

地震科技前沿快报

2023 年第 5 期（月刊总第 52 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、土耳其北安纳托利亚剪切带中被忽视的伊斯坦布尔地震：构造意义和针对未来中等事件的宽频地面运动模拟

土耳其伊斯坦布尔是世界上的大都市之一，历史上曾多次遭受来自北安纳托利亚断裂带上发生的毁灭性地震的影响。因此，近 20 年来，相关研究主要集中在北安纳托利亚主断层及其未来的潜在破坏性地震方面，而忽略了都市区的地震活动及其影响。

最近的研究表明，伊斯坦布尔市区发生中等强度（ $M_w 5$ ）地震时，由于存在共振现象，且建筑质量较差，地震对中高层建筑（4—10 层）具有潜在破坏力。为更好地理解一个区域的地震危险性并预测地震地面运动情况，需要详细地了解区域地壳结构、震源破裂特性和特定场地的土壤性质。

2、基于卫星图像的因果推断进行地震多灾害和影响估算

快速、准确进行震后灾害调查、评估对于应急响应非常重要。但目前，基于物理和数据驱动的方法估算性能较低。美国石溪大学等机构的研究人员在 *Nature communications* 发文，利用遥感技术和统计因果推断，提出了一种地震多灾害和影响的快速估算系统。

该系统通过因果依赖关系建模，从卫星图像中推断多种灾害和建筑损坏，从而提供准确和高分辨率的估算结果。系统在全球不同国家的多次地震事件上进行了试用，结果证实，与现有系统相比，整合因果关系后显著提高了多种灾害和影响的大规模估算的准确性。

3、慢滑移事件和地震的综合破裂力学

慢滑移事件在世界范围内发生，并可能引发毁灭性的地震，但它们的时矩标度是线性的、还是指数的，仍存在争议，而且还缺乏一个统一慢地震和快地震的基本模型。

该研究证明了慢地震和快地震的破裂传播可以用一个新的三维动态断裂力学理论来预测。该模型为解释慢滑移如何导致地震提供了一个新的框架，并为地震灾害评估开辟了新的途径。

土耳其北安纳托利亚剪切带中被忽视的伊斯坦布尔地震：构造意义和针对未来中等事件的宽频地面运动模拟

伊斯坦布尔（位于土耳其西北部马尔马拉地区）是世界上的大都市之一，历史上曾多次遭受来自北安纳托利亚断裂带的毁灭性地震。近 20 年来，相关研究主要集中在主断层及其未来的潜在破坏性地震方面。土耳其伊斯坦布尔大学的相关研究人员调查了最近被都市区掩盖的地震活动及其构造意义，并利用地面运动数值模拟分析未来中等事件 ($M_w 5$) 对伊斯坦布尔的影响。伊斯坦布尔-宗古尔达克地区 (Istanbul-Zonguldak) 新生代或古生代构造上的震中被解释为古构造在近代构造应力作用下的重新活化，其断层面解符合马尔马拉地区与右旋走滑系统相对应的张扭体系的同向/反向剪切作用。模拟的峰值地面加速度 (PGA) 与短震中距 ($<30\text{ km}$) 的地震动预测方程相一致。此外，根据土耳其地震的经验关系，复合模型的最大 PGA 值 (约 0.3 g) 对应于地震的感受烈度 MMI IX。 $M_w 5$ 地震场景的模拟谱加速度可能超过 2018 年《土耳其建筑抗震规范》中给出的设计谱 ($0.2\sim0.6\text{ s}$)。此外，某些模型还产生了接近设计谱 ($0.4\sim1\text{ s}$) 的谱加速度，导致共振现象。研究表明，伊斯坦布尔市区发生中等强度 ($M_w 5$) 地震时，由于现场存在共振现象，且建筑质量较差，地震对中高层建筑 (4—10 层) 具有潜在破坏力。相关研究成果发表在 2023 年 4 月的 *Geophysical Journal International*。

北安那托利亚断层 (NAF) 是最大的板块边界转换断层之一，分离了安那托利亚和欧亚板块，在安那托利亚东部和爱琴海北部之间延伸约 1600 km 。相对于欧亚和阿拉伯板块之间的碰撞带，安纳托利亚断层以每年约 25 mm 的速度向西移动，激活了马尔马拉地区南部的主要走滑型地震，

以及南北向伸展的正断层地震。NAF 的地震活动非常频繁，在历史和仪器地震目录中已报道了几次在 NAF 发生的破坏性事件 ($M_w > 7$)。

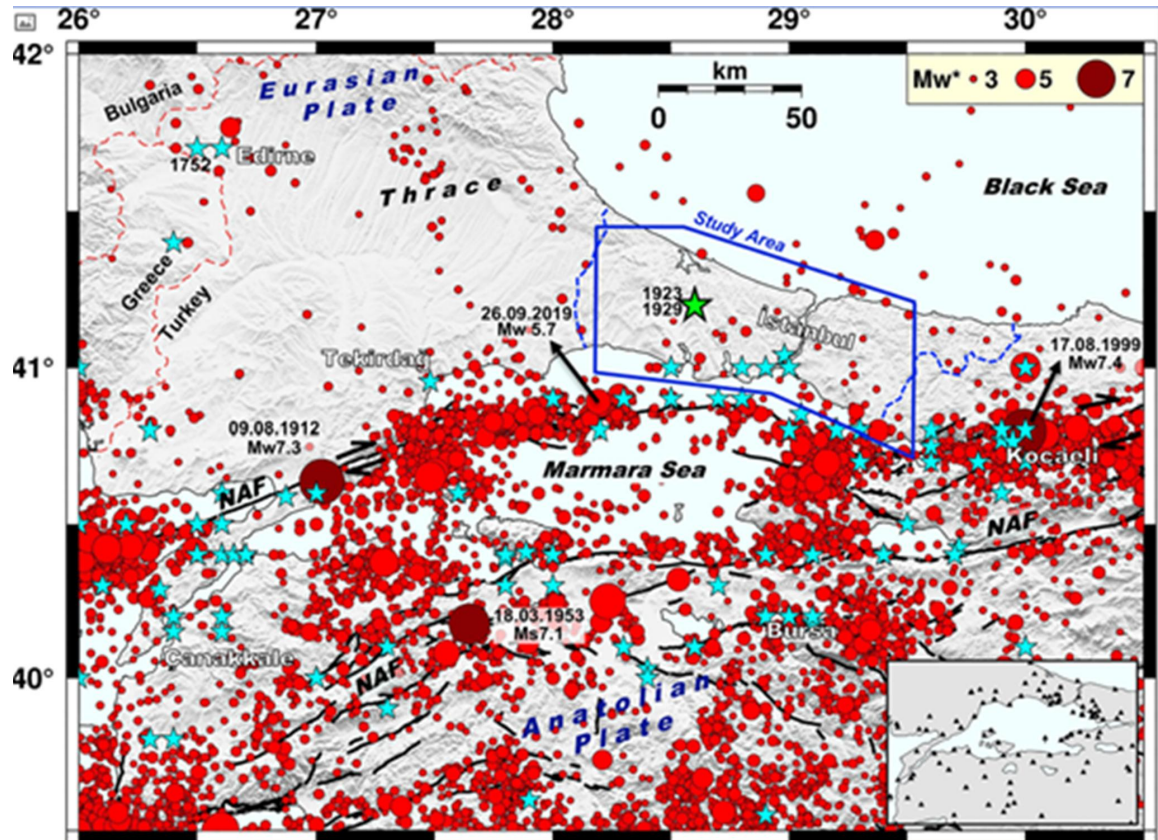


图 1 马尔马拉地区（土耳其西北部）和研究区的地震活动

伊斯坦布尔都市区覆盖博斯普鲁斯海峡（Bosporus）两岸，并且主要位于古生代沉积岩上，这些沉积岩被中生代和新生代的岩浆和沉积物侵入或覆盖。过去十年的地震表明，土耳其的大多数建筑仍然不能抵抗附近的中等或远处的大地震。较小的事件对建筑物的影响，如 2021 年伊斯坦布尔-卡尔塔尔（Istanbul-Kartal）地震 (M_L 4.1)，由于强度低而被忽略。然而，它们应该被考虑，因为在同一震源区没有破裂过的不平整面可能会产生一次中等事件 (M_w 5.0—5.5)。在这种情况下，来自靠近人口密集城市（如伊斯坦布尔）的震源的辐射波可能会影响抗震能力较低的住宅和工业结构。

研究人员聚焦伊斯坦布尔都市区之下的中等地震，及其未来可能的潜在地震风险。为此，研究了 2006—2016 年的地震活动性和震源性质，包括 2021 年 6 月 19 日的卡尔塔尔地震。研究人员利用波形相似性的双差分算法对地震震源进行重新定位，利用大量的 p 波初动极性确定了低不确定度的震源机制解。之前从未讨论过的 1923 年 (M_w 5.5) 和 1929 年 (M_w 5.1) 伊斯坦布尔地震，也根据公报中报道的体波到达时间进行了重新定位，并估计了它们在区域应力体系中的作用。

除了伊斯坦布尔地震震源机制的构造意义外，研究人员还在地面运动预测方面对地震情景进行了数值模拟。利用 2021 年卡尔塔尔地震记录，验证了采用离散波数法 (DWNM) 计算工程基岩浅层一维土层传播源、路径和场地放大效应的数值模拟方法。此外，使用水平-垂直谱比方法 (HVSr) 和至少 10 个地震记录估计了土耳其灾害与应急管理局 (AFAD) 强震台站的基本土壤频率 (fundamental soil frequency)，以验证先前的报道值。在确定了伊斯坦布尔都市区未来可能发生 M_w 5 级地震的震源位置后，在强震台站对不同震源模型的情景地震进行了数值模拟。然后，模拟峰值地面加速度 (PGA) 和伪加速度响应谱 (S_a)，并将其与前人研究获得的衰减关系和 2018 年的《土耳其建筑抗震规范》进行了比较。最后，根据震源和伊斯坦布尔市区的场地条件，评估了中等地震的可能影响。

整体而言，研究人员对 20 世纪 20 年代的两次中等地震以及 2006—2016 年的近期地震活动进行了详细分析，以了解断裂特征及其与区域构造的关系。这些地震发生在北安纳托利亚断层以外的北安纳托利亚剪切带 (NASZ) 的次生剪切构造上。大都市区发生的 3.0—4.5 级地震表明，在伊斯坦布尔两侧有五个显著的源区。此外，基于 P 波初动极性的断层面解表明走滑分量占主导地位。在其中一个地震源区，即土兹拉-伊村勒

（Tuzla–Icmeler）地热区，微地震活动最为频繁，向北倾斜的断层可能是热液源头。

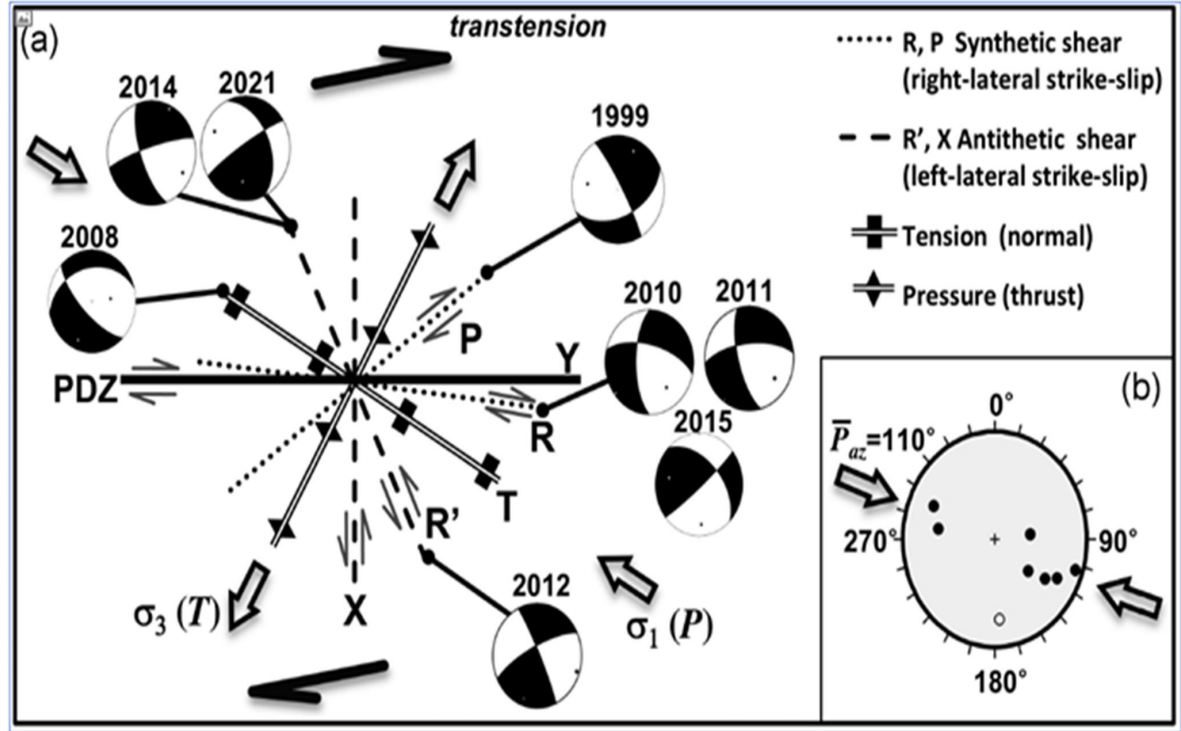


图2 (a)张扭区不同断层结构与伊斯坦布尔地震的震源机制解；(b)P 轴方向

近期地震的断层面解和正确选择的节理面与 NASZ 中的同向/反向剪切（synthetic/antithetic shear）和正常结构一致。震源机制的 P 轴表明存在一个 WNW-ESE 向的挤压力（N110°E），这与张扭体系的最大主应力相匹配。研究人员发现，伊斯坦布尔欧洲侧近期地震的震中位置和 NW-SE 节理面方向与西黑海断层（WBSF）高度一致。此外，亚洲侧事件的震源机制解，包括 2021 年 6 月 19 日卡尔塔尔地震（ M_L 4.1），具有与绘制的古生代断层一致的走向角。由于马尔马拉现今张扭体系可能的里德尔/反里德尔剪切和伊斯坦布尔的古生代断层之间的方向一致，可以推断出这些地震（ M_w 3—4）可能发生在古老的断层面上。

安纳托利亚断层向西运动的持续应力加载可能会在研究区先前存在的薄弱区域产生中等地震（ M_w 5.0—5.5）。考虑到五个震源区可作为未来的

中等事件源，研究人员利用在伊斯坦布尔的 11 个强震台站的源、路径和场地效应进行确定性数值地震模拟来研究地震影响。在震中距 5~30 km 之间，模拟的 PGA 与前人的地震动预测方程的曲线一致。复合模型的最大 PGA 值约为 0.3 g，根据土耳其地震获得的经验关系，对应于 MMI IX 的感受烈度。另一方面，研究人员发现在同一地点的震源机制之间存在明显的 PGA 差异，主要归因于辐射模式效应。这一结果意味着，对于城市地区的地震危险性估计而言，断层类型对短震中距具有重要作用。

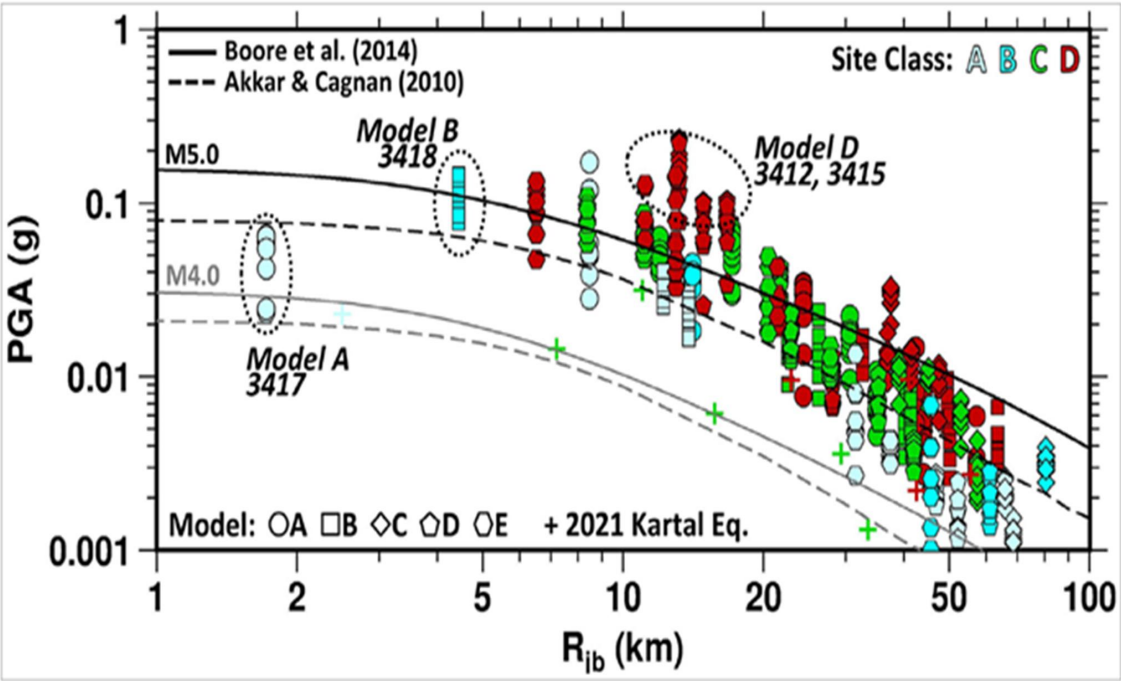


图3 模拟的 M4、M5 地震的 PGA 与前人地面运动预测模型的结果比较

模拟的 M_w 5 地震场景的谱加速度可能会超过 2018 年《土耳其建筑抗震规范》给出的设计谱（0.2~0.6 s）。震源机制和震源距离控制岩石和土壤站点的谱值水平。某些模型也会产生接近设计水平（0.4~1 s）的谱加速度，从而导致共振现象。研究认为，在具有共振现象和质量不佳的场地，以及根据新的地震设计规范在近期建造的建筑物中，伊斯坦布尔大都市区的中等地震事件将对中高层（4—10 层）建筑物具有破坏潜力。

本研究根据不同数据集确定了一些场地参数的不一致性，因此需要在强震台站进行新的场地调查。伊斯坦布尔市政府和大学在 2020—2021 年已开始进行覆盖整个大都市区的共同跨学科研究，以进行地震危险性评估。此外，研究认为，为更好地理解一个区域的地震危险性并预测地震地面运动情况，需要详细地了解区域地壳结构、震源破裂特性和特定场地的土壤性质。

来源：Tan O, Karagöz Ö, Ergintav S, *et al.* The neglected Istanbul earthquakes in the North Anatolian Shear Zone: tectonic implications and broad-band ground motion simulations for a future moderate event. *Geophysical Journal International*, 2023, 233(1): 700-723.

基于卫星图像的因果推断进行地震多灾害和影响估算

快速地进行震后调查对于紧急响应和恢复是非常重要的，因为它可以提供关于次生灾害和影响（如山体滑坡、液化和建筑损坏等）的准确和及时信息。目前，基于物理和数据驱动的方法估算性能较低。来自美国石溪大学等机构的研究人员利用先进的统计因果推断和遥感技术，提出了一种地震多灾害和影响的快速估算系统。该系统的特点在于，通过因果依赖关系建模，从卫星图像中推断多种灾害和建筑损坏，从而在区域范围内提供准确和高分辨率的估算。研究人员在全球不同国家的多次地震事件上试用了该系统，结果证实，与现有系统相比，整合因果关系后显著提高了多种灾害和影响的大规模估算的准确性。同时，还揭示了多个地震事件中地震引发的多种灾害和影响之间的定量因果机制。相关成果发表在 2022 年 12 月的 *Nature communications*。

地震的发生往往伴随着一系列地表破裂和后续影响，例如滑坡、液化以及建筑物损坏。因此，地震快速响应系统在快速准确评估地震灾害（如滑坡、液化）的空间分布和地震影响（建筑物损坏）方面具有重要作用。尽管目前已经部署了先进的地震快速响应系统，但由于数据和方法的不确定性、地震事件之间的差异，以及次生灾害和影响的共存等原因，准确和及时地定位和评估地震影响仍然具有挑战性。近年来，遥感观测技术的发展使人们可以在地震后数小时到几天时间内获得更加完整和精确的地震灾害信息。但是，由于一些技术上的原因，目前基于遥感观测的地震影响评估方法的性能仍然较低。

为了更准确的评估地震导致的灾害和影响，研究人员开发了一种地震多灾害和影响的快速估算系统。该系统定量模拟地质过程和卫星图像揭示的地表变化之间的因果关系，从而将单一类型灾害和受损地图（**damage**

proxy map, DPM) 中的信息有效整合。这种基于因果关系的模型使系统能够联合估算多种地震危害和影响, 从而提高区域规模评估的整体准确性和分辨率。研究人员将模型应用到发生在波多黎各、日本、美国加州以及意大利中部的四次地震, 验证了系统的表现。

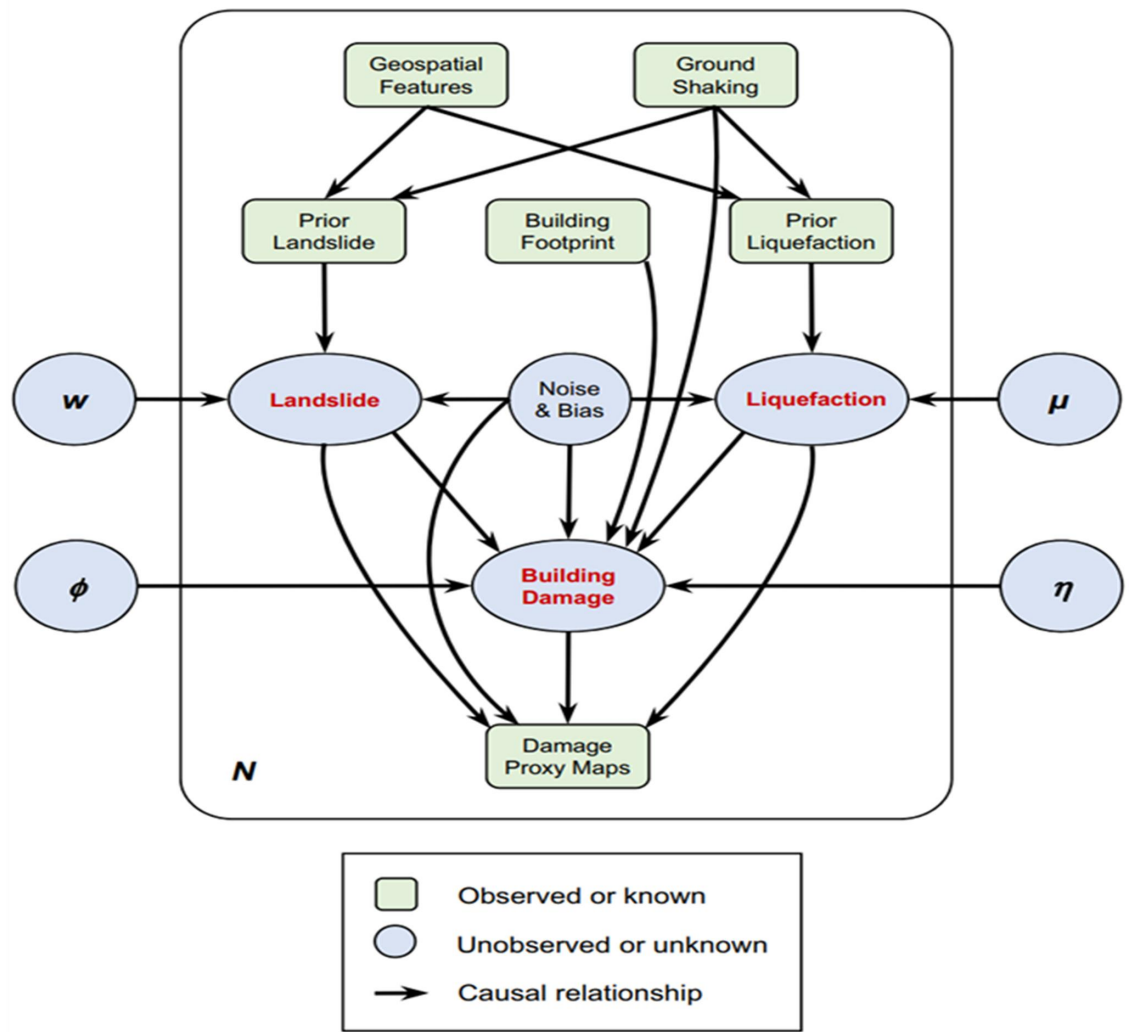


图 1 因果贝叶斯网络

1. 因果贝叶斯网络在地震多灾害和影响建模中的应用

因果图被表述为一个贝叶斯网络, 用于编码一组条件依赖关系。在因果图中, 自由变量包括未观测到的地震灾害和环境噪点、观测到的卫星图像产物 DPM, 每种灾害的地理空间模型输出、地面摇晃程度, 以及所有观

察中的不确定性。自由变量被表示为节点，它们的因果关系通过带有方向的边来模拟。模型将先验地理空间模型、建筑覆盖区和给定地震的 DPM 作为输入变量。模型的最终输出包括滑坡、液化和建筑物损坏概率图，以及它们之间的因果系数。研究人员通过贝叶斯更新对模型进行进一步的无监督训练，确保模型适用于具有不同数据变化特征的国家 and 地区。

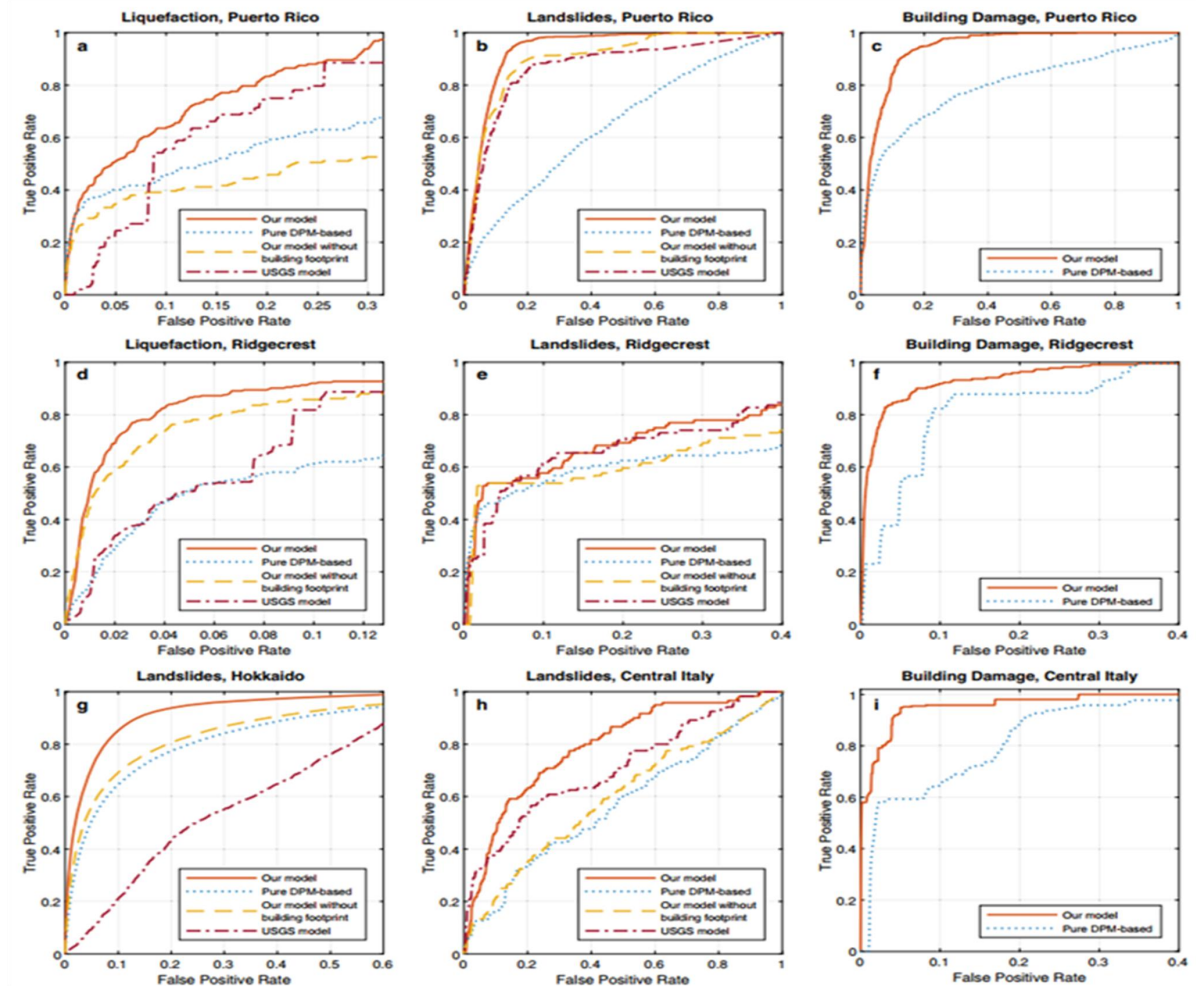


图 2 四次地震事件的 ROC 曲线

2. 在多次地震事件中评价多灾害估算系统

研究者将新的灾害估算系统和现存的几种系统应用到四次地震中：2020 年波多黎各地震、2018 年日本北海道地震、2019 年美国加州里奇克萊斯特地震，以及 2016 年意大利中部的地震。系统的表现通过接收者运

行特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 和曲线下方面积 (area under the ROC, AUC) 来衡量。ROC 曲线表示真正例率 (true positive rate) 随假正例率 (false positive rate) 的变化, AUC 曲线表示系统区分正确和错误情况的能力, 交叉熵损失 (cross-entropy loss) 衡量预测和实际数据之间的分布差异。结果表明, 与美国地质调查局 (USGS) 的模型相比, 新系统显著提高了滑坡和液化的估算能力。

由于新系统有效整合了来自建筑物覆盖区、先验模型和 DPM 的信息, 因此与传统的地理空间模型和纯基于 DPM 的模型相比, 显著提高了地面损坏估算能力。在新系统中, 建筑覆盖区信息提供了建筑物在不同位置存在的信息, 从而进一步减少将 DPM 数据归因于滑坡、液化或建筑物损坏过程中的不确定性。

此外, 即使没有先验脆性函数, 该系统仍然可以对建筑物损坏分布提供有意义的预测。研究者比较了新系统和纯基于 DPM 的模型对建筑物损坏分布的估算表现, 结果显示, 新系统对建筑物损坏的估算准确率提高了 16.92%。

研究者详细阐述了新系统在 2020 年波多黎各地震和 2018 年日本北海道地震中的估算表现。

2020 年波多黎各地震。与现有模型相比, 在对液化的估算中新系统 ROC 曲线的 AUC 提高了 15.64%, 交叉熵损失降低了 52.45%。在对滑坡的估算中, 新系统的 AUC 提高了 7.4%, 交叉熵损失降低了 51.57%。在对建筑物的损坏估算中, 新系统的 AUC 提高了 33.14%, 交叉熵损失降低了 44.34%。此外, 当假正例率增加到 31.38% 时, 新系统对液化估算的真正例率性达到了 97.40%, 而 USGS 液化模型的真正例率为 88.54%。图 3 显示了新模型在滑坡 (3c)、液化 (3e) 以及建筑物损坏估算 (3g) 中的表现

和地面真实观察，以及先验滑坡模型（3b），先验液化模型（3d）和建筑物覆盖区（3f）的情况。图 3a 中的矩形 i 显示的是波多黎各地区第二大城市庞塞（Ponce）的西部，其在此次地震中遭受了严重的液化和侧向扩张。与现存的 USGS 液化模型相比，新系统预测了在这些地区（图 3e 中的 i 区）发生液化的高可能性。研究认为，整合了 DPM 的因果贝叶斯网络可以提高液化快速识别的准确度。

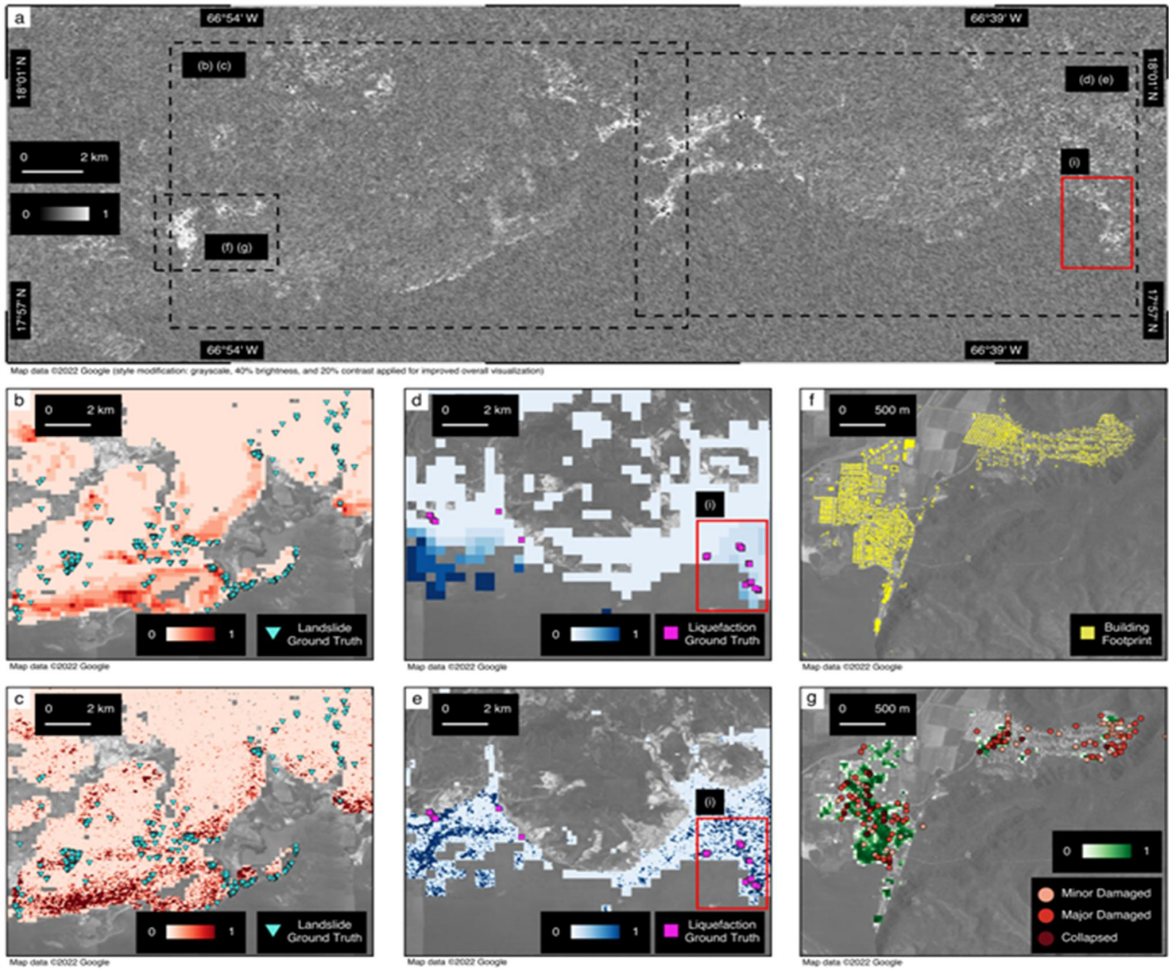


图 3 2020 年波多黎各地震地理空间先验和后验估算

2018 日本北海道地震。相比于 USGS 的模型，新模型与地面真实观测到的滑坡空间分布更吻合，而且新模型识别了更多滑坡事件的发生。AUC 提高了 42.02%，达到了 0.9331，交叉熵损失降低了 47.75%。此外，液化

和滑坡估算地图的分辨率分别提高了 7.7 和 15 倍。研究认为，利用高分辨率卫星图像对滑坡和液化进行联合估算，可显著提高滑坡的估算精度。

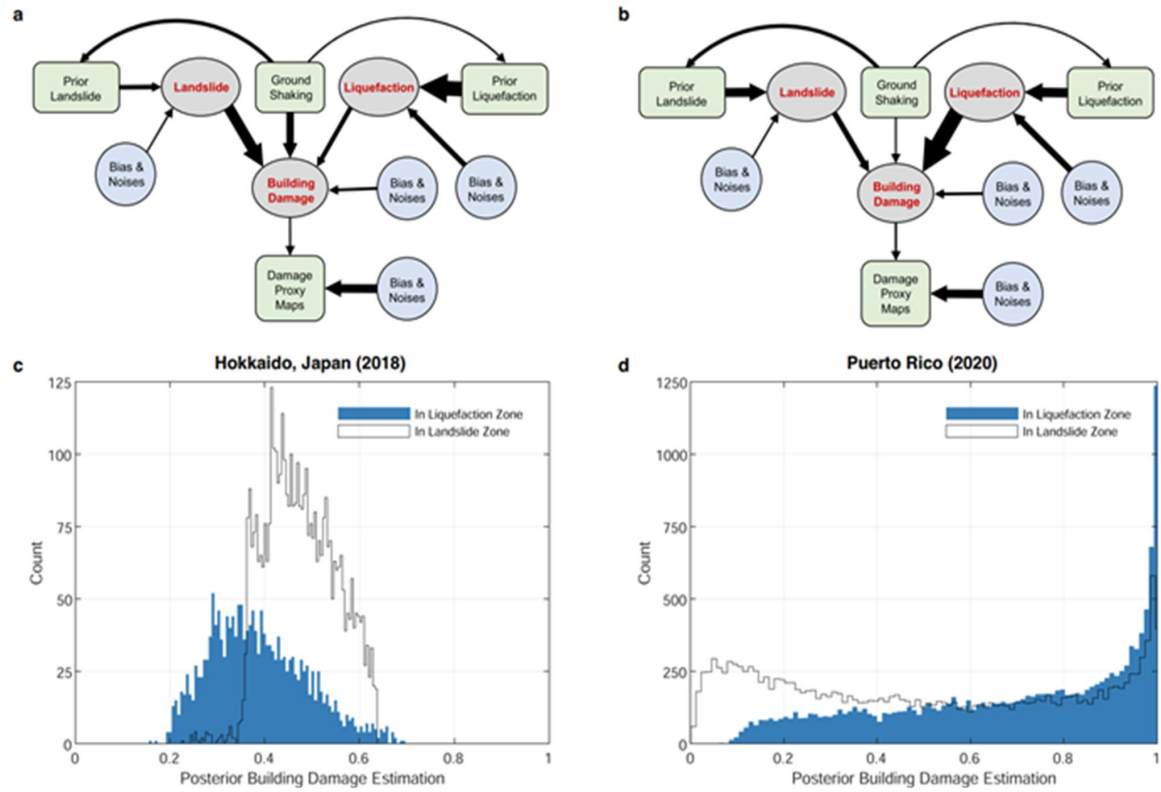


图 4 两次地震的因果机制分析

3. 新系统揭示的因果关系

在波多黎各和里奇克莱斯特地震中，建筑物损坏主要是由液化导致的。在这两次地震中，从液化到建筑物损坏的量化因果系数分别为 1.718 (± 0.116) 和 2.059 (± 0.151)，显著高于从滑坡到建筑物损坏的因果系数 (0.527 ± 0.305 和 1.560 ± 0.374)。在日本北海道地震和意大利中部地震中，情况则相反，建筑物损坏主要由滑坡导致。这种因果关系在将系数绝对值作为线宽而得到的增强因果图中，同样得到了体现（图 4）。结合建筑物覆盖区的空间分布可以发现，尽管波多黎各地震中大多数建筑物位于滑坡地区，但是它们的损坏却主要由液化导致。这主要是由于液化区建筑破坏

的概率更大，损坏更加严重。而在北海道地区，最严重的建筑物损坏发生在滑坡区，这与因果图得出的结论相吻合。

上述对比结果表明，通过考虑因果依赖性，联合估算地震多灾害和损失，可以显著提高地震多灾害和影响快速估算的准确性和分辨率。此外，新系统量化了多个触发因素对建筑物损坏的因果作用。该系统可以作为一种新的方法来理解高分辨率卫星信号中多种灾害的复杂相互作用。未来，通过对飓风和洪水等极端灾害的级联危害和影响之间的伤亡进行建模，该系统将有可能应用于飓风和洪水等其他极端灾害。总体而言，基于因果关系的多灾害和影响建模，即使在没有先验模型的情况下，也能快速和准确地进行多灾害和影响的评估。

来源：Xu S, Dimasaka L, Wald D, *et al.* Seismic multi-hazard and impact estimation via causal inference from satellite imagery. *Nature communications*, 2022,13: 7793.

慢滑移事件和地震的综合破裂力学

慢滑移事件在世界范围内发生，并可能引发毁灭性的地震，但它们的时矩标度（**moment-duration scaling**）是线性的，还是立方的，仍存在争议，而且还缺乏一个统一慢地震和快地震的基本模型。本研究证明了模型中慢地震和快地震的破裂传播可以用一个新的三维动态断裂力学理论来预测，该理论考虑了有限的破裂宽度，这是以前的理论中缺少的一个基本要素。破裂速度的完整频谱由破裂能量与能量释放率的比值控制。剪切应力的异质性可以在单个断层上产生立方标度，而有效法向应力的变化可以在断层群上产生线性标度，这调和了存在争议的标度关系。该模型为解释慢滑移如何导致地震提供了一个新的框架，并为地震灾害评估开辟了新的途径——综合了地震学、实验和理论的发展。相关研究成果发表在 **2022 年 11 月** 的 *Nature Communications*。

了解慢滑移事件（SSE）的物理机制变得越来越重要。SSE 通常发生在深部板块界面的拉长部分，其破裂速度比大型逆冲地震慢得多。对全球 SSE、地震和实验室实验的破裂速度的汇总表明，自发破裂的速度范围很广，从超慢速一直到 P 波速度。先前的模拟研究表明，如果 SSE 由摩擦转换（从低滑移速率下的速率弱化到高滑移速率下的速率强化），或者断层泥膨胀（同时相关的流体压力发生变化）所推动，SSE 破裂可以以非常慢的速度稳定传播。此外，长断层上的地震破裂可以稳定地以超剪切速度（快于 S 波速度）传播，这取决于破裂能量和能量释放率之间的平衡。

尽管实验室实验表明，破裂速度是连续的，但这些实验缺乏有限的破裂宽度，而破裂宽度是自然断层上大的慢速和快速破裂的基本组成部分，并且由这种有限破裂宽度控制的一般破裂力学尚不完全清楚。经验时矩标

度关系常被用于比较 SSE 和地震的物理机制，但 SSE 的标度是线性的，还是指数的，仍存在争议，并且仍然缺乏整合 SSE 和地震的基本模型。

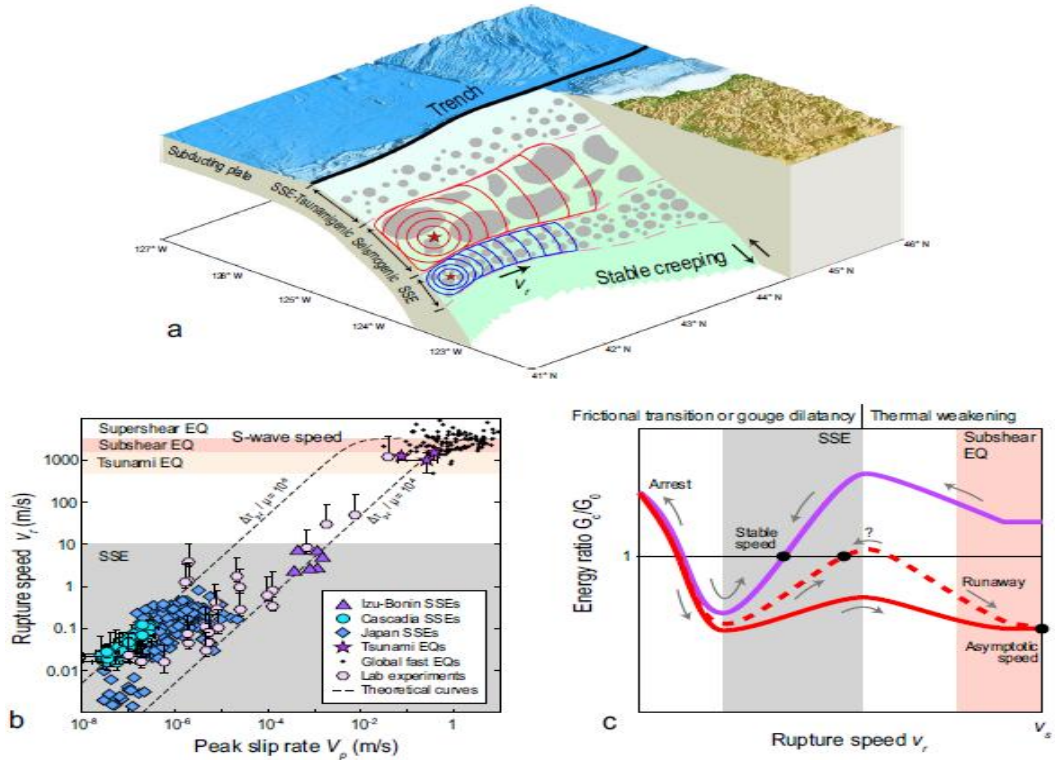


图 1 俯冲带上的缓慢和快速破裂及其破裂速度

研究人员从不同文献和数据库中编制时间序列数据集，并计算破裂速度和峰值滑动速率。研究建立了 SSE 准动态模型和地震的全动态模型，通过考虑有限的破裂宽度，采用一个新的三维动态断裂理论，研究了 SSE 和地震的破裂传播，并重点分析了 SSE 中的时矩标度关系。

(1) 稳态 SSE 和地震的一般力学。目前，已经提出了一种大破裂三维理论，其解释了有限破裂宽度 W 。同时，该理论形成了以下破裂尖端运动方程：

$$F\left(\frac{G_c}{G_0}\right) = M(v_r) \cdot \dot{v}_r$$

其中， G_c/G_0 是破裂能与稳态破裂能量释放率的比值， $\dot{v}_r$ 是破裂加速度， v_r 是破裂速度， F 和 M 是已知的通用函数。在该方程中，稳态破裂

的能量释放率恰好等于静态能量释放率，与经典的二维断裂力学理论相比，其与断裂长度无关。有限的 W 是研究大地震和 SSE 的重要组成部分，但在之前的理论和实验研究中被忽视。本研究进一步验证了上述方程的稳态破裂速度（从任意慢速度到 S 波速度）的连续性，研究人员开展的数值模拟表明，稳态破裂速度可以通过与应力降和临界滑移速率相关的两个无量纲参数来控制。调整这两个无量纲参数会在连续的稳态破裂速度下产生破裂传播，包括超慢 SSE 速度、海啸地震速度和快速的次剪切地震速度。

数值模拟进一步表明，稳态破裂速度对应力降的依赖性与对各种临界滑移速率的依赖性是完全一致的（快速次剪切破裂除外）。本研究中的稳态破裂和先前研究中的非稳态破裂对上述方程的验证，表明该方程可用于同一理论框架中 SSE 和地震的描述，并可在未来扩展到其他具有额外复杂性的模型。

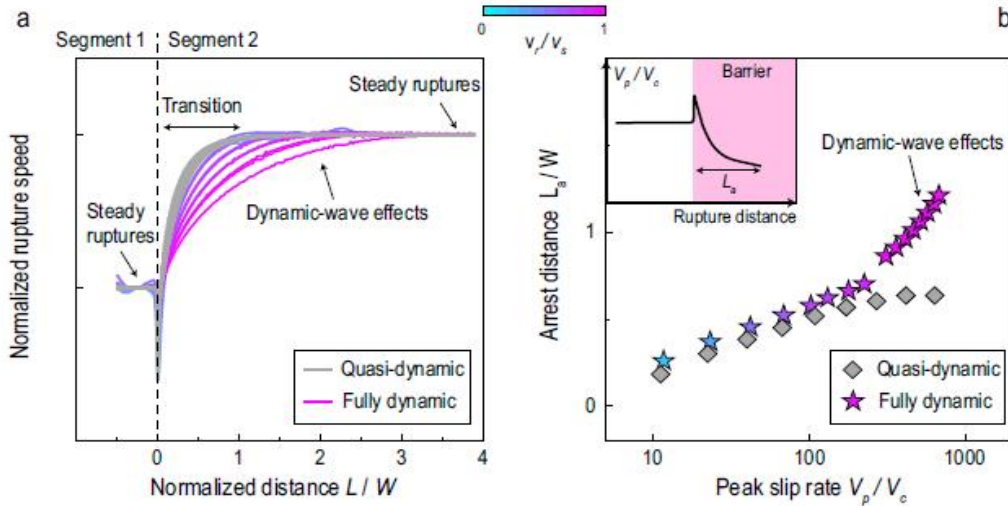


图2 沿走向的异质性导致的非稳态破裂

(2) 慢速和快速破裂的综合框架。 G/G_0 由特定的摩擦行为和由此产生的断层应力状态控制。速率和状态摩擦定律在高滑移率下导致速率强化，产生 V 形 G/G_0 。此外，其他摩擦机制也会在高滑移速率下引起摩擦

强化。结合在不同滑移速率和滑移下占主导地位机制，本文提出了 G_c/G_0 的概念模型（图 1C）。该模型可解释观测到的一种地震活动，即 SSE 可能在其邻近地区引发大地震。假设破裂开始于速率强化机制占主导地位的低耦合断层段，则破裂速度被限制在较低且稳定的值，因此仅形成 SSE。如果这种稳定的 SSE 传播到热弱化机制占主导地位的相邻断层段，将可能会转变为不稳定的地震，并向 S 波速度加速。如果两个相互竞争的摩擦机制具有可比性，则可能允许有两个稳定速度。

（3）沿走向的破裂分段。由断层异质性引起的非稳态破裂的其他模拟结果表明，非稳态 SSE 也可以用相同的理论运动方程来描述。由于动态波效应，快速破裂（接近 S 波速度）的过渡距离更长。如果该段的剪切应力低于稳定破裂的最小值，则该段将产生屏障作用，使破裂穿透一定距离后减速，并最终停止。快速破裂比慢速破裂具有更长的过渡和阻滞距离，这可以通过长破裂的三维动态断裂力学理论（即上述方程）来理解。

地球物理观测表明，SSE 通常会破坏断层的不同部分，但有时会跨越多个部分并达到更大震级，这在概念上类似于发生在孕震带的大型俯冲地震的超周期行为。SSE 的这种类似超周期的行为可以用 SSE 分段的时间依赖性演变来解释。

大型逆冲地震的复发间隔比 SSE 长得多，所以大地震的超周期由于其重现时间长而难以研究。但此处揭示的常规地震与 SSE 之间的联系表明，对频繁发生的 SSE 的运动学和动力学研究，形成了一个全面的 SSE 超周期模型，这将促进对大型毁灭性地震的超周期行为的理解。

（4）SSE 和地震的观测。有争议的标度行为可以归因于不同类型的断层异质性：剪应力的异质性可以产生三次方标度，而有效法向应力的异质性可以产生线性标度。为了探索可以直接与断裂力学理论进行比较的破

裂速度标度关系，研究人员编制并计算了全球 SSE、地震和实验室破裂的破裂速度和峰值滑动速率。尽管在实验室实验中已经报道了连续的破裂速度，但在自然断层 10~1000 m/s 的破裂速度中存在观察间隙。数值模拟表明，可以通过调整两个无量纲参数来获得连续的破裂速度。

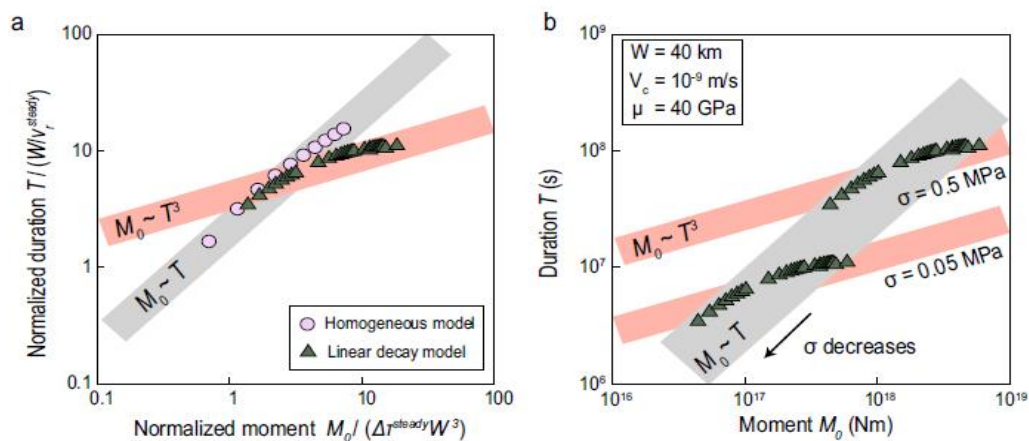


图 3 由异质性控制的 SSE 的时矩标度

虽然岩石摩擦行为可能由不同的机制控制，但长断层上慢地震和快地震的破裂传播可以通过相同的动态破裂力学三维理论来预测，其中破裂速度由 G_c/G_0 定量控制。将摩擦机制的实验室和理论进展整合到量化的 G_c/G_0 中，形成一个基本模型，其能够在同一理论框架内定量描述与大地震相关的短期慢速破裂和长期超周期行为。这一基本模型整合了慢速和快速破裂，调和了有争议的标度关系，从而通过整合频繁发生的 SSE 和破坏性地震的观测和模拟，为评估未来地震风险开辟了新途径。

来源：Weng H, Ampuero J P. Integrated rupture mechanics for slow slip events and earthquakes. Nature Communications, 2022, 13(1): 7327.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所