

地震科技前沿快报

2024 年第 3 期（月刊总第 62 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、最大可信地震危险的不确定性全场景分析

如何准确评估特定地点的地震危险性是降低灾害风险的关键问题。特定断层的最大可信地震由于具有不同震源过程的潜在场景的存在而表现高度不确定性。研究人员基于确定性宽频带地震动模拟方法，在充分考虑地震物理过程的基础上，实现了未来潜在地震的不确定性全场景分析。该方法可以获得更丰富的地震危险性评价结果，从而使最大可信地震危险性评估更加现实和准确，在地震工程领域具有很大的应用潜力。

2、应力传递速度超过注入引起的非震滑移并诱发地震

了解地下流体注入如何在孔隙压力扩散无法到达的地区引发地震活动至关重要。研究人员发现在注入诱发的非震滑移之前，显著的应力传递能够以更高的速度传播，并且这是远震触发的可能机制。应力传递的速度取决于背景应力水平和注入速度，断层上的预应力越大，注入速度越快，应力传递速度越快，并且几乎可以比非震滑移前缘的传播速度高一个数量级。

3、贝叶斯推理阐明断层系统结构和持续盐水处理引起的反复地震

自 2022 年 11 月起，在加拿大阿尔伯塔省中北部皮斯河（Peace River）

附近的一个地震相对平静的位置开始出现地震序列。然而，关于该地震序列的成因存在争议。研究人员通过精确的震源定位和贝叶斯联合推断发现，一个断层系统可以在盐水处理开始的 10 多年后被激活，并且继续处理可能会导致地震活动的复苏。

最大可信地震危险的确定性全场景分析

大地震因其巨大的破坏力和不可预测性而成为现代社会的主要威胁之一。特定断层的最大可信地震 (**maximum credible earthquake, MCE**), 即可能发生的最大震级地震, 有许多具有不同震源过程的潜在场景, 从而使未来的地震危险具有高度的不确定性。研究人员提出了一种全场景分析方法, 通过多种场景的确定性宽频带模拟来评估 **MCE** 危险。全场景分析是通过充分考虑未来潜在地震的所有不确定性来实现的。研究人员通过在 **0~10 Hz** 范围内模拟 **2200** 万个 **MCE** 场景, 展示了该方法在中国溪洛渡大坝地震危险性分析中的应用。该方法可提供所有地震危险水平的任意强度测量、地震动时间序列和空间地震动场, 使 **MCE** 危险评价更加真实、准确, 在地震工程中具有很大的应用潜力。相关研究成果发表在 **2023** 年 **10** 月的 *Nature Communications*。

地震具有严重的破坏性和时间、空间上的不确定性, 是威胁人类社会的主要自然灾害之一。如何准确地评估特定地点的地震危险性是降低灾害风险的关键问题。确定性宽频带地震动模拟已被历史地震记录和公认的经验地震动预测模型所验证, 然而, 基于物理的地震危险性分析方法通常局限于低频范围。事实上, 高频地震动在工程结构抗震设计中具有重要意义。此外, 由于没有全面考虑地震的复杂物理过程, 获得的地震危险性结果可能不能充分反映目标地点的未来潜在地震危险。

研究人员开发了一种基于完全确定性宽频带地震动模拟的 **MCE** 全场景地震危险性分析方法。该方法从一些基本的地震信息 (包括历史地震和目标地点附近的断层结构等) 开始, 来确定 **MCE** 的震级和潜在地震带。然后, 在给定震级和潜在地震带的基础上, 考虑地震断层上震源、滑动分布、破裂时间、滑动角等断裂过程中的所有运动学参数, 采用蒙特卡罗方

法生成 MCE 场景集。利用预先计算的应变格林张量获得多维震源模型
子断层 (subfault) 格林函数后, 直接合成目标位置的所有地震场景的宽频
带地震动。最后, 对各场景下的地震动强度测量结果进行分析, 得到地震
危险性。

由于该方法的复杂性和计算成本, 其更适用于评估极端地震 (发生在
目标场地附近) 作用下重大工程项目的地震危险性分析。此外, 该方法可
以给出指定地震危险性等级和相应宽频带地震动的地震场景, 所以可直接
用于基于性能的抗震设计和分析。同时, 该方法生成的目标场地周围的空
间地震动场在大坝、桥梁等大跨度结构的抗震设计中也十分重要。

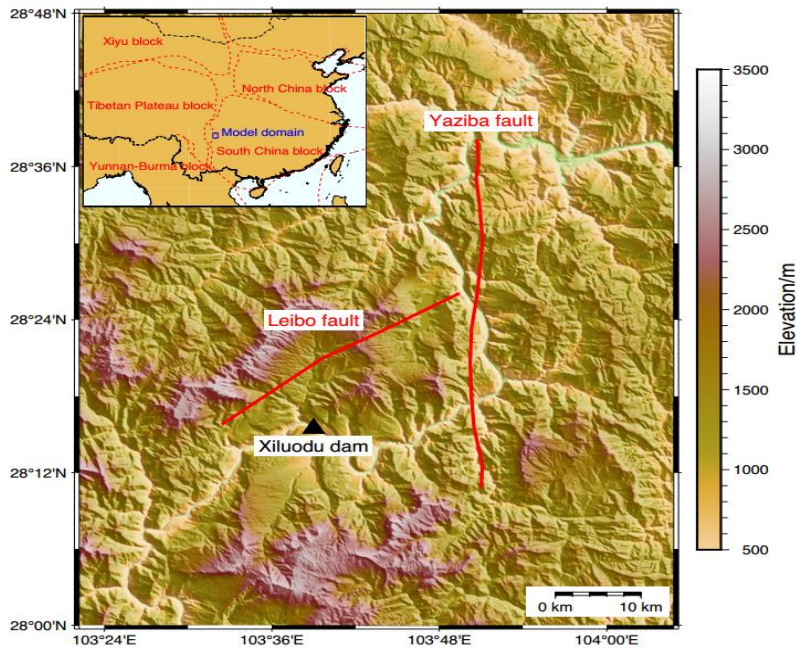


图 1 溪洛渡坝址的周边情况

溪洛渡大坝附近有两个重要的断裂构造, 一个是楔子坝 (Yaziba) 断
裂, 潜在最大震级为 7.5 级, 另一个是雷波 (Leibo) 断裂, 潜在最大震级
为 7.0 级。考虑到断层位置的不确定性, 研究人员假设在主断层两侧 5 km
范围内的地震带内可能出现 MCE, 并在地震带内每 1 km 设置一次 MCE

断层破裂。在溪洛渡大坝地震危险性分析中，楔子坝断裂和雷波断裂产生了 2200 万个 MCE 场景，即在潜在地震带中，每个地震断层产生了 100 万个地震场景。

1. 模型产生的 MCE 危险性

研究人员将与强度测量（intensity measure, IM）对应的超越概率（exceedance probability）作为目标位置的地震危险性（图 2）。溪洛渡大坝同一断层在地震场景中的地震动强度差异显著。例如，雷波断裂与河流平行方向在超越概率为 95% 时的峰值地面加速度（PGA）为 0.163 g。相比之下，超越概率为 5% 时的 PGA 为 0.443 g。考虑到在特定断层上发生的地震场景具有相同的震级、断层几何形状、断层距离和传播路径，地震动强度的显著变化表明，地震的复杂破裂过程对特定地点的地震动有很大的影响。

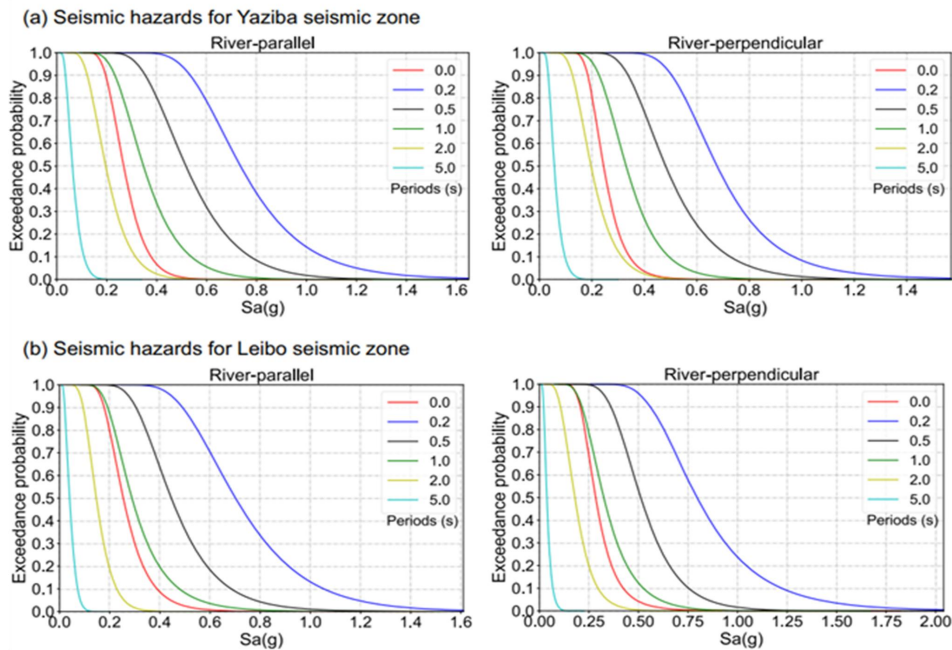


图 2 溪洛渡坝址地震危险性评估结果

此外，研究发现雷波断层的地震场景中所产生的地震动谱加速度与楔子坝断层在相同地震危险水平的地震动谱加速度相似。例如，楔子坝断裂

在与河流平行方向上，超越概率为 50% 时的 PGA 为 0.268 g，雷波断裂在与河流平行方向上，相同地震危险水平的 PGA 为 0.254 g。

2. 指定危险水平的地震场景

基于性能的工程结构抗震设计和分析通常需要宽带地震动时间序列数据。针对这一问题，研究人员提出的地震危险性分析方法可以给出具有特定地震危险水平的地震场景和目标场地相应的宽频带地震动。图 3 显示了楔子坝断裂和雷波断裂在与河流平行方向与超越概率 50% 所对应地震场景的破裂过程。溪洛渡大坝相应的加速度时间序列也在图 3 显示。楔子坝断裂上的地震场景产生的地震动持续时间长，河流垂直分量比河流平行分量强。同时，雷波断裂上的地震场景产生的地震动在河流垂直方向上更强。两个水平方向上地震动强度的相对差异可能是由于两条断层在地震场景中的震源机制和断层几何形状的差异所致。

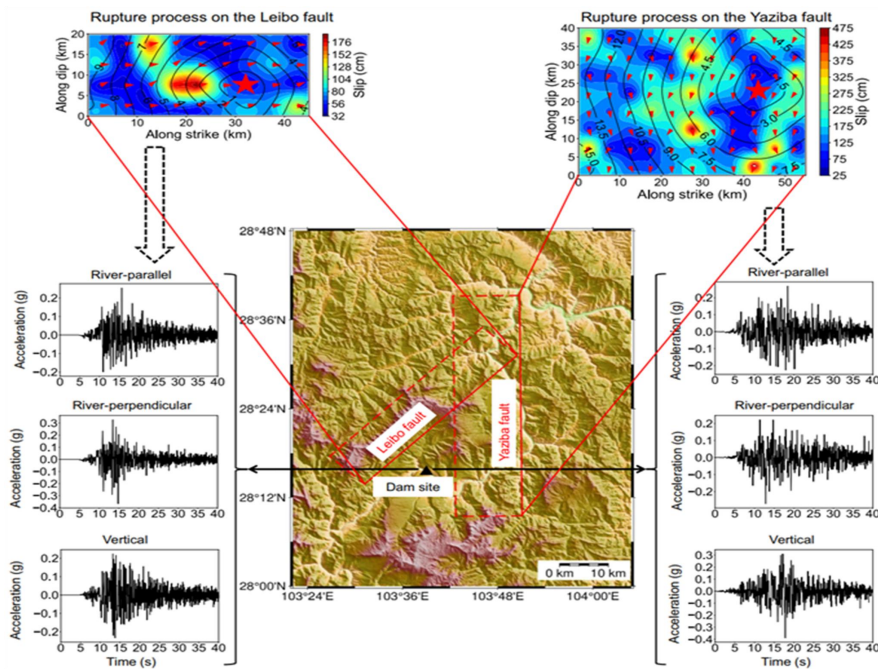


图 3 地震场景和相应的地震动

此外，利用与指定危险水平相对应的地震场景的震源过程，通过正演模拟可以得到目标地点周围的空间地震动场。楔子坝断裂和雷波断裂地震

场景正演模拟生成的震动图（指空间地震动场的 PGA）如图 4 所示，该图显示，利用与特定危险水平所对应地震场景的破裂过程的正演模拟，可以全部生成目标地点周围的真实空间地震动场。因此，对于可能受到不均匀地震动显著影响的大跨度结构（如水坝和桥梁），该方法可以为这些结构的抗震设计提供更真实的地震动输入数据。

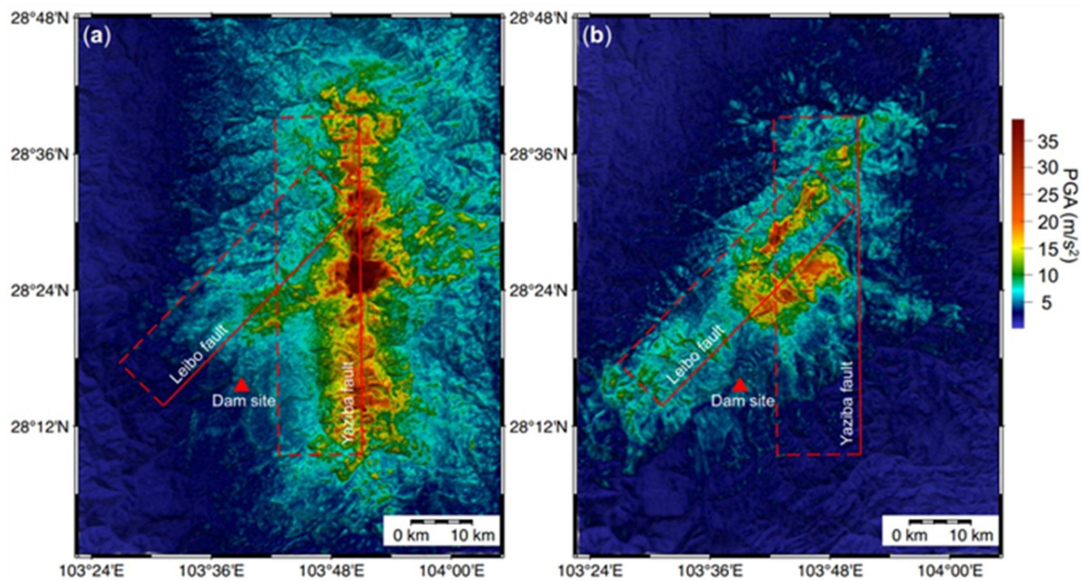


图 4 模型域中空间地震动场的震动图

3. 与经验估计的比较

研究人员将地震危险性结果与四种公认的经验地震动预测方程（GMPE）进行了比较。该研究获得的地震危险性通常在四个经验 GMPE 的一个标准差范围内，表明研究人员提出的方法可以很好地预测大周期范围内的谱加速度。此外，比较结果表明，利用研究人员开发的方法获得的地震危险性的残差标准差（ σ ）比经验 GMPE 小得多。因此，某一断层特定位置地震危险性的变化明显小于使用经验 GMPE 的 σ 获得的估计值。

4. 讨论

综上所述，研究人员提出的基于宽频带地震动模拟的地震危险性分析方法考虑了地震的破裂过程、传播路径和局部位置条件。同时，基于多维震源模型的自相似特征，研究人员充分考虑未来潜在地震的所有不确定性，分析了可能发生在目标地点的 MCE 场景。

研究人员应用该方法对溪洛渡大坝的地震危险性进行了评价，结果显示，发生在特定断层的地震的地震动强度与其物理背景密切相关。对于不同的破裂过程，相同震级和相同断层位置的地震场景所产生的地震动强度测量结果会有较大的差异。此外，尽管雷波断裂 (M_w 7.0) 的 MCE 震级明显小于楔子坝断裂 (M_w 7.5)，但雷波断裂的地震场景可以对溪洛渡坝址产生相似的地震风险（由谱加速度显示）。这表明，特定地点的地震危险性与地震破裂过程和传播路径等复杂物理背景密切相关，不能通过震级和震中距离等简单参数进行准确评价。

总体而言，研究人员基于确定性宽频带地震动模拟方法，在充分考虑地震物理过程的基础上，实现了未来潜在地震的确定性全场景分析。与传统方法相比，该方法可以获得更丰富的地震危险性评价结果，如任意强度测量、宽频带地震动时间序列和指定危险水平的空间地震动场，从而使地震危险性评估更加现实和准确。此外，该研究为实现基于地震实际物理过程的抗震设计给予了更大的希望，在地震工程领域具有重要意义。

来源：Wang X, Wang J, Zhang C. Deterministic full-scenario analysis for maximum credible earthquake hazards. *Nature Communications*, 2023, 14: 6600.

应力传递速度超过注入引起的非震滑移并诱发地震

随着人们对与工业活动（如水力压裂、地热能开采、废水处理）相关的破坏性地震的担忧日益增加，了解地下流体注入如何在孔隙压力扩散无法到达的遥远地区引发地震活动变得至关重要。以前的研究表明，远程孔隙弹性应力和非震滑移是潜在的触发机制。香港中文大学的研究人员发现，在注入诱发的非震滑移之前，显著的应力传递能够以更高的速度传播，并且这是远震触发的可能机制。此外，这还可以解释地震活动的迁移比非震滑移前缘（**front**）传播快得多的现象。研究人员展示了这些概念在中国威远页岩气田水力压裂作业所引发地震活动中的应用。应力传递的速度取决于背景应力水平和注入速度，并且几乎可以比非震滑移前缘的传播速度高一个数量级。相关研究成果发表 2023 年 10 月的 *Scientific Reports*。

流体注入可通过孔隙压力扩散、非震滑移和孔隙弹性应力等多种机制触发地震活动。同时，这些过程发生的速度和空间范围也有很大差异。地震活动的迁移通常归因于非震滑移前缘的推进。然而，在距离注入位置较远的地方，从注入诱发的非震滑移前方辐射出的弹性剪切应力传递也可能非常重要，并且尚未得到很好的研究。非震滑移前缘存在不同程度的应力传递，距离滑动前缘越近，应力传递程度越高。但是，即使是滑动前缘的少量应力扰动也有可能引发地震活动。

研究人员在二维反平面剪切中进行了流体注入与断层滑动耦合的数值实验。研究人员将流体注入断层的速度增强（**velocity strengthening, VS**）部分，并在与注入位置一定距离的地方放置速度弱化（**velocity weakening, VW**）块体。在 **VW** 块体内，考虑了应力非均质性，使得该区域比其他区域具有更高的剪切应力水平，因此更容易成核（图 1b）。研究人员分析了这种应力非均质体在不同预应力条件和流体注入速率下的行为，以描述该

区域地震活动的主要原因。此外，研究人员量化了接近 0.01 MPa 和 0.1 MPa 静态触发阈值的应力传递的迁移速度，并与非震滑移前缘的迁移速度进行了比较。最后，将相关发现应用于中国威远页岩气田的地震活动迁移模式分析。

1. 模拟研究

模型设置如图 1 所示，获得的不同注入速度下的滑移速度时空图如图 2 所示。没有任何流体注入的情况下（图 2a），在 51.5 天左右成核，最大速度 V_{\max} 约为 2.6×10^{-5} m/s。这低于地震速度阈值 V_{seismic} (10^{-3} m/s)，因此是一次非震事件。在低注入速率下，断层响应与没有注入的情况差别不大（图 2b）。应力传递完全局限于孔隙压力扩散前缘，未能到达应力非均质体。然而，随着注入速度的增加，开始观察到在更高滑动速度下触发的非震滑移，导致应力前锋从注入位置传播出去（图 2c）。尽管非震滑移前缘仍然被限制在压力扩散范围内，但在大约 20 天后，由非震滑移产生的 0.1 MPa 应力传递前缘已经加速到大约 400 m/d，并在非震滑移之前到达 VW 应力非均质体。

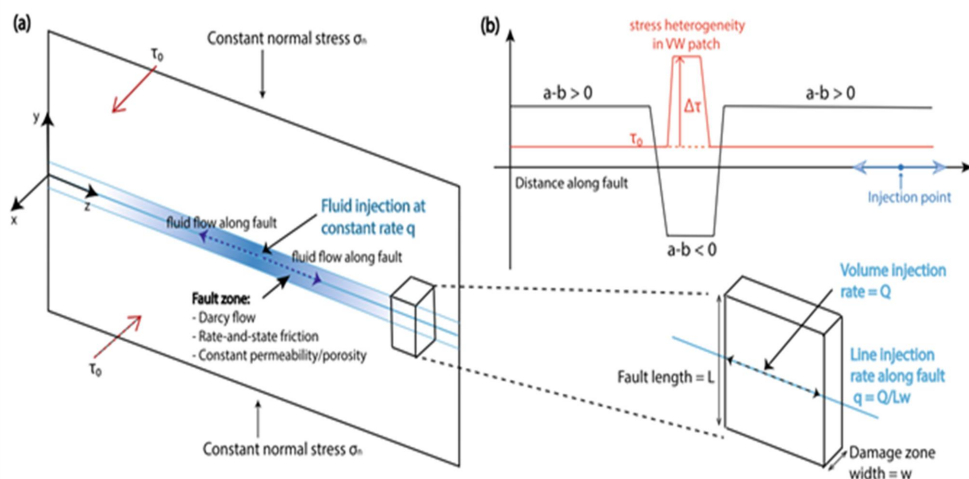


图 1 (a) 在断层中部注入流体时的二维反平面问题； (b) 流体注入断层的 VS 部分

注入速率 q 增至 10^{-5} m/s 时（图 2d）， V_{\max} 增大至 0.2 m/s，并且成核时间提前至 32 天。此时，非震滑移前缘仍距成核位置约 2 km。同时，0.1 MPa 库仑破裂应力变化的迁移速度增加到 600 m/d，并且能够比低注入速度更早地在压力扩散前缘外传播。一般情况下，较高的预应力和较高的注入速度会导致在成核发生时具有较高的滑移速度。当预应力水平较低时，增加注入速度特别有效，使非震破裂变成地震破裂，并且大大缩短了达到 V_{\max} 的时间。

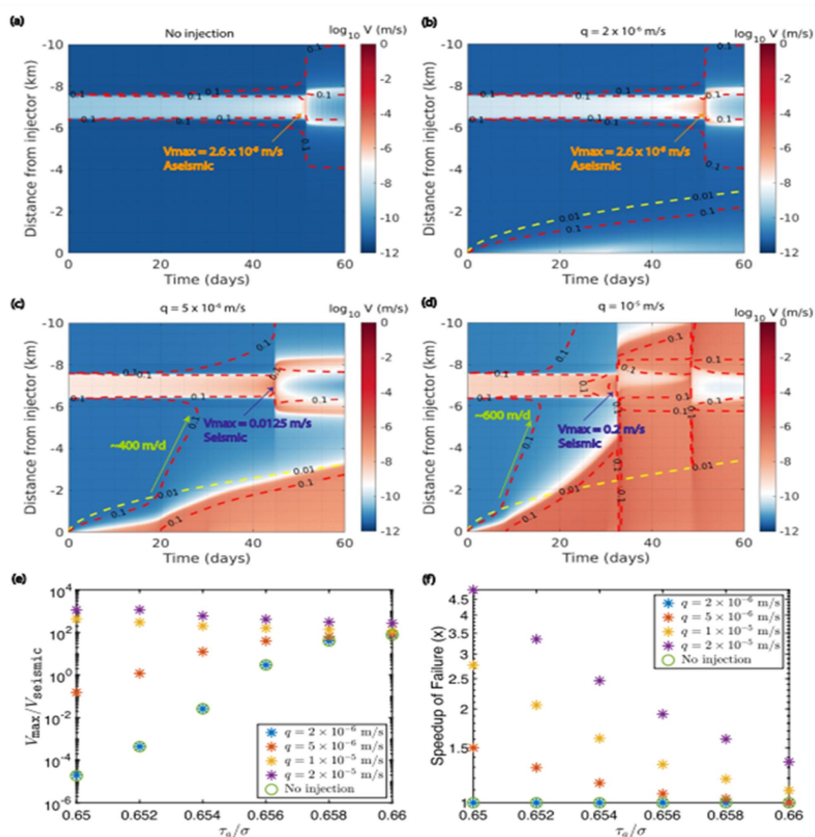


图 2 (a) — (d) 在 VW 上的初始剪切应力 $\tau_0=32.7$ MPa 时，不同注入速率下滑移速度的时空图；
(e) $V_{\max}/V_{\text{seismic}}$ ；(f) 在不同注入速率下，凹凸体失稳的加速情况

研究人员总结了一个相图（图 3a），描述了流体注入所引发远震活动（在孔隙压力扩散影响之外）的原因。研究人员发现，注入诱发地震活动的机制有许多细微差别。特别是，如果断层在过去的注入操作中经历了应力扰动，那么很可能存在许多已经接近成核的高应力凹凸体，并且由注入

引起的非震滑移导致的少量应力传递可能会在距离注入点很远的地方引发地震活动。

图 3b 为断层 VS 部分在 τ_0/σ'_0 (恒定预应力/初始有效正应力) = 0.598 时, 不同注入速率下, 0.01 MPa、0.1 MPa 库仑破裂应力传递前缘和非震滑移前缘的迁移速度。需要注意的是, 在所有注入速率下, 0.01 MPa 的应力传递前缘比非震滑移前缘快了几乎一个数量级。在最低注入速率下 ($q=2\times 10^{-6}$ m/s), 在注入期间没有产生非震滑移前缘, 因此其迁移速度为零, 应力传递纯粹是由于孔隙压力扩散导致的。研究人员注意到, 如果注入周期较长, 低注入速率也将最终触发非震滑移, 但目前只考虑注入 30 天的断层响应。另一方面, 在最高注入速率 ($q=10^{-4}$ m/s) 下, 0.01 MPa 前缘的速度最高可接近 10 km/d。

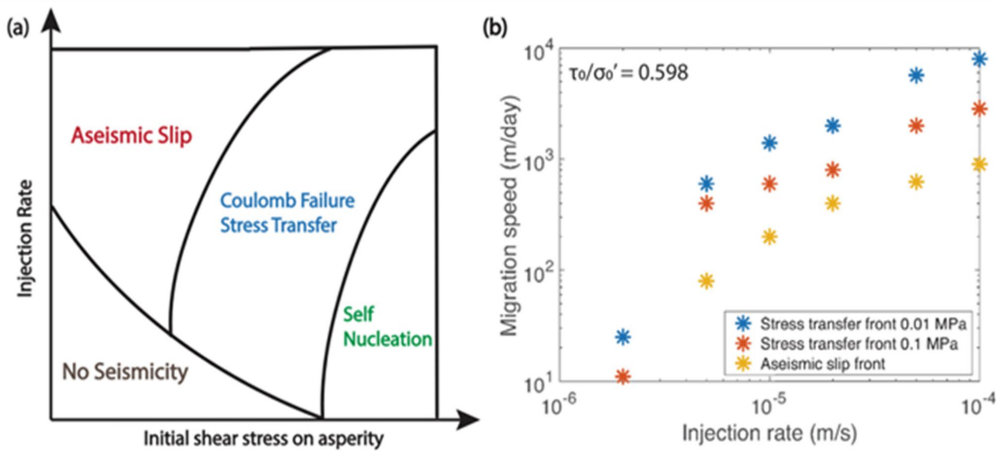


图 3 (a) 远震触发机制的相图; (b) 不同注入速率下, 注入周期为 30 天的 0.01 MPa、0.1 MPa 库仑破裂应力传递前缘和非震滑移前缘的迁移速度 (m/d)

2. 在威远页岩气田地震活动迁移中的应用

研究人员调查了自贡双石镇 2020 年 5 月 10 日至 2020 年 6 月 19 日(共 40 天) 在井台 Z201H2 进行的水力压裂作业。整个时间段的地震分布并不局限于紧邻水平井的位置, 而是向东延伸。研究人员重点关注前 25 天的地震活动演变, 以确定地震活动迁移的可能驱动机制。

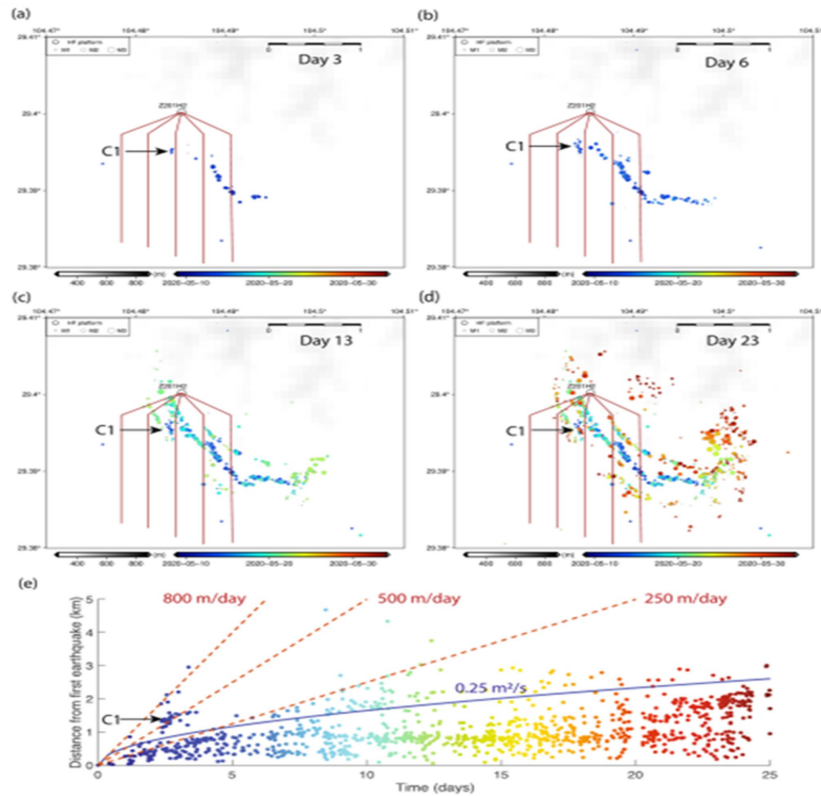


图 4 四川盆地自贡市威远页岩气田双石镇水力压裂作业引发的地震活动

图 4a–4d 展示了第 3、6、13 和 23 天的地震。在第 3 天（图 4a），断层已经可以通过沿着其轨迹移动的一些地震来划定。然而，位于断层西北角的 C1 群与其他地震之间存在较大的空间间隙。这种不连续性不符合孔隙压力扩散所引起地震偏移的一般解释。在图 4e 中，研究人员绘制了所有地震相对于第一次地震在时间序列中的距离。在前 6 天， $0.25 \text{ m}^2/\text{s}$ 的扩散率能够相对较好地拟合大部分地震活动。这与模拟中使用的扩散系数在同一个数量级上，并且与该区域的一些估计一致。图 4e 中，第 5 天以后还有一组地震活动在扩散曲线下不拟合，用 250 m/d 速度的线性迁移曲线可以较好地拟合。研究人员将其解释为可能的非震滑移前缘偏移。然而，由于迁移速度快，C1 中的地震仍然是异常值。因此，这个震群由独立的事件组成，由一个长期的应力传递机制触发。还有一些其他的地震是在更远的地方触发的，它们大多可以用 800 m/d 的迁移速度来拟合。

结合图 3b 可知，250 m/d 的非震滑移前缘迁移速度使注入速度在 $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5}$ m/s 之间，与考虑一定流体泄漏时的注入速度接近。在实际流体流入断层的速率下（推断而来），0.1 MPa 应力传递前缘的迁移速度大约为 500 m/d，0.01 MPa 应力传递前缘的迁移速度大约为 1000 m/d。因此，C1 地震活动 500 m/d 的迁移速度可能归因于该地区向高应力凹凸体的 0.1 MPa 应力传递。

3. 小结

综上所述，从模拟中观察到，根据断层应力条件和注入速度的不同，应力传递前缘迁移速度的变化范围很大。断层上的预应力越大，注入速度越快，应力传递速度越快。此外，这种应力传递可以使先前的非震成核变成地震性质，并使地震发生的时间提前。

地震活动的触发机制可能不同，在评估注入相关地震时不应使用单一方法。例如，如果只考虑孔隙压力扩散，从远离注入位置的地震活动迁移推断的表观水力扩散率（hydraulic diffusivity）可能具有欺骗性。如果更快的迁移是由应力传递而非流体扩散引起的，为了包含这些地震，表观水力扩散率将被大大高估。

在所模拟的断层上（处于反平面应变状态），断层滑移没有引起正应力的变化，因此没有孔隙弹性效应。这可以说是一个重要的弹性应力传递机制，与远程地震触发密切相关。最后，该研究也可用于解释与注入操作相关的远震或延迟地震的触发。

来源：Yang Y, Yang H, Zi J. Stress transfer outpaces injection-induced aseismic slip and triggers seismicity. *Scientific Reports*, 2023, 13: 16626.

贝叶斯推理阐明断层系统结构和持续盐水处理引起的反复地震

加拿大西部的一个地震序列显示出反复出现的余震，这可能是对主震后持续盐水处理的响应。来自德国和加拿大的几名科学家通过对干涉合成孔径雷达和地震波形数据的联合推断，减少了主震震源参数的不确定性。分析发现，主震震源在约 5 km 深处成核，往上向注入源传播，并在约 2 km 深处停止。通过精确的震源定位和贝叶斯推断，研究人员发现 4 条近平行断层被重新激活，这些断层可能是区域性基底地堑系统的一部分。重新激活的断层似乎被一个共轭断层截断，该共轭断层在当前应力状态下位错滑移。距离最近的盐水处理井位于一个渗透性的泥盆纪礁体，它与前寒武纪基底直接接触，位于脊状隆起的顶部。研究表明，一个断层系统可以在盐水处理开始 10 多年后被激活，并且继续处理可能导致地震活动的复苏。相关成果发表在 2023 年 11 月的 *Communications Earth and Environment*。

从 2022 年 11 月起，在加拿大阿尔伯塔省中北部皮斯河（Peace River）附近的一个地震相对平静的位置发生了一个地震序列（图 1）。目前，关于该地震序列的成因仍有争议。阿尔伯塔能源监管机构最初评估认为，该地震序列起源于自然构造。然而，对主震和最初的余震，以及该地区的其他地震活动群进行调查后，认为它们是主震震中东边约 3.5 km 处的深层处置井的盐水处理诱发的。

研究人员采用多种方法对皮斯河地震序列进行了表征和解释。通过精确的再定位，分析了 2022 年 11 月 23 日至 2023 年 3 月 23 日期间超过 130 次余震的长时间地震序列。利用贝叶斯联合推断，将干涉合成孔径雷达（InSAR）与地震资料相结合，推断出主震破裂特征。利用贝叶斯推理，对 7 次前震和余震的震源机制进行了分析。

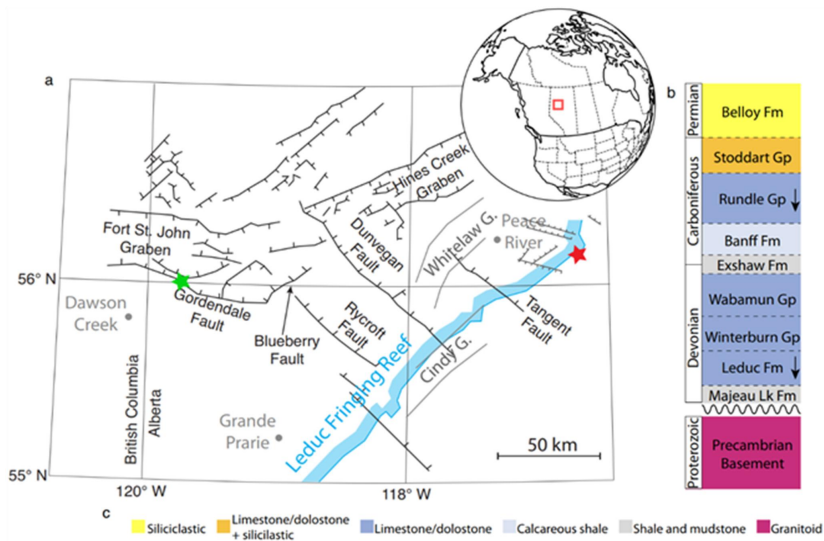


图 1 皮斯河地震序列的地质背景

1. 四个近平行断层的再激活

研究人员采用双差法 (double-difference method) 对地震进行了重新定位, 以确定相对震源位置。通过仔细的检查, 将地震分布分为四个簇。利用回归分析解译的四个断层平面被标记为 F1、F2、F3 和 F4 (图 2)。它们的走向依次分别为 290° 、 289° 、 295° 和 297° (从 F1 到 F4), 倾角分别为 52° 、 55° 、 54° 和 50° 。因此, 三维分析揭示了一个基底断裂系统, 该系统由四条近平行断层组成, 单个断层之间相距 500~600 m。

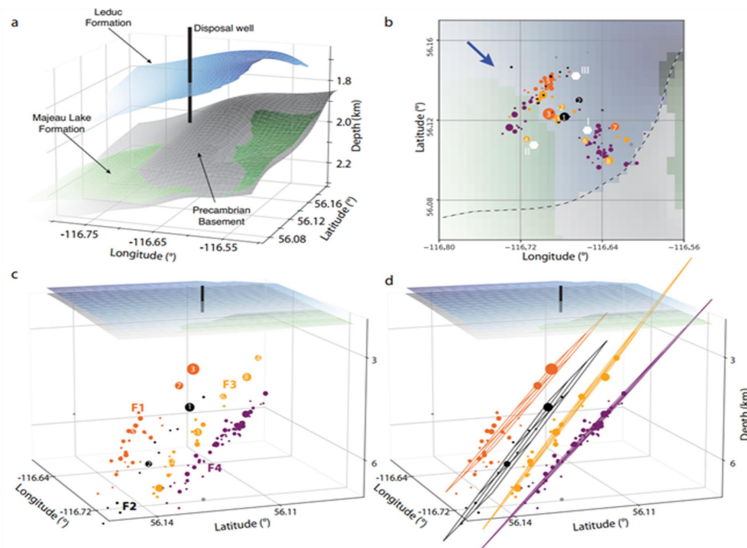


图 2 地震重定位、簇与断层系统结构 (F1: 橙色, F2: 黑色, F3: 黄色, F4: 紫色)

2. 主震在深部成核，并在前寒武纪基底顶部附近停止

断层定位的横向不确定性小于 200 m，纵向不确定性小于 100 m。矩形震源模型求解走向为 310° ，倾角为 45° ，滑移角 (rake) 为 118° ，角不确定性 $<2^\circ$ 。估计断层长 2.7 km (沿走向)，不确定性为 0.5 km，宽 4.75 km (沿倾角)，不确定性为 0.3 km。该断裂带的平均滑动量为 0.2 m，不确定性为 0.06 m。力矩释放持续时间为 6.7 s，不确定性为 0.3 s，破裂在 1.3 s 内沿断层传播，导致破裂速度为 3 km/s，与破裂深度处的剪切波速度相似。破裂在断层底部成核，在大约 5 km 深度从断层中心位移 0.5 km (图 3)，并以反向运动的方式向上传播到大约 1.9 km 深处，在那里基岩与盐水处理带直接接触。

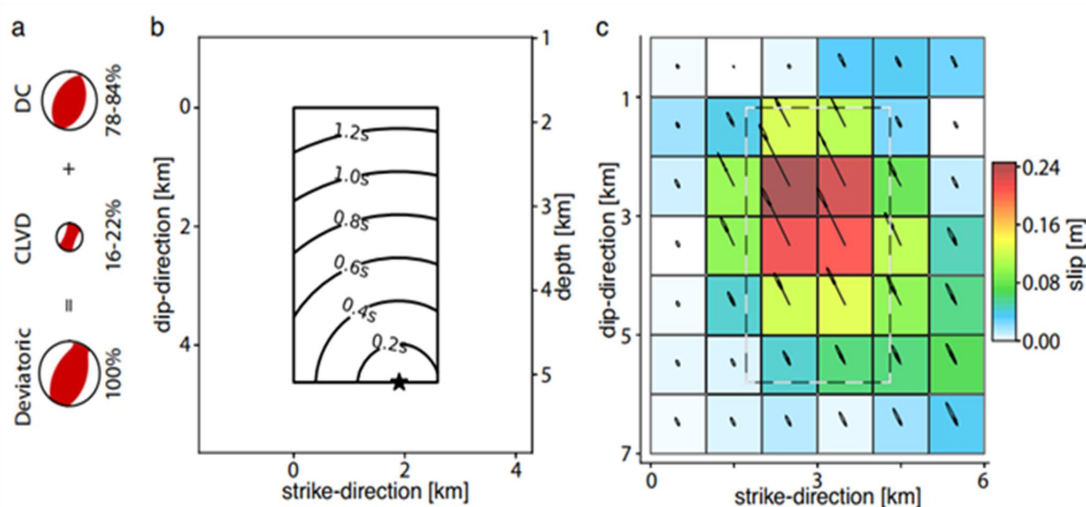


图 3 不同参数化下的主震推断结果

研究人员利用贝叶斯有限断层反演，并仅基于 InSAR 数据来研究断层滑动的空间分布。最大滑移为 25 cm (在 20~29 cm 之间有不不确定性)，发生在 2.5 km 深处。破裂呈近椭球状，长轴沿滑移方向 (115°) 展布，长半径为 3 km，短半径为 2 km，大部分滑移发生在 2~4.5 km 深度之间。总的来说，矩形断层和有限断层的结果表明，沿破裂尖端线区域的滑动相对较小，在断层顶部附近滑动达到最大值。静态有限断层解在三个 InSAR 位移

图上的方差缩减 (variance reduction) 值最高 (>90%、>89%和>82%)。与之前的工作相比, 研究人员获得了一个不是非常光滑的滑移分布, 但在凹凸体 (asperity) 的上部显示出峰值滑移。

3. 多条近平行断层上的前震和余震

图4总结了7次 $M_w > 3.8$ 级地震经贝叶斯反演获得的质心矩张量(CMT)结果。这些地震的观测数据和预测数据之间的一致性与主震相当。所有地震的震源机制都是类似的斜反转 (oblique-reverse), 滑移角 (rake angle) 在 $100^\circ \sim 120^\circ$ 之间变化 (其中 90° 为纯反转)。推断断层走向在 $300^\circ \sim 320^\circ$ 之间, 倾角在 $37^\circ \sim 55^\circ$ 之间。这种较陡的倾角对于逆断层来说是不典型的, 但与正断层的重新激活相一致。图4中的三维视图显示, 矩张量解在多个阶段激活了一个复杂的断层结构, 断层之间的破裂非常一致, 在浅部震级最高。

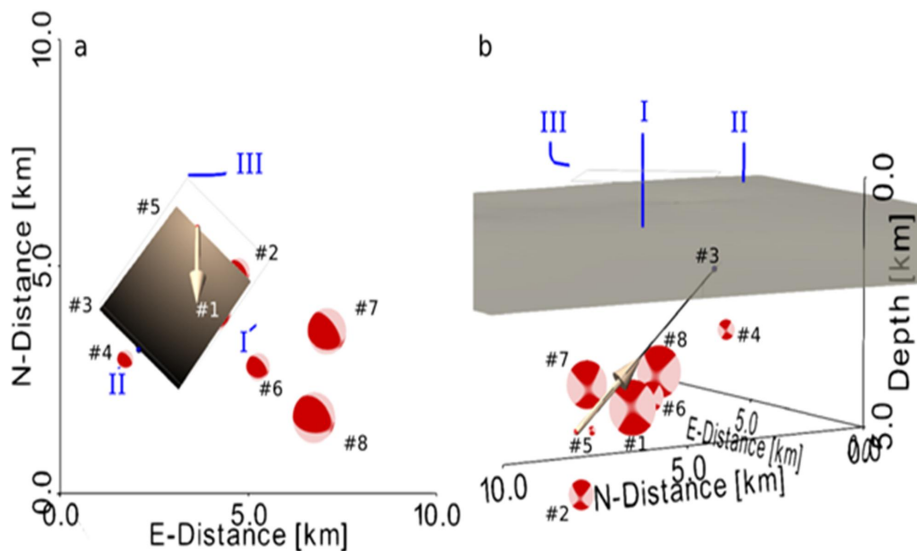


图4 震源位置和震源机制估计结果

4. 断层系统结构

3D 聚类获得了四条陡倾的近平行断层。这些断层上的地震活动沿着一条北东向的线性特征集中, 研究人员将其解释为未激活的共轭断层。因此,

地震活动似乎集中在定向良好的断层与位错（**misoriented**）断层的交叉处，可能是由于断层末端的应力集中导致的。这种几何形状与 **Peace River Arch** 地区石炭系断裂的构造样式（**Tangent** 断层和 **Whitelaw** 地堑）以及阶跃（**step-wise**）平行的正断层组相一致。矩形断层和有限断层模型都表明，在观察到余震聚集的同一位置，破裂停止，这进一步证明了该位置存在相交断层。

5. 天然还是诱发？

皮斯河地震序列是天然的，还是诱发的，这是一个重要问题。有观点认为，皮斯河地震序列是由于盐水处理进入 **Leduc** 边缘礁体所诱发的。如果这一解释是正确的，那么这一序列的主震将成为迄今为止加拿大西部最大的人为地震，并意味着在注入开始和断层激活之间存在超过十年的特殊时间滞后。靠近结晶基底是诱发地震的关键地质风险因素，值得注意的是，与加拿大西部沉积盆地的其他地方不同，该位置的 **Leduc** 组直接覆盖在前寒武纪基底上。这种直接接触增加了在盐水处理地层和深部断层之间存在水文联系的可能性，从而更倾向于诱发成因。

作为进一步的测试，研究人员考虑了注入与地震活动性之间是否存在时间相关性。不幸的是，注入数据可用的只有月平均值。尽管如此，研究人员还是应用了互相关和重组测试来寻找注入 **Leduc** 处理井的速度与地震活动率（包括余震）之间的因果关系。结果表明，这些时间序列之间存在显著的（>95%置信度）相关性。在滞后 51 个月时，出现最高的相关峰；在滞后 42 个月和 70 个月时，出现 95%置信度以上的次峰。尽管由于公开的注入数据的间隔为 1 个月，无法获得更精确的相关性，但该结果支持了盐水处理可能在触发该地震序列中发挥关键作用的结论。

6. 注入诱发地震活动风险的启示

F4 的中心区域位于处置井下方，没有明显的地震活动。在西边类似的断层上，自然地震造成的破裂比这里观察到的深度要大得多。因此，研究推断出的断层可能比迄今为止激活的凹凸体延伸得更深。在几何断层模型中，推断出的前震震源的向上迁移，以及主震破裂的上倾传播，更倾向于级联成核模型（从较深的层次向较浅的层次发展）。这种“逆行”（retrograde）地震成核模式与基于向外传播的触发锋模型的破裂方向相反。上倾破裂方向可能反映了在速率-状态摩擦定律控制的断层上，孔隙压力的向下扩散效应与依赖深度的不稳定性叠加所产生的权衡。如前所述，从注入到地震活动开始之间 11 年的延迟时间可能说明，需要很长时间才能充分加压于与 Leduc 边缘礁体内巨大区域性咸水含水层系统相交的断层。

来源：Vasyura-Bathke H, Dettmer J, Biegel K, et al. Bayesian inference elucidates fault-system anatomy and resurgent earthquakes induced by continuing saltwater disposal. *Communications Earth and Environment*, 2023, 4: 407.