

地震科技前沿快报

2024 年第 11 期（月刊总第 70 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、利用 ETAS 模型预测采矿微震活动

采矿作业会引起地下应力场变化，从而导致微震发生。研究人员使用 ETAS 模型预测了加拿大萨斯喀彻温省钾盐矿的微震活动，发现微震表现为震群型特征，贝叶斯预测框架结合马尔可夫链蒙特卡罗抽样来量化参数不确定性，该方法能准确预测地震数量和强度，为评估地震风险提供框架。

2、中国西南地区近期地震活动背景及丛集特征

中国西南地区地震活动受多种因素影响，包括自然地震背景活动、水库诱发地震和主震诱发的余震。研究发现，重大地震事件可能导致背景地震活动水平突变；水库诱发地震显著提高区域地震活动水平；主震直接诱发的地震多发生在同震滑动较大区域的邻近地区。

3、断层尺寸相关的断裂能可解释多尺度地震活动和级联地震

新研究发现，地震的能量收支受断层尺寸影响，小地震和大地震由不同的断裂过程控制。该研究建立了断裂能量与断层大小的线性关系，并通过超算揭示了大型动态破裂地震级联，为理解地震成因和多断层破裂级联提供了新视角。

利用 ETAS 模型预测采矿微震活动

采矿作业会引起地下应力场的变化，从而导致微震发生。制定预测和避免重大地震的战略对矿山的安全和有效作业至关重要。加拿大学者讨论了软岩钾盐矿中观察到的诱发微震活动。此类地震主要是由岩石开挖引起的，但也可能由先前的地震触发或由软岩塑性蠕变的延迟效应所引起。研究人员对加拿大萨斯喀彻温省钾盐矿诱发微震活动的时间演化进行了分析和模拟，采用流行型余震序列（ETAS）模型来近似计算诱发采矿微震活动的发生率。所估计参数表明，微震活动表现为震群型特征，具有有限的震间触发。此外，贝叶斯预测框架被用于计算地震序列演化过程中，在规定的预测时间间隔内，大于一定量级的最大预期地震的发生概率。这种计算概率的方法允许人们充分考虑模型参数的不确定性。后验分布的马尔可夫链蒙特卡罗抽样（MCMC）被用来生成参数链，以量化模型参数的可变性。此外，研究人员还进行了一些统计检验，以评估与观测到的微震活动相比，获得的回顾性预测的可信度。结果表明，该方法能准确预测地震的数量和序列的强度。这为计算最大预期地震的概率提供了一个框架。相关成果发表在 2024 年 9 月的 *Geophysical Journal International*。

采矿诱发地震活动是一种常见现象，它与采矿过程中发生的地下应力场变化有关。考虑到钾盐矿矿区附近应力的显著变化，钾盐矿的诱发微震活动特别值得关注。了解钾盐矿或其他类型矿山微震活动的统计学特征对危险性评估和风险减轻至关重要。地震活动的统计分析可模拟地震的演变，预测地震的未来行为，其在理解地震过程中扮演着重要角色。

研究人员分析和模拟了加拿大萨斯喀彻温省钾盐矿诱发微震活动的时间演化，主要目标是确定微震活动的统计特征，并计算在特定预测时间间隔内发生一定震级以上的最大预期地震的概率。研究人员使用了流行型

余震序列（ETAS）模型，该模型可有效估计采矿诱发微震活动的发生率。为了计算最大预期地震的概率，研究人员利用了考虑模型参数不确定性的贝叶斯预测框架。该框架结合了马尔可夫链蒙特卡罗（MCMC）采样，被用于生成参数链并量化它们的可变性。此外，研究人员还进行了统计检验，通过与观测到的微震活动数据进行比较，来评估回顾性预报的可信度。

1. ETAS 模型参数估计

ETAS 模型的条件强度符合下面的公式，其中， $\omega = \{\mu, A, c, p, \alpha\}$ 是一组参数。

$$\lambda_{\omega}(t|\mathcal{H}_t) = \mu + A \sum_{i:t_i < t}^{N_t} \frac{e^{\alpha(m_i - m_0)}}{\left(\frac{t - t_i}{c} + 1\right)^p}$$

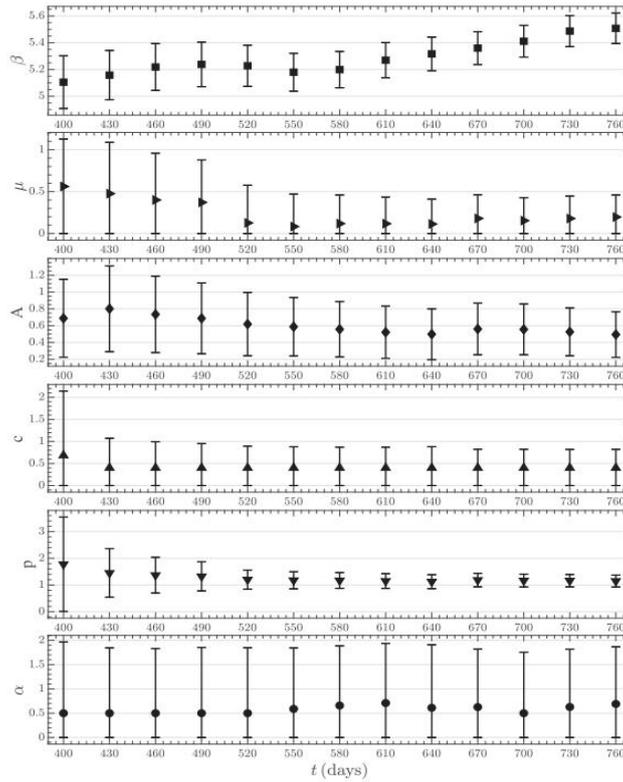


图 1 $m_0 = -0.94$ 以上微震活动序列演化过程中 ETAS 模型参数 $\{\beta, \mu, A, c, p, \alpha\}$ 估计结果

研究人员利用最大似然法估计多个目标时间区间 $[T_s, T_e]$ 的相应模型参数 ω 。首先，对地震目录的总长度进行拟合，训练时间间隔设为 $[T_0, T_e] = [0,$

800]天 (d)。截止 (cut-off) 震级 $m_0 = -0.94$ 和目标时间区间 $[T_s, T_e] = [102, 800]$ 的 ETAS 模型参数估计值为 $\mu = 0.22 \pm 0.62$, $A = 0.45 \pm 0.52$, $c = 0.47 \pm 0.89$, $p = 1.19 \pm 0.18$, $\alpha = 0.82$ 。这与观测数据拟合得很好。其次, 在多个目标时间区间内对 ETAS 模型进行拟合。这些区间是从 $T_s = 102$ d 开始选择的, 一直延伸到 $T_e = [400, 430, \dots, 760]$ d。图 1 显示了所估计参数的演变, 它们相应的 95% 置信区间, 包括 $\beta = b \ln(10)$ (β 是震级分布指数, b 表示古登堡-里克特标度的 b 值), 以及 ETAS 模型的参数。

2. 采矿地震活动性的贝叶斯预测分布

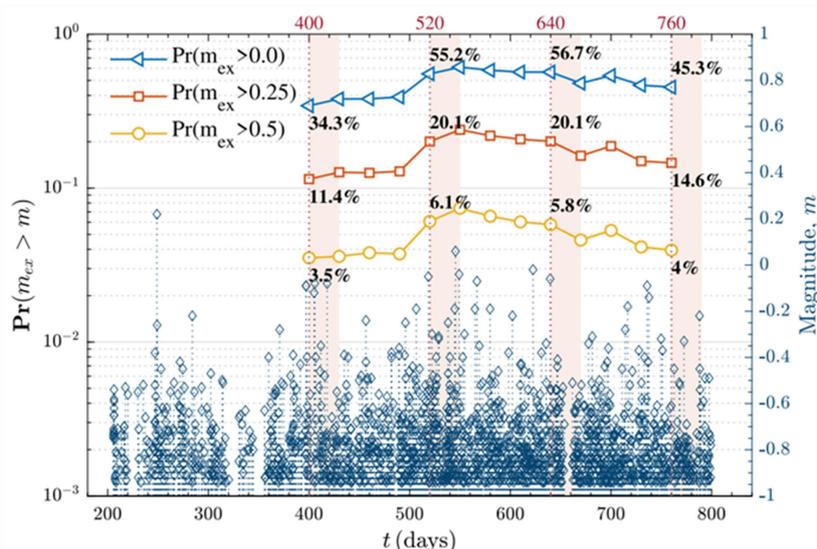


图 2 在预测时间间隔 $\Delta T = 30$ d 期间, 在每个训练时间间隔 $T_e = [400, 430, \dots, 760]$ d 结束时, 震级大于或等于 0.0, 0.25 和 0.5 的最大预期地震的发生概率的演变

研究人员使用 ETAS 模型的估计参数作为先验均值, 计算了贝叶斯预测分布 (BPD), 以估计在 800 d 训练时间间隔后的 30 d 预测时间间隔内发生大于或等于给定阈值的地震的概率。结果表明, 在预测时间间隔内, 震级大于 $m_{ex} > 0.0, 0.25$ 和 0.5 的最大预期地震发生的概率分别为 38%、11% 和 3%。此外, 研究人员分析了在预测时间间隔 $\Delta T = 30$ d 内, 在每个目标时间间隔 ($T_e = [400, 430, \dots, 760]$ d) 结束时, 大于或等于 m 级的最大预期地

震发生概率的演变。图 2 显示了计算的大于 $m_{ex}>0.0, 0.25, 0.5$ 的最大预期事件的概率的演变。可以观察到，在序列进入 520 d 左右和大地震群发生之前，概率显著增加。

3. 矿山地震活动性预测

对于贝叶斯预测分布的效果，研究人员从地震数量和地震震级两个方面进行了评估，通过 N 检验对预测地震的数量与观测地震的数量进行了统计比较，通过 M 检验评估了震级分布的一致性。

图 3 显示了在预测时间间隔 $\Delta T=30$ d 结束时观测到的地震数和预测的地震数，目标时间间隔结束于 $T_e=[400, 430, \dots, 760]$ d。图 4 显示了 M 检验对预测地震震级分布的一致性评价结果，同时，还显示了 N 检验的分位数得分（用 δ 表示），这有效地评估了在不同目标时间间隔内所预测地震数量的一致性。

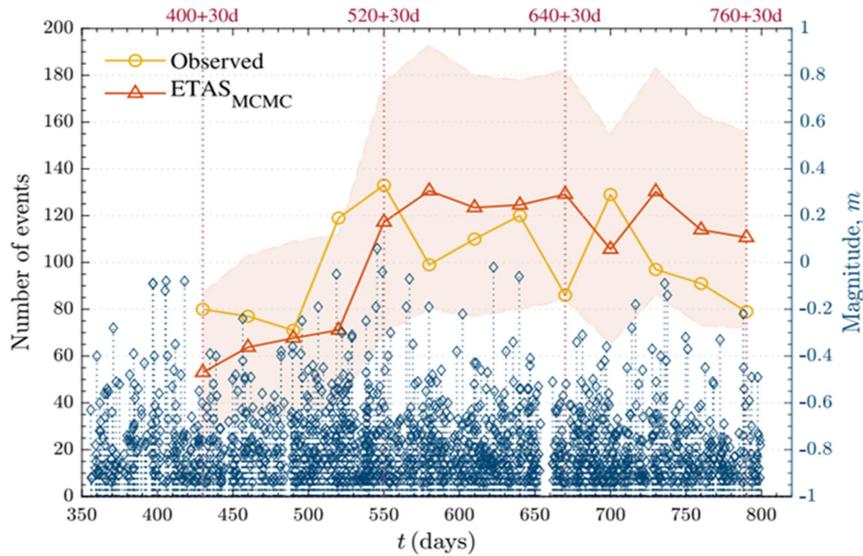


图 3 在 $\Delta T=30$ d 的预测时间间隔内，在每个训练时间间隔结束时 (400, 430, ..., 760 d)， $m \geq -0.94$ 的观测和预测地震数，分别用黄色圆和红色三角形表示

除了对整个矿区进行分析外，研究人员还测试了 ETAS 模型应用于采用不同采矿方法的两个矿区的预测能力。其中，西区主要采用应力消除采

矿法，应力消除采矿涉及战略工程开挖，旨在减轻岩体内的累积应力，从而最大限度地减少因应力集中而引发地震事件的风险。东区则采用房柱采矿法，以最大限度地减少地面沉降和相关地震发生的可能性。此外，研究人员还通过将矿区细分为北部和南部区域来进一步细化分析。之所以如此，主要是因为整个矿山地震空间分布的不均一性，而地质构造和应力分布的变化可能导致这些区域之间的地震行为存在差异。

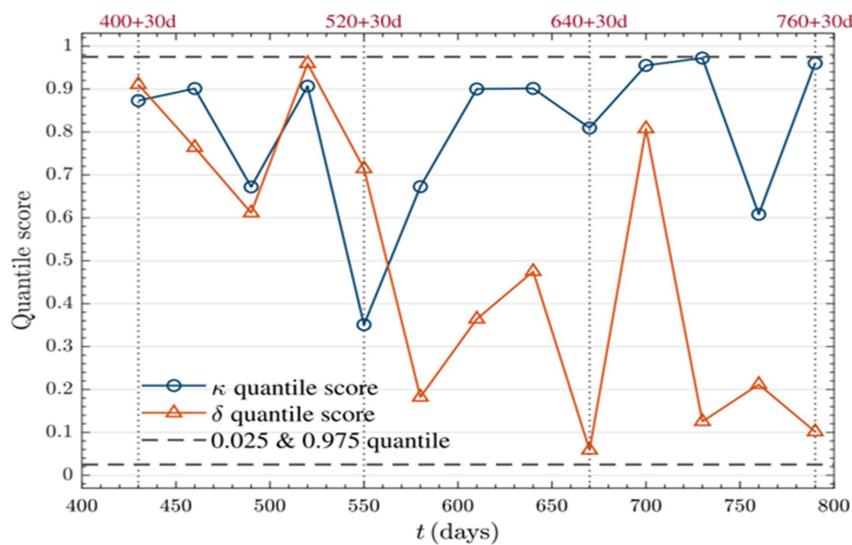


图 4 在每个预测时间间隔 $\Delta T=30$ d 内，通过 N 检验和 M 检验获得的分位数得分，以评估 $m \geq -0.94$ 的预测地震数量和震级分布的一致性

4. 小结

上述模拟及分析揭示了几个重要的发现，为了解该矿区的地震活动提供了见解。首先，较高的 β 值表明，微震分布在较小的震级范围内。其次，ETAS 模型可以很好地估计地震的发生率，这一发现很重要，因为准确估计地震活动对于减轻采矿引起的地震活动风险至关重要。再次，在整个分析序列的演化过程中，ETAS 模型获得的参数变化适中，表明 ETAS 模型具有稳健性。最后，N 检验结果表明，ETAS 模型能够准确预测地震数量，而 M 检验结果说明了震级分布的一致性。

通过对矿区东西区和南北区两组分区分析，揭示了关键 ETAS 模型参数的演化存在一定差异，尤其是代表震级分布指数的 β 。在整个序列演化过程中，西段 β 值始终呈现出高于东段的趋势。这一观测结果表明，西部微震事件更紧密地聚集在一个狭窄的震级范围内，表明小震级地震的比例更高。相反，东部地区和南部地区 β 值相对较低且变化较大，表明地震震级分布较广。

整个矿区地震活动性的分析对于得出全面可靠的结论至关重要，特别是考虑到分区域的计算参数与整个矿区参数的 95% 置信区间有很大的重叠。这种重叠表明，分区（除了西部区域）的微震行为在统计上与整个矿山没有区别，因而使用汇总数据来捕捉整体地震活动模式是合理的。

此外，值得注意的是，ETAS 模型假设过去发生的地震与未来地震发生率之间存在纯粹的统计关系。虽然该模型已经成功地捕获了地震活动性的总体模式，但它可能无法完全捕获驱动采矿诱发地震活动的潜在物理过程和机制。将额外的地质力学和地质信息整合到建模框架中将可以提高预测的准确性，并对微震活动的原因提供更深入了解。

来源：Sedghizadeh M, Berghe M, Shcherbakov R. Leveraging the ETAS model to forecast mining microseismicity. *Geophysical Journal International*, 2024, 238(3): 1491–1504.

中国西南地区近期地震活动背景及丛集特征

本研究利用中国地震台网中心编制的地震目录和四种不同的时空流行型余震序列模型（ETAS）分析了中国西南地区的地震活动情况，这些模型包括二维点源（PS）模型、二维有限源（FS）模型、三维 PS 模型和三维 FS 模型。研究旨在了解西南地区背景地震活动的特征和丛集模式，以更好地评估区域地震危险性。研究仔细分析了自 2008 年汶川 M_s 8.0 地震发生以来袭击该地区的 7 次 $M_s \geq 6.0$ 地震（共发生了 10 次）之后的余震序列，包括攀枝花地震（2008 年 8 月 31 日，6.0 级）、姚安地震（2009 年 7 月 9 日，6.0 级）、芦山地震（2013 年 4 月 20 日，7.0 级）、鲁甸地震（2014 年 8 月 3 日，6.5 级）、景谷地震（2014 年 10 月 7 日，6.6 级）、康定地震（2014 年 11 月 11 日，6.3 级）和漾濞地震（2021 年 5 月 21 日，6.4 级）。研究结果表明：①天然地震的背景地震活动水平通常比较稳定，但可能会因重大地震事件而发生突变，例如 2014 年鲁甸 6.5 级地震和 2014 年景谷 6.6 级地震，这种背景率变化可达 50%；②水库诱发地震显著提高了区域地震活动水平，在分析天然地震活动和评估区域地震危险性时不容忽视；③主震直接诱发的地震大多发生在同震滑动较大区域的邻近地区，与主震破裂呈现出互补模式。相关研究发表在 2024 年 9 月的 *Geophysical Journal International*。

2018 年，中国地震局建立了中国地震实验场（CSES）——地震科学和技术的天然实验室。CSES 位于中国西南部（SW）的川滇地区，该地区构造活动强烈。先前对中国西南地区地震活动的研究主要考察了地震丛集性特征、背景地震活动和前震等。

在地震活动统计分析中，流行型余震序列（ETAS）模型被广泛使用，用于解释背景地震活动水平变化、量化地震活动丛集模式和预测短期余震。

为了将更多从数据中获取的信息纳入模型并进行更精确的建模，各地学者先后开发了有限源(FS)ETAS 模型、3D 点源(PS)ETAS 模型和 3D FS ETAS 模型。需特别注意的是，FS ETAS 模型改进了对大地震直接余震的偏差估计，并代表了一种研究余震产生力（aftershock productivity）与同震滑移之间相关性的合理方法。

本研究使用不同版本的 ETAS 模型（包括最近开发的 3D FS ETAS 模型）对中国西南地区的地震活动进行系统分析。研究人员对采用的分析方法，包括四个 ETAS 模型的基本数学模型、随机去丛方法和最大似然估计等进行了详细的介绍。研究所使用的目录由中国地震台网中心编制，本研究选择了 2008 年 1 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日期间，在 20.5°–32.5°N、97°–106°E 地理范围内发生的 $M_L \geq 2.8$ 级地震，深度范围为 0~57 km。

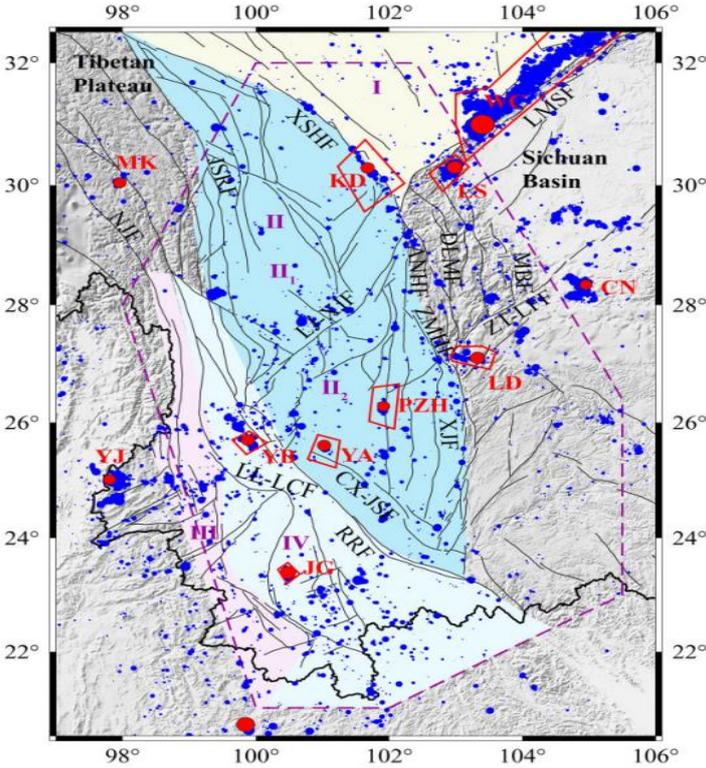


图 1 2008 年 1 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日中国西南地区 $M_L \geq 2.5$ 地震活动的震中图。红点表示 $M_S \geq 6.0$ 地震的震中，紫色虚线多边形表示模型拟合的目标空间区域

研究人员通过将四个版本的 ETAS 模型（2D PS、2D FS、3D PS 和 3D FS）与中国地震台网中心提供的地震目录进行拟合，研究了中国西南地区地震活动的时空特征。3D 模型结合了地震的深度，FS 模型考虑了大地震的破裂几何形状。相关分析主要涉及三个方面，分别是：模型拟合、地震活动特征以及水库诱发地震对自然构造地震活动估计的影响。

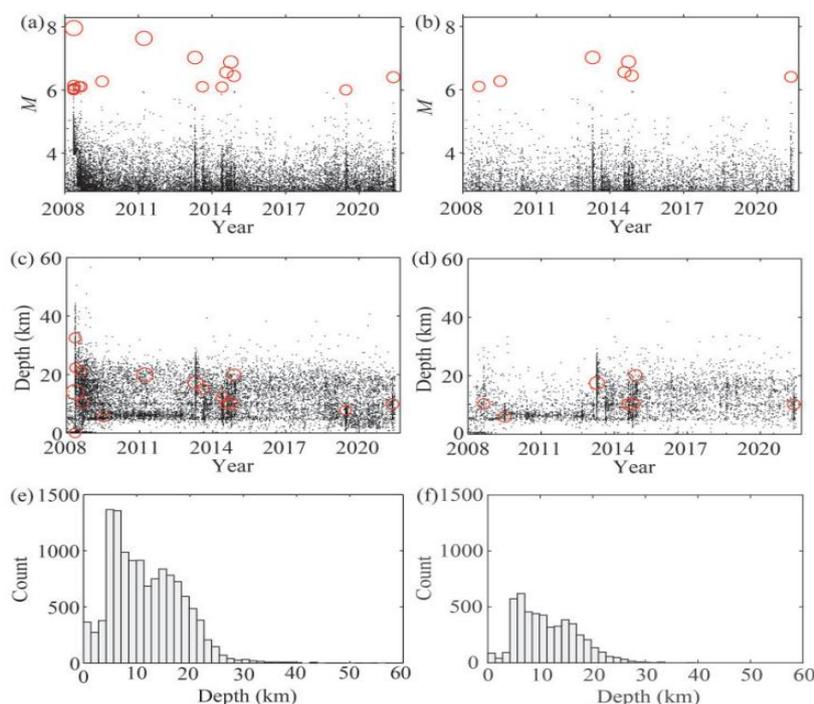


图 2 (a): 图 1 所示区域内 $M_L \geq 2.8$ 级地震的震级-时间图，红色圆圈指 $M_s \geq 6.0$ 地震；(b): 图 1 中紫色虚线多边形区域内 $M_L \geq 2.8$ 级地震的震级-时间图；(c)和(d): 图(a)和图(b)中分别显示的震中深度与事件发生时间的关系；(e)、(f): 图(a)和图(b)的深度直方图

通过将 2D PS、2D FS、3D PS 和 3D FS 版本的 ETAS 模型与地震数据的拟合结果进行比较，发现以下两点值得注意。首先，在对背景地震和触发地震进行分类时，尽管 PS 模型给出的背景地震活动率略高于 FS 模型，3D 模型给出的背景地震活动率略高于 2D 模型，但是所有四个模型都得出了相似的地震丛集率（触发地震在所有地震中所占的比例）。触发地震的各向同性空间响应导致 α （表示主震的余震触发潜力）被低估，这可以通

通过对主要事件引入 FS 建模来纠正。在对目录中的谱系进行分类时，结合地震破裂几何特征的 FS ETAS 模型表现更好，其能拟合更大的 α 值，并将更多的直接触发事件归类为主震。其次，震源深度在地震触发中起着重要作用。考虑现实深度分布的 ETAS 模型会产生更好的结果，似然值更大。例如，3D 模型纠正了对地震是背景事件的概率的错误估计。因此，3D FS ETAS 模型具有更大潜力。

研究区自然地震活动特征的分析主要包括背景地震活动水平、丛集效应和余震的直接触发，主要发现如下：

(1) 通过将研究区划分为 10 个子区域来估计背景地震活动，发现背景地震活动是非平稳的，并受到大型主震的调节，变化高达 50%。在每个区域的主震中都检测到了不同的地震活动相位。在中国西南地区，大地震发生前的地震平静（seismic quiescence）或加速是常见的。

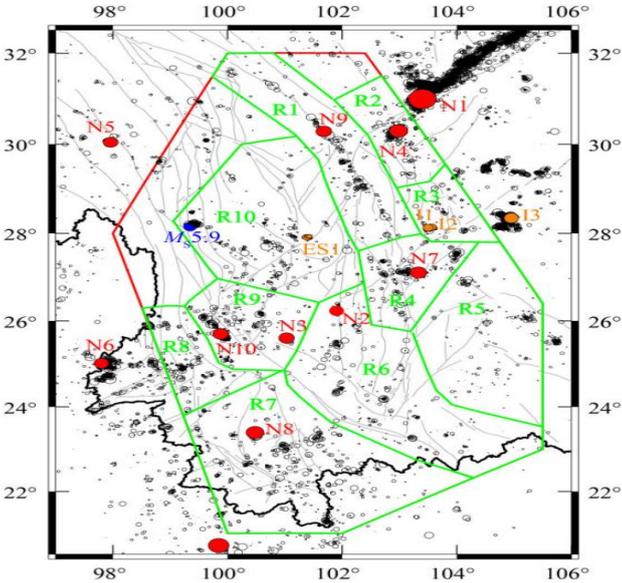


图3 为研究中国西南地区背景地震活动而定义的子区域。红点代表 $M_s \geq 6.0$ 地震（N1至N10），橙点表示诱发地震（I1至I3和ES1），R10中的蓝点指2013年8月17日香格里拉 M_s 5.9地震

(2) 使用随机去丛方法对背景事件和触发事件进行分类，聚类效果明显。以 3D FS ETAS 模型的结果为例，在总共 4973 个 $M_L \geq 2.8$ 的地震事

件中，约有 2338.79 个事件被确定为背景事件。因此，53%的事件被归类为触发事件。在触发地震中，16.77%是由本研究中所考虑的七个主要事件直接接触发的。

(3) 余震大致补偿了同震破裂。在主震的破裂面上，直接余震往往发生在滑移最大的区域附近，或者有时发生在滑移最大的区域内，这与先前研究的结果一致。此外，小事件的位置有助于反演震源破裂的几何形状。

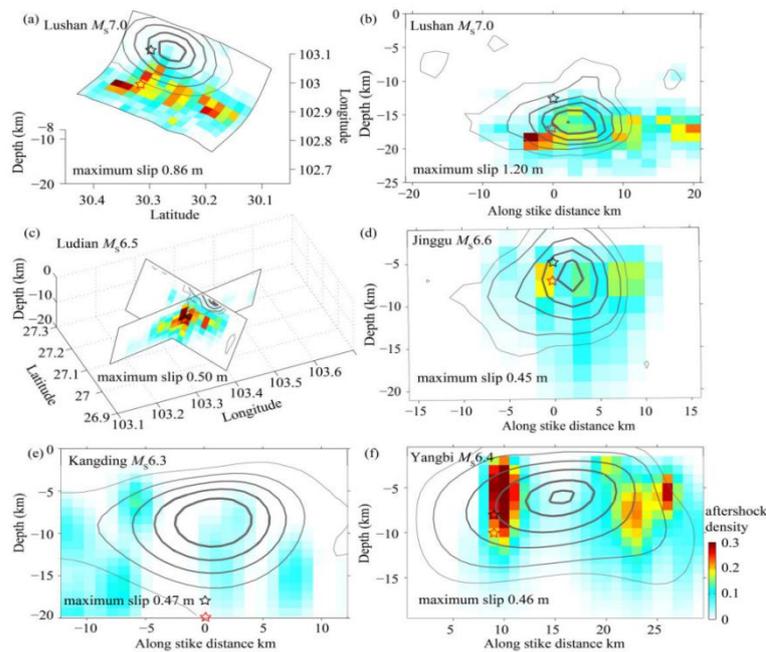


图4 大地震的余震产生力密度与同震位移对比：(a)芦山7.0级地震，(b)芦山7.0级地震（与a不同的另一学者的研究），(c)鲁甸6.5级地震，(d)景谷6.6级地震，(e)康定6.3级地震，(f)漾濞6.4级地震

丰富的水库诱发地震对构造地震活动的估计造成了不可忽略的干扰，研究人员以锦屏一级水库和溪洛渡水库为例，评估了水库诱发地震引起的背景地震活动比例的变化。研究发现水库蓄水后，水库附近的地震活跃程度不断提高。在假设背景地震活动水平处于稳定状态的前提下，研究人员基于四种版本的 ETAS 模型对数据进行了拟合。但即使在 μ 值（背景地震水平）不变的情况下，拟合结果也存在一定误差。分析结果总体表明，水库蓄水后，水库区域的背景地震活动率急剧上升。因此，在数据分析中忽略

诱发地震很容易导致对自然地震背景水平的过高估计。此外，研究发现背景地震活动率呈现周期性模式，这可能归因于水库水位的季节性变化。

当目录中存在诱发地震时，对自然地震的危险性评估必须小心谨慎。然而，只要意识到诱发地震的存在，利用 ETAS 模型获得有意义的结果并不困难。此外，由于诱发地震也会对人类生命和基础设施造成危害，因此在诱发地震活动丰富的地区，评估地震危险性时也应考虑诱发地震。

本研究表明，ETAS 模型及其扩展模型可作为分析自然和诱发地震特征的有效工具。特别是，研究结果显示 3D FS ETAS 模型是最佳拟合模型。这说明可以通过使用更具信息量的模型来改进地震建模。

来源: Liu Y, Zhuang J, Guo Y, *et al.* Background and clustering characteristics of recent seismicity in Southwestern China. *Geophysical Journal International*, 2024: ggae211.

断层尺寸相关的断裂能可解释多尺度地震活动和级联地震

规模在多个震级范围内变化的地震，通常会在复杂的多断层和多事件序列中破裂。尽管观测到的地震数量巨大，但地震能量收支的尺度仍然是个谜。美国学者领衔的新研究认为，完全不同的断裂过程控制着小地震和大地震。研究人员将地震观测与基于物理的地震模型相结合，发现动态弱化（**dynamic weakening**）和再强化效应（**restrengthening**）在小地震的能量收支中都不可忽略。本研究建立了断裂能量和断层大小之间的线性标度关系，并发现了这种标度关系随滑移的中断。研究人员通过超算应用了这种标度关系，揭示了断层破碎带内涉及 **700** 多个多尺度断裂的大型动态破裂地震级联，并对所有尺度的地震活动提供了一个简单解释，这对理解地震成因和多断层破裂级联具有重要意义。相关研究成果发表在 **2024** 年 **7** 月的 *Science*。

受复杂多断层破裂动力学控制的大地震（如 **2023** 年 **2** 月 **6** 日土耳其发生的地震）的灾难性后果提醒人们，地震无法预测或预防，只能做好准备。然而，人们对地震的复杂机制仍然知之甚少。天然断层带是结构复杂的系统，由长度从几毫米到数百公里的断裂和断层组成，可能引发多个数量级的地震。但地震能量收支的细节、其尺度特性以及多尺度断裂和断层如何相互动态作用仍然是个谜。

在本研究中，研究人员将分析与数值模型和地震数据相结合，为地震动力学的标度提供了一个统一的视角。首先，利用由闪热摩擦驱动的圆形裂纹状动态破裂分析模型进行推导，并考虑了同震断层再强化。然后，基于滑移脉冲后的一般应力恢复原理，推导出双向扩展的运动脉冲式破裂的分析模型。最后，汇编了五种不同数据集的断裂能量和相关震源量（如破裂断层大小）。

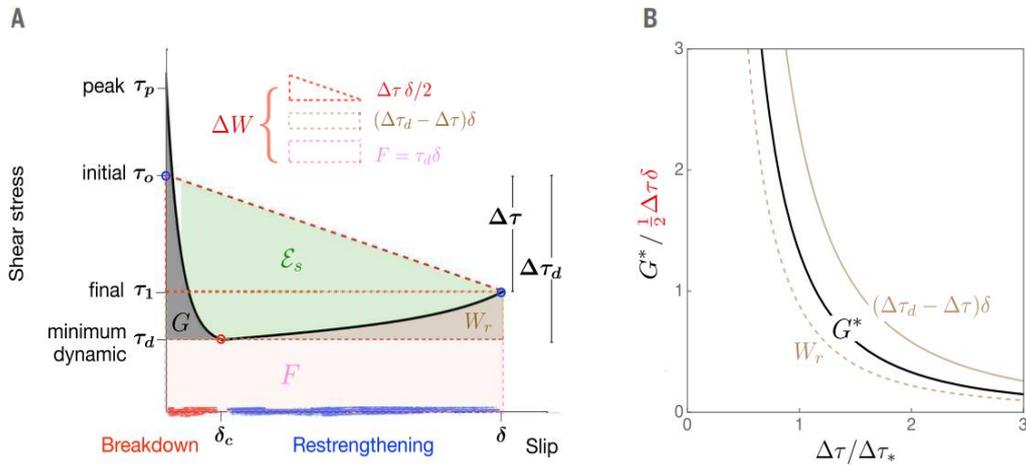


图 1 地震能量收支，包括动态弱化和再强化。(A) 总体、逐点地震能量收支图；(B) 归一化 $G^*=G-G'$ ， G^* 即断裂能量 G 与其地震学可观测部分 G' 之间的差值

一般认为，地震断裂能量 G' 是通过地震观测推断出的，这需要假设在地震过程中动态再强化和断层应力的“过冲或下冲”可以忽略不计。然而，动态弱化和再强化效应在地震过程中确实存在，并且不可忽视。

为了纠正这一问题，研究人员引入了一个物理修正量 G^* ，其表示为：

$$G^*=G-G'$$

G 是完整的断裂能量， G' 是从观测中推导出的部分。通过这个修正量 G^* ，研究人员能够更好地解释和量化动态弱化与再强化效应在地震能量收支中的重要性。

通过分析破裂过程中的应力分布和滑移历史，研究人员推导出 G^* 及其分量的解析表达式，发现可以仅用破裂尺寸 R 来表示平均 G^* ：

$$G^*=0.4393 \times \tau^* R$$

其中， τ^* 是动态应力前因子 (prefactor)。

在脉冲式模型 (pulselike model) 中，研究人员提出动态下冲与破裂大小成线性比例 (这是所提出的 G^* 标度的核心)，这主要基于脉冲式破裂后的应力恢复机制。在本研究的裂纹式模型 (cracklike model) 中，需要对摩

擦进行分析，以描述尖端后应力如何恢复。

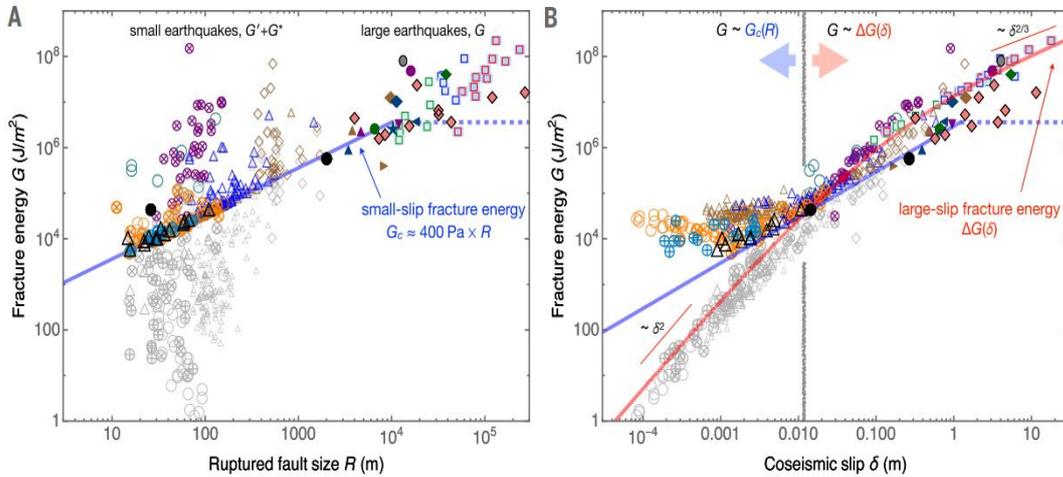


图 2 线性标度相关的断裂能量，由“小滑移”断层特性和不断增加的“大滑移”分量组成。（A）小型和大型地壳地震和俯冲带地震的断裂能量 G 与破裂断层尺寸 R 的关系；（B）与（A）相同，但 G 相对于同震滑移绘制，0.01 m 处的灰线表示标度关系的中断

断裂能量是地震期间耗散的平均能量，通常使用理想化的断裂模型从地震观测中推断出来。因此，本研究中的断层大小相关断裂能量模型的含义超出了理论分析的范围。研究人员的模型增加了数据一致且基于物理的解释，解释了为什么地震动力学通常涉及激活跨越各种空间尺度的互连多断层系统。研究人员的分析模型表明，静态强但动态弱的断层可能驱动多断层破裂级联。此外，本研究的 3D 动态破裂级联模拟强调了可变方向断层段之间动态和静态应力转移的重要性。

断裂能量模型为在所有尺度上观察到的地震提供了直观的解释，包括完全发生在主断层之外的潜在地震活动。高分辨率光学卫星图像相关性分析证实了分布式断裂和扩散变形的重要性。这与本研究中多断裂破裂级联动态触发主断层模型中的断层外与主断层的滑动分区相一致。在断层外的断裂中观察到的不同滑动方向类似于动态断裂网络级联中倾斜方向的变化，可能无法仅用背景或静态应力变化来解释。

本研究的发现对自然断层系统的力学和地震周期有重要影响。断层外断裂网络中级联断裂对应力的重新分配可能会促进或抑制较大事件的成核，并解释断层强度和应力的动态变化（即使在主断层较弱的情况下，例如在俯冲带）。级联多断裂地震破裂启动模型可能包括级联复合断层地震活动，该地震活动由断裂或断层网络内与断层大小相关的最小断裂能量 G_c 驱动，从而导致大地震的成核。该机制与经典的“级联”成核模型有相似之处。

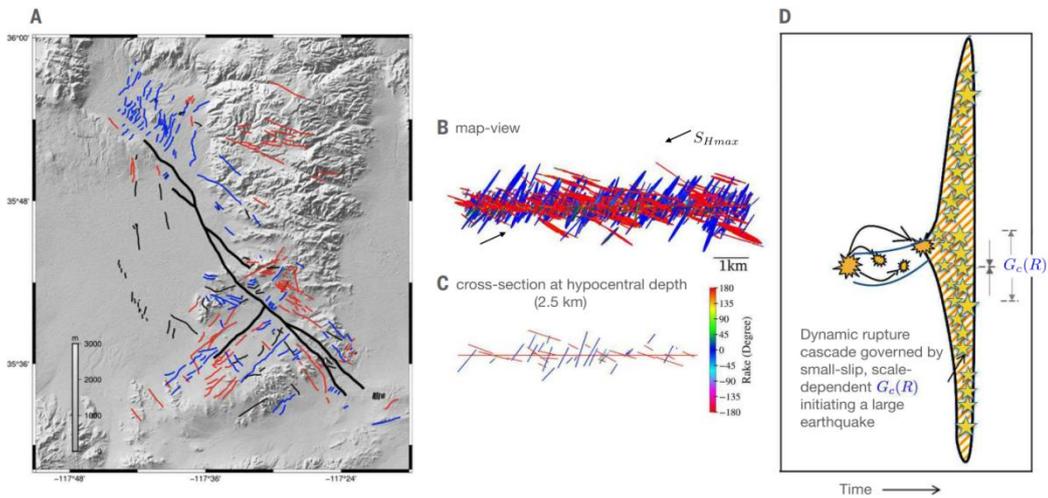


图3 破裂图和模型输出。(A) 基于2019年里奇克雷斯特地震序列干涉合成孔径雷达数据的同震激活断层外断裂图；(B) 破裂级联动态触发主断层后，本研究的3D动态破裂模型中整个断裂网络的可变倾斜度；(C) 深度为2.5 km的B图水平横截面，与A图中的地表观测结果一致；(D) 完善后的多断层级联地震启动模型

本研究提出的“小滑移”断裂能量与断层大小的简单线性标度背后的物理机制，为进一步研究提供了一个有趣的课题。大断层的断层核心嵌在断层破碎带，包括次级断层、高度破碎物质的封闭透镜体和分布式宏观断裂。在断层核心内，应变容纳在一个或多个主要滑动区内，这些滑动区是厚度为厘米至米的高度粉碎的超碎裂泥，并且可能在地震时局限于亚毫米级的“滑动面”。对于较小的断层，这种结构复杂性会降低，因为单个断层核心嵌入在薄的断层破碎带中。本研究汇总了相关观测数据，结果表

明，断层带（FZ）和主滑移带（PSZ）的厚度均与总断层位移 D 大致呈线性关系。PSZ 在此定义为大断层的断层核心内的超碎裂泥层，或较小、较不成熟断层的整个断层核心。当断层超过 $D \approx 100$ m (PSZ) 和 $D \approx 300$ m (FZ) 时，两种比例关系都会饱和。经验比例关系 $D \sim 10^{-2} L_f$ (其中 L_f 为断层长度) 表明，等效比例关系为 $FZ \sim 10^{-2} L_f$ 和 $PSZ \sim 10^{-4} L_f$ 。

在局部化背景下，“小滑移”最小断裂能量 G_c 可以解释为同震局部化过程的断裂能量。基于此，预计 G_c 与断层主滑移带的厚度成比例，而主滑移带本身与断层总位移和断层长度成比例。因此，局部化提供了一种物理机制，解释了与断层强度共定位（colocalization）急剧下降相关的闪热弱化（flash-heating weakening）的开始。随后的局部化后滑移（postlocalization slip）可能有利于孔隙流体热增压，导致地震破裂“尾部”的滑移持续减弱。

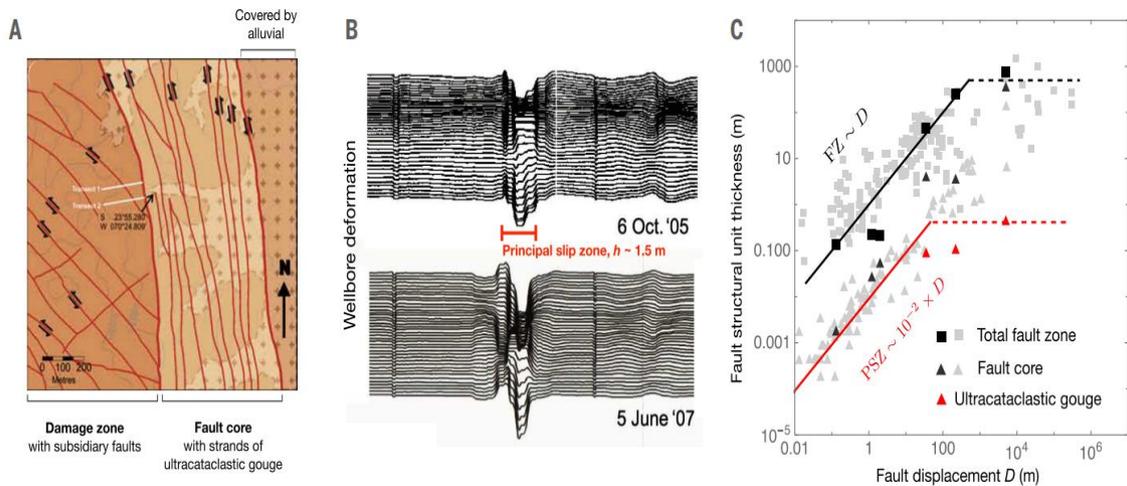


图 4 断层带。(A) Caleta Coloso 断层的地质图，显示断层核心厚度约为 400 m；(B) 圣安德烈斯断层的超碎裂泥带与圣安德烈斯断层深度观测站的井筒相交，其是一个主要滑移带；(C) 总断层带和主滑移带的厚度与总断层位移 D 的近似线性关系

断层尺寸相关断裂能量模型提供了一个直观而全面的框架，可用于理解不同尺度地震的复杂性。通过承认不同的“小滑移”和“大滑移”断裂能量分量控制着地震动力学，研究人员为驱动自然断层带中地震成核、传播和级联的机制提供了新的见解。在地震学数据日益丰富的时代，该领域

仍然“模型贫乏”，缺乏用于理解不同尺度地震力学的、力学一致的理论框架。本研究的模型是弥合这一差距的关键一步，增强了理解并可能预测地震动力学的理论能力。

来源：Gabriel A A, Garagash D I, Palgunadi K H, *et al.* Fault size-dependent fracture energy explains multiscale seismicity and cascading earthquakes. *Science*, 2024, 385(6707): eadj9587.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所