

地震科技前沿快报

2022 年第 4 期（月刊总第 39 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、2021 年 Ms 6.4 漾濞地震序列短期的前震和余震模式
- 2、对强震发生之前 b 值的回顾性分析
- 3、诱发地震研究进展与展望
- 4、数十年废水处理导致地震活动由平静向激增转变：加拿大阿尔伯塔省中西部地区的一个案例研究

2021 年 Ms 6.4 漾濞地震序列短期的前震和余震模式

2021 年 5 月 21 日，云南省西部的漾濞县发生了 Ms 6.4 地震，对附近地区造成了破坏。在主震前 3 天出现了强烈的前震活动，余震沿右旋走滑性质主断裂向南东方向扩展。本研究使用台网中心区域震相报告，采用双差定位法对主震前后短时间的地震序列进行重定位，并反演了其中较大前震和余震的震源机制。研究不仅刻画出了发震断层的几何形态，还根据前震的时空演化说明了静态应力的传递机制。此外，主震附近的低背景 b 值也与漾濞地震序列的发生相一致。相关研究成果于 2022 年 1 月发表在 *Seismological Research Letters*。

漾濞地震是自 2014 年 Ms 6.6 景谷地震以来，云南省内最强的地震。截止 2021 年 5 月 22 日凌晨 6 点，地震已造成 3 人死亡，27 人受伤，预计经济损失达 3.1 亿元。主震震源机制与早期余震位置表明发震构造为一条平行于维西—乔后—巍山断裂的走滑型断裂（WQW）。然而，2021 年漾濞地震序列的位置与区域已知断裂相距 15 km，实际发震断裂仍待商榷。此外，主震西北部分别于 2013 年和 2017 年发生中等规模的地震，也与 WQW 断裂平行。

漾濞地震之前发生了多次前震，包括少数震级大于 3 的前震。值得注意的是，主震前三天地震活动明显增加，发生了 5 次震级 4 以上的地震。最大的前震（Ms 5.3）发生在 21 日 13:21，大约在主震前半小时。这种前震有助于降低主震前不久的地震风险，当地居民被建议 5 月 20 日呆在帐篷等不易受破坏的建筑物中。5 月 20 日，还安装了临时地震台站监测地震序列。前震序列是否代表了主震的成核过程仍然未知，分析前震的时空演化可能会阐明这一关键问题。

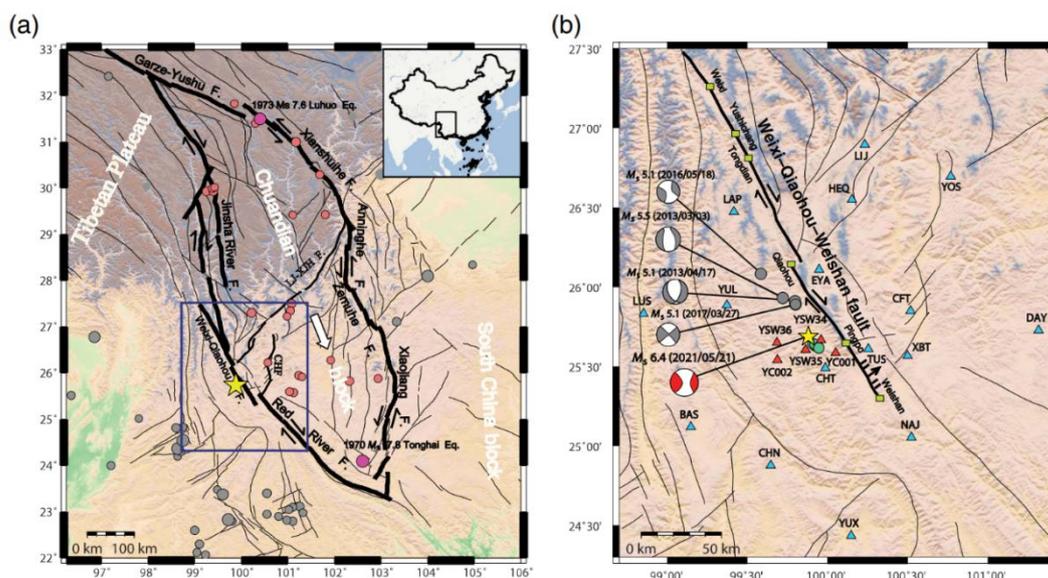


图 1 构造和历史地震分布

截止到 5 月 27 日，一共报告了 3500 多次余震。监测余震演化对于判断发生较大地震的可能性和及时开展震后灾害评估有重要意义。研究表明，余震可能发生在破裂断层或者隐藏的共轭断层上，对这些隐藏的地震灾害源进行成像有助于应急响应和实时灾害评估。

地质背景和历史地震：漾濞地震发生在川滇地块西南边界，其东以鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂为界，西以金沙江—红河断裂为界。由于印度板块和欧亚板块的碰撞，青藏高原形成，部分物质向东逃逸，向东南积压了川滇地块。沿川滇地块东部边界的大量断裂为左旋，而西部边界断裂为右旋特征。地块内部发育多条规模较小的断裂，包括北东向的丽江—小金河断裂，南北向的澄海断裂。川滇地块作为中国最活跃的地块之一，曾多次发生强震。1970 年以来发生过 7 级以上地震 2 次，6 级以上地震 24 次。7 级地震均位于地块边界，而 M 6+地震分布在地块边缘或者内部。

红河断裂延伸超过 1000 km，在更新世和全新世孕育了多次大地震。然而，我国境内的红河断裂主要区段在历史上未发生过大于 7 级的地震。漾濞地震发生在红河断裂西北部，靠近 WQW 断裂——北起白济汛地区，途径维西、乔后，止于巍山盆地南端，大致以玉狮场和坪坡为界，分为三段，北段和中段呈右旋走滑性质，南段主要呈正断层性质。

b 值：为了解该地区地震频发的原因，首先利用 2008 年 10 月 1 日至 2021 年 5 月 21 日的中国地震台网（CENC）目录推导 b 值。b 值被认为是区域背景应力分布的指标，因此常用来评估地震风险。红河断裂带北段 a 值在 2.0~2.5 之间，地震发生率没有明显异常，但 b 值明显偏低，表明该地区背景应力较高。此外，红河断裂带北段估计最大震级 M_{max} 大于 5 级，明显高于周围区域。

地震定位：云南省地震局的分析人员挑选并检查了 P 波和 S 波到时，然后使用 LOC 3D 程序获得地震位置。用双差定位法（HypoDD）重新定位 5 月 18 日至 27 日的地震。研究人员从川滇地区的面波层析模型构建出一维速度模型。其中， V_P 和 V_S 的比值为 1.75，95% 置信区间显示，水平和垂直方向的平均位置偏差为 400 m 和 2000 m。5 月 18 日至 27 日期间的主震和余震覆盖了长宽分别为 40 和 15 km 的区域，大多数地震位于主震中东南方，表明主震向东南方向单侧破裂。大多数震源深度浅于 20 km，主震震源深度约为 14 km。这些地震分布情况描绘了一个近乎垂直的断层面，向西南有轻微的倾斜。余震主体向东南方向延伸了 30 km，部分余震发生在西北方向 10 km 内。

较大前震和余震的震源机制：Mw 5.2 前震呈走滑断层机制，具有明显的正滑分量，震源深度 6~7 km。Ms 4.2 和 Ms 4.5 前震也显示出走滑断层机制。但是，这三个前震位于不同的断层。

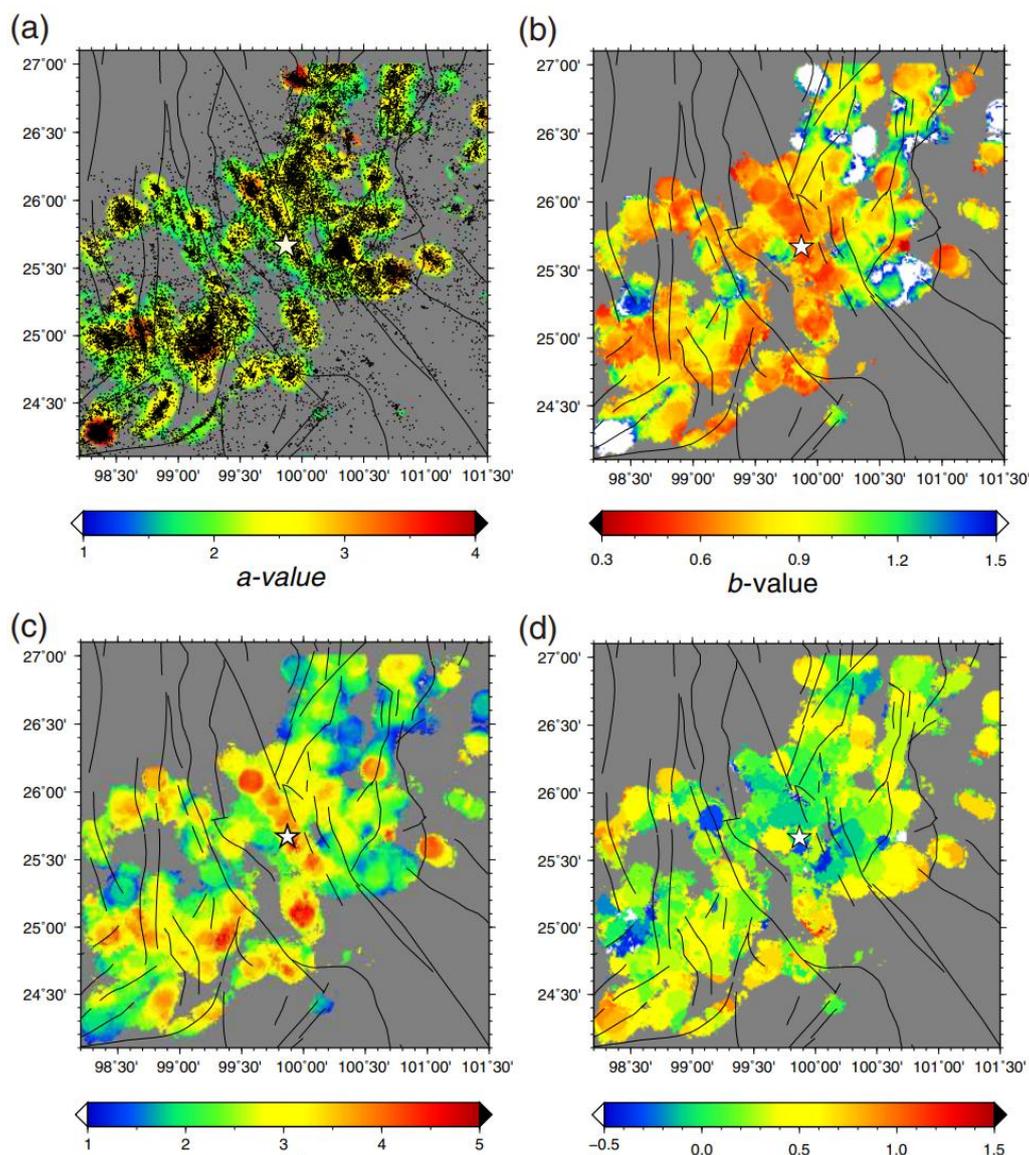


图2 a 值、b 值、Mmax、Mc 的空间分布

5月18日以来前震的迁移：前震序列主要集中在3个时间窗口，研究人员对同时期序列进行了分析。第一个前震是发生在18日距主震东南8.1 km处的 M_L 3.8地震。以此为参照，将断层分为东南段和西北段。在接下来的25小时内，包括4.2级前震在内的数十次前震发生在西北段的一小块区域，范围约为2 km。这个序列持续了14小时并变得静默，地震活动整体向西北以 9.6 ± 0.8 km/day迁移。

M_L 3.8 地震 25 小时后，在其西北边缘附近发生了 M_S 4.5 地震，随后两小时内发生了超过 20 次较小地震，这些地震在更远的西北方向破裂，几乎延伸到主震位置，该序列持续了约 30 小时，并在主震前 15 小时停止。经过 15 小时的静默， M_S 4.3 前震发生在与 M_L 3.8 地震相同的位置，不到半小时后，此序列中最大的前震 5.3 级地震发生。之后，东南段出现地震。

前震序列和成核机制：由于前震的时空演化反映了主震附近应力的变化，因此被认为是预测强震的有效指标。研究表明，准静态滑移会在地震前发生，并且在地震成核过程可能伴随主震发生。在应力分布不均的发震断裂上，前震的发生受到破裂成核的影响。相反，有些地震序列的时空演变被解释为地震成核过程，这对于短期地震预报十分重要。

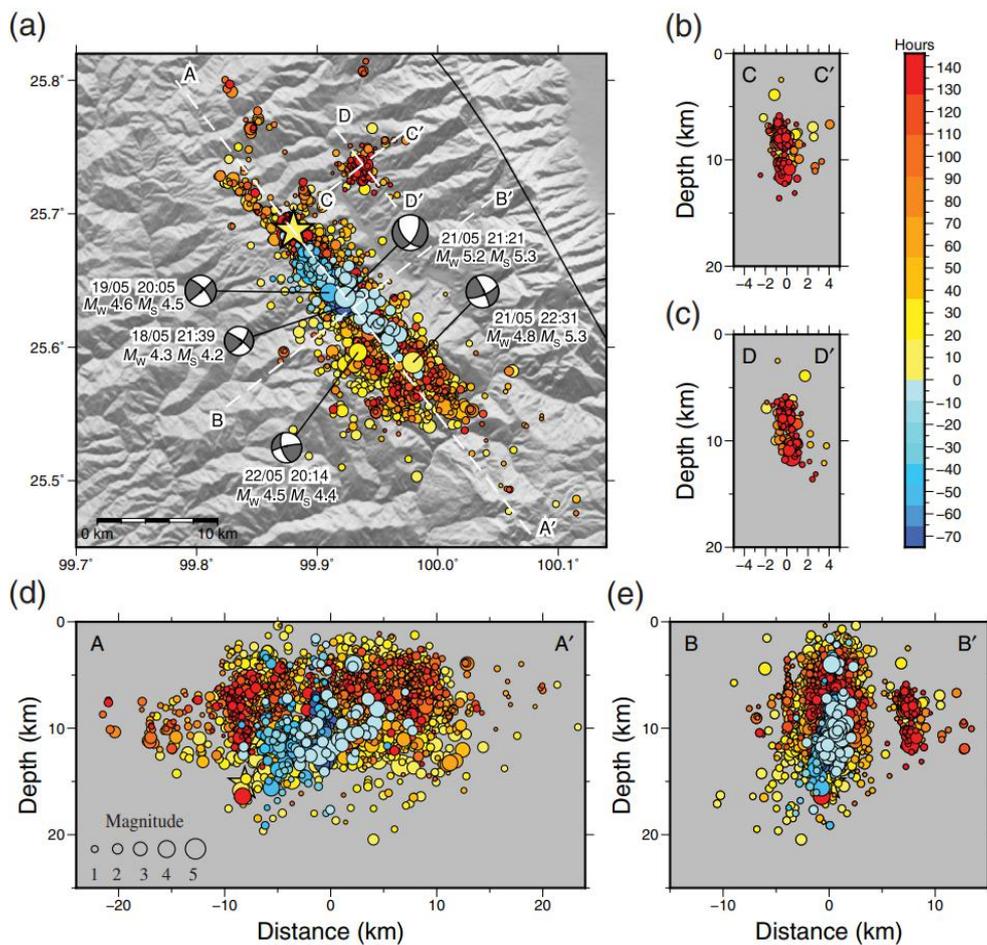


图 3 重新定位的漾濞地震及震源分布

断层预滑（pre-slip）、级联触发或者两者的组合常被用来解释前震和主震的关系。预滑模型表明，小的前震始于非震滑移，随后引发大破裂扩张。级联模型认为，一次地震可以由相邻区域前序地震引起的静态或者动态应力扰动触发。有利于级联模型的重要证据是那些所谓的“重复前震”，实为相邻地震，并非真正的重复地震。

因此，主震与前震震源的时空关系对于区分这些前震机制和理解地震成核过程至关重要。在本研究中，并未观察到一致的地震活动向主震迁移。因此，目前的结果并未表明主震成核。另外，前震序列中的静默期以及震源的重叠都不支持慢滑移或者流体迁移。此外，也未观察到小地震引起的较大地震。相反，所有前震的时空模式都可以通过静态触发很好的解释，特别是彼此靠近的较大前震。此外，前震可能会对主震破裂面产生引力扰动，诱发主震。

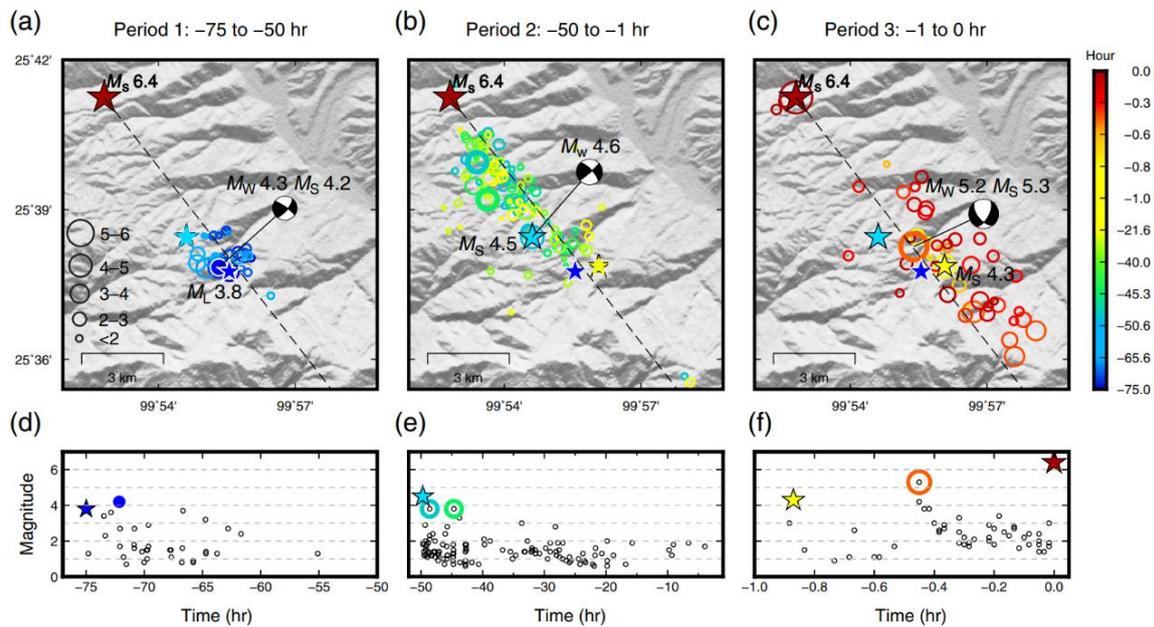


图 4 前震序列的时空演化

非断层余震（off-fault aftershock）：余震通常与发生主震的断裂密切相关，但有时也并非如此。实验研究表明，断层系统可以通过断层相互作用

用强烈影响其附近的应力场，导致非断层地震发生在与断层垂直的张裂中。这种非断层余震被认为是由动态或者静态库伦破裂应力（CFS）场的变化触发的。

本研究中，大多数余震与主震的破裂方向一致，但靠近 CC' 剖面（图 3）的一组余震可能与激活的破裂有关。这个非断层群位于距主震震源一个破裂长度内，因此，动态和静态应力扰动起着同样重要的作用。未来，在近场中使用精确的滑移模型和断层参数模型进行 CFS 计算，将有助于更好地了解该非断层震群的动态和静态触发机制。

来源：Zhang, Y., Y. An, F. Long, et al. 2022. Short-Term Foreshock and Aftershock Patterns of the 2021 Ms 6.4 Yangbi Earthquake Sequence, *Seismol. Res. Lett.* 93, 21–32, doi: 10.1785/0220210154.

对强震发生之前 b 值的回顾性分析

常被用来预测地震的前兆仅有很少的成功案例。已有研究表明，6 级地震之后 b 值的下降可能预示着大地震即将发生，并据此提出了交通灯系统 (TLS)。然而，这一方法依赖于必须由专家选择的参数。美国加州大学戴维斯分校的研究人员基于马修斯 (Matthews) 相关系数系统地分析了这些参数，来找到最佳的一组参数。对于每一种参数组合，研究人员分析了美国地质调查局 (USGS) 综合地震目录中北美西部每个 6 级以上地震序列的频率-震级随时间的变化。通过分析 25 个 $M \geq 6$ 和 88 个 $M 5\sim 6$ 的事件，发现并不存在完美的参数组合。虽然这一方法对一些 $M 5$ 事件进行了成功的追溯，但是预测依赖于所选择的参数。 $M 5\sim 6$ 中大约 80~95% 的事件由于数据过少，而无法产生结果。预测具有时间依赖性，而且具有很大的不确定性。由于对前兆 b 值的变化并没有一个精确的定义，这种方法及相似的方法并不符合评估地震前兆的 IASPEI 标准。如果测量地震前兆变化和将它们与应力状态相关联的问题能被克服，实时预测主震就能减少人员伤亡。相关研究成果于 2022 年 1 月发表在 *Seismological Research Letters*。

在一次大地震之后，人们就会思考危险是否已经过去，或者接下来是否还会发生更大的地震。基于对历史地震的统计，科学家指出，有 5%~10% 的概率会发生更大的地震。研究表明，在一次明显的地震之后，地震的频率-震级分布 (FMD) 是接下来相同区域是否会发生更大地震的可靠指示。

震级分布常遵循古登堡-里克特关系：

$$\log_{10}(N_M) = a - bM$$

通常，b 值接近 1.0。在短时间内、小的空间范围或者不同的构造背景下，能够观察到 b 值的变化。b 值常被用作地震前兆，因为它代表了断层

应力状态。研究表明， b 值和差应力呈负相关，并在主震之后增加，后者被认为是主震释放断层面应力的标志，并且意味着不太可能再有更大的地震发生。相反， b 值降低就意味着差应力增加，大地震则可能即将发生。

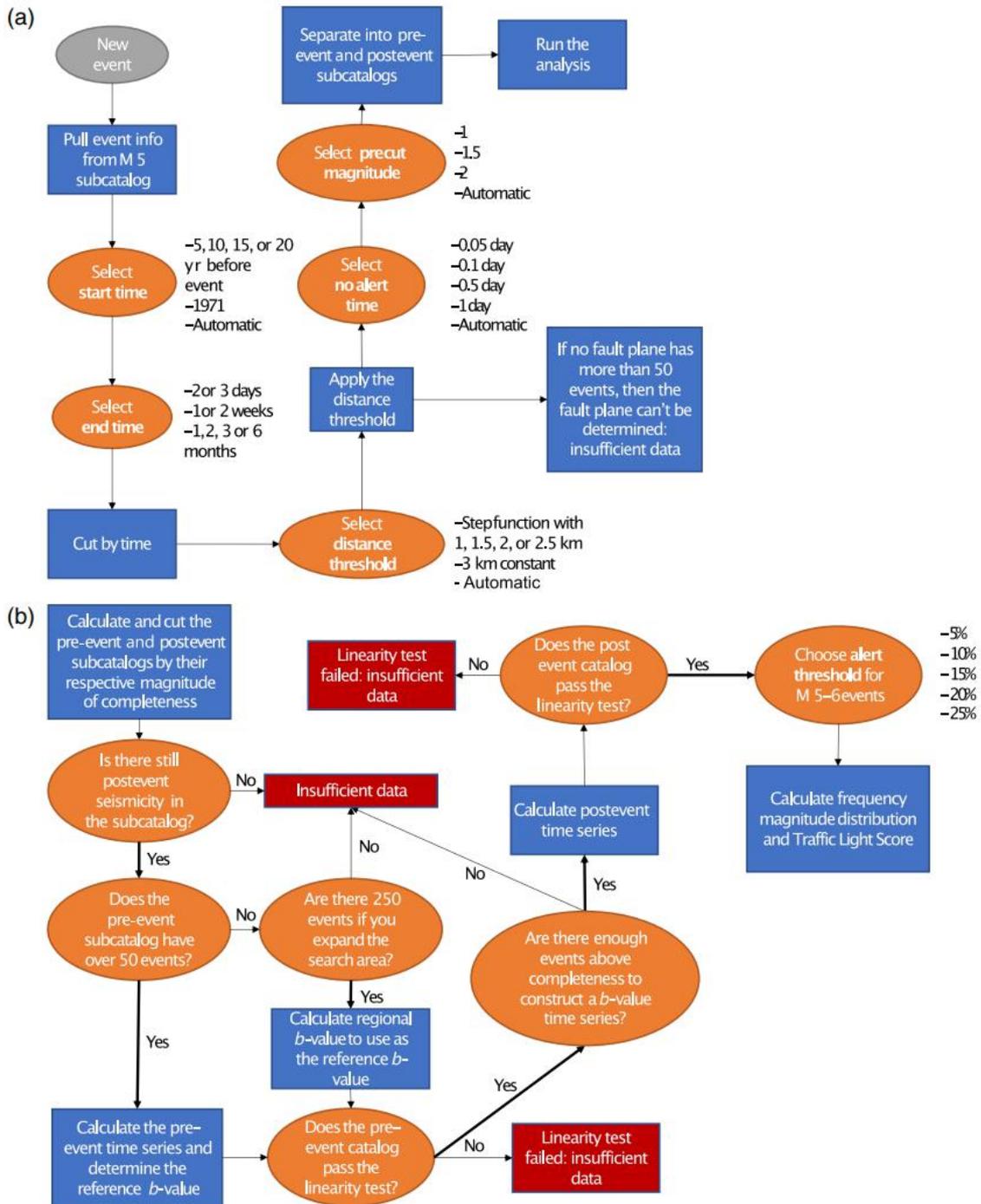


图 1 TLS 程序的流程

Gulia 和 Wiemer (2019) 基于 b 值的改变提出了交通灯系统 (TLS), 来预测那些前震大于 6 级的地震。回顾性分析表明, $M \geq 6$ 地震发生之后, 如果即将发生主震, 则地震周围 b 值下降。当 b 值下降超过 10%, 红色预警发布, 更大的地震可能发生。如果 b 值变化介于 -10% 到 10%, 黄色预警发布, 表明相关情况需要关注。如果 b 值变化大于 10%, 则发布绿色预警, 表明不会再有更大的地震发生。但是, 对于特定事件参数的人为选择可能表明, 这种方法并不能有效的实时预测地震, 并且如果都发布黄色预警虽然有 100% 的正确率, 但是不具有意义。

数据来源: 研究人员从 USGS 的综合地震目录 (ComCat) 获得地震震级、位置和时间信息。从全球质心矩张量目录 (CMT) 获得矩张量信息, 如果没有就使用 ComCat 的数据。共分析了 113 个 $M \geq 5$ 的事件, 其中 25 个 $M \geq 6$, 88 个 $M 5 \sim 6$ 。

识别相关事件: 为了评估 TLS 的表现, 需要对主震和前震进行配对。主震被定义为一个时空窗口中在其后无更大地震发生的地震, 如果一个时空窗口内存在相等或者更大的事件, 这两个事件就被认定为前震-主震组合。

TLS 程序: 研究人员遵循 Gulia 和 Wiemer (2019) 的方法。通过震后 1 小时的余震来确定断层面, 震源尺寸通过经验关系确定。在目录中选择距离阈值内的、包括震前和震后的数据, 并将小于预切震级的事件排除。数据被分为震前和震后两组, 排除紧随主震发生的余震, 排除的时间称非预警时间。震前和震后的子集都通过最大斜率法进行分割。然后, 计算 a 和 b 值的时间序列。 b 的变化:

$$\text{Percent change} = 100 \times \left(\frac{b_{\text{post}} - b_{\text{reference}}}{b_{\text{reference}}} \right)$$

参数：TLS 程序中有 6 个参数需要设置，其中 4 个直接采用 Gulia 和 Miemer(2019)的方法：开始时间(Start Time)、非预警时间(No Alert Time)、预切震级 (Precut Magnitude)、结束时间 (End Time)。当 $M \leq 6$ 时，以下两个参数可能需要改变：距离阈值(Distance Threshold)和预警阈值(Alert Threshold)。

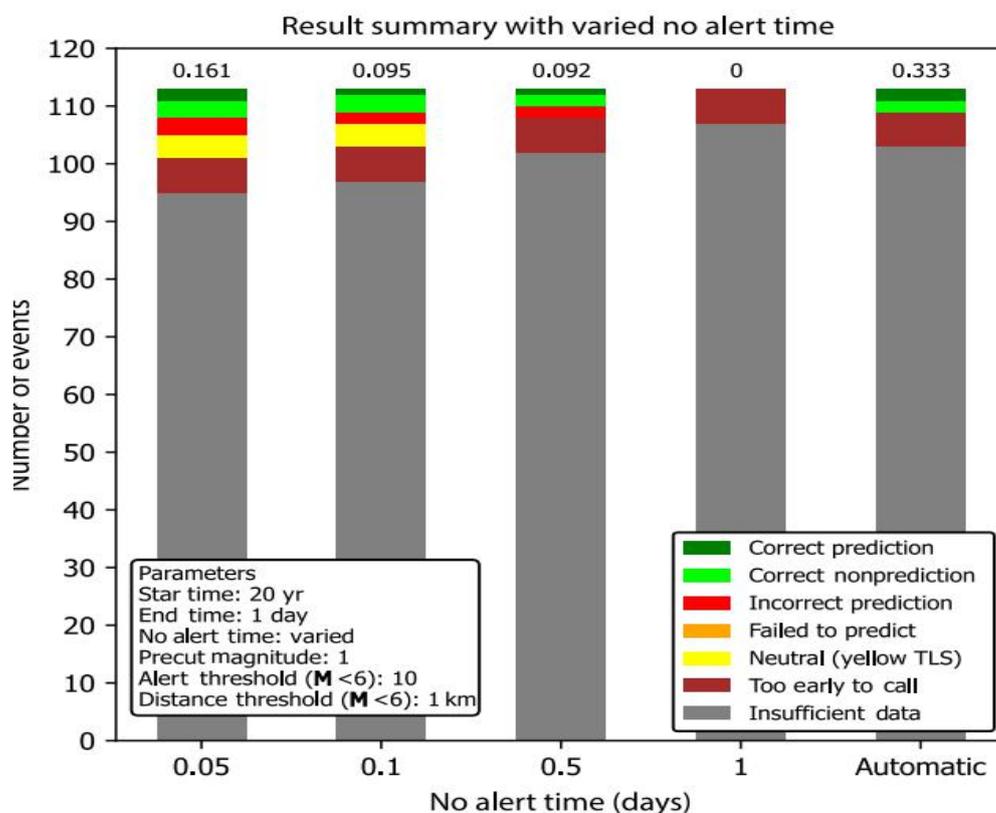


图 2 仅改变非预警时间的五种参数的组合结果

TLS 程序需要对每一个地震人为确定参数，该研究的目的旨在确定是否存在一组最佳的参数组合，能够适合北美西部所有的地震，进而排除人为影响。为了达到这一目的，研究人员让每一个参数都在一定范围内变化。对于开始时间采用 5、10、15、20 年；对于非预警时间选择 0.05、0.1、0.5 和 1 天；对于预切震级选择 1、1.5 和 2 级；对于结束时间选择 6 小时到事件的时间窗口结束；距离阈值在 1、1.5、2、2.5 和 3 km 变化；预警阈值

选择 5%、10%、15%、20%和 25%。利用不同的参数组合，对每一个 M 5+ 地震重复运行 TLS 程序。

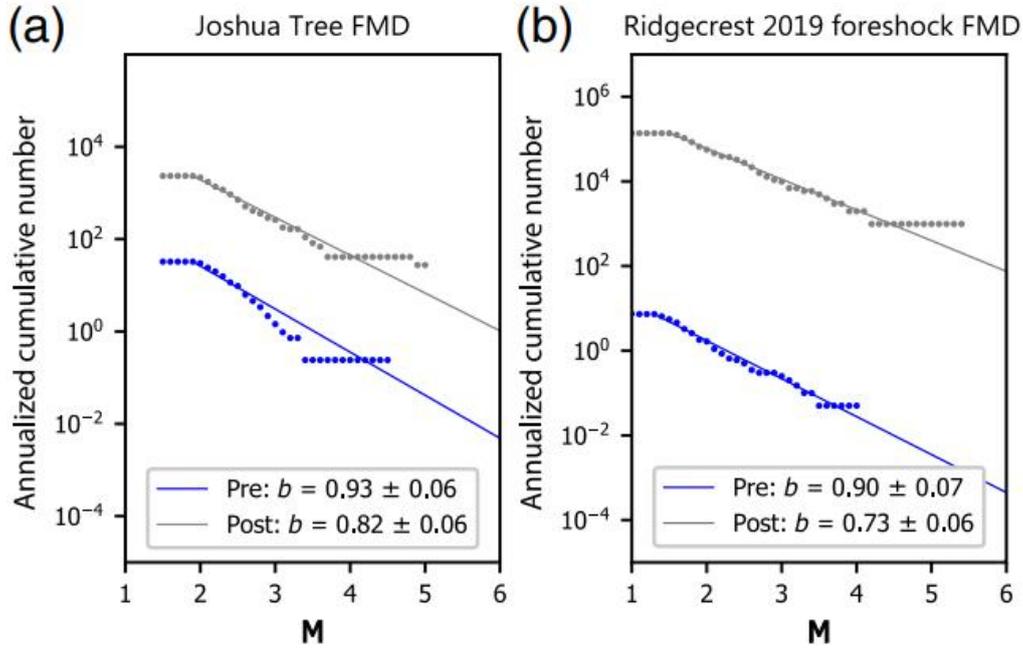


图 3 (a) Joshua Tree 地震的频率-震级分布; (b) 2019 Ridgecrest 地震的频率-震级分布

结果评估： 研究人员通过 TLS 的计算情况来评估结果准确性。对于每一个事件，有四种可能的结果：正确的预测、不正确的预测，正确的非预测（真否定），不正确的非预测（假否定，即预测失败）。这四种结果常出现在混淆矩阵（**confusion matrix**）中，并被用来评估分类准确性和搜索算法。研究人员使用马修斯相关系数（MCC）来评估结果，因为 MCC 使用一种中性的方法来囊括中性的预测，并且在非平衡数据集分类问题上有很好的表现。MCC 被定义为：

$$C = \frac{\sum (S_i - \bar{S})(P_i - \bar{P})}{[\sum (S_i - \bar{S})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2]^{1/2}}$$

C=0：随机；C=1 or -1：完美的正相关或者负相关， \bar{S} 和 \bar{P} 分别表示观测到的 \underline{S} 和预测的 \underline{P} 平均值， P_i 表示主震 i 的发生概率。

研究表明，并不存在一组完美的参数组合，如果想要正确预测的数量最大化，就必须接受大量的错误预测。不幸的是，大多数前震-主震组合并没有足够的数据来做出预测。并且，预警很大程度上取决于结束时间，随着时间的变化可能由绿色预警变为红色预警。不确定性分析表明，很多接近预警阈值的预警会延伸到多个预警范围内，包括绿色和红色预警。

参数网格搜索：对于 $M \geq 6$ 的事件，有 4 个前震-主震组合：1987 年美国 Superstition Hills 地震、1992 年美国 Cape Mendocino 地震、Joshua Tree 和 Landers 地震，以及 2019 Ridgecrest 地震。在这四个地震中，仅仅成功预测了 Joshua Tree-Landers 地震和 Ridgecrest 地震。最佳的 $C=0.524$ ，有 6 个参数组合产生这一结果。

对于 $M \geq 5$ 的事件，有 16 个前震-主震组合。其中，仅仅成功预测了 4 个地震，并且不存在一组参数组合能够同时预测这四个事件，最大的是 3 个。最佳的 $C=0.333$ ，有两个参数组合能够产生这一结果。

随着时间的变化以及不确定性：结束时间不同，可能会产生不同的预警，很多预警级别会随时间发生变化。此外，对于一个给定的预警，其不确定性常跨越不同级别的预警。为了量化预警级别随着时间的变化，研究人员分析了每种参数组合的结果，计算了随时间推移预警级别变化的地震的比例。对于 $M \geq 6$ 的地震：46%无足够数据，29%会保持预警级别不变，而 25%会发生变化；利用最佳参数组合时，32%无足够数据，40%预警级别不变，28%发生变化。对于 $M \geq 5$ 的地震：76%无足够数据，15%预警级别不变，10%发生变化；利用最佳参数组合时，78%无足够数据，17%预警级别发生变化，5%不变。

最佳参数组合仅产生了 1~2 个正确预测，如此少的正确预测，很难去评估这一预测方案的稳健性。概率分析表明， b 值作为即将发生的主震的

预测指标可能是一种巧合。另一方面，如果逐个时间地进行参数选择， b 值可能是成功的预测指标。如果后一种可能性是正确的，那么实时描述参数选择的客观标准对于设计和验证基于 TLS 的预测系统至关重要。本研究表明，通过 b 值实时区分前震和主震的能力是有限的。更完整的地震目录以及更好的参数选择可能会产生更成功的预测。 b 值的准确确定面临很多挑战，包括目录和子目录的完整性、震级不确定性和异常值，以及震源误差。预警级别随时间的变化可能会成为实时预测的一个障碍。TLS 的表现也许可以通过根据构造背景以及断层类型选择不同参数得到提高。

来源：DeSalvio, N. D., and M. L. Rudolph. 2022. A Retrospective Analysis of b -Value Changes Preceding Strong Earthquakes, *Seismol. Res. Lett.* 93, 364–375, doi: 10.1785/0220210149.

诱发地震研究进展与展望

为了维持人类社会的运转，需要进行许多活动，这些活动有可能引发地震，这就是所谓的“诱发地震”。历史上，第一次观测到的诱发地震与大规模位移有关，例如，1894年南非的金矿和煤矿开采诱发了地震活动。另一个原因是为供水和发电而进行的水库蓄水，如1939年胡佛水坝米德湖的5级地震。迄今为止，探测到的此类最大诱发事件是1967年印度柯伊纳大坝（Koyna）的6.3级地震。目前，正在建造或计划建造的大坝超过3500座，这种趋势将会继续下去。与此同时，风力涡轮机、太阳能板和电池等可再生能源技术不断发展，这些技术需要各种矿物和金属，因此，在未来几十年内将需要开发新矿，以开采所需要的资源。

诱发地震也可以由地下工业活动引起，如地热能开发、二氧化碳地质封存（阿尔及利亚 In Salah 二氧化碳封存项目引发微震）、非传统的碳氢化合物开发（英国布莱克浦碳氢化合物开发引发2.3级地震），以及在地质构造中储存天然气（西班牙海岸 CASTOR 项目诱发4级地震）。这些作业需要更具侵入性的流体注入和开采技术，同时会增加地震活动的风险，有时甚至在靠近城市中心的地方诱发地震。因此，美国俄克拉荷马州和加拿大阿尔伯塔省等地区的诱发地震活动不断增长，远远超过了历史水平，一些地震事件更是造成了局部破坏。

因此，项目开发商和监管机构面临着公众对诱发地震破坏潜力的日益关注和担忧的问题。由于舆论压力，人为诱发地震往往会迫使地下开发活动迅速终止（例如德国 Ruhr Area 的煤矿开采、瑞士巴塞尔地热项目和西班牙的 CASTOR 地下储气库项目等，均因开发活动导致诱发地震而终止）。因此，迫切需要开展工业开发活动与诱发地震相关性研究，以评估是否可

以控制人为因素引起的地震灾害，以及对其基本物理过程的进一步了解是否有助于缓解此类地震灾害。

一个关键的有待解决的问题是，是否有可能控制或降低诱发地震活动及其最大震级，以减轻给社会和关键基础设施带来的风险。对于不同类型的地下作业和构造环境，需要改进地震危险性评估和诱发地震的可操作性预报。

控制诱发地震活动发生的一般机制包括弹性加载和卸载，以及由于储层和围岩中的流体注入等而导致的孔隙流体压力和应力条件的改变。尽管孔隙压力增加和有效应力降低被认为是产生大多数诱发地震的原因，但最近的观察表明，存在一系列更复杂的机制：地震活动情况的突然变化和长期效应突出了流体压力和固体应力之间的相互作用的重要性；浅部断层可能促进无震变形，从而触发更远距离的地震事件；流体流动可以触发地震，并可能导致断层系统的级联破裂，从而导致一系列地震事件。

总体而言，诱发地震活动研究涉及许多不同的学科，从地质力学和工程学一直到地震学和大地测量学，需要一套工具（数值模拟、统计分析等）来提高理论认识并减轻灾害。未来，应通过从实验室到中观尺度的流体注入试验、从储层到区域尺度的模拟和观测，来不断推进对不同尺度的物理过程的理解。

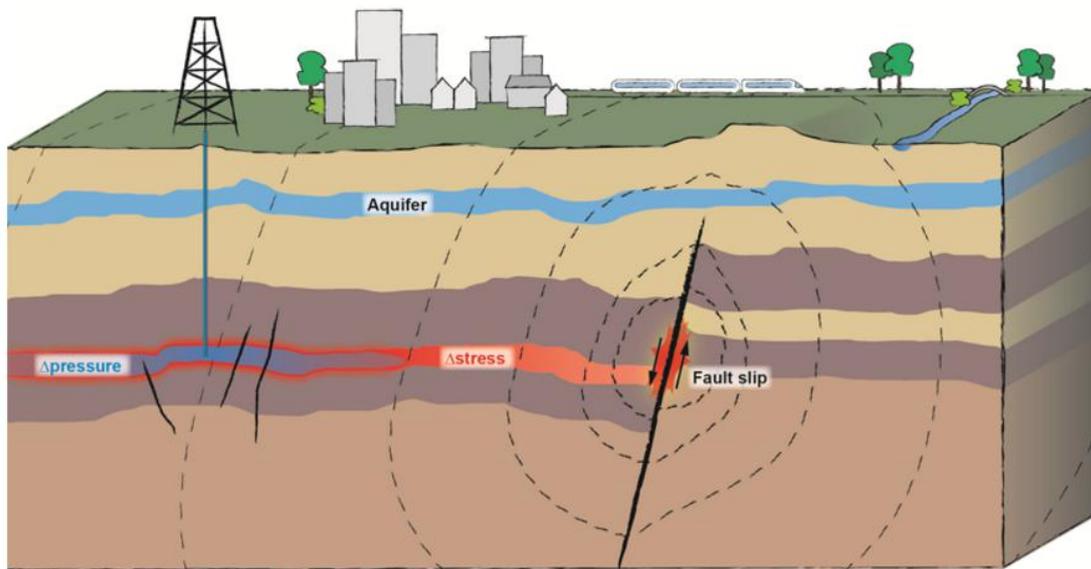


图 1 由于孔隙压力变化和人为活动引起的应力变化，处于临界应力状态的断层发生诱发地震

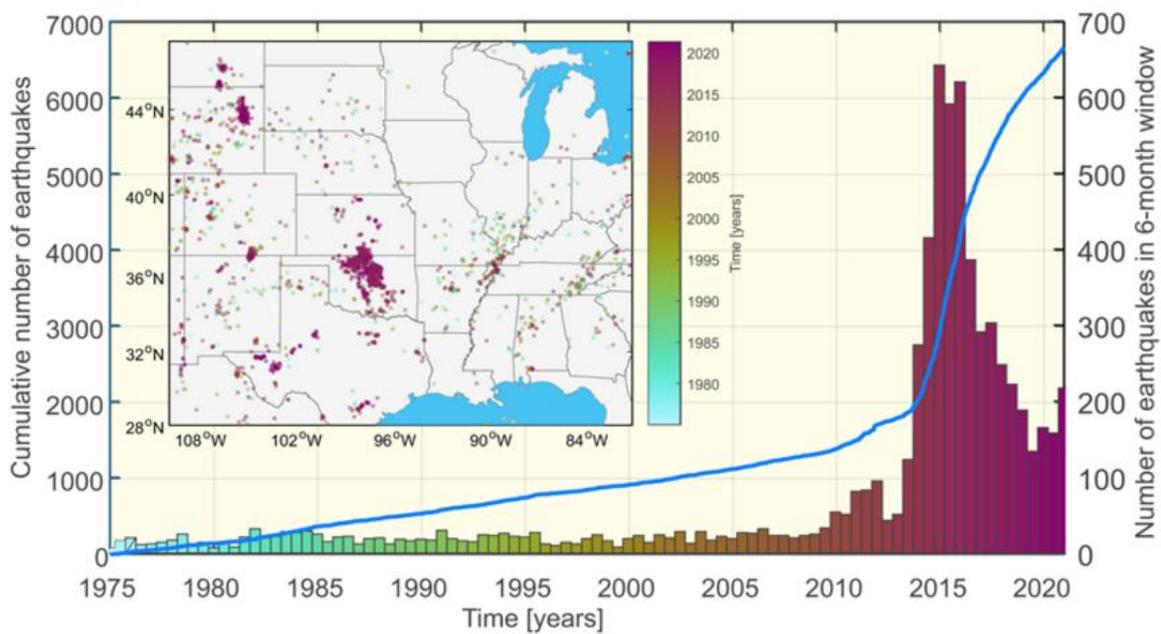


图 2 1975—2020 年美国大陆中部 3 级以上地震数量的变化

来源：Understanding and Anticipating Induced Seismicity.

<https://eos.org/editors-vox/understanding-and-anticipating-induced-seismicity>

数十年废水处理导致地震活动由平静向激增转变：加拿大阿尔伯塔省中西部地区的一个案例研究

在加拿大西部沉积盆地，与废水处理相关的注入引起的地震比水力压裂相关的地震要少得多。然而，最近在历史上属于地震平静区的地方发生了 43 次与废水处理有关的地震（震级 1.3~3.9），该地区自 2018 年以来，废水注入变得密集，预示着临界应力状态的累积形成。来自加拿大地质调查局的多名学者的研究表明，与其他浅层井相比，较深的中上泥盆统含水层注入井的地震活动更强烈，应力降范围较大（0.8~230 MPa）。三种物理机制可能共同导致了观测到的地震模式：（a）下伏的泥盆纪礁系使注入的流体更容易水平移动；（b）流体可以被引导到更多关键断层，并沿其垂直移动，从而引起地震；（c）流体运移可能在 Duvernay 地层内引发无震滑移，进一步促进较浅地层的地震活动。相关研究成果发表在 2021 年 11 月的 *Geophysical Research Letters*。

注入诱发地震是非常规油气开发带来的不良后果之一。一些地质力学过程被提出来用于解释这种地震，包括：流体扩散导致的孔隙压力增加；与流体体积变化相关的弹性应力扰动；靠近井筒的无震蠕变对断层附近的脆性段施加载荷等。最近的研究进一步表明，许多地质/水文地质力学因素也可能促进流体-岩石相互作用，并最终导致断层的重新活动。而在加拿大西部沉积盆地，废水处理并没有像水力压裂一样诱发很多地震。因此，目前还不清楚注入相关的地震活动最终是否会激增。

研究者选择加拿大西部沉积盆地中废水注入活动最强烈的地区——阿尔伯特中西部的 Musreau 湖，作为研究区。该地区在 2000—2015 年间具有中等程度的注水（ $<10^4$ m³/月），之后废水注入一直增加，在 2018 年达到 10^5 m³/月，且此后的注入量一直较高。截至 2020 年 1 月，共检测到

43 次地震事件（1.3~3.9 级），被称为 Musreau 湖序列（Musreau Lake sequence）。研究者首先对地震位置进行重定位，使地震位置信息更加精确。然后，根据地震位置将其分类。接着，估算了地震的应力降（ $\Delta\sigma$ ）大小，应力降的空间变化可以突出沿着断层的摩擦强度不均匀性和水文地质性质。最后，根据这些数据分析该地区的地震模式，并提出力学过程进行解释。

与注水井对应的地震群分布

如图 2a 和 2b 所示，重新定位的地震主要可以分为三个群（G1、G2 和 G3）。G1 包括 9 个小地震（震级 < 2），都在 #485871 废水注入井附近；G2 在 #488015 井附近，包含了 7 个地震事件（震级 2~3）；G3 包含 13 个地震事件（震级 2~4），分布在 #46087 井附近。图 2c 表明了废水注入与当地地震分布之间的时间相关性，总体表现为，地震数量随注入量变化呈正相关关系。

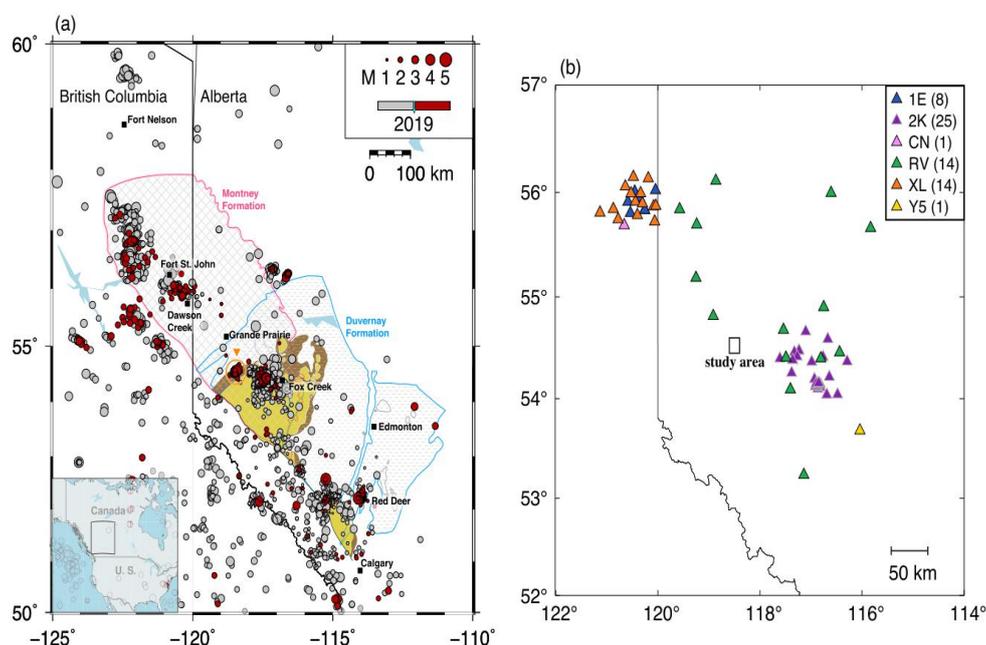


图 1 加拿大西部沉积盆地的地震活动和地震台网分布。(a)：灰圈和红圈分别代表 2006 年 9 月 1 日至 2019 年 1 月 1 日和 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 1 月 21 日报告的 3089 次地震和 496 次地震；橙色圆圈代表 Musreau 湖序列；(b)：本研究中使用的地震台站

所有的废水注入井都打在 Winterburn 组之下的含水层（4~4.4 km）。其中，#460875 井比其他井深 0.4 km，打在了中上泥盆统含水层系统，而其他井打在了浅部的上泥盆统。这两个含水层系统被 Woodbend 含水层隔开。

震源深度集中在注入深度附近。G3 中的地震主要发生在 3~4 km；G1 中的地震则是在不到 2 km 处发生，但是具有很大的误差范围；G2 中的地震主要分布在 4~5 km。

注入深度附近显著的应力降变化

通过谱比拟合得到的三个地震事件（21、24、35）的角频率（corner frequency）分别为 7 Hz、5.1 Hz 和 11.6 Hz，分别对应 44，116 和 57 MPa 的应力降（图 3a）。此外，聚类 Q 频谱拟合方法（clustered-Q spectrum fittings）估计的 19 号地震事件和 26 号地震事件的应力降变化范围很大，在 0.8~230 MPa 之间。G3 中的地震事件具有最大范围的应力降值（图 3c），而较浅的 G1 中的地震具有相对较小的应力降值（0.8~21 MPa）。

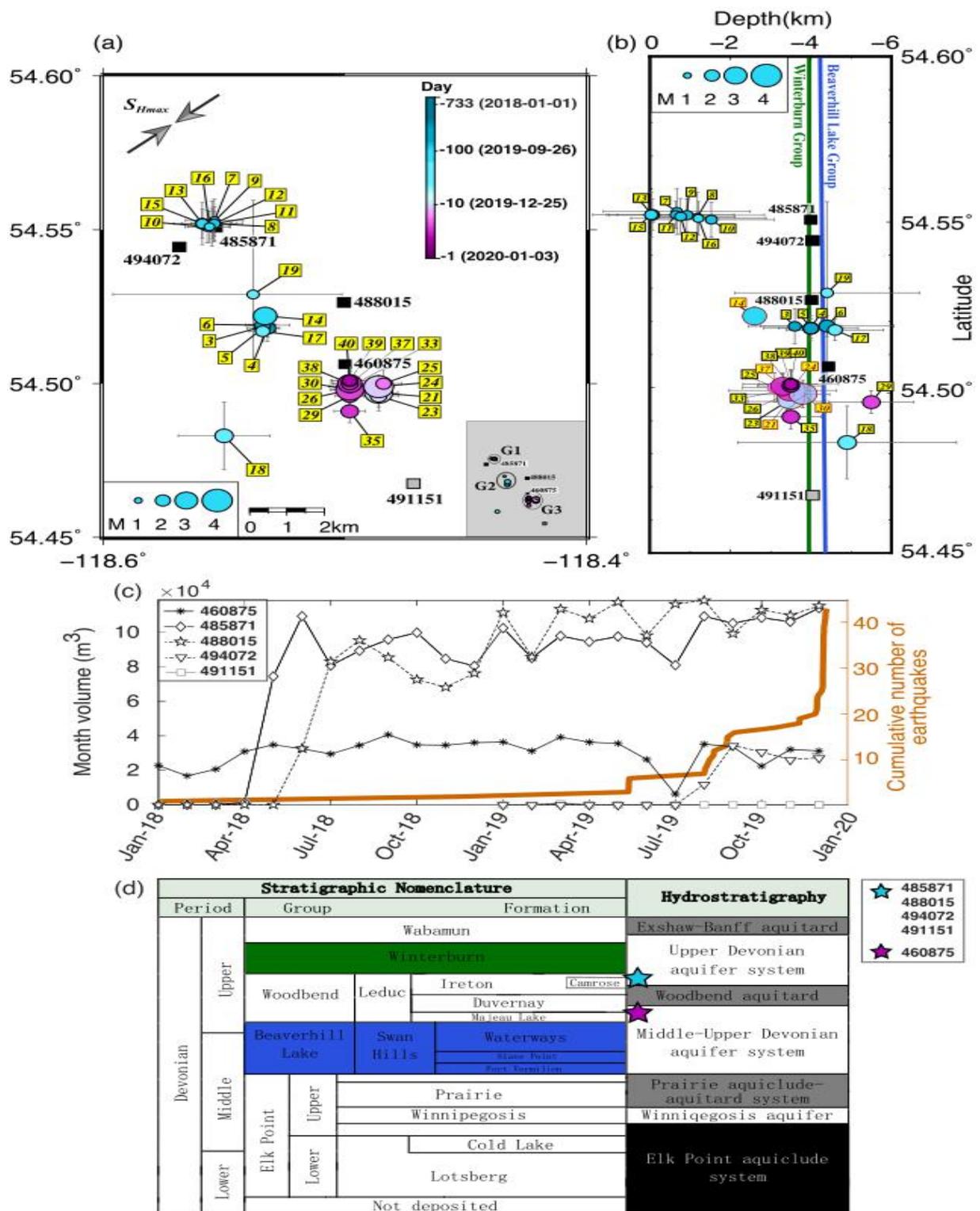


图 2 废水注入和 Musreau 湖地震序列的时空关系。(a)：重新定位的 30 个地震；(b)：重新定位地震的一个南北向剖面；(c)：月注入量与累计地震次数的比较；(d)：泥盆纪地层与水文地层划定

地震模式及其成因

研究区长期的地震平静是既有构造的不利方位和/或流体注入引起的应力扰动水平有限。而地震的发生说明，注水导致的应力积累使断层发生破裂。通常假设总的地震矩释放 ($\sum M_0$) 与注入流体的体积成正比。在其他注入了相同体积流体的地区，例如克拉荷马州，诱发了 5 级以上的地震。而研究区发生的 5 级以上地震只有其 0.3%~3%，可能是因为研究区的断层系统不发育，只有部分注入的流体起到了激活断层的作用。

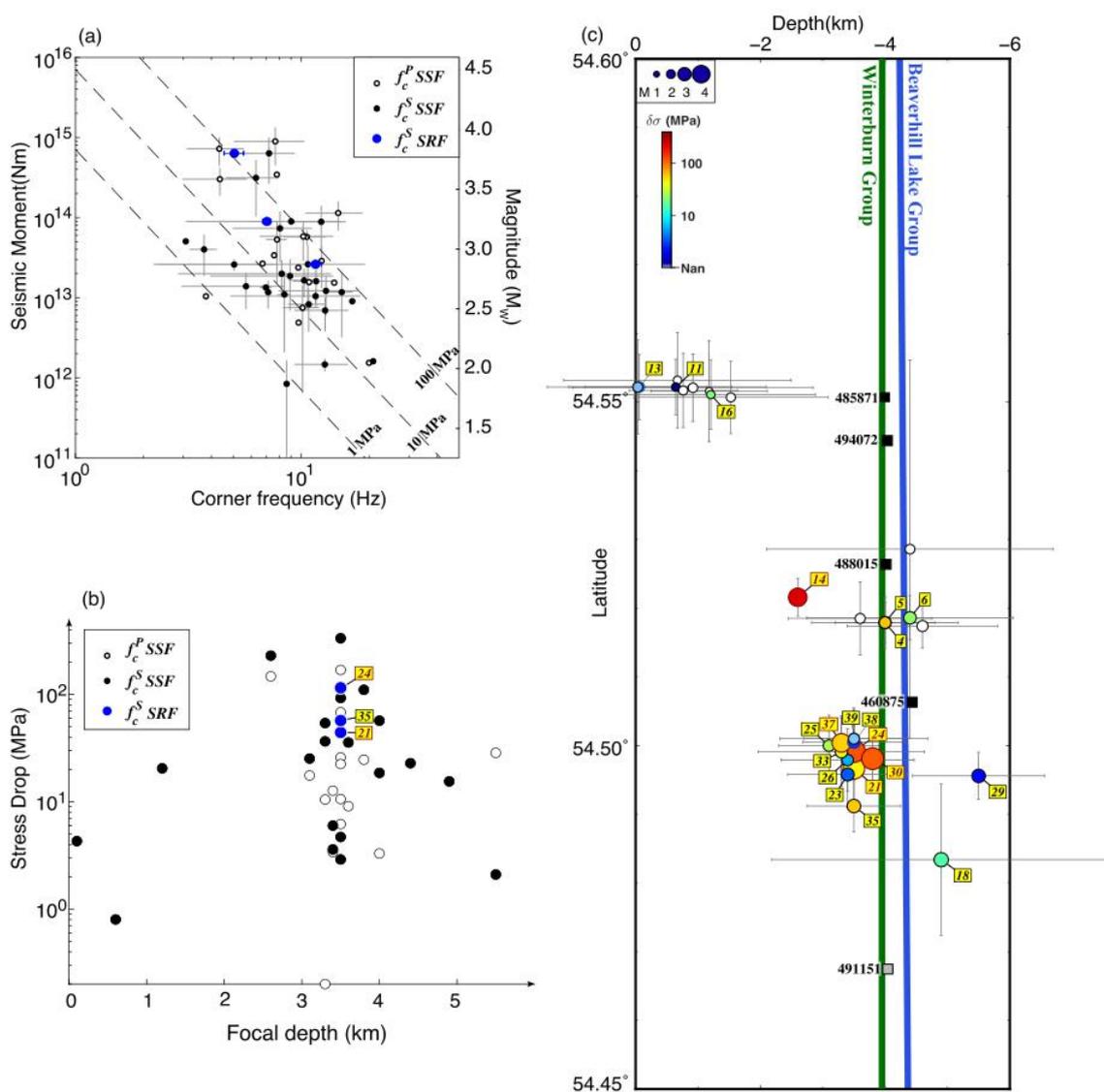


图 3 应力降值的分布。(a)：角频和地震矩之间的关系；(b)：应力降随震源深度的变化；(c)：南北向剖面所显示应力降的空间分布

另外，G3 地震群比 G1 和 G2 地震群更加活跃，表现为地震事件的时间间隔由几天缩短为几个小时，震级由 2 级增加到 4 级。但是，其对应的注入井只注入了其他井 20% 的水量。造成这种现象的原因可能是注入深度的不同。G3 地震群对应的井打在了较深的中上泥盆统含水层，相比于浅部的含水层，中上泥盆统含水层中的水能够更加容易的进入下覆的古泥盆纪礁系中。

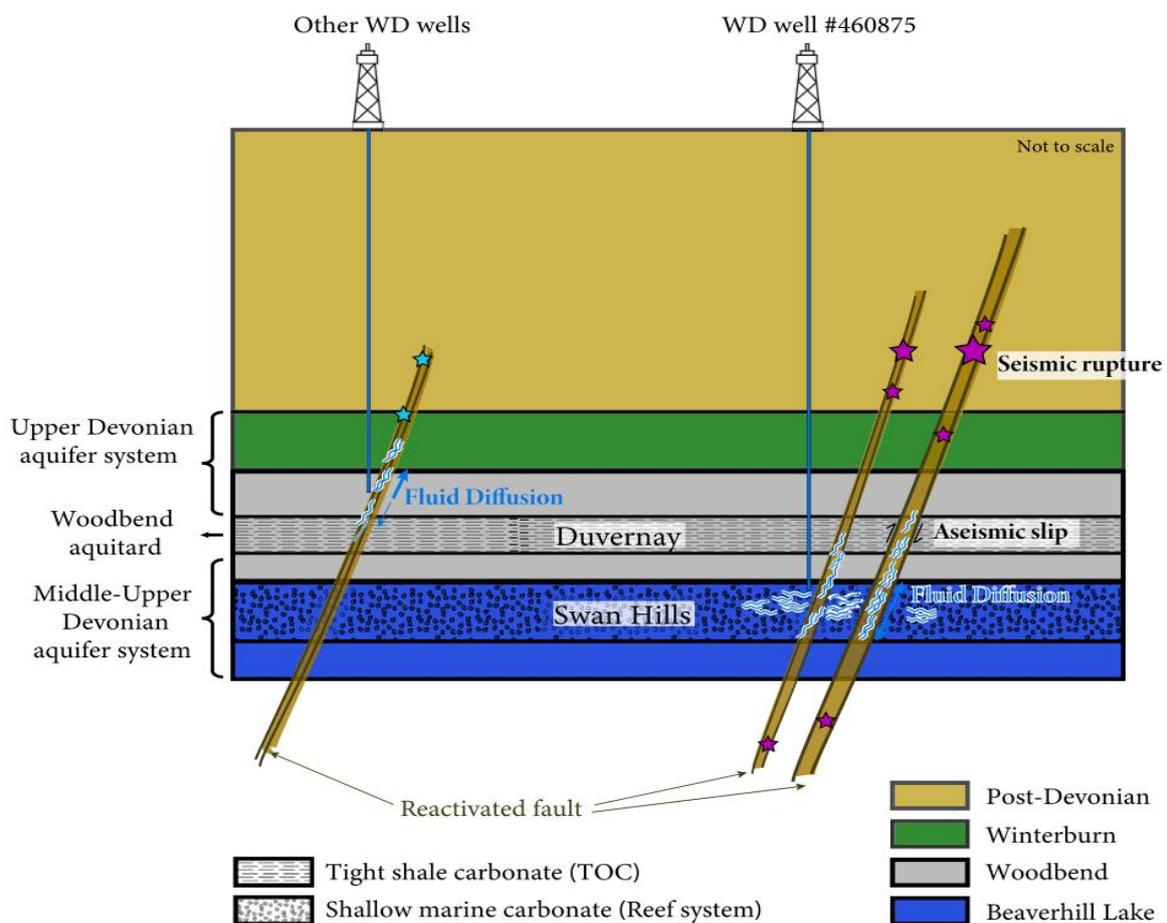


图 4 所提出触发机制的概念模型

水文地质研究通常认为，古礁系是控制注入诱发地震分布的最重要因素之一。因此，研究者认为 G3 地震对应的注入井（#460875）中的流体更容易迁移到礁系中，并到达附近受到高应力的断层，诱发地震。相反，浅部 G1 和 G2 对应的井中的流体只能沿着先存断裂向上迁移，并且在更浅的

地方诱发地震。而 G2 中，在井的下部出现的地震则是由于错误的地震定位导致的。

此外，需要一种物理机制使 G3 地震群在比注入深度更浅的位置发生，包括两个最大的地震事件（24 和 30 号地震，图 2b）。研究者认为，注入引起的无震滑移起到关键作用。先前研究表明，总有机碳高的材料更倾向于稳定滑动，而不是地震破裂。流体进入高有机碳的 Duvernay 组，诱发无震滑移，产生的应变将沿着断层进一步向上传递，加载于脆性段，并在较浅深度诱发地震破裂。

事实上，该项研究并没有直接观测到 Duvernay 组中发生无震滑移，但是 G3 地震群中较宽的应力降范围具有一定的指示意义。它可能反映了：从无震到地震滑移的转变；受无震滑移限制的重复破裂；或沿断层的有效正应力的变化。由于距#460875 井 1 km 处的应力扰动可能不够大，不足以证明 G3 中 $\Delta\sigma$ 的变化，所以研究者认为，涉及无震滑移的两种情景更有可能发生。

总之，该研究提出的地震发生模式表明，废水处理注入导致的断层再活化过程，可能会随着局部地质和水文特征的不同而发生显著变化。注入的流体是否能沿水平方向或垂直方向有效运移，决定了发育良好的地壳断层重新活动的可能性。就应用方面而言，该模型为加拿大西部沉积盆地废水处理相关的地震灾害评估提供了新的见解。

来源：Yu H., Kao H, Visser R, et al. From seismic quiescence to surged activity after decades of wastewater disposal: A case study in central-west Alberta, Canada. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48, e2021GL095074.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所