

地震科技前沿快报

2023 年第 9 期（月刊总第 56 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、气压与地下水的相互作用是相对地震波速日变的主要原因

大地震发生之前、期间和之后，地震波速变化研究非常重要。奥地利维也纳大学近期使用尾波干涉测量法的研究结果表明：波速变化可能受到多种环境效应（大气潮汐、温度变化）的影响，与构造应力变化或地震引起的小变化相比，这些影响反而相对较强；大气潮汐对地震波速变化有很强的影响，地下水位引起相对较小的变化也被研究人员观察到，表明尾波干涉测量法可能具有足够的灵敏度；需要过滤掉这些影响，才能揭示波速变化对应力变化的真实反应，尤其是地震前的反应。

2、河水钍浓度可记录包括远震诱发的基岩破裂过程

到目前为止很少有方法和研究可以分析近地表的基岩破裂变化。美国 and 西班牙的合作研究表明，河流中超微量元素钍（Th）的浓度的长期高频测量可以表征邻近流域的基岩断裂过程。钍的浓度模式表现为突然的（亚日级）漂移和双指数衰减，时间常数约为 1 天和 1 周。这种模式与日降水量或大气沉降的季节趋势无关。研究人员利用事件一致性分析方法判断河水钍浓度变化与大气降水、基岩破裂的关系，发现钍浓度与远震引起的地

震运动之间存在微弱的统计相关性，这表明钍浓度可以作为动态地震触发的第一个化学特征。

钍信号提供了一个无需地球物理检测的了解基岩力学过程的窗口，未来对地震活动和水化学特征的研究可以更好的检验有关深层岩-水相互作用控制关键带过程的假设。

3、瑞士巴塞尔增强型地热系统中受孔隙弹性应力松弛、滑动应力转移和摩擦减弱控制的注入后地震活动

诱发地震是限制增强型地热系统发展的一个因素，其因果机制尚未被完全揭示，尤其是注入后地震的因果机制。为了更好地理解瑞士巴塞尔增强型地热系统中诱发地震的机制，研究人员进行了水力-力学耦合模拟，分析了基于监测到的地震活动构建的离散先存断层网络的塑性响应。结果表明，在流体注入过程中，位于注入井附近的断层主要由于孔隙压力增加，而触发了破裂。孔隙弹性应力作用范围比压力扩散更广，对远处断层的影响更大，并且其稳定性或破坏性取决于断层的方向。注入停止后，孔隙弹性应力松弛导致先前稳定的断层立即破裂。剪切滑移应力转移也有助于远处断层在注入后再活化，特别是在具有滑动诱导的、摩擦减弱的断层中，其作用更为显著。

气压与地下水的相互作用是相对地震波速日变的主要原因

奥地利维也纳大学的研究人员分析了地震波速在短时间（数小时）内的变化，他们使用尾波干涉测量法检查了德国南部地震阵列连续 5 个月的数据，发现相对地震波速 (dv/v) 显示出 10^{-4} 量级的变化。速度时间序列谱图中包含强烈的每日 (**daily**) 和亚日 (**sub-daily**) 变化特征，表明地震波速的每日和亚日变化主要是由大气潮汐引起的。此外，温度变化对地震波速的每日变化具有次级影响。研究采用的解释性模型侧重地下水位的深度变化，将大气压力（在地球表面的加载和卸载）与地震波速的变化联系起来。分析表明，气压和地下水的相互作用对地震波速的日变化有相当大的影响。该项研究结果强调，在将地震波速变化用于流体和应力变化的现场检测之前，需要考虑环境对地震波速的影响。相关成果发表在 2023 年 4 月的 *Geophysical Research Letters*。

目前，有关大地震发生及其前兆阶段的研究仍在进行中，测量地震波速的变化是其中一种重要手段。但是，环境效应，例如温度，降水等因素，同样会对地震波速产生一定影响。尽管前人的研究结果表明，每日的温度变化以及潮汐力会对地震波速产生持续影响，但是，每日的地下水水位变化以及大气压变化对地震波速的影响很少被研究。

为了探究环境效应对地震波速的影响，研究人员分析了来自德国南部一个高度敏感的地震阵列的数据。该阵列被称作德国实验地震系统（German Experimental Seismic System, GERES），位于德国巴伐利亚州东南部的巴伐利亚森林，靠近捷克共和国和奥地利的边界。其由 25 个垂直短周期地震仪组成，这些地震仪被安装在中心站 A0 周围 4 个同心圆的 3~5 m 深的孔内。研究人员使用了来自 GERES 的 5 个月（2014 年 1 月至 2014 年 6 月）的连续数据。为了监测近地表的变化，研究人员使用了尾波

干涉测量技术 (coda wave interferometry)，并将尾波到达时间变化 (dt/t) 转化为相对地震波速变化 (dv/v)。

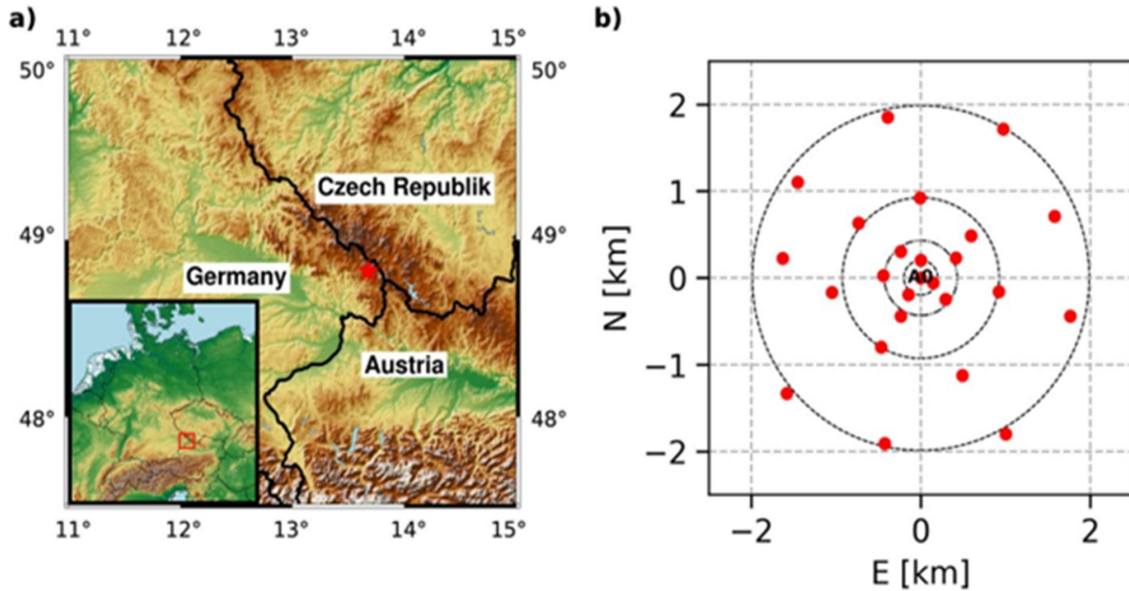


图 1 a: 德国 GERES 阵列的位置; b: GERES 阵列的配置信息 (红点表示短周期地震仪的位置)

1. 相对地震波速变化及谱分析

图 2a 显示了 4—8 Hz 频带的地震波速变化情况，表明存在 10^{-4} 数量级的 dv/v 的扰动，这与前人的研究结果相似。地震波速存在短期（每日）变化和长期（每月）变化。长期变化的驱动力可能是大气降水，包括降雪及其造成的荷载，以及大气压变化。同时，长期变化在不同的频带都存在。

通过傅里叶变换得到 dv/v 在每天的周期性。结果发现，在每天 1 个循环 (S_1) 和 2 个循环 (S_2) 的位置出现持续性的强振幅 (图 2b)。通常情况下，它们也被叫做日循环和半日循环。此外，在每天 3、4、5 个循环的位置也能观察到较弱的振幅。但是，没有在每天 1.93 个循环的位置观察到强峰，研究人员曾预期固体地球的潮汐作用将在该位置引起强峰 (M_2)。沿着时间轴的堆栈验证了上述观测结果，并显示了强峰及其比率变化 (图

2c)。此外还发现，对于最高频率， S_1 峰占主导地位，而随着频率的降低， S_2 峰变得越来越强。

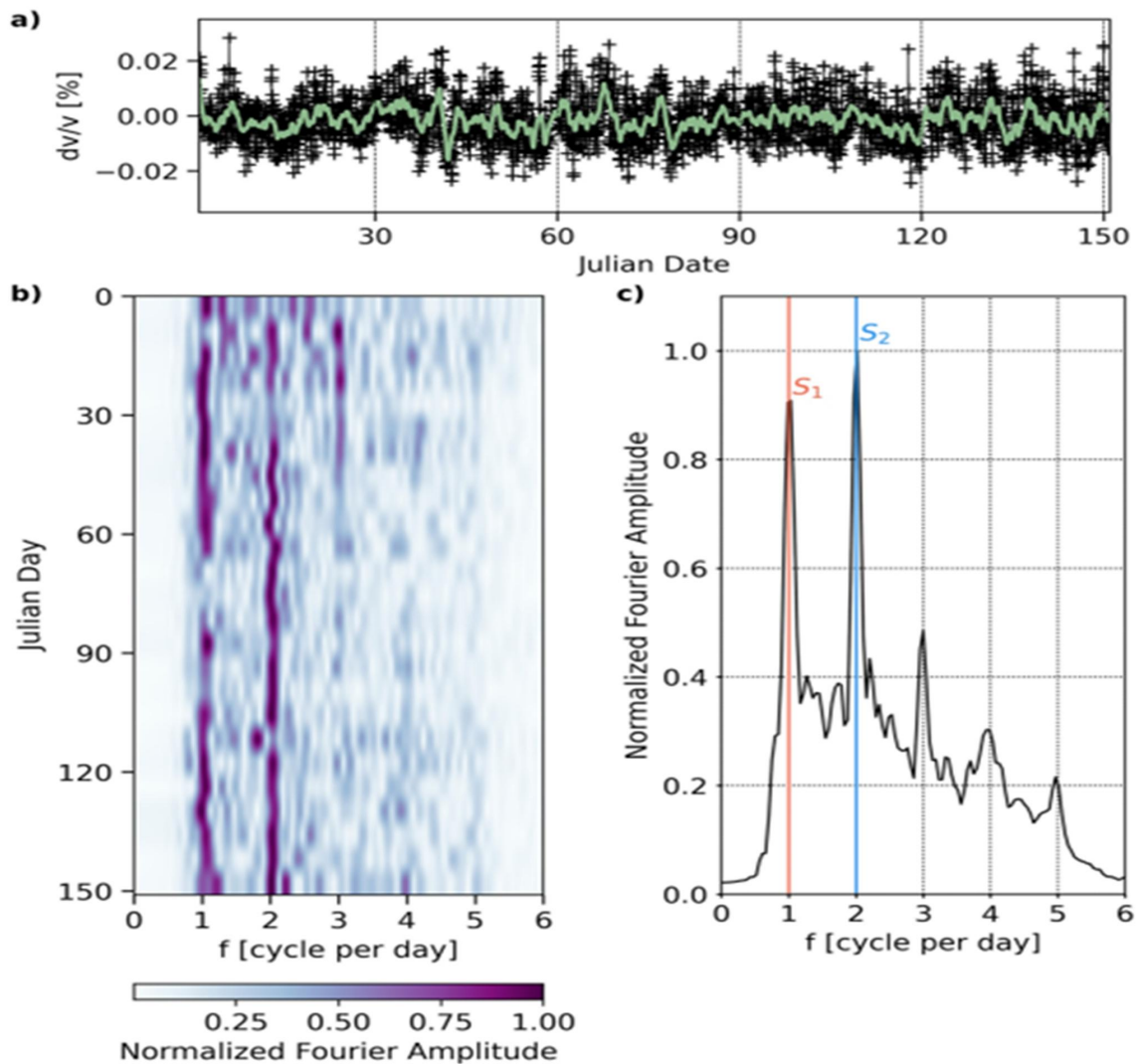


图2 a: 4—8 Hz 频带的 dv/v 时间序列; b: 7 天滑动窗傅立叶分析的二维谱图;
c: 滑动窗堆栈

2. 可能引起地震波速变化的环境效应

环境效应分为两类，即周期性的和非周期性的。大气降水等属于非周期效应，不能用来解释观测到的地震波速的周期性变化。温度和大气压很大程度上属于周期性效应，图 3 显示了这些效应的谱图与速度时间序列谱图的组合情况，它们均表现出每日和亚日级的规律性。

潮汐的谱图（图 3 中的插图）显示出了 S_1 、 S_2 以及 M_2 的峰值，但数据分析结果并未发现 M_2 的峰值。因此认为，固体地球潮汐对地震波速的影响相对较小。温度的谱图显示较强的 S_1 和较弱的 S_2 ，表明温度对 S_1 有贡献，但是对 S_2 贡献很小。气压的谱图显示出较强的 S_1 和 S_2 ，和地震波速变化特征一致。因此，研究人员认为，气压的变化主导了地震波速的日变化。

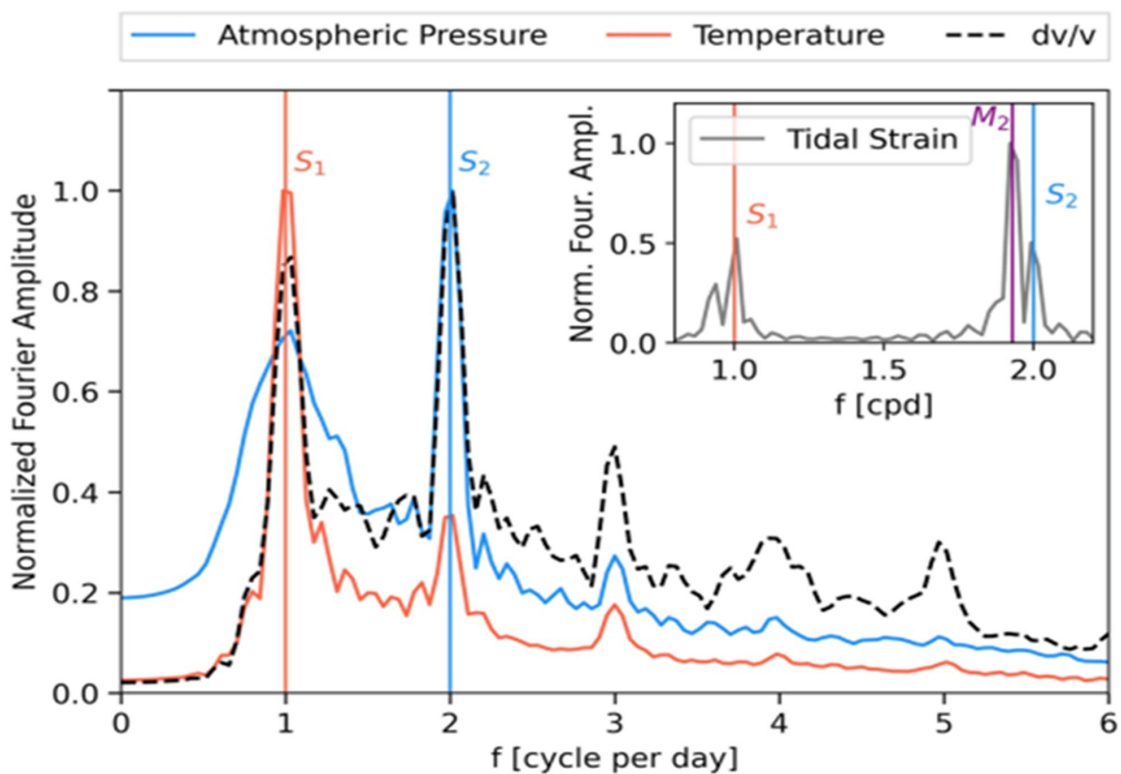


图 3 气压（蓝色）、温度（红色）的谱图与速度时间序列谱图（黑色）的组合（插图显示了 GERES 阵列在理论上的潮汐应变谱，垂线表示谱中的主要周期）

3. 含水层与气压的相互作用和温度变化

气压具有每日和亚日的变化特征，这种现象叫做大气潮汐。与固体和海洋潮汐相比，重力在大气潮汐中的作用要小得多。 S_1 与空气的加热和冷却直接相关，而 S_2 的形成原因仍在讨论中。

为什么气压对 dv/v 有如此大的影响呢？一种观点认为，气压变化的直接影响是地球表面质量的加载和卸载，当大气压增加，破裂会发生闭合，导致地震波速增加。但是，当流体存在时，孔隙压力增加会使地震波速降低——这种影响相对较小，不能产生地震波速 10^{-4} 数量级的变化。

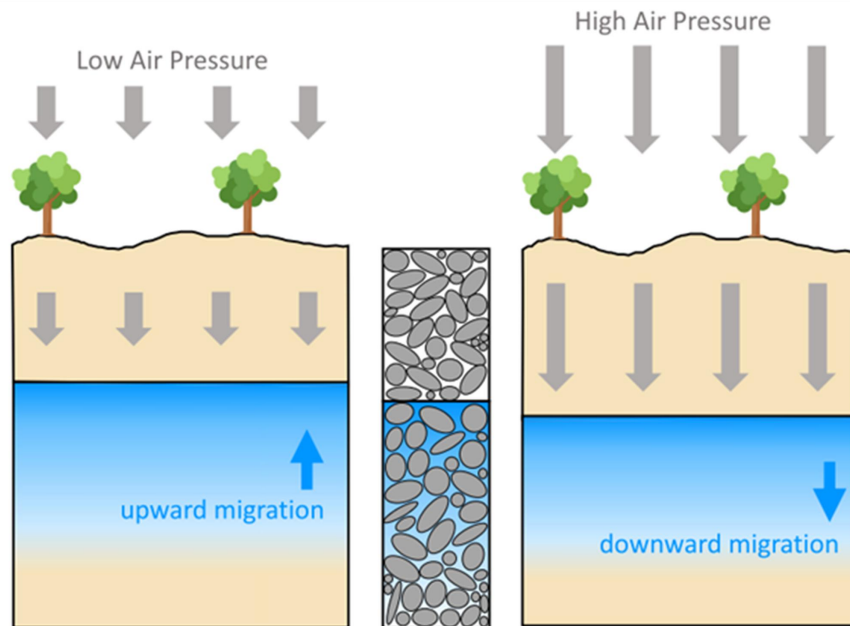


图 4 气压与地下水位相互作用的示意图

另外一种机制可能是气压变化导致了地下水位的变化，气压升高会导致地下水位的下降。研究认为，地下水位的下降改变了近地表的水饱和度，而水饱和度的变化会导致地震波速的显著改变。这种机制可以解释观察到的地震波速 10^{-4} 数量级的变化。

除了气压外，温度也会对地震波速产生次一级的影响。对于 S_1 而言，热弹性应变大约在 10^{-8} 数量级。研究发现，主要峰值的振幅比会随着频率的变化而变化。当 S_2 振幅增加时， S_1 振幅会发生衰减。在几米之内， S_1 振幅不再占主导地位。研究人员将这些现象解释为：随着深度的增加，热弹性应变的影响减弱。因此， dv/v 的变化是温度和压力变化的综合结果，但是主要受压力控制。

4. 比较分析

与其他研究相比，本研究并未发现持续的潮汐作用引起的 M_2 峰值。即使在某些站台观测到了，但也比其他研究中观测到的 M_2 弱得多。可能是因为测量精度不同，或者测量地区不同。该项研究的地点远离海岸线，而且地层岩石较硬，所受潮汐作用较小。因此，地震波速的变化特征似乎在一定程度上取决于试验地点，包括地质环境及其位置。此外，结果还取决于所选择的频带。较低的频率对深度更敏感，这可能受到了含水层和大气潮汐相互作用的更多影响，而频率越高，这种影响越小。

5. 展望

环境地震监测对地球物理监测具有重要意义，可以帮助更好地了解地球壳在构造事件之前、期间和之后的行为，特别是在地震活跃区。然而，确定的速度时间序列可能受到了多种环境效应的影响，与构造应力变化或地震引起的小变化相比，这些影响可能相对较强。该项研究有助于过滤掉这些影响，以揭示地球对应力变化的真实反应，尤其是震前反应。

本研究没有观察到地球潮汐的强烈影响，相反，研究人员发现，大气压力变化（大气潮汐）对相对地震波速变化有很强的影响。因此，引入了一个联系大气荷载和观测到的 dv/v 变化的模型。进而发现，水或流体对 dv/v 有很大影响。未来，地下水和地下水库的地震研究还有很大发展空间。地下水位相对较小的变化也被研究人员观察到，表明所采用技术可能具有足够的灵敏度，这将为地下水地球物理学开辟新的方向，例如，进行储水层表征，以及帮助更好地了解地热储层。

来源：Kramer R, Lu Y, Bokelmann G, *et al.* Interaction of Air Pressure and Groundwater as Main Cause of Sub-Daily Relative Seismic Velocity Changes. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(7): e2022GL101298.

河水钍浓度可记录包括远震诱发的基岩破裂过程

裂缝 (**fracture**) 是流域水文学和流域地球化学的重要组成部分, 但是由于来自地下监测的挑战, 人们对破裂动力学的理解仍十分有限。来自美国和西班牙的多名科学家的研究表明, 对河流中超微量元素钍 (**Th**) 的浓度的长期高频测量可以表征跨越科罗拉多州邻近流域的基岩断裂过程。钍的浓度模式与除铍和砷以外的其他所有溶质不同, 其表现为突然的 (亚日级) 漂移和双指数衰减, 时间常数约为 1 天和 1 周。这种模式与日降水量或大气沉降的季节趋势无关。地下水中的钍分析与基岩释放和与河水混合后的稀释一致。大多数的钍浓度漂移在距离现场 50 km 的地方没有可检测到的地震特征, 这表明钍浓度可以揭示无震破裂或断裂事件。然而, 研究人员发现, 钍浓度与远震引起的地震运动之间存在微弱的统计相关性, 这表明钍浓度可以作为动态地震触发的第一个化学特征。相关研究成果发表在 2023 年 4 月的 *Nature Communications*。

关键带 (**critical zone**) 底部基岩的破裂使地质元素能够进入集水区, 以及下游水文系统的河流和生物地球化学循环。破裂使岩石表面暴露在地下水中, 引发了化学风化反应, 最终将原岩转化为土壤, 并提供了连接地下水和地表水的流体流动通道。尽管目前一些方法可以被用来观察破裂, 例如: 钻孔纪录和主动地球物理测量能够观察破裂的静态结构; 被动地震监测方法对于断层运动较为敏感; 地表地震研究可以捕获与应力和风化作用相关的岩石破裂。但是, 到目前为止很少有方法和研究可以分析近地表的基岩破裂变化。

为了探究河水中钍浓度是否与基岩破裂有关, 研究人员首先利用了在美国科罗拉多州大东河流域实施的监测项目获得的数据。该项目在东河 (**East River**) 支流的 **Pump House (PH)** 位置和煤溪 (**Coal Creek**) 支流的

Coal-11 位置进行高频率的（每日）河水数据采集。另外，在其他位置也进行了频率较低的样品采集。之后，研究人员利用事件一致性分析（Event Coincidence Analysis, ECA）方法判断河水钍浓度变化与大气降水、基岩破裂的关系。

1. 河水化学特征

数据显示，河水中许多大量元素和微量元素浓度的变化规律与矿物反应和生物地球化学循环的季节变化趋势一致。但是，东河和煤溪中的钍浓度表现出不寻常但可重复的动态变化，其特征是突然增加到高于背景值，然后衰减。在 2016—2018 年的 20 个月内，PH 位置记录了 22 个这样的变化循环。钍浓度的瞬态由具有快速和慢速指数衰减的双指数拟合获得，时间常数分别为 0.38~1.6 天和 1.8~8.2 天。另外两种元素，即砷和铍，在东河中同时与钍表现出漂移。在煤溪中，没有观察到钍与砷、铍或任何其他元素之间的相关性，可能是因为这些元素的背景浓度及其波动在受采矿影响的流域（煤溪）中要大得多。

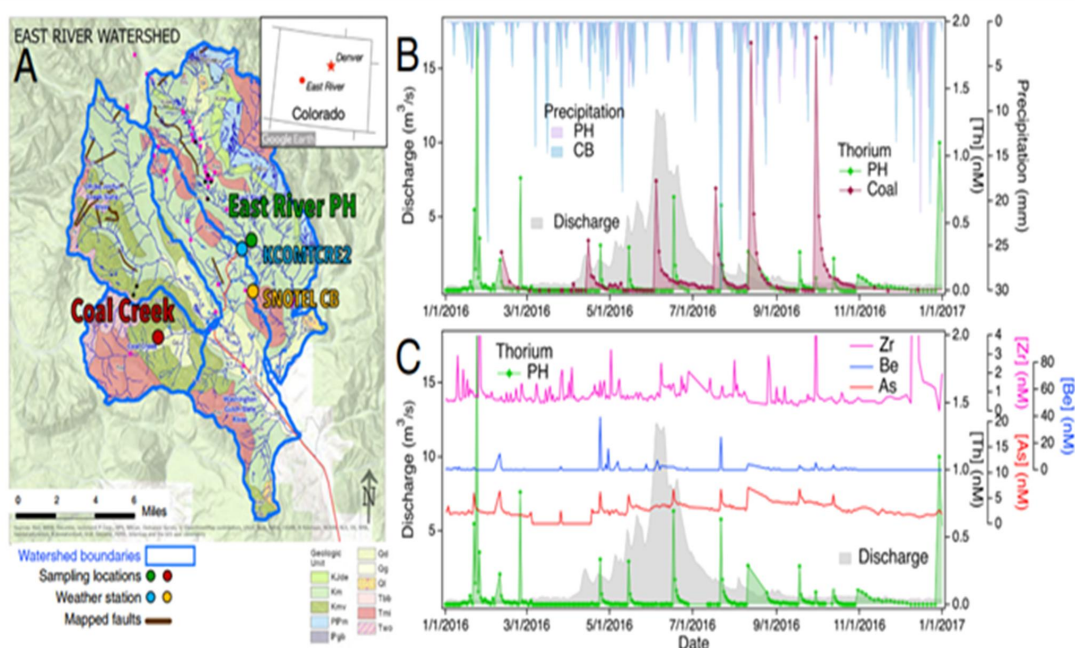


图 1 河流位置以及河水地球化学数据测量

2. 钍与降水和其他事件的相关性

降水可能导致溶质水平的上升，因为大降雨事件可以迅速使土壤和渗透区饱和，将溶质冲刷到地下水中。降水也会导致大气中气溶胶的湿沉降，比如来自科罗拉多州燃煤发电厂和科罗拉多河流域上游逆风（upwind）的燃烧产物。然而，在以 0.5~30 mm 为每天降雨阈值，以 1~2.5 天为时间窗口的 ECA 分析中，并没有发现降水与钍浓度漂移具有相关性。

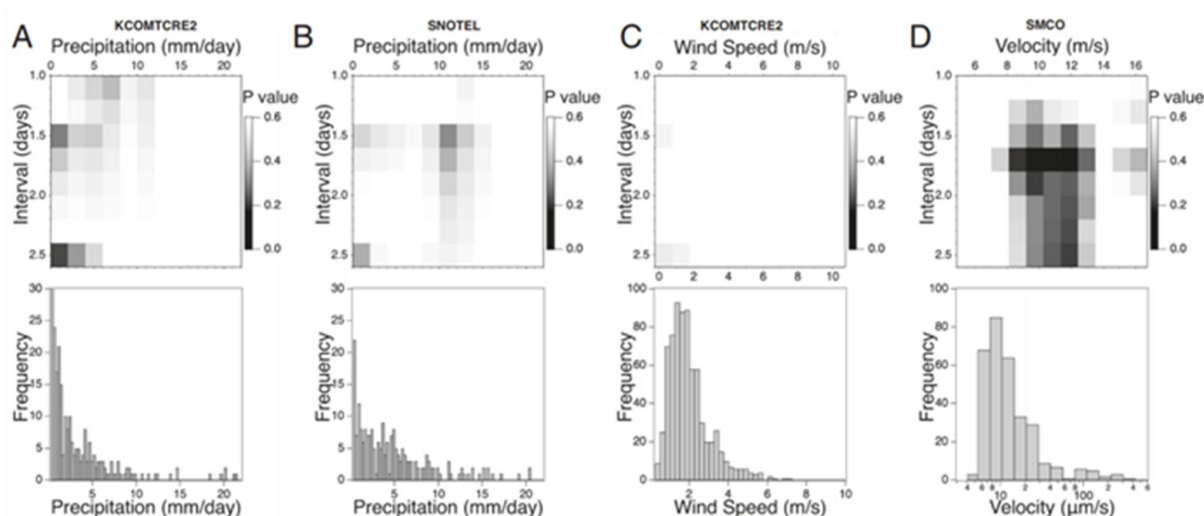


图 2 钍浓度漂移前，日降水、风速和地震活动（上）的 ECA 分析以及降水总量、风速和地面运动的直方图（下）

来自科罗拉多高原并由冬季风暴输送的矿物粉尘干沉降对圣胡安山区积雪的反照率有显著影响。但是，记录到的雪尘（dust-on-snow）事件的季节性和频率与东河的钍观测结果并不相符。此外，在圣胡安山脉收集的矿物粉尘的元素浸出研究发现，钍只有在强酸性条件下才会释放，而东河并不具备这种强酸条件。

东河和煤溪两个支流都位于沉积岩之下，可以通过水文驱动的风化作用释放钍。然而，通过页岩基岩风化而释放到地下水中的主要阴离子和阳离子（如硫酸盐、钙）的浓度数据没有显示出与钍同时发生的突然浓度变

化。此外，去趋势的 SO_4^{2-} 和 Ca 数据与钍也没有相关性。因此，水文驱动的风化趋势不会导致钍的突然漂移。

东河流域偶尔会发生山体滑坡，这可能会将部分风化的岩石和土壤带入河中，并可能加剧风化。滑坡会引起河水浑浊度的变化，但是，河水浑浊度数据显示，只有 3 次漂移可能与钍有关。当树木遭受大风时，树根会给岩石施加压力并使其断裂，但是平均风速和最大风速与钍的漂移并不具有相关性。此外，在 ECA 分析中并没有小于 0.41 的 P 值（获得观测到的一致性次数的概率）的出现（图 2c）。

3. 地下水化学特征

从沿山坡横断面监测井获得的地下水浓度数据提供了钍起源于地下基岩的野外证据。实地研究观察到短暂的钍浓度漂移（伴随着砷），如在 PLM3 井的 3.7 m 处，但这并没有相应的近地表钍浓度变化。地下水中钍的最大浓度（1.8 ppb）明显高于这一时期在 PH 位置的钍浓度（0.07 ppb）和整个 20 个月期间的钍浓度（0.95 ppb）。这些比较表明，钍源于地下，而不是大气。

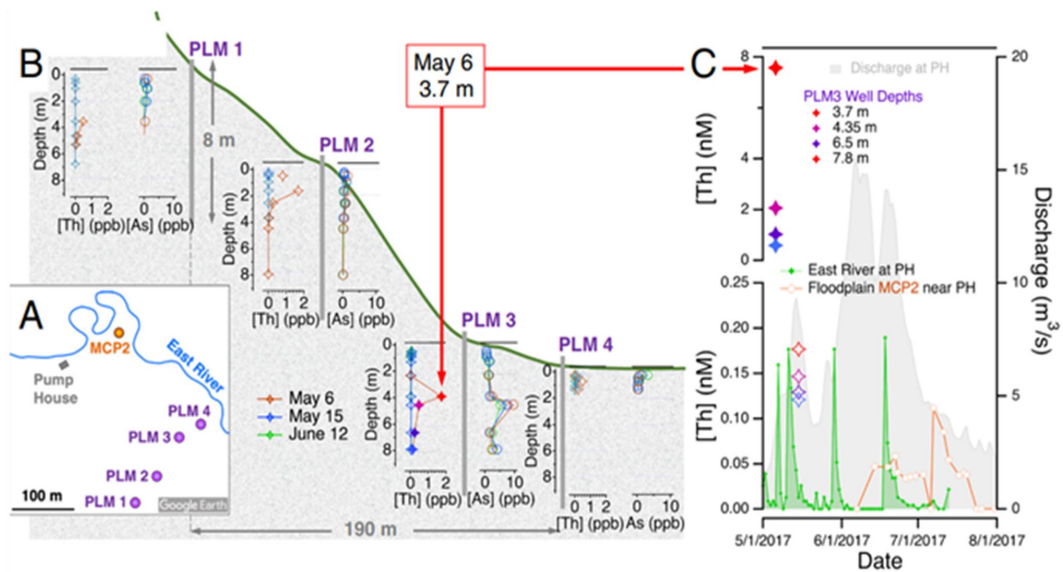


图 3 在较深的地下水 (> 3 米) 中观察到钍和砷的耦合漂移，但在山坡或洪泛区较浅地下水中没有观察到

4. 钍浓度与地震的关系

在这一时期，该地区有 4 个地震台站处于运行状态，其中 SMCO 站距离最近，约 50 km。地震数据包含了较低强度的地面运动记录，以及加州或内华达州地震引起的高强度地面运动记录。ECA 分析结果揭示了 P 值在 0.12~0.25 之间时的地面运动阈值和时间间隔（图 2d）。尽管获得的最低 p 值（ $p=0.12$ ）没有达到被认为具有统计学意义的阈值（ $p=0.05$ ），但这些值低于从降水数据集所获得的 p 值。此外，ECA 分析显示了一组低 p 值，这在两组降水数据中都不存在。因此，ECA 分析表明，一部分基岩断裂过程可能是由远震引起的小型地面运动引发的。

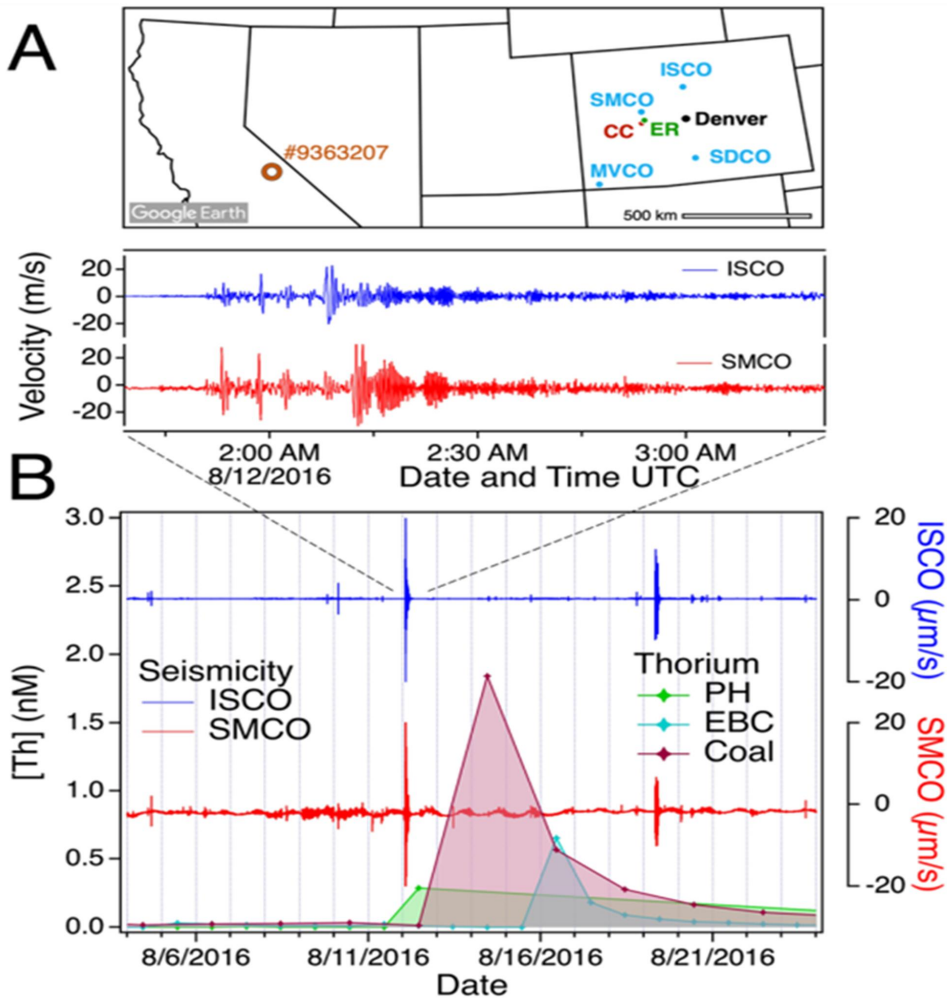


图 4 地震活动性与钍浓度的变化

上述观察结果表明，基岩的突然破裂可以产生可检测到的、输入地下水和溪流的微量溶质。该过程可能包括产生新的水岩相互作用的过程，例如破裂或滑动，以及改变地下水力路径的过程。由于溶质在邻近的流域中表现出快速的增加，研究人员推断了跨越河流的断裂带的作用，其中一些已经被绘制在图 1a 上。深部基岩断裂构造是山区集水区补给低地的重要通道，有利于流域间水的流动。

此外，研究人员尝试分析了流域断层动力学的钍或其他化学特征是否存在于其他的高频河水数据中。但是，满足高频数据条件的流域很少，如法国的 **Kervidy-Naizin** 流域。该流域呈现在片岩上集约耕种的低地形地貌，日常的钍测量显示，其河水中钍的变化与东河流域完全不同。去趋势的钍和钠数据的时间和相关分析表明，**Kervidy-Naizin** 的两种溶质都受到水文变化的影响。与上覆土壤相比，基岩裂缝在水的储存和输送中往往起着更大的作用，因此，山地流域可能最有利于识别破裂过程的地球化学特征。

钍信号提供了一个无需地球物理检测的了解基岩力学过程的窗口，未来对当地地震活动性和水化学特征的研究可以更好的检验有关深层岩-水相互作用控制关键带过程的假设。

来源：Gilbert B, Carrero S, Dong W, *et al.* River thorium concentrations can record bedrock fracture processes including some triggered by distant seismic events. *Nature Communications*, 2023, 14: 2395

瑞士巴塞尔增强型地热系统中受孔隙弹性应力松弛、

滑动应力转移和摩擦减弱控制的注入后地震活动

诱发地震是限制增强型地热系统（EGS）发展的一个因素，其因果机制尚未被完全揭示，尤其是注入后地震（**post-injection seismicity**）的因果机制。为了更好地理解瑞士巴塞尔 EGS 中诱发地震的机制，研究人员进行了水力-力学耦合模拟，分析了基于监测到的地震活动构建的离散先存断层网络的塑性响应。结果表明，在流体注入过程中，位于注入井附近的断层主要由于孔隙压力增加，而触发了破裂。孔隙弹性应力作用范围比压力扩散更广，对远处断层的影响更大，并且其稳定性或破坏性取决于断层的方向。注入停止后，孔隙弹性应力松弛导致先前稳定的断层立即破裂。剪切滑移应力转移也有助于远处断层在注入后再活化，特别是在具有滑动诱导的、摩擦减弱的断层中，其作用更为显著。相关研究成果发表在 2023 年 4 月的 *Communications Earth & Environment*。

地热能开发是实现净零排放目标的关键低碳措施，而诱发地震是地热能开发的主要障碍之一。在增强型地热系统（EGS）中，通过新建和/或刺激裂缝网络，使流体循环传导热量至生产井，以增加发电量。感知到的诱发地震不仅危害人类，损坏建筑和基础设施，还会对公众产生负面影响，可能导致项目被取消。在过去 20 年的研究中，讨论了多种触发机制的存在，包括孔隙压力增加、孔隙力学应力变化，以及无震或震动滑移应力转移。孔隙压力扩散也被视为注入后诱发地震的一种机制，因为在停止注入后，孔隙压力仍在储层中传播。此外，地震的相互作用也是一种潜在机制。

虽然相关研究取得了进展，但高震级注入后地震活动的最终原因仍未完全了解。特别是，巴塞尔深层热能开发项目（已停止 15 年）的注入后

地震活动的原因，尚不清楚。已有研究提出了一些潜在因果机制，但对于解释观察到的地震响应，不同机制及其组合的作用仍需深入分析。

在本研究中，研究人同时模拟了孔隙压力扩散、孔隙弹性应力再分布、剪切滑移引起的应力相互作用，以了解它们对巴塞尔 EGS 在流体注入中和注入后诱发地震活动的影响。研究建立了一个基于巴塞尔地震观测的显式断层模型，并解决了与水力刺激相关的水力-力学耦合问题，以确定不同储层位置发生破裂的机制。其中关键在于，模拟了将流体注入到嵌入在结晶基底的断层网络的情景，重现了巴塞尔 EGS 的运行情况。在此基础上，研究人员分析了剪切滑移激活引起的压力扩散、孔隙力学应力、应力变化的作用，以及剪切滑移激活后的摩擦减弱在注入后地震活动激活中的作用。

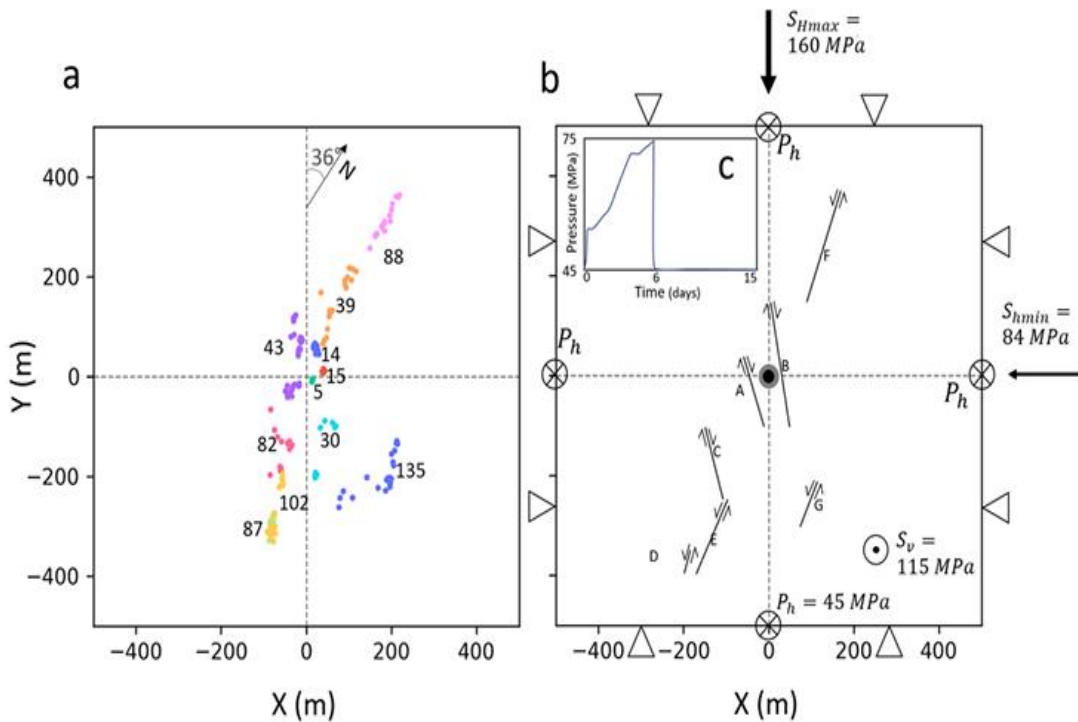


图 1 模型的几何形状和条件

研究人员重新分析了巴塞尔 EGS 在注入中和注入后的诱发地震活动，并通过流体流动和岩石力学的耦合数值模型来确定触发机制，该模型中包

含一组基于现场观测到的地震活动所确定的先存断层（A、B、C、D、E、F、G）。尽管有一些简化的假设，模拟结果在时间和空间上与观测到的诱发地震活动非常一致。分析表明，考虑孔隙弹性应力和非弹性行为（如剪切滑移应力转移），对于再现断层的重新活化至关重要。

通常认为，孔隙压力扩散是 EGS 中地震的主要触发机制。然而，这种观点可能过于简单，导致对诱发地震活动，尤其是注入后地震活动的预测不准确。尽管孔隙压力对断层有直接影响，特别是距注入井较近的断层，但孔隙压力与其他触发机制是相关的，应考虑这些机制，以进行可靠的诱发地震活动估计。

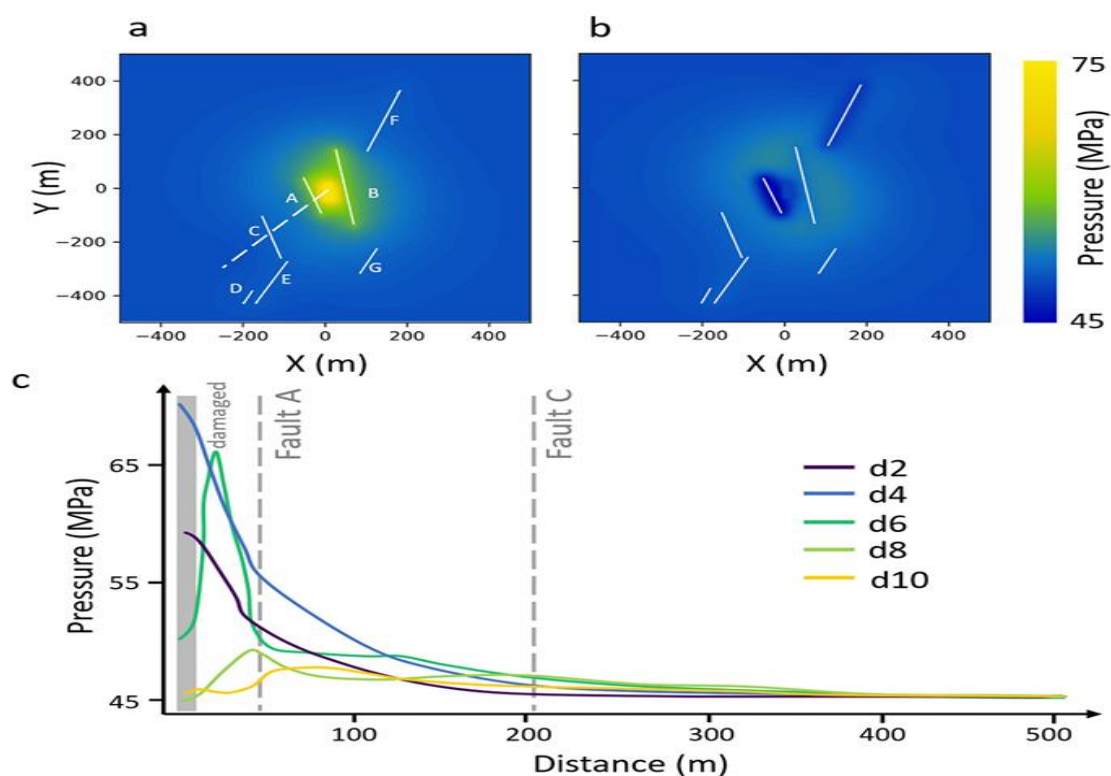


图 2 孔隙压力演化

在注入过程中，岩石的孔隙力学体积膨胀表现出比孔隙压力扩散更广泛和更快的特征。这种孔隙弹性效应是由流体注入引起的压缩载荷驱动的，

可以根据断层的方向来改善或减弱其稳定性。注入停止后，压力梯度快速消散，孔隙弹性应力消失，如果进行排气，情况会更加明显。在注入后，孔隙压力和孔隙弹性应力的突然下降是储层中某些区域立即发生诱发地震活动的原因。最后，剪切滑移应力转移影响附近断层的稳定性，并增强了诱发地震活动。

在巴塞尔 EGS 的注入中和注入后诱发地震活动中，孔隙压力扩散、孔隙弹性应力和剪切滑移应力转移的组合可解释断层破裂模式。为了量化每种机制在断层再活化中的作用，需要估计在注入中和注入后，每个断层的再活化部分分别是由哪种机制引起的。这些机制包括直接孔隙压力效应、孔隙弹性效应（如孔隙压力变化、诱发的孔隙力学应力）、孔隙弹性效应与应力转移的组合。为此，研究人员通过水力力学弹性模型对每个断层网格元素的行为进行了分析。结果表明：如果通过该模型估算的孔隙压力达到临界压力，则认为这部分断层是由直接孔隙压力效应所重新激活的；如果通过该模型估算的库仑破裂应力为正值，则认为这部分断层是由孔隙压力和孔隙弹性的组合效应所重新激活的。最后，如果水力力学粘弹性模型估算得到的塑性应变增加值为正值，则认为这部分断层是由所有机制的组合效应所重新激活的。

在注入井附近的断层，孔隙压力对其稳定性具有重要影响，在停止注入后，这种影响变小。孔隙弹性效应影响范围更广，但取决于断层的方向和位置。静态应力转移是导致没有受到孔隙压力和孔隙力学应力影响的断层（断层 C、E）被重新激活的原因。断层 D 上增加的塑性应变不足，因此没有被重新激活。注入后的断层再活化主要归因于孔隙弹性迅速消失，稳定效应迅速逆转，而孔隙压力在停止注入后仍然扩散（断层 F）。这些机制与断层再活化引起的连续应力重分布相结合，引发了注入后的诱发地震活动。

尽管本研究的建模方法有助于确定巴塞尔诱发地震活动的触发机制，但模拟结果不能完全解释所有断层的再活化，这可能是因为在建模中将裂缝网络简化为了几个断层。本研究在建模中的另一个简化是采用了二维域，虽然采用横跨垂直断层的二维水平截面来表示断层再活化是合理的，但静态应力转移在这个假设下是有限的。

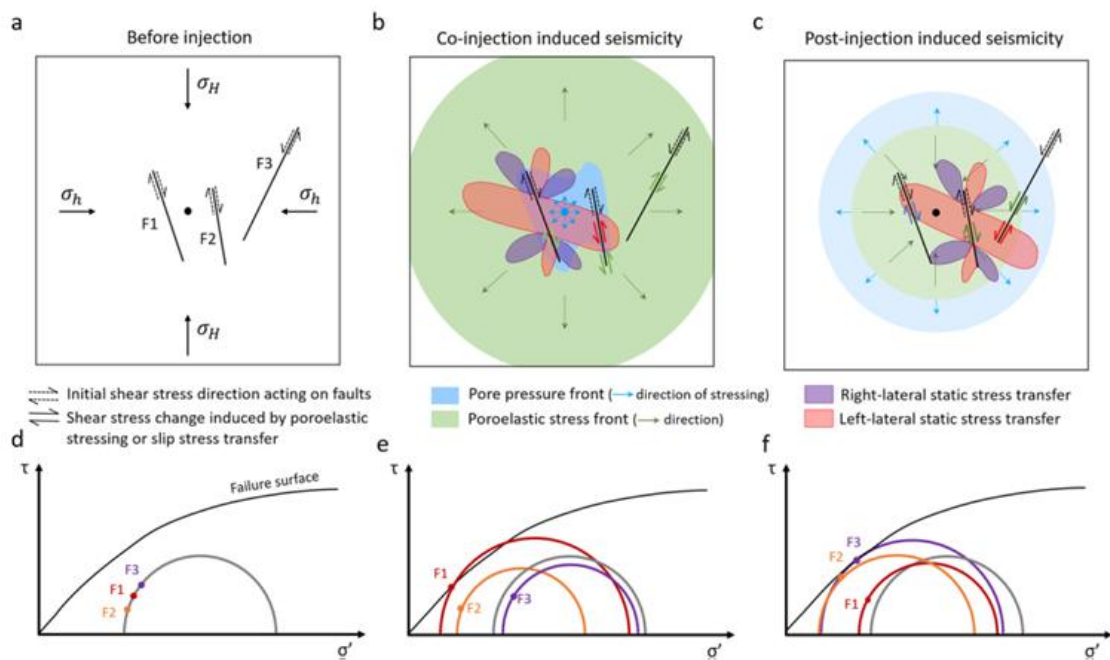


图3 诱发地震的触发机制示意

本研究开展的新型分析推动了对 EGS 在水力刺激下诱发地震的物理过程的理解。在注入过程中，断层破裂主要发生在注入井附近；在注入停止后，断层破裂则发生在储层内部更远的位置。注入过程中，孔隙压力扩散和孔隙力学应力是主要的触发机制。孔隙力学效应在注入过程中的传播范围比孔隙压力扩散更广、更快。此外，孔隙弹性应力取决于断层与注入井的方向关系，在注入过程中会使断层稳定或失稳，在注入停止后，由于孔隙压力迅速下降而产生相反效果。

在注入停止后，孔隙压力继续向前传播，导致注入井远处的孔隙压力增加，可能引发一些地震事件。在注入井远处的断层中，剪切滑移应力转移成为主导机制。通过对实时监测到的地震活动进行分析，可以校准重新激活断层的实际摩擦角，提高对储层稳定性预测的准确度。对于 EGS 中诱发地震因果机制的深入理解，将有助于提高对诱发地震的预测能力，这对于地热项目的广泛发展和管理至关重要。

来源: Boyet A, De Simone S, Ge S, *et al.* Poroelastic stress relaxation, slip stress transfer and friction weakening controlled post-injection seismicity at the Basel Enhanced Geothermal System. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4(1): 104.