

地震科技前沿快报

2024 年第 12 期（月刊总第 71 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、背景地震活动在基于物理的地震模拟中的影响

本研究提出了一种在基于物理的地震模拟中纳入背景地震活动的方法，通过分离背景地震、估计滑动速率并结合主断层模型，提高了模拟地震目录与观测数据匹配度，增强了地震空间分布的准确性。

2、基于物理评估中国西南安宁河-则木河断裂系统的地震潜力

本研究通过结合高分辨率断层耦合图和三维动态断裂力学模型，评估了中国西南安宁河-则木河断裂系统的地震潜力。结果显示，该断层系统目前可能产生 7.0 级地震，预计到 2200 年最大震级将增至 7.3 级。

3、火星地壳的地震不连续面可能由含水裂缝引起

日本科学家提出，火星地壳中的地震不连续面可能由含水裂缝引起，而非孔隙度或化学成分变化。该模型解释了在约 10 km 深度处地震波速和纵波横波速度比的急剧增加现象，表明火星地壳可能存在液态水，为生命提供了潜在的地下栖息地。

背景地震活动在基于物理的地震模拟中的影响

过去十年来，基于物理的模拟被广泛用于生成合成地震目录。在这种模拟中，通常对已知的主要断层进行建模，而较小断层和中等断层则经常被忽略。因此，模拟中的地震位置仅限于建模的断层。此外，由于去除了断层外的地震活动，合成目录的频率-震级分布与观测数据无法完全匹配。本研究提出了一种方法，可以将断层之外的地震活动（或背景地震活动）纳入模拟。首先，将背景地震与主断层的地震分开，并为每个地震事件分配一个断层段。通过采用标度关系，根据相应事件的震级确定这些断层段的尺寸。然后，根据观察到的频率-震级分布估计断层段的滑动速率。最后，将背景断层模型与主断层模型相结合，可以得到一个综合模型，该模型考虑了模拟器中实际位置的断层元素之间的所有应力相互作用。因此，合成目录中的更广泛的频率-震级分布可以与观测结果相匹配。在此基础上，研究人员使用一个现有模拟器 **Virtual Quake** 对样本区域开展了案例研究。相关研究成果发表在 **2024 年 10 月的 *Journal of Asian Earth Sciences***。

理论和数值弹性动力学模型在地震学家对地震的认识中起着核心作用。基于物理的（使用弹性模型）地震模拟提供了合适的方法来解决观测数据的不完整性问题。然而，解释和利用此类模型的结果需要仔细评估，因为在根据不完整的观测数据验证结果方面存在实际挑战。

另外，模型输出仅限于建模断层，这也给验证地震的空间预测带来了挑战。目前，现有方法没有评估观测数据实际位置的背景地震活动，并且完全忽略了背景地震活动与主断层之间的相互作用。

本研究介绍了一种在模拟中考虑断层外地震活动影响的方法。在该方法中，通过考虑主断层周围的定义缓冲区来分离背景地震。为了估计滑动速率，使用了背景地震的频率-震级分布，该分布已针对作用不完整性

(effect incompleteness) 进行了校正。然后，将此背景断层模型与主断层模型相结合，构建一个综合模型，其中考虑了模拟中所有地震在其实际位置的相互作用。

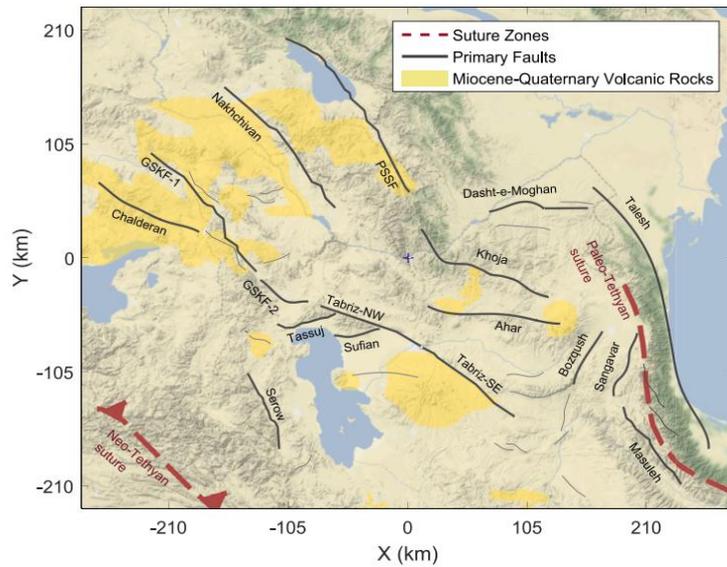


图 1 伊朗西北部地区的断层模型

在本研究中，Virtual Quake (VQ) 模拟器被用于生成合成地震目录。VQ 是一个 3D 边界元模拟器，其中断层系统（模拟的主要输入）在整个模拟期间被假定为是恒定的。同时，VQ 采用众所周知的后滑方法 (back-Slip method) 将构造应力引入系统。

在此基础上，本研究介绍了一种创建背景断层模型的新方法，该方法可以显著缓解地震的空间分布问题。要在模拟器中的每个点生成地震，必须在该点定义一个断层段。因此，模拟断层之外的地震在模拟中几乎不可能发生。要定义背景断层模型，必须确定模拟断层无法产生地震的部分。这些断层外的地震被称为背景地震活动。为此，考虑每个断层周围特定大小的缓冲区，并将该区域之外的所有地震确定为背景地震活动。而缓冲区的选择可以根据地震位置的不确定性来进行。

确定背景地震活动后，将断层段分配给地震目录中每个相应的事件。通过与观测到的地震活动相一致的方式，所提出方法确定了这些背景断层段的特征。由于缺乏信息，这些断层段最初可以被视为具有随机走向角的方形走滑断层。如果有更多信息，也可以为这些断层分配倾角和滑移角。根据相应事件的震级，使用标度关系可计算每个断层的尺寸。

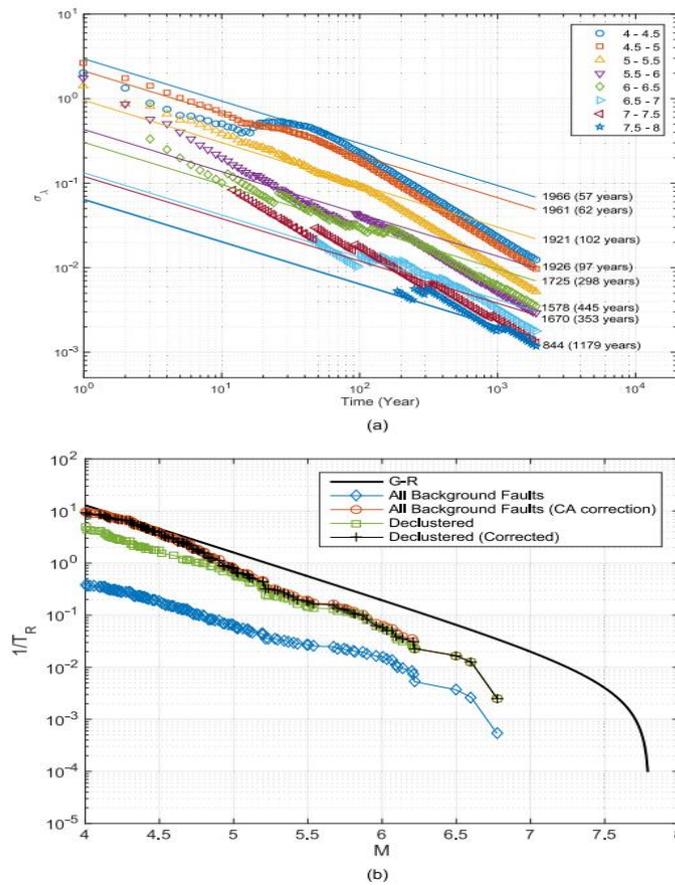


图 2 (a)：按照 Stepp (1972) 的方法对背景地震活动进行完整性分析的结果；(b)：背景地震活动模型的频率-震级图——完整性分析结果的校正（红线）、去聚类（绿线）、去聚类效果校正（细黑线）、从观察中获得的经验古登堡-里克特曲线（粗黑线）

之后，研究人员对伊朗西北部地区进行了案例研究，对两个模型 B 和 A（有和没有背景地震活动）之间的模拟结果进行了比较，主要发现如下：

1. 频率-震级分布和空间分布

通过将背景地震活动模型与主要模型（由 17 个主要断层组成）相结

合，可以得到该地区断层的完整模型。初始模型称为“模型 A”，完整模型称为“模型 B”。使用模型 B 进行 50 000 年的长期模拟，并将结果展示出来，以便与模型 A 进行比较。模型 B 的主要优势之一是，在更广泛的震级范围内，模拟的频率-震级分布与古登堡-里克特关系的拟合度更好。将背景地震活动与观测到的地震活动进行比较，可以发现模拟地震的位置非常一致。由于该方法为每个事件分配了一个专用的断层段，因此可以精确控制地震的位置。

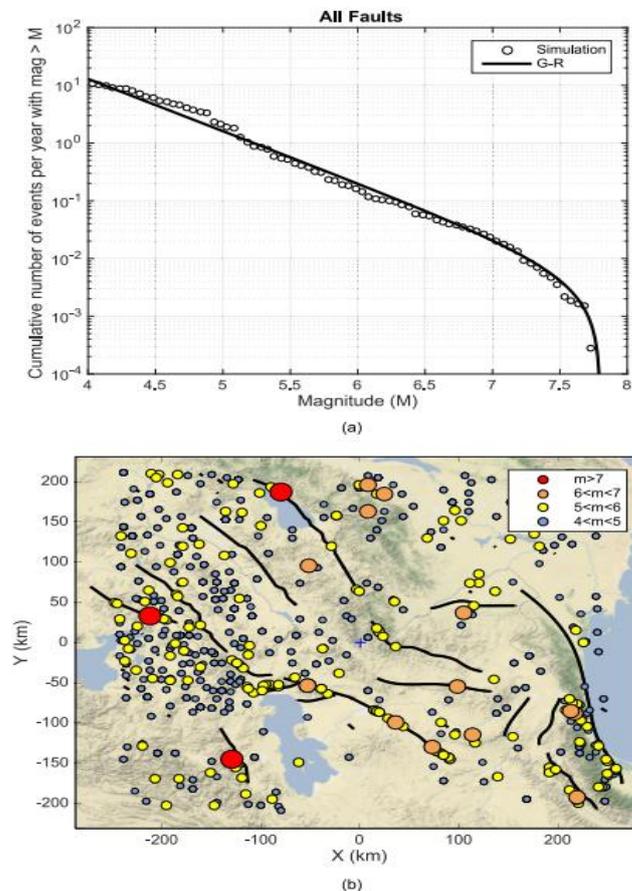


图 3 (a)：模型 B 的频率-震级图，包括主断层地震活动和背景地震活动，还显示了从观测中获得的古登堡-里克特曲线（粗线）；(b)：100 年模拟样本本期地震活动的空间分布图

2. 区域预报

在 VQ 中，模拟的基本输出之一是大地震之间的重现期。因此，可以为整个区域或每个断层段计算这些重现期。根据这些数据，可以计算地震

重现期的平均值和其他统计量。对比模型 A 和模型 B 可以发现，从模拟中去除背景地震活动会导致中间范围地震概率的低估。模型 B 重现期的平均值和标准差都小于模型 A，模型 A 低估了 10 年、25 年和 50 年内的地震条件概率。

3. 断层预测

基于物理的模拟最显著的优势之一是，其能够根据地震的发震断层分离数据，这是物理数据难以实现的功能。使用模型输出数据，可以识别、分类与每个断层相关的地震，并对其进行必要的统计操作。

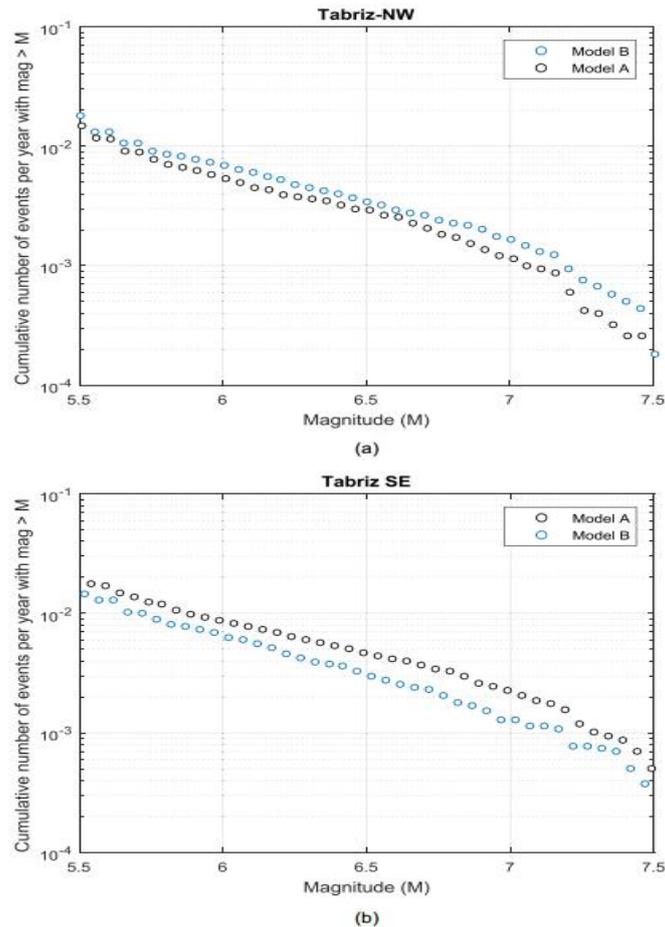


图 4 模型 A 和 B 提取的 Tabriz 断层 (a) NW 段和 (b) SE 段的频率-震级曲线的对比

伊朗大不里士 (Tabriz) 断层长约 200 km，由西北和东南两段组成。该断层整个区域的记录数据非常少，几乎不可能确定经验频率-震级曲线。

另一方面，考虑到长达 50 000 年的目录，可以轻松提取模拟数据，并提供足够的事件进行统计分析。研究表明，西北段背景断层的相互作用增加了地震发生率，而相互作用导致东南段的地震发生率下降。

这种下降可以归因于模型 B 中东南段附近存在大量具有显著尺寸的背景断层。换句话说，该断层的一部分地震活动现在通过这些背景断层释放出来。从模拟中消除这些影响也会显著影响每个断层段发生地震的概率。另外，可以发现，从模拟中去除背景地震活动会导致东南段地震发生概率被高估，而西北段地震发生概率被低估。

4. 小结

整体而言，基于物理的地震模拟的一种简化是消除背景地震活动。因此，该地区的所有地震活动都集中在有限数量的建模断层上。本研究提出的方法在模拟中考虑了背景地震活动的影响，同时保持了其正确的空间分布。因此，所有断层之间的应力相互作用可以被准确地纳入模拟中，并且可以实现模拟地震概率与观测值的更广泛匹配。

需要注意的是，由于缺乏断层数据信息，该案例研究中的背景断层模型不可避免地包含一些较大的地震。然而，如果在整个区域正确定义断层模型，则可以解决这一限制。如果把该方法应用于具有良好断层模型的区域，将可以对该方法进行更可靠的评估。

来源：Bazrafshan A, Khaji N, Paolucci R. On the effect of background seismicity in physics-based earthquake simulations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 274: 106261.

基于物理评估中国西南安宁河-则木河断裂系统的地震潜力

断层系统的地震危险性是由其可能发生的最大地震震级控制的。然而，现有的估计最大震级的方法可能导致很大的不确定性或忽略震级随时间的演变。本研究展示了如何通过高分辨率断层耦合图与三维动态断裂力学中基于物理的模型（由动态破裂模拟证实）的结合，来评估断层系统的最大可能地震震级。研究人员在中国西南部（该地区有密集的近断层大地测量数据）的安宁河-则木河断裂系统上验证了该方法。结果表明，该断层系统目前有可能产生 7.0 级地震，到 2200 年最大震级将增加到 7.3 级。这些结果得到了观测到的破裂程度和历史地震重复次数以及当前地震活动性 b 值的支持。该工作为评估自然断层的地震潜力提供了一种实用的方法。相关研究成果发表在 2024 年 8 月的 *Nature Communications*。

由于构造荷载和摩擦阻力的相互作用，大地震会在天然断层上反复发生。由于成核条件的难以预测以及应力状态的不确定性，即使是对于简单的特征模型，预测大地震的重复次数仍是具有挑战性的。评估未来地震危险性的一种可行方法是估计断层上可能发生的最大地震震级与时间的函数关系，例如，捕捉断层在其整个长度上不会断裂的可能性。

鲜水河-小江断裂（XXF）是中国西南地区最长的左旋断裂之一，其空间尺度（约 1100 km）与美国加州的圣安德烈斯断层相近。XXF 中部的变形由两条分支断裂调节，即成熟的安宁河-则木河断裂（AZF）和不成熟的大凉山断裂（DLSF）。然而，目前在两条断层上积累的弹性能量以及断层目前和将来可能发生的最大地震震级仍不清楚。研究人员结合运动学反演和基于三维动态断裂力学的物理理论模型表明，XXF 已经具有产生 $M_w > 7$ 级地震的潜力，最大可能震级将在 2200 年增加到 $M_w > 7.3$ 级。

1. 安宁河-则木河断裂系统上的凹凸体 (asperity)

断层耦合控制着断层上滑动亏损 (slip deficit) 的积累, 从而为潜在大地震的位置和破裂程度提供了关键约束。为了获得高分辨率的断层耦合分布, 研究人员将 24 个新建的近场 GNSS 台站的观测数据与 AZF 和 DLSF 周围先前台站的观测数据相结合, 估计了长期地壳运动速度, 从而实现了断层耦合运动学反演。

研究发现, AZF 上的大地滑动速率自北向南降低, 从 6.1 mm/a 降至 4.9 mm/a, 与地质观测值 6.5 ± 1.0 mm/a 吻合较好。DLSF 的滑动速率为 3.3~4.8 mm/a, 占整个断裂系统左旋运动的约 40%, 与地质观测估计的 3~4 mm/a 一致。AZF 断层耦合率 (coupling ratio) 沿走向呈现“串珠状”横向变化, 具有 6 个空间尺度为 20~40 km 的高耦合凹凸体。沿着与 AZF 长度相当的 DLSF, 研究人员确定了四个高耦合的凹凸体。

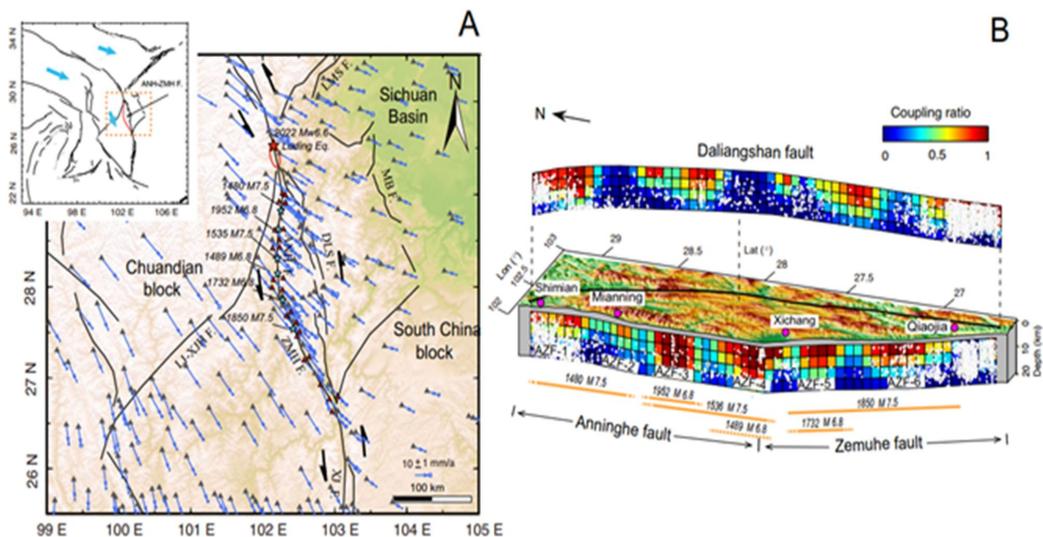


图 1 安宁河-则木河断裂系统的构造背景与断层耦合率。(A) 研究区构造背景; (B) 安宁河-则木河断裂和大凉山断裂的耦合率

AZF 和 DLSF 具有不同的断层成熟度, 成熟的 AZF 比不成熟的 DLSF 具有更多连续的地表迹线。地震学研究和实验研究表明, 代表断层构造成

熟情况的断层地形粗糙度可能控制地震的大小，断层界面越光滑，地震越强烈。进一步研究表明，AZF 和 DLSF 具有不同的耦合率分布模式，这可能与断层成熟度不同有关。同时，成熟 AZF 的耦合非均质（coupling heterogeneity）尺度小于未成熟的 DLSF。

2. 与历史破裂和当前地震 b 值的空间相关性

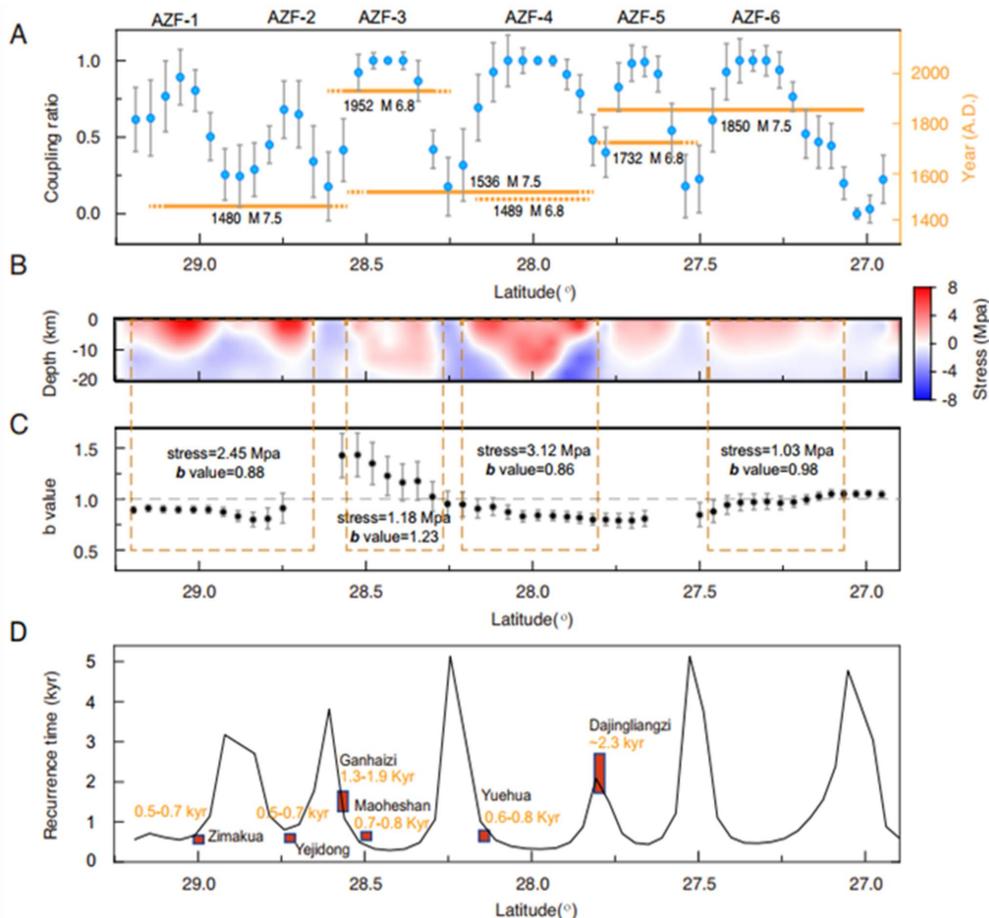


图 2 安宁河-则木河断裂带的耦合率、历史破裂、b 值和应力的空间变化

横向可变的断层耦合与累积剪应力和历史地震的破裂程度密切相关。研究人员使用历史大地震的破裂程度来验证所得到断层耦合图的可靠性。如图 2A 所示，通过多学科观测综合分析所圈定的 AZF 断层凹凸体与过去约 500 年历史大地震的观测破裂程度具有较强的空间相关性。1489 年、1732 年和 1952 年发生的三次 6.8 级地震只破坏了单个孤立的凹凸体，而 1480

年、1536年和1850年发生的三次7.5级地震则连接了两个相邻的凹凸体。此外，研究人员观察到两个低耦合带，即凹凸体AZF-3的北部和AZF-4的南部，这似乎是长期存在的障碍，因为没有观察到突破它们的破裂。历史断裂普遍受到低耦合区阻碍的现象强烈表明，断层耦合控制着大地震的破裂程度和强度。

研究人员进一步基于断层耦合率计算了AZF上的应力加载率（*stressing rate*）的分布，并估计了自上次大地震以来各凹凸体上当前的累积剪应力。*b*值被建议作为应力计，其与应力水平呈负相关关系。如图2C所示，在凹凸体AZF-1和AZF-4附近观察到两个低*b*值区域，表明存在高应力条件，这与上次大地震以来断层上积累的高剪应力一致。在凹凸体AZF-3和AZF-6上，*b*值相对较高，表明这些凹凸体经过时间较短，应力水平相对较低。这些结果表明，剪应力（由大地测量和古地震观测约束）与基于当前地震活动统计特征的*b*值具有一致性。

3. 最大可能地震震级

累积滑动亏损和剪应力与三维动态破裂理论相结合，可帮助评估AZF和DLSF上可能的最大地震震级。在动力破裂理论中，断裂的扩张和停止是由构造荷载的累积弹性能 G_0 和摩擦阻力的耗散能 G_c 控制的。该理论预测，当 $G_0 > G_c$ 时，破裂加速，而当 $G_0 < G_c$ 时，破裂减速。研究表明，在1952年地震发生前，凹凸体AZF-3上的 G_0 高于 G_c ，处于有利于破裂的状态。

理论模型表明，如果在AZF-3凹凸体附近破裂成核，则该断层有可能在1952年之前产生7.0级地震，这与1952年实际发生的6.8级地震相一致。由于1952年的地震已经释放了部分储存的弹性能量，因此凹凸体AZF-3在现今状态下发生 M_w 7级地震的可能性较小。但其邻近凹凸体仍

能发生 $M_w > 7$ 的地震，其最大震级将因 1952 年断裂的荷载而略有增加。由于当前模型中缺乏对 1952 年 6.8 级地震的直接约束，因此不能排除未来发生与 1536 年 7.5 级地震类似的连接 AFZ-3 和 AFZ-4 的 7.5 级地震的可能性，因此值得进一步研究。

此外，研究人员也用这个理论估计了 DLSF 上可能的最大地震震级，尽管它的耦合没有 AZF 那么精细。结果表明，如果距离上一次大地震的时间超过 500 年，DLSF 上可能发生的最大地震的震级也可达到 $M_w 7$ 。

为了证实这些理论预测，研究人员在线性弹性介质中建立了一个垂直平面断层与自由面相交的三维动态破裂模型。结果表明，在拟合 G_c 标度数据的不确定性范围内，理论预测和模型预测在不同破裂场景中具有一致性。理论和模型都预测，如果在 2200 年发生地震，AZF 上的最大可能地震震级可能增加到 $M_w > 7.3$ 。

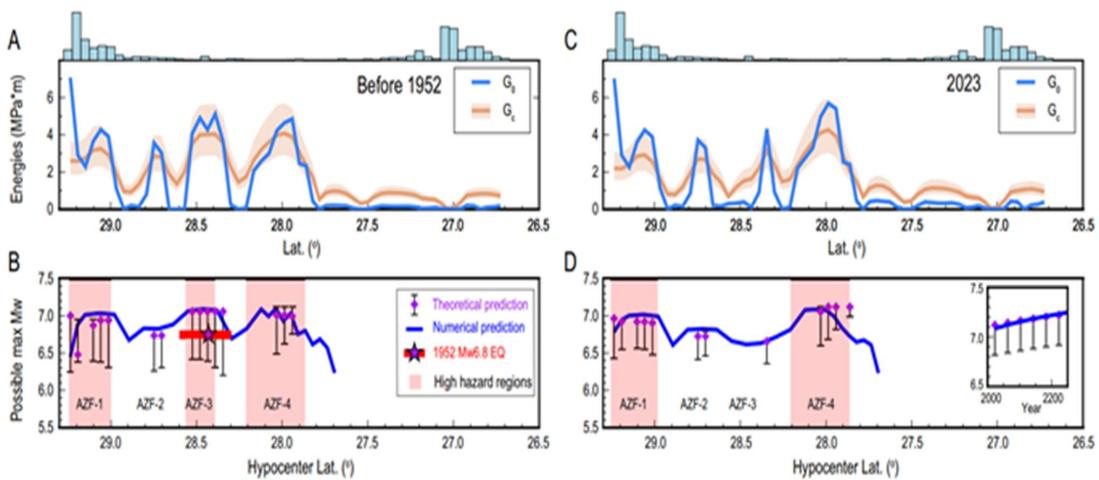


图3 安宁河-则木河断裂带的最大可能震级

综上所述，AZF-1 凹凸体的地震活动性比其他凹凸体更高，这意味着该凹凸体有更大的机会发生 $M_w 7$ 级大地震。在该断层段的北部，2022 年发生了泸定 $M_w 6.6$ 地震，引发了多次余震，并对该断层段施加了 0.2 MPa 的载荷。根据这些地震观测结果和模型，研究人员认为，AZF-1 凹凸体比

其他部分具有更高的地震危险性，目前有可能发生 M_w 7 级大地震。虽然断层也受到其他复杂过程的影响，这些过程的参数目前还没有得到很好的约束，比如断裂带流体、几何复杂性和绝对应力状态，但本研究结果表明，基于断层上的累积滑动亏损和动态破裂模型可以很容易地估计潜在地震的最大震级。

来源：Diao F, Weng H, Ampuero J, *et al.* Physics-based assessment of earthquake potential on the Anninghe-Zemuhe fault system in southwestern China. *Nature Communications*, 2024, 15: 6908.

火星地壳的地震不连续面可能由含水裂缝引起

“洞察”号着陆器最近获取的地震数据揭示了火星地壳中的地震不连续面，这些不连续面被解释为孔隙度或化学成分的突变。来自日本的两名科学家提出一种替代模型，即从干裂缝（无水）向含水裂缝的转变可以解释火星地壳中观测到的地震波速不连续现象。该模型可以解释在约 10 km 深度处地震波速和纵波横波速度比的急剧增加，而无需孔隙度或化学成分的变化。目前的模型分析表明，火星地壳中局部存在液态水，这些地方可能是生命的地下栖息地。相关研究成果发表在 2024 年 9 月的 *Geology*。

InSight 火星探测任务于 2018 年发射“洞察”号探测器登陆火星，此后探测到来自火星内部的地震信号。分析表明，“洞察”号着陆点下方的火星地壳具有三层地震结构，在深度约 10 km 和 20 km 处具有地震不连续面。这些地震波速不连续的边界被解释为孔隙度或化学成分的明显变化，因为它们（孔隙度或化学成分）对地震波速有显著影响。另一方面，如果地壳的空隙中存在液态水，那么根据有效介质理论，预计地震波速度将高于无水情况下的速度。

为了验证火星地壳的地震不连续面是否可能由无水层到富水层的过渡所导致，而与孔隙度和化学成分的变化没有关系，研究人员通过实验测试了无水、水饱和以及结冰条件下破裂地壳岩石的地震波速度，并根据现今火星上地下水的存在与否讨论了地震不连续面的起源。

实验样品为来自瑞典南部 Rydaholm 的辉绿岩样品，其具有等粒结构，主要由长石和斜方辉石组成，与火星地壳成分相似。原始样品的孔隙率 <0.2%，热处理后样品的孔隙率提高到约 1.2%。扫描电镜显示，热处理后晶内和晶间裂缝几乎各向同性分布。在 100 °C 真空中加热 24 h 后，进行无水样品地震波速测量；用盐水（0.5 mol/L NaCl）饱和样品 10 天后，进行

水饱和样品的地震波速测量；将饱和的样品储存在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ （低于盐水的共晶点）的冰柜中，进行结冰样品的地震波速测量。

结果显示，P波和S波在具有不同裂缝填充相样品中的传播时间有所不同，其中，在无水（气体充填）样品中的地震波速度最慢。尽管气体、水和冰的弹性模量不同，而孔隙度的影响取决于裂缝填充相，但地震波速随着孔隙度的增加而系统性的降低。无水和饱和样品的实验结果可以用平均纵横比为 6×10^{-3} 的裂缝模型很好地解释，这与从大陆地壳岩石推断的结果几乎一致。尽管无水裂缝和水饱和裂缝显著降低了地震波速，但与气相和水相相比，冰填充裂缝的模量相对比较刚性，因此对地震波速的影响很小。

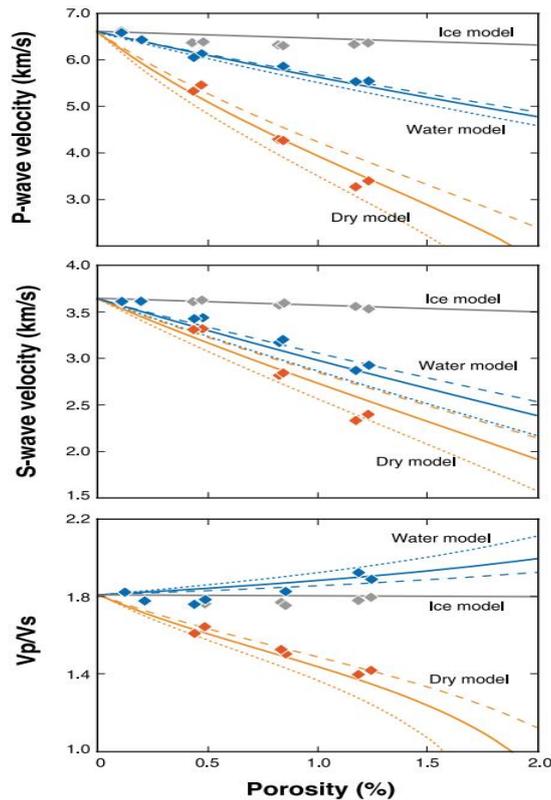


图 1 热裂辉绿岩的孔隙度与地震波速的关系，曲线和菱形方框分别代表理论模型和实验观测的结果。模型基于有效介质理论计算不同纵横比裂缝：虚线 7×10^{-3} ，实线 6×10^{-3} ，点线 5×10^{-3}

计算表明，即使在孔隙率恒定的情况下，在中地壳中，从无水裂缝到

水饱和裂缝的变化也会导致地震波速的显著增加。在更深的深度，地震波速预计会进一步增加，其中大多数裂缝在深度约 20 km 以下由于粘性流动而闭合。同时，计算结果还取决于计算中使用的裂缝纵横比。本研究表明，类似的破裂岩石中含有小纵横比的裂缝（裂缝纵横比 $\alpha=0.005\sim 0.007$ ），并且火星地壳的显著地震波速变化可以用细裂缝模型（thin-crack model）来解释。

被冰填充的裂缝对地震波速的影响很小，不太可能解释“洞察”号着陆点下方观察到的地震波速变化，因为此前的研究表明，着陆点下方没有冰冻圈。考虑到火星上目前的热流，水的冻结温度将出现在约 10 km 的深度，这使得中部地壳下可以存在液态水。这些水很可能含有绿泥石和硫化物，从而进一步降低共晶点，使得液态水在更大的范围内稳定存在。

最近其他科学家开展的接收函数与瑞利波椭圆度的联合反演表明，在 10~20 km 火星中部地壳，存在地震纵波和横波速度的不连续面以及 V_p/V_s 的增加。实验数据和理论计算表明，含水裂缝会增加 V_p/V_s ，而无水裂缝会降低 V_p/V_s 。而圆形孔隙或地壳岩石成分的变化，很难获得高 V_p/V_s 异常。这些证据表明，火星中部地壳可能存在富水破裂层。

在深度小于 10 km 处，该模型预测的 V_p/V_s 明显比观测值低。当裂缝被水填充时，纵波和横波速度都增加，但水对 V_p 的影响大于对 V_s 的影响。因此，无水裂缝的局部饱和可能导致地壳浅部较高的 V_p 和 V_p/V_s 。另一种可能是浅深部裂缝形状的变化，即具有较大纵横比的无水裂缝会导致相对较高的 V_p/V_s 。

“洞察”号探测到了陨石在远离着陆点处撞击引起的面波。对这些数据的分析显示，地壳的地震波速变化很小，这与“洞察”号着陆点的分层地震结构具有很大不同。然而，表面波代表沿其传播路径的平均速度，并

且对地震不连续面的成像不太敏感。着陆点下方上地壳相对较低的地震波速可能与高度破裂的物质有关，正如着陆点看到的准圆形凹陷所示，这些破裂物质可能源于埋藏的撞击坑。最近的分析表明，最上层的低速层厚度约为 1~2 km，可能是覆盖在地壳层上的撞击角砾岩或喷出物沉积物。与更深的基底相比，它们可能具有更高的孔隙度和不同的孔隙几何形状。具有快速垂向极化速度的地震波速各向异性也表明，“洞察”号着陆点附近的上地壳存在高度破裂带。研究人员的计算中没有包括各向异性特征，因此模型和观测之间的速度差异可能部分归因于此。

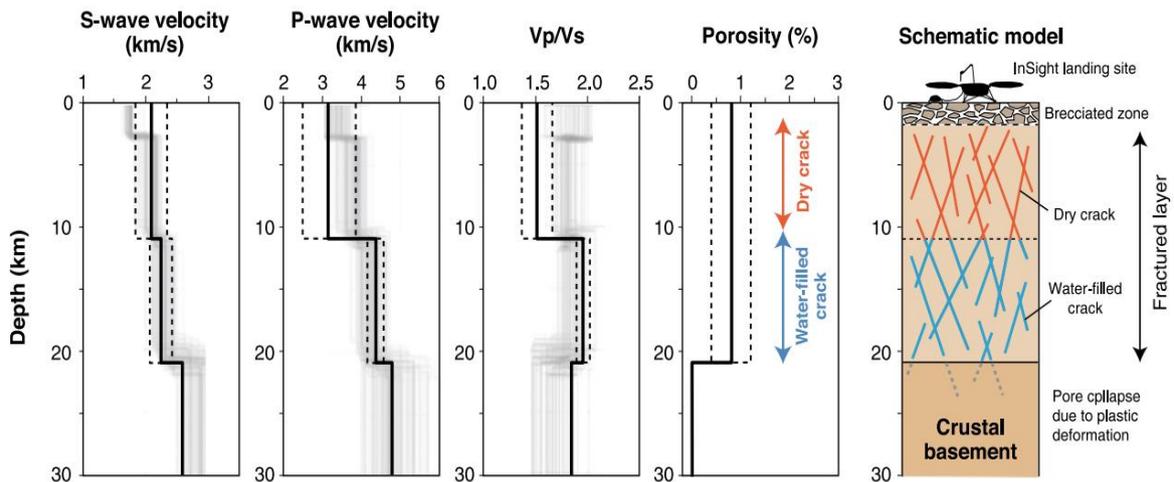


图 2 计算得到的火星地壳的地震波速结构。模型假设在无水破裂层下有一个富水破裂层，这些破裂层在 20 km 深度以上具有恒定的 0.4%~1.2% 的孔隙度

研究人员认为，在“洞察”号着陆点探测到的深度约 10 km 处的地震不连续面可能是由中部地壳层中的含水裂缝造成的，这表明火星地壳中部可能存在地下水。尽管这不是解释目前观测数据的唯一途径，但考虑到导电性对含水流体的敏感性，火星上的电磁测量可能有助于进一步验证这一解释。虽然由于大气压力低，液态水在现今的火星表面并不稳定，但随着深度的增加，静岩压力可能会允许在共晶点以上的温度存在地下水。

水在大气和近地表地壳之间的长期循环可能在火星的整个地质历史

中都发生过，在这个过程中由纬向地下水丘形成的水力水头梯度（**hydraulic head gradient**）驱使流体流向赤道。大部分地下水可能已经枯竭，形成了由冰凝结的冰冻圈。但由于撞击坑周围地壳中相对较高的热梯度，地下水可能在局部存留下来。在地球上，许多微生物存在于地下，并通过流体与岩石的相互作用（如蛇纹石化作用）获得营养。如果液态水存在于现今的火星内部，它可以为微生物群落提供适宜生存的栖息地。

来源：Katayama I, Akamatsu Y. Seismic discontinuity in the Martian crust possibly caused by water-filled cracks. *Geology*, 2024: <https://doi.org/10.1130/G52369.1>.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所