

地震科技前沿快报

2019 年第 8 期 （月刊 总第 8 期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震科学实验场

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、新马德里地震带地震预警可行性研究
 - 2、双震带地震活动和几何形态的控制因素
 - 3、圣安德烈斯北部断层剖面图揭示 1906 年旧金山大地震线索
-

新马德里地震带地震预警可行性研究

在过去十年，地震预警系统（EEWSs）的理论和研究方法有了快速发展。其中，包括实时数据分析，改进的遥测和计算机技术的进步，它们正成为实用的实时地震危险缓解的有用工具。该项目的主要重点是从源位置的角度对新马德里地震带（NMSZ）的 EEWS 进行可行性研究。有关震级的确定在另一篇文献中有介绍。NMSZ 覆盖广阔的区域，该区域拥有几个人口稠密的城市，以及距离 1811—1812 地震震中不到 70km 的重要的基础设施。

与 NMSZ 相关的挑战之一是，虽然低到中等水平的地震活动是常见的，但较大的地震是罕见的（在 NMSZ，没有仪器记录到震级大于 M 5.5 的地震）。像在美国西海岸所做的那样，为所有可能的来源提供早期预警可能是不现实的，因此，研究者专注于特定的源区。检查 NMSZ 内的站点以回

答以下问题：“应该对 NMSZ 网络应用进行哪些更改使它适合 EEW？”。

研究者还探索了对于国家地震监测台网系统 (ANSS) 地震实时监控系統 (AQMS RT) 数据采集系统 (DAS) 所需的变化,使其对 EEW 有用。我们的结果表明 EEW 是可行的,尽管在将其用于现有网络上存在一些技术挑战,EEW 仍是可行的。相关成果发表在 2019 年 5 月的 *Seismological Research Letters* 上。

地震的后果可能是灾难性的,因此,科学界一直在努力提高对造成这些灾害的因素的了解,以及如何减轻未来的损害。这需要更多地了解产生地震的机制,提高预测地震后果的能力,扩大减灾方法的使用,以及开发和实施地震预警系统 (EEWS)。对 EEWS 的研究取得了快速发展,并且正在成为实际实时地震防灾减灾的有用工具。EEWS 是集成地震网络和软件的实时信息系统,能够执行实时数据的遥测和分析,在地震发生后数秒内,在由地震产生的破坏性 S 波到达用户之前发出警报信息。伴随着人群的适当培训和预备,EEWS 是由人群减少地震风险暴露的有效且可行的工具。现在,EEWS 的应用正在增加,世界上一些国家已经开发了 EEWS 或即将开展 EEWS 的研究。目前,EEW 在世界各地的几个地震活跃地区运作,如日本、墨西哥、和罗马尼亚。EEW 在美国西海岸各州 (加利福尼亚州、华盛顿州和俄勒冈州) 取得了快速进展,EEW 项目的 ShakeAlert 目前正处于实施阶段。EEWS 还在世界其他地区进行开发和测试,如瑞士、意大利、伊比利亚南部、中国、伊比利亚半岛、韩国。

EEW 算法大致分为三类:现场 (onsite, 单站), 区域 (network based, 基于网络) 和正面检测 (frontal detection), 虽然正面检测是一个区域方法的特例。EEWS 的配置选择主要取决于网络几何和源到站点的距离。在区域 EEWS 中,在给定情况下记录的 P 波地震信号的早期站点的子集 (通常是三到四个站点) 用于从波形的前几秒快速估计源参数,例如地震位置和震级。它还用一些特定区域的已建立的经验地面运动预测方程来预测远处

的地面运动强度，例如峰值地面加速度。在区域背景下，从网络获取新数据时，源参数的连续更新和精确估计被实时放出，前提是提前期（警报和目标站点处的破坏性地震波到达的时间差）相对较长。在正面探测中，研究的目的是已知产生强烈地震活动的特定区域，并且仅推断出震级。对于现场 EEWS，记录的 P 波信号的早期部分的峰值和/或主要周期通常用于预测相同位置处随后的峰值地面运动。大多数 EEWS，无论是运营还是开发，使用 Nakamura 等人开发的现场方法或现场和基于网络的区域方法的组合。

EEW 的大多数方法都做了假设，由于这些假定不足以描述震源和波幅的衰减关系而对位置和震级的预测上产生偏差。迄今为止的最佳实践是使用在网络站获得的过去强烈地震的记录，并使用离线分析来研究系统快速估计源参数的能力。在这项研究中，研究者专注于使用新马德里地震台网（CNMSN）对 EEWS 进行源位置可行性研究，以确定应该对 CNMSN 做出哪些改变以使其适合作为 EEWS？总体目标是确定当前 CNMSN 站分布，该分布将最大化警告时间并识别目标区域。同时，研究者特别分析了现有实时系统的冗余问题、网络覆盖、数据处理和时间延迟。然后，评估了系统的理论性能，以估计新马德里地震带（NMSZ）的预计提前期，并根据当前的网络架构，确定此类系统在该区域的适用程度。

研究者首先对 NMSZ 进行介绍并提出关于该地震带的主要问题来源于三个关键因素：①由于该地震带历史地震数据的模糊性，地震危险性估计没有很好的约束；②与美国西部的地震相比，新马德里地震带的衰减较小；③地面运动的放大率较高，尤其是疏松沉积物之间的低振幅、长周期运动。接着介绍了 CNMSN 的台站分布和特点，如图 1 所示。然后，从技术可行性、网络数据包长度和延迟、网络优化、地震台站模拟、警告时间、目标提前期、盲区等方面讨论了 NMSN 对 EEW 的适应性，评估现有的网络能力，找出发震中的台站空白区域和量化措施，对 CNMSN 进行改善。

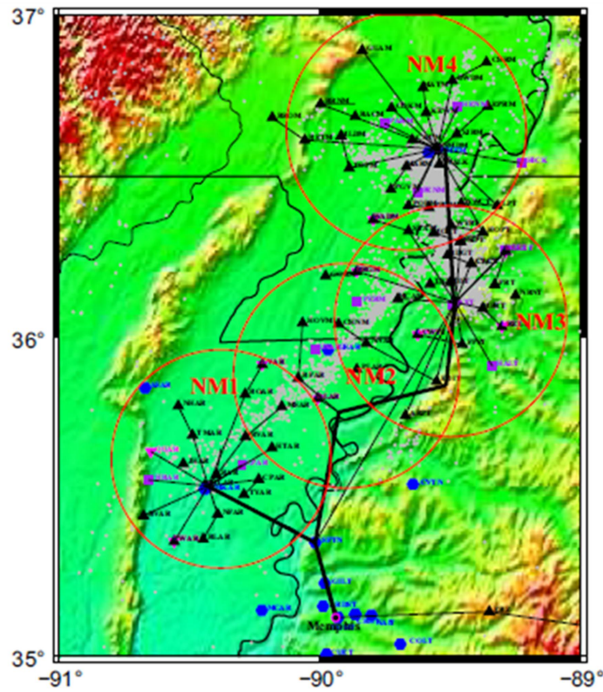


图 1 NMSN 的台网分布

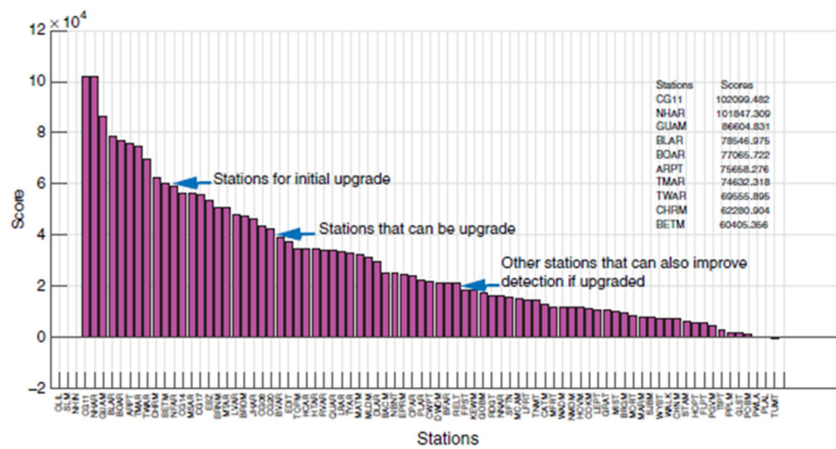


图 2 NMSZ 内的数据延迟

NMSZ 可以为 EEW 系统做好技术准备。NMSZ 内的大部分 BB 和 SM 地震台符合 Auclair 等人表 1 (2015) 的基本技术要求, 因为大多数这些站都用于 NMSZ 内的常规实时事件检测、位置和地震警报。推荐的技术要求不是全球性的, 但可以随着实施 EEW 来改进。一些通过更新来适应标准的 SP 台站已经被确定, 并且根据每个站台的改进分数进行了排名, 如图 3 所示。同时还需要安装必要的软件, 添加新的台站, 并添加计算机硬件,

以满足 EEW 系统标准。

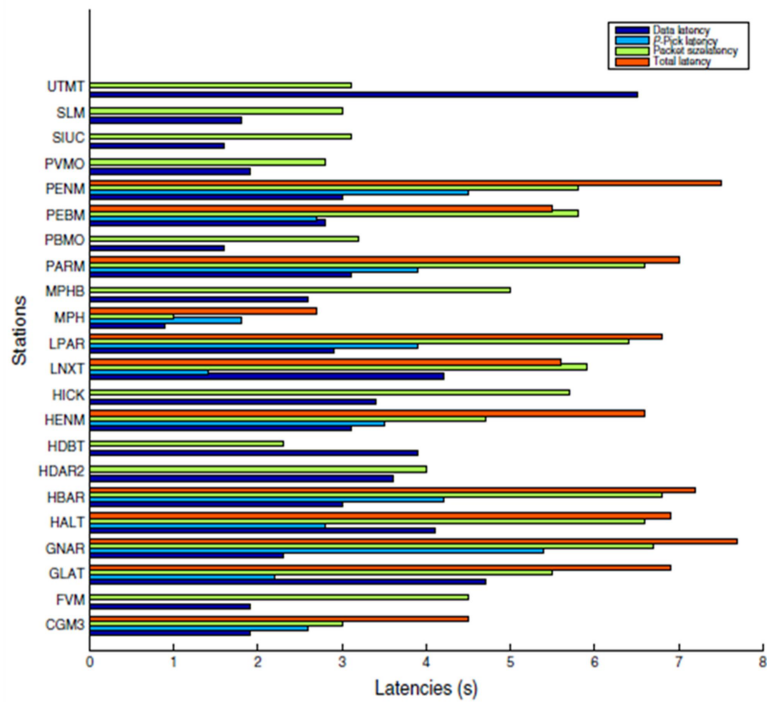


图3 可以升级的 SP 站

数据包长度和遥测数据延迟一起给出了 NMSZ 网络中的总遥测延迟时间，对于 NMSZ 网络中的 31 个 HHZ 和 HNZ 信道，平均延迟时间为 2.8 秒。对于所分析台站的 P 点（P 波）的延迟为 3.5 ± 1.32 秒。

研究者使用 TMS-ETAS 模型来计算事件发生的概率，背景网格大小设置为 0.05，并应用 2D Voronoi 图估计新安装的地震台站的近似位置，以将台站密度增加到大约 20km。通过目前的 22 个 SM 和 BB 站，选择 25 个 SP 站进行升级，并根据给定台网发生地震的概率增加 19 个新站，以在整个 NMSZ 实现小于 20 km 的台站密度。

从经济上来讲，为所有 CEUS（美国中部和东部）或所有 CUSEC（美国中部地震联合会）的州提供 EEW 覆盖是不可行的。相反，研究者建议关注已知的震源区，如 NMSZ、田纳西州东部地震带、沃巴什谷地震带等。

来源：Ogweno L P, Withers M M, et al. Earthquake early warning feasibility study for the New Madrid Seismic Zone. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(3): 1377-1392.

双震带地震活动和几何形态的控制因素

双地震带是俯冲带普遍存在的特征，其中地震活动沿两层分布，其间由一个地震活动明显较少的区域隔开。脱水脆化被认为是造成俯冲地壳（上层）地震的原因，但岩石圈地幔（下层）的地震机理则不太清楚。研究人员应用最近开发的相对再定位技术来表征 32 个板块的地震活动性。高精度的震源深度能够使研究人员区分地震事件发生在哪一层，并分别估计每个层的地震频率大小分布。研究人员在上层找到了一致的较大的 b 值，并与板块年龄相关，而下层具有一个大致恒定的值。研究人员还发现，热参数和板块年龄是双地震带几何形状的关键控制因素。结果表明，俯冲带的下层相对较干，同时，岩石圈地幔具有截然不同的地震机制。相关研究成果于 2019 年 4 月发表于 *Geophysical Research Letters*。

双地震带（DSZs）是俯冲板块地震活动的共同特征。多项研究表明，俯冲岩石圈中的地震聚集在两个不同的层，最终在深处融合。两者之间的区域几乎没有地震活动，它们的平均间隔与板块年龄相关。位于上部地震层（USL）的地震发生在俯冲洋壳或最上层的地幔内，而下部地震层（LSL）似乎位于俯冲岩石圈地幔中。一般认为 USL 中的地震活动是由于地壳或最上层地幔中的脱水反应引起的流体超压。相比之下，LSL 中的地震活动机制更具争议。最近，实验室和野外的的工作表明，在干燥条件下可能发生中等深度的断层活动，但同时，部分含水的岩石圈地幔可能通过部分含水的最上层地幔中的脱水反应所驱动的应力传递机制产生破裂。

水渗透进入俯冲地幔的可能途径是通过海沟处的断层和板片弯曲，尽管水能够渗透的深度和这种机制的普遍程度仍然存在争议。在 LSL 中常发现， V_p 异常降低；在某些情况下，没有观察到高度蛇纹石化的地幔或流体饱和岩石的高 V_p/V_s 比值，而其他结果则指向含水的岩石圈地幔。无水橄榄岩的各向异性可以为推断的地震速度异常提供更好的解释，对触发机制

具有额外的限制作用：必须在相对干燥的条件下进行。因此，由热剪切失稳驱动的脆性破裂也是可行的，并且更可能用于 LSL 中的地震解释。

已知流体（或其他因素）的存在（或不存在）会影响俯冲带中小地震和大地震的相对数量，即地震活动频率大小分布中的 b 值；小的 b 值意味着相对大量的大地震。在阿拉斯加、新西兰、日本和圣安德烈斯，高的 b 值异常区在板块顶部呈现牛眼形状，并与预期脱水反应的区域相关。此外， b 值测量已成为火山弧下流体存在的标志。研究人员系统地应用 Florez 和 Prieto (2017) 提出的再定位方法来生成一个新的全球中间深度的地震活动目录。这个数据集使研究人员能够研究 32 个板块，它们具有广泛的俯冲板块物理条件、板块年龄、汇聚速度和热参数。基于此，研究人员分析了 DSZs 的宽度和深度范围与俯冲板块的物理性质之间的关系，并分析了 USL 和 LSL 在生产率和频率大小分布方面的地震活动的统计行为。

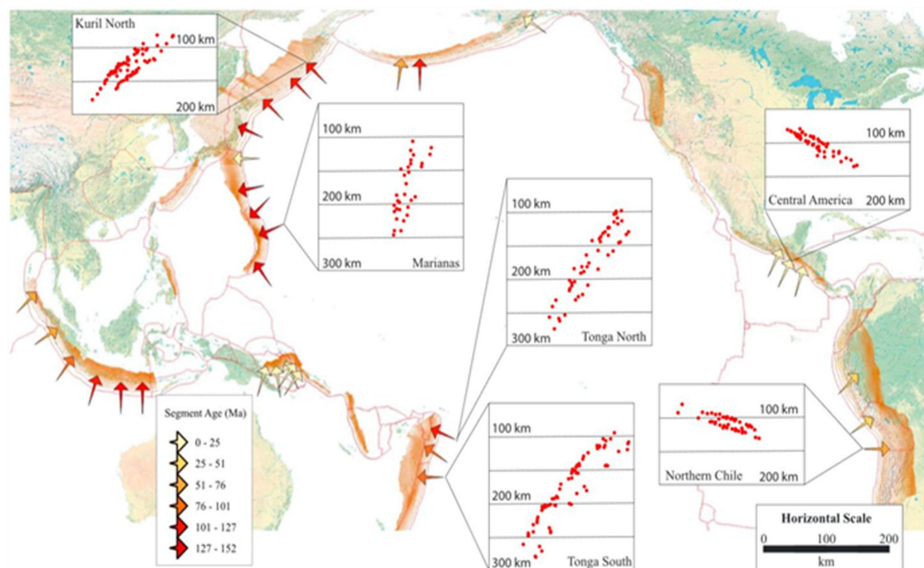


图 1 全球主要俯冲带

DSZs 的宽度从几公里到大约 40 公里不等。与此长度尺度相比，全球地震活动目录中的典型位置误差可能非常重要。由于良好的方位角覆盖，但缺乏垂直分辨率，全球目录中的大多数地震事件的震中位置都具有很好

地限定，但是震源位置很难确定。为了克服这些限制，研究人员使用了 Florez 和 Prieto (2017) 开发的算法，并在全世界应用这种技术，选择了尽可能多的发生大的中等深度地震的窄而平滑的板块。对每个主要的俯冲带和整个板块年龄进行采样，所分析的每个区段显示清晰的双震带，容易观察到宽度和深度范围的显著变化（图 1）。

早期的工作使用全球目录来统计评估 DSZ 的存在。通过在板块下倾方向上取小段并旋转它们的地震活动，可以测试所获得的图形是否可以通过双峰高斯分布来实现。如果是，则双震带的宽度简单地估计为高斯峰之间的距离。然而，这个想法只允许推断 DSZ 的存在。新的地震目录具有足够的分辨率，可以系统地探索控制 DSZ 几何形态的因素，并将地震活动分为属于上层或下层的地震。使用双峰高斯滤波计算起始 DSZ 宽度。基于该初始宽度和两个峰值的位置，对 USL 或 LSL 进行事件的初始分配。然后，使用平滑样条插值分别分配两层地震活动。迭代地执行该过程。

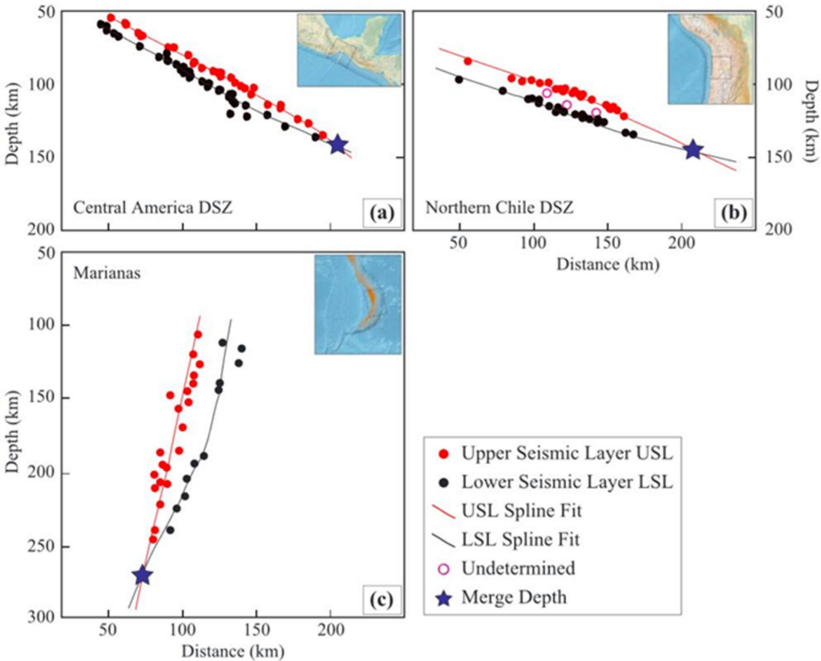


图 2 三个地区双震带的宽度与深度以及 USL 和 LSL 的区分

研究人员根据两个变量分析 DSZ 几何形态：深度范围和宽度。深度范

围对应于两个样条曲线相交的深度。为了确定 DSZ 的宽度，研究人员估计它们在板块法线方向上的平均距离。将宽度的结果与双峰高斯地震活动的结果进行了比较后发现，它们具有极好的一致性。再定位的地震目录提供了 DSZ 普遍存在的强有力证据，以及 DSZ 宽度和板块年龄的强相关性(图 3)，这与之前的工作一致。实际上，诸如热参数、沟弧距离和会聚速度之类的变量与 DSZ 宽度不相关。这有时可以通过板块的水化深度来解释，其受到板块温度和含水相的稳定性的限制。相反，深度范围主要由热参数控制。后者的结果类似于汤加和其他俯冲带的结果。

计数事件可能不是最有用的地震活动统计特征，每个地震的大小也需要考虑。研究人员对尽可能多的不同区域，针对 USL 和 LSL 独立地进行频率-幅度统计。为了获得有意义且稳健的统计数据，将附近的板块区段和单独的事件分为两类：属于 USL 和属于 LSL。如果两个类别中每个类别的事件总数超过 100，计算两个 b 值。在尽可能多的不同区域获得 USL 和 LSL 的独立 b 值测量。每个区域的年龄简单地计算为它包含的区段的年龄的算术平均值。结果发现，USL 的 b 值总是比 LSL 大得多。USL 的 b 值与板块年龄正相关，类似于浅俯冲带地震的板块年龄和 b 值之间的强相关性。相比之下，LSL 的 b 值基本保持不变，平均值约为 0.8。以前的研究发现，一些板块顶部附近存在较大的 b 值异常，这些差异是系统的，可能受一些物理参数控制，并且是一个全球特征。最近在日本的工作表明，在北海道沿着 USL 显示较大的 b 值，但在东北地区有较低的 b 值。这一研究并没有足够高的分辨率比较每个分段，但指出了 USL 和 LSL 之间 b 值的全球系统行为，且具有很大的差异。

明确定义 DSZ 几何形态的能力使研究人员能够将地震分布到 USL 或 LSL。一些报告表明，与上层相比，下层的地震活动率，即每年地震的数量要小得多。本研究为这一观察提供了部分解释：板块的热参数对相对地

震活动率具有重要控制作用。较冷的俯冲板块显示出较高的 USL 地震活动率。较温暖的板块表明两层的地震活动率大致相等。之前的研究表明，高 b 值异常与预期脱水反应的区域或存在大量流体的断裂带有很好的相关性。因此，沿着俯冲带的 b 值提供了对流体含量的间接评估。相对干燥的岩石圈地幔可以解释观察到的始终较小的 b 值。这对于中等深度地震的机制具有重要意义，部分学者认为这是一系列脱水反应的结果。

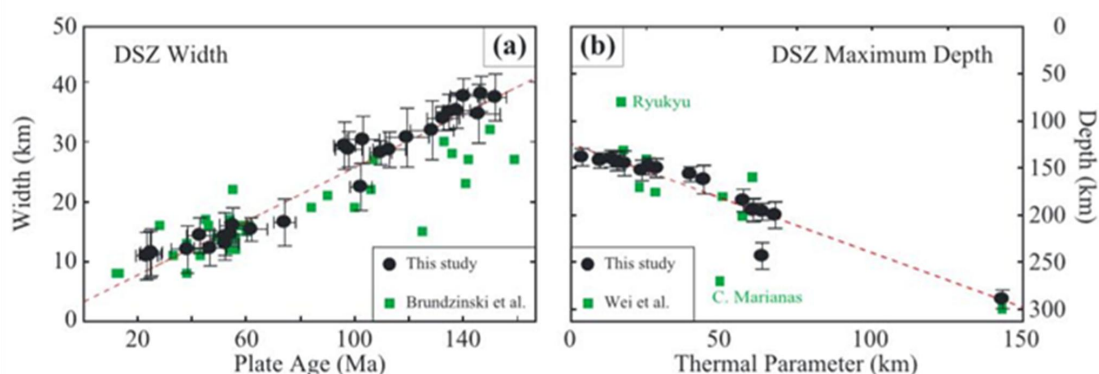


图3 全球范围内双震带宽度与板块性质的关系

脱水引起的流体超压与 USL 中观察到的较高 b 值一致，但不太可能在触发下层地震活动中发挥重要作用。研究表明，中等深度的地震发生的岩石圈地幔是干燥的。这与最近在实验室和野外观察到的情况一致，即在部分水化的地幔岩石中破裂发育在干燥的岩石中。地幔内破裂通过脱水驱动的应力传递诱发，而且不需要高度水化的岩石圈地幔。事实上，如果岩石完全水化，应力传递机制就不再起作用。然而，不能完全排除不需要高度水化岩石的其他机制。需要进一步的实验、观察和计算来细致了解导致 LSL 地震的过程。无论实际机制是什么，系统 b 值差异表明，存在能够诱发岩石圈地幔地震的一个根本不同的过程。

来源：Florez M A. & Prieto G A. Controlling factors of seismicity and geometry in double seismic zones. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46:4174–4181, Doi:10.1029/2018GL081168.

圣安德烈斯北部断层剖面图揭示 1906 年旧金山大地震线索

根据《美国地震学会通报》(BSSA) 2019 年 3 月发表的一项研究, 美国地质调查局 (USGS) 的科学家在圣安德烈斯北部断层的一张新的高分辨率剖面图中发现了 1906 年旧金山地震的迹象, 并可能提供断层在未来如何破裂的一些线索。这张剖面图的制图范围是 Tomales Point 和加利福尼亚州 Fort Ross 之间 35 公里长的断层。

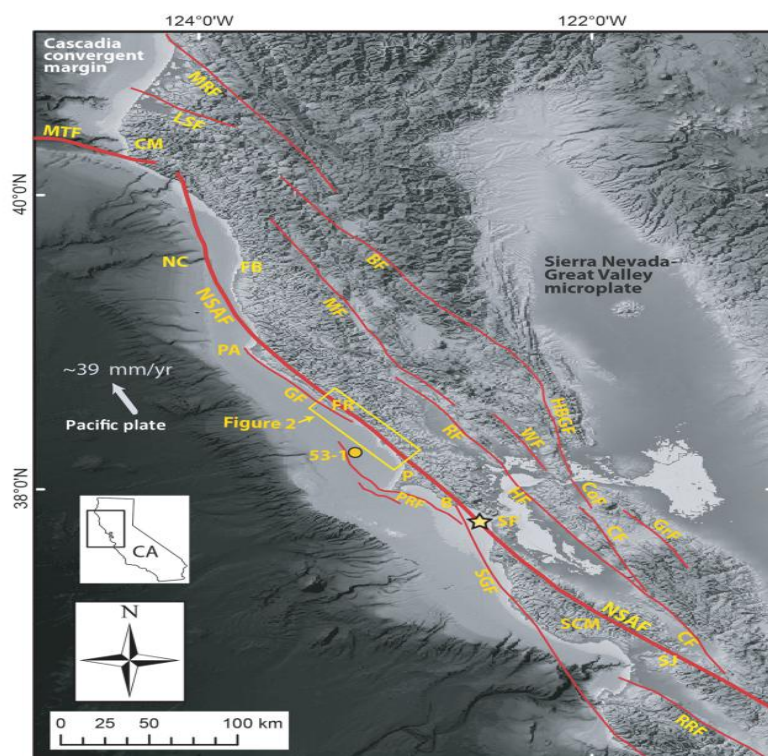


图 1 北加州索引图显示的北圣安德烈斯断层、区域断层及本研究的区域 (标识 Figure2)

研究人员在俄罗斯河 (Russian River) 近海的海底发现了两个大的区域, 每个区域大约有两平方英里的边坡失稳, 这标志着 1906 年地震的剧烈震动导致砂土液化形成了裂片。同时, 该剖面图还表明, 在博德加湾 (Bodega Bay) 北部有两条活动断层, 每条断层在过去一万年里移动了数十米。

该研究的领导者、USGS 的研究地质学家 Samuel Johnson 表示, 这些调查结果不会影响他们对圣安德烈斯北部断层复发间隔或滑移率的认识,

但会影响他们对圣安德烈斯北部断层破裂的理解。虽然圣安德烈斯断层的其余部分已经成为研究地震的天然实验室，但人们仅在过去 8 年里对圣安德烈斯断层的北部近海区域进行了深入研究。因此，对于研究不多的北方区域，研究人员一直在等待高分辨率技术和工具来对其进行观察。

研究人员使用了由几种技术提取的数据，包括高分辨率地震反射剖面和多波束测深，这两种技术都使用多个定向声波来对海底上或海底下的地层进行成像。作为制定海洋保护区监测战略工作的一部分，一些水深数据的收集由加利福尼亚海洋保护委员会（California Ocean Protection Council）提供资助，同时，为了改进航海图，美国国家海洋与大气管理局（NOAA）也提供了资助。

研究人员幸运地在液化裂片消失之前看到了它们，因为有些特征已经被 1906 年后的沉积物所抹平。研究发现，这些液化裂片与 1980 年加州北部 7.2 级尤里卡地震期间克拉马斯河（Klamath River）三角洲近海的地面破坏类似。Johnson 称，这是一项非常有趣的发现。其次，还有一些其他发现，如断层的运动如何影响陆上景观，包括海洋梯田的隆起以及海滩和沿海沙丘的快速形成等。

来源：Samuel Y Johnson. & Jeffrey W Beeson. Shallow Structure and Geomorphology along the Offshore Northern San Andreas Fault, Tomales Point to Fort Ross, California. Bulletin of the Seismological Society of America, 2019, Doi:10.1785/0120180158.

Signs of 1906 earthquake revealed in mapping of offshore northern San Andreas Fault.

https://www.eurekaalert.org/pub_releases/2019-03/ssoa-so1032719.php

主 送：中国地震局领导

联 系：中国地震科学实验场管理部 Email:sycglb@ief.ac.cn