的二氧化碳输送和封存基础设施。该

项目计划在 Aurora 地区进行二氧化碳封存，在进行大规模二氧化碳封存之前、期间和之后，对封存地点进行监测是安全运营的重要要求之一。其中一个可能影响二氧化碳注入成功的风险是：封存地点及其周围可能诱发和触发的地震活动。过去的研究已经发现，在脆性地壳岩石中进行大规模二氧化碳封存时，可能存在显著的诱发地震风险。

自 2018 年以来，Horda 网络（HNET）项目已经评估了不同的被动监测策略，以研究在二氧化碳注入之前 Horda 台地的背景地震活动。其主要目标是更好地了解过去和现在的地壳地震活动（深度为 5~15 km），以便能够识别在启动（2024 年）或注入二氧化碳期间可能发生的地震活动速率和状态的任何可能变化。

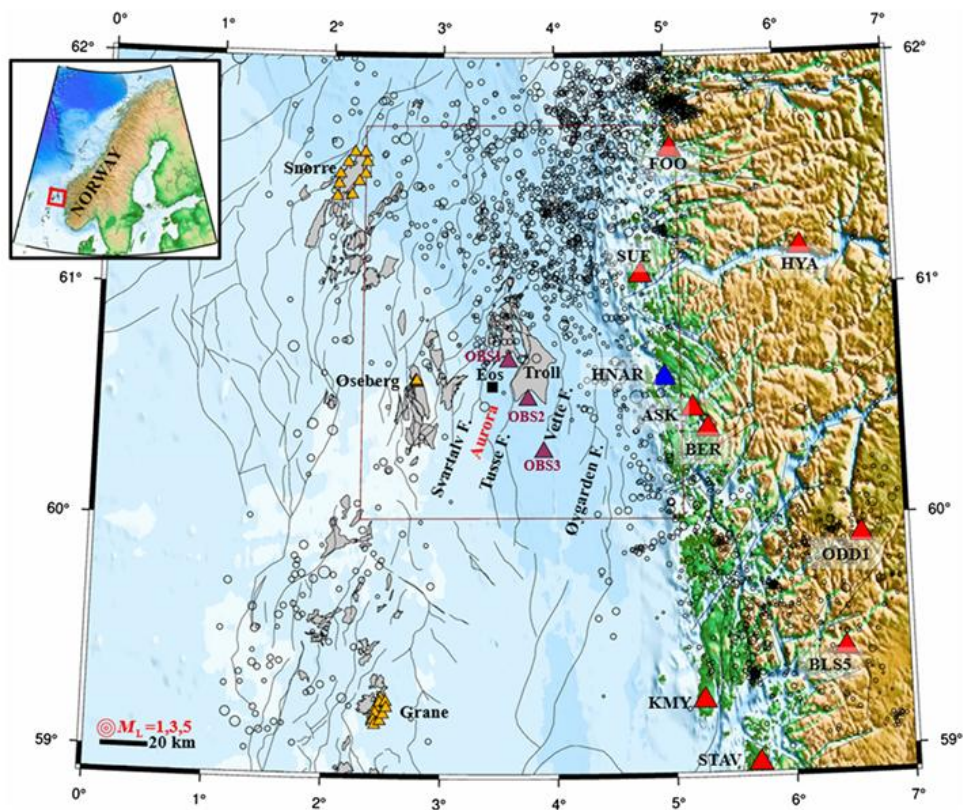


图 1 Horda 台地及周边地区的地震活动（挪威西南海岸）。计划中的 Aurora 二氧化碳注入点和 Eos 注入井及附近生产油田的轮廓已标出，红色三角形表示选定的 NNSN 宽频台站，黄色三角形表示近海 PRM 台站，蓝色三角形表示陆上 HNAR 阵列，紫色三角形表示新部署的海底地震仪

研究人员首先介绍了 Horda 台地的构造环境和应力状态，梳理了自 2001 年以来从挪威国家地震网络 (NNSN) 获得的 Horda 台地地震活动目录，以进一步开展地震活动的统计分析，估计震级-频率关系，然后，展示了将挪威国家石油公司 (Equinor) 开展永久储层监测 (PRM) 所用的海底地震仪与新部署的陆地地震阵列 (HNAR) 和 NNSN 的陆地宽频地震仪进行整合的方法和过程。

挪威西海岸 Horda 台地上的 Aurora 地区是大规模二氧化碳封存的指定区域。由于正接近 2024 年的注入启动日期，因此识别和了解其附近地区过去和现在的地震活动至关重要。NNSN 的国家地震活动目录表明，Horda 台地的平均  $b$  值为 1，且具有中等程度的地震能量释放潜力，但基于该目录的完整性震级 ( $M_c$ ) 约为 1.5 (以  $M_L$  衡量)，这一证据表明，仅凭区域网络无法充分监测未来二氧化碳封存地点的背景地震活动。Horda 台地上的震级变化情况表明，由于接近地震台站，近海地区的地震检测阈值较低，因此较小震级地震 ( $1.2 < M_c < 1.3$ ) 的目录是完整的，而如果向 Horda 台地的西部和西北方向移动， $M_c$  将增加到约 1.6。

由于地震活动水平非常低，因此在 Horda 台地的西南部无法估计  $M_c$  值。这可以通过两种情况来解释：一是该地区是非地震活动区，二是该地区的地震活动水平低于 NNSN 在挪威大陆架这一部分的地震阈值。Horda 台地西南部和 Aurora 地区的地震活动水平低，评估哪种情况能够解释这一观测结果非常重要。2021 年 10 月，HNET 在 Aurora 地区部署了专用的海底节点 (靠近 Aurora)。具体而言，部署了三个宽频传感器，以进行为期一年的测试 (受传感器电池寿命限制)，之后它们被回收，并进行数据分析。根据所获得数据的质量和数量，可为 Horda 地区推荐进一步的监测解决方案。

研究发现，将油气田 Grane、Oseberg 和 Snorre 的 PRM 系统的海底地震仪与 NNSN 的陆地宽频带站点进行整合，并部署一个位于 Horda 台地东侧的陆地宽频带阵列（位于 Holsnøy 岛），同时将阵列处理纳入监测策略中，可能会影响目标区域的检测阈值和位置精度。对 2020 年 7 月 1 日  $M_L$  1.6 地震的分析发现，通过海上和陆地站点的整合以及阵列处理的应用，可以整体影响地震的位置精度，将误差椭圆的长半轴从 15 km 减小到 5.8 km，短半轴从 8.1 km 减小到 4.5 km。

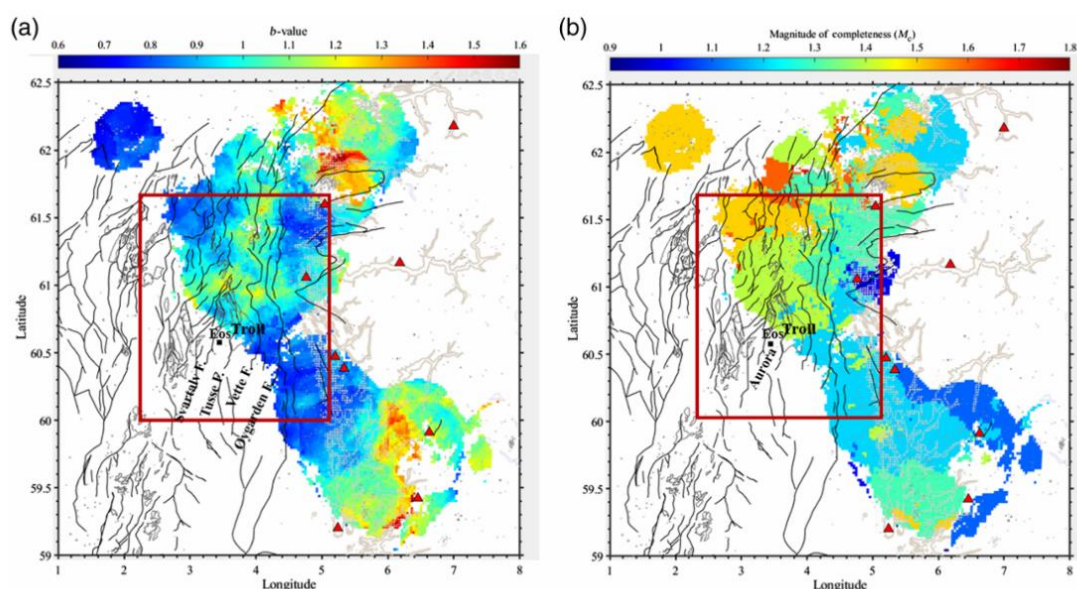


图 2 (a) b 值图；(b) 基于 NNSN 地震活动目录（2001–2021）的完整性震级

2022 年 3 月 21 日，Horda 台地西北边界发生了一次地震，震级为  $M_w$  5.1 ( $M_L$  4.7)，此次地震具有近东-西向的压缩性质，与世界应力地图中最大水平应力方向的观测结果，以及本研究中通过震源机制应力反演所得到的最大主应力轴方向一致。过去 20 年来，Horda 台地的累积地震矩释放情况表明，其地震矩释放属于中等程度，相当于  $M_w$  4.3 ( $M_L$  4.1) 的地震。但是，最近的地震监测表明，在 Horda 台地内可能发生略微更高层次的地

震矩释放。因此，通过 Horda 台地的新监测策略获取新数据，以丰富地震活动的长时序目录，应该可以更好地评估该地区的地震灾害风险。

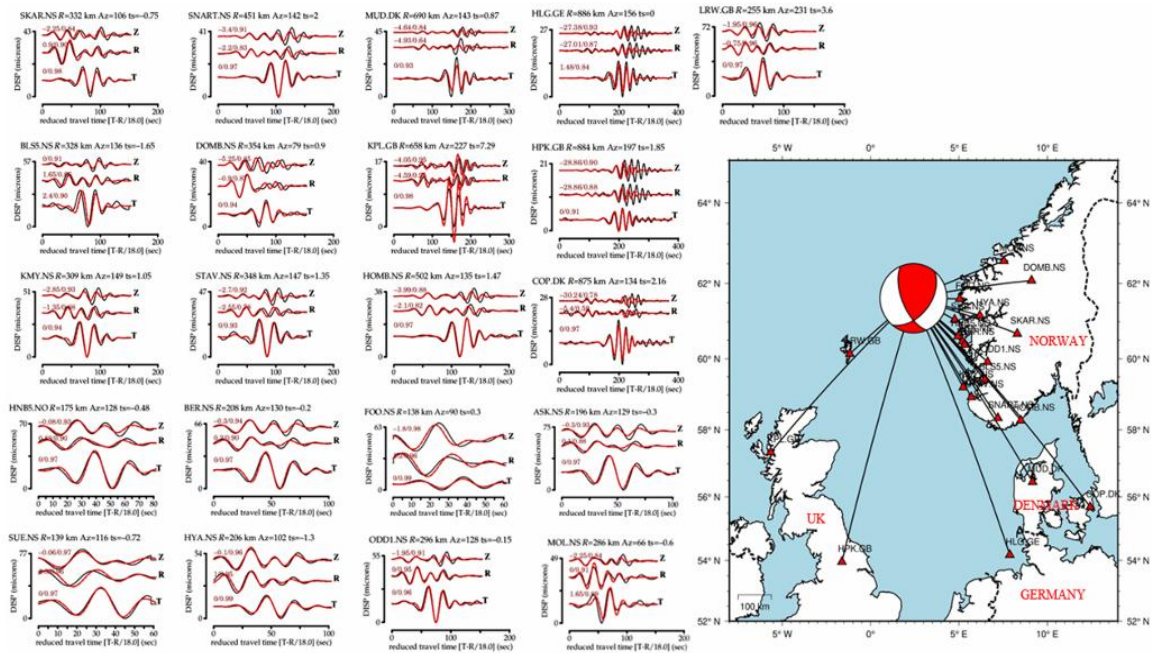


图 3 基于近海和陆上地震检波器整合所确定位置对 2022 年 3 月 21 日地震进行的矩张量反演，观察到的（黑色）和合成（红色）波形之间的方差减少了 79%，研究选用了来自挪威、丹麦、德国和英国的几个宽频站点的数据

计划中的挪威海岸二氧化碳封存项目反映了政府在实施碳捕获和封存方面的雄心壮志，以确保实现 2050 年的气候减缓目标。为了评估 Horda 台地的潜在地震危险性，HNET 项目自 2018 年以来采取了多项措施。总体而言，将海底地震仪与陆地宽频地震台站整合，部署位于 Horda 台地东侧的 HNAR 陆地宽频阵列，将单站与阵列处理相结合，可以改善监测策略，提高地震定位的准确性。因此，可帮助更准确地评估地震危险性。部署在 Aurora 附近的海底地震仪（OBS）在回收和分析后（2022 年末），可以进一步加深对 Aurora 地区地震活动的理解。对研究所推测的应力方向进行分析后发现，整个区域和不同深度的最大水平应力呈现出北西-南东到东-西

向的变化趋势。研究所获得的应力状态可以作为不同构造分析的输入，例如对断层稳定性和重现情景的研究。

来源：Zarifi Z, Köhler A, Ringrose P, *et al.* Background Seismicity Monitoring to Prepare for Large-Scale CO<sub>2</sub> Storage Offshore Norway. *Seismological Society of America*, 2023, 94(2A): 775-791.

## 预报未来的地震

目前，有关地震位置、震级和确切时间的预测仍然很困难，一些人将地震预测称为科幻小说中的东西。但是，地质学家已经掌握了降低地震风险的工具。英国爱丁堡大学的地球物理学家曾利用库仑应力传递模型，确定了 2023 年土耳其地震的位置，但时间难以确定。本文分析了库仑应力传递模型的实际应用情况，并讨论了有关地震预报、地震风险降低的问题。相关成果发表在 2023 年 3 月的 *Nature*。

20 年前，约翰·麦克洛斯基（John McCloskey，目前是英国爱丁堡大学的一名地球物理学家）在土耳其东南部的地图上画了一条红线，以确定大地震可能发生的地点。唯一的问题是什么时候，2023 年 2 月，麦克洛斯基和他的团队确认了答案。地震发生在当地时间 2 月 6 日凌晨 4 点 17 分，当时大多数人都在睡觉，造成土耳其和邻国叙利亚 5 万多居民死亡。



图 1 土耳其地震破坏了很多地方的建筑，如卡赫拉曼马拉什市

麦克洛斯基的工作既展示了地震预报科学的前景，同时也展示了其局限性。尽管地质学家长期以来一直试图提供有关未来地震的位置、震级和

确切时间的警告，但数十年的研究表明，很可能无法预测地质断层何时开始震动。美国地质调查局（USGS）地震灾害项目的地球物理学家苏珊·霍夫（Susan Hough）表示，科学家常常试图把地震“筛选”出来，以了解接下来会发生什么，但世界上大多数地区真正关注的不是地震预测，而是对地震危险性及其长期发生率的评估。

现在，研究人员致力于预测、确定哪些断层段最危险，以及它们预计会产生多大规模的地震。有了这些知识，政策制定者可以采取减少死亡和破坏的措施，例如，要求更好的建筑实践或敦促当地居民做好准备。日本、美国和土耳其的一些地区已经开发出早期预警系统，当附近发生地震时可向居民发出警报。麦克洛斯基认为，原则上，人们可以摆脱地震风险。

### 1. 危险区域

土耳其是一个地震活跃的交界带，几块地壳在这里相遇并相互摩擦。在土耳其东南部和叙利亚北部，阿拉伯板块正在向北挤压安纳托利亚板块，不断将其挤压向西边。但是，这种转变并不是一帆风顺的。相反，摩擦使这些板块保持在适当位置，有时甚至持续了几个世纪。当应力克服摩擦力时，断层线两边的板块会彼此颤动，以地震的形式释放出巨大的能量。

这种情况在土耳其一次又一次发生，使麦克洛斯基和他的同事能够绘制出其重要震源之一，即东安纳托利亚断层沿线的应力图。与其他断层一样，该断层被划分为在不同时间滑动的断层段。当一个断层段发生位移和震动时，会改变同一断层相邻断层段及附近其它断层上的应力。这增加了一些地方的应力，使它们更接近破裂，但也缓解了其它地方的应力，使它们暂时更安全。



专门从事地震危险性和风险评估的 Temblor 公司的首席执行官罗斯·斯坦 (Ross Stein) 表示，它们不仅仅是随机发生的地震，它们在“交谈”，而这种“交谈”是通过应力传递来进行的。

2002 年，麦克洛斯基和他的同事使用这项技术调查了东安纳托利亚断层上的高应力区。在历史记录的帮助下，该团队将自 1822 年以来 10 次地震引起的应力变化纳入了一个持续的板块运动模型。模拟表明，卡赫拉曼马拉什以南断层线的一个区域——2 月 6 日所破裂断层的准确位置和长度，在未来某个时候破裂的风险很高。该团队甚至知道这将是毁灭性的，估计将发生 7.3 级或更高震级的地震。

这种方法在技术上被称为库仑应力传递，然而，这并不是其第一次准确地定位到即将到来的震颤。1997 年，斯坦和他的同事分析了已经袭击土耳其北安纳托利亚断层的地震，估计下一次地震可能发生在伊兹米特市 (Izmit) 附近。两年后，那场地震来临，造成 17 000 多人死亡。2005 年，麦克洛斯基和他的同事分析发现，2004 年印尼苏门答腊-安达曼地震后的应力变化可能会导致苏门答腊西部的巽他海沟发生地震。这项研究发表 12 天后地震发生。2008 年，日本地质调查局的远田晋次 (Shinji Toda) 和他的同事预测，当年早些时候的中国汶川地震将增加三个相邻断层的应力。在接下来的十年里，其中两个断层引发了强烈的地震。

## 2. 增加的应力

但是，不可能在任何地方都使用这项技术。该模型需要对以前的地震（通常是几个世纪前的地震）有一些了解，因此研究人员只能使用它对地震历史已知的地区进行评估。因为余震通常比主震小，所以该模型在预测余震方面最为成功。尽管如此，仍有许多未知因素，科学家们正在努力以进一步评估该模型。

2002 年，USGS 的地球物理学家汤姆·帕森斯（Tom Parsons）分析了 2000 多次震级大于 5.5 级的地震——这些地震发生在 7 级及以上地震之后和附近。结果发现，61% 的后发地震与早发地震引起的应力增加有关。由此表明，库仑应力传递可以准确地识别出更容易引发破坏性地震的断层。2008 年，帕森斯和他的同事在汶川地震后发表了一项预测，目的是在以后评估该模型的性能。目前，这项工作正在进行中。

如今，提出震后力变理论的研究人员之一斯坦估计，该方法已被 30000 篇论文用于解释地球最近三分之二的余震和渐进式主震（**progressive main shock**）。这告诉人们，前述方法并不是唯一的方法，因为断层是粗糙、杂乱的，它们的行为并不像人们希望的那样。

例如，麦克洛斯基的模型预测了最近土耳其地震的位置，但震动开始于断层的一个小得多的分支，然后蔓延到主要部分，这让斯坦感到困惑。另一个复杂的情况是，这次主震也比预期的要大得多，可能是因为它使 1822 年破裂的南段和 1893 年破裂的北段重新发生了破裂。麦克洛斯基认为，这突显了地震预报的问题，即使确定了最危险的地方，但每一次地震都是独一无二的。

不久前，地震学家认为，他们或许能够在地震发生前几天或几个小时预测到一些地震。这样的希望出现在加利福尼亚州的帕克菲尔德，那里的圣安德烈斯断层几乎每隔 22 年就会有一小部分发生地震。并且，每一次地震都是在北部发生一次较小的地震之后发生的。1966 年，帕克菲尔德附近发生强烈地震的几个小时前，前兆运动破坏了一条横跨断层的灌溉管道。

当年（指 1966 年），地震预报看起来就像是人类应该拥有的一种能力。在下一次预期的地震到来之前，地质学家们在帕克菲尔德地区安装了数百台地震仪，希望找到一些可以用来预测未来地震的前兆。但当下一次

地震发生时，研究人员没有发现任何警告信号。同时，其他前兆也消失了。多年来，科学家们分析了当地水中不断增加的氡、来自地壳的电磁信号、甚至奇怪的动物行为。但这些潜在的前兆没有一个经得起统计检验。斯坦表示，尽管有各种令人震惊的、有希望的证据，但在实际预测地震方面没有取得丝毫进展。

麦克洛斯基认为，这不会永远发生。霍夫写了一本名为《预测不可预测》（2009年）的书，他认为西方的大多数地质学家不再研究地震预测问题了一一至少现在不再研究了。斯坦认为，每次大地震之前，不太可能突然出现一些人们能看到的東西（在这里指前兆）。

尽管地质学家无法准确地预测地震，但许多研究人员表示，有可能避免这些自然灾害造成的大部分死亡和破坏。1999年土耳其伊兹米特地震发生后，伊斯坦布尔技术大学的地质学家艾库特·巴尔卡（Aykut Barka）警告称，增加的应力可能会在杜兹镇（Düzce）以东约100 km处引发类似的破裂。他的工作说服当局关闭了在伊兹米特地震中已受损的校舍。两个月后，当7.1级地震袭击该市时，这些建筑倒塌了。

### 3. 早期预警

圣安德烈斯断层所在的加利福尼亚州已经开始运行早期预警系统，该系统依靠地震网络来检测地震的开始。这可以提前几秒钟或几分钟通知加州人“伏地、遮挡、手抓牢”，同时自动触发拯救生命的措施，如让火车减速并停止前进。

2002年，土耳其在伊斯坦布尔部署了一个早期预警系统。一旦发生地震，该系统将使火车减速、打开电梯门、关闭工厂的关键工序。同时，该国也颁布了建筑法规，但许多科学家担心这些法规的执行不够严格。伊斯坦布尔海峡大学的退休土木工程师、土耳其地震基金会（Turkish Earthquake

Foundation) 主席穆斯塔法·埃尔迪克 (Mustafa Erdik) 同意该观点。他认为, 无知、无能, 以及建筑师、检查员和建筑商之间的默契都是罪魁祸首。

对于那些多年来一直在敲响土耳其地震警钟的研究人员来说, 2 月份的后果尤令其痛苦。麦克洛斯基表示, 如果你在地图上画了一条红线, 你就会明白这意味着很多人将被杀害, 他们的房子将被摧毁。土耳其地震是一场彻头彻尾的悲剧, 麦克洛斯基希望人们能从中吸取教训。只有如此, 当在地图上画下一条红线时, 将不一定等于灾难性的生命损失。

来源: Shannon H. Forecasting Future Quakes. *Nature*, 2023, 615(7952): 388-389.

---

主送: 中国地震局领导

编发: 中国地震局地震预测研究所