

# 地震科技前沿快报

2023 年第 1 期（月刊总第 48 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、深度学习地震学

美国科学院院士、南加州地震中心副主任、斯坦福大学 Beroza 教授日前在 **Science** 发表综述论文，基于他在地震检测、地震能量释放和分配过程等方面的具国际影响力的成果，并结合 1988-2022 年间 637 篇深度学习方面的论文，系统概述了深度学习方法在地震学中的应用趋势、挑战和机遇。

文章提出深度学习仍处于起步阶段。在基于物理且可解释的深度学习上投入更多精力将有助于该领域的成熟。相关研究正在迅速从概念验证转向实际应用，对不确定性的估计以及建立标准的基准测试和评估方案将变得至关重要。深度学习方法会通过优化结果、提供价值和激发灵感来为地震学做出实质性贡献，尽管存在可解释性和脆弱性问题，深度学习将很快成为多地震数据分析的规范。深度学习不会取代专业的地震分析人员，但在许多类型的问题上，使用深度学习的专家将胜过不使用它的专家。

## 2、喜马拉雅一场致命灾难中的潜在地震前兆和地表动力学：一种早期预警方法

在全球变暖背景下，青藏高原冰川在近几十年的融化和地形陡峭的不稳定斜坡导致很容易发生冰川、冰湖崩塌和滑坡灾害，以及链生的洪水等灾害。但对其进行监测极具挑战，且成本高昂，冰川大规模运动活动、湖泊变化等首先可通过卫星遥感图像识别，地震台网的高灵敏度地震仪可以在不同的频-时域记录这些运动，在精细研究中具有重要优势。

2021年2月7日，印度北阿坎德邦查莫利地区发生了冰-岩碎屑流，造成200多人死亡和巨大的经济损失。针对该实例，基于地震观测数据的研究发现，使用现有观测网络的实时地震监测和在现有潜在危险区域的部署具有预警参数的密集地震网络，对开展减灾工作极具潜力。

## 3、2021年法格拉达尔火山喷发前的变形和地震活动性下降

变形速率和地震活动率的增加是火山喷发的公认前兆，对它们的解释构成了全球火山喷发预警的基础。在许多火山喷发之前，地面位移速率和地震次数会增加。冰岛大学弗雷斯泰恩·西格蒙德森(Freysteinn Sigmundsson)教授针对2021年3月19日冰岛法格拉达尔火山(Fagradalsfjall)的喷发研究发现，在喷发开始前几天经历了一段构造应力释放期——以变形和地震活动下降结束；因此在预测火山喷发时，还需要充分考虑火山与构造应力、地壳分层之间的相互作用。

## 深度学习地震学

从地震和其他来源获取的地震波可以被用来推断地球内部的结构和特性。大规模地震数据集的可用性和深度学习技术对地震数据处理的适用性已将深度学习推向了地震学的基础和长期调查研究的前沿。然而，地震学中深度学习应用的某些方面可能会对地球科学以及其他更广泛研究领域产生指导作用。深度学习是一种强大的方法，但在其应用中存在细微差别。本研究系统地概述了深度学习方法在地震学中的应用趋势、挑战和机遇。相关成果发表在 2022 年 8 月的 *Science*。

地震学通过对地震波的研究以了解它们的起源（特别是断层滑动），从而推断地球内部的结构和特性。通常情况下，数千个传感器阵列会以每秒 100 个点的典型采样频率连续记录三个分量的地震地面运动。尽管地震学是一门数据丰富的科学，但它也是一门数据驱动的科学，能够定期发现新现象。作为一门数据标签丰富（data label-rich）的科学，地震学逐渐成为深度学习的沃土。深度学习几乎进入了地震学的每个子领域，并且表现出色，例如地震目录的开发，其可以比传统目录中的地震数量多一个数量级。深度学习在其他重要的地震学任务中也表现出优于经典方法的能力，包括从爆炸和其他来源中区分地震、从背景噪声中分离地震信号、地震图像处理 and 解释以及地球模型反演。

深度学习使用深度神经网络（DNN）来学习复杂关系，发现多尺度结构和模式，并通过使用堆叠的神经元层和多个非线性变换获得数据的高级表示，以解决不适定反问题（ill-posed inverse problem）。DNN 变体的能力——例如，卷积神经网络（CNN）可从数据中提取多尺度特征，循环神经网络（RNN）可模拟序列数据中的时间关系——使其成为地震学的强大

工具。地震学中的深度学习可以处理具有前所未有的时空覆盖度的大量多保真地震观测数据，并带来新的见解和发现。

本研究通过对有关当前技术水平的 637 篇期刊论文（1988 年 1 月至 2022 年 1 月期间发表）的元分析，对地震学中的深度学习进行了系统概述。主要包括：数据处理自动化、正演问题（**forward problem**）、反演问题（**inverse problem**）、探索性数据分析以及对超越传统地震学的讨论。最后，研究者对未来趋势进行了一些推测，并提出了旨在推动进步的提议。

## 1. 数据处理自动化

在被动和主动源地震学中，通常存在一系列需要执行的数据处理和分析步骤。在许多情况下，熟练分析师的手动处理仍然是最可靠的选择。地震数据量的加速扩张带来了新的挑战，并带来了通过深度学习等数据驱动方法开发新一代强大处理工具的需求。

(1) 地震监测。DNN 的分类能力使其非常适合处理诸如地震识别、检测、相位拾取、第一极性（**first-polarity**）确定和相位关联等共同构成的地震监测任务。在地震识别（如区分人为爆炸和自然地震）中，需要半监督、无监督以及迁移学习的辅助来弥补大规模标记数据集的稀缺。在地震检测和相位拾取中，深度学习检测器和相位选择器被认为是地震信号的通用模板，其由神经网络不同层上的一组不同大小的内核以及它们之间的连接权重表示。实践表明，深度学习模型整体优于经典的基于特征函数的模型，且计算成本更低。在拾取 P 波尾部出现的 S 波这一具有挑战性的任务中，基于人工智能（AI）的拾取器的能力最为明显。

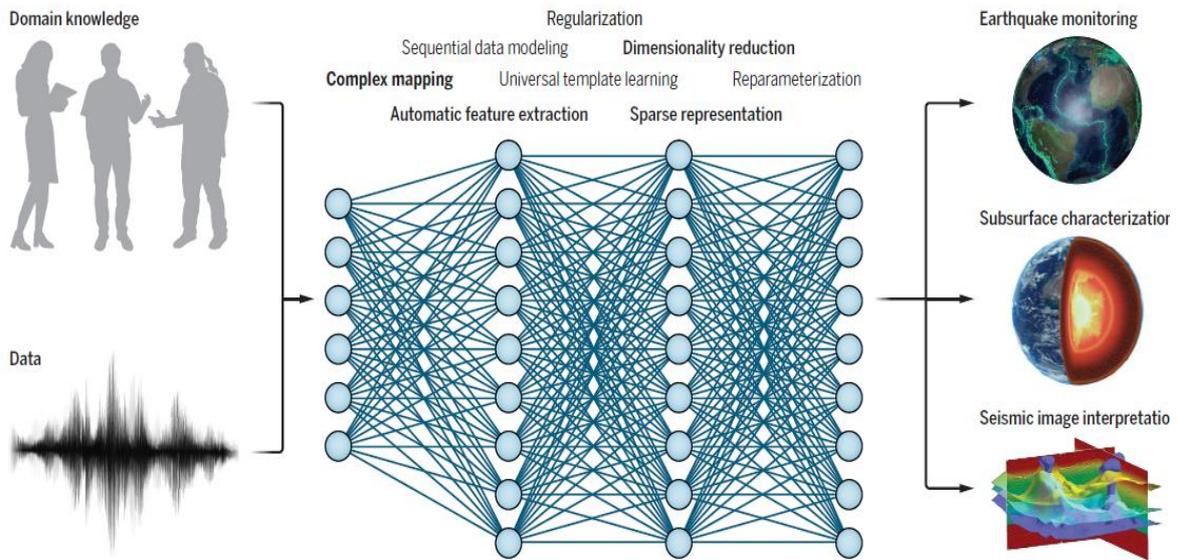


图1 地震数据的深度学习处理和领域知识的结合（可为地震学带来新的能力和见解）

(2) 地震图像处理。由地震传感器阵列记录的反射和折射地震波被用于对地下地质和结构进行成像。深度学习可用于提高地震图像的质量，并通过消除数据采集伪影和波传播效应，将其转换为可解释的地下图像。深度学习模型在以低成本抑制各种类型和水平的地震噪声方面十分有效，其中一个主要的挑战是从现场记录中获得无噪声信号和无信号噪声。应对的有效方法是创建半合成数据，将干净的合成信号与从现场数据中手动挑选的噪声相结合。另一种常见方法是，通过使用自动编码器或生成对抗网络（GAN）执行无监督除噪。地震图像的获取和处理主要包括识别具有位置误差的镜头（shots）和接收器、用于重建采集期间丢失的轨迹的插值等。研究表明，在以前所未有的计算效率执行复杂处理任务方面，DNN 具有令人印象深刻的能力。

(3) 地震图像解释。解释旨在从分辨率有限且受噪声污染的地震图像中提取有关地下地质或结构的有用信息。CNN 的特征学习和降维能力非常适合根据地质特性对地震响应进行聚类。除了地质解释之外，深度学习

在图像分割和目标检测方面的强大功能使其成为结构解释的热门选项。尽管缺乏大型、完整和精确标记的训练数据集，但这些方法在地震图像解释方面的表现卓越，主要归因于数据增强的广泛使用和复杂合成数据的生成。

## 2. 正演问题

DNN 的预测能力使其成为地震学中正演建模问题的流行工具，特别是以下三个方面：

(1) 地震波模拟。使用物理信息神经网络 (PINN) 和 GAN 是当前模拟地震波的两个趋势。在 PINN 中，通过定义神经网络训练中使用的损失函数的边界条件和波动方程，可训练 DNN 来学习介质波动方程的解。GAN 模拟器利用 DNN 的通用函数逼近能力，通过优化生成器网络来学习训练数据属性的概率分布。

(2) 地震动属性建模。基于现场或合成数据提供的一组固定输入参数，神经网络已被用于构建非参数地面运动模型 (GMM)。与传统的有限差分法（特别是对于复杂结构）相比，基于深度学习的 Eikonal 求解器的空间和时间复杂度要低得多，因为它们无需传播时间查询表 (travel-time lookup table)，并且极大地受益于深度学习。

(3) 地震预测。深度学习方法在这方面的应用更直接地结合了地震目录的完整时空结构。通过利用一些 DNN 的自动特征提取能力及其学习动态数据的潜力，可重新审视旧问题。深度学习地震预测模型是否为地震可预测性提供了新的见解，以及它们是否比传统的经验方法表现更好，还有待确定。就目前而言，它们通过将不同的潜在前兆数据和已知的地震物理学成果与地震活动数据和仍然未知的基础物理特征相结合，为地震预测提供了新的机会。

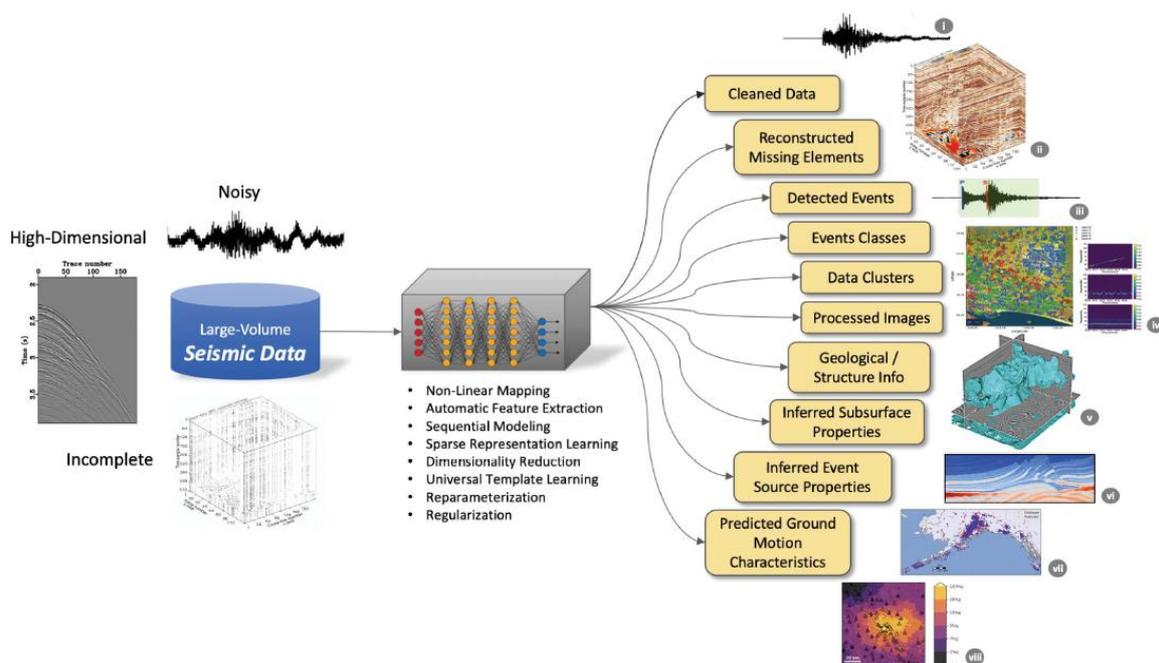


图 2 用于处理地震数据的 DNN 的特性

### 3. 反演问题

解决通常非线性和不适定的反问题是地震学中深度学习应用的另一个重要方面。从观测到的地震数据中估计物理参数的深度学习分为两大类：

(1) 地下特征。DNN 的各种特性已被证明可有效解决地震学中的反问题。它们学习高度非线性关系的能力依赖于完全数据驱动的端到端方法，这种能力可用于推断各种地下属性。DNN 的表示学习和降维能力是地震反演的宝贵属性。研究证明，在为大规模地震反演问题提供快速可靠的解决方案方面，深度学习技术表现卓越。此外，深度学习模型的训练和推理处理时间比经典地震反演方法少一个数量级。

(2) 震源参数化。深度学习在提供近乎实时的震源参数方面具有巨大潜力，其对于震源属性的端到端学习是有效的。通过表征单站数据的源参数，其还可用于超越传统的多站方法。

### 4. 探索性数据分析

深度学习也可以在地震学中用于探索性分析，以发现地震数据的新模式。在从连续地震数据获得新见解方面，无监督深度学习具有巨大潜力，新 DNN 的智能特征提取和降维机制使其非常适合高维地震数据(如 DAS)的探索性分析。

## 5. 超越传统地震学

除了常规应用，深度学习还被用于区分不同类别的目标(如人与车辆)和不同类型的车辆(如轻型车辆与重型车辆)，或区分不同的野生动物物种及其行为。同时，深度学习地震学的进步有可能以多种方式促进引力波测量。根据历史地震数据，深度学习已可用于预测地震期间引力波探测器的地面运动水平和状态。与地震信号检测和识别类似，深度学习已被证明是有效检测和分类来自不同宇宙源的引力波信号的有效替代方法。

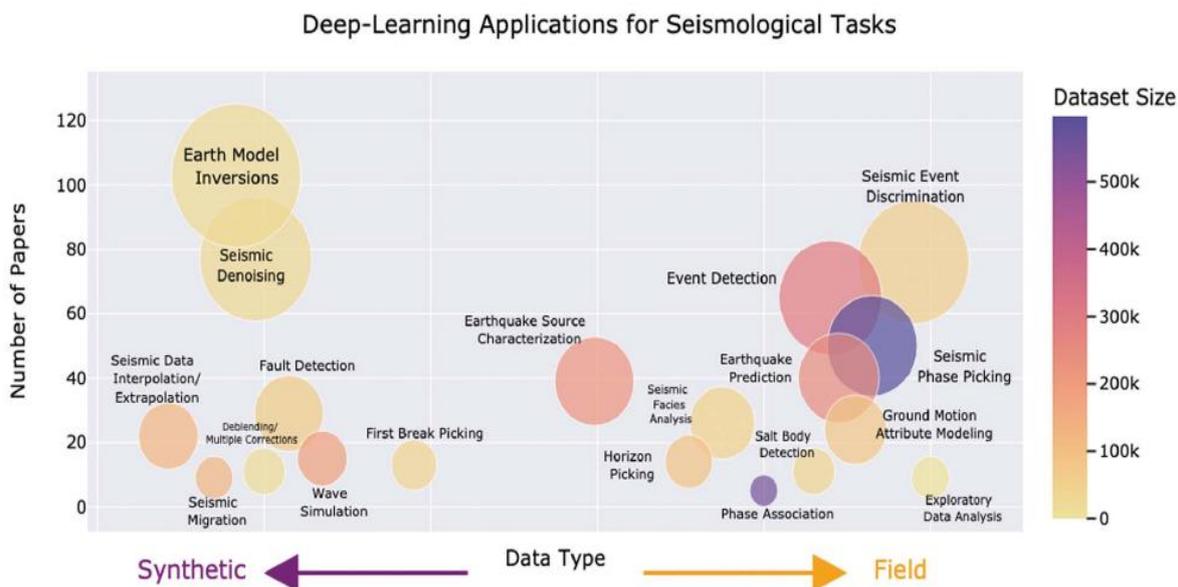


图 3 深度学习在地震学任务中的应用

## 6. 讨论

(1) 元分析。迄今为止，地震数据处理的自动化和反演问题的求解构成了地震学中深度学习应用的大部分内容。在大多数地震数据处理任务

中，与正确答案的价值相比，错误答案的成本较低。在地震图像处理、解释与地下表征等应用中，用于模型构建的大规模标记的现场数据的稀缺性更为明显。在地震学中使用的深度学习方法中，监督学习一直占主导地位。然而，越来越多的研究发现了无监督和半监督方法的重要应用。CNN 在许多领域成为主导地震模型，因为它们对地震数据的自动特征提取和稀疏表示学习非常有效。GAN 则是另一种流行的地震数据处理方法。在 RNN 中，长短期记忆 (LSTM) 单元是最流行的网络类型，地震数据的顺序性使得 RNN 对许多地震学任务具有吸引力。

(2) 可解释的深度学习。目前，地震学中的大多数深度学习方法都涉及基于已知的输入-输出对构建模型，以预测与以前看不见的输入相对应的输出，而没有可解释性。尽管可能无法阐明深度学习模型的工作原理，但可以通过使用反向传播技术、特征图 (saliency map) 或热图等解释工具，根据特征重要性和相关性分数揭示输入中的相关模式，从而获得有关学习模型的有用信息。

(3) 将地球物理融入 DNN。包含物理定律的深度学习方法在机器学习社区中发展迅猛，并且在地震学中得到了越来越多的应用，其主要思想是整合数据和数学物理 (领域知识) 模型。关键目标是为深度学习方法提供可解释性，在存在缺失或噪声数据的情况下对其进行规范化，并通过将解决方案的空间限制为物理上合理的解决方案，来增强其分布外泛化 (out-of-distribution generalization)。领域知识可以融入深度学习模型的训练数据、假设空间和训练过程中。其中，利用数值模拟，通过数据生成和增强将领域知识纳入训练数据是地震学中进行主动地震数据处理、地震波模拟和速度估计的最常用方法。结合多个物理约束开发混合方法、使用基于物理的 GAN 来增强数据生成的真实性等也是十分有意义的应用方向。

(4) 不确定性的量化。偶然和认知不确定性的量化对于评估所输出预测的可靠性至关重要。贝叶斯 DNN 可以通过提供神经网络的概率处理，在该领域发挥关键作用。高时间复杂度是贝叶斯 DNN 实际应用中的主要挑战，然而，贝叶斯 DNN 在自适应性方面的进步将改变这一点。除了不确定性量化之外，贝叶斯 DNN 方法还具有一些隐式正则化效应，尤其是在数据不足时可以抑制过度拟合。

(5) 训练数据限制。由于分辨率有限、噪声的存在、不同的专业水平、认知偏差和任务固有的模糊性等，人工标签的不确定性和非唯一性是地震学训练数据开发的主要限制因素。解决该问题的第一种方法是生成物理上逼真的合成数据，以反映各种复杂的地质环境。第二种方法是使用归纳迁移学习，第三种方法是在训练过程中添加约束，并通过结合基于物理的约束来降低监督方法中的自由度（可训练参数的数量）。

(6) 分布外泛化。为了在大多数地震学应用中评估所获得模型的质量，通常会对未用于训练的数据子集和/或来自其他数据集（或区域）的数据样本进行盲测。因此，需要一个代表现实世界全部多样性的盲测数据集，以稳健地评估模型的泛化能力。深度学习模型的泛化总是有限制的，因为每个模型都可能存在盲点，并且总是会出现分布外的情况。这使得很难对泛化性进行明确而稳健的测量。目前，尚不清楚使用物理引导的 DNN 或贝叶斯框架可以获得多少改进，未来需要更系统的研究来理解和表征深度学习模型的这一重要特性。

(7) 基准测试陷阱和有关趋势。并非所有的改进都会导致深度学习实际性能的提高，为了克服这一令人担忧的趋势并避免在其他领域观察到的“伪进步”现象，对标准的基准测试的鼓励和最终执行应成为经验性机器学习研究的必要基础。目前，基准测试的实施在深度学习地震学中是多

种多样的。鉴于基准测试对于衡量进展的不可或缺的作用，参与深度学习应用的社区需要开展更加统一、标准和严格的评估。另外，制定如何使用基准的指南也很重要。

整体而言，作为科学发现的通用工具，深度学习仍处于起步阶段。在基于物理且可解释的深度学习上投入更多精力将有助于该领域的成熟。相关研究正在迅速从概念验证转向实际应用，对不确定性的估计以及建立标准的基准测试和评估方案将变得至关重要。深度学习方法会通过优化结果、提供价值和激发灵感来为地震学做出实质性贡献，尽管存在可解释性和脆弱性问题，深度学习将很快成为多地震数据分析的规范。深度学习不会取代专业的地震分析人员，但在许多类型的问题上，使用深度学习的分析师将胜过不使用它的分析师。

来源：Mousavi S M, Beroza G C. Deep-learning seismology. *Science*, 2022, 377(6607), eabm4470.

## 喜马拉雅一场致命灾难中的潜在地震前兆和地表动力学： 一种早期预警方法

2021年2月7日，查莫利地区（印度北阿坎德邦）发生了致命的冰-岩碎屑流，造成200多人死亡和巨大的经济损失。研究发现，在动态成核阶段之前，主拆离的前兆信号中存在值得注意的序列。冰-岩碎屑流似乎是由地震前兆引发的，这些地震前兆在主拆离之前持续活跃了两个半小时。成核相位（位于拆离楔中心）由静态到动态的变化可通过检测到的小震的地震波振幅、频率特征和信噪比变化来分析。地震数据特征可用于区分来自其他震源的碎屑流和撞击障碍物，也可用于估计碎屑流速度。研究者用现场证据分析和验证了地震信号，并估计了动态碎屑流的相关影响和速度。近端的高质量地震数据能够帮助重建完整的时间序列，并评估从成核阶段开始所产生的影响。此外，研究者建议使用现有网络的实时地震监测和未来部署的集成密集网络来预测下游的碎屑流事件，并开展减灾工作。相关成果于2022年3月在线发表于 *Scientific Reports*。

喜马拉雅冰川在近几十年的融化和地形陡峭的不稳定斜坡导致很容易发生滑坡，从而引发喜马拉雅山脉湖泊的变化，以及随后的洪水事件。出于科学研究目的对喜马拉雅冰川进行监测，不仅具有挑战性，且成本高昂。如果无法进行其他监测，冰川大规模运动活动产生的未察觉破坏只能通过卫星图像识别，而地震台网的高灵敏度地震仪可以在不同的频-时域记录运动。2021年 Rishiganga-Dhauliganga 山谷发生的灾难性事件使得瓦迪亚喜马拉雅地质研究所（WIHG）更加专注于监测这些重要且未被察觉的活动。与主动动态变形相关的地震信号可以使用地震波形谱进行识别，以前的一些研究表明，冰-岩碎屑流和滑坡的地表动力学的地震特征对于了解

事件的发生及动力特征非常重要。这些变形会产生与地面有效耦合的地面运动，并被地震台站记录下来。

2021 年，一场致命的冰-岩碎屑流导致北阿坎德邦查莫利地区 Rishiganga-Dhauliganga 山谷附近的 Raunthi Gad 发生毁灭性洪水。2013 年 6 月，北阿坎德邦曾经历过另一场致命的洪水事件。自 2007 年以来，WIHG 是唯一一个在雪崩释放区（release zone）12~45 km 内拥有三个高灵敏度宽带地震台站的机构。这些台站可以探测到 Rishiganga-Dhauliganga 山谷中冰川和岩石的显著运动，对冰雪崩的理解做出了巨大的贡献。同时，地震台站记录了具有高信噪比的、高质量的地震数据，这将可以详细重建致命的雪崩动力学。

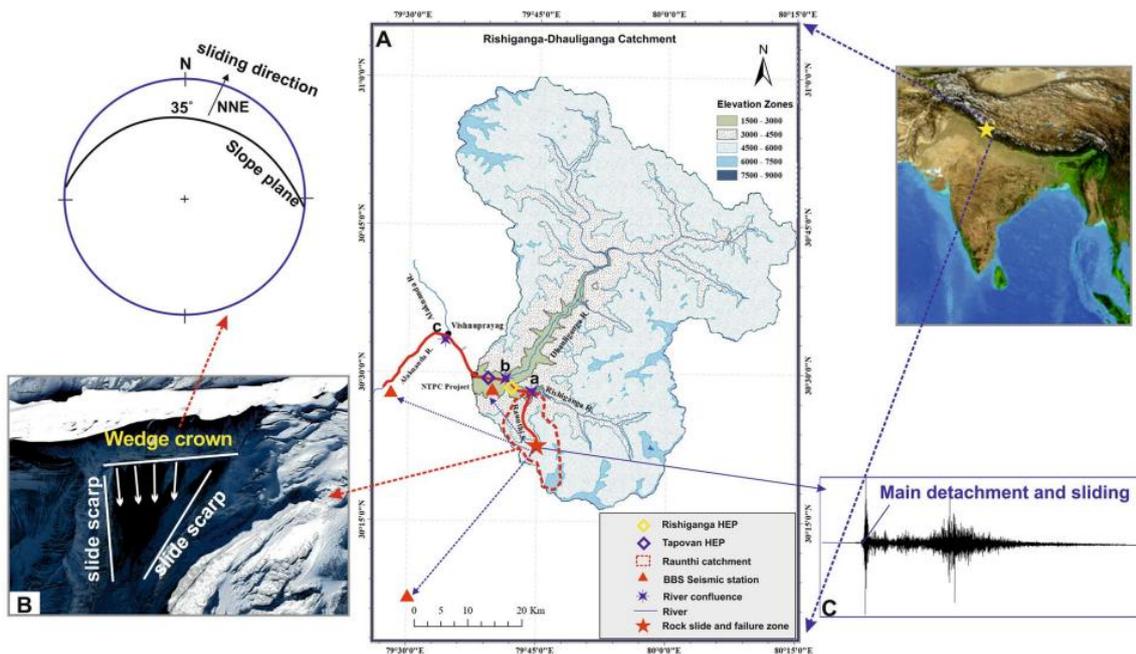


图 1 Rishiganga-Dhauliganga 流域

本研究通过展示 2021 年 2 月 7 日查莫利地区冰-岩碎屑流的地震和相关现场证据，根据卫星图像和信号谱分析，揭示出雪崩释放区特征。根据近距离地震观测站记录的 GPS 同步重大地表撞击的时间顺序，分析了频率

-时间-幅度域中的地震预兆 (pre-signature)，以及随后的自然动态事件 (如碎屑流) 的地面耦合影响，评估了弱区从静态到动态的成核过程及相关影响，并分析了流体动力学方面的影响。最后，从预警系统的视角阐述地震信息对开发预警系统的重要性。

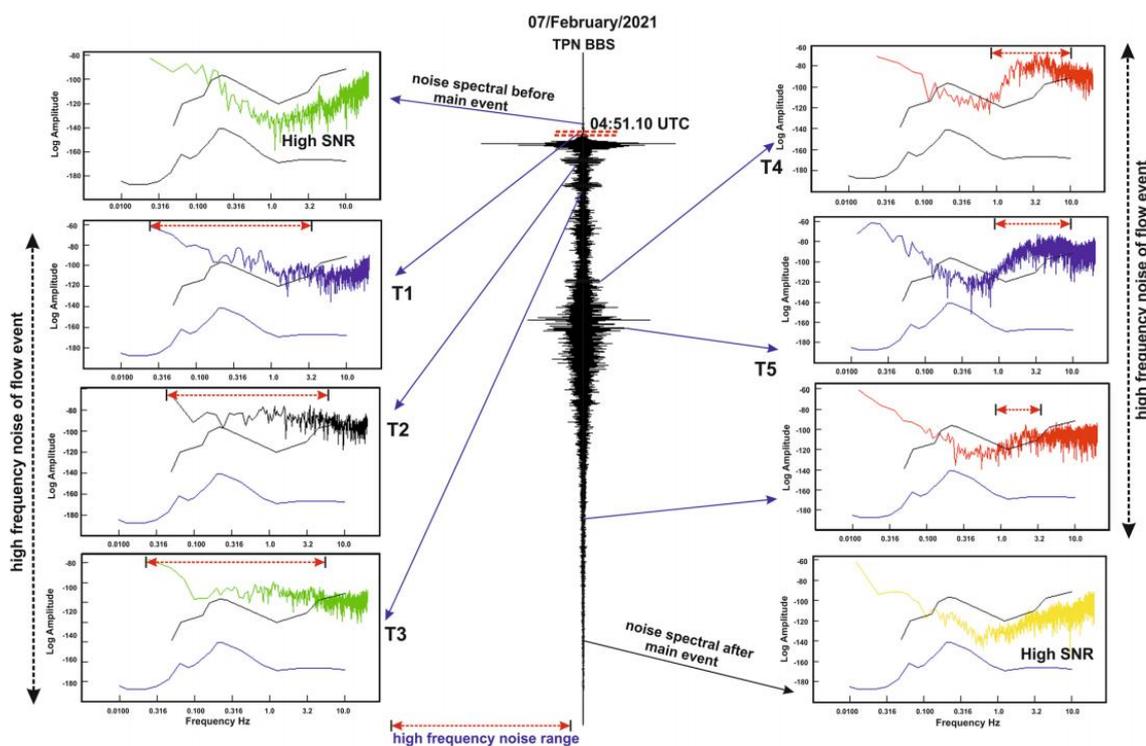


图2 主要事件 (指碎屑流) 之前、期间和之后的地震波形频谱及其噪声功率谱密度 (在主要事件开始和极端流动事件持续期间，最近台站 TPN 记录到明显的高频噪声)

为重建喜马拉雅西北部查莫利地区 Rishiganga-Dhauliganga 山谷的整个破坏情景，研究者分析了致命的冰-岩碎屑流 (2021 年 2 月 7 日) 的地震数据、地震前兆信号以及动态事件 (指碎屑流) 的时间进程/影响。地震台站距离震源异常近，记录了高信噪比的高质量数据。对记录的地震数据的详细分析发现，在雪崩大量释放前存在约两个半小时的连续高频信号。在地震波形谱中，震动振幅 (tremor amplitude) 和信号持时同时增加的预

兆意味着，在冰-岩碎屑流释放之前弱楔（weak wedge）附近随着裂缝和断裂的扩展而逐渐蠕变。

距离震源 12 km 的 TPN 台站（Tapovan）在世界标准时间的 04:51:10 首次记录到主拆离。具有不同频率、信噪比、振幅变化的连续蠕变表明了从静态到动态的相位变化，这引发了约  $27 \times 10^6 \text{ m}^3$  的弱楔形雪崩。人们逐渐意识到，2015 年后开始出现的大量裂缝导致楔形破坏顶部附近的弱区（源区）不断扩展。裂缝发展的渐进过程在 2021 年 2 月的主要活动之前就已开始，它只需要从稳定阶段发展到动态阶段就可突然发生破裂。

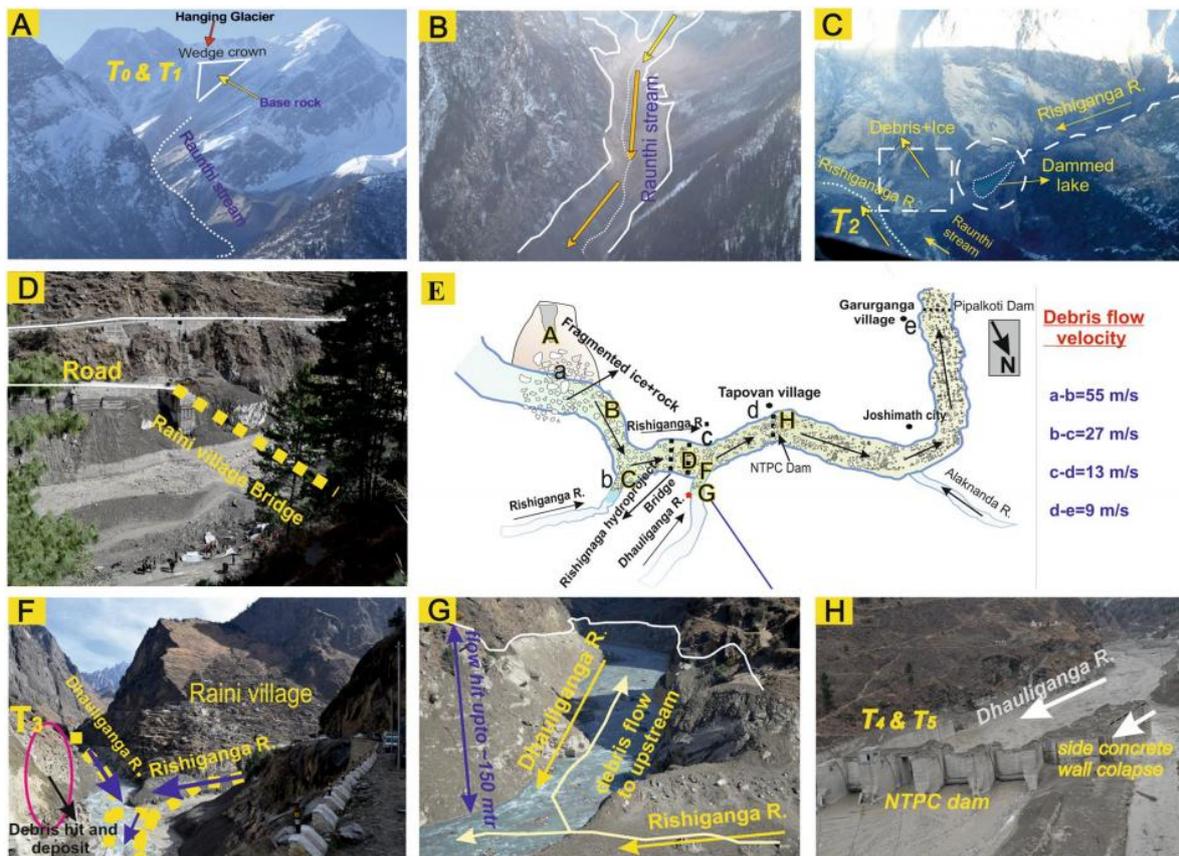


图 3 流体动力学以及相关影响的航拍照片（灾难发生后立即进行的航测）

基于所记录地震信号和近期破坏现场的时序重建分析了下游的能量影响。岩石和冰的混合物以极高的前沿流速（以约 55 m/s 的速度开始）从源头（平均坡度  $35^\circ$ ）流向因巨大冲击而倒塌的现代结构。不同速度的计

算在时间上基于地震震级突变发生的时间，在距离上基于 TPN 地震台站记录的从震源到每个障碍物的距离。流动动力、高坡度的狭窄河道以及巨石与泥浆物质的混合在高强度冲击中起到了重要作用。在距离 Raunthi 峰约 45 km 的 Pipalkoti 大坝之后，流动前沿（flow front）变得正常化。

研究者基于地震观测分析了地震监测对碎屑流的预警潜力。为了解源区的临界程度（degree of criticality）和不稳定性，需要实时监测断裂和裂缝扩展所导致的滑动和蠕变。Rishiganga-Dhauliganga 山谷的主要破坏事件（指碎屑流）导致 Tapovan 大坝发生巨大的人员伤亡，而这仅发生在冰-岩碎屑流开始后 15~17 分钟。如果有一个早期预警系统，就会有足够的时间进行大规模疏散。进一步分析表明，监测潜在危险区需要密集地震阵列的高质量数据。这将描绘该地区自然灾害的动态变化和临界程度，从而可以通过对任何灾害提供及时预警，来提高人们对重大灾害的关注度。此外，研究者建议在现有潜在危险区域的外围部署具有其他预警参数的密集地震网络，这将提高无感知事件检测、信号处理和预警系统开发的效率。为了提高准确性、避免误报，需要一个由高敏感度的水文、气象和地震（良好的方位角覆盖）观测站组成的集成网络。这也将有助于及时识别新的、可能会在未来造成危急情况的潜在风险区。因此，具有实际响应、沟通和感知能力的综合预警策略将为减轻灾害提供有效方法。

来源：Tiwari A, Sain K, Kumar A, et al. Potential seismic precursors and surficial dynamics of a deadly Himalayan disaster: an early warning approach. *Scientific reports*, 2022, 12(1): 1-13.

## 2021 年法格拉达尔火山喷发前的变形和地震活动性下降

变形速率和地震活动率的增加是火山喷发的公认先兆，对它们的解释构成了全球火山喷发预警的基础。在许多火山喷发之前，地面位移速率和地震次数会增加，因为岩浆会冲向地表。然而，变形和地震活动在喷发前的模式存在很大差异。2021 年 3 月 19 日，冰岛法格拉达尔火山（Fagradalsfjall）喷发，研究发现该火山在喷发开始前几天经历了一段构造应力释放期——以变形和地震活动下降结束。2 月 24 日至 3 月中旬发生了高速率的变形和地震活动，这与从地表到 8 km 深处之间大约 9 km 长的岩脉的逐渐就位，以及高达  $M_w$  5.64 的走滑地震的触发有关。随着储存的构造应力被系统地释放，岩浆的横向迁移减少，变形速率和地震活动减少。地表附近较弱的地壳也可能导致地震活动减少，因为岩浆侵位深度逐渐变浅。该研究表明，在预测火山喷发时，需要充分考虑火山与构造应力、地壳分层（crustal layering）之间的相互作用。相关研究成果于 2022 年 9 月发表在 *Nature*。

世界各地的火山观测旨在向平民、航空当局和其他利益相关者提供及时的喷发预警，以防止人员伤亡和基础设施损坏。为实现这一目标，必须正确理解喷发前兆模式，喷发前兆通常会在喷发开始前呈现上升速度。Voight（1988）开创性的量化了这种行为，他推导出一种方法来解释在火山上观察到的前兆活动，以找到破裂和喷发开始的时间。这种预测方法或其改进版本已被广泛用于事后预测喷发时间，在某些情况下甚至可以近乎实时预测。然而，一些火山喷发表现出不同的行为，甚至在喷发前出现前兆活动减少。比如，2010 年 3 月，冰岛埃亚菲亚德拉冰盖火山（Eyjafjallajökull）的侧翼喷发（发生在爆炸性顶峰喷发之前），在其喷发前，地震活动和变形速率在经过数月的增加后有所下降。

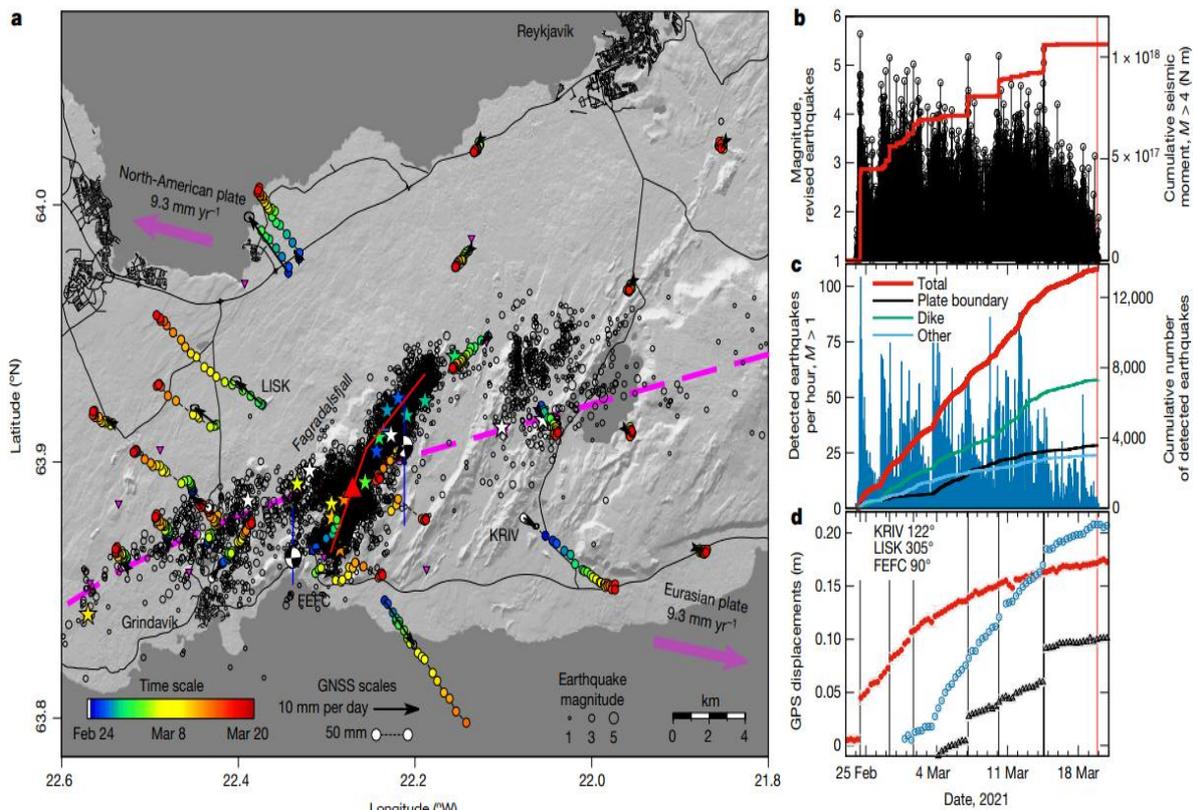


图 1 雷克雅内斯半岛的地震活动和变形情况

**喷发前的地震活动和变形：**雷克雅内斯（Reykjanes）半岛斜向裂谷带是北美-欧亚大陆板块分界线的一部分，位于冰岛海平面以上。沿雷克雅内斯半岛由东北向西南排列的雁列式裂隙群是将该区域划分为火山系统的基础，每个火山系统由裂隙群和高地热区组成。南北方向的走滑断层主要位于裂隙群之间，在非喷发期间释放跨越板块边界的剪应力。在 2021 年 3 月 19 日法格拉达尔火山开始喷发之前，雷克雅内斯半岛大约 800 年没有喷发，其过去 3000 年的火山活动以数百年的喷发期为特征，周期约为 800~1000 年。1990 年代的大地测量表明，应变和应力沿板块边界累积，在 5~8 km 深度以下，韧性变形占主导地位，板块自由滑动，并受到地震和地热的扰动而变形。2019 年 12 月中旬，雷克雅内斯半岛开始变得“动荡”，法格拉达尔火山南缘出现了为期一周的强烈地震群，随后雷克雅内

斯半岛大部分地区的地震活动加剧。在本研究中，研究人员描述了从 2021 年 2 月 24 日到 2021 年 3 月 19 日的活动，这一期间发生了最大的地震。

在 2021 年 2 月 24 日发生  $M_w$  5.64 地震之前，在将形成岩脉的位置发生了 3 小时强烈、集中的微震活动，深度范围接近 7 km，这表明岩浆侵入的开始。在沿未来岩脉的大致方向向东北延伸数百米后，地震群最终在地震群区域内触发 M4 走滑事件。在 17 秒内， $M_w$  5.64 地震在东南 1 km 处触发，靠近板块边界的中轴。在接下来的 4 小时内，所有活动都局限于板块边界的中轴。该地区的变形模式在 2 月 24 日之后发生了变化，表明岩浆持续流入脆性地壳中的垂直岩脉，同时板块边界的中轴上也发生了一些滑动。

全球导航和卫星系统(GNSS)的大地测量和合成孔径雷达图像(InSAR)的干涉分析充分显示出岩脉就位的地面变形。岩脉东南部的 KRIV GNSS 站显示，在  $M_w$  5.64 地震期间出现同震跳跃，然后在接下来的几天内以每天约 10 mm 的速度向一固定方向移动，并随时间逐渐下降。从 InSAR 中也可以明显看出，变形速率随时间降低，最慢的变形速率出现在喷发前的最后几天。因此，GNSS 和 InSAR 数据都揭示了  $M_w$  5.64 震后的高变形速率，然后在喷发开始时逐渐减小到几乎为零。

继 2021 年 2 月 24 日发生  $M_w$  5.64 地震后，雷克雅内斯半岛在喷发前发生了 9 次大于  $M_w$  4.8 的地震，其中最大的一次是 2021 年 3 月 14 日发生的  $M_w$  5.33 地震。地震震级和地震矩释放率不断下降，直到 3 月 19 日晚上开始喷发。喷发前两天，地震活动主要集中在两个小震群，其中一个在火山即将喷发的地点。从 2 月 24 日到 3 月 19 日喷发开始，检测到超过 53 000 次地震。这些地震活动的一个特点是  $M_w \geq 4.0$  地震的数量异常多（64 次），比该地区过去 20 年的记录多近 20 次。前所未有的地震活动，以重叠的主

震-余震序列为特征。通过波形分析发现，存在垂直的两段岩脉，研究人员分别称之为北段和南段。2月24日至3月3日期间，北段岩脉发生地震活动。此后，地震活动向南段岩脉迁移，同时也向西迁移。3月7日，这一趋势停止。在岩脉和板块边界活动的整体影响下，地震活动率在喷发开始前几天整体下降。与岩脉区域相比，板块边界区域的下降开始时间提前了3天。

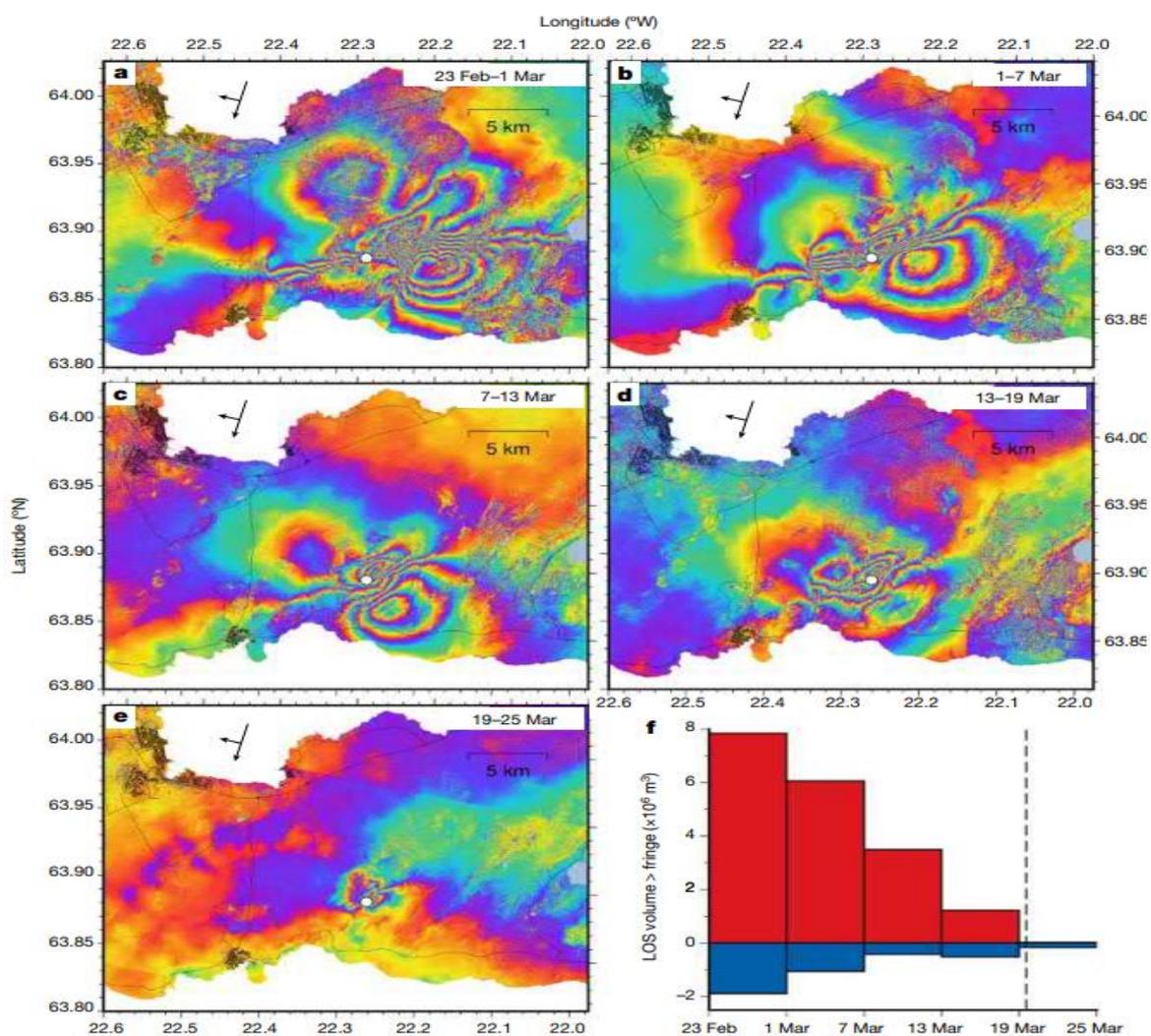


图2 变形的空间分布

**大地测量模拟：**模拟显示，大部分变形与大量较小规模地震发生地区的垂直岩脉的就位有关。研究人员推断，岩浆流入岩脉的速度是波动的，

最高值出现在 2 月 24 日至 3 月 3 日岩脉形成的最初几天，最低值出现在火山爆发前几天。岩浆侵位的日平均深度也有波动，但在 3 月 11 日之后逐渐变浅。岩浆流速与平均侵位深度之间似乎存在线性关系，因此岩浆侵位越浅，岩浆流速越低。预测表明，初始喷发速率约为  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ，这与观察结果一致。

模型  $3.5 \text{ km}$  深处的张应力变化为数十兆帕，而之前因板块运动引起的张应力变化为每年数十千帕。因此，前述地震事件期间的应力变化可能对应于自大约 800 年前雷克雅内斯半岛喷发以来累积的大部分构造应力。剪切作用与岩脉相结合，释放了倾斜扩张环境中的构造应力。

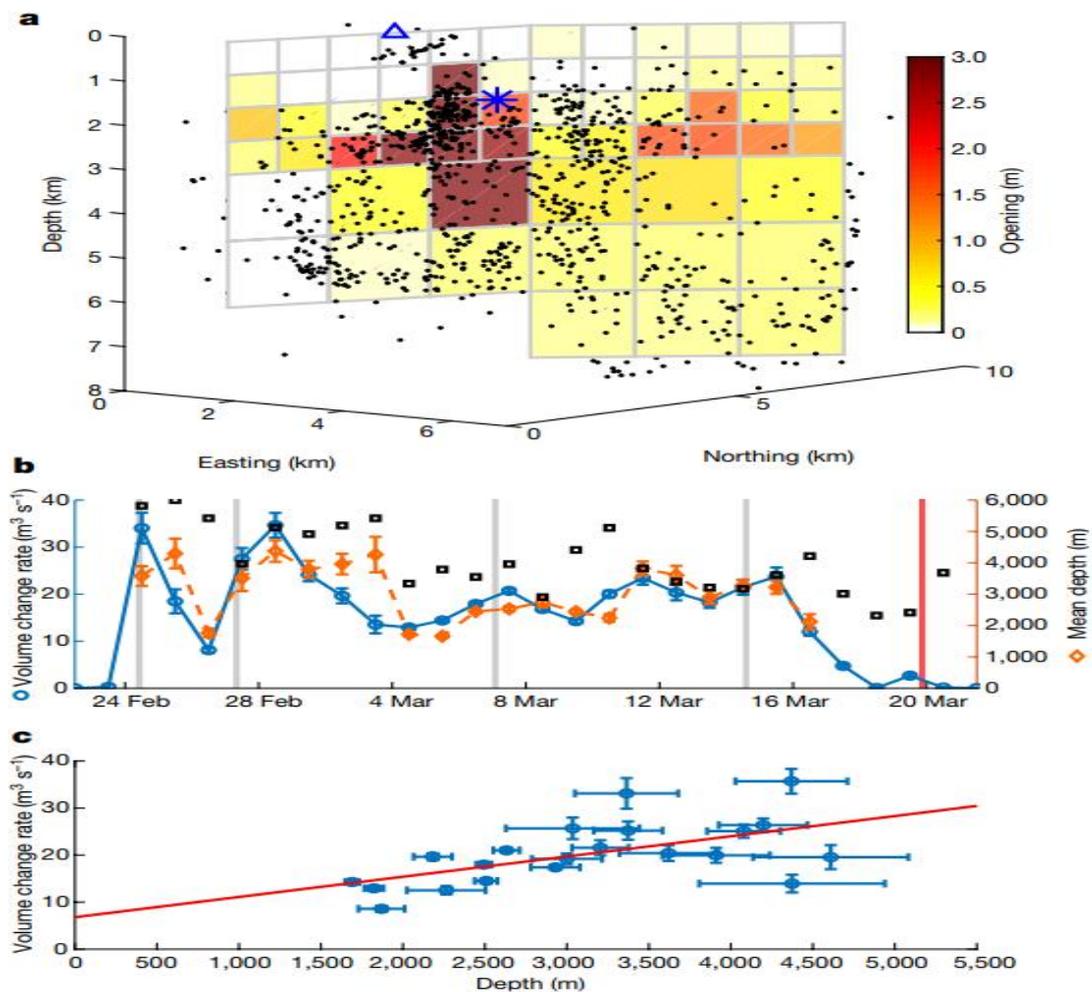


图 3 大地测量模拟结果

**讨论：**构造应力的释放以及变形和地震活动率的下降可能是某类火山喷发的特征性前兆活动，这一认识主要基于以下发现：①岩浆流入具有相关特征变形和地震活动的岩脉，并触发周围地区的变形和地震活动；②构造应力的主要释放时期过后，变形和地震活动率下降，这均与岩浆流入速率的下降有关；③一旦累积的构造应力沿岩脉释放，岩浆将以相对平静的方式突破地表，开始喷发，但没有明显的地震能量释放或变形。即使岩脉需要突破最上层地壳才能引起喷发，但火山裂谷中最上层 1 km 的地壳已经破裂且脆弱，因此信号不容易被检测到。总体而言，这是一种非常不同的前兆活动模式。因此，从火山观测站获取的地球物理数据集中确定不太常见的喷发前兆模式将是支持民政当局及时决策并缓解风险的重要方法。

**来源：**Sigmundsson, F., Parks, M., Hooper, A. *et al.* Deformation and seismicity decline before the 2021 Fagradalsfjall eruption. *Nature*, 2022, 609: 523–528.

---

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所