

地震科技前沿快报

2021 年第 5 期（月刊总第 29 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、加州中部圣阿多地区近圣安德烈斯断层处 40 多年的潜在诱发地震活动
- 2、建立具有自然灾害弹性的高质量地震网：WI 地震网如何在玛利亚与厄玛飓风中保持运转
- 3、easyQuake：机器学习为区域地震网或局部地震研究服务

加州中部圣阿多地区近圣安德烈斯断层处 40 多年的潜在诱发地震活动

尽管在地震活跃的断层附近有大量的流体注入，但在加州的油气盆地中，流体注入诱发地震活动的证据很少。来自美国的两位科学家调查了一个可能的注入诱发地震案例——圣阿多（San Ardo）油田（运营始于 20 世纪 50 年代初）。通过卫星在 2016 年至 2020 年期间获取的合成孔径雷达干涉图像（InSAR），发现地表变形高达 1.5 cm/yr，表明油田部分地区存在压力再平衡。圣阿多的流体注入集中在花岗质基底上方高渗透性的岩石中，深度约 800 m。地震活动主要发生在 6~13 km 深处的基底断层。地震活动和废水处理井在与油田北部存在空间相关性，时间相关性则超过 40 年，

距离油田 24 km 范围内的地震活动相关系数高达 0.71。圣阿多地震活动的复杂性表明，弹性应力传递和无震滑移（aseismic slip）瞬变等多种过程是潜在诱发地震的原因。相关成果发表在 2021 年 1 月的 *Seismological Research Letters*。

先前的研究表明，加州过去的石油开发导致了诱发地震。最近，先进的采油技术和废水处理导致美国中部和加拿大的地震活动激增，然而，在加州却是例外。很多其他因素被用来解释这种现象，例如围压、当地的地质情况以及区分诱发地震和天然地震的难度等。

以往的许多研究集中在近井地震（near-well seismicity），并认为流体压力效应是诱发地震的主要机制。然而，最近的观察强调了其他过程的重要性，如弹性应力变化，这可能在沉积注入点的结晶基底正上方最明显。弹性应力的其他来源包括由先前破裂引起的库仑应力变化，以及诱发的无震滑移。

为了探究加州地区的地震是否为诱发地震及其地震机制，研究者以圣阿多地区为对象展开研究。研究者关注的是加州中部圣阿多地区的长期地震和油田记录，圣阿多位于圣安德烈斯断层以西 35 km 处。该地区设备齐全，拥有加州最大的几口废水处理井。研究者对圣阿多北部和西北部的潜在诱发地震活动进行了详细的调查：首先研究了流体注入与地震之间的空间相关性，并分析了油田投产期间地震活动的历史记录；然后，检查当地的地质和地表变形数据，并检查流体注入和地震活动率之间的潜在时间相关性；最后，从空间地震活动衰减和时空迁移的角度讨论了观测到的地震活动的聚集特征和潜在机制。

数据分类处理结果表明，地震主要发生在圣阿多油田的北部和西北部，最显著的特征是一个大致呈线性的地震群，从油田边界向北延伸约 6 km，

自 1970 年以来发生了 4 次 4 级以上的地震（图 1）。流体注入在整个圣阿多油田普遍存在，但是废水处理也主要集中在油田北部，少量分布在油田东侧和南侧。因此地震和废水处理在地表空间上紧密相关，但是它们发生的深度却有很大差异。地震主要集中在 10~12 km（图 1），而注入活动则发生在 500~880 m 之间，平均为 600~730m。观察到最浅的地震群出现在 6~8 km，而最深的 14 km 处的地震很可能是由于 20 世纪 70 年代设备不够精准导致的。

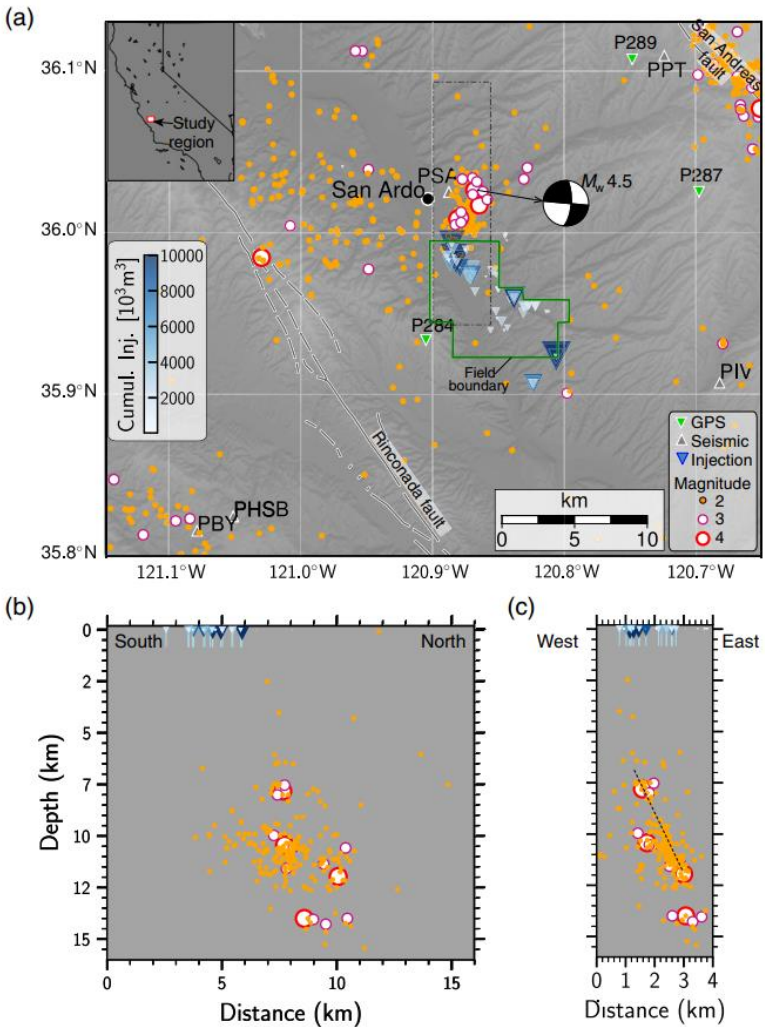


图 1 1970 年后圣阿多附近的地震和注入井分布。(a): 地震位置 (彩色圆圈, 见图例)、1985 年 4.5 级地震的震源机制 (表明南北走向断层中存在右行滑移)、圣阿多油田边界 (绿色多边形)、注水井位置 (蓝色三角形)、GPS 台站位置 (绿色三角形) 以及地震站台 (灰色三角形); (b) 和 (c): 圣阿多油田北侧地震的深度剖面

地表变形

圣阿多油田之下，油砂直接覆盖在花岗岩基底之上，深度不到 1 km。相对浅的注水活动会引起地表抬升。为了探究注水活动对地表运动的影响，研究者利用 2016—2020 年间的长期干涉合成孔径雷达 (InSAR) 变形速率进行分析。

结果表明，成像卫星的峰值视线 (line-of-sight, LoS) 位移速率为 1.5cm/yr。在被许多高排量注水井包围的区域，位移最高。2016 年至 2020 年期间，LoS 的累计位移约为 5cm。此外，通过全球定位系统 (GPS) 的测量数据验证了 InSAR 观测结果，并确定了与 GPS 总体标准差约为 2.3 mm/yr 的高精度 InSAR 速度图。

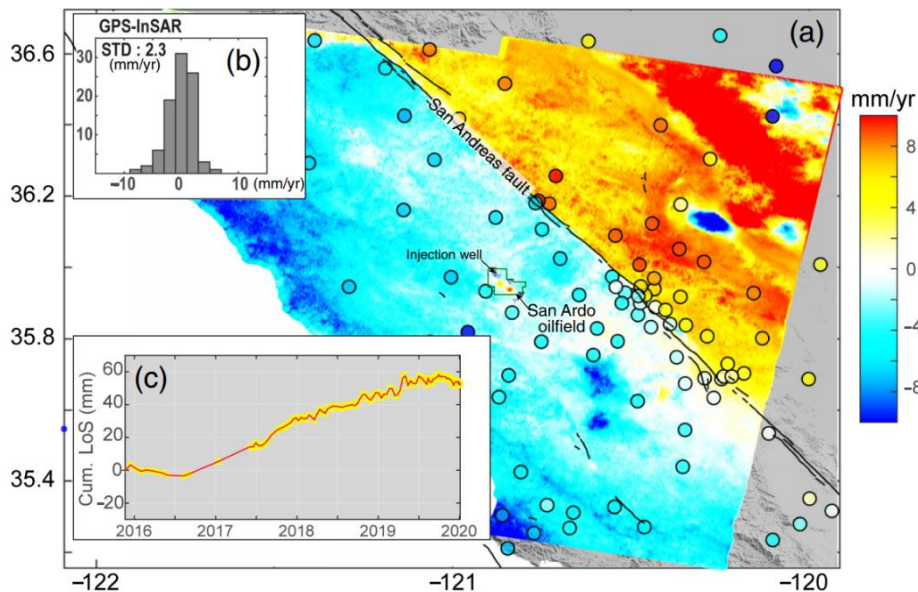


图 2 圣阿多地区与注水活动相关的视线速率与位移。(a): InSAR 结果与 GPS 测量结果 (黑色圆圈), 速度场以圣安德烈斯断裂附近的右行剪切为主; (b): 柱状图显示 InSAR 和 GPS 结果的差异, 方差为 2mm/yr; (c): 2016—2020 年间向着圣阿多油田内部的 InSAR 位移时间序列。

观察到的变形是普遍性流体注入活动的表现，并提供了孔隙弹性响应 (与储层压力增加相关) 的直接指示。其中，最大位移似乎是从最高速率的废水处理井转移过来的。这种空间位移与在东德克萨斯州观察到的情况

类似，表明在岩石最柔弱的地方发生了孔隙弹性变形。

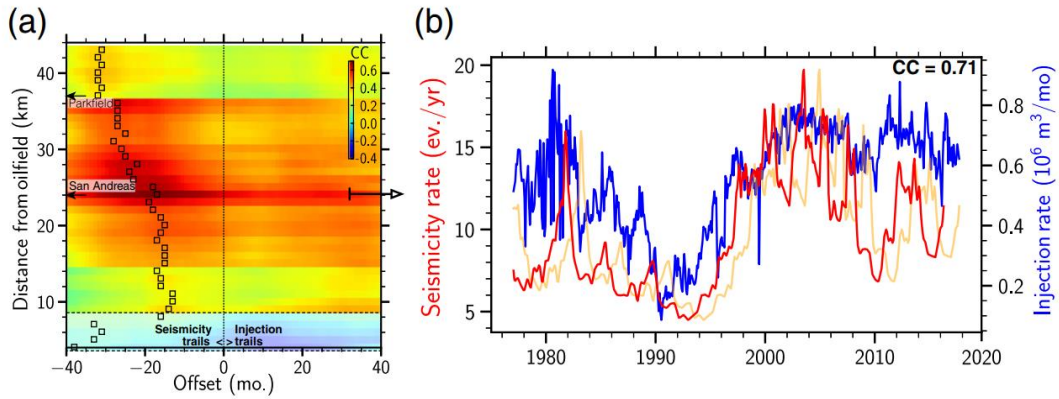


图3 (a): 注入和地震事件的互相关系数;
(b): 距离圣阿多 24 km 内的地震活动 (红色) 和注入速率 (蓝色)

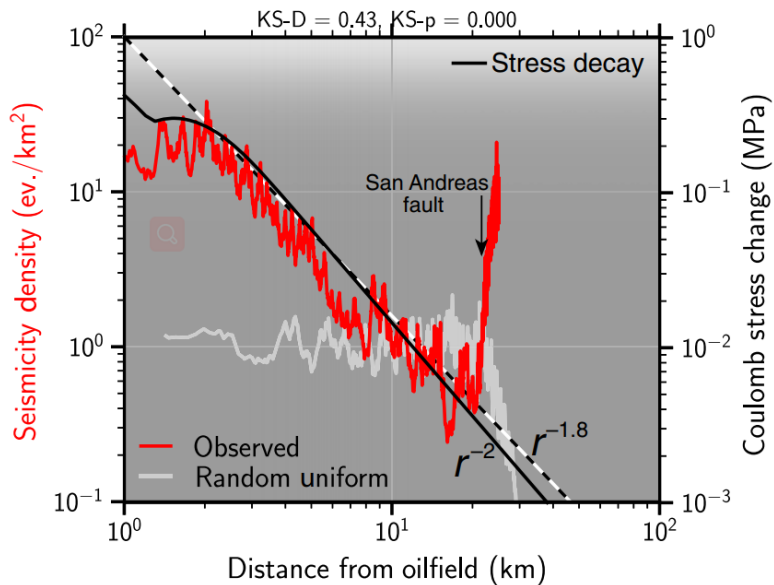


图4 与空间均匀地震活动 (灰色) 相比, 地震活动密度衰减 (红色) 与和圣阿多油田地表距离的函数关系

地震与注水速率的时空联系

研究者系统测试了地震和注入速率的时空关系。结果表明，在较小的距离内（小于 8 km）由于地震数量较少，地震和注入速率之间的关系并不明显。而在 9~24 km，相关系数由 0.35 增加到 0.71。距离超过 24 km 时，相关系数又随之降低，这是由于更多的与圣安德烈斯断裂相关的地震被包

含进来。随着注入速率的变化，距离从 9 km 增加到 24 km，滞后时间从 13 个月逐渐增加到 17 个月。而超过 24 km，滞后时间快速增至 30 个月。废水处理与地震活动率之间的相关性要比其他参数强烈的多，例如产液量、注水量和注气量等。上述分析结果表明，在大尺度情况下（24 km），注水速率与地震有着较强的联系，这与俄克拉荷马州的研究结果具有相似性。

潜在诱发地震的物理机制

圣阿多的一个特别出乎意料的观测发现是，流体注入和地震之间的巨大垂直间隔，这很难与流体压力扩散和有效应力减少相协调。因此，需要一个综合的物理机制解释其成因。

其中一种解释是，断层破裂区可以充当流动管道，促进压力扩散到较深的地方。这一机制取决于广泛的水力连通性，以及从注入点到地震发生深度始终保持的高断层渗透率。

另一种解释是弹性应力传递的影响。观测到的地表抬升支持了储层的孔隙弹性膨胀，这将产生弹性应力，在油田以外按幂律衰减。弹性应力是不排水条件下孔隙压力增加的结果，即使没有直接的水力连通性，也会导致断层活化。圣阿多的地震活动在 2~20 km 之间呈幂律空间衰减，指数约为 $r^{-1.8}$ 。在与隔离注水井有关的诱发地震活动中，也观察到同样的幂律指数。此外，地震过程的弹性应力传递可能对观测到的地震活动有贡献。

综上，对加州中部圣阿多油田近 40 年来高分辨率地震数据的详细分析表明，废水处理与地震活动之间存在潜在联系。地震活动与流体注入具有显著的时空相关性。在离处置井 24 km 范围内，时间相关性最强，这也是到附近圣安德烈斯断层的距离。在加州和其他地方，判定可增加注入诱发地震危险的标准包括：①直接在基底之上的注入；②渗透带的高速率、大范围注入；③存在构造应力断层。这些标准有助于指导今后的注入作业，

并减少地震风险。

来源：Goebel T H W. & M Shirzaei. More Than 40 yr of Potentially Induced Seismicity Close to the San Andreas Fault in San Ardo, Central California, *Seismological Research Letters*, 2021, 92, 187–198.

建立具有自然灾害弹性的高质量地震网：

WI 地震网如何在玛利亚与厄玛飓风中保持运转

在 2008—2014 年间，巴黎地球物理学院 (IPGP) 与西印度大学地震研究中心 (UWI-SRC) 设计和建造了穿越小安的列斯群岛 (Lesser Antilles) 的区域地震网 (即西印度群岛地震网，简称 WI 地震网)。建立该地震网的一个目标是为服务加勒比海及其相邻区域的海啸预警中心提供实时地震数据。在一个易于发生飓风、地震、海啸和火山喷发的地区，研究人员采取不同的技术来保证这一地震网可以在主要的自然灾害面前幸免于难，并不断提供数据。纳米级甚小孔径终端 (VSAT) 是这一系统的核心，它能够在三个观测站收集数据。

在 2017 年，这一地震网的设计和运行接受了 5 级飓风厄玛 (Irma) 和玛利亚 (Maria) 的考验，这两个飓风分别穿过了小安的列斯群岛的北部和中部，主要影响了在马提尼克岛 (Martinique) 和瓜德罗普岛 (Guadeloupe) 的火山-地震观测站 (OVSM 和 OVSG)。研究人员的理念被证明是有效的，仅有一个少于 12 小时的数据缺失以及两个站点受到严重的破坏。在本文中，研究人员评述了初始设计的优缺点，并讨论了接下来要采取的步骤，以加强地震网的能力，来更好地在任何情况下向海啸预警中心提供实时地震数据。相关研究成果于 2021 年 1 月发表在 *Seismological Research Letters*。

小安的列斯群岛活动俯冲带从南部特立尼达岛 (Trinidad) 到北部维尔京群岛 (Virgin)，跨越 1000 km。在这里，北美板块以 2 cm/yr 的速度向加勒比海板块运动。这种缓慢的汇聚在 19 世纪引发了两次逆冲地震，使上百人遇难并摧毁了两个主要的城市。1839 年的 M8.0 级地震和 1843 年的

M8.5 级地震分别摧毁了当时马提尼克岛和瓜德罗普岛的经济中心 Fort Royal（现在的法兰西堡）与皮特尔角城（Pointe-à-Pitre）。此外，1843 年的地震还触发了一次小海啸。

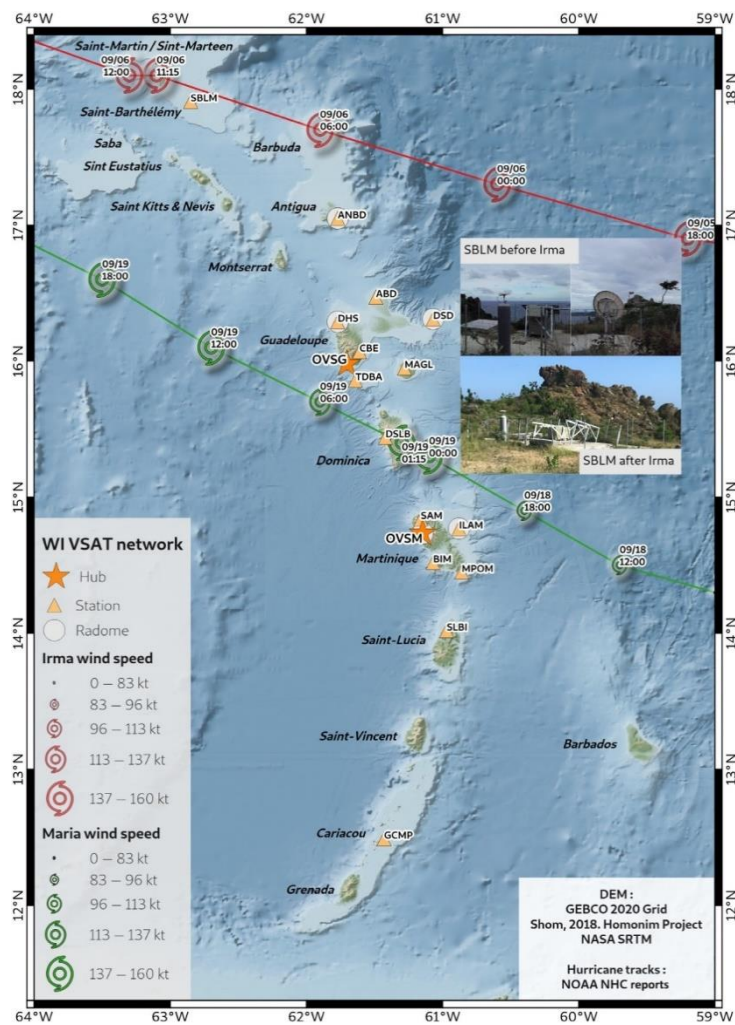


图 1 厄玛与玛利亚飓风穿过 WI 地震网的轨迹

北美板块向加勒比海板块下俯冲了 40 Ma, 形成了 850 km 长的小安的列斯群岛火山岛链。从公元 1600 年开始, 欧洲人在此定居后, 这一地区从南部格林纳丁斯 (Grenadines) 到北部萨巴 (Saba) 共计 11 个岛的 21 个活火山至少发生过 34 次喷发。此外, 小安的列斯群岛还发生了世界上最致命的火山喷发, 1902 年的喷发导致 29000 人丧生, 完全摧毁了圣皮埃

尔 (Saint-Pierre) 和莫恩鲁日 (Morone Rouge)。目前, 该地区的火山活动仍然活跃。作为一个热带地区, 小安的列斯群岛也面临着每年的飓风。在 1965—2019 年间, 77 个热带飓风路过这一地区。虽然每年的飓风数量都会发生变化, 但是仅有很少的一部分会对群岛产生严重威胁。

小安的列斯群岛的火山活动是由 UWI-SRC 在特立尼达岛的研究中心与 IPGP 在马提尼克岛和瓜德罗普岛的两个部门负责监测。萨巴岛和圣尤斯特歇斯岛 (Sint-Eustatius) 的火山活动是由荷兰皇家气象学院 (KNMI) 负责监测。

站点、地震网和数据分布设计: 三个加勒比海观测站 (OVSM-IPGP、OVSG-IPGP、UWI-SRC) 跟随先进技术的发展, 于 2000 年开始使用数字遥测。2004 年在 12 月 26 日 Sumatra-Andaman 地震海啸过后, 联合国教科文组织 (UNESCO) 在受海啸威胁的盆地建立了早期海啸预警系统。在加勒比海地区, 其促进了海啸和其他海岸灾害预警系统之间对高质量宽频地震数据的实时分享。在 2008 年首批 5 个站点由 UWI-SRC 安装后, UWI-SRC 与 IPGP 合作部署并扩展了小安的列斯群岛俯冲带的地震网。

为了应对各种自然灾害, WI 地震网在多个方面 (传输、供电、设备) 使用冗余系统 (redundant system)。在一个易于发生地震、海啸、火山喷发和飓风的区域, 陆地通信网络被认为是不现实的。为了确保覆盖跨越 1000 km 的小安的列斯群岛, 选择了 VSAT 卫星技术。三个观测站都配备了卫星中心 (satellite hub), 来接收与卫星相连的地震网的站点数据。使用的 6 个卫星频道中的每一个, 其主中心 (master hub) 都配备了两个副中心, 来保障安全运行。

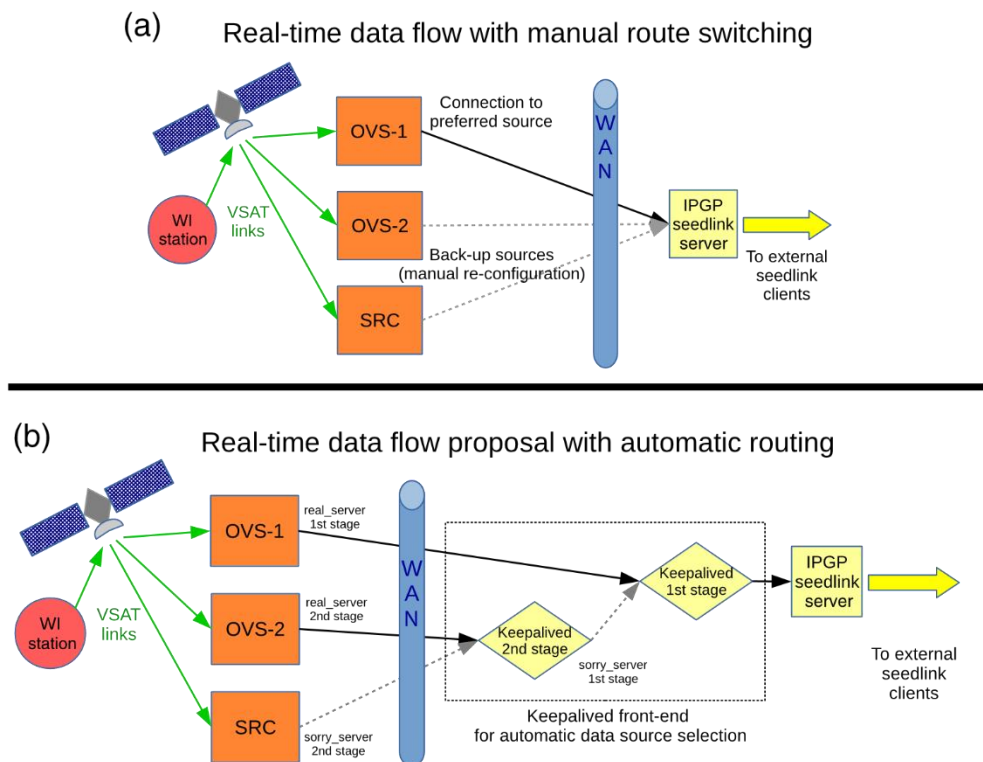


图 2 从一个站点到早期预警中心的实时数据流

研究人员小心地安装了每个岛上火山风险区的 **WI** 台站。由于小安的列斯群岛火山大多数都是安山岩质的，以大面积喷发火山灰为特征，因此每个站点都配备了独立的双太阳能系统，每一个都能确保在无太阳的情况下工作至少 10 天。鉴于飓风是地震网面临的最频繁灾害，**VSAT** 中的一个接收中心与四个站点配备了抵抗飓风的保护罩，使其能够在 120 kt 飓风下运行。

由于区域观测站的网络带宽受限，海啸服务提供者 (**TSP**) 要获得数据只能通过巴黎的 **IPGP** 数据中心。**WI** 数据首先来自马提尼克岛与瓜德罗普岛的观测站，特立尼达岛的观测站被认为是最后的解决方案。由 **IPGP** 或 **UWI-SRC** 运行的 **WI** 站点从 **IPGP** 数据中心实时公开分发数据，

UWI-SRC 运行的 TR 站点则从特立尼达岛的设备向预警中心实时分发数据。TR 和 WI 实时数据在三个观测站之间是共享的。

2017 年飓风季地震网的弹性：在 2017 年，一个意外的飓风袭击了小安的列斯群岛。厄玛是自 1851 年有记录以来第一个穿越小安的列斯群岛的五级飓风，紧接着是乔斯 (Jose)，其在最后时刻避开了群岛并转向北。三周后，又遭受了玛利亚的袭击。

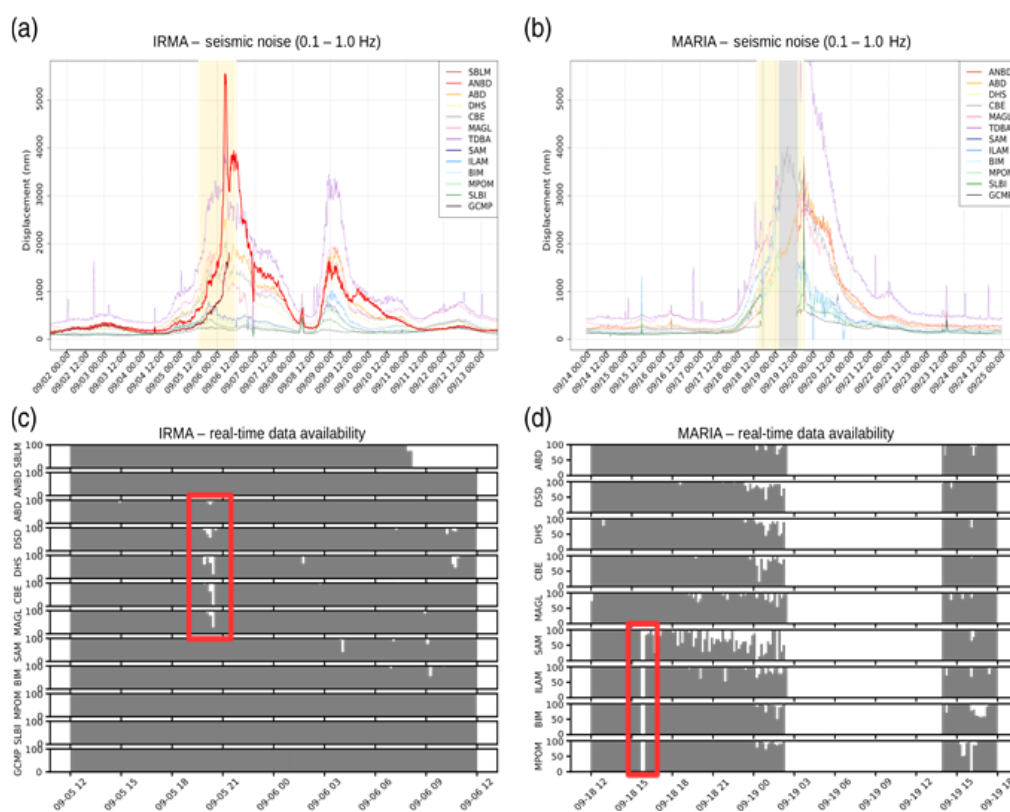


图 3 在厄玛与玛利亚飓风期间 0.1~1.0 Hz 的地震噪音振幅

在 2017 年 9 月 1 日，厄玛飓风已经成为了一个大型飓风，并且也知道它会穿过小安的列斯群岛北端。4 日，国家海洋气象局以及国家飓风中心提高了预警等级，称持续风力可能会达到 150 kt。WI 观测站中的两个位于飓风路径上：安提瓜岛 (Antigua) 的 ANBD 以及 Saint-Barthélemy 的 SBLM。

5 日，大约在 UTC 时间 20:00，厄玛带来的大雨袭击了瓜德罗普岛，使该站点的数据传输变得模糊，并持续了几小时。6 日，在 00:00 至 05:00，厄玛的中心在距安提瓜岛观测站 70 km 之外经过，并产生了一个噪音峰值。由于该站配备了保护罩，并未遭受任何破坏，仅由于大雨造成很少的实时信号中断。几小时后的 08:07，130 kt 的狂风被 Saint-Barthélemy 气象站记录。SBLM 在 08:04 停止响应和记录数据。

9 月 17 日，飓风玛利亚接近马提尼克岛、多米尼加和瓜德罗普岛时快速成长为一个 4 级飓风。WI 地震网的几个站点与其中两个接收中心受到大风与暴雨影响。马提尼克岛北部首先被影响，暴雨侵袭了岛内的所有 VSAT 传输，渗透了 1936 年的观测建筑，并迫使其关闭服务 24 小时。因此，马提尼克岛的数据采集被人为的切换到瓜德罗普岛接收中心。随后，飓风加强到 5 级，并由南东向北西穿过多米尼加，破坏了 DSLB 的地表设备。19 日夜晚，玛利亚的中心接近瓜德罗普岛。所有的数据传输在 02:20 停止，因为观测站和接收中心遭受了严重的破坏。所有的数据收集在 19 日 14:00 重启之后，都被路由至马提尼克岛中心。虽然 WI 地震网的一个初始目的是确保在马提尼克岛与瓜德罗普岛观测站失效的情况下，从特立尼达岛获得数据，但不幸的是，在其需要工作时未能运转。在特立尼达岛中心，几个早期调制调节器失效，以及与 IPGP 合作均不连续，使得在巴黎配置的应急软件在玛利亚到达之前无法从 UWI-SRC 服务器获取数据。在 19 日 18:14，15 个 WI 站点中的 12 个记录了发生在墨西哥普埃布拉 (Puebla) 的 7.1 级地震，水平和垂直频道在 10 s 时的信噪比在 3~30 之间，这仍然是实时数据处理的一个很好的水平。相比之下，6 月 22 日，圣何塞港 (Puerto San José) 6.8 级地震在 10 s 时的信噪比高出这一水平 5 倍多。

最后，整体而言，虽然被直接影响，WI 地震网仅发生了 12 个小时的实时数据缺失。

受保护罩保护的核心网未遭受任何破坏。在减少早期预警服务实时数据流短缺方面，跨越整个俯冲带不同中心的数据接收能力依然是有效的。不幸的是，在特立尼达岛修复调节调制器延后的情况下，阻碍了弹性网络的作用发挥。在这两个主要的飓风之后，仅有三个站点受损。SBLM 和 DSLB 站点的外部设备由于飓风袭击而被损坏，DHS 站点的地震仪由于大雨受损。

飓风厄玛与玛利亚揭示了系统中的两个弱点：需要人为重新配置来优化系统效能，同时，忽略了 SBLM 站点在监测小安的列斯群岛北部地震活动中的重要性。在安提瓜岛和马提尼克岛安装的保护罩证明了其有效性，所以 SBLM 站点重新安装了保护罩，以抵抗更强的飓风。

即使巴黎是地震网实时数据集合和分发的一个安全地方，数据路由依然需要人为干预。再者，在巴黎的 IPGP 无专人负责。这可通过自动重路由方案得以解决。数据可以优先从马提尼克岛与瓜德罗普岛的观测站获得。如果两个 IPGP 中心失效，可随后转到特立尼达岛中心。为了保持系统的灵活性以及避免将所有的带宽压力放在单独的观测站，路线被设计成通过站与站传输。这一自动系统在 IPGP 服务器依然未实施，而该服务器现在已经被移到一个集群设施上。飓风带来的暴雨淹没了 DHS 站点的设施并破坏了宽频地震仪，现在这一问题可通过配备防水传感器并在 5~10 m 深的浅井安装来解决。

来源：Saurel J M, J Corbeau, S Deroussi, T Didier, A Lemarchand, S

Moune, L Lynch, A M Lejeune, R Moretti. & J C Komorowski. Building a NaturalHazard-Resilient High-Quality Seismic Network: How WI Network Sustained Hurricanes Maria. & Irma, Seimological Research Letters. 2021, 92, 77–84, doi: 10.1785/ 0220200270

easyQuake: 机器学习为区域地震网或局部地震研究服务

地震的自动识别、震相提取关联和事件定位可以通过各种不同的开源和专有算法与计算机程序实现。美国俄克拉荷马大学研究人员开发了一个开源的 Python 包——easyQuake，它包含了一套灵活的工具，可探测和定位来自国际数字地震台网联盟（FDSN）收集或现场采集的地震记录。这一工具包利用一个机器学习驱动的相位选择器，再加上一个关联器，来生成一个带有震级和纵波极性的以 Quake 语言（QuakeML）标记的目录。研究人员描述了全天候地震记录的夜间计算如何识别由于背景噪音而被忽略的低震级候选事件，以及如何将这些事件通过分析师人工审查合并到俄克拉荷马州地质调查局的全州网络中。该工具包可被用于区域台网的地震检测和任意用户定义区域的微震活动研究，由于其基本原理具有尺度不变性，所以在从区域到局部阵列的地震分析中有广泛应用，在识别被遗漏的早期余震方面亦有很大潜力。相关研究成果发表在 2021 年 1 月的 *Seismological Research Letters*。

随着最近地震检测和震相提取关联能力的增强，地震学中的机器学习方法迅速发展。伴随这一发展，机器学习有可能揭示地震的基本特征。探测更小地震的能力可能会在地震成核和断层滑动特征谱方面产生惊人发现，并可能提供独特的见解，最终使短期预测成为可能。以输出详细的 QuakeML 文件为目标，研究人员专门指导了 easyQuake 的开发，以使地震区域网络的监测和研究更具可重复性和可验证性。使用各种现有组件组装了一个 Python 包，并对其进行了一些修改，还编写了几个实用程序，其可作为获取原始地震记录并生成一个可靠的研究级地震目录的全套解决方案。

运行 easyQuake: easyQuake 套件依赖于最近 5 年发布的几个 Python

包。ObsPy 是所有地震记录和事件元数据读取与写入的基础，已被地震学家广泛使用。从本质上讲，easyQuake 指导了地震目录生成工作的所有步骤，包括：生成候选相位到达检测、收集地震关联的提取数据、定位关联期间的事件以及确定震级。此外，还包括几个实用程序，分别为 hypoinverse（输出必要的文档）和 hypoDD（输入地震位置和重新定位的文件）。

数据下载（获得震动图）：从相关的 FDSN 数据库收集地震记录。通常，所有数据都围绕一个顶级项目文件夹（top-level project folder）进行组织（用户分配的项目文件是计算机上项目目录的完整路径）。在这个文件夹下面，对应于单个日期或指定事件时间的目录名（不同的目录名是存放拾取、旅行时间和 1D 关联器表的子目录）。如果数据是从 FDSN 来源收集的，站点元数据（包括仪器响应）将下载到日目录中。如果数据是在本地收集的，easyQuake 将假定元数据也存在于日目录中，但是，如果元数据不在那里或不存在，它将尝试在后面的分析步骤中从 FDSN 网络收集元数据。

地震监测：默认情况下，easyQuake 利用机器学习进行地震相位检测，通过整合系统连接到广义相位检测（GPD）拾取器。该拾取器利用了机器学习软件，图形处理单元（GPU）的大规模并行芯片架构大大提高了处理速度。默认情况下，easyQuake 被配置为使用 1 个 GPU；拥有多个 GPU 的用户应该识别 easyQuake 包中选择器脚本的文件位置，并相应地进行编辑。此外，尽管 GPD 选择器在一个 CPU 上运行，如果不安装 NVIDIA 显卡和 CUDA 并行计算平台，它的速度会非常慢。

地震关联：对于地震关联，需收集可用的数据，在时间上对它们进行聚类，并尝试利用旅行时间查找表来关联事件，这里使用了 PhasePapy 1D 关联器。PhasePapy 使用了走时查找表，该表是使用 ObsPy 内的 TauP 子模

块和 IASP91 全球速度模型计算的。关联过程的第一步是在不同组件上聚合来自同一站点的拾取信息，并利用 S-P 次数来识别站点可能的成对 P/S 拾取信息。接下来，关联器从 S-P 旅行时间和相应的走时查找表中确定候选的 S-P 距离。关联器根据 S-P 距离确定原始时间并反向投影相应的 P 波走时。位置的确定通过最小化 S-P 距离和震中到台站距离之间的残差来实现。虽然一些 easyQuake 函数直接控制关联器（如最大 S-P 距离），在确定事件之前，可以通过直接编辑发布在 easyQuake 包中的 PhasePApy 代码来编辑其他函数（如聚集的候选站点数量）。

为 QuakeML 合并所有项目关联和格式：一旦所有地震都关联起来，事件和站点数据库就会以嵌入式的数据库文件存在于项目目录中的单个日期或事件的文件夹中。下一步将通过使用 ObsPy 工具将这些文件夹中的所有事件组合到一个 QuakeML 目录文件中。用户可以进一步选择将目录拆分为单独的 QuakeML 事件文件。QuakeML 标准对于地震的元数据应该如何以分层的方式组织有特定的规定。在此步骤中，将为每个事件填充这些字段（包括拾取、到达和起始对象）。从嵌入式关联表到 ObsPy 编目对象的转换过程中，QuakeML 是兼容的，研究人员还创建了 hypoinverse 站点和事件文件，这些文件保存在项目的顶级目录中，可以用于以后的重定位。由关联器生成的初始震源可能相当粗糙，因为旅行时表是在一般速度模型上使用 TauP 计算的。

局部震级计算：一旦所有地震都关联起来，并且事件以 QuakeML 格式作为目录对象，就可以计算局部地震震级。对于某个台站，震级评估公式为：

$$M_L = \log_{10}(A) + 1.11 \log_{10}(D) + 0.00189D - 2.09,$$

A 是来自一个地震仪水平位移的最大振幅（nm），其中现代仪器响应

是去卷积的，伍德-安德森（Wood-Anderson）地震仪的数字响应被卷积以模拟这种类型的地震仪的读数。对于 Wood-Anderson 响应，使用 2080 灵敏度和 0.7 的阻尼常数。按照国际地震学和地球内部物理协会（IASPEI）的建议，每一个水平位移都是独立测量的，因此从一个给定的站点可能有两个震级估计值。研究人员将所有这些以 160 km 为半径的观测站震级估计值结合起来，计算出一个中值，即为事件的震级。利用 160 km 的截止距离来避免临界折射距离，其中 Lg 波在约 40 km 厚的地壳中最为突出。台站震级的标准差即为震级的不确定性。单个观测站的震级、事件震级和事件震级不确定性都包含在 QuakeML 目录文件中。

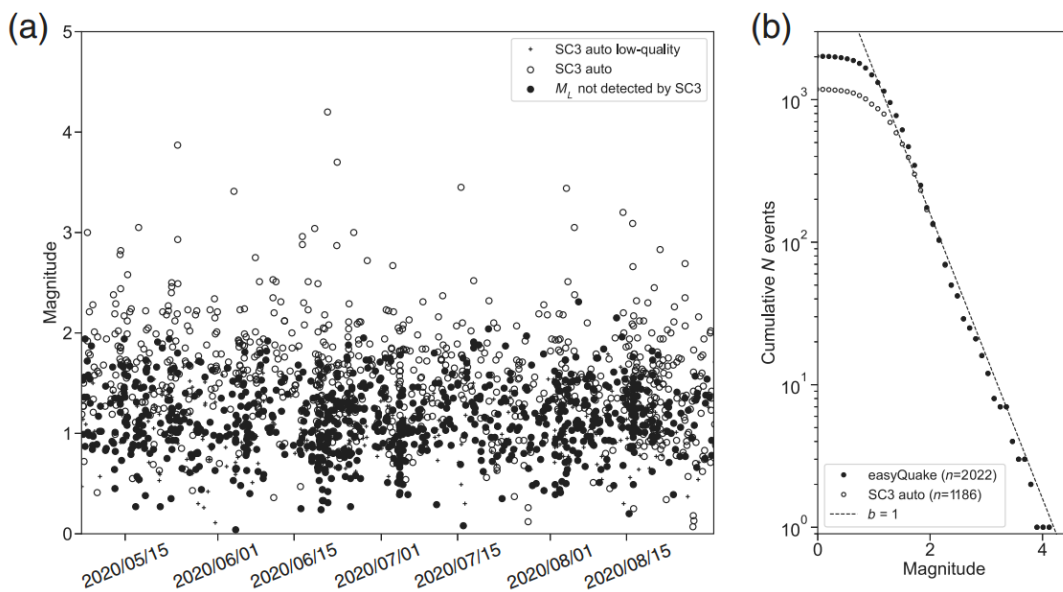


图 1 easyQuake 的表现与俄克拉荷马州地质调查局实时系统 SC3 的比较

进一步的地震分析：在 easyQuake 中加入实用程序，以重新获取 QuakeML 文件并生成运行 hypoinverse 和 hypoDD 所需的文件。此外，在震级分析步骤中，P 波极性可在 P 波拾取时间后通过搜索局部最小值或最大值来估计，但拾取振幅的绝对值要足够长，至少是 P 波拾取时间前 5 s 内地震波形标准差的 5 倍。极性拾取被添加到相关的 QuakeML 文件中，

此外，还包括通过 `hashpy` Python 模块来计算 HASH 震源机制的模块。

研究人员展示了 `easyQuake` 的能力，并证明它增强了俄克拉荷马州地质调查局实时地震网的性能。在俄克拉荷马州，`easyQuake` 增强了实时研究能力，并将探测到的事件数量增加了 2 倍。在另一个案例研究中，研究人员将该工具包应用到爱达荷州中部，在 2020 年 3 月 31 日地震后，探测到的事件多了 10 倍。

尽管机器学习在改善人类对地震的日常分析和增强人类对地震过程的科学理解方面有着巨大的潜力，但仍有必要保持一些谨慎。区域地震台网的作用是提供及时可靠的地震信息。机器学习正处于这样一个阶段，即区域网络应该利用固有的效率来识别可能被噪声掩盖的事件。然而，区域网络是由受信任的组织管理的，这些组织为各种利益攸关方，主要是公众服务。这种信任关系有赖于可靠的信息资源，难以承受错误或虚假信息。当发生大规模或复杂的事件时，必须让训练有素、经验丰富的分析人员和科学家来处理可信的数据，并向公众传播相关信息。尽管机器学习在地震学中的作用似乎是无限的，但这些能力应该与协调一致的专业人员支持和培训相平衡。

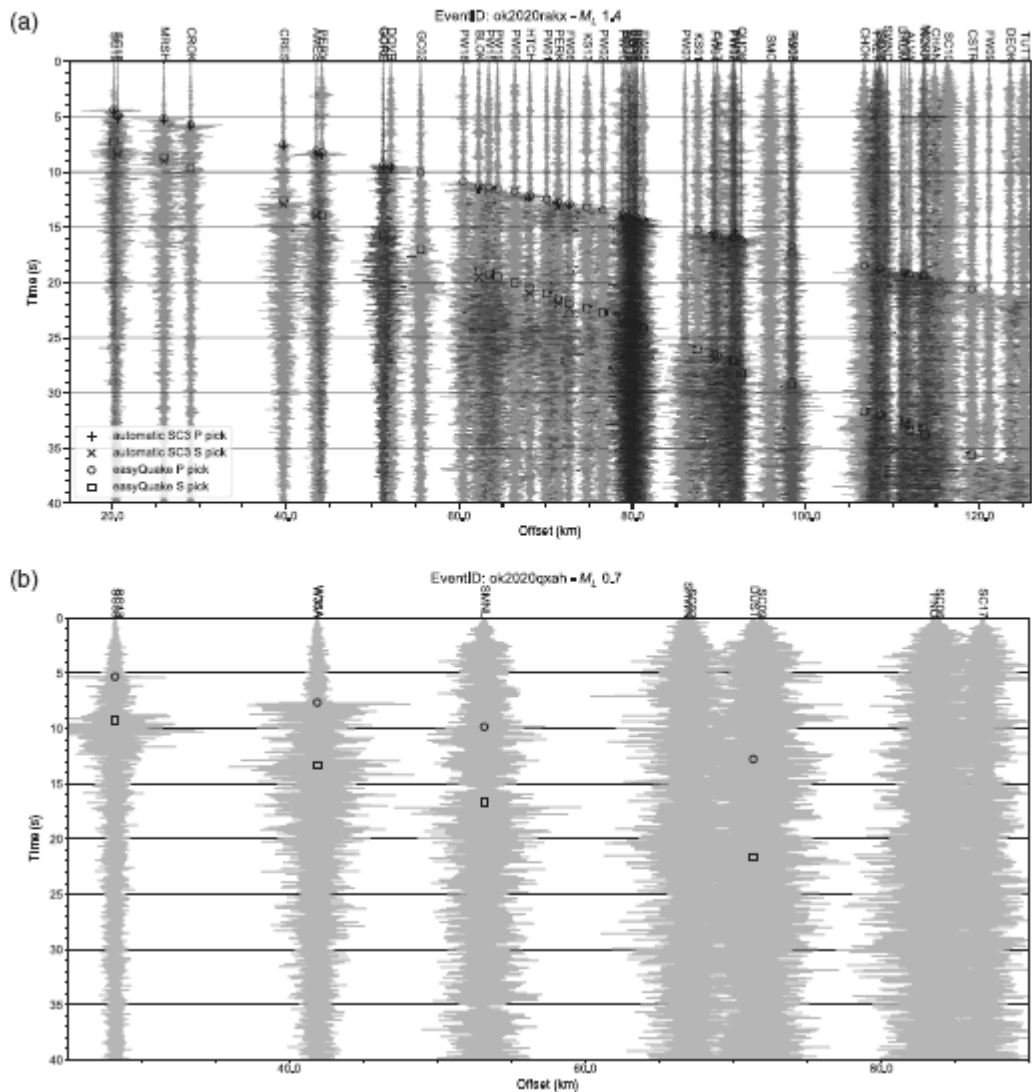


图 2 俄克拉荷马州两次地震事件记录剖面

来源: Walter J I, P Ogwari, A Thiel, F Ferrer. & I Woelfel. easyQuake: Putting Machine Learning to Work for Your Regional Seismic Network or Local Earthquake Study[J]. Seismological Research Letters, 2021, 92: 555–563.

主送: 中国地震局领导

编发: 中国地震局地震预测研究所