

地震科技前沿快报

2025 年第 1 期（月刊总第 72 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、使用广义地震训练用于实时地震预警的通用神经网络

本研究通过数据重组方法创建广义地震训练神经网络，经过训练的模型能应用于不同监测设置进行地震检测和参数评估，实现早期实时地震预警。模型在日本、加州等地测试中表现优异，可在 P 波到达后 4 秒内报告地震位置和震级，平均误差小，无需复杂经验配置，具有全球应用潜力。

2、不同饱和度下地震诱发的砂土液化的评估与解释

本研究综述了不同饱和度下地震诱发砂土液化的机制及评估方法，发现降低饱和度能有效增强砂土抗液化能力。同时，还提出了使用基于应力和基于能量的方法来深入解释不同饱和度下的循环行为的新方法。

3、青藏高原东北缘张剪性断裂带：千年地震复发与高地震危险性

本研究通过对青藏高原东北部天祝地震空区中部的天祝盆地西缘断裂的几何结构与运动性质进行遥感影像解译和野外调查，发现该断裂自约 8000 年以来发生过 7 次古地震，平均复发间隔为 1102 ± 100 年，具有千年级别准周期复发特征。同时研究认为金强河-天祝张剪性断裂带具有较高地震危险性。

使用广义地震训练用于实时地震预警的通用神经网络

深度学习可通过直接挖掘地震波形来增强地震监测能力，然而，目前在特定区域内训练的神经网络在推广到不同区域时面临挑战。本研究采用数据重组方法创建发生在任何位置的广义地震（具有任意站点分布）用于神经网络训练，经过训练的模型可以普遍应用于不同的监测设置，以从连续地震波形流中进行地震检测和参数评估。这使得实时地震预警（EEW）可以在地震发生的早期阶段启动，当应用于日本和美国加利福尼亚州的大量地震序列时，模型可以在初始 P 波到达后的 4 s 内可靠地报告大多数地震位置和震级，平均误差分别为 2.6~7.3 km 和 0.05~0.32。通用神经网络促进了实时地震预警在全球的应用，消除了传统方法中通常需要的复杂经验配置。相关研究成果发表在 2024 年 9 月的 *Communications Earth & Environment*。

地震监测是地震学的核心任务，实时报告地震参数对地震预警（EEW）至关重要。传统 EEW 系统通常需几秒至 1 分钟的时间发出警报，其通常利用多个模块处理波形流数据，以满足触发条件（如震级阈值、触发站点数量等）。严格的阈值影响实时性，宽松则可能误报。单站 EEW 用初始几秒的 P 波估算位移或周期参数，但为了避免误报需要其他额外站点的确认。深度学习可提升从单站 P 波中检测和预测地震参数的效率，而大地震的长破裂过程需更多 P 波数据。

传统地震监测流程复杂，涵盖震相识别、关联和震级评估等，若某一步出错将影响结果。相比之下，EEW 需更快地处理初期数据，并充分利用站点信息。通过深度学习直接从波形中提取信息，无需复杂的经验设置，可被用于地震检测和参数评估。卷积神经网络和图神经网络已成功用于震源定位和震级估计，但泛化能力受限，常需迁移学习。此外，EEW 要求神

神经网络能处理触发和未触发站点数据，对模型提出了更高要求。

本研究设计了三个神经网络模型，通过持续输入地震数据流，进行地震检测、定位和震级估计。模型基于全卷积网络，输出结果采用 1D 或 3D 高斯分布表示检测到的 P 波到达、地震位置和震级。定位网络将台站的 XY 坐标作为输入，并按坐标排序，以确保每个地震对应唯一的输入数据。训练数据来源于意大利、美国俄克拉荷马州和南加州的 94586 个单站震源数据，通过重新组合这些数据生成具有不同台站分布的通用训练样本，从而提升模型的泛化能力。此外，通过模拟不同震中和台站配置，构建了 355001 个地震样本用于训练。

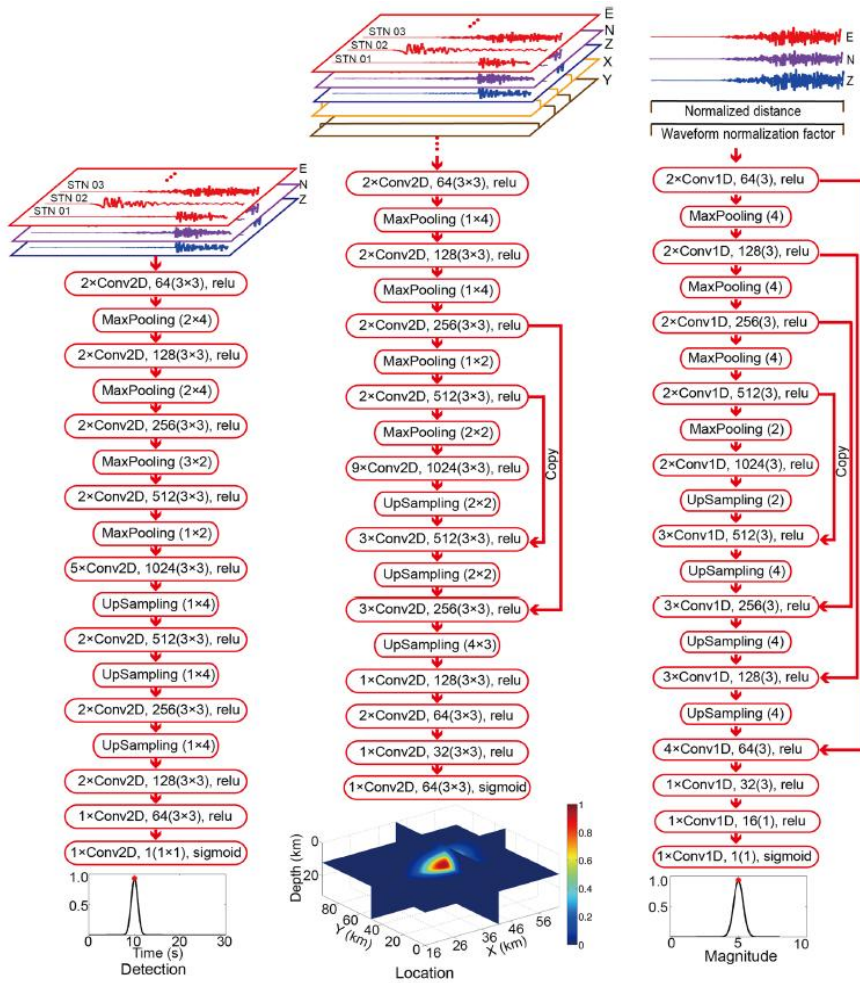


图 1 输入、输出和神经网络。三分量波形或台站 XY 位置被输入到神经网络中，输出被标记为 3D 或 1D 高斯分布，以表示地震参数

(1) 日本大阪和美国里奇克雷斯特主震的伪实时监测。研究人员以训练好的神经网络对2018年6月18日在日本大阪发生的6.1级地震和2019年7月4日在美国里奇克雷斯特发生的6.4级地震进行实时监测，同时，通过最大概率密度函数值（PDF）判断是否检测到地震，通过预测的地震位置计算监测台站的震中距，通过首个P波到达时间、理论P波到达时间、归一化波形等，推算地震起始时间和震级。实验结果表明，系统可以在P波到达后4 s内准确报告震中位置和震级。在更早的时刻，虽然震级预测存在误差，但仍能提前预警，表明该系统具有实时监测地震参数的潜力。

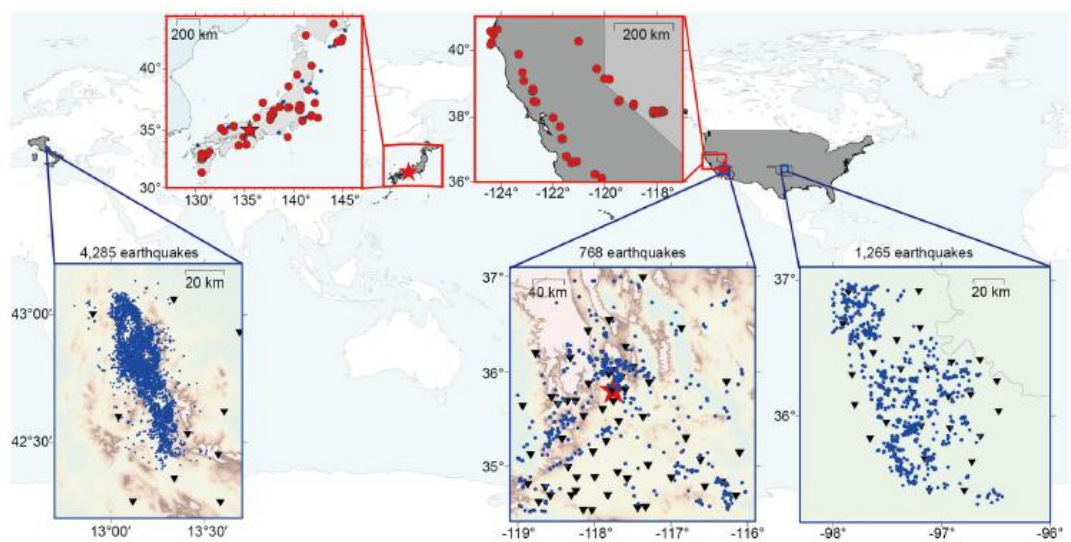


图2 训练数据和测试地点。蓝点表示收集的训练地震数据，三角形表示记录站点，红色星号表示日本大阪和美国里奇克雷斯特地震序列的测试地点，红色矩形表示较大的测试区域，包括日本和北加州的139次相对较大的地震（红点）

(2) 大阪和里奇克雷斯特监测的鲁棒性分析。研究人员应用神经网络对上述两地528次较大地震及一天的连续波形记录进行了鲁棒性测试。结果表明，神经网络能够检测并定位 $M \geq 2.5$ 的地震，且能识别小于 $M 2.5$ 的地震。在测试中，神经网络预测的所有 $M > 3.0$ 地震均与原始目录一致，说明模型对两个地区 $M > 3.0$ 地震没有误报。对结果的分析表明，震中误差分别为2.6 km和4.5 km，震级误差分别为0.08和0.11，表明该神经网络

模型可在不同地区和监测项目中广泛应用。

(3) 大阪和里奇克雷斯特地震的预警性能。结果显示，地震预警可在 P 波到达后 3~4 s 启动，并且随着数据的增加，震中和震级误差逐步降低。震源深度预测的精度较低，但随着波形信号长度的增加而增加。研究认为，复杂波形对深度估计产生了一定影响。

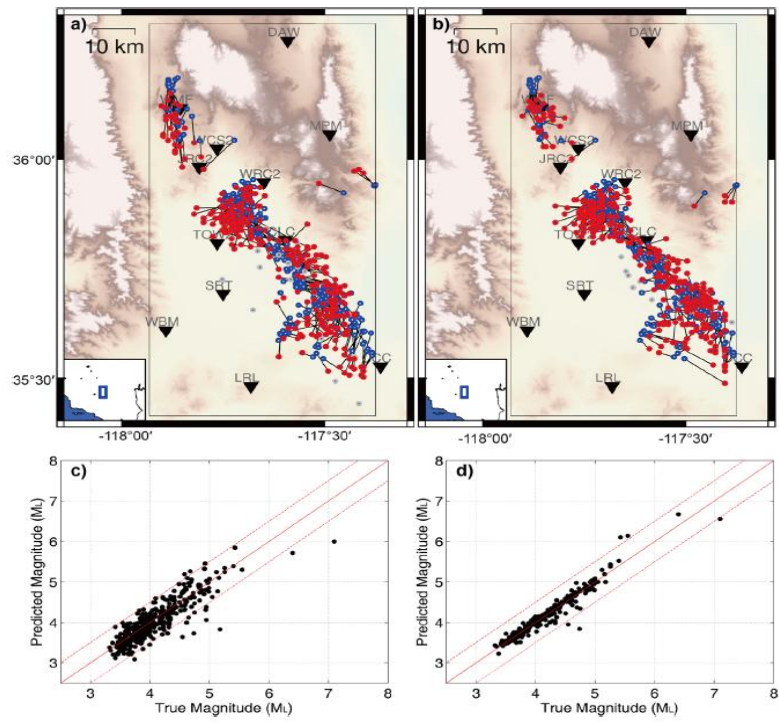


图 3 美国里奇克雷斯特 349 次地震的预测结果与记录之间的地震参数比较。(a) 和 (b) 首个台站触发后第 4 s 和第 15 s 的地震位置比较；(c) 和 (d) 首个台站触发后第 4 s 和第 15 s 的地震震级比较

(4) 神经网络的泛化能力。研究结果显示，对于陆地地震，震中位置、深度和震级的平均误差分别为 4.9 km、4.0 km 和 0.17，而海底地震的误差较大，说明复杂的速度结构对地震定位有影响。

(5) 不同站点分布下实时监控的首次警报。对于 139 次较大地震的实时监控，研究人员分析了满足检测和定位 PDF 阈值的首次警报。结果显示，震中位置、深度和震级的误差分别为 5.5 km、4.2 km 和 0.32，且大多

数首次警报可在 P 波到达后约 4 s 发出。震中误差与站点分布密度有关，稀疏分布（3~5 个台站）下，首次报警时间可能超过 8 s，而在密集分布下，报警时间较短。总体而言，神经网络能够有效提取特征，并根据当前波形实时发出预警。

（6）应用于 $M>7.0$ 地震以及与传统 EEW 实践的比较。研究人员将训练好的神经网络模型应用于 2016 年 4 月 16 日发生的日本熊本 7.3 级地震，结果显示，在 P 波到达后 3.5 s，地震参数被首次报告，震中位置和震级的误差分别为 6.1 km 和 1.4。在 15 s 时，所有台站触发警报，震中误差为 5.0 km，震级为 M 7.1。尽管训练数据主要来自宽频地震仪，神经网络模型在强震仪数据下也表现良好。

传统的地震预警方法在熊本地震中首次发出预警的时间较神经网络模型晚 2 s，且传统方法最终震级为 M 6.9，而神经网络模型提前约 2 s，震级为 M 7.1。这表明，神经网络模型在震级估算上较传统方法更迅速且准确，尤其是在震中位置和震级的早期预警中具有优势。

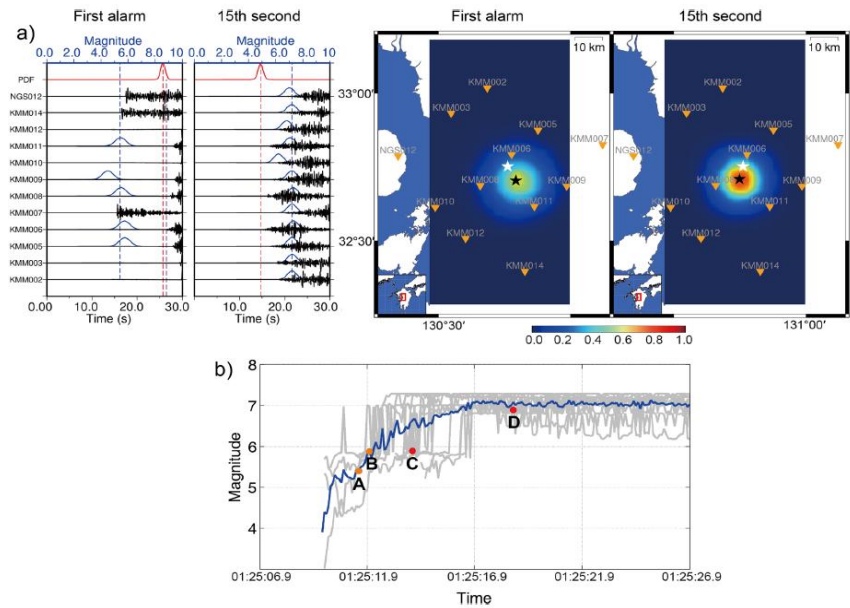


图 4 在 2016 年 4 月 16 日日本熊本 7.3 级地震中的应用。（a）第一次警报和第一次 P 波到达后 15 s 的监测快照；（b）不同时间的预测震级

总体而言，研究人员使用来自意大利、俄克拉荷马州和南加州的数据训练了神经网络，证明其已能够应用于不同地区的实时地震早期预警，而无需额外训练。所训练模型具有广泛的适用性，能够在全球范围内减少地震灾害。尽管南加州的训练数据与里奇克雷斯特测试数据存在时间差异，但由于里奇克雷斯特在地质上属于南加州，地质结构和波形可能相似，所以模型在里奇克雷斯特地震中的监测误差与日本、北加州等地区的结果相似，表明模型学习到了用于地震检测的普适特征。这些神经网络模型无需复杂的经验设置，可广泛应用于任何地区的地震监测。尽管需要设定高斯分布的 PDF 阈值，但相同的阈值可跨区域使用，确保了稳健的地震检测和准确的参数计算。与传统的基于行程时间的方法相比，这些方法更高效、精准，能够自动提取实时波形数据并发出预警。

来源：Zhang X, Zhang M. Universal neural networks for real-time earthquake early warning trained with generalized earthquakes. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5(1): 528.

不同饱和度下地震诱发的砂土液化的评估与解释

地震引起的液化是一种突出且影响深远的自然灾害，在世界范围内造成了巨大的经济损失。因此，目前工程师和研究人员十分关注能够减轻这种破坏性现象的方法和技术。降低饱和度是提高砂土抗液化能力的可靠方法，因为它直接影响地震作用期间孔隙压力的积累。本研究回顾了不同饱和度（减少诱发液化现象的关键参数）的砂土中地震诱发液化的机制及其评估方法，同时，还提出了使用基于应力和基于能量的方法来深入解释不同饱和度下的循环行为的新方法。汇编和讨论的实验结果表明，有效降低饱和度有望成为提高土壤抗液化能力和减轻相关风险的可行策略。此外，本研究对循环行为的解释为量化几种饱和度（可通过去饱和或诱导部分饱和和技术实现）下抗液化能力解释方法的可靠性提供了宝贵见解，有助于制定抵御地震损害的恢复策略。相关研究成果发表在 2024 年 11 月的 *Earth-Science Reviews*。

地震是最具破坏性的自然现象之一，近年来导致了全球范围内巨大的经济损失。地震引发的液化现象，尽管不致命，但会严重破坏建筑物和基础设施，尤其是通过显著降低土壤承载力、造成不均匀的地面变形和横向扩展，导致受影响的建筑物失去使用功能。目前，液化现象在多个国家已造成严重后果。

在这种情况下，必须确定能够减轻地震所引起液化造成损害的缓解技术，同时遵守设计可靠性、环境兼容性和成本效益的标准。去饱和或诱导部分饱和（IPS）方法通过引入一定量的空气/气体来增加孔隙流体的压缩性，从而提高土壤对液化的抵抗力。更有大量文献表明，地震引起的液化通常发生在饱和土体沉积物中，因此，降低饱和度（ S_r ）可以增加循环不排水剪切强度（cyclic undrained shear strength）。

本研究对不同饱和度下地震所诱发砂土液化的评估进行了全面综述，汇集了从 1980 年代到 2024 年的大量实验结果，特别是过去十年发表的最新研究成果。研究人员介绍了饱和度对地震引起的液化的影响，进而详细说明了三种不同的抗液化性评估方法，最后，通过大量实验结果对提高不同饱和度下砂土循环行为的分析和创新方法进行分析 and 总结。

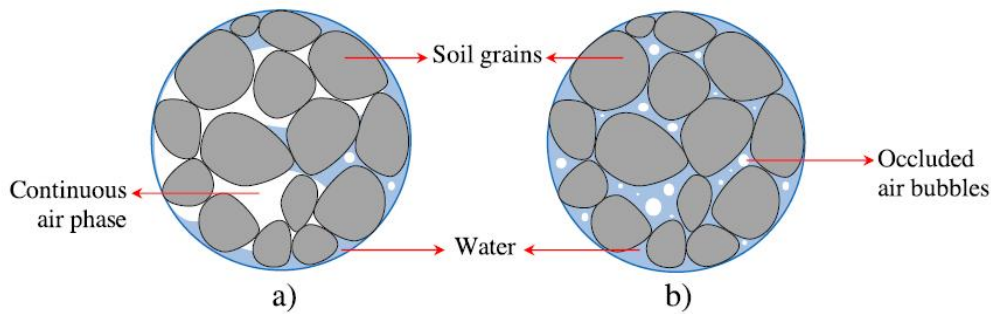


图 1 土壤中的气体/空气分布：(a) 非饱和状态；(b) 含气或部分饱和状态

近年来，许多方法通过不同土壤参数建立了液化触发与地震液化易感性的关系。同时，研究显示，实验室重塑土样的循环加载测试对行为模式研究或分析方法验证具有重要价值，尤其是土壤去饱和对液化性抵抗力的影响。因此，本研究涵盖了在均匀循环加载条件下从重塑样品获得的实验数据。

在不同饱和度下，通过实验室测试对抗液化性进行评估的方法主要有 3 种，分别是传统方法、基于应力的方法和基于能量的方法。

(1) 抗液化性的传统评估方法。在这种方法中，土壤样品通过不同循环应力比（CSR）的加载循环至液化发生，计算出对应的液化循环次数（ N_L ）。液化的发生由孔隙压力比（ r_u ）或双应变振幅（DA）的特定阈值定义，即当 r_u 接近 1.0 或 DA 达到特定值时视为液化发生。通过多种实验设备（如三轴、扭剪和简单剪切测试）测量不同 CSR 下的 N_L ，绘制液化强度曲线（LSC），此曲线可以描述土壤液化抗性随 CSR 的变化。

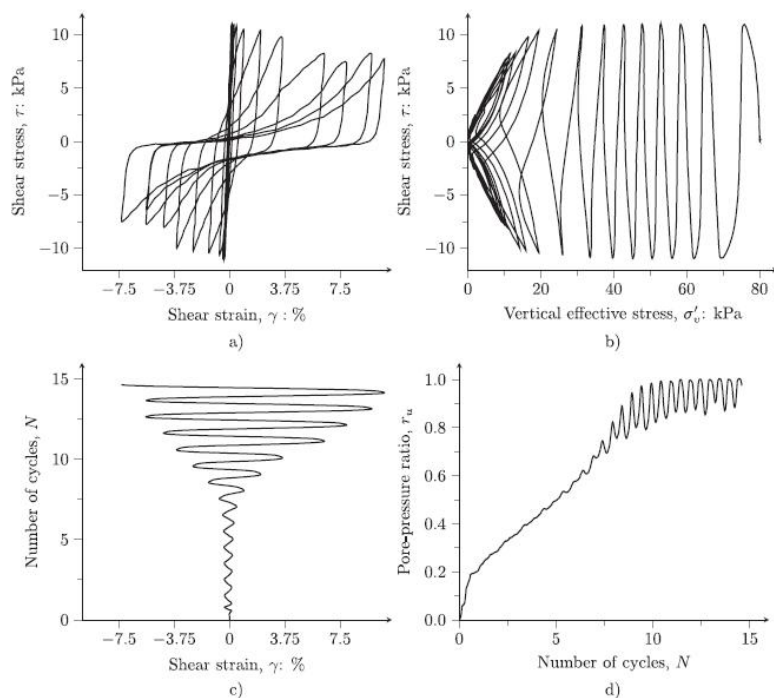


图2 循环土壤响应——松散沙子在直接简单剪切试验中的实验数据：(a) 应力-应变循环行为；(b) 应力路径；(c) 应变演变；(d) 孔隙压力积累

(2) 基于应力的抗液化性评估方法。地震液化的触发通常通过应力状态的变化实现，因此该方法通过评估孔隙水压力的累积情况来预测液化发生。在实验室测试中，研究人员会根据施加的循环应力比（CSR）和累积加载周期数（ N/N_L ），观察 r_u 的变化情况。较高的 CSR 通常会加速液化的触发， r_u 接近 1 时，表示土壤达到液化状态。

(3) 基于能量的抗液化性评估方法。与传统的应力方法不同，能量方法认为地震引起的土壤变形与能量耗散相关，通过计算单位体积的总耗散能量（ ΔW ）来预测液化发生。实验表明，在循环加载中累积的耗散能量与孔隙水压力的增长密切相关，因此能量耗散可以作为液化的一个指标。此方法的优势在于不依赖特定的应力路径，可以适应不同的加载模式，并为现场和实验室测试结果提供统一的评估标准。

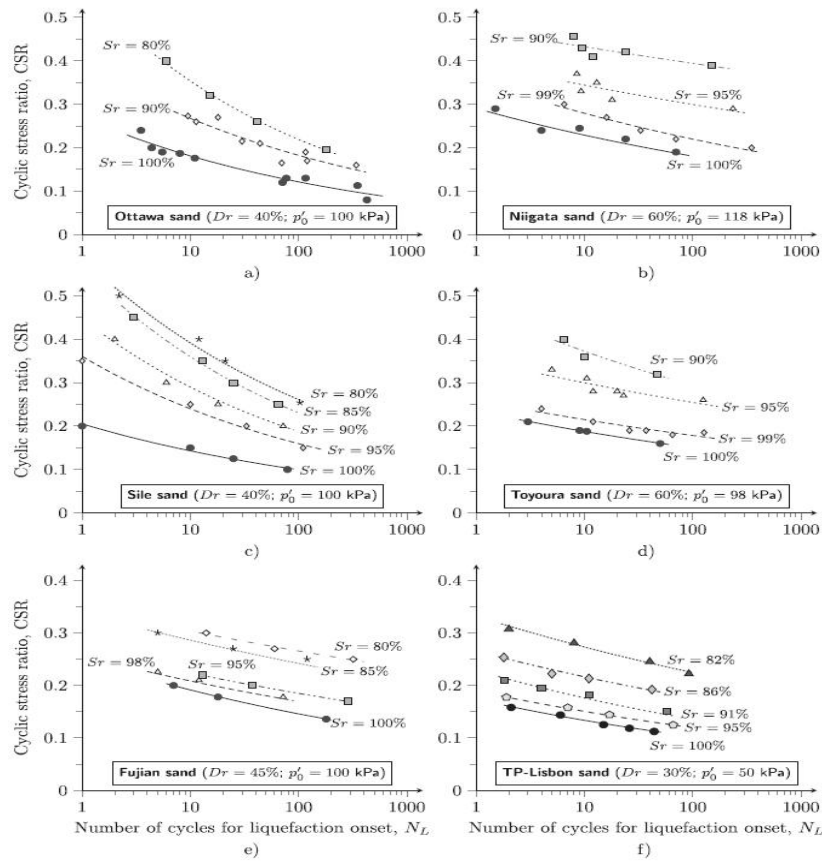


图 3 饱和度对抗液化性的影响：(a) 渥太华砂；(b) 新泻砂；(c) 希莱砂；(d) 丰浦沙；(e) 斐济沙；(f) TP-里斯本沙

地震诱发的液化通常导致砂土强度和刚度丧失，主要原因是地震加载导致的孔隙水压力的积累。饱和度显著影响液化发生的可能性，完全饱和的均匀砂土最易发生液化，而减小饱和度可有效增强抗液化能力。由于在完全饱和的土壤中会产生气体，因此去饱和或诱导部分饱和作为缓解液化的一种替代技术引起了越来越多的关注。气泡会增加流体的压缩性，并显著降低循环加载过程中的孔隙压力积累。研究人员探讨了去饱和对地震引起的液化的影响，并介绍了评估不同饱和度下砂土循环行为的新方法，主要取得了以下 4 方面发现：

(1) 实验证据表明，饱和度即使略有降低，也能显著提高砂土抵抗地震液化的能力。尤其是从完全饱和状态 ($S_r=100\%$) 降至部分饱和状态

（如 S_r 约为 90%）时，液化抗性提升最为显著。这种影响强调了降低饱和度，可缓解地震诱发液化的潜力。已有实验证据表明，饱和度的降低会增加液化开始的循环次数，并减轻循环加载过程中产生的应变。

（2）对不同饱和度下颗粒土体循环行为的评估而言，基于能量的方法已成为非常有潜力的工具。与传统的基于应力的方法不同，基于能量的方法考虑了流体压缩性对土壤行为的影响。此外，该方法有助于比较从各种实验室测试程序（包括元素测试和离心机建模）获得的结果。

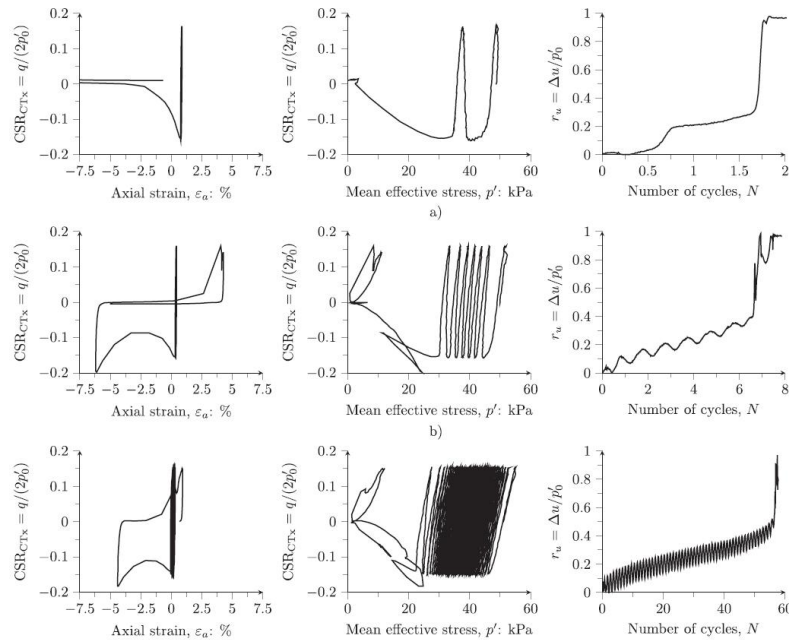


图 4 不同 S_r 下的不排水循环行为：(a) $S_r = 100\%$ ；(b) $S_r = 95\%$ ；(c) $S_r = 91\%$

（3）各种砂土的实验数据表明，液化强度曲线是平行的，并且随着 S_r 的降低而上升。然而，通过估计不同砂土中归一化循环强度和 S_r 之间的关系，可以观察到 S_r 减少带来的抗液化能力提高并不遵循特定的趋势。这种差异归因于土壤的围压、相对密度和初始结构的变化。需要进一步研究这些参数的变化，以确定不同 S_r 下砂土不排水循环行为的影响因素。

（4）基于波的方法表明，可通过 P 波速度 (V_p) 来描述抗液化性能（通过降低 S_r ）的改善潜力。P 波速度的测量是一种非破坏性的方法，可

以在现场应用中对土壤状态进行监测。这种方法解决了一个各种可液化砂土的 LRR_{20} （任何低于 100% S_r 条件下 20 次循环的 CSR 与完全饱和条件下 20 次循环的 CSR 之比）与波速的关联方程。结果显示，当 V_P 低于 500 m/s 时，土壤的液化抗性显著提高，较低的 P 波速度代表着较低的饱和度，通常液化抗性也更强。实验数据表明，这种方法对于具有不同细颗粒含量和相对密度的砂土非常合适，说明 LRR_{20} 和 V_P 关系不受测试条件的影响。然而，由于缺乏在不同 S_r 条件下以波测量进行循环元素测试的综合实验数据，基于波的方法更加有限，这为未来的研究提供了一种新的可能性。

来源：Molina-Gómez F, da Fonseca A V, Ferreira C, *et al.* Insights into the assessment and interpretation of earthquake-induced liquefaction in sands under different degrees of saturation. Earth-Science Reviews, 2024: 104925.

青藏高原东北缘张剪性断裂带：千年地震复发与高地震危险性

在构造活跃的变形带中，大地震破裂间的地震空区通常被认为是未来地震的危险区域。天祝盆地西缘断裂(Western Tianzhu Basin fault, WTBF)具有斜向正断运动，其位于青藏高原东北部天祝地震空区的中部。天祝地震空区位于海原(8.5级)和古浪(8.0级)大地震之间，WTBF的断层活动是理解该地震空区地震危险性的关键，但目前对该断层活动的了解很少。通过卫星影像、野外调查、古地震探槽分析和放射性碳年代测定，研究人员发现天祝盆地西缘断裂自大约8000年以来发生了七次古地震，最近的一次发生在 1005 ± 584 年，地震平均复发间隔为 1102 ± 100 年，变异系数为0.38，表明该断层具有千年级别的准周期性地震复发特征。基于几何形态、运动学和构造活动的对比分析，研究建议将天祝地震空区划分为三个区域，并认为其呈现出分段破裂模式。其中，天祝盆地西缘断裂和金强河断裂具有相似的几何形态和运动学特征，二者共同形成了约55 km长的金强河-天祝张剪性断裂带(JTTFZ)，该断裂带能够引发约7.2级的地震。鉴于自最近一次地震发生以来已过去较长时间，并且具有较强的发震潜力，研究认为金强河-天祝张剪性断裂带具有较高的地震危险性。该研究结果增强了对地震空区中高地震危险性的理解，并为理解青藏高原东北部的地震破裂行为提供了新的见解。相关研究成果发表在2024年10月的 *Tectonics*。

印度板块与欧亚板块的东北向碰撞导致青藏高原隆起和扩张，造成大量应变积累，形成了活跃的断裂带和造山带。青藏高原东北缘的祁连-海原断裂带(QHFZ)经历强烈的斜向压缩，导致该区域主要存在左旋剪切和地壳收缩增厚两大变形模式。QHFZ具有5~8 mm/yr的左旋走滑速率，涉及多个重要断层。1920年至1932年，该区域发生了三次7.5级以上的大地震，形成了两个地震空区，被认为是未来地震的高风险区域。

通常认为天祝地震空区包含冷龙岭、金强河、毛毛山和老虎山断裂，并具有发生大地震的潜力。然而，冷龙岭断裂在 1927 年已发生破裂，不再是该空区的一部分。WTBF 位于金强河和毛毛山断裂之间，具有正断特征，形态明显。因此，研究该断层的地震活动及其与邻近断层的关系，对于理解天祝地震空区的破裂行为至关重要。

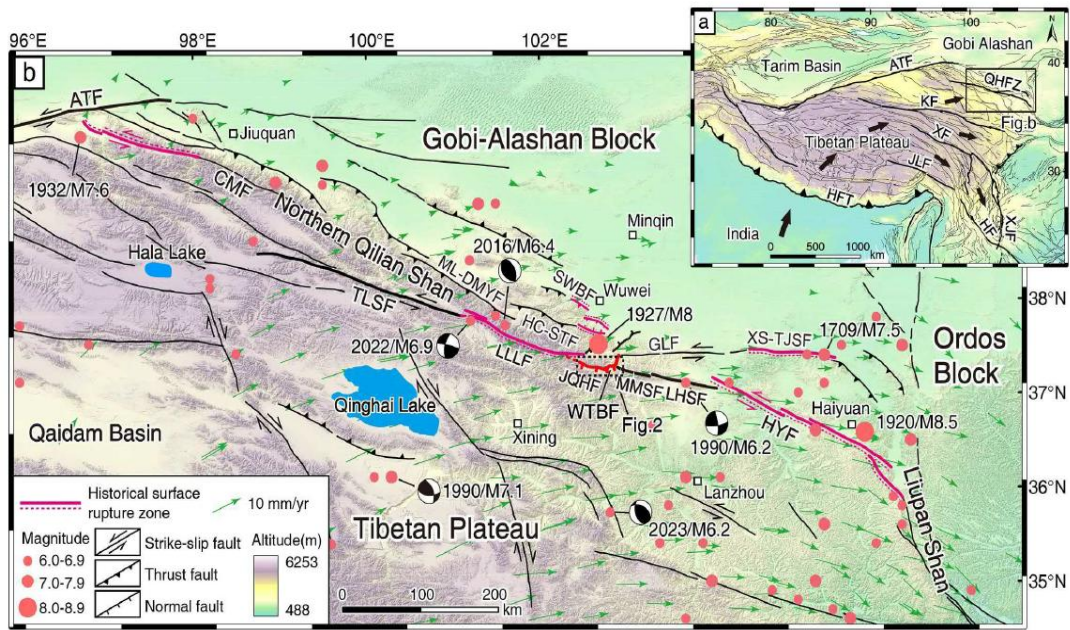


图 1 研究区域的构造背景。(a) 区域构造特征，黑色箭头表示印度和青藏高原相对于西伯利亚的运动；(b) 研究区域主要活动构造和地震，绿线和箭头表示相对于稳定欧亚大陆的 GPS 速度场

为了更好地了解 WTBF 的断层活动和地震空区的破裂行为，该研究对 WTBF 和相邻断层的几何形状和运动特性进行了卫星图像解释和实地调查。研究人员使用无人机摄影测量法测量了 WTBF 沿线两个地点的偏移地貌，并挖掘了两条探槽以识别 WTBF 的古地震，并使用放射性碳测年法限制了这些古地震的年龄。接着，分析了金强河断层的几何形状和运动学特征，以及该断层与 WTBF 之间的联系。最后，探讨了 WTBF 的地震重现期和空区内的地震危险性。

1. WTBF 地震重现期

WTBF的古地震活动性研究表明,TC1和TC2两个探槽仅相距约1 km,它们揭示了相似的古地震事件。TC1自 4785 ± 970 年以来记录了4次地震,TC2则自 7621 ± 138 年以来记录了6次地震。通过比对,两个探槽中的部分事件被认定为同一次地震。根据高质量地震标志,共确认了7次主要地震事件。地震的发生时间分别为 7621 ± 138 、 6579 ± 566 、 5634 ± 548 、 4614 ± 652 、 3188 ± 356 、 2471 ± 270 和 1005 ± 584 年。

统计分析得出,WTBF的平均地震重现期为1102年,且具有0.38的变异系数,这显示出该断层具有千年级准周期性的地震重现特征。这一现象与邻近大规模断层的地震活动一致,这些断层的准周期复发行为表明,它们很可能是一个相对稳定状态的应变积累和释放过程。这进一步表明,该地区应力积累和释放是一个相对稳定的过程。

此外,WTBF的最后一次地震时间与1092年地震(发生在武威市周边)的历史记录相符,表明1092年地震可能与WTBF的最新地震相关。这一发现为青藏高原东北部的地震危险评估提供了理论支持。

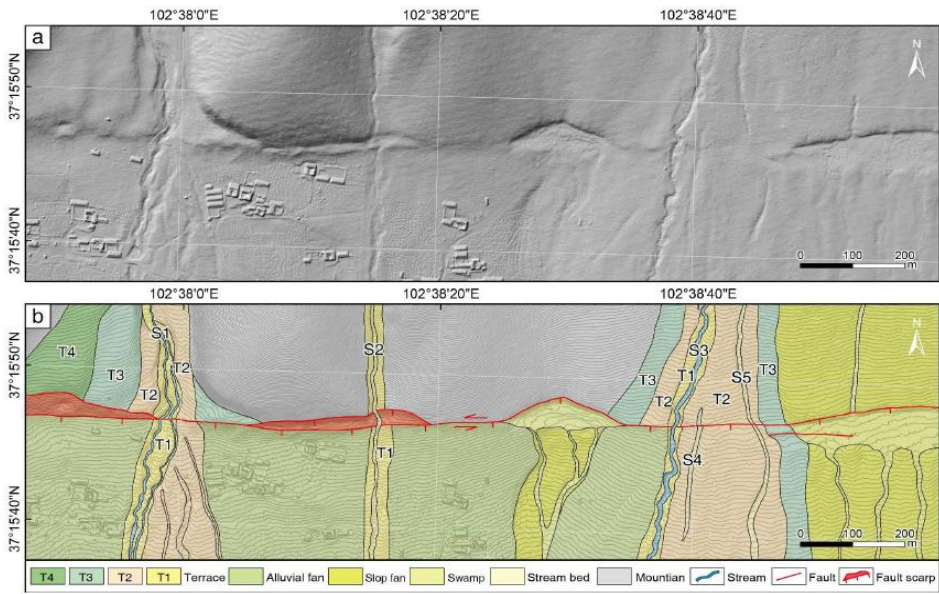


图2 金强河断层北山根遗址的偏移地貌。(a)北山根遗址的山体阴影图;(b)(a)中偏移地貌的解释图

2. 天祝地震空区的分段破裂

天祝地震空区主要由冷龙岭断层（LLLF）、金强河断层（JQHF）、毛毛山断层（MMSF）和老虎山断层（LHSF）构成，理论上这些断层可能会共同引发强震。然而，这些断层的几何形态、运动学特征和活动性存在差异，导致它们可能不会同步破裂。

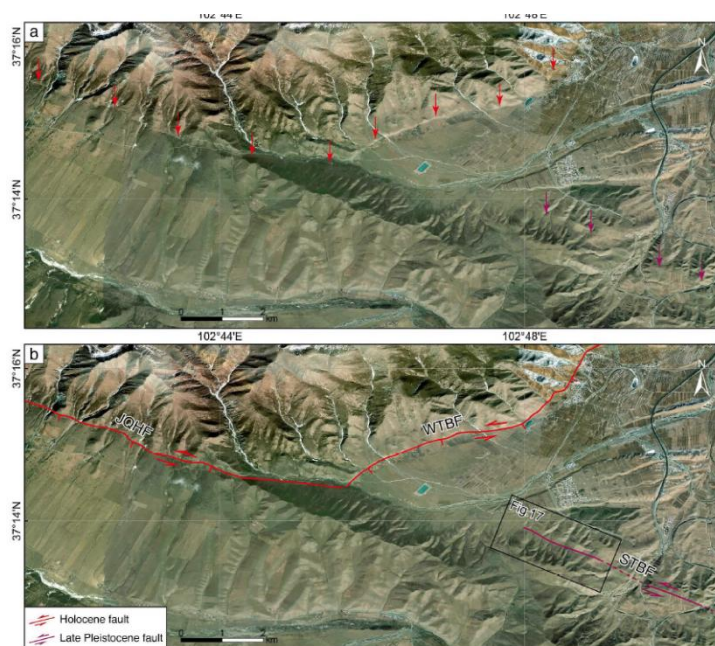


图3 天祝盆地西段与金强河断裂交汇区的断裂分布图。（a）分辨率为0.6 m的卫星图像；（b）图(a)中断裂的解释图

首先，LLLF与JQHF的构造关系较弱，LLLF向东延伸并与古浪断层相接，且与JQHF的活动没有明显的联系。因此，目前可获得的数据表明JQHF与LLLF可能没有明显的构造关系，两者一起破裂的可能性较小。

其次，JQHF在NWW向和W向段之间呈现阶梯式变化，显示正断和走滑特征，而WTBF与JQHF在几何形态和运动学上有相似之处，且两者可能组成了一个共同的断层带，即金强河-天祝张剪性断裂带（JTTFZ），更可能发生共同破裂。

最后，MMSF和LHSF呈连续线性分布，无明显的阶梯式构造，且活

动特征与 JTTFZ 有所不同。因此，MMSF 和 LHSF 可能不与 JTTFZ 发生共同破裂。

综上，天祝地震空区可以划分为三个构造区段：冷龙岭断裂带（LLLFZ）、金强河-天祝张剪性断裂带和毛毛山-老虎山断裂带（MMS-LHSFZ），这些区域可能以分段破裂的方式发生地震。

3. JTTFZ 和 MMS-LHSFZ 的高地震危险性

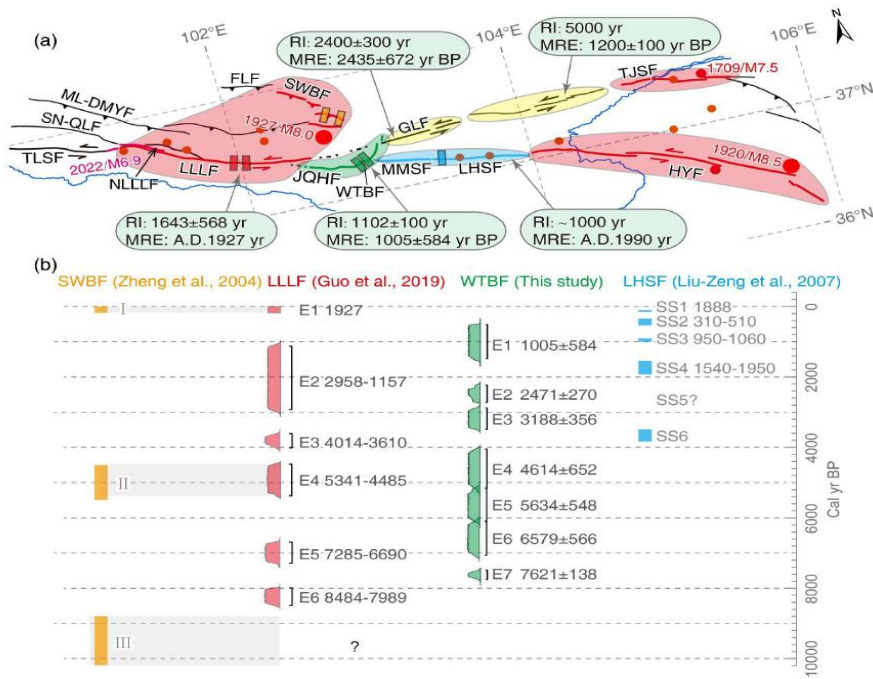


图 4 天祝盆地西缘断裂带及邻近断裂带古地震事件的时空分布。（a）主要断裂带、主要地震及探槽位置；（b）天祝地震空区主要断裂带古地震事件的时间分布

WTBF 显示准周期性的地震重现，重现期为 1102 ± 100 年，最近一次地震发生在 1005 ± 584 年，可能与 1092 年的历史地震对应。由于距离上次地震时间已经较长，且 JTTFZ 具有较强的发震潜力，预计该区域未来发生大震的可能性较高。根据经验关系，JTTFZ 可能产生约 7.2 级的地震。

MMSF 和 LHSF 在几何结构上较为连续，若两者同时发生破裂，可能产生 7.4 级的地震。LHSF 的倒数第三次地震发生在 950~1060 年，其时间接近地震重现间隔，表明 MMS-LHSFZ 也具有较高的地震危险性。

尽管 LHSF 和 WTBF 的部分地震事件时间相近，但并非完全重合，表明它们的地震不完全相同。虽然不同滑动方式的断层可能同时破裂，也不排除产生 7.6 级的大地震及 160 km 的破裂带的情况，但 JTTFZ 和 MMS-LHSFZ 共同破裂的可能性较小。

4. 小结

WTBF 南端与 JQHF 东端相连，两个断层都表现出相似的“之字形”几何形状和斜向正断运动特征。此外，JQHF 在与 WTBF 相连后并未继续向东延伸。因此，这两条断层被视为一条约 55 km 长的断裂带，即 JTTFZ。在 JQHF 以东，天祝盆地南缘断裂表现出平缓的错断地貌，可能是一条晚更新世断层。

由于几何形状的不连续性、运动学和构造活动性的差异，天祝地震空区可分为三段，包括 LLLFZ、JTTFZ 和 MMS-LHSFZ，其破裂方式具有分段性。其中，JTTFZ 能够产生 7.2 级地震。鉴于最近一次事件发生的时间较长，以及强烈的发震潜力，JTTFZ 具有较高的地震危险性。研究结果加强了对地震空区高地震危险性的认识，并为青藏高原东北部的地震破裂行为提供了新的见解。

来源：Guo P, Han Z, Gai H, *et al.* A transtensional fault zone on the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Millennial earthquake recurrence and high earthquake hazard. *Tectonics*, 2024, 43(10): e2024TC008545.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所