

地震科技前沿快报

2024 年第 9 期（月刊总第 68 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、地幔岩石圈的密度和强度变化影响板内地震分布

大陆板块内地震活动的成因动力学机制尚不清楚。德国科学家通过研究表明，西欧和中欧地区的板内地震活动主要集中在上层岩石圈地幔的低密度层，同时与上地幔有效粘度的横向梯度相关。地幔低密度体与地壳地震活动的空间相关性反映了地幔岩石圈内浮力的重要性。研究也强调了建立从地幔对流部分穿过所有潜在脆韧性转换带进入发震带的连续流变模型的必要性。

2、动态地震周期模拟中前兆速度变化对地震成核和应力演化的影响

了解地震和慢滑移事件发生前前兆速度变化的影响，有助于阐明断层破裂的开始和时间演化特征。研究人员通过数值模型模拟了二维走滑断层系统的动态地震周期，分析了前兆速度变化对地震成核和应力演化的影响。结果显示，更早的前兆速度变化导致地震更快成核且尺寸更小。研究强调了断裂带结构的监测对评估地震风险的重要性。

3、滑坡灾害级联可诱发地震

物质运动及其灾害级联的潜在地震反应受到较少关注。研究人员通过

建立地震目录发现，滑坡堰塞湖接近峰值水位时，地震活动显著增加，溃坝后恢复正常。约 90% 的地震是由库仑应力增加引发，表明滑坡灾害级联效应可引发地震。全球模型表明，滑坡堰塞湖和类似构造引发地震现象普遍。研究强调，山区地质灾害评价和管理应考虑地震与地表灾害的双向触发。

地幔岩石圈的密度和强度变化影响板内地震分布

在稳定的陆内构造环境中，地震的分布通常比板块边界处要分散得多，同时一些已识别出的地震丛集现象背后的成因机制尚不清楚。德国科学家的研究表明，西欧和中欧的板内地震活动主要位于最上层岩石圈地幔中具有低密度层的地区，并倾向于聚集在上地幔有效粘度的横向梯度之上。剪切波层析模型为更新对上地幔热结构和密度结构的认识提供了基础。研究认为，地幔低密度体与地壳地震活动的空间相关性反映了地幔岩石圈内浮力的重要性。此外，在地幔重力不稳定、板块构造和冰期后回弹等所引起的力的相互作用下，不同温度和强度的地幔岩石圈通过局部变形做出响应，对上覆地壳施加差异性载荷。相关研究成果发表在 2024 年 5 月的 *Communications Earth & Environment*。

揭示大陆板块内地震活动的成因动力是困难的，因为这些环境总体上显示出较低水平的变形率，较长的大地震重现周期，以及比沿板块边界更分散的震源。从北阿尔卑斯前陆横跨法国西北部和不列颠群岛的、稳定的西欧和中欧地区就是这样一个板内环境。尽管地壳的丛集地震活动与地幔低速带之间的因果关系被用来解释其他陆内环境（如美国、澳大利亚）的地震成因，然而，对于西欧和中欧地区来说，目前缺少的是对整个地幔岩石圈热结构、强度和密度变化的量化分析。

研究人员定量地探索和讨论了上地幔非均质性对西欧和中欧地区地震横向分布的潜在影响。他们从大陆尺度的横波速度层析模型中得出温度变化，进而直接估计出地幔中粘性蠕变的相关效率（有效粘度），将其作为地幔对形变的空间响应的指标。之后，利用转换方法，获得了上地幔的密度结构，其与温度非线性相关，同时该密度结构为可能导致重力势能和浮力空间变化的一个关键分量提供了指示。

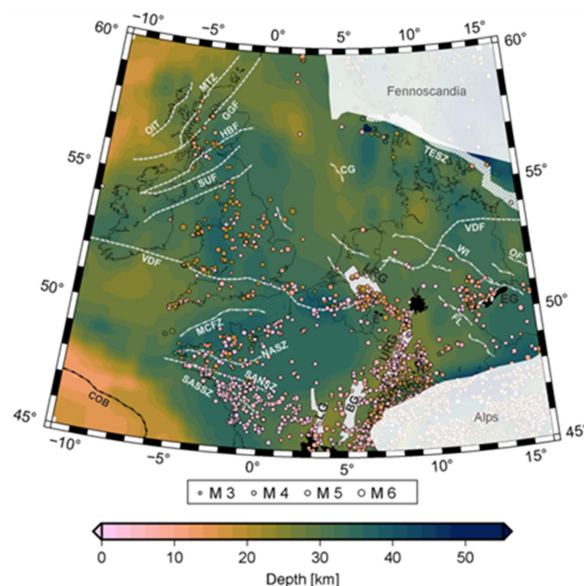


图 1 西欧和中欧的地壳结构和地质构造

研究人员从温度结构（由横波速度层析成像获得）中提取了 1300°C 等温线的深度，将其作为横跨西欧和中欧的岩石圈-软流圈边界（LAB）的深度变化指标。最大的岩石圈厚度（ $>180\text{ km}$ ）出现在北海西南部和巴黎盆地下方，总体上显示出比东部和西部较薄岩石圈（ $<140\text{ km}$ ）区域更低的地震活动。

在岩石圈内 80 km 深处，地幔呈现出低速、高温（ $>1000^{\circ}\text{C}$ ）和相应的低密度，以及低有效粘度这几大异常。在不列颠群岛西部，赫布里底群岛（Hebrides）下方的温度最高；在斯堪尼亚（Scania）最南端的近海有一个异常；在阿尔卑斯山脉的西北前陆，温度最高的地方在中央高原（Massif Central）、上莱茵地堑-黑高地区的南部、埃菲尔山和波西米亚地块（Bohemian Massif）西北部的下方。一般来说，大多数地震事件往往分布在上地幔中相对温度高和相对温度低的边界之上。对于中欧和西欧而言，岩石圈龙骨（lithospheric keel）之上的地震仅限于两个狭窄的带：一个在从英格兰东南部到荷兰的、北西-南东走向的 LAB 隆起之上（图 2），另

一个在横穿法国北部的、北东-南西走向的较浅岩石圈的正热异常（positive thermal anomaly）之上（图 3b）。

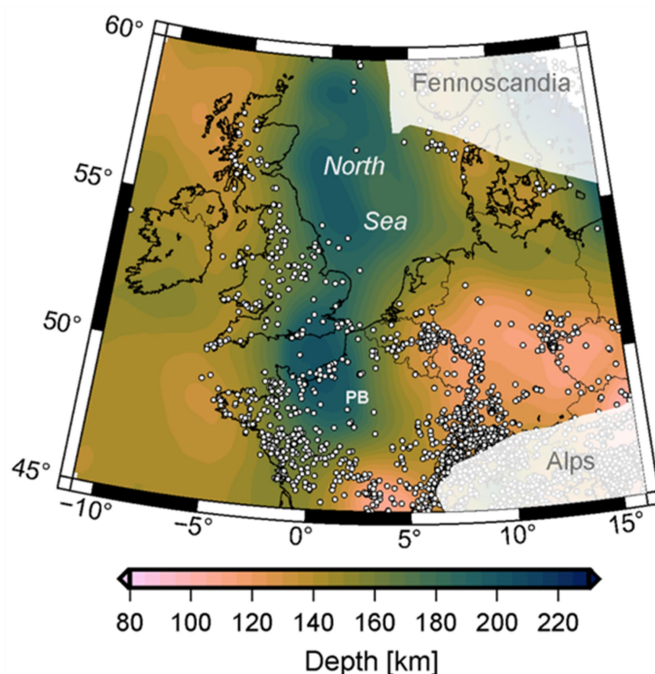


图 2 热岩石圈-软流圈边界（LAB）

为了在垂直地幔结构的基础上讨论地震的横向分布，研究人员分析了从四条剖面的横波速度获取的参数（温度、有效粘度、密度），两条大致平行于最大水平应力 S_{Hmax} （北西-南东方向），两条垂直于岩石圈龙骨走向（图 3c）。剖面 A 显示，虽然北海区域基本上没有自然地震活动，但在更南的地方记录了三个地震群，它们与下莱茵地堑（LRG）、上莱茵地堑（URG）和阿尔卑斯变形前沿（ADF）有关。

剖面 B 显示了从西南的阿尔莫里克（Armorican）陆架到东北的德国东北盆地（Northeast German Basin）的地壳和上地幔结构。与剖面 A 相似，主要地震带（如北上莱茵地堑、莱比锡-雷根斯堡地震带）相对于较浅地幔（<120 km）的最热区域发生横向偏移，位于密度低的近垂直边界之上。相比之下，在奥登瓦尔德（Odenwald）和巴黎盆地，地震活动大大减少。

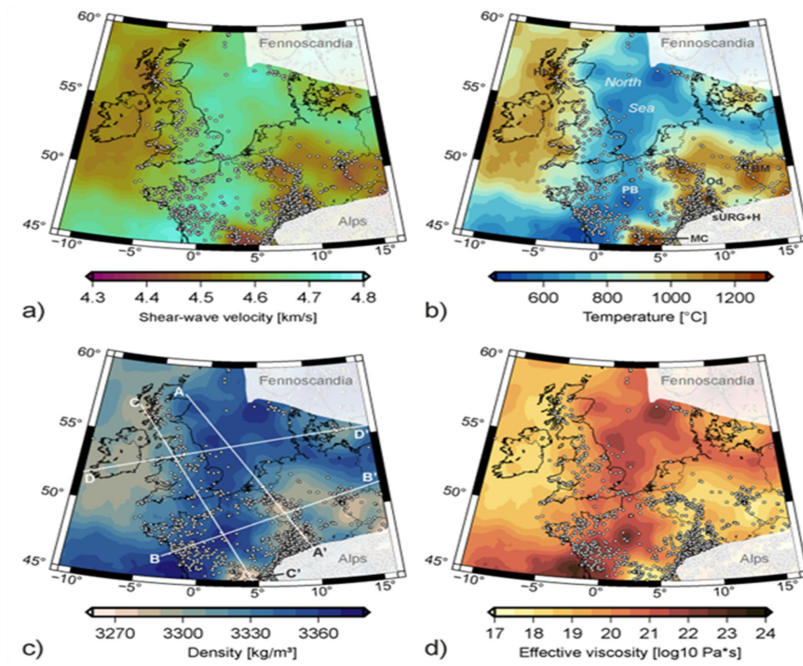


图 3 80 km 深处的岩石圈地幔特征

剖面 C 连接了西北赫布里底群岛和东南中央高原的地幔正热异常，从而显示了一系列岩石圈厚度范围以上的地震活动性，包括岩石圈龙骨上方和穿过它的两条狭窄的地震活动带。剖面 D 显示了岩石圈龙骨北海部分在地壳地震活动和上地幔结构方面明显的不对称性，尽管岩石圈龙骨以西和以东的 LAB 深度相似 (150 ± 20 km)，但浅层岩石圈地幔的温度和密度结构明显不同。

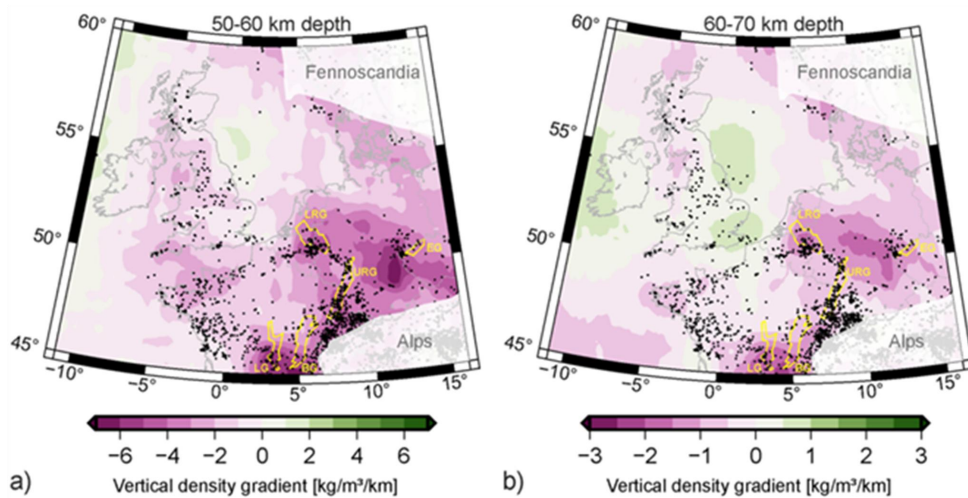


图 4 在地震活动增加区下方的上地幔浅层，向下递减的密度是与浮力相关的重力不稳定性的指标

研究人员的转换结果反映了横波速度和获取的温度、密度之间的非线性关系。地震优先发生在上地幔温度和密度变化大的横向梯度之上的集群和带中，这表明地幔异常与上覆地壳地震应力释放之间存在潜在因果关系。

深钻实验和流体注入诱发的地震活动表明，研究区域的大部分脆性地壳处于临界应力状态，以至于即使是最小的瞬态应力扰动，都可能引发地震。孔隙流体超压的形成会降低断层面的有效正应力，从而降低滑动阻力。然而，在研究区，地下流体流动与天然地震之间的因果关系证据在空间上非常有限，因此不能用作整个研究区地震活动分布的解释。

地壳中的差应力可能源于岩石圈地幔，在那里板块的韧性和脆性部分之间存在适当的机械连接。对于西欧和中欧，从转换的地幔温度分布（图 3d）发现有效粘度不均匀，进而表明上地幔中的应力-应变关系不均匀。粘度最低的上地幔区域（如埃菲尔异常）被地震活动较少的地壳覆盖，可能表明那里的动能被粘性（非地震）变形有效地消散，进而有效地卸载了脆性区域。此外，像北海南部和巴黎盆地（图 2 和图 3d）这样具有持续高有效粘度的地区，在上地幔中可能积累的应变太少，无法导致地壳中的强烈地震变形。

施加在脆性区域的差应力的另一个潜在来源可能是地幔固有的、与密度相关的力。首先，横波速度层析成像得出的横向密度梯度（图 3c）意味着起源于上地幔的重力势能（GPE）的变化，并涉及高密度区域对低密度区域施加的水平挤压力。其次，层析成像转换以最浅岩石圈地幔中的低密度体形式揭示了第二种地幔固有力，这些低密度体被高密度物质包围和覆盖，从而意味着与重力相反的浮力。为了初步绘制整个研究区域浮力的变化，研究人员利用这些低密度结构顶部的密度向下递减的特点，为每个地理位置绘制了垂直综合平均密度梯度。研究认为，如果这些垂直梯度确实

是地幔固有浮力的度量，可以推断出，最浅地幔中的重力不稳定性可为研究区的大部分地震活动创造有利条件。

在岩石圈顶部，西欧和中欧的应力-应变关系被认为至少部分源于粘弹性岩石圈板块对冰盖消长的调整。层析成像得出的、由温度驱动的上地幔不稳定性与震群之间的空间相关性表明，这些岩石圈内的不均匀性确实为正在进行的（部分由冰川消退控制）变形提供了一阶贡献。

整体而言，尽管研究结果表明，地幔中的变形和地壳中的地震活动在物理过程上是有联系的，但目前仍然缺乏对这种联系的更详细理解。为了阐明地幔中可能导致陆内环境下地壳地震活动的机制，有必要建立从地幔对流部分穿过所有潜在脆韧性转换带进入发震带的连续流变模型。

来源：Bott J, Scheck-Wenderoth M, Kumar A, *et al.* Density and strength variations in the mantle lithosphere affect the distribution of intraplate earthquakes. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 243.

动态地震周期模拟中前兆速度变化对地震成核和应力演化的影响

在大范围时间尺度上观察到的地震周期中的地震速度变化，可能是未来地震发生的一个良好指标。了解地震和慢滑移事件发生前的前兆速度变化的影响，可能有助于阐明断层破裂的开始和时间演化特征。研究人员使用数值模型模拟了具有反平面几何形态的二维走滑断层系统的全动态地震周期。该断层系统被一个狭窄的平行的断层破碎带所包围，通过在断层破碎带内施加横波速度变化，研究人员分析了这些前兆对地震周期多个阶段的影响，包括成核阶段、同震阶段、震后阶段和震间阶段。模型结果显示了多种断层滑动行为，包括快速地震、慢滑移事件和不同的蠕变。所施加速度前兆的一个主要影响是对地震成核阶段的影响，更早开始的前兆会导致地震更快成核，且成核尺寸更小，这是理论方程所不能预测的。此外，这些前兆也会影响动态地震和慢滑移事件的成核。研究结果强调了断裂带结构的短期和长期监测对于更好地评估区域地震危险性的重要性。相关研究成果发表在 2024 年 7 月的 *Earth and Planetary Science Letters*。

地震是发生在大范围时空尺度上的复杂现象。地震前兆现象是指断裂带性质的异常或变化，包括断层的几何形状、刚性、成分和流体的出现等。它们的变化可以表现为地震前发生的应力变化、微裂缝的张开和闭合以及流体变化等。尽管在实验室断层实验中，已经观察并记录下了前兆信号，同时也发现，快地震和慢地震时（二者都被认为是通过相同的成核过程开始的），地震波速度发生了系统性的、不同程度的降低。这些前兆地震速度变化的机制主要归因于加速的断层变形、流体效应以及应力变化引起的微裂隙的打开和闭合。但是，这种速度前兆如何影响地震破裂和成核过程在很大程度上仍然是未知的。

为了探究前兆速度变化对地震成核和应力演化的影响，研究人员使用基于物理的数值模型模拟了具有反平面几何形态的二维垂直走滑断层的动态地震周期。建模采用二维谱元法，涵盖了地震所有阶段。为简单起见，研究人员用一个常量几何层来表示平行的断层破碎带。同时，材料是纯弹性的，破碎带具有较低的剪切模量。

1. 前兆速度变化及其对成核尺寸的影响

速度前兆在模型中表示为走滑断层周围的断层破碎带的横波速度变化。研究人员使用断层上的最大滑移速度作为约束前兆速度降（velocity-drop）的阈值（图 1），剪切波速度变化表示为 δV_s 。结果表明，对于 $L_c=2\text{ mm}$ 和 $L_c=8\text{ mm}$ （ L_c 是接触面滑移的特征长度标度）的模型，测得的前兆持续时间与前兆滑移速率（slip-rate）阈值呈对数关系，但需要更多的数据点来建立定量关系。此外，还观察到，由于 δV_s 的作用，地震成核尺寸显著减小。在恒定的 0.5%前兆速度降条件下，随着前兆持续时间的增加， $L_c=2\text{ mm}$ 和 $L_c=8\text{ mm}$ 模型的成核尺寸可以减小一半以上。因此，成核尺寸也是前兆开始时间的函数，前兆持续时间越长，成核尺寸越小。

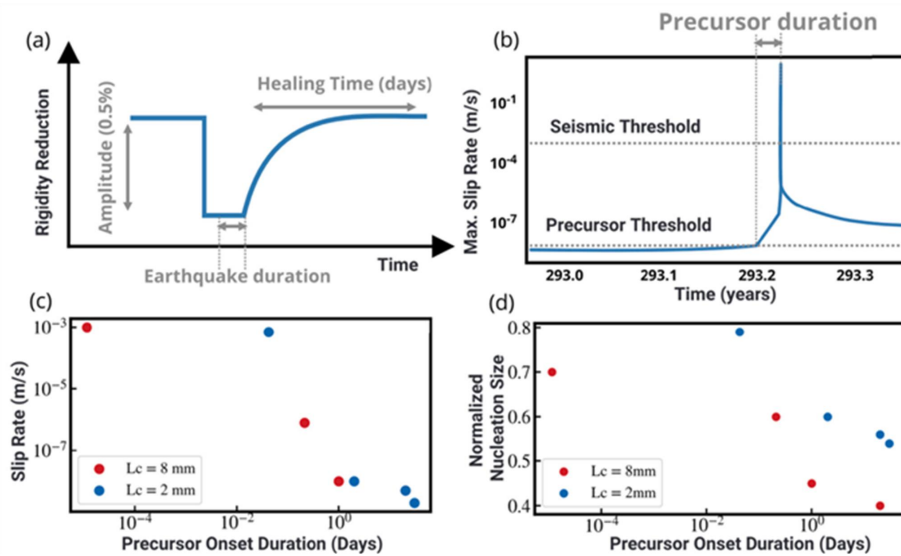


图 1 前兆设置和模拟参数

2. 前兆速度变化对地震周期的影响

研究人员列举了 $Lc=2\text{ mm}$ 的四种不同前兆持续时间（1 小时、2 天、20 天和 30 天）的模型。与参考模型（无 δV_s ）相比，增加前兆持续时间会导致更多的大型地表达达到事件（surface-reaching event）。对这些模拟中的峰值滑移速率的分析表明， δV_s 的更早开始对应了地震的更早发生。参考模型中的第一次地震开始于 55 年，与此同时， δV_s 模型显示出更早的成核，且与前兆持续时间同步。与其他前兆模型相比，30 天前兆模型和参考模型在地震间都经历了更少的慢滑瞬变（slow-slip transient），这说明如果前兆持续时间足够长，地震动力学更接近参考模型。对震级-频率分布的研究表明，当前兆持续时间短时，其对地震动力学的影响更强。而较长的前兆持续时间可能对中等震级地震的发生没有显著影响。对震源位置研究表明，20 天和 30 天前兆模型的震源位置与参考模型的相似程度较高，1 小时和 2 天前兆模型与参考模型有明显偏差，震源深度分布明显不同。

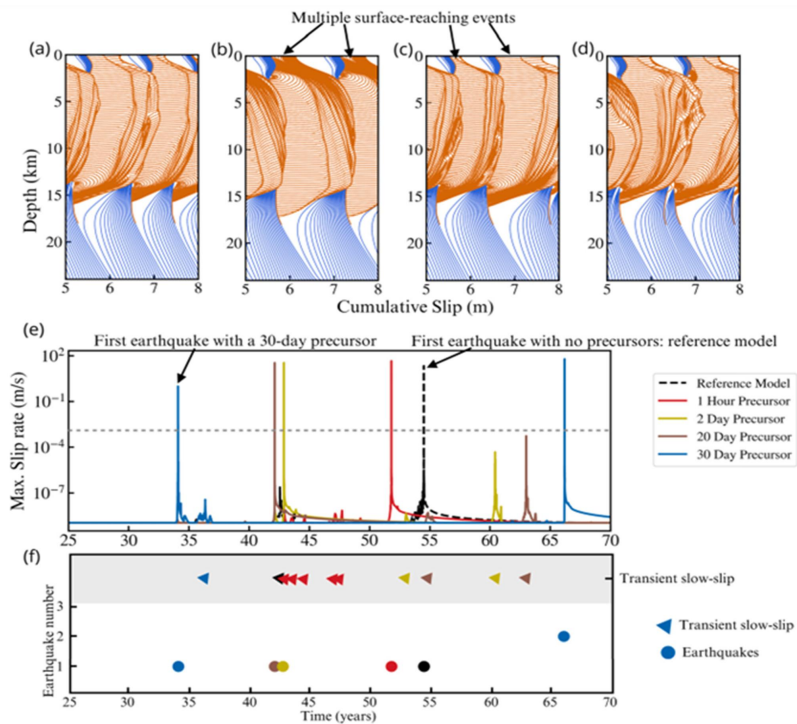


图2 不同前兆速度下的地震周期模型比较

3. 有/没有前兆情况下的非均质应力 (heterogeneous stress)

为了探索在具有先验应力非均质性的断层中 δVs 效应的持久性，研究人员模拟了包含自相似正应力（沿深度分布，被称为非均质应力）的地震周期。自相似正应力的加入影响地震的成核大小，并随深度变化有所不同。非均质正应力模型显示非震部分的粗糙滑动剖面，而参考模型显示粗糙同震滑动剖面。虽然与参考模型相比，非均质正应力模型延迟了地震成核，但引入 δVs （地震前 20 天）会导致更早的成核，类似于图 2 中的结果。图 3b 和图 3d 显示了非均质正应力模拟时震源的震级-频率分布和深度分布，与参考模型相比，更多的地震在孕震带底部附近成核，但有 δVs 和没有 δVs 的模型的总体分布是相似的。这表明 δVs 对地震成核的开始有强烈影响，但其对地震大小和深度分布的影响要弱于断层破碎带结构、非均质正应力和摩擦参数的影响。

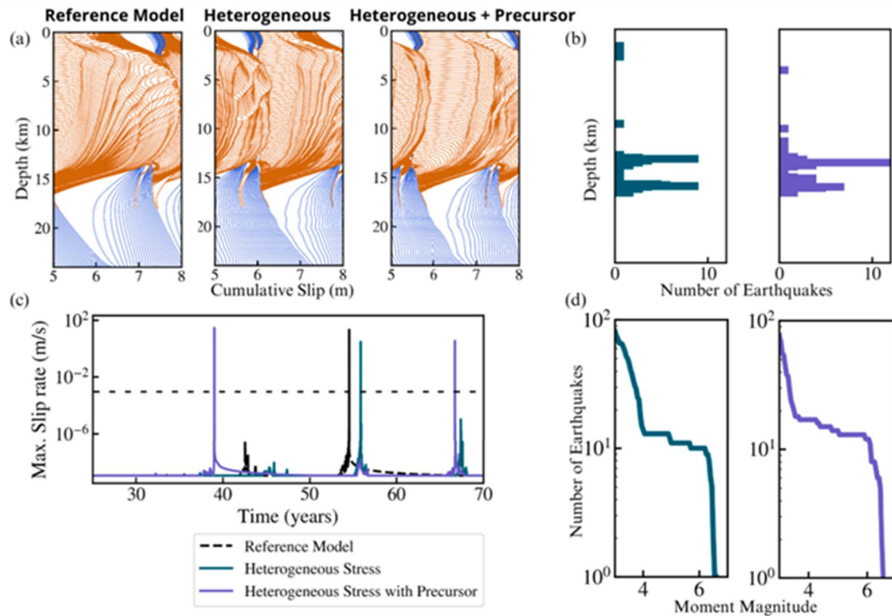


图 3 具有自相似（非均质）初始正应力的地震周期模拟

4. δVs 随更大成核尺寸的变化 ($L_c = 8 \text{ mm}$)

图 4a 显示了不同前兆持续时间下四种模型的累积滑移特征。随着前兆

持续时间的增加，成核尺寸明显减小，因此地震破裂发生的时间更早。如前所述， δV_s 的加入也导致了滑移速率的加速。然而， $L_c=8\text{ mm}$ 模型成核尺寸的减小不会引起额外的地震复杂性，如小地震的发生和震源位置的变化。这表明 δV_s 对长周期地震的破裂长度没有影响，但天然断层的地震震级可能受到沿走向的破裂宽度的影响。同时还发现，两次大地震之间的复发间隔随着前兆持续时间的增加而直接缩短，如果在大地震之前有很长一段时间的前兆活动，那么这次地震和下次地震之间的时间间隔可能小于前兆时间短的情况。这表明，前兆活动的长度和强度可以用来估计随后大地震的发生。

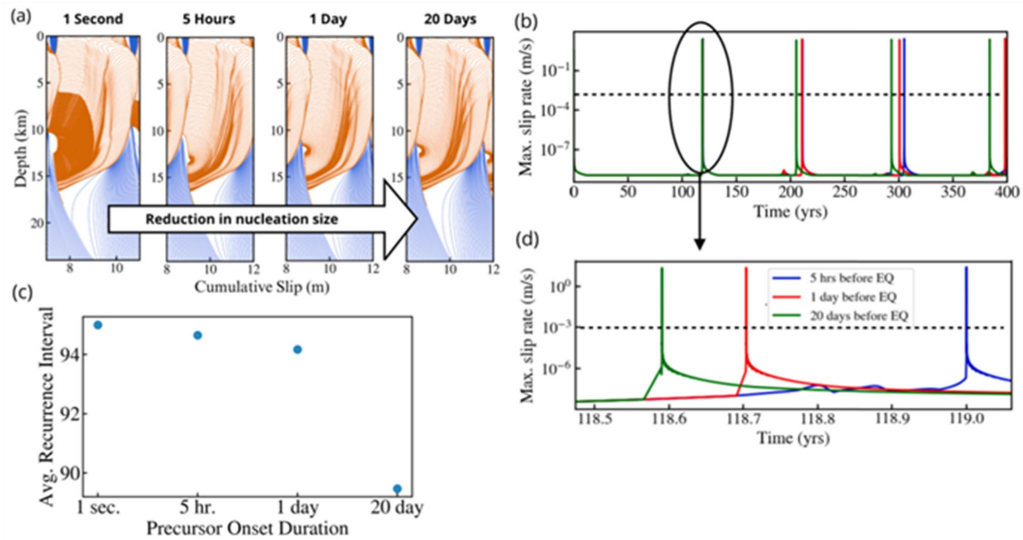


图 4 (a) 不同前兆起始时间模型的累积滑动剖面；(b) 断层上三个前兆持续时间的峰值滑动速率比较；(c) 前兆开始时间与平均复发间隔的对比；(d) 图 4b 的放大图，显示更早的前兆开始时间对应更早的地震成核时间

综上所述，研究人员探讨了前兆速度变化对地震动力学的影响，特别是它们对地震成核大小、地表到达事件、震源分布和复发间隔的影响。值得注意的是，观察到地震成核尺寸的显著减小，与弹性材料特性的重大变化无关。

模拟表明，由于 0.5% 的前兆速度变化，地震成核尺寸减少了一半以上，

这取决于这种变化在地震前发生的时间。这意味着在地震准备阶段，如果剪切模量、有效正应力和摩擦参数在时间上发生变化，地震成核大小可以明显小于理论方程预测的大小。同时，模型还强调了在断层破碎带和前兆速度降低的情况下，非均质应力演化的相对影响。断层破碎带破裂时产生的断层应力非均质性会影响未来地震的破裂成核和传播，然而，先前存在的自相似应力的加入可以促进破裂扩展和无震蠕变过程中应力的非均匀分布。在均匀初始应力条件下，前兆速度变化对震级-频率分布和震源位置等地震统计数据有影响，而在非均匀初始应力条件下，对地震统计数据影响不显著。

简而言之，通过探索由前兆速度下降和非均质正应力引起的一系列复杂性，动态地震周期模拟研究表明，对自然断裂带进行更详细和频繁的观测可以帮助人们更好地理解沿走滑断层系统所发生地震的非周期性。

来源：Thakur P, Huang Y. The effects of precursory velocity changes on earthquake nucleation and stress evolution in dynamic earthquake cycle simulations. *Earth and Planetary Science Letters*, 2024, 637: 118727.

滑坡灾害级联可诱发地震

尽管地震会引发地表灾害并导致灾害级联，但地表灾害是否会引发地震仍未得到充分研究。2018 年，青藏高原发生了两次山体滑坡，形成了山体滑坡堰塞湖，随后决口，引发了灾难性的溃决洪水。研究人员使用机器学习和基于互相关的方法建立了一个地震目录，该目录显示，当滑坡堰塞湖接近峰值水位时，地震活动（近震震级 ≤ 2.6 ）在统计上显著增加，而溃坝后地震活动回到背景水平。此外，约 90% 的地震活动是由于直接载荷和孔隙压力扩散的共同作用导致了库仑应力的增加。库仑应力增加与地震活动密切的时空相关性表明，地震是由滑坡灾害级联效应引发的。最后，考虑了全球滑坡堰塞湖和水库诱发地震特性的库仑应力模型表明，滑坡堰塞湖和类似构造引发地震可能是一个普遍存在的现象。因此，研究人员认为，地震-地表灾害相互作用可能包括双向触发，在山区地质灾害评价和管理中应适当考虑这种双向触发。相关研究成果发表在 2024 年 4 月的 *Nature Communications*。

山体滑坡、雪崩和泥石流等大规模物质运动被认为是山区的主要灾害和山区地貌演变的关键形式。迄今为止，关于地震与物质运动之间相互作用的研究主要集中在地震如何引发物质运动和灾害级联上，而对物质运动及其灾害级联的潜在地震反应却很少受到关注。然而，各种研究表明，如潮汐、大坝蓄水、水力压裂、废液处理和湖泊填充等过程可以通过地表载荷和/或流体扩散改变地壳应力状态。当邻近活动断层的应力增加超过临界阈值时，就会触诱发地震。

研究人员以 2018 年青藏高原白格（Baige）滑坡灾害级联为例，研究了滑坡堰塞湖引发的地震。研究人员量化了地震活动性的时空演变和由于这种灾害级联导致的周围断层系统的应力变化，同时，进一步使用基于全

球滑坡堰塞湖数据库的库仑应力模型来探索滑坡堰塞湖引发地震的可能性。

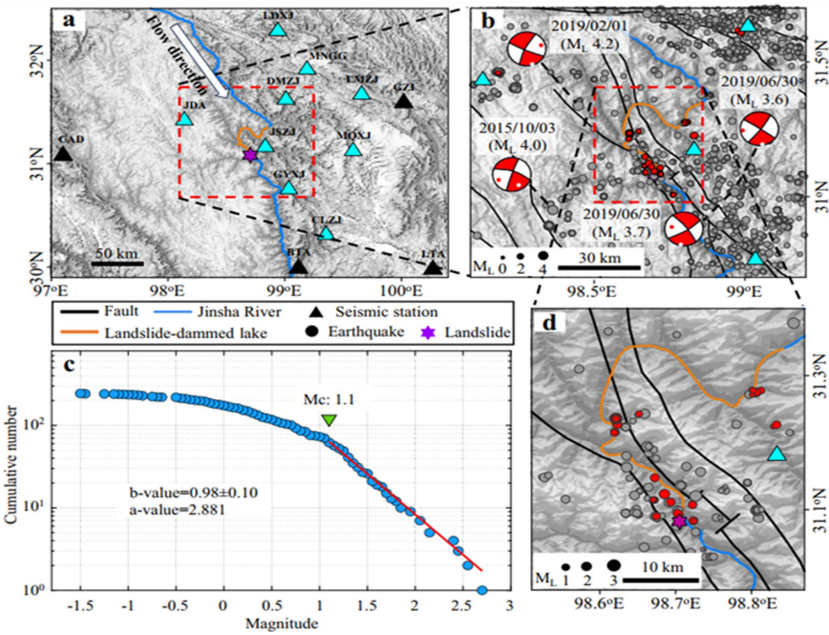


图1 研究区位置和区域地震活动性

1. 2018 年白格灾害级联

2018 年 10 月 10 日，中国标准时间（CST）22:05，青藏高原白格村发生大规模滑坡（图 1）， $2.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的沉积物进入金沙江。这形成了一个长约 1 500 m，宽大于 450 m，高约 60 m 的滑坡坝。滑坡堰塞湖水位从海拔 2880 m 逐渐增加到 10 月 13 日 00:45 的峰值 2 932 m。由于河水自然溢出大坝西部，滑坡坝迅速发生第一次决口。大约三周后，2018 年 11 月 3 日 17:40，第一次滑坡擦痕后缘的物质突然坍塌，由此产生的滑坡在第一次滑坡形成的残坝上沉积了 $8.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的沉积物，形成了一个新的高于 96 m 的滑坡坝和一个新的滑坡堰塞湖。11 月 12 日 04:45 分，水进入人工修建的溢洪道，标志着第二次溃决洪水的开始。11 月 13 日 13:40 分，滑坡堰塞湖达到峰值水位 2 957 m。11 月 13 日 18 时，溃决洪水流量达到最大值 $31\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。14 h 后，11 月 14 日 08:00，流量减小至大约 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

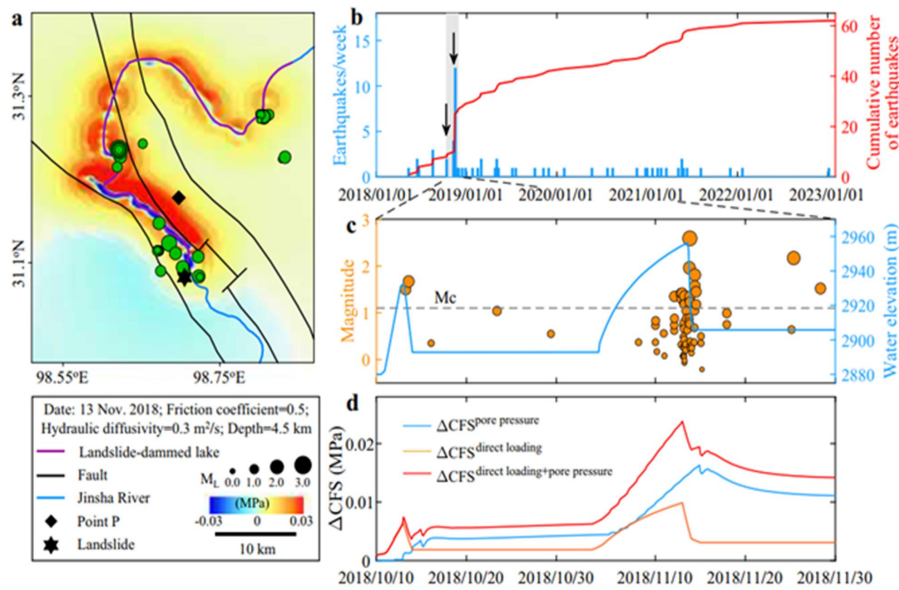


图 2 2018 年白格滑坡堰塞湖引发的地震

2. 白格滑坡堰塞湖形成后，地震活动率增加

基于 2014 年 1 月至 2023 年 1 月期间白格滑坡附近 13 个地震台站记录的连续地震数据，研究人员应用基于机器学习和互相关方法构建了一个地震目录，其中包含约 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 区域内有震级记录的 3 970 次地震。结果表明，随着第二个滑坡堰塞湖接近峰值水位，地震的数量和震级随着水位上升而开始增加，并与水位一起达到峰值。随后，随着大坝决堤后滑坡堰塞湖水下降，地震活动逐渐降至背景水平。

研究人员使用 Reasenber (1985) 的方法进行除丛 (declustering)，余下 54 次地震，其中 9 次发生在第二个滑坡堰塞湖接近其峰值水位的那一周。相比之下，前 27 周内仅有 8 次地震（地震活动率约为 0.3 次/周），在随后的约 224 周内 37 次地震（地震活动率约为 0.2 次/周）。基于统计量 P (Marsan 等, 2005) 和 Z (Habermann, 1981) 以及基于改进的泊松概率和源于经验的统计检验均表明，地震活动率的增加在 >99% 的水平上具有统计学意义。因此，在第二个滑坡堰塞湖接近峰值水位时所开始的

地震活动率的显著增加说明两者是相关的。

3. 白格滑坡堰塞湖导致的应力变化

研究结果表明，随着滑坡堰塞湖的水位上升，由于滑坡堰塞湖的直接重力加载和孔隙压力扩散，地震区域库仑破裂应力变化(ΔCFS)普遍增加，而在大坝决堤后滑坡堰塞湖的水位下降时， ΔCFS 则下降。规模更大、持续时间更长的滑坡堰塞湖产生了更大的 ΔCFS 。第一次较小且持续时间较短的滑坡堰塞湖产生的 ΔCFS 峰值为 0.007 MPa，小于通常与地震应力触发相关的应力增加 ($>0.01\text{MPa}$)。这可以解释为什么与第一次滑坡堰塞湖形成相关的地震活动率没有显著增加。相比之下，大约 3 周后的第二次滑坡形成了一个更大的滑坡堰塞湖。这次产生的 ΔCFS 峰值达到 0.024 MPa，与地震活动率的最大值相吻合。此外，约 90% 的地震位于 ΔCFS 为正的区域内。计算得出的正 ΔCFS 与地震活动率在统计上的显著增加之间存在紧密的时空相关性，表明这些地震很可能是由滑坡堰塞湖触发的。

4. 滑坡堰塞湖触发地震

基于 HiQuake 数据库（目前全球最完整、最新的一个水库诱发地震免费数据库，其中包含 1933—2019 年间约 226 例水库诱发地震，网址 <http://inducedearthquakes.org/>），研究人员发现有高度记录的、存在诱发地震的约 190 个水库的最小和中位高度分别约为 13 m 和 110 m 米。相比之下，在 300 个有坝高记录的滑坡堰塞湖中，分别约有 73% 和 10% 高于诱发地震水库的最小和中位高度。因此，全球一些滑坡堰塞湖的高度与诱发地震的水库相似。

研究人员进一步计算了研究区域周围断层对坝高为 30 m（全球滑坡堰塞湖数据库中的中位坝高）的滑坡堰塞湖的应力响应。在这种情况下，如果坝体不溃决，由于直接载荷和孔隙压力扩散，给定点（图 2a 和图 3d）

的 ΔCFS 将在约 11 天后超过 0.01 MPa。在全球数据库中有持续时间记录的 145 个滑坡堰塞湖中，约 64% 在大坝溃决前持续超过 11 天，并且这与坝高无关。因此，模拟分析表明，如果全球其他滑坡堰塞湖附近有处于临界应力状态的断层，有可能触发地震。

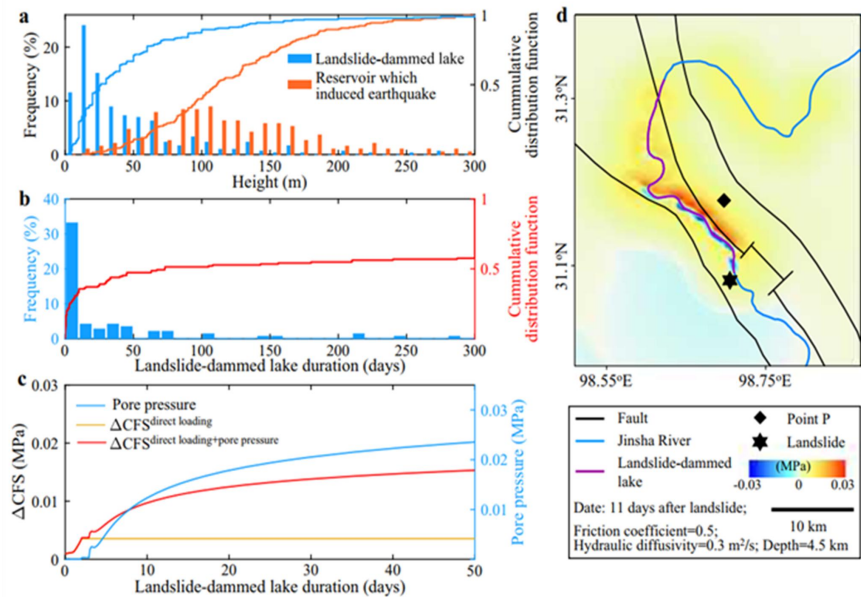


图 3 滑坡堰塞湖的一般特征

虽然重力加载会导致某些区域的库仑应力降低，但孔隙压力总是导致 ΔCFS 增加，其量级随着距滑坡堰塞湖的距离增加而减小。对于重力加载导致库仑应力降低区域的地震，很明显孔隙压力是触发这些地震的主要机制，尽管这忽略了孔隙压力扩散和重力加载之间的耦合效应。然而，对于那些重力加载导致库仑应力增加区域的地震，重力加载和孔隙压力可能共同控制触发地震活动。

此外，地震触发还取决于其他因素，如是否存在临界应力断层。由于水库诱发地震的情况相对常见，并且包括 $M > 7$ 的地震，如果在地震活动更活跃的区域中滑坡堰塞湖会增加 ΔCFS ，有可能触发更多、更大的地震。

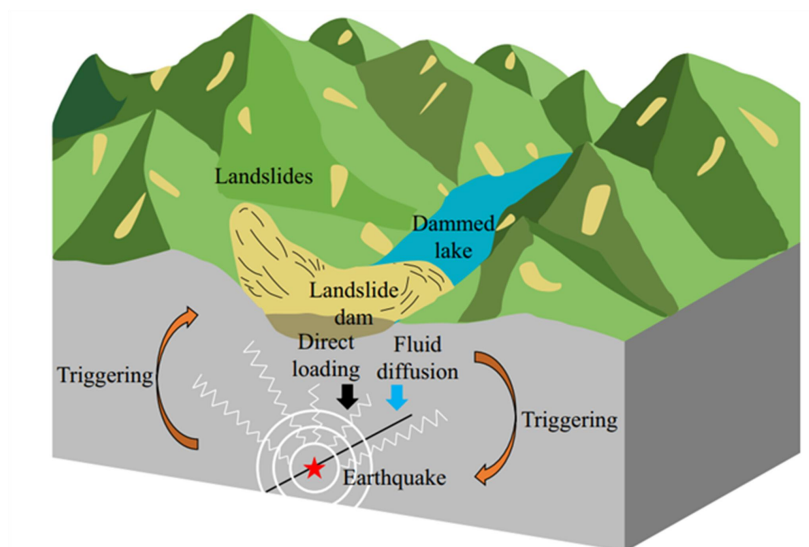


图4 地震-地表灾害相互作用示意图

整体而言，虽然此项研究证明了滑坡堰塞湖会触发地震，但其他地表灾害可能同样会改变周围断层的应力状态并触发地震。因此，在未来山区地质灾害风险评估和灾害管理中，应适当考虑地表灾害与地震之间的这种双向相互作用。

来源：Zhang Z, Liu M, Tan Y, *et al.* Landslide hazard cascades can trigger earthquakes. *Nature Communications*, 2024, 15: 2878.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所