

地震科技前沿快报

2021 年第 10 期（月刊总第 34 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、2011 年东日本大地震十年研究回顾
- 2、基于暗光纤 DAS 探测区域地震阵列
- 3、印度国家地震网的实时地震监测

2011 年东日本大地震十年研究回顾

2021 年 3 月，日本海洋-地球科学与技术研究中心（JAMSTEC）的研究人员在 *Science* 发表文章，总结分析了 2011 年东日本大地震以来所取得的研究进展，并对未来的地震风险进行了分析。

自 2011 年东日本大地震在日本海沟（太平洋板块在大陆板块之下俯冲）发生以来，10 年过去了。地震和海啸给日本东北沿海地区造成了巨大破坏，当地社区仍在恢复中。在日本中部和东北部 530 km 的海岸线上发现了高出海平面 10 m 以上的海啸痕迹，在东北地区约 200 km 的海岸线上发现了 20 m 以上的隆起。海啸淹没了 561km² 的区域，东北地区北部的隆起高度最高达 40 m。这些数据使其成为历史文献和地质记录中最大的海啸之一。

地震发生时，附近有世界上最密集的地震、大地测量和海啸观测网，

清楚地记录了地震带来的巨大地球动力学效应。此外，在地震前后，还在断裂带的近海区获取了地球物理和地质数据。这些海洋观测数据是决定性的、真实的地球运动数据，表明有些地方的地震滑移超过了 50 m，而且，断裂到达了俯冲带逆冲断层的最浅处。

全球卫星导航系统（GNSS）与声学技术联合提供了地震前后的海底大地测量数据，这些数据显示，震中附近的海底向东南方向发生了 31 m 的同震位移，并有 3 m 的隆起。对比地震前后的海底差分测深图，可推断出，海沟轴线处的地震位移超过 50 m。一个快速响应的深海钻探项目成功地在海沟附近的板块边界断层上采集了地震破裂带的物质，并测量了同震滑动期间断层摩擦加热引起的热异常。结果表明，板块边界处的断层富含软弱的粘土，并且黏土层内的热增压促成了异常大的同震断层滑移。这些真实数据为约束俯冲带浅部的滑动行为提供了证据。在确定地震滑移特征方面亦取得关键进展，相关证据证明了海沟附近同震滑动的横向变化，以及控制横向变化的可能构造因素。

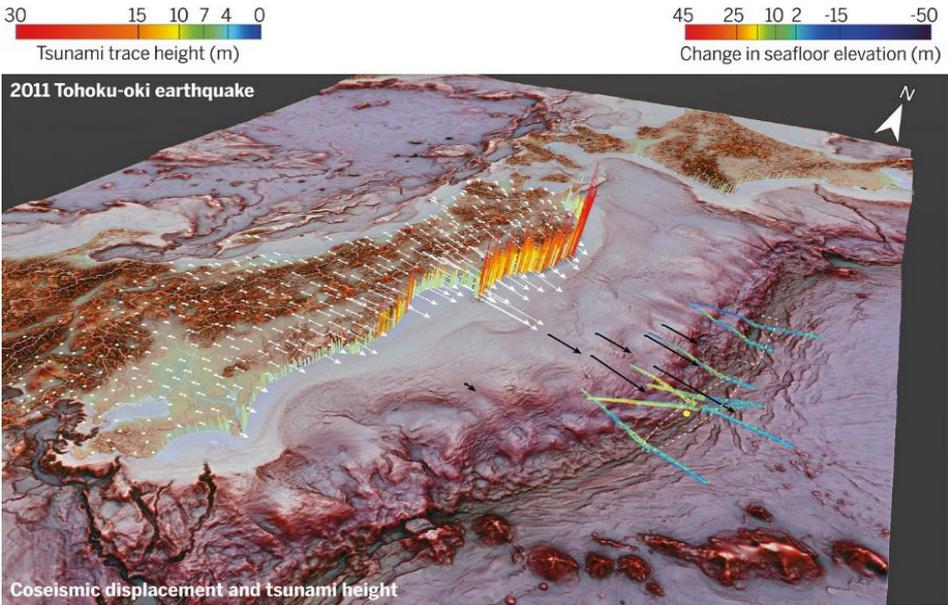


图 1 2011 年东日本大地震的同震位移与海啸高度

地震发生 10 年后，日本海沟的地壳形变（包括地幔的后滑和黏弹性松弛），仍在继续。黏弹性松弛主要发生在海沟的中部，大的同震滑动延伸到海沟。松弛作用使该海底向西移动，而后滑作用则使其在主破裂带附近向东移动。这些观测结果，加上大洋板块的正断层的余震活动，表明海沟的正延伸仍然存在于大洋板块和主破裂带的向海方向。

近期，日本海沟再次发生大地震（震级 ≥ 9 级）的概率很低，但即使在东日本大地震发生 10 年后，东日本的地震活动，包括海沟外坡和主破裂带周边地区，仍高于震前。以往的观测表明，在板块边界大地震之后，大洋板块的大型正断层可能发生地震。因此，有必要进一步研究日本海沟周围应力状态的时间变化，以评估发生这种“后续”地震的可能性。

来源：Reviewing a decade of research on the 2011 Tohoku-oki earthquake

https://www.eurekalert.org/pub_releases/2021-03/aaft-rad030821.php

Investigating a tsunamigenic megathrust earthquake in the Japan Trench

<https://science.sciencemag.org/content/371/6534/eabe1169>

基于暗光纤 DAS 探测区域地震阵列

分布式声学传感技术 (DAS) 所固有的阵列特性使其可利用传统地震检波器阵列中常用的波束成形技术, 来增强来自遥远地震事件的弱地震相和相干地震相。在加州北部的萨克拉门托盆地 (Sacramento basin), 美国莱斯大学的研究人员利用波束成形技术检验了暗光纤 DAS 探测小地震信号的能力, 这些地震发生在距 DAS 阵列 100 km 以外的间歇泉地热田。为了充分利用大孔径的优势, 研究者将约 20 km 的 DAS 光纤分成约 1.5~2.0 km 的 8 个子阵列, 并采用相位加权叠加法对每个子阵列独立进行波束成形。通过分析连续 45 天的 DAS 数据, 发现 DAS 能够检测 2.4 级以上的所有地震, 而更小震级的地震则很少能检测到。相比而言, 单一宽频带地震检波器不能检测到 2.4 级以下的任何地震。结果表明, DAS 通过波束成形在检测局部和区域小地震事件方面具有重要潜力。相关成果发表在 2021 年 7 月的 *Seismological Research Letters* 上。

地震相位到达的检测通常是地震学研究的第一步。近些年来, DAS 彻底改变了获取密集、宽频带和连续的长期地震动记录的能力, 这些记录的空间分辨率为几米, 检测距离可以达到几十公里。在美国广泛分布的暗光纤可以被用来进行地震检测。一些研究已经证明, 使用 DAS 可以获得一系列震级和距离的高保真地震记录。加州北部的间歇泉是世界上最大的综合地热发电厂, 为了获取火山岩储层中的热量而注入的废水导致了微地震活动水平 (震级小于 3) 的升高。微地震活动的详细表征对于了解和表征诱发地震活动的机制和危害, 以及地热资源的监测至关重要。

研究者将 20 km 长的 DAS 光纤分为 8 个子阵列, 从几个大震级事件

的波形分析中选出一个特定速度范围对连续 DAS 数据进行波束成形。多个子阵列的 STA/LTA (Allen, 1978) 被同时触发时, 则推断为由真实地震引起的信号。然后, 将结果与位于 DAS 阵列附近的单个宽频带传感器的数据进行比较。

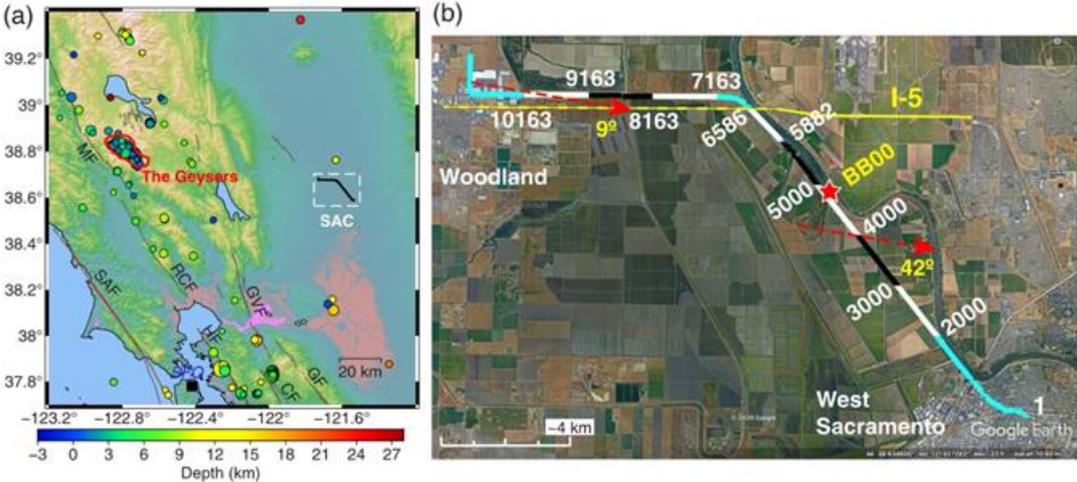


图 1 a: 研究区地震构造图;

b: 青色线段是 DAS 阵列, 交替的白色和黑色线段是用于波束成形的 8 个子阵列

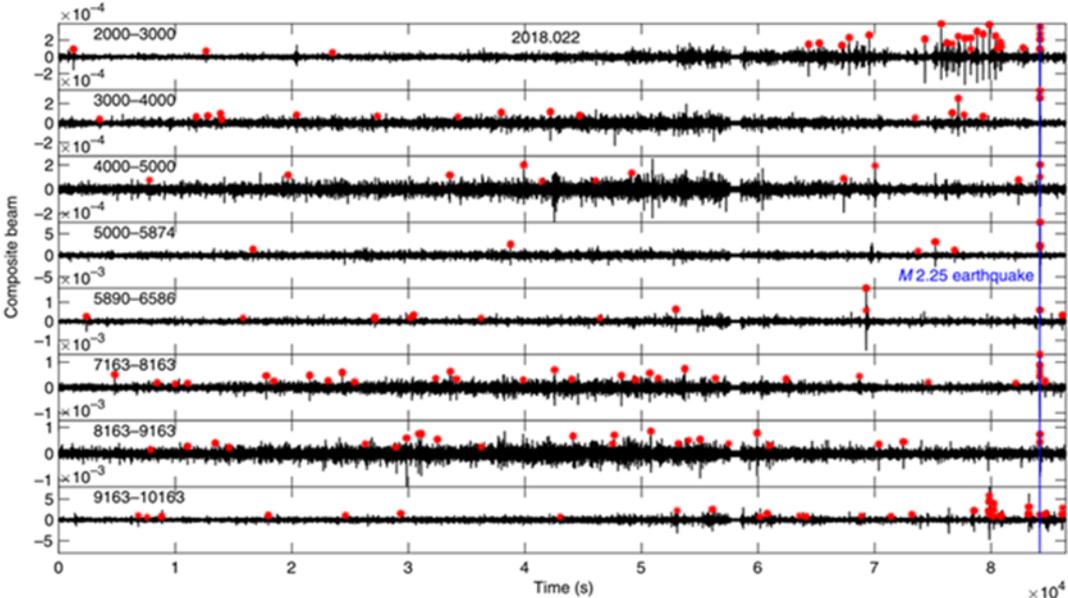


图 2 2018 年 2 月 2 日 8 个子阵列的复合波束 (黑色波形)。红星表示每个子阵列的单独检测结果, 蓝线表示满足多个子阵列共同触发条件的最终检测结果

图 2 比较了 2018 年 2 月 2 日各个子阵列的复合波束。结果表明，在许多子阵列中存在大量大幅度瞬变。低检测阈值造成大多数子阵列均出现大量触发。为了利用大孔径产生的多个子阵列，研究者采用一个标准，即五分之三的南东-北西向段的子阵列和三分之二的东西向段的子阵列在 15 秒内同时触发才代表了可靠的地震检测。这种使用多个子数组的叠加方案是减少假触发的关键。因为，导致误检的人为噪声源很可能只会被定位在一个或两个子阵列上。应用这一准则，全天只有一次有效的探测，对应的是间歇泉的一次 2.25 级地震。此外，与东南-西北段相比，东西向段的主要面波到达和探测通常延迟约 10 秒，说明在两个方向上，最大应变率对应的面波速度略有不同。

实验共观测到 40 次地震事件，其中 27 次是在间歇泉内或者周围（图 3）。图 3a 表示了 NCSN（北加州地震网）地震目录中以及 DAS 检测的地震与震级之间的函数关系。即使有 100 km 的距离，DAS 也能够检测到所有 2.4 级以上的地震。此外，DAS 还检测到 NCSN 目录中的 4 次 2.3~2.4 级的地震（总共六次）。而 2.3 级以下的地震很少检测到。检测到的间歇泉范围之外的地震主要位于 170° ~ 300° 的后向角之间（南-北西方向）。与传统的二维地震检波器阵列相比，萨克拉门托 DAS 阵列的方位角控制相对较差，这并不奇怪，因为它只有两个不同方向的线段，相对方位角约为 50° 。对于选定的滞后范围和 STA/LTA 参数，在实验周期（45 天）内，没有任何非地震导致的错误检测。这证明了密集空间采样（~2 米）、大孔径（~16 km）和 DAS 剖面的子阵列处理的好处。

为了比较单宽频带地震检波器和 DAS 在地震探测中的表现，研究者首先计算了相同探测意义下的等效 STA/LTA 探测阈值。对于 DAS 子阵列，

检测阈值为 5~6 时 STA/LTA 特征函数的中位数、MAD 和检测意义分别为 0.89, 0.31 和 12~16。而对宽频带地震仪来说, 这些值分别为 0.98, 0.17 和 3.6。与道路附近的 DAS 阵列类似, 单宽频带地震仪白天也会记录相当大的人为噪音。研究者在 2018 年长达 36 天的时间里, 对宽频带台站的约 200 个探测结果进行了逐一调查。结果表明, 远震 P 波 (20 次) 的触发次数大约是 DAS (7 次) 的 3 倍, 这表明宽频带传感器的垂直分量对垂直入射纵波更敏感。

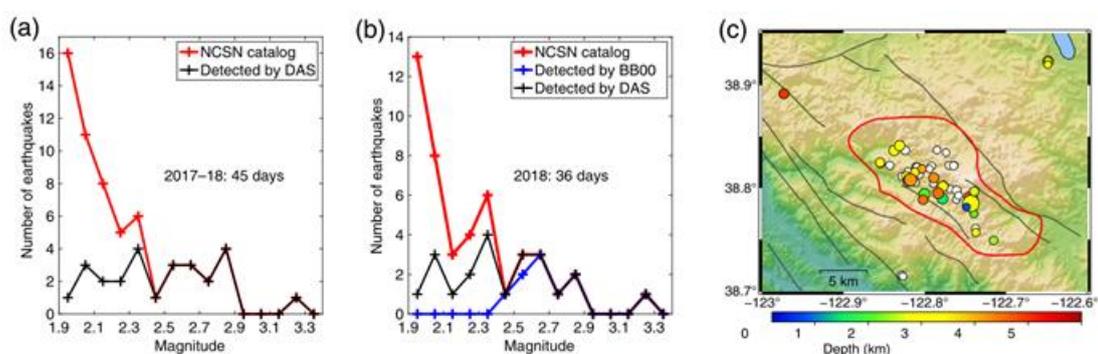


图 3 a: NCSN 目录和 DAS 检测到的地震; b: 增加了宽频带台站的检测结果; c: 研究期间间歇泉附近的地震; DAS 检测到的地震为彩色, NCSN 目录中存在但 DAS 没有检测到的标记为白色

然而, 宽频带传感器上约 80% 的探测结果, 与美国地质调查局地震目录中的任何 $M \geq 4$ 级地震或 NCSN 目录中的任何 $M \geq 1.5$ 级地震都没有明显的相关性。研究者将其解译为错误的检测。这些检测中有许多明显和与 DAS 阵列平行的轨道上运行的列车相关。图 3b 比较了 2018 年 36 天内由单一宽频带台站和 DAS 阵列探测到的间歇泉地震数量。宽频带台站没有检测到 DAS 阵列漏掉的任何发生在间歇泉或附近的地震。此外, 宽频带台站没有检测到 DAS 检测到的一次 2.5 级地震和小于 2.4 级的地震。

用于关联多个子阵列检测的叠加方案、STA/LTA 窗口长度和检测阈值是需要考虑的重要参数。对 DAS 阵列而言, 地震检波器阵列的一些经验

法则也是有效的。**STA/LTA** 窗口的长度取决于信号的频率和研究区环境噪声的特性。较低的 **STA/LTA** 检测阈值会导致检测到更多的地震，以及更多的误检。更大的阵列孔径有助于减少局部相干噪声造成的误检。**DAS** 的独特之处在于，随着询问器（**interrogator**）沿光纤的距离增加，光学噪声会增加，导致信噪比降低，地震信号的灵敏度降低。对此，东西向子阵列的低 **STA/LTA** 检测阈值可以解释其较弱的信号强度。

研究者将波束成形应用于由暗光纤 **DAS** 阵列记录的连续数据，以探测距离约 **100km** 的间歇泉地热田的地震。整体结果表明，波束成形能够增强小地震的面波信号，并且改善信噪比。**DAS** 阵列得益于密集采样、大孔径和不同方向的子阵列存在，在多个子阵列上的同时触发有助于避免局部噪声源造成的误检。与安装在嘈杂环境中的单一宽频带传感器相比，使用 **DAS** 波束成形能够检测更多的小震级地震，而且由于地震噪声造成的误检更少。**DAS** 阵列还可以与区域地震台网结合，进行地震探测和定位。**DAS** 阵列在地震阵列探测中还有其他明显的好处，所有通道与单个记录设备的内在连接，消除了没有中央时钟（**central clock**）的传统地震阵列有时出现相对时间错误的可能性。美国庞大的暗光纤网络使得将地震阵列分析扩展到城市地区或新地区（缺乏传统地震网络的仪器）成为可能。

来源：Nayak A, J Ajo-Franklin. & the Imperial Valley Dark Fiber Team. Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Array Detection of Regional Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 2021, 92: 2441–2452.

印度国家地震网的实时地震监测

印度国家地震网 (NSN) 有超过 120 年的历史, 在过去的 20 年中, NSN 经历了明显的现代化, 包括配备宽频带地震仪 (BBS) 和强震加速度仪 (SMA) 的地震台站的建设。每个台站都有一个超小孔径终端连接, 用于将数据实时传输到新德里的中央接收站 (CRS)。所记录的地震数据在 24×7 的基础上连续分析, 以监测印度及其邻近地区的地震。在本文中, 研究人员展示了: BBS 与 SMA 地震网的详细信息; 从野外地震台站到 CRS 的数据流; 以及地震参数的自动和人工发布, 包括位置坐标、震源深度、发生时间和震级。此外, 还提供了具有历史意义的模拟地震图和地震目录的详细信息, 其中包括自 1505 年以来 M_w 1.7~9.3 的 34000 多个事件。印度国家地震网在过去的几年得到了强化, 并具有了在 5~10 分钟 (平均 8 分钟) 评估主要地震震源参数的能力。近几十年来, 最小震级检测能力显著增强。相关研究成果于 2021 年 7 月发表在 *Seismological Research Letters*。

印度次大陆的构造非常复杂, 常被划分为三个地形单元: 喜马拉雅、印度-恒河平原以及印度半岛。喜马拉雅地区由于印度-欧亚大陆碰撞成为地震活跃区。这一碰撞发生在大约 55 Ma, 在 40 Ma 完成, 不仅导致了喜马拉雅山的形成, 也形成了沿其边缘长达 2500 km 的活动地震带。并且, 从西北的克什米尔喜马拉雅到东北的阿鲁纳查喜马拉雅 (Arunachal Himalaya) 具有发生大地震的可能性。在过去的 120 年, 喜马拉雅山几乎有一半的地方发生过破裂, 其中在 1897、1934 和 1950 年都发生了大地震, 这些地震导致了大量的经济损失和人员伤亡。

根据地震活动以及地质和构造背景, 印度标准局在印度划分了四个地震等级: II-V。Indo-Burmese 弧和 Andaman-Nicobar 岛的地震活动与印度板块在 Myanmar 微板块之下的俯冲有关, 使这一地区的地震风险达到最高

级(V级),与北部的喜马拉雅碰撞带以及印度西部的 Kachchh 地震带一致。西印度半岛在 1819 年 6 月 16 日发生了 Allah Bund 地震 (M_w 7.8),该地震破坏了这一地区,并使断层上盘隆起了 3~6 m。然而,1897 年 6 月 12 日发生在东北部的 Great Shilong 地震 (M_s 8.7)被认为是记录的最大地震之一。

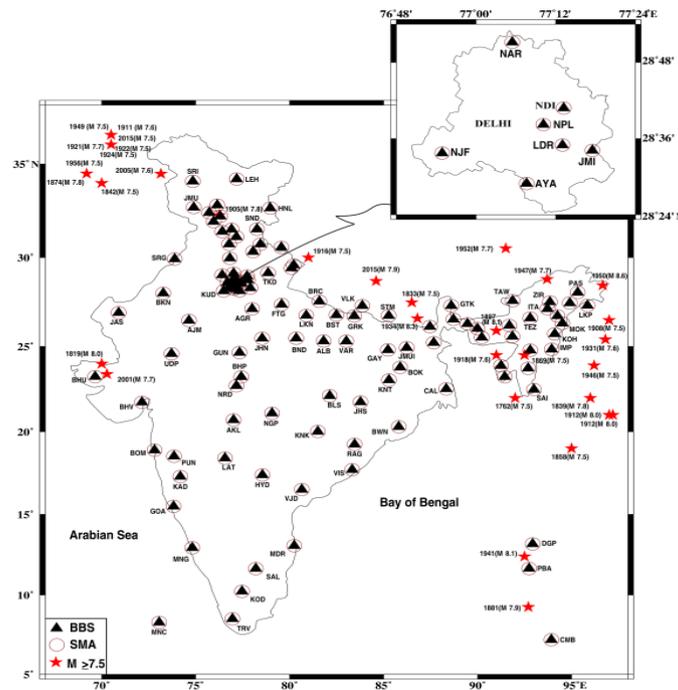


图 1 印度国家地震网的地震台站位置

另外,仪器记录的喜马拉雅弧由西到东的地震活动有 1905 M_w 7.8 Kangra、1916 M_s 7.5 Dharuchula、1934 M_s 8.3 Bihar-Nepal、1947 M_w 7.7 Assam, 以及 1950 M_w 8.6 Assam 地震。Andaman-Sunda 弧与 Burmese 弧的南端相连部分已经发生了几个破坏性地震,在部分地区还产生了海啸。最大的地震有 1881 年的 M_w 7.9 地震和 1940 年的 M_w 8.1 地震。最近的地震为 2004 年 12 月 26 日沿印度板块靠近 Andaman-Nicobar 岛的巨型逆冲地震 (M_w 9.3),引起灾难性海啸,导致 20 万人丧生,数十亿美元的经济损失。

在过去不久,印度半岛发生了超过 100 次 $M_w \geq 5$ 的地震活动。按照时

间顺序，有在印度中部的 1993 Killari (M_w 6.2) 与 1997 Jabalpur (M_w 5.8) 地震，在半岛西部的 2001 Bhuj (M_w 7.7) 地震。这些地震改变了印度半岛地震活动很小的观点。因此，印度次大陆的地震活动需要严谨的研究，因为中等地震就会引起很大区域的破坏，小地震也会引起公众恐慌。

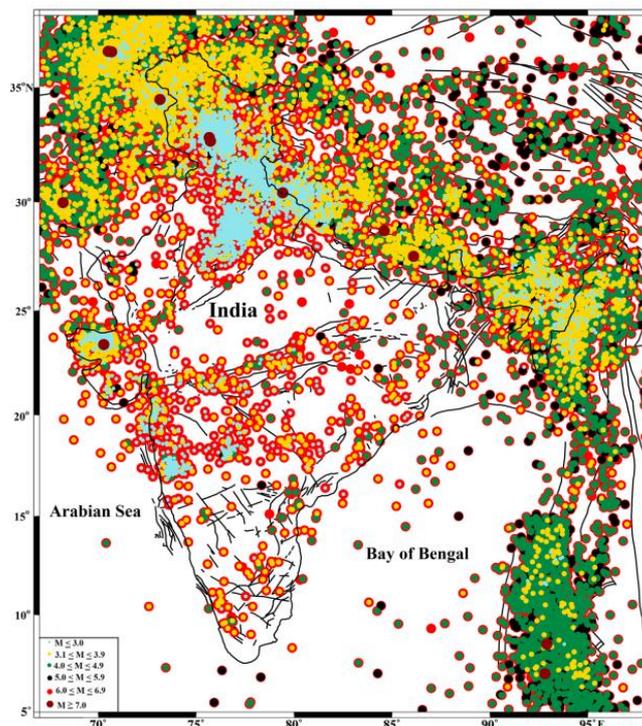


图2 1990年以来印度及其周边地震活动

印度地震台网的发展

NSN 在地震研究方面有超过 120 年的历史，仪器地震观测可以追溯到 1998 年。灾难性地震的发生使得 NSN 的建立成为必要。随后，地震台网得到加强，现在由 115 个地震台站构成。在升级之前，所有的观测站都配备了 Milne-Shaw、Press-Ewing、Hagiwara 地震仪。1960 年早期是地震监测的一个里程碑，因为世界标准地震台网 (WWSSN) 开始全球性建设。其中科代卡纳尔 (Kodaikanal)、新德里、浦那 (Pune) 和石龙 (Shilong) 安装了相匹配的短期和长期地震仪系统，成为 WWSSN 的一部分。

1990 年之前的地震台网主要由传统的地震仪系统组成。在 1993 年 Latur 地震之后，10 个主要位于半岛的观测站升级为标准的全球地震仪。紧接着，14 个观测站也在 1999—2000 年之间升级为相似的数字地震仪。现在，NSN 在全国拥有 115 个数字地震观测站。每个观测站都配备了宽频带地震仪、加速度仪、六频道 24 位记录系统，以及超小孔径终端（VSAT，用以快速传输数据）。随着地震台网的升级，评估震源参数所需要的时间已经由原来的超过一小时减小到 5~10 分钟。

在 2004 年 Great Sumatra 地震之后，7 个 BBS 和 35 个 SMA 在 Andaman-Nicobar 岛上安装。目前，这一区域的地震活动被北部区域的 20 个 BBS 台站以及 10 个在 Andaman 的 BBS 台站有效监测。NSN 通过一个中心化的、24×7 的连续监测系统来检测整个国家和其周围地区的地震活动，其具有定位 $M_w < 3.0$ 地震位置的能力。除了国家地震中心（NCS）的地震台网，印度不同的州、中央政府机构、大学等都有自己运行的地震台站。

野外观测站的建立

地震网的建立和升级发生在不同的阶段，因此，不同的野外观测站有所不同。115 个观测站具有不同的取样速度，它们通过 VSAT 从偏远的台站将数据传输到新德里的 CRS。在强运动记录中，连续模式下地震波以每秒 100 次采样，在触发模式下每秒 200 次采样。弱运动记录中，以每秒 40 次采样。为了最小化局部噪音，BBS 台站都尽量远离居民区、高铁、工厂等。最近，由于新冠疫情导致的封锁，使得城市地区的噪音水平下降。

数据流及其分析

连续记录的地震数据通过 VSAT 从偏远台站传输到位于海得拉巴（Hyderabad）和新德里的数据接收站。之后，数据在数据中心（DC）和 CRS 进行分析。CRS 使用为每种型号的数字仪配置采集软件进行数据存储，

并通过 SEEDLINK 协议传输一个平台。之后，数据被转换为 miniSEED 格式，并输入自动定位软件 SeisComP3 来进行实时地震定位。此后，mSEED 格式连续数据在光盘中永久存储。当通过软件进行震源参数分析之后，再由地震学家进行复审，之后再向公众发布。

从附近地震台站进行震源深度的精确估计一直都存在问题。尽管如此，基于数字化宽频记录，采用合适的滤波器就有可能识别深度。依赖于震中距离，可通过波幅、周期和尾波持续时间估计不同类型的震级，包括 M_L 、 M_b 、 M_s 、 M_D 、 M_c 和 M_w 。其他的重要信息，包括震源机制、烈度图等都在 NCS 网站向公众提供。除了永久性的国家地震网，移动地震设备也在很多特定区域被采用，以监测余震活动。

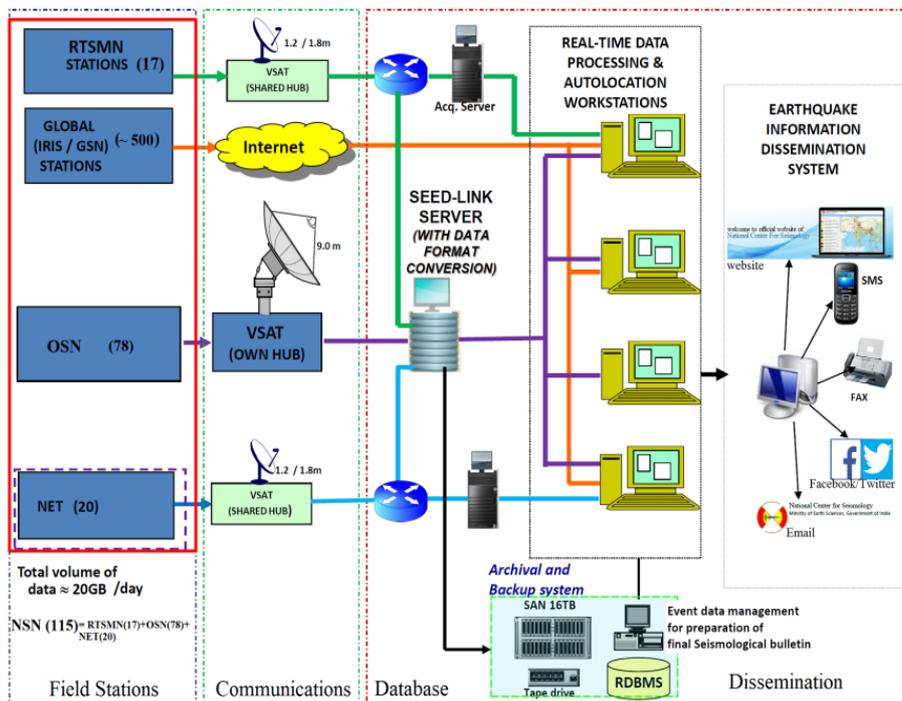


图 3 从野外地震台站到数据中心、再到向公众发布地震信息的数据流模式

地震目录和地震简报

对于印度境内的所有地震波形数据及世界范围内震级大于 6 级的地震，都会进行常规分析。然而，地震目录仅包含发生在印度境内和周边区域的

地震。具体而言，目录包含地震发生时间、位置、震源深度和震级。地震月报（MSB）会对国家地震网监测到的所有明显地震进行波形分析（主要使用 SEISAN 软件），同时，分析中还要考虑合适的地壳波速模型。因此，MSB 包含了修订的地震参数。

具有历史意义的模拟地震图

在过去的 120 年，地震台网利用模拟和数字地震仪产生了大量的地震数据。历史模拟地震图的数量超过百万，这些包含地震记录的图由热敏设备等制作而成，都很老旧，需要以安全的模式进行存储。以电子形式长期保存这些历史图表中包含的宝贵信息，将为地震学界提供重要研究机会。

地震网的最小地震监测能力

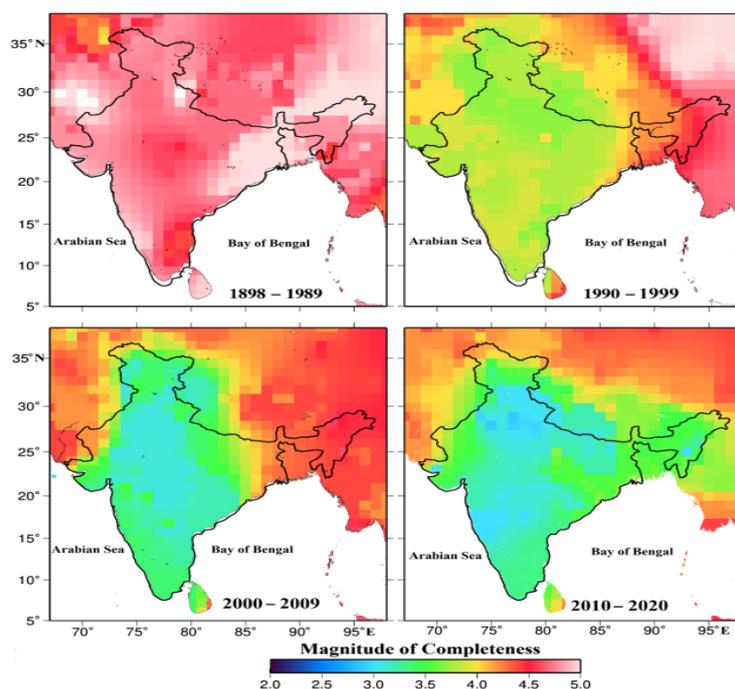


图4 印度最小地震的监测能力变化

一个国家的任何地震网都是根据其探测最小地震的表现而被认可的。印度 NSN 已经运行很长时间，有四个标志性事件窗口代表了其最小地震的监测能力，1898—1989、1990—2000、2001—2010、2011—2020。在过

去的 20 年中，这一能力在全国大部分地区显著提升，在东北部、半岛、新德里、Andaman-Nicobar 区域以及边境地区能够分别监测 M 3.0、3.5、2.5、3.5、以及 4.0 及以上地震。

来源：Bansal B K, A P Pandey, A P Singh, G Suresh, R K Singh. & J L Gautam. National Seismological Network in India for Real-Time Earthquake Monitoring. Seismological Research Letters, 2021, 92: 2255–2269, doi: 10.1785/0220200327.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所