地震科技前沿快报

2024 年第 1 期（月刊总第 60 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、应用深度学习实现灵活且可扩展的地震预报

在过去几年中，地震目录的多样性和规模呈爆炸式增长。然而，当前的可操作地震预报未能充分利用丰富的地震数据集。因此，研究人员介绍了一种基于神经时间点过程最新发展的深度学习模型—复发地震预报（RECAST），该模型能够利用更多数量和多样性的地震观测数据，克服了传统方法的理论限制和计算限制。预报人员可以通过深度学习的灵活性和可扩展性来生成增强型目录。

2、在城市地区基于通信光缆的 DAS 可记录暴风雨引起的地震噪声

极端天气事件威胁着人口稠密地区的生命和财产安全，因此，及时和精确的天气监测和风险评估至关重要。但由于城市气象站数量有限，这项工作受到了一定阻碍。分布式声传感（DAS）技术可以将现有的通信光缆变成密集的地震传感器阵列。来自美国的科学家应用分布式声传感（DAS）技术研究了暴风雨引起的地震噪声，并详细描述了风致和雨致噪声的地震特征，分析了风致噪声的机理，并确定了潜在的噪声源，量化了 DAS 记录的噪声振幅和风强度之间的关系。研究结果表明了使用配备 DAS 的通信光缆感知城市地区的暴风雨及其与城市基础设施相互作用的可能性。

3、青藏高原地震诱发滑坡研究进展

青藏高原（TP）作为地球上最明显的地震滑坡易发区之一，目前仍缺乏全面的概括性调查来揭示青藏高原上地震滑坡的典型特征。研究人员挑选青藏高原近年发生的10次地震滑坡，总结了在空间模式和控制因素、滑坡模式和成因、易发性和长期演变等方面的研究进展。结果表明：青藏高原地震滑坡的分布与发震断层、地形及岩石性质密切相关；地震滑坡规模随着震级的增加呈指数函数增长；地震滑坡的模式可分为坠落、滑动、雪崩和变形四种；地震滑坡的成因主要为地震震动及地震放大效应。

应用深度学习实现灵活且可扩展的地震预报

地震学正在见证地震目录的多样性和规模的爆炸性增长。该领域发展的一个关键动力是：更多的数据应该转化为更好的地震预报，但是这种改进还有待观察。先前的工作严重依赖于统计模型，这些模型无法扩展，不能充分利用当前可用的大型地震数据集。在这里，研究人员介绍了复发地震预报（RECAST），这是一种基于神经时间点过程最新发展的深度学习模型。该模型能够利用更多数量和多样性的地震观测数据，克服了传统方法的理论限制和计算限制。研究人员以时间流行型余震序列（ETAS）模型为基准开展测试，对合成数据的测试表明，使用中等大小的数据集，RECAST 可以直接根据编目数据准确地模拟类似地震的点过程。对南加州地震目录的测试表明，当训练集足够长（$>10^4$ 个地震事件）时，与基准相比，拟合和预报准确性有所提高。随着训练数据集的扩大，这种改进愈发明显，使地震目录中的信息比用于地震预报的信息还要多。而 RECAST 中的基本组件在不牺牲性能的情况下，增加了地震预报的灵活性和可扩展性。相关研究成果发表在 2023 年 9 月的 *Geophysical Research Letters*。

由于密集的地震网络和日益自动化的数据处理技术，地震目录的多样性和规模在过去几年呈爆炸式增长。该方面的发展动力是：更详细的观测应该转化为更好的地震预报，然而，当前的可操作地震预报建立在为稀疏地震记录设计的开创性工作（以地震学的经典统计定律为基础）之上。虽然过去几十年在这些模型的区域化、目录偏差校正和空间预报方面取得了进展，但这未能充分利用丰富的地球物理数据。

目前的一种解决方法是使用机器学习中神经时间点过程的最新进展来补充现有的预报能力。此类方法有望实现通用、灵活且可扩展的预报。术语“灵活”（flexible）表示模型既可以包含额外的地震信息，又可以学

习数据中的复杂依赖性，而无需假设特定的函数形式。术语“可扩展”（scalable）是指模型可以有效地在大型数据集上进行训练，并通过附加数据进行改进。尽管有这些理想的特征，但目前尚不清楚深度学习是否非常适合地震数据。因为地震记录高度随机且受到极端事件的强烈影响，所以机器学习预报缺乏重大进展。

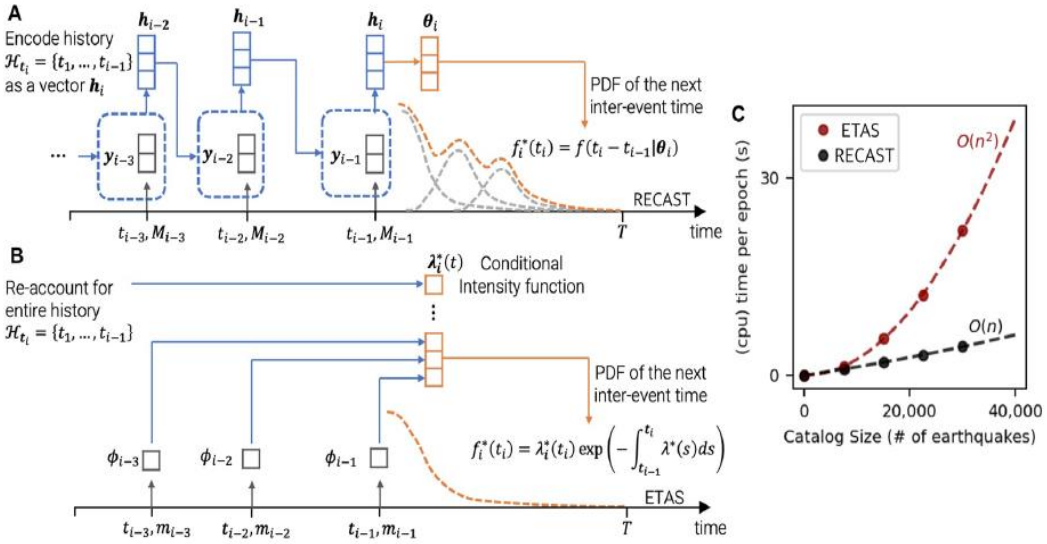

图 1　结构相似、概念不同的地震预报模型

这项研究的目标是实现一个满足灵活性和可扩展性基本要求的地震预报模型。因此，研究人员介绍了一种深度学习模型：复发地震预报（RECAST）。首先，描述了该模型和性能测试基准——时间 ETAS 模型。然后，以合成地震目录和观测地震目录为基础，展示了相关实验的结果，比较了模型的性能。最后，总结了建模方法的优点和局限性。

研究显示，RECAST 模型的优点和局限性，其中有些是深度学习固有的，而另一些则源于模型架构的选择。

（1）RECAST 与 ETAS 有着根本的不同。RECAST 不需要关联目录数据和下一个事件可能时间的确切函数形式，对合成目录的测试很好地说明了这一点。在训练之前，RECAST 仅假设事件间的时间严格为正。

RECAST 架构可以在中等大小的数据集上进行训练，以了解输入（时间和震级）与输出（事件可能性）之间的关系。这种整合新数据和关系的灵活性是一个关键优势。相反，ETAS 是一个参数模型，需要已知的函数关系。ETAS 的优点是需要更少的参数，缺点是预报受到模型假设的限制，而模型的假设常常由于系统的物理变化或目录数据准备过程中的人为因素而被破坏。对于真实地震目录，RECAST 可能有超越 ETAS 的潜力。

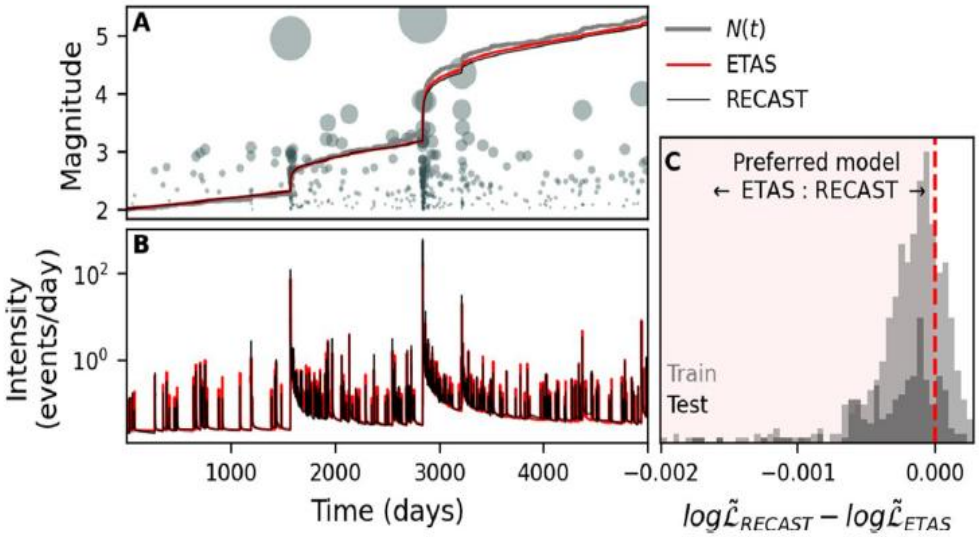

图 2　RECAST 在合成地震目录中的性能

（2）RECAST 模型需要足够大的地震目录来进行训练。对于小数据集，时间 ETAS 模型优于 RECAST。在实验中，RECAST 需要更大的目录（10^4 个事件）才能超越基准（即 ETAS）。与 ETAS 非常相似，如果训练集与评估模型的时间段不同，研究人员预计性能会很差。研究所进行的其他测试表明，对于如此密集的地震目录，结果是稳健的。有趣的是，RECAST 和 ETAS 之间的相对性能差距随着目录大小的增加而增大，这表明持续的改进可能会随着可用数据的增加而扩大。与 ETAS 不同，RECAST 的模型架构确保当前的可用数据量不会对这种趋势造成计算限制。从历史上看，

一种方法几乎没有理由使用超过几千个事件的信息。然而，现在目录提供了更多内容，并需要新的技术。

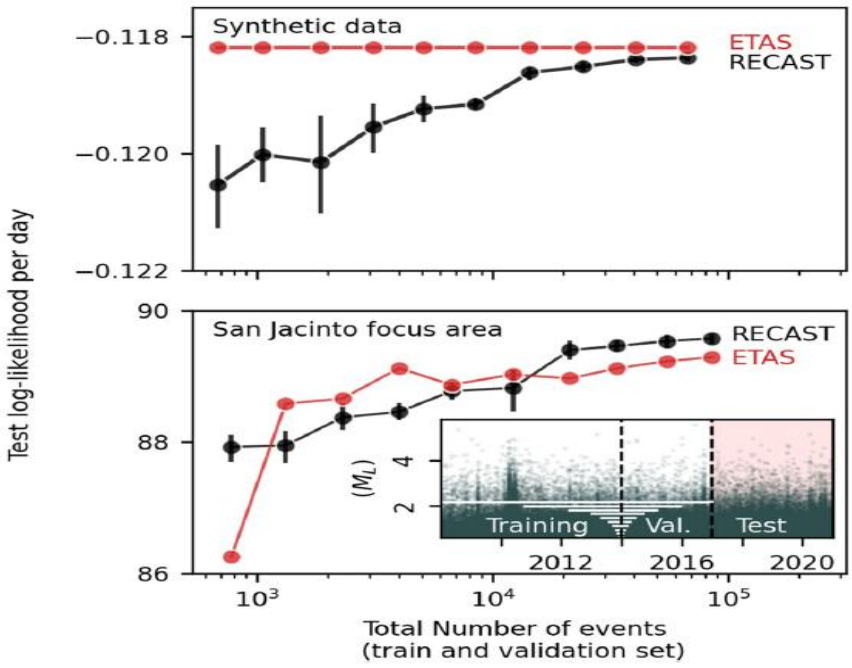

图 3　合成地震目录和现代地震目录的性能

（3）很难确定得到改进的确切原因。然而，可以强调一些判断。首先，较小的次区域取得了更显著的改善。其次，时间 ETAS 模型似乎不适合事件序列，并且不能解释地震活动的长期趋势。对于 San Jacinto 数据集，ETAS 在高地震活动期间预测不足，在低地震活动期间预测过高。就南加州地震目录（SCEDC）而言，ETAS 的预报反映了训练集较高的基础地震活动率，因此存在偏差，始终高估测试区的基础地震活动率。尽管 RECAST 在所有情况下都使用相同的训练周期，但模型的记忆允许 RECAST 考虑验证集和测试集中的时间变化趋势，因此可以更好地跟踪不断变化的地震活动率。改变 ETAS 训练程序，以在每次预报之前直接在固定窗口上重新训练，可能会解决该模型的限制。

（4）RECAST 的性能改进可能源于其揭示了控制系统可预测性的物理过程。另一种解释是，深度学习模型（如 RECAST）共同解决了与标准参数模型（如 ETAS）相关的破裂模式。当前的实践有许多地方需要改进，引入和权衡涉及非平稳性、各向异性、目录不完整性、震级误差、仪器覆盖范围变化等方面数据的新假设是具有挑战性的。这些因素的一部分可能会缩小 ETAS 和 RECAST 之间的性能差距。在实验中，最重要的是通过 ETAS 非平稳运行或重新校准的滑动窗口来分析地震活动的长期趋势。这种优先级在事后是明确的，但在进一步的实验中可能无法稳定地保持。目前，没有任何模型能够解决 ETAS 模型同时面临的一系列限制。深度学习作为一种解决方法的优势可能在于，模型建立在维护良好且快速发展的库之上，并提供了一条不太依赖理想化数据的前进道路。

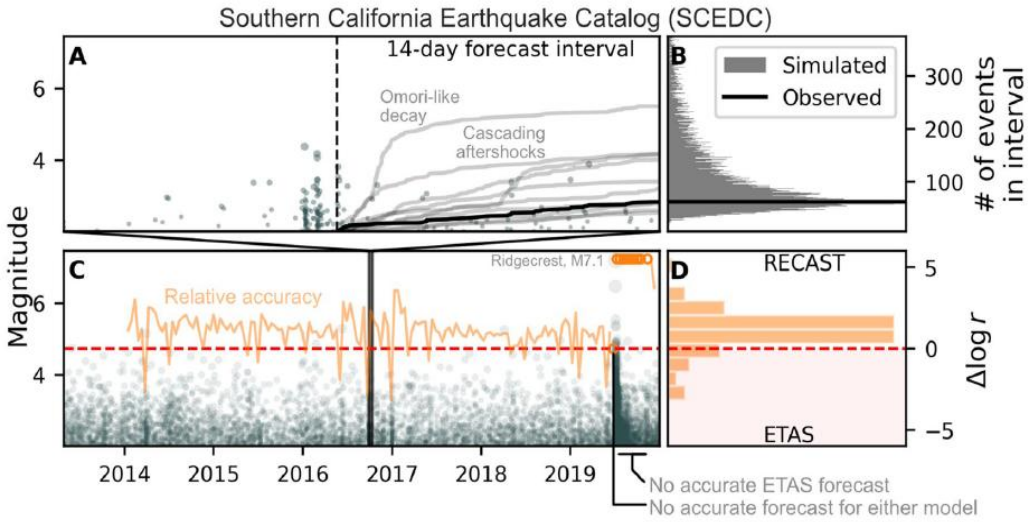

图 4　使用 RECAST 和 ETAS 模型对南加州地震目录进行预报评估

（5）小结。总体而言，密集地震目录打开了了解地震周期的更丰富的窗口。然而，将更精细的细节和增加的数据量转化为更好的预报一直是一个挑战。RECAST 等深度学习方法有足够的通用性，使其可以学习到众所周知的统计模式。对合成数据集的实验表明，其性能至少与提供适量事

件的时间ETAS模型一样强大，并且RECAST还可以捕获现实目录中ETAS模型未明确参数化的过程。

这项研究是神经时间点过程模型在地震预报中应用的概念验证。更通俗一些说，神经时间点过程模型和深度学习提供了重要的优势。它们不需要了解地震特征与预报概率之间的关系。随着地震数据集越来越大，它们的设计使其能够直接从数据中发现更加复杂的关系。性能的提高是由于更准确地捕获了目录的观测限制，还是反映了控制长期地震活动演化的物理过程，还有待研究。无论哪种情况，预报人员都可以通过深度学习的灵活性和可扩展性来生成增强型目录。

来源： Dascher-Cousineau K, Shchur O, Brodsky E E, *et al*. Using deep learning for flexible and scalable earthquake forecasting. Geophysical Research Letters, 2023, 50(17): e2023GL103909.

在城市地区基于通信光缆的 DAS 可记录暴风雨引起的地震噪声

极端天气事件威胁着人口稠密地区的生命和财产安全，因此，及时和精确的天气监测和风险评估至关重要。但由于城市气象站数量有限，这项工作受到了一定阻碍。来自美国的科学家应用分布式声传感（DAS）技术研究了暴风雨引起的地震噪声。结果表明，DAS 记录的低频风致噪声（0.5~8 Hz）可能是由风中的灯杆摆动引起的。此外，DAS 能量与风速之间存在很强的线性相关性。对两次降雨事件（一次中雨，一次大雨）的详细观察表明，雨水引起的噪声不是由直接落到地面的雨滴产生的。相反，低频噪声（2~8 Hz）可能是雨水排水系统中水流产生的噪声。高达 125 Hz 的强高频噪声可能与暴雨期间雨水从地表快速进入排水系统有关。降雨导致的 DAS 能量与降水率之间存在线性关系，其斜率与雨水的体积有关。该项研究结果表明了使用配备 DAS 的通信光缆感知城市地区的暴风雨及其与城市基础设施相互作用的可能性。相关研究成果发表在 2023 年 12 月的 *Geophysical Journal International*。

由于气候变化，包括雷暴、龙卷风和热带气旋在内的恶劣天气发生的频率和强度正在增加。最近的研究结果表明，地震传感器已经成为捕获天气引起的地面运动和监测与天气事件（特别是风和雨）相关的自然过程的有效工具。但是，迄今为止，人们对地震方法在城市暴风雨监测中的适用性关注甚少。可能的原因是，城市环境的复杂性给在有限的地点和时间内部署地震阵列带来了困难。而分布式声传感（DAS）技术可以将现有的通信光缆变成密集的地震传感器阵列，且维护成本较低。

为了探讨城市地区管道中配备 DAS 的通信光缆对风雨引起的噪声的敏感性，研究人员分析了由宾夕法尼亚州立大学的环境传感光纤（FORESEE）阵列记录的 4 个月的 DAS 数据。研究人员重点关注了对风

缘的断裂岩石导致斜坡的稳定性较低，而陡峭的峡谷会通过场地放大效应引起更强的地震震动，特别是其顶部部分。因此，地震震动加上场地放大效应使得这些断裂的斜坡不稳定，形成了地震滑坡易发区域。

图 4　全球 PGA 值与相应地震滑坡的关系

构造和地貌在青藏高原的地震滑坡分布中发挥着重要作用，逆冲地震和走滑地震所引发滑坡的分布分别遵循上盘效应和活动盘效应。然而，世界上其他地方引发地震滑坡的地震事件大多位于沿海或海岸附近，这些地震事件发生在不同的发震背景和地质气候环境中。因此，并非其他地方的所有地震滑坡都遵循与青藏高原相似的分布规律。

滑坡模式并不完全相同。青藏高原上的滑坡主要分为碎屑滑坡、岩石滑坡和冰川滑坡。在这三种类型中，碎屑滑坡和岩石滑坡在世界其他地方

也很常见。除高纬度地区外，青藏高原以外的冰川地震滑坡很少发生。另一个重要的差异表现在地震液化滑坡上，这种滑坡模式在青藏高原上很少发生，但却经常发生沿海地震中，如 2018 年印度尼西亚帕卢地震、2018 年日本北海道地震。

青藏高原上的地震滑坡需要较长的恢复周期。例如，受 2008 年汶川地震影响的滑坡地区需要 25 年多的时间才能恢复，受 2005 年克什米尔地震影响的滑坡地区需要超过 13 年的时间才能恢复。相比之下，全球其他地区沿海地震的地震滑坡需要的恢复时间稍短。

来源：Zhao B, Su L, Xu Q, *et al*. A review of recent earthquake-induced landslides on the Tibetan Plateau. Earth-Science Reviews, 2023, 244: 104534.