地震科技前沿快报

2025 年第 4 期（月刊总第 75 期）

中国地震局科学技术委员会　　中国科学院兰州文献情报中心
中国地震局科技与国际合作司　　中国科学技术信息研究所

本期概要

1、实验室规模地震的数值模拟和无监督机器学习对地震成核的启示

加拿大研究者采用无监督机器学习流程，模拟实验室地震以探究成核机制。该研究支持宏观尺度级联触发模型，但颗粒尺度揭示剪切应力积累可能与预滑触发相关，表明两种机制可共存。该方法为理解地震成核提供新框架，未来可扩展至孔隙压力等复杂参数。

2、全球导航卫星系统揭示中国西部地壳变形特征与强震的关系

基于中国地壳运动观测网络的 GNSS 数据，研究发现中国西部强震前地壳变形存在显著异常：7 级以上地震多发生于最大剪切应变速率高值边缘与断裂带交汇处，且震前应变速率偏离长期趋势。结合速度场、应变场和时间序列分析，提出以应变参数异常（如 18%偏离）作为中强震预测判据。

3、使用极值理论的诱发地震震级的经验约束预测策略

研究提出基于极值理论的统计模型，预测诱发地震的震级上限与下限。通过 80 多个诱发地震序列测试，发现上限模型易高估震级，跳跃限制模型更接近实际，两者结合可定义概率分布。

实验室规模地震的数值模拟和无监督机器学习对地震成核的启示

了解地震成核对于预测和减轻地震事件、拯救生命和加强地震多发地区的建筑实践至关重要。级联触发（cascade triggering）和预滑触发（preslip triggering）是两种流行的理论，这对基于现场观察进行机制区分提出了挑战。来自加拿大的多名学者采用了一种新颖的无监督机器学习流程，在离散元法（DEM）框架中集成了粘滑实验的宏观和粒度数据。通过运行 27 次模拟，该研究分别对前震和主震进行聚类，并评估它们的相关性。由于没有观察到成核参数和主震大小之间的任何尺度关系，因此该研究支持宏观尺度上的级联触发模型。另一方面，进一步的粒度分析发现，除了库仑应力转移之外，还有一种与断层上的剪切应力积累相关的额外机制，这有可能是预滑触发。总体而言，虽然前震可能不会直接影响接触力（contact force）的演变趋势，但它们可能会通过增加积累剪切应力的接触比例，进而为断层动态破裂做好准备。该研究推断，两种理论机制可能共存。相关研究成果发表在 2024 年 11 月的 *Scientific Reports*。

理解地震成核机制至关重要，成核持续时间影响震级，成核位置则影响峰值地面加速度，这些知识可为地震灾害评估与减缓策略提供重要支持。目前，关于地震成核有两种主要理论：级联触发模型和预滑触发模型。级联触发模型认为，一个断层片段的破裂通过应力转移可引发周围断层的破裂，最终导致主震发生。预滑触发模型则认为锁固段（locked patch）通过周围的无震滑动加载，前震是主震成核的副产品。虽然成核参数和主震大小之间的强烈尺度关系是预滑触发的有力指标，但如果断层元素呈层次分布，级联触发模型中也会出现这种尺度关系。因此，通过实地观测很难解决这两种理论中的争端。

由于地震的分形特性（fractal nature），实验室研究可以模拟小尺度地

震，控制实验条件，深入探讨成核机制。另外，近年来分类算法等监督机器学习已被应用于实验室地震研究，合成数据还被用于训练神经网络以拾取地震波的到达。

该研究利用从数值模拟中生成的大量数据开发了一个新框架，并将无监督学习算法应用于这些数据，以研究实验室规模的地震成核机制。在数值模拟中，选择在 150 MPa 下进行模拟，以便与已有实验进行交叉验证。研究人员使用属于离散元法的颗粒流程序（Particle Flow Code 3D，PFC3D）进行三轴粘滑实验（27 次），使用核密度函数（KDF）将前震和主震事件进行分割，在宏观尺度和粒度尺度上进行分析。最后，使用层次聚类算法对前震和主震事件进行分析。

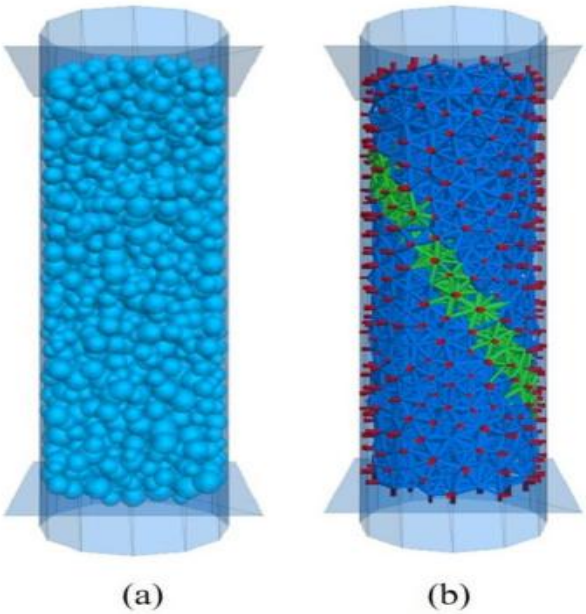

图 1　模拟设置。（a）样品被模拟为三轴压缩室内的粒子集合，压缩室由圆柱形压缩壁以及顶部和底部加载压板组成；（b）粒子之间的接触，平直节理接触以蓝色显示，光滑节理接触以绿色显示，线性接触以红色显示

该研究提出了一种结合数值模拟和数据管道的地震研究无监督学习框架。这种新颖的研究方法利用了数值模拟，可以进行多次试验并生成大量数据。数据管道由多个阶段组成，包括数据收集、集成、分析和验证。

在数值模拟中，使用 KDF 隔离单个前震和主震事件。通过比较模拟结果中声发射（AE）的 b 值和分形维度与实验数据，验证了模拟的可靠性。在宏观变量聚类分析中，基于每个模拟的前震点云计算了豪斯多夫距离（Hausdorff distance）矩阵，并利用单链接法将模拟结果分别聚类为前震层次树（T_f）和主震层次树（T_m）。通过计算 Fowlkes-Mallows 指数在每个层次树的分布，并与随机生成的等节点数树进行比较，评估 T_f 与 T_m 之间的相似性。结果表明，除了树的第 2 和第 8 层次外，其他层次的 p 值均大于 0.2%，因此无法拒绝零假设，即前震与主震之间没有显著关系。此外，这一结论在不同距离度量（如 Chamfer 距离和 Earth Mover 距离）和链接函数下保持一致。这些分析表明，主震特征与前震序列变化没有显著关系。

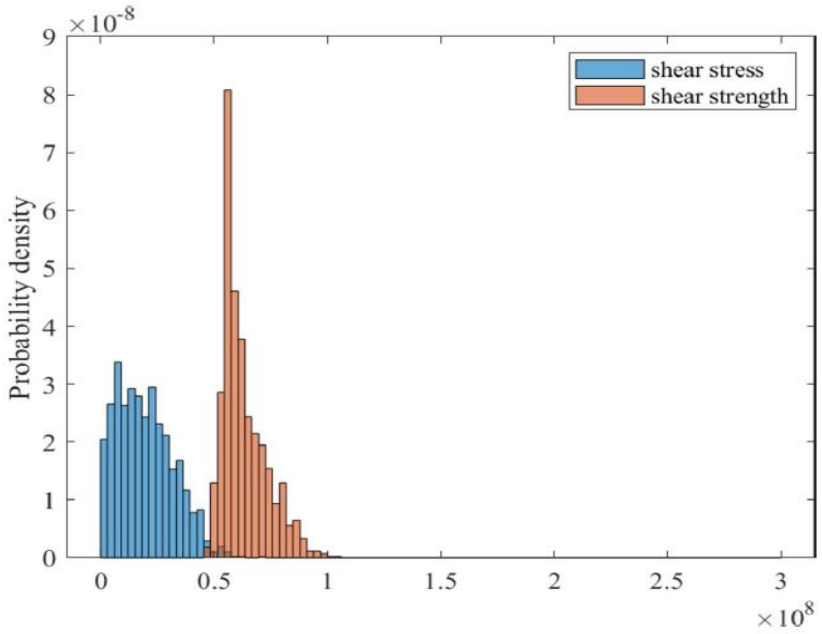

图 2　通过归一化直方图（面积代表频率）估计给定时间或给定快照中的剪切应力（蓝色）和强度（橙色）的概率密度函数

在颗粒尺度上，根据形状对接触力段进行了分类，以研究前震应力传递对断层接触力分布的影响。结果表明，约 25%的接触力积累了剪切力，但未增加剪切强度。随着主震的临近，接触点受到了前震应力传递的额外

载荷，且更易发生大规模剪切破裂。尽管前震应力传递机制在时间上有所变化，但它并未改变断层上应力分布的总体趋势。剪切荷载接触可能会因前震而发生卸载，然而，这种现象的发生仅占所有记录的法向力和剪切力数据的 10%。这解释了宏观上前震和主震之间缺乏相关性的原因。此外，前震更容易使接触受到剪切应力的作用，而非法向应力，尤其是在主震临近时，这促进了断层的剪切破裂。前震应力转移机制虽然不直接触发主震，但它通过增加剪切应力和改变断层上的应力状态，为主震的发生提供了有利条件。

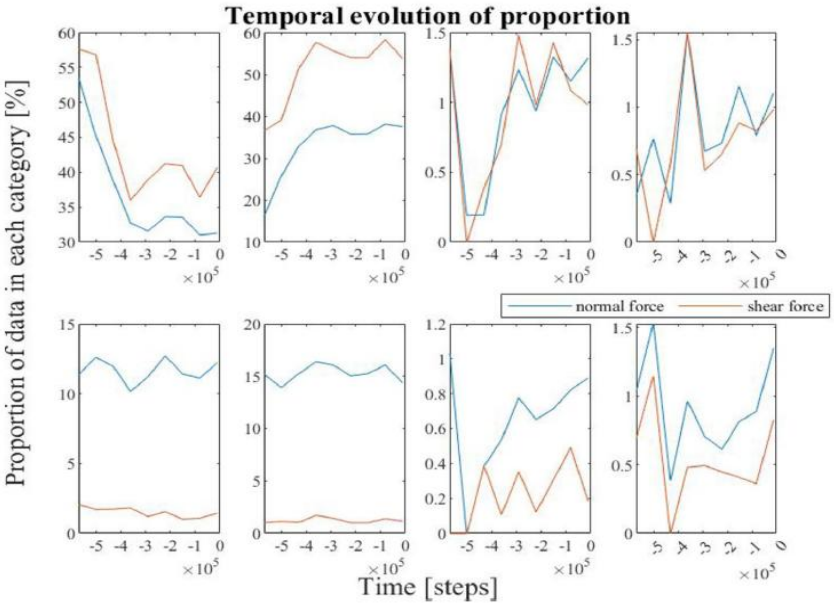

图 3　每个类别的接触法向力段的比例随时间的变化（每个面板对应八个类别之一）

粒度变量上的进一步分析表明，接触剪切力的增长速度普遍高于接触法向力，这一现象可解释为库仑应力传递的增加，进一步证明每次前震都可能使断层进入有利于主震发生的状态。随着时间的推移，剪切应力与剪切强度的概率密度函数重叠区域增大，表明接触剪切应力上升速度超过剪切强度。分析还表明，除了库仑应力传递外，可能还有其他机制促进了剪切应力的积累。该机制很可能是预滑移，因为模拟中不涉及流体或其他机

制。因此，研究推断出两种理论机制，即级联触发和预滑触发可以共存。

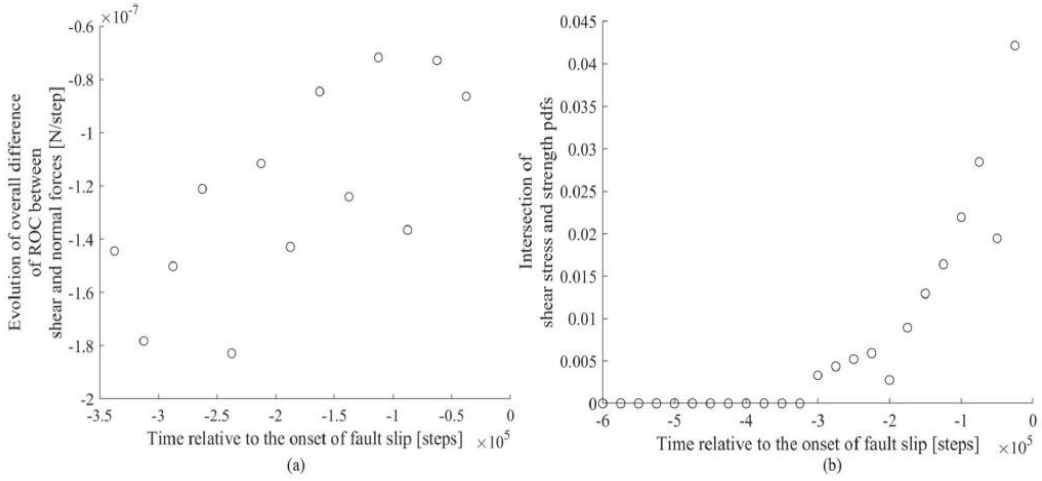

图 4　（a）接触剪切力和法向力之间的加速度标量差随主震时间的变化；（b）剪切应力和强度直方图之间的重叠面积随主震时间的变化

该研究提出的方法允许收集大量数据，这可以为粘滑不稳定性提供新的见解。此外，这些接触力分析表明，由于前震引起的应力转移极不可能（>90%的概率）影响接触力演变的趋势。因此，随着断层向动态破裂不稳定态发展，无论是否有前震，这最终都会实现。结果还表明，前震可以使断层处于有利于动态破裂的状态。与机器学习中的其他研究相比，该研究的方法不仅考虑了前震的大小和持续时间，还考虑了它们的空间位置。

该研究的基础理念是地震在本质上是分形的，这意味着晶粒间产生声发射的界面上的滑动类似于产生地震的断层上的滑动。然而，该研究也存在一定的局限性。最值得注意的是，在该研究的模拟中，整个断层在主震期间破裂，这意味着它受边界效应和加载框架刚度的控制。断层被嵌入到主岩中，但现实环境中不存在这种情况，而这是实验室地震研究中常见的问题。

目前，该研究仅关注在专用机械加载路径下的受控实验室实验，实验范围不包括由于流体的存在和断层润滑的影响而导致的孔隙压力变化。但

是，在未来的研究中，该方法可以在数值模拟阶段包括更复杂的参数，例如通过孔隙压力的变化及变率描述前震和主震。这些实验将有望为触发和诱发地震提供新的见解。此外，该研究重点关注声发射的 b 值和分形维数，因为这两个值被视为地震破裂和岩石裂缝的区别因素。未来可以基于该研究提出的框架，通过进一步挖掘数据，研究更详细的特征。

来源： Ye S H, Lui S K Y, Young R P. Insights on earthquake nucleation revealed by numerical simulation and unsupervised machine learning of laboratory-scale earthquake. Scientific Reports, 2024, 14(1): 28812.

全球导航卫星系统揭示中国西部地壳变形特征与强震的关系

为了阐明中国大陆西部地区全球导航卫星系统（GNSS）地壳形变与强震孕震之间的关系，研究人员基于中国地壳运动观测网络（CMONOC）的 GNSS 观测数据，采用一系列方法（包括速度场、应变速率场和应变参数时间序列等）分析了自 1999 年以来中国西部地区 M≥5 级地震前地壳变形运动的异常特征。结合地震的发震构造，研究人员探讨了地震前地壳运动的相应变化，在此基础上揭示了不同震级地震前 GNSS 速度场、应变场和应变参数时间序列的异常情况。最后，根据 GNSS 及其与地质结构特征的结合，提出了中国大陆西部地区中强-大地震前的异常判据。研究成果可为预测中国大陆西部地区中强-大地震的趋势和位置提供依据。相关研究成果发表在 2024 年 11 月的 *Scientific Reports*。

历史地震统计表明，中国西部地区的地震活动频率占全国地震活动的 90%。1999 年以来部署的 CMONOC I 和 2010 年以来部署的 CMONOC II 为研究中国西部地壳形变和强震孕震过程提供了大量高精度、高时空分辨率的数据。在过去的几十年里，许多研究探索了 GNSS 观测数据与大地震之间的关系。因此，从 GNSS 观测资料中提取地壳变形信息的多尺度方法已经被建立，这些方法重点关注 GNSS 与地震孕震过程的联系。

研究人员收集了中国大陆西部地区地质资料、地震活动记录和 GNSS 观测资料。数据包括 CMONOC 的 GNSS 连续站记录（1999—2023）和来自 CMONOC 的 GNSS 临时站数据（1999—2007）。在此基础上，研究分析了中国大陆西部不同震源机制类型的中强震发生前地壳变形运动的共同特征，初步分析了中强震发生前区域地壳变形动力特征与地震孕震晚期阶段可能存在的联系。最后，讨论了 GNSS 地壳变形在中国大陆西部地区未来中强震预测中的作用。

在中国大陆西部，印度板块和欧亚板块汇聚产生的挤压、隆升、走滑和逆冲作用，形成了大规模的地壳变形。在印度板块的作用下，青藏高原近南北方向被压缩、抬升、增厚，东西向则发生伸展，使青藏高原及其边缘地区成为中国大陆 7 级以上大地震的高发区。

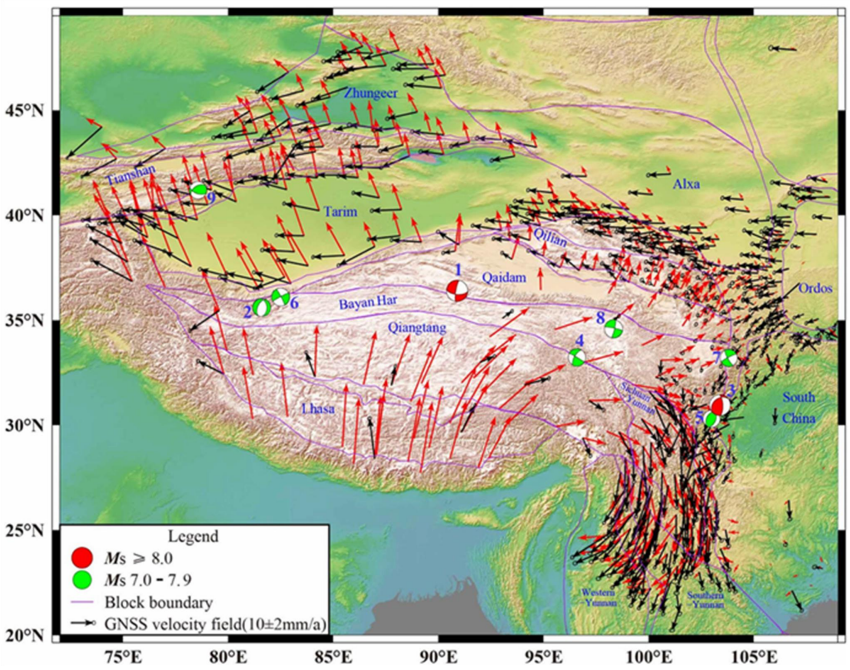

图 1　中国大陆西部 GNSS 速度场（华南基准）。图中黑色箭头代表 1999—2001 年的速度场，红色箭头代表 1999—2007 年的速度场

1. 速度场

1999—2007 年速度场是中国大陆相对稳定的地壳运动背景场，由于它既消除了 2001 年西昆仑山口 8.1 级地震的影响，又不受 2008 年汶川 8.0 级地震的影响，所以可以用来研究 7 级以上地震发生前的地壳运动。因此，研究人员基于华南地块给出了 1999—2001 年和 1999—2007 年的速度场。两个时期的速度场特征从西南向北、东北、东南依次递减。在青海-西藏高原东部边缘（巴颜喀拉地块东部），1999—2007 年速度值较 1999—2001 年略有上升，而在汶川 8.0 级地震附近，巴颜喀拉地块东部边界附近速度值则有所下降。南东和南南东位移在运动方向上存在逆时针偏转。

基于 1999—2007 年地震和震后运动的速度场，研究发现地震可能造成了巴颜喀拉地块与柴达木地块边界的解锁，导致了大范围内的速度场增大，特别是在拉萨、羌塘、巴颜喀拉和塔里木地块。然而，巴颜喀拉地块东部边界，即汶川 8.0 级地震和芦山 7.0 级地震震中所在地，速度值变小，这表明该地区可能具有高度的震前闭锁。汶川 8.0 级地震的发生可能导致了巴颜喀拉地块东部边界的解锁。此外，两次 8 级大地震的发生加速了巴颜喀拉地块周围的应变积累速度，导致地块边界多次发生 M≥7 级地震。

2. 应变速率场

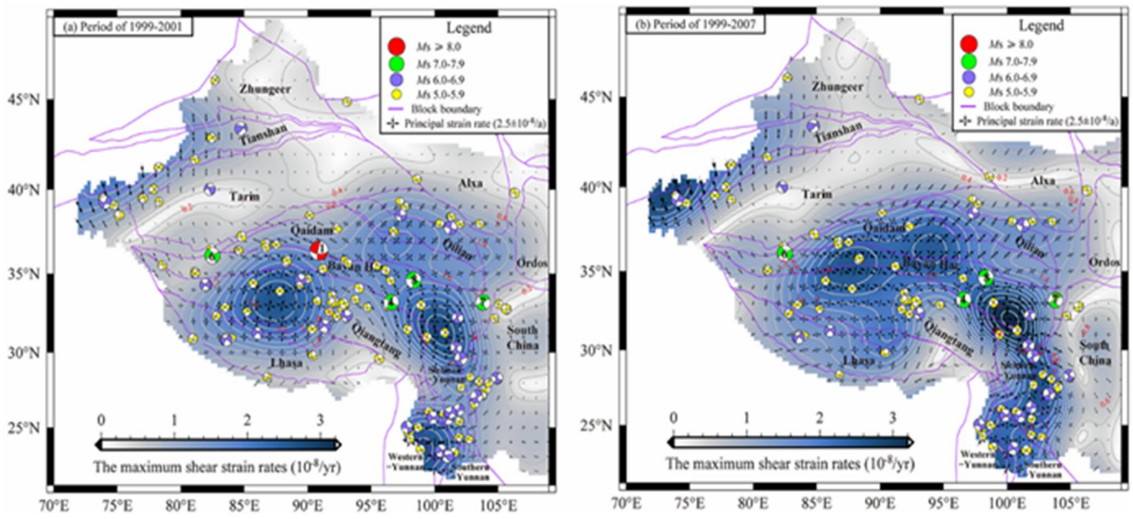

图 2　中国大陆西部的最大剪切应变速率场（彩色等值线）和主应变速率场（黑色箭头），a：1999—2001 年，b：1999—2007 年

研究人员利用 1999—2001 年和 1999—2007 年的 GNSS 速度数据，采用最小二乘配点法计算了主应变速率、最大剪切应变速率、第一剪切应变速率、东西线性应变速率、南北线性应变速率、应变速率第二不变量和平面应变速率。结果表明，2000 年以来，研究区共发生了 9 次 7 级以上地震，其中 5 次以走滑破裂为主，4 次以倾滑破裂为主。最大剪切应变率结果显示，5 次 M 7~8 走滑地震发生在最大剪切应变速率高值边缘区域与大规模走滑断裂带的交点，最大剪切应变速率范围为 0.6×10^{-8}/年≤γ_{max}≤2.0×10^{-8}/

年。这表明与主断裂构造活动背景相符的剪切应变速率高值区或边缘区容易发生大地震。5~6 级走滑地震的最大剪切应变率结果表明，高值及其边缘区域容易发生走滑地震，范围为 0.8×10^{-8}/年≤γ_{max}≤3.0×10^{-8}/年。

7~8 级倾滑地震的东西向应变速率结果表明，于田 M 7.3 地震发生在青藏高原中西部东西向应变高正值的西缘地区，即具有高张力值地区的西缘，其东西向应变速率$\varepsilon_\lambda=0.1\times10^{-8}$/年。汶川 M 8.0 和芦山 M 7.0 两次逆冲地震发生在东西向应变速率高负值的东缘地区，即东西挤压高值区的东缘，范围为-2.2×10^{-8}/年≤ε_λ≤-2.4×10^{-8}/年。5~6 级倾滑地震东西向应变率结果表明，M 5~6 张性地震多发生于青藏高原地区东西向应变速率高正值区及其边缘区域，范围为 0×10^{-8}/年≤ε_λ≤2.6×10^{-8}/年。同时，逆冲地震多发生在高负值边缘区域，范围为 0×10^{-8}/年≤ε_λ≤-2.1×10^{-8}/年。

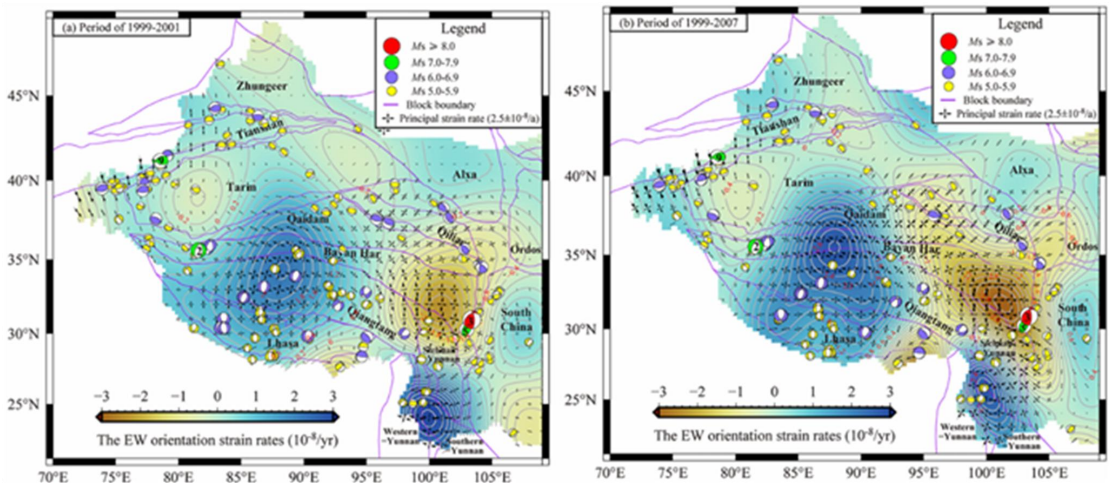

图 3　中国大陆西部东西向应变速率场（彩色等值线）和主应变速率场（黑色箭头），a：1999—2001 年，b：1999—2007 年

3. 应变时间序列

以 2017 年 11 月 18 日米林发生的 6.9 级地震为例，研究绘制了地震前该地区东西向应变速率和主压应变速率的时间序列曲线。两条曲线的斜率均为负值，说明封闭区域处于挤压状态，且在地震前一年的下降趋势明显

放缓。这种偏离线性趋势的异常现象表明，在震前一年震中附近的应变积累速率明显下降。这进一步说明，地震前发震区存在变形亏损的迹象。因此，地震前可能已经积累了很高的应变能。

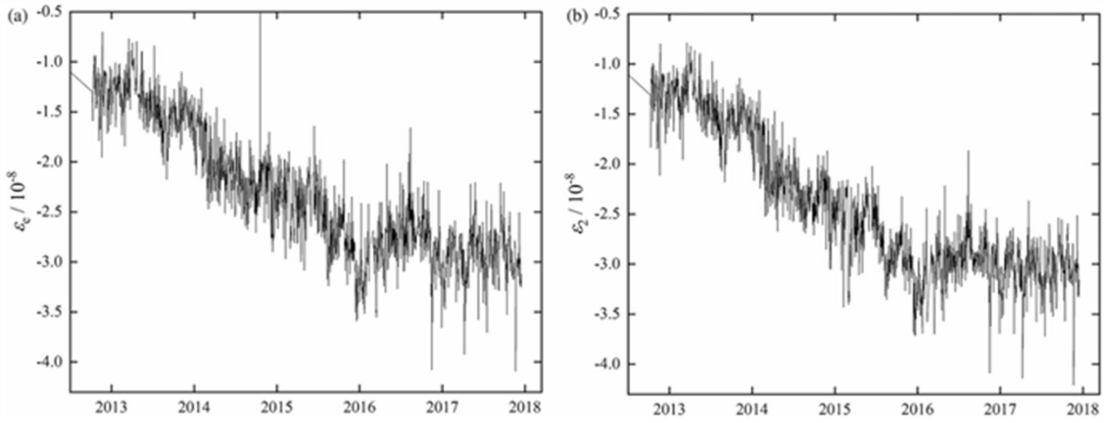

图 4　2017 年米林 M 6.9 地震震中应变参数时间序列，a 为东西向应变速率时间序列，b 为主压应变速率时间序列

4. 讨论

综上所述，对 1999—2001 年和 1999—2007 年华南基准速度场的分析表明，7 级以上地震发震断裂的运动状态与地质构造背景一致。最大剪切应变速率高值边缘区与大规模走滑断层的交界处、拉张应变速率高值边缘区与大正断层的交界处、挤压应变速率高值边缘区与大逆冲断层的交界处，是今后 7~8 级强震需要认真监测的地方。7~8 级地震与应变速率场的关系，其机制可归结为发震后期构造断层的强闭锁作用。与 7 级以上地震不同，5.0~5.9 级和 6.0~6.9 级地震的发震构造并非全部由典型深部断裂主导，其动力成因也表现出多样性。

研究人员通过小尺度区域应变时间序列分析，系统提取了研究区 M≥5 级地震前 GNSS 应变时间序列的异常特征。其总体表现为 GNSS 应变时间序列曲线在震前 6 个月至 5 年内偏离长期背景趋势，其中应变时间序列偏离线性趋势的相对变化大于 18%。尽管结果很有希望，但这一阈值的准确

性需要在未来更多的地震中得到验证。由于 GNSS 观测时间序列数据中存在短周期非结构噪声的影响，且基线时间序列反映的是两站连接线上的地壳的缩短或伸长，因此在表征区域变形特性和强度方面存在局限性。因此，研究人员没有对强震前 GNSS 单站和基线时间序列的异常特征进行分析。

来源： Ma H, Meng G, Zhang H, *et al*. The relationship between crustal deformation characteristics and strong earthquakes in western China revealed by GNSS. Scientific Reports, 2024, 14: 28356.

使用极值理论的诱发地震震级的经验约束预测策略

诱发地震震级模型旨在预测水力压裂、地热刺激（**geothermal stimulation**）、废水处理（**WWD**）和碳捕获与储存等地下工程运行期间即将发生的诱发地震震级。准确的预测模型可以实时指导运营决策。例如，如果预测模型表明震级可能超过可接受水平，则可以减少或暂停运行。如果要让此类行业的运营商和监管机构采用预测模型，则需要对预测模型进行稳健且透明的测试。来自英国和捷克的两名研究人员开发并测试了一套基于极值估计量的模型，以根据观察到的地震预测即将发生的诱发地震事件的震级。本研究将这些模型应用于俄克拉荷马州和德克萨斯州西部 **WWD** 的多个诱发地震案例，以及北美、欧洲和中国由地下流体注入引起的其他地震案例。测试数据集由 **80** 多个单独的诱发地震序列组成。研究发现，所有模型都产生了观测震级和模拟震级之间的强相关性，这表明预测提供了有关即将发生地震震级的有用信息。然而，有些模型会系统地高估观测震级，而另一些模型则倾向于低估。因此，这套组合模型可用于定义未来地震的预期震级的上限和下限估计量，以及这些震级在上限和下限值之间如何分布的经验约束统计预期。最后，本研究展示了如何使用经验约束分布来对即将发生的诱发地震震级进行概率预测，并将这种方法应用于最近发生的两起诱发地震事件。相关研究成果发表在 **2024** 年 **11** 月的 ***Seismological Research Letters***。

过去二十年以来，诱发地震的案例迅速增加。在较严重情况下，诱发地震会对附近的建筑物和基础设施造成破坏，并导致附近人员受伤。显然，需要开发量化地下工程运营期间诱发地震危险的方法，主要手段是估计可能发生地震的震级。破记录事件的增长给地下行业的运营商和监管机构带来了巨大挑战，如果能够准确预测即将出现的破记录震级，这将使运营商

能够做出决策，以确保其活动的安全性。目前，已发展出多种预测方法，主要包括数值地质力学模拟和基于统计的估计方法。通过了解这些方法，本研究旨在为诱发性地震序列中的破记录震级（M_{NRB}）提供准确的预测。

本研究旨在系统地评估上限震级 M_{UL} 和跳跃限制震级 M_{JL} 估计量在大量注入诱发地震案例中的表现。研究人员评估了这些方法的几种不同应用方式，在此过程中，主要分析了这些不同公式对最终 M_{NRB} 预测的影响，并定量比较了它们各自的性能。相对于 M_{UL} 和 M_{JL} 估计量，本研究对大量诱发地震序列的观察提供了破记录震级行为的经验数据。

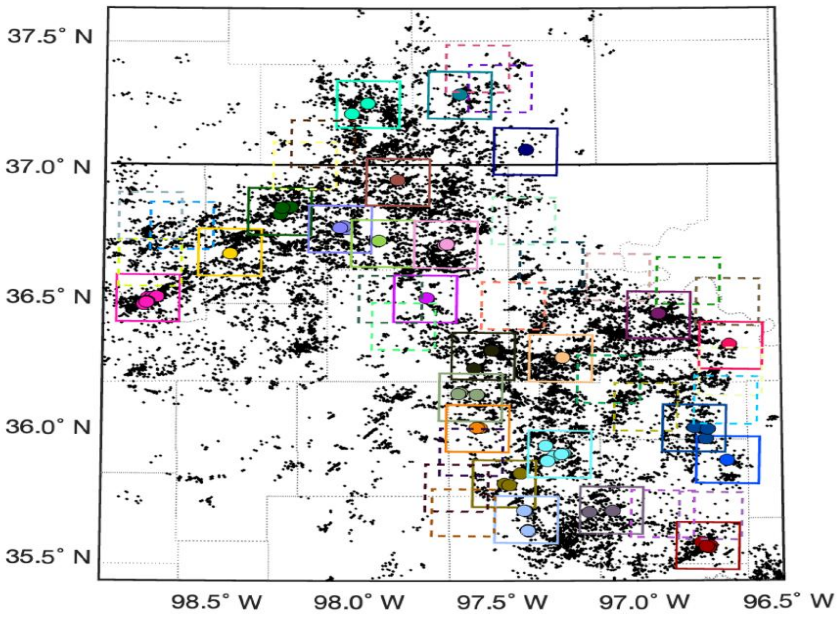

图 1　俄克拉荷马州和堪萨斯州南部破记录（OK-KS）破记录研究区地图。黑点表示所有 M≥1.5 级地震，彩色圆圈表示 M≥4.0 级地震。实线框表示每个包含 M≥4.0 级地震事件序列周围的 20×20 km 区块，虚线框表示记录了 500 个地震事件（M≤3.5）的 20×20 km 区块

研究人员使用基于极值估计量的方法评估了 M_{NRB} 诱发地震预测模型的性能。这些模型（M_{UL} 和 M_{JL} 估计）可以以多种不同的方式实现，并且研究人员定量比较了这些实现方式的性能。以俄克拉荷马州和堪萨斯州南部为主要对象，研究人员编制了一个包含 80 多个诱发地震序列的数据库，并根据该数据库对模型性能进行了比较。结果发现，使用目录中的所有事

件或仅使用破记录事件时，对预测结果影响不大，因为这些模型主要对序列中的最大震级事件敏感。

使用地震事件震级的上限方法估计 M_{NRB} 往往会高估观测到的震级。但是，与其他模型不同，该模型从未明显低估观测到的地震，因此它可用于定义 M_{NRB} 的上限估计值。使用地震效力（而不是震级）的模型与观测到的震级总体最接近，但有时确实会严重低估观测到的震级。同时，基于效力的模型很少对观测到的震级产生过度预测。

基于这些观察，研究认为，上限震级模型和跳跃限制效力模型可以结合起来，为诱发地震序列中即将发生的事件提供上限和下限估计量。分析表明，大多数观测到的地震事件都更接近下限震级估计量。研究人员利用这些观测结果定义了相对于上限和下限估计量的预期震级的经验约束概率分布。这种分布在编译的不同诱发地震序列群体之间以及合成序列之间都是一致的。

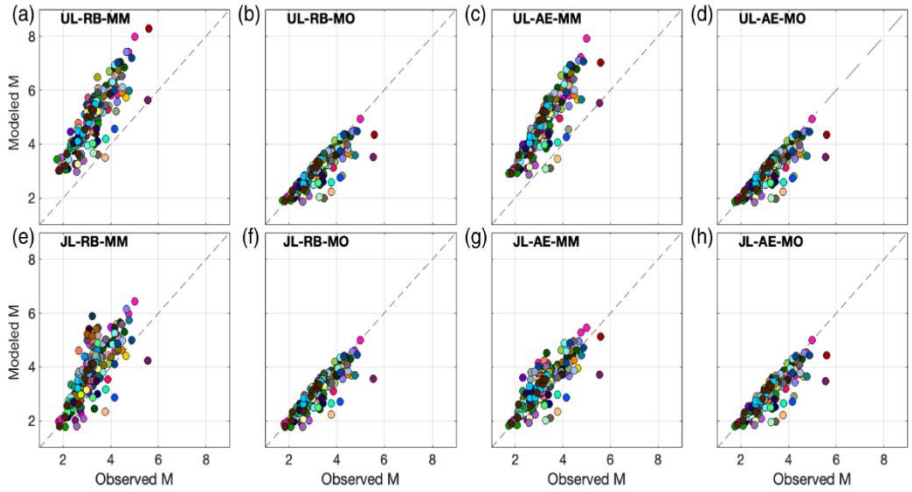

图 2　比较每种 M_{NRB} 预测方法的观测震级和模拟震级的 OK-KS 破记录序列。（a）仅使用有震级的破记录事件的上限方法；（b）仅使用具有矩震级的破记录事件的上限方法；（c）使用所有具有震级的事件的上限方法；（d）使用所有具有矩震级的事件的上限方法；（e）仅使用具有震级的破记录事件的跳跃限制方法；（f）仅使用具有矩震级的破记录事件的跳跃限制方法；（g）使用所有具有震级的事件的跳跃限制方法；（h）使用所有具有矩震级的事件的跳跃限制方法

研究检查了各种统计分布与观测值的拟合度，包括对数正态分布、Gumbel 分布和广义极值（GEV）分布。然后，进一步测试了这些分布在应用于合成序列时的表现。在不同案例研究和合成模型中发现的震级一致性能够使用极值估计量构建一个经验约束的概率模型，用于诱发地震预测。研究发现，观测结果可以合理地近似为移位对数正态分布，其平均值为破记录$\mu_{LN}=-1.4$，偏差为$\sigma_{LN}=0.6$，移位为$\delta_{LN}=0.2$，或者近似为 GEV 分布，其形状参数为破记录 $k_{GEV}=0.23$，尺度参数为破记录$\sigma_{GEV}=0.1$，位置参数为$\mu_{GEV}=0.0$。此后，研究人员使用 GEV 分布作为组合观测结果的最佳拟合。

对于给定的地震序列，研究人员计算给定时间的 M_{UE}（上限）和 M_{LE}（下限）估计量。计算出 M_{UE} 和 M_{LE} 后，可以计算序列中下一个最大震级事件的概率，然后标准化相对于 M_{UE} 和 M_{LE} 的震级，之后可根据先前描述的尺度、形状和位置参数，从 GEV 分布中估计任何震级事件发生的概率。

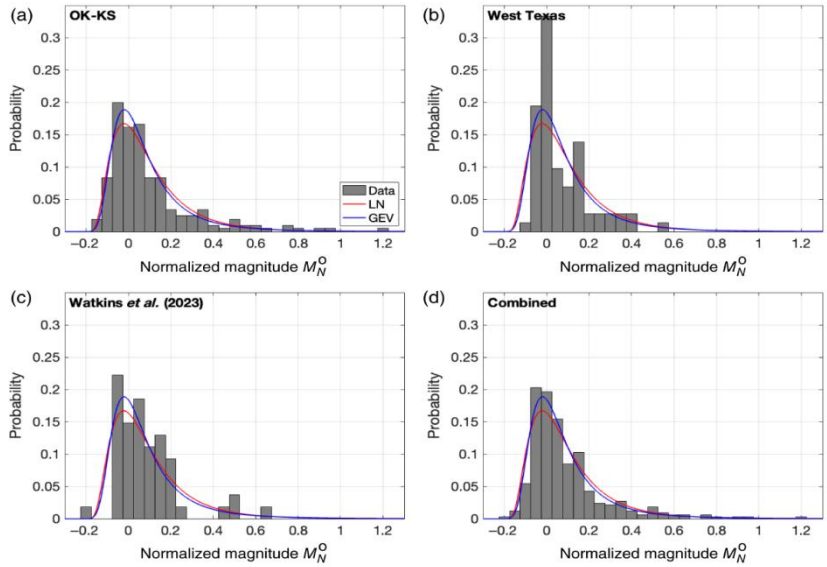

图 3　标准化观测震级的分布（条形图），其中观测震级相对于（a）OK-KS、（b）德克萨斯州西部和（c）W23 序列以及（d）所有观测值组合的模拟上限和下限估计量进行了标准化。红线和蓝线显示了移位对数正态分布和广义极值（GEV）分布，以便近似计算观测到的分布

研究人员将这种预测方法应用于两个训练样本外（即未用于定义的经验约束分布）的诱发地震序列：英国兰开夏郡 PNR-2 页岩气压裂和加拿大阿尔伯塔西北部和平河地区废水处理（WWD）活动引发的地震。结果表明，在这两种情况下，本研究的建模方法都能很好地表征发生的诱发地震。尤其对于 WWD 活动，其通常具有稳定的注入速率，导致地震活动呈现较为恒定的分布。然而，PNR-2 的例子再次凸显了预测诱发地震的主要挑战之一：当底层地质力学过程发生快速变化时（例如不同的断层开始受到扰动时），序列中较早的地震活动可能对发生此变化后的预测没有用处。

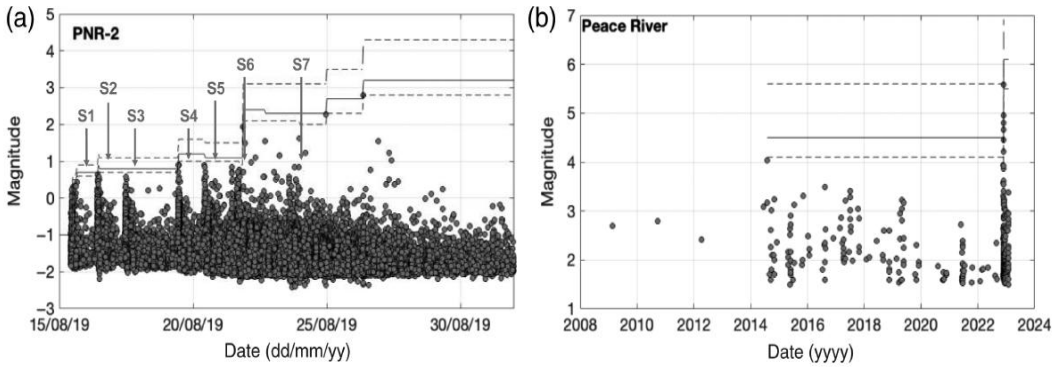

图 4　将经验约束预测模型应用于（a）英国 PNR-2 页岩压裂和破记录（b）加拿大和平河序列，观察到的事件用灰点标记

研究还探讨了时间相关的预测方法，分析了通过地震事件数量估算未来破记录事件发生的可能性。结果表明，基于极值的震级预测方法在地震活动初期表现良好，但随着地震活动趋于稳定和减少，预测精度可能下降。因此，研究建议对序列进行前向和反向分析，若前向破记录事件较多，说明地震风险增加，反之则表明风险减弱。未来，这一观点还需要进一步的研究。

来源：Verdon J P, Eisner L. An empirically constrained forecasting strategy for induced earthquake magnitudes using extreme value theory. Seismological Research Letters, 2024, 95(6): 3278-3294.

主送：中国地震局领导　　编发：中国地震局地震预测研究所