

地震科技前沿快报

2022 年第 5 期（月刊总第 40 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、针对目标地震的 GNSS 观测网络优化设计
- 2、日本海沟海底地震海啸观测网（S-net）计划及初步成果
- 3、Irpinia 断层地震波速变化揭示孔隙压力的脉动
- 4、基于智能手机的公共地震预警系统性能及用户评价

针对目标地震的 GNSS 观测网络优化设计

位于太平洋西北部的卡斯卡迪亚俯冲带能够产生 9 级地震，并可能经常伴有海啸。海底大地测量方法能够对俯冲带近海部分的累积应变进行成像，从而预测未来地震的潜在大小和破裂模式。然而，海底大地测量的高成本意味着只能部署数量有限的观测站。根据潜在观测站所提供新信息量的大小，三位美国研究人员为未来海底大地测量观测定量化地制定了最佳位置建议。

最优选择取决于人们试图用这些观测数据来解决什么样的问题，以及模型数量和数据不确定性假设。特别是，数据不确定性假设将随着时间的推移而改变，因为更多位置的观测将减少速度不确定性。研究发现，沿着大型逆冲断层上盘的近海沟走向部署观测站，可以显著地减少微分熵，进而提供更多信息。相比于陆上的最佳观测站，一个位置良好的海底观测站可以提供 30 倍的信息增益。相关成果发表在 2022 年 2 月的 *Geophysical Journal International*。

预测地震灾害的一项重要工作是观察沿断层逐渐累积的构造应变，直到这种应变突然释放，引发地震。全球卫星导航系统（GNSS，包括全球定位系统）等大地测量观测手段并不能很好的监测海底俯冲带。相反，整合 GNSS 与水声测距的 GNSS-A 可以更好的监测俯冲带的变形，约束同震滑移和震后滑移。但是，高昂的建造费用只允许建设有限的海底观测站。因此，如何选择最优位置来部署观测站是一个重要的问题。

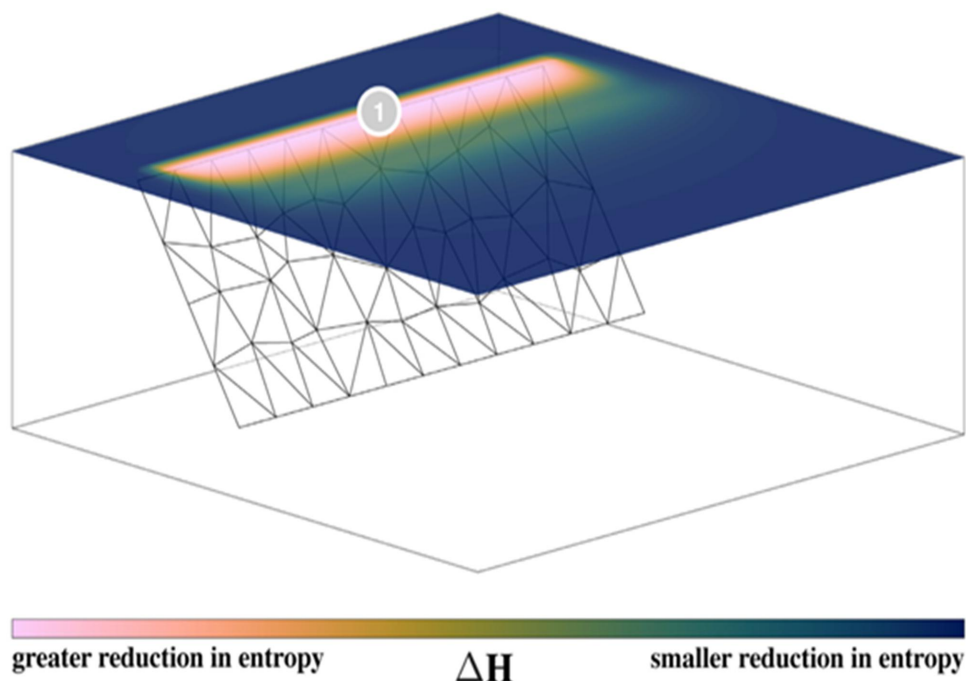


图 1 在无现有观测数据时，熵减的概念说明

研究者利用信息熵的一种即微分熵 (DE)，来量化通过增加新的大地观测站所获得的相关信息。信息熵是对一个参数值缺失信息量的度量，因此最优观测位置是信息熵减少最多的位置。该研究主要针对两个方面：①优化观测以绘制耦合空间分布 (SDC)，从而确定哪些俯冲界面是自由滑动的，哪些是部分闭锁的，哪些是完全闭锁的；②优化观测以估算总滑移亏损率 (TSD)，从而推算俯冲带的总地震潜力。

首先，根据现有的台站计算当前的微分熵 (H_{current})，然后，计算每一个潜在位置的微分熵 (H_{new})。具有最大 ΔH ($H_{\text{new}} - H_{\text{current}}$) 的位置就是新观测站的位置。之后，把新确定的位置归到现有的观测站，继续上述步骤，直至找到 30 个新的观测站位置。

1 最优 SDC 台站网络

基于当前陆上 GNSS 观测站得出 SDC 的 DE (H_{current}) 是 996.3 nats (微分熵的单位)。重新计算所有 5888 个潜在观测位置的 DE，DE 的最大减少即 $\Delta H = -6.9$ nats ($H_{\text{new}} = 989.4$ nats) 出现在胡安·德富卡板块 (Juan de Fuca, JDF) 板块中 (图 2a)。这并不奇怪，因为这个板块完全是海下的，没有 GNSS 的陆上观测。在 JDF 板块内，所有位置 ΔH 的变化极小，研究者选择其几何中心作为第一个最优位置，第二个最优位置出现在北纬 45.0° ，距离海沟大约 10 km。依次计算出 30 个观测站的位置，所有观测站位置都位于海下，主要沿海沟分布，大部分位于海沟靠近北美的一侧。分析结果表明，第一个观测站可以提供的信息量是现有陆上最佳观测站的 4 倍。

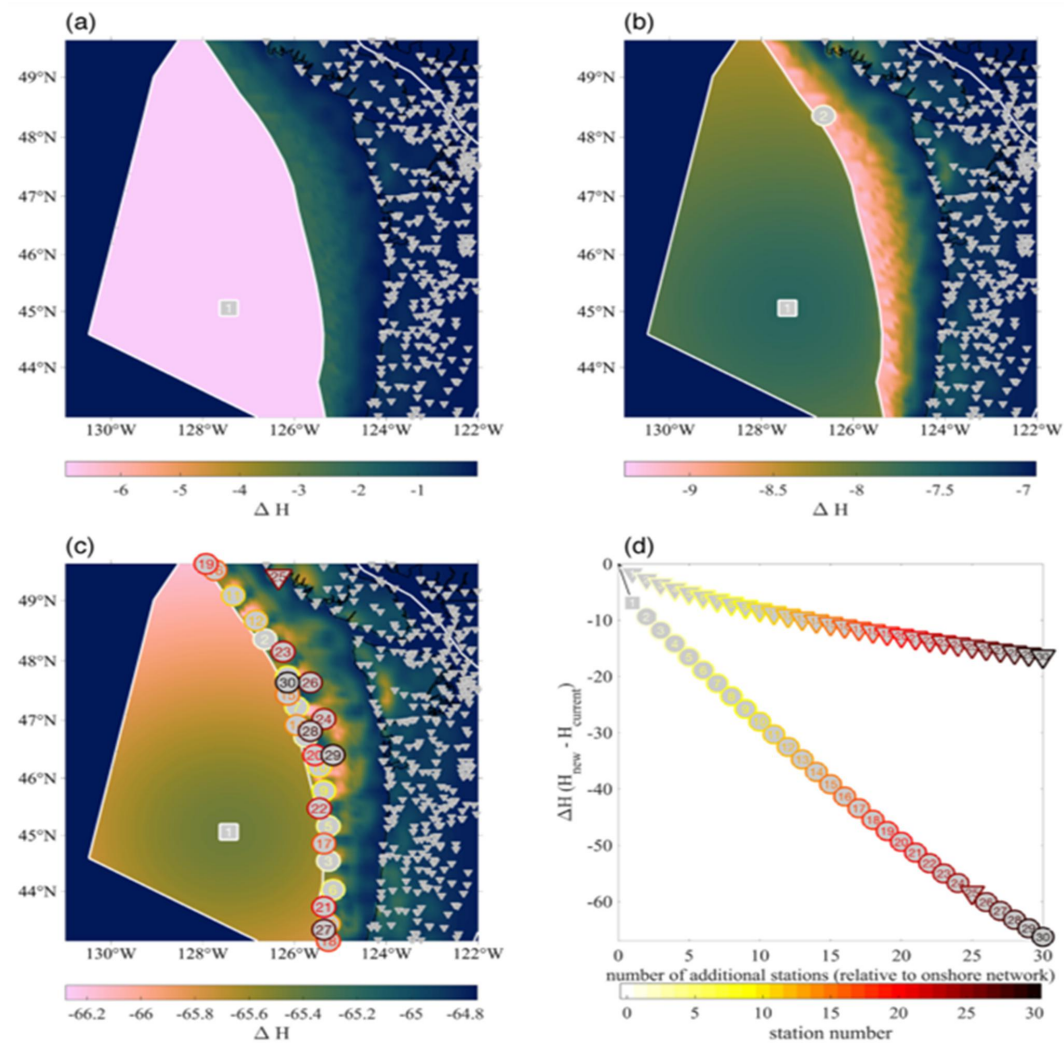


图2 假设无海底观测站时SDC的优化

2 基于现有海底观测站的最优SDC台站网络

将现有的12个海底观测站包括进来,假设海底速度(offshore velocity)的不确定值为2mm/yr, DE降低到972.7 nats (图3d中的星符)。第一个最优位置在北纬47°,位于海沟上盘且靠近海沟的位置(图3a)。继续计算17个最优位置,达到总共30个海底观测站。所有新增位置都在海沟的上盘(北美),尽管已有四个观测站在JDF。结果表明,第一个海底观测站使现有观测网(陆上观测网和海底观测网)的DE降低了0.23 nats,信息量是现有陆上最佳观测站的1.02倍。

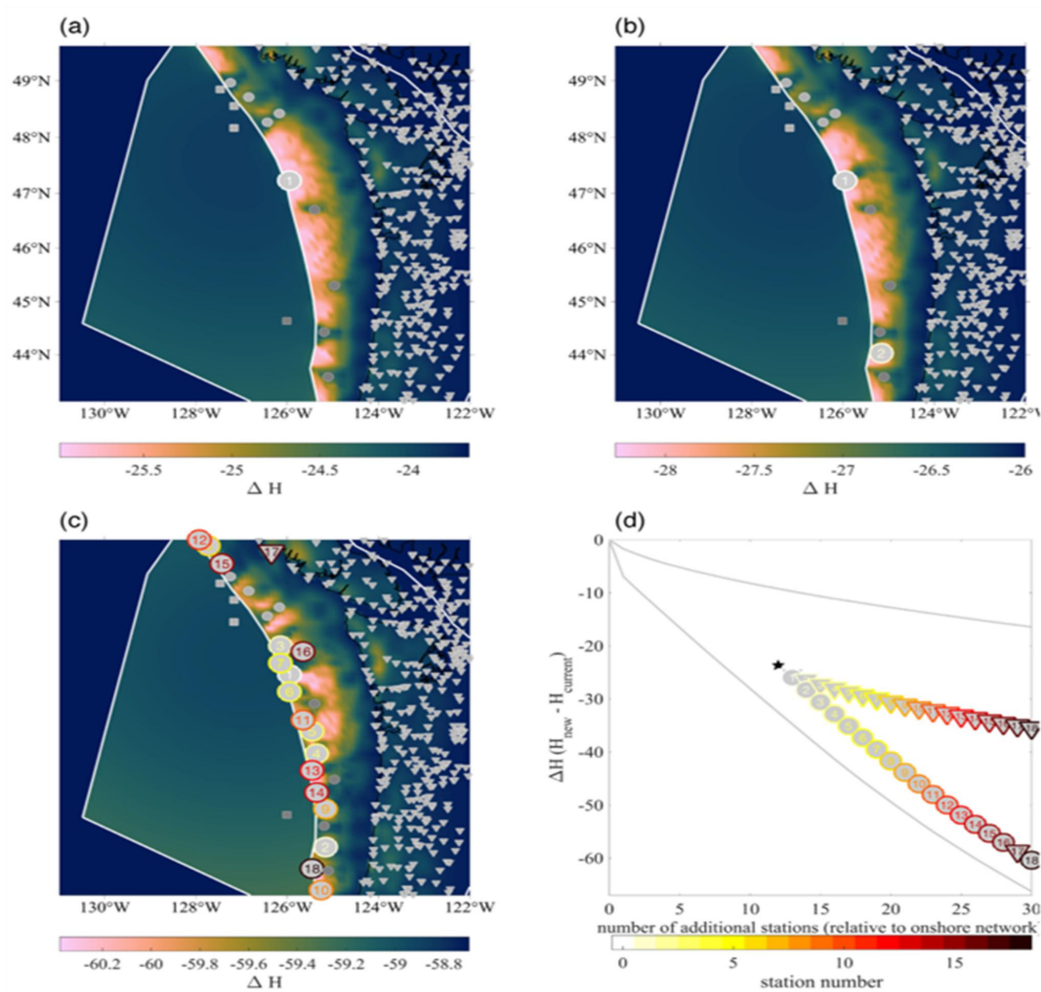


图3 存在12个海底观测站时SDC的优化

3 最优TSD台站网络

对于TSD计算，当前陆上网络的DE为5.93 nats。如果不考虑现存的海底观测站，第一个最优海底观测站位于北纬47°，距海沟42 km处（图4a），将使DE减小到5.89 nats（ $\Delta H = -0.04$ nats）。绝大多数优化观测站的位置距离海沟40~50 km，而不是靠近海沟。

虽然总DE比估算SDC时要小，但海底观测相对来说更有价值（图4d）。一个海底观测站的DE减少量是一个陆上观测站的11倍。此外，在15个陆上观测站之后，熵值停止下降（图4d），说明没有任何陆上观测站可以提供一个近海观测站所提供的信息。

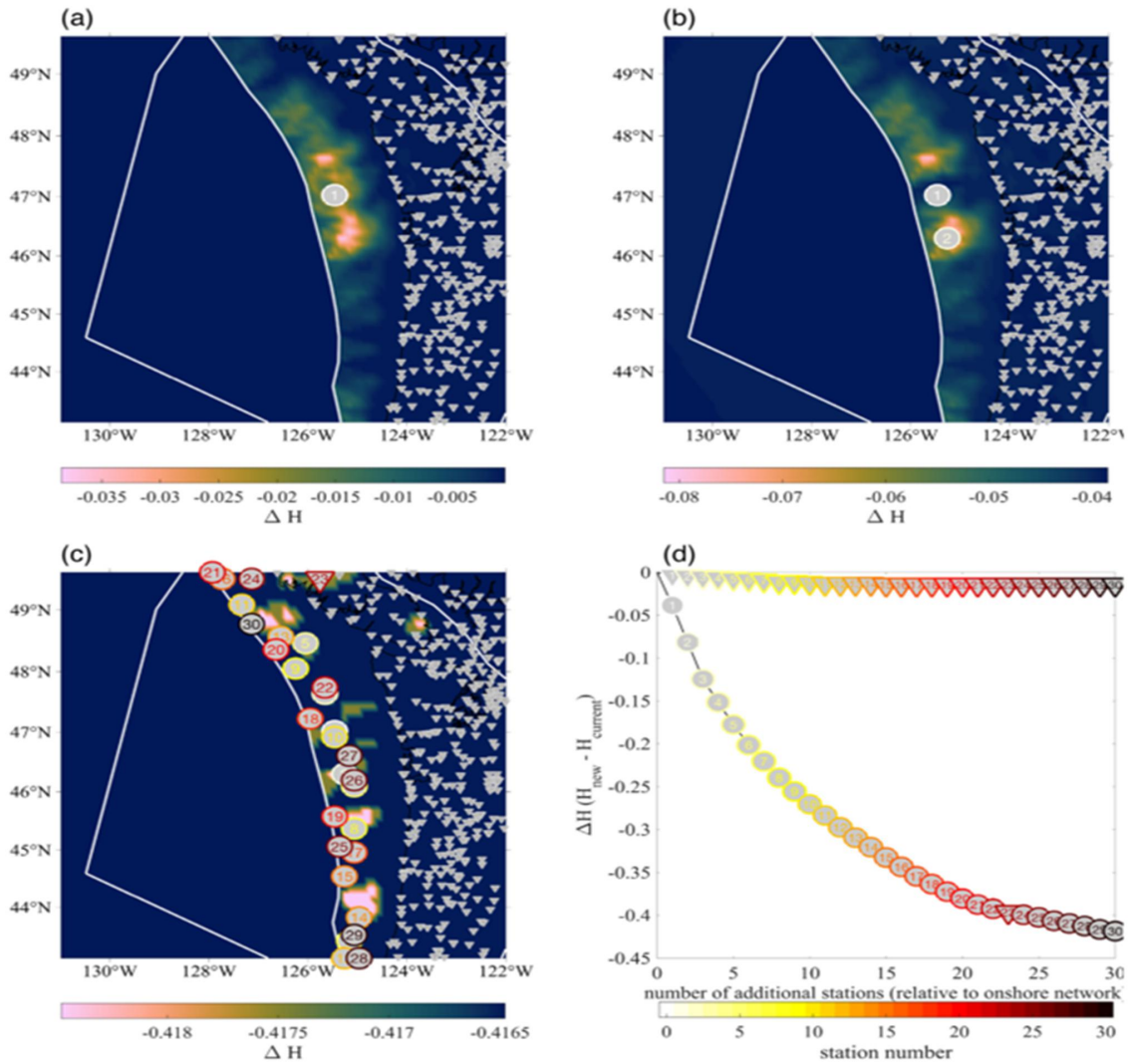


图 4 无海底观测站时 TSD 的优化

4 基于海底观测站的最优 TSD 台站网络

当把 12 个现有海底观测站考虑在内，DE 降低到 5.81 nats（图 5）。第一个最优观测站可以降低 0.16 nats 的 DE，位于北纬 46.2°，距海沟 39 km 处。18 个最优台站沿海沟走向分布，距离海沟 40~50 km。最优的陆上观测站只能减少 0.006 nats 的 DE，而所有 18 个最优陆上观测站只能减少 0.04 nats 的 DE。换句话说，第一个最优海底观测站降低的 DE 是一个陆上观测站的 14 倍，是所有 18 个陆上观测站的 4 倍。

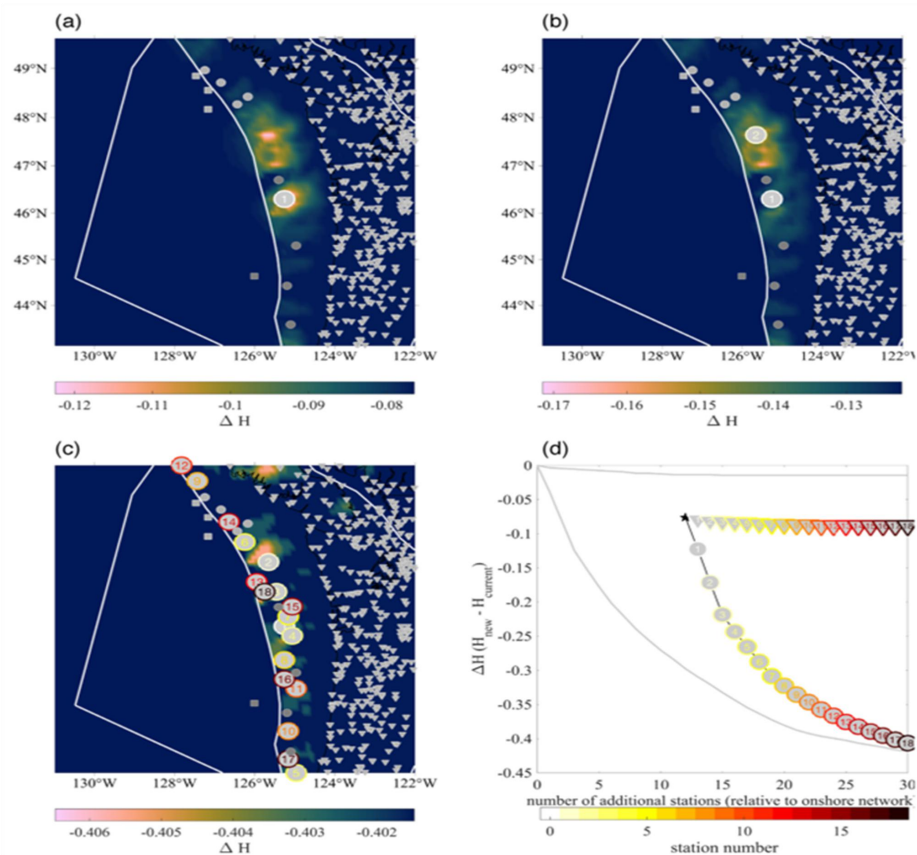


图 5 存在 12 个海底观测站时 TSD 的优化

5 讨论

上述结果表明，最佳观测网络可能因观测的物理过程不同（如俯冲带闭锁率、TSD、多个块体的构造变形等）而有所不同，也取决于若干建模和数据不确定性假设，以及模型设计（如块体数量、俯冲带界面的空间分辨率）。对于 SDC 和 TSD 的计算表明，海底观测提供的信息是陆上观测的 1~33 倍。

上述结果假定海底速度的标准差是固定的，即 $\sigma V=2\text{mm/yr}$ ，但海底观测站的最佳分布也依赖于这一假设。研究者不只是选择一个单一的 σV 值，还考虑了一组可信的数据不确定度，以解释位置的可能变化。当观测时间为数十年时， σV 较低，而观测时间为短期时， σV 较高。研究者在 σV 为 1~10 mm/yr 的范围内，对 30 个新观测点进行了优化（图 6）。随着 σV 的

增加， ΔH 的幅度减小，但网络的许多特征保持不变。当对 SDC 问题进行优化时，对于所有 σV ，第一个最优位置都位于 JDF 板块。后续观测，无论 σV 是多少，最优位置主要位于太平洋西北地块（Pacific Northwest），集中在北纬 $46\sim 48^\circ$ 附近。因此，随着 σV 的增加，海底观测站的重要性相对降低，进而使陆上观测站的数量不断增加。 $\sigma V=10\text{mm/yr}$ 时，30 个观测站中有 10 个位于陆上。

对 TSD 问题进行最优化处理时， ΔH 的幅度随 σV 的增大而减小。对于 TSD，JDF 上的观测站不如 SDC 有价值，但上盘的观测站再次集中在北纬 $46\sim 48^\circ$ 之间，而无论 σV 是多少。随着 σV 的增加，陆上观测站的数量减少。在 $\sigma V=1\text{mm/yr}$ 时，有 3 个陆上观测站；在 $\sigma V=10\text{mm/yr}$ 时，有 1 个陆上观测站。

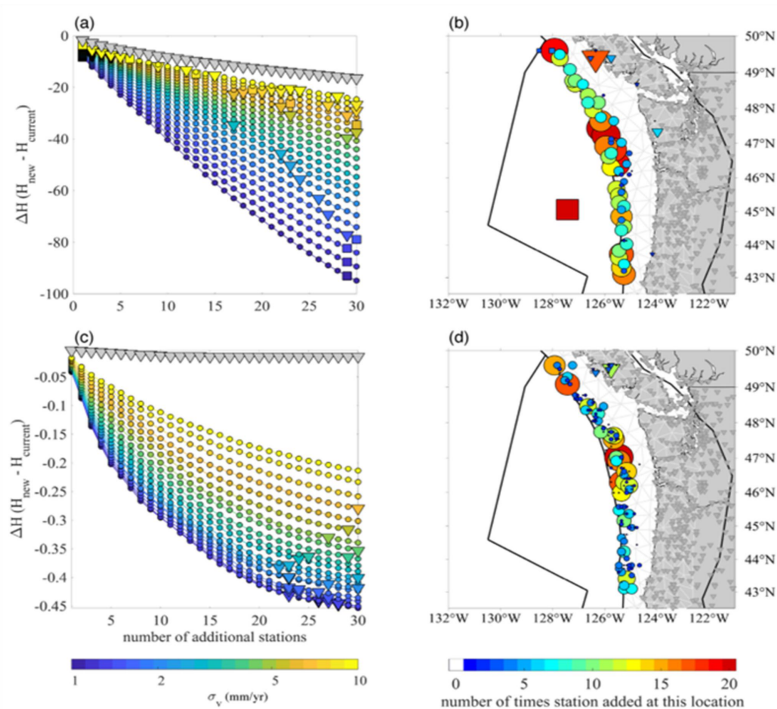


图 6 数据不确定性在 1~10 mm/yr 时的优化结果

来源：Evans E, Minson S, Chadwell. Imaging the next Cascadia earthquake: optimal design for a seafloor GNSS-A network. *Geophysical Journal International*, 2022, 228, 944-957.

日本海沟海底地震海啸观测网（S-net）计划及初步成果

日本气象厅地震观测所长、日本地震学会副会长、静冈大学防灾综合中心石川有山教授 2021 年 12 月撰文介绍了日本海沟海底地震海啸观测网（S-net）计划概述及初步成果。

1 简介

日本气象厅从中央气象台时代开始，通过地震年报和地震月报公布地震观测数据。其中的震源数据得到了广泛应用。随着时代发展，地震观测网扩充，处理系统提高，检测能力也发生变化。特别是 1997 年 10 月开始，大学和国立研究机构的观测数据集中到气象厅进行统一处理，震源数据大幅度增加。地震观测网变得稠密，地震检测能力提高。但大部分的观测点都在陆上，海域的观测点只限于东海海域等有限地区。从 2020 年 9 月 1 日起，国立防灾科学技术研究所设置的日本海沟海底地震海啸观测网（以下简称为 S-net）将观测点和数据导入气象厅，由此提高了从关东地区到北海道东部海域的地震检测能力，震源参数的获取也大幅度获得改善。

S-net 通过海底电缆连接地震仪和水压计等观测设备，安装在从日本海沟到千岛海沟水域的东日本太平洋沿岸，实时连续 24 小时获取观测数据。观测设备在 6 个区域依次进行安装，共安装 150 个站点，电缆总长度约为 5500 公里（图 1）。S-net 直接探测海沟地震和海啸后，通过迅速可靠的信息传输，有望为减少损害和疏散行动等防灾措施做出贡献。海底观测数据对于阐明海洋地震图像也至关重要。

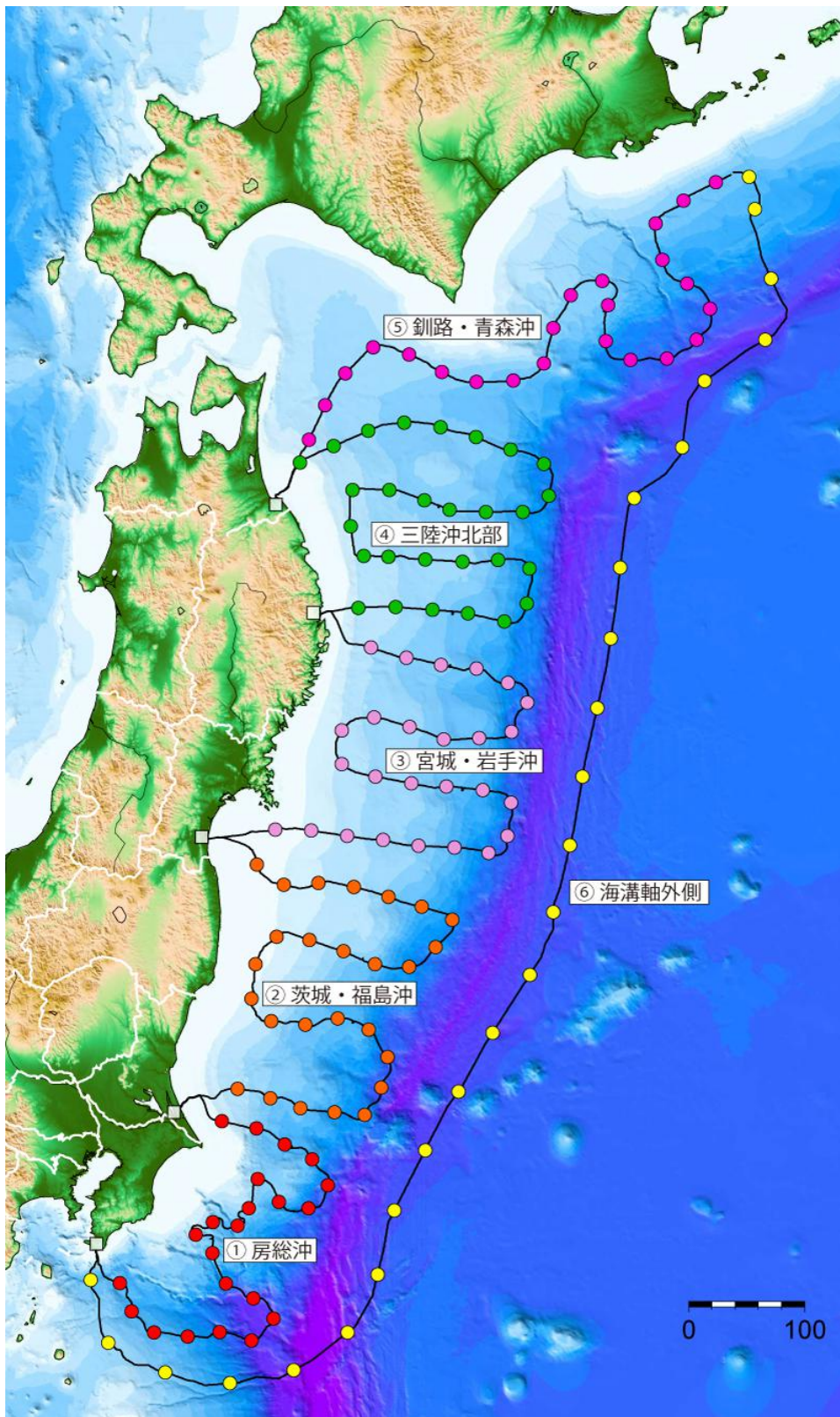


图1 S-net 地震观测网分布图 (<https://www.seafloor.bosai.go.jp/S-net/>)



图 2 观测网的基本构成

每个观测系统以网状方式安装,平均每 30 公里安装约 25 个观测点(观测设备) (图 2)。每个系统电缆总长度约为 800 公里,在水深 1500 米以下的渔业作业水域,在海底挖一条深约 1 米的沟渠,并安装电缆和观测设备。每个观测点包括地震仪(三组分速度计、高增益和低增益六组分加速度计)、水压计和倾斜计。速度计、加速度计和倾斜计获取 100Hz 数据,水压计获取 10Hz 数据。

2 日本海沟海底地震海啸观测网 (S-net) 的初步结果

S-net 是部署在此前没有地震观测站点的地区,因此地震的检测能力大幅提高。

图 3 给出了观测区域的地震活动，为了比较 S-net 接入前后的数据，对比前后各 1 年，合计 2 年（2019 年 9 月到 2021 年 8 月）的全部震级的地震，显示了深度达 60km 的地震。从 2020 年 9 月开始地震个数明显增加。通过导入 S-net 的数据，检测能力大幅提高。但是，仅凭这些图无法确定提高了检测能力，例如，存在从 2020 年 9 月开始海上地震活动突然活跃的可能（图 4）。因此，与在此期间观测网没有变化的防灾科研高感度地震观测网（以下简称 Hi-net）的自动处理震源的数据相比，可排除地震活跃的情况。

那么，接下来研究震源检测能力提高到了什么程度。从图 9 来看，到 2020 年 8 月为止，震源被定为比深度 0km 和 40km 深的震源相当多，但到 2020 年 9 月以后，震源的深度从 5km 到 40km，可以看出，决定震源深度的精度大幅提高。另外，到 2020 年 8 月为止，震源只有 2 级左右（这期间震级最小的地震为 1.5），2020 年 9 月以后，即使是震级 1 以下的地震也能确定震源。震源数的月份变化方面，从 2020 年 9 月以后，震级为以前的 5 倍。2019 年 9 月至 2021 年 8 月的深度 100km 的震源，蓝色为 S-net 导入前的 1 年，红色是 S-net 引进后的一年的震源。图 5 显示了图 3 的框内的震源的截面分布，左边下降的是伴随着太平洋板块下沉的地震活动（图 5），在 S-net 引进前后看不到差别，另一方面，右侧的蓝色震源多分布在地表，深度为 40~60km，但是，红色的震源分布在 30 平方公里较浅的地方，可以认为震源位置的可靠性提高了。但是，在右侧红色震源也下降到了下面，该地区的震源位置的可靠性很低，从海沟轴稍微离开海岸的地方，这上面没有地震观测点。

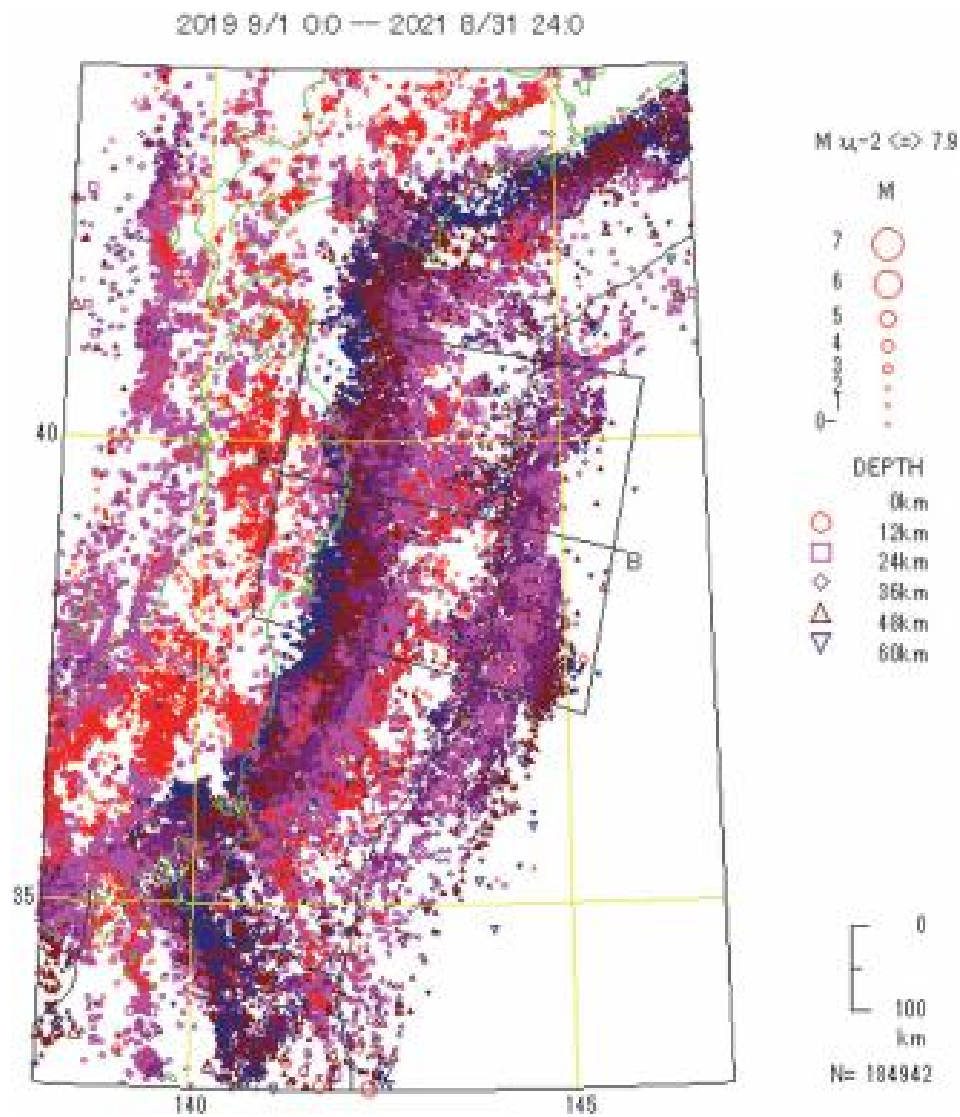


图3 2019年9月-2021年8月地震分布图

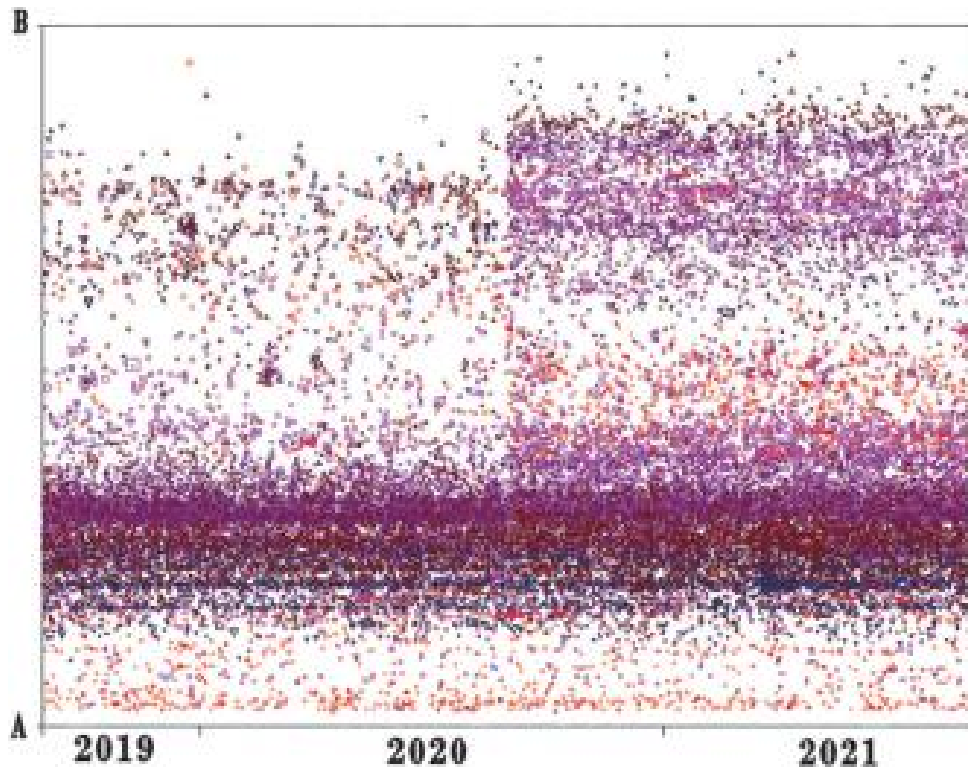


图 4 S-net 引入前后图 3AB 剖面框内的震源时空分布图

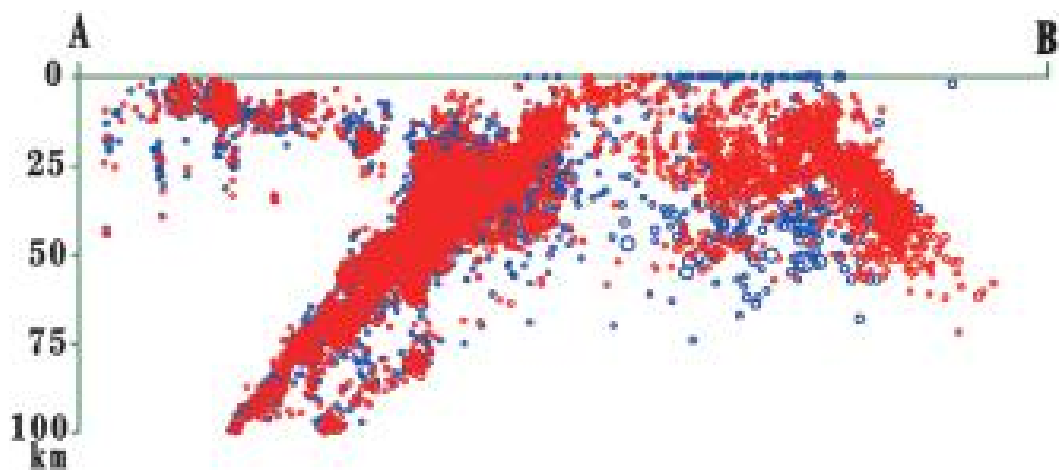


图 5 图 3 中 AB 剖面的震源剖面分布图（揭示太平洋板块向日本的俯冲构造）

Irpinia 断层地震波速变化揭示孔隙压力的脉动

很多研究关注地壳地震波速的变化，并试图将其与断层系统的应力状态和物理性质相联系，进而约束断层系统动力学和地震触发机理。在本研究中，研究人员重建了意大利 **Irpinia** 断层系统的四维地震波速图像，该断层孕育了 1980 年 **Ms 6.9** 地震的多段破裂。通过对十多年地震连续监测数据的反演，研究人员发现与时间无关的波速异常，其与地壳岩性有关。同时，还发现断层系统中间区域随时间变化的波速异常，在 **1~5 km** 和 **8~12 km** 深度，**Vp/Vs** 的变化与地下水的补给和同时间段内的地壳形变具有很好的相关性。这种相关性为深部（**8~12 km**）由地下水补给产生的脉动性孔隙压力变化提供了证据。研究表明，对 **Vp/Vs** 变化的层析成像是示踪断层系统深部高敏感区域孔隙压力演化的合适手段。相关研究成果于 2022 年 1 月发表在 *Scientific Reports*。

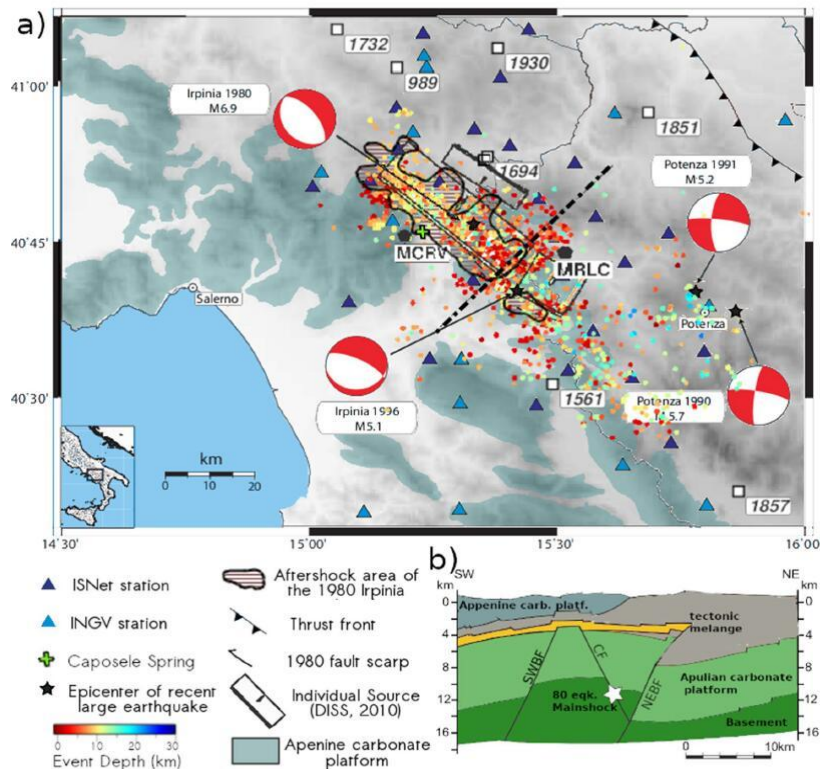


图 1 Irpinia 断层系统的构造背景

孔隙压力变化对不同破裂尺度上地震触发的贡献已在全球范围内得到了认同，并被应用到意大利亚平宁半岛的多个实例上。过去的十年中，在这一区域的很多研究通过监测介质参数、气体的水文地球化学特征、地下水位及泉水流量，分析了流体在中等或大地震的孕育阶段的贡献。这些研究的结果虽然着眼于不同的参数，但通过将流体超压作为主要机制，强调了地壳流体动力学与地震触发之间的联系，并建议进行多参数分析来研究这些复杂过程。

Irpinia 断层系统 (IFS) 位于亚平宁山脉南部，孕育了过去 100 年意大利最大的地震：1980 年 Ms 6.9 Irpinia 地震。此次地震包括沿山脉排列的三段断层，两个倾向北东，在第 0 s 和 20 s 时活动，第三个倾向南西，在第 40 s 时活动。自 2005 年以来，IFS 显示出稳定的微震活动，微震在空间上位于整个 IFS，使利用不同方法对 IFS 微震和地壳流体相互作用的调查得以开展。

Amoroso 等人 (2014) 发现，P 波和 S 波的三维层析成像表明 1980 年 Irpinia 地震震源区具有高 V_p/V_s ，这被归因于流体饱和岩石的出现。D'Agostino 等人 (2018) 发现，瞬态形变和地震活动受大的岩溶含水层的补给调节。尤其在 IFS，岩溶含水层高水头 (hydraulic head, 指单位重量的液体所具有的机械能) 驱动的高瞬态水平伸展增强了亚平宁半岛的稳定的伸展速率 (约 3mm/yr)。

IFS 内流体和地震活动之间的联系强调了流体示踪对于更好地表征岩石物理性质、地震活动以及可能减少灾害的重要性。在本文中，研究人员使用 2005—2016 年 10 年间 IFS 微地震数据集，通过四维层析成像示踪弹性介质性质的时空变化。为了揭示断层系统的复杂动力学，并评估水力 (hydraulic forcing) 对地壳弹性性质的作用，研究人员示踪了不同时期的

波速变化，并比较了位于 IFS 中部、及深度介于 1~5 km 和 8~12 km 的两个岩体 V_p/V_s 的时间演化。

层析成像：在中等深度，一些特定区域（IFS 中间区域 1~5 km 深处、北东区域 1~8 km 深处）具有低 V_p 和低 V_p/V_s 比值，这些异常与破碎的亚平宁碳酸盐台地有关。北东区域的地震波速不随时间发生明显变化，可能原因是岩性未受影响。中间区域的 V_p/V_s 比值随时间发生高达 7% 的变化。在更深的 IFS 中间区域（8~12 km）， V_p/V_s 比值随时间发生高达 20% 的明显变化。最大的 V_p/V_s 比值变化位于南西向和北东向的边界断裂之间，在这里发生了 1980 年 Irpinia 地震。

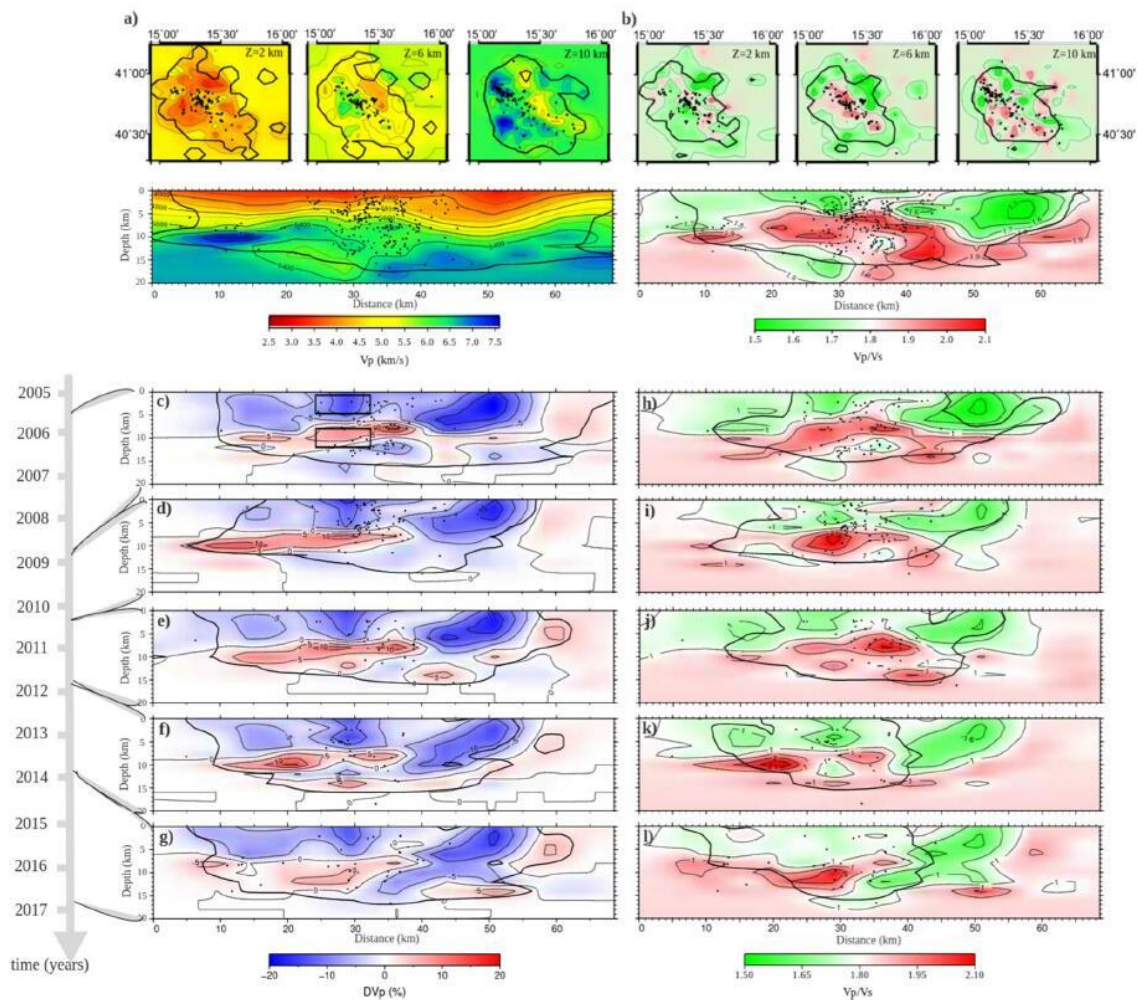


图 2 三维层析模型

Vp/Vs 比值、泉水流量与地壳形变：在 IFS 中间区域的浅部（1~5 km），Vp/Vs 比值在 1.65~1.75 之间。在前三个时期，该比值略微增加，在第四个时期明显下降，在最后一个时期再次增加（2005—2016 年被分为 5 个时间段，2005 年 8 月—2008 年 9 月、2008 年 9 月—2010 年 2 月、2010 年 2 月—2011 年 8 月、2011 年 8 月—2013 年 7 月、2013 年 7 月—2016 年 10 月）。这种变化主要由 Vs 的变化导致。

在 IFS 中间区域的深部（8~12 km），Vp/Vs 比值的变化要大于浅部区域。该比值在 1.75~2.10 之间变化，从第一个时期到第二个时期以及从第四个时期到第五个时期，比值增加，从第二个到第四个时期，比值下降。研究表明，Vp/Vs 的变化主要与 Vp 的变化有关。

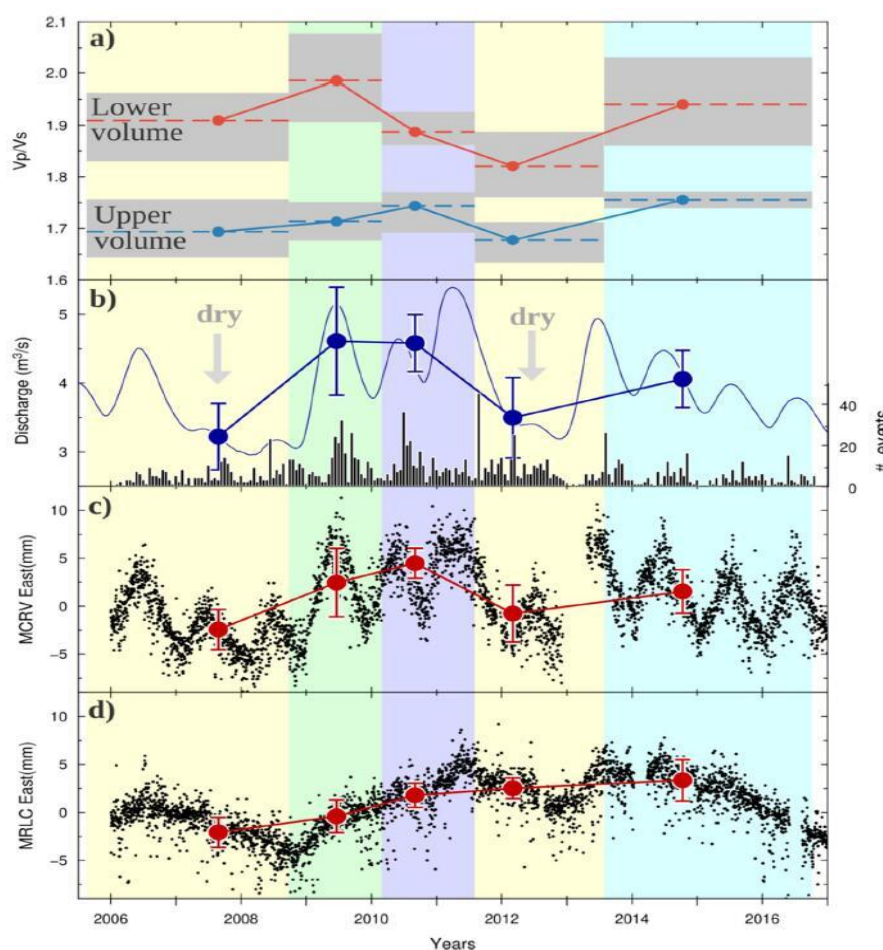


图3 一维 Vp/Vs、泉水流量和地壳形变的时间演化

为了分析在岩溶含水层不断变化的水头作用下,水力(hydraulic forcing)与弹性性质变化之间的关系,研究人员将 V_p/V_s 曲线与 Caposele 泉水流量(指示水头)的时间序列进行了比较,同时,还将其与同一期间来自 Calabritto (MCRV) 和 Lucano (MRLC) 台站的全球定位系统(GPS)位移的去势(detrended)东部分量进行了比较。为了定义每个时期这些观测值的可比值,研究人员提取了与地震活动发生相对应的观测值,并计算了它们的中值。

Caposele 泉的年均流量为 $4 \text{ m}^3/\text{s}$, 且具有很大的季节变化,最大的流量发生在春季—夏季(5—6月),而最小的流量发生在雨季(11—12月)。在分析期间,2008—2012年是干旱期。

来自永久 GPS 台站的地壳位移时间序列表明,岩溶含水层附近发生了季节性的和多年的伸展应变瞬变,与地下水补给具有很强的时间相关性。这种相关性以及两种趋势之间没有时间上的变化表明,高度破碎、水力联通的浅部地壳物质(0~3 km)通过扩散裂缝打开了在北东-南西方向上的水平扩张,以响应岩溶含水层中水头的增加。有趣的是,不仅浅部的 V_p/V_s 变化与泉水流量或位移变化相关,而且深部的变化也相关。因此,在对地下水补给高度敏感的地区,浅部含水层(2~3 km)中水头的变化和随之而来的动态形变会影响更深处(高达 8~12 km)的介质弹性。泉水流量和深处的 V_p/V_s 比值变化之间未见时间偏移,这表明波速变化的时滞小于层析成像时期的时间间隔(其中较小的为 13 个月)。

解释: 深部区域位于构造混杂岩之下,介于两条边界断裂之间。很多研究表明,流体在这一区域出现。构造混杂岩可被认为是在 Apulian 台地顶部的一个不透水层,这些流体由构造混杂岩限定在两条边界断裂内。多个研究表明,深部岩石处于高度破碎、流体饱和与超压的状态。这些超压

流体被认为是触发地震的主要因素。事实上，通过考虑超压条件下岩石弹性的高敏感性，可以解释较深区域中 V_p/V_s 比值的巨大变化。

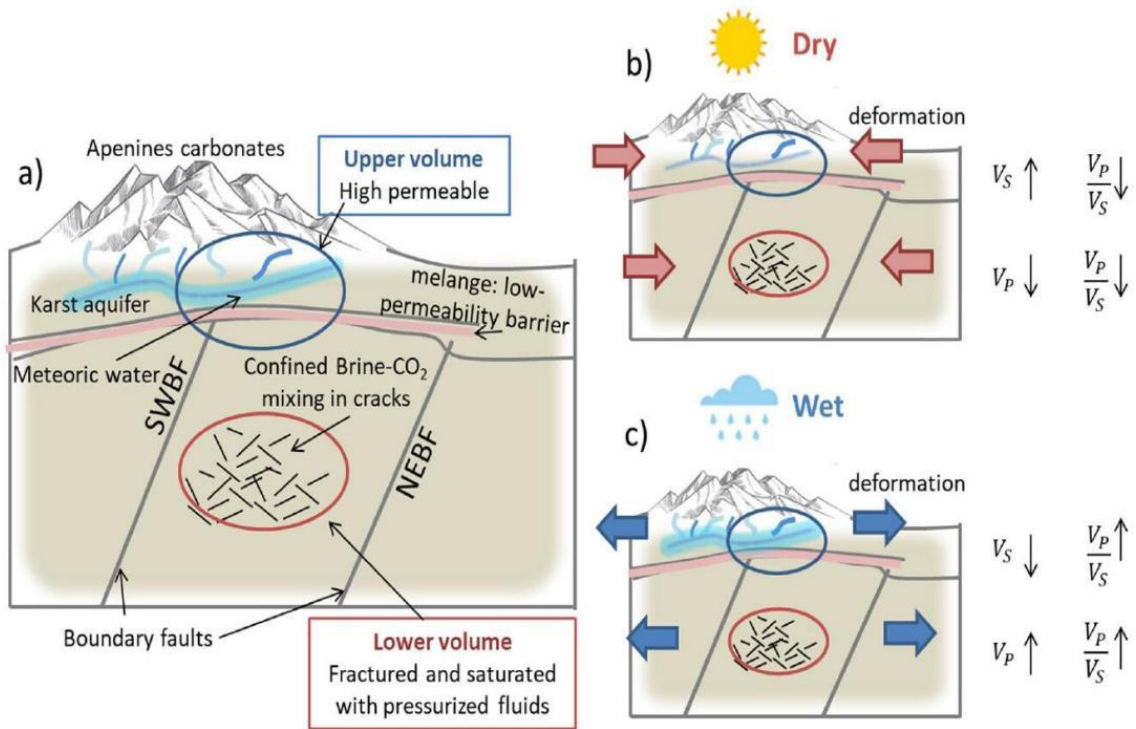


图 4 解释性的概念模型

研究表明，IFS 中两个区域观测到的地震波速变化是由不同的机制引起的：浅部由地下水的补给引起，深部与孔隙压力的脉动有关。

干早期，浅部补给有限、水头低。研究人员据此预计，含水层岩石基质 (rock matrix) 中的大气水饱和度会降低。正如在实验室中观察到的， V_s 随着含水饱和度的降低而增加，导致 V_p/V_s 比值降低。从位移情况来看，负位移的发生表明较浅层发生水平收缩，以响应水头的减少。或者， V_s 的增加可以通过裂缝和裂缝的闭合来解释，这些裂缝在水平收缩下弹性地硬化了岩石基质。假设深层岩体与上层岩体发生弹性耦合，其将被等效压缩。这种压缩机制可能会导致高度破碎和充满流体的岩体的孔隙压力增加。 V_p/V_s 比值随之降低，表明多孔和断裂岩体中主要是饱和气体。

相反，在潮湿条件下，浅部的水饱和度增加，导致 V_p/V_s 比值增加。浅层和较深层之间的弹性耦合驱动后者进入水平扩张，导致孔隙压力降低，从而导致 V_p/V_s 比值增加。除了两层之间的弹性耦合，较深处的速度变化也可能由水头变化导致的孔隙压力扰动的扩散所引起。在该研究中，所考虑的时间间隔不能使研究者及时跟踪孔隙压力扩散或区分这两种机制。

来源: De Landro G, Amoroso O, Russo G, et al. Decade-long monitoring of seismic velocity changes at the Irpinia fault system (southern Italy) reveals pore pressure pulsations. *Scientific reports*, 2022, 12(1): 1-9.

基于智能手机的公共地震预警系统性能及用户评价

公共地震预警系统有可能通过警告人们即将发生的地震来降低个人风险，但其发展受到昂贵的基础设施的阻碍。此外，用户对此类服务的理解以及他们对实际警告的反应仅是少数调查的主题。地震网络（**Earthquake Network**）计划的智能手机应用程序利用用户的智能手机作为运动探测器，提供了第一个完全基于智能手机的地震预警系统，而无需专门的地震台站基础设施，并在多个国家运行。该系统已经在多个国家发布预警，包括破坏性震动，因此这在可预见的未来提供了传统预警系统的替代方案。研究表明，尽管预警被用户理解和认可，特别是为了做好心理准备，但只有一小部分人采取了保护措施。相关研究成果于 2022 年 1 月发表在 *Seismological Research Letters*。

地震预警（EEW）系统旨在通过快速检测地震，来警告人们或者基础设施即将发生地震。公共地震预警（PEEW）系统专门服务人，而非基础设施，并通过预警来使人们在几秒或几十秒内采取保护措施来降低个人风险。但到目前为止，PEEW 还没有广泛使用，因为这需要密集、实时和强大的地震与通讯网络。此外，对 PEEW 的评估主要集中在技术性能，只有少数研究从用户的角度评估服务的价值、用户在收到预警之后是否做出反应，或者他们对未来服务的预期。这种情况导致在个人风险降低方面，缺乏对 PEEW 的实际评估。因此，公众对错误和未预警的容忍度等关键参数仍然未知，难以制定可靠有效的预警策略。

智能手机由于其内部的加速度计、通信能力、使用广泛和低成本，具有成为 EEW 的潜力。地震网络（EQN，一款手机 app）计划实施了第一个基于智能手机的 PEEW，该系统既可以实时检测地震，也可以发布该网络所产生的地震预警。EQN 计划的智能手机应用程序通过在手机充电时监

控其内部加速度计，将参与者的手机变为实时地震探测器。由此，产生的监控网络是完全动态的。自 2012 年开始，EQN 已经有 800 万下载量和 120 万活跃用户，该研究是对其预警能力的首次评估。

当活跃（如正在充电）的智能手机检测到加速度超过与噪声相关的阈值时，就会向 EQN 发送触发信息。当彼此相距 30 km 和 10 s 内触发数量超过动态加速度变化阈值时，就会检测 EQN 系统收集的每个触发信号，并通过统计分析来检测地震。在检测时，会向检测位置 300 km 范围内的所有用户发出地理定位警报。为避免大地震引发多次警报，仅发布相距 >300 km，时间 >120 s 的检测。EQN 不估计震级，因此不适合火车和核电站等基础设施。相反，其旨在传播信息和向民众发布预警。

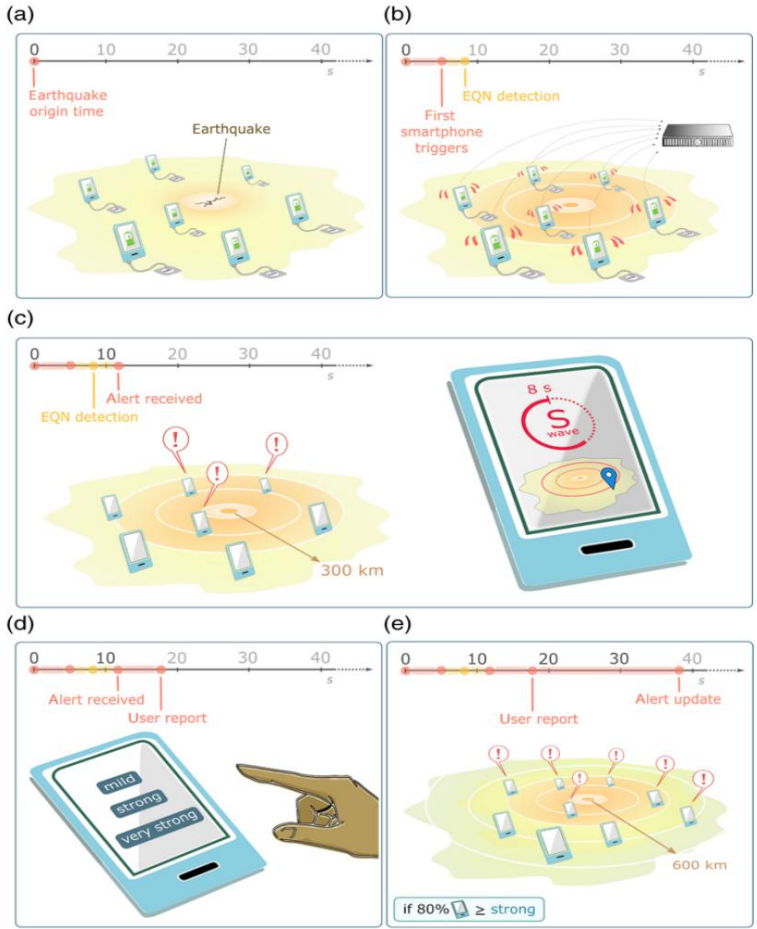


图 1 基于智能手机的地震预警系统

这项工作的目标是：评估 EQN 的检测性能；证明它能够在多个国家提供 PEEW；通过研究 EQN 用户在实际预警之后的反应，来评估 EQN 对降低个人风险的潜力。本文的目标之一是确定在没有烈度预测的情况下，服务是否可行。研究人员在 26 个月内（2017.12.15—2020.1.31），对其性能进行了评估。此外，通过对 2019 年秘鲁 M 8 地震震区当地 EQN 用户的在线调查，分析了 EQN 用户对预警的反应。

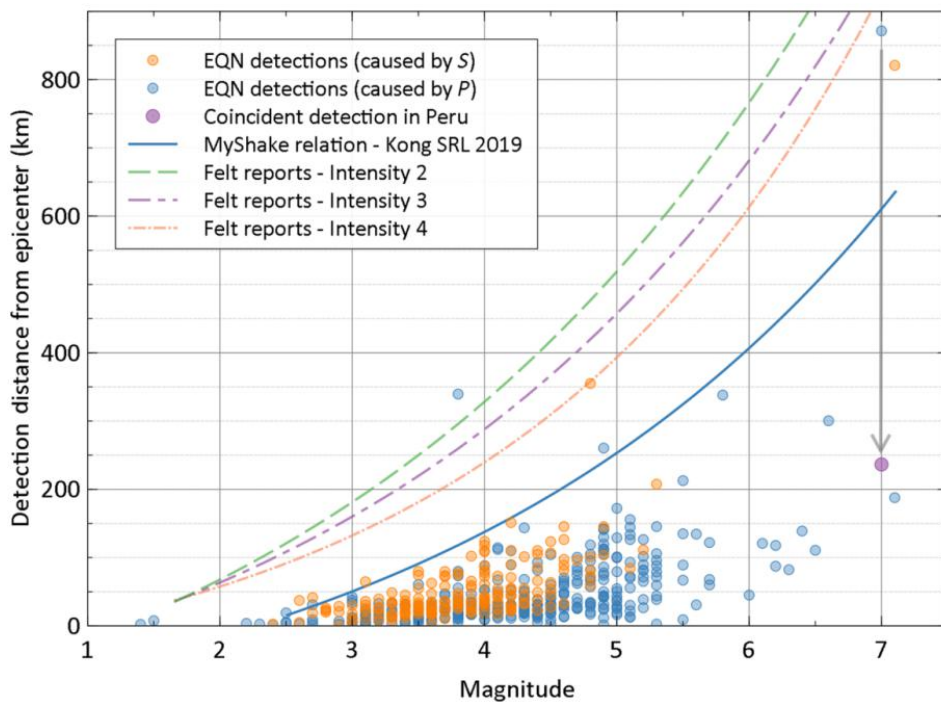


图 2 震级和检测时间的关系

EQN 检测表现：通过使用来自智利、美国和意大利的 550 次检测，评估了 EQN 在延迟、误检、漏检方面的性能。首先，EQN 检测在时空上与国家目录中的震源相关联；然后，如果 P 波到达检测位置的理论时间在检测时间之前 90 s 或检测时间之后 10 s 内，则认为此次地震是检测源。由此，与 550 个检测中的 535 个形成初始关联。与传统地震监测网络相比，EQN 漏检率的评估更为复杂，因为网络几何结构受人口分布的时空变化控制，并会随着应用程序的安装和删除而不断变化，以及充电手机数量的限制。

因此，当晚上有更多手机充电时，EQN 可检测性增加，EQN 夜间的检测率是白天的 3.1 倍。

动态监测网的地震检测延迟：当震源靠近安装 EQN 应用程序较多的区域时，可以实现最短的地震检测延迟，即地震发生时间和警报发布时间之间的时间差非常小。美国和意大利地震都发生在大陆地壳 <40 km 的深度，中位检测时间为 7~8 s，而智利地震多发生在海上和中等深度，检测时间为 17 s。通过与美国西海岸 ShakeAlert 系统的对比，两个系统都检测到了 4 次地震，EQN 的延迟平均要大 1.6 s。

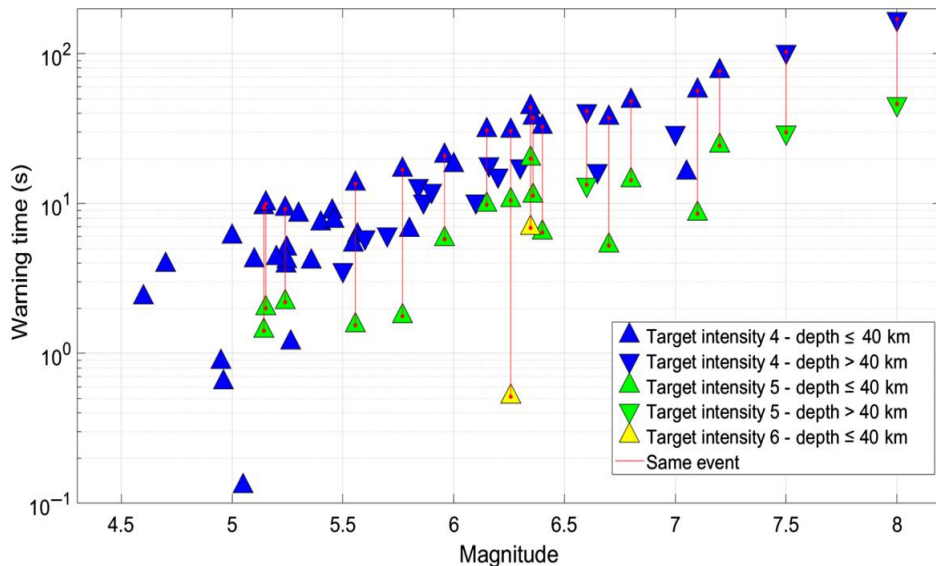


图 3 所估计预警时间与震级的关系

为了评估 EQN 的固有延迟，从震中到 EQN 检测位置的波传播时间从警报发布延迟中减去。这不仅给出了对累计处理和传输延迟的估计，而且还是高估了，因为它隐含地假设在地震开始时加速度最大，实际上要更晚。因此，最小和中位延迟（分别为 0.5 s、4.3 s）表征了 EQN 系统可以提供的最佳检测延迟。考虑到其低成本，如此快速的检测可谓是一项成就。

EQN 预警时间：对于给定的目标烈度，预警时间定义为警报发布与 S 波到达该目标烈度（target intensity）的用户位置之间的时间延迟。因此，

预警时间越长，用户就有越多的时间准备。针对目标烈度 4（观察到）、5（强烈）、6（轻微破坏），计算了检测到的美国和意大利所有震级大于 4.5，以及全球其他地区大于 5 级地震的预警时间。根据这些估计，对于给定的目标烈度，预警时间随着震级的增加而增加，对于给定的地震，预警时间随着目标烈度的增加而减少。

EQN 用户在收到警告之后是否会采取保护措施：对 EQN 用户在 2019 年 5 月 26 日秘鲁 M8 地震有感区域进行在线调查后，分析了用户对预警的理解和反应，以评估 EQN 在降低个人风险方面的效率。此次地震的震源深度为 120 km，并产生了两次 EQN 检测，一次在秘鲁，一次在厄瓜多尔。EQN 对烈度 5 区域的 599 个用户和烈度 4 区域的 54288 个用户发出了警报。

在震中 1500 km 范围内有 61863 名用户，USGS 等估计此范围内的有感烈度为 3~4。大约 2625 名 18 岁以上的参与者回答了问卷。其中，超过 2/3 的人称地震发生时在距震中 500~1000 km 的范围内。大多数受访者声称，以前经历过地震，25%的人称他们经历过 EQN EEW。大约 72%的人相信该应用程序的有效性，这证实了之前的研究，即公众期望 EEW。在这 2625 名受访者中，1663 名在地震时已安装该应用程序，而其他人在震后安装了该应用程序。

在安装了该程序的人当中，34%的人在感知到地震之前收到了 EQN 预警，35%的人在感知到地震之后收到了预警，11%的人收到了预警但没有感知到地震，14%的人感知到了地震但未收到预警，6%的人既未收到预警，也没有感觉到地震。重要的是，在感到地震之前收到预警的用户中，79%的人认识到地震即将发生。但是，当被问及他们的反应时，只有 25%的人采取了保护措施。55%的人警告了附近的亲属，22%的人通过社交媒体警

告了不在身边的亲属，35%的人等待地震到来。人们只是做好了地震的心理准备，但未采取安全措施。

这项基于自选参与者和单个案例的研究证实，基于低成本智能手机的PEEW系统可以为某些用户提供实际的预警，即使警报传播延迟未知且可能因用户而异。尽管缺乏有关震级的信息，以及一些用户收到他们认为是错误预警的信息，但满意度和信任度仍然很高。事实上，82%的用户希望收到有关即将发生地震的预警，即使地震烈度未达到破坏性水平。然而，在目前的情况下，虽然预警的内容可被人们理解，但是仅少数人采取了保护措施。尽管EQN无法系统地保证预警并估计震级，但它还是受到了用户的认可，这种结合了早期预警和快速检测有感地震的服务在公共地震信息服务中取得了进步。

整体而言，EQN计划利用智能手机创建了一个地震网络，为用户提供预警服务。EQN的预警策略不是基于所预测的烈度，所以该服务不同于传统服务。事实上，即使准确地确定了震源参数（震级和位置），地面运动的可变性也意味着传统服务会让用户收到不合适的预警（因为预测的烈度被高估了），或者，更常见的是，用户未收到预期的警告（烈度被低估）。事实上，公众对烈度并不敏感，而更在乎接收到预警，并且，只有在未发生地震时才会认为是误报。因此，对传统PEEW尚未覆盖的全球地震活跃区而言，EQN的早期预警和快速信息服务是对其现有快速公共信息系统的重大改进。

来源：Bossu, R., F. Finazzi, R. Steed, *et al.* 2022. “Shaking in 5 Seconds!”— Performance and User Appreciation Assessment of the Earthquake Network Smartphone-Based Public Earthquake Early Warning System, *Seismol. Res. Lett.* 93, 137–148, doi: 10.1785/0220210180.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所