

地震科技前沿快报

2022 年第 1 期（月刊总第 37 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、固定式智能手机网络可提供经济的地震预警潜力
- 2、流体驱动条件下的余震触发和余震区分布：从自然地震群中识别诱发地震
- 3、首次利用气球上的声学信号探测地震

固定式智能手机网络可提供经济的地震预警潜力

由美国地质调查局（USGS）和哥斯达黎加国立大学的研究人员开展的一项新研究表明，使用智能手机技术的地震预警系统既廉价且有效。

2019 年底，该研究团队组装了 82 部智能手机，将它们绑定在哥斯达黎加各地建筑物的墙壁和地板上，并等待了 6 个月。经过仔细分析，他们发现自己创造了一个有效且廉价的地震预警系统，可以在地震发生和摇晃即将到来几十秒前为社区提供警告。

在之前智能手机传感器用于地震预警的测试研究基础上，新研究将智能手机从口袋转移到固定的地板和墙壁。因此，新方法依靠的不是众包数据，而是一个固定的智能手机网络。在该项研究中，智能手机不再仅仅是

电话。相反，手机的加速度计（或称微型运动传感器）在地震波从震中传播时捕捉地面的加速度。

在 2019 年 12 月至 2020 年 6 月的六个月期间，网络成功捕获了哥斯达黎加各地的五次 4.8~5.3 级地震，并发送了一个简短的、有标签的信息，时间足以让测试者们采取保护行动，如“伏地、遮挡、手抓牢”。



图 1 一款用于地震预警的智能手机被装在固定在墙上的盒子里

一般情况下，智能手机网络的灵敏度低于科学网络，因为其通常从横波（S 波）中探测运动。另一方面，科学网络通常能够提供更多的预警时间，因为其可检测到更微小的初至波（P 波），这些波的破坏性较小，在地壳中传播更快，在更具破坏性的 S 波之前到达。

然而，哥斯达黎加的智能手机网络也通过 P 波探测到了两次地震，这与科学网络相当，对未来潜在的类似系统来说令人兴奋。同时，该网络通过 S 波感应到了 3 次地震，这意味着预警时间会较短，但仍然有益。

哥斯达黎加除了美丽的热带海滩之外，还拥有一个测试地震预警系统

的理想环境。该国每月发生 1000 多次地震，其中 15 次通常可以感觉到，可以说是世界上最好的构造实验室。目前，智能手机网络预警主要针对强震。尽管本研究中没有使用哥斯达黎加地震科学网络的数据，但前者的数据有助于验证后者的数据。

来源：A Fixed Smartphone Network Offers Inexpensive Earthquake Early Warning Potential

<https://www.usgs.gov/news/a-fixed-smartphone-network-offers-inexpensive-earthquake-early-warning-potential>

流体驱动条件下的余震触发和余震区分布： 从自然地震群中识别诱发地震

余震特征在预测自然和人为地震活动中发挥着重要作用。加拿大卡尔加里大学的两名研究者利用高质量的地震目录，探究了受流体影响的五种地震环境中的余震特征：俄克拉荷马州和堪萨斯州的诱发地震、加州和内华达州的天然地震群，以及加州 **Yuha** 沙漠的疑似地震群。所有地震环境都显示出显著的余震行为，突出了事件-事件触发过程的重要性。前 4 类地震在破裂长度之外，余震区会迅速衰减，而 **Yuha** 沙漠的余震区具有较长范围，表明流体运移可能不是主要的发震机制。此外，研究者发现，结合余震活动规模随主震震级的变化，以及古登堡-里克特定律的 **b** 值（控制指数式衰减率）可以区分天然地震与诱发地震。相关成果发表在 2021 年 8 月的 **Geophysical Research Letters** 上。

流体驱动的地震活动通常指涉及流体流动的地震事件，包括天然地震和人为诱发地震。因此，有必要区分两类地震事件，一类由于相关的剪切应力或孔隙压力的增加，直接或主要由流体注入引发，另一类通常由静态或动态应力变化导致，通常被称为余震。识别这些地震和事件-事件触发机制（**Event-Event Triggering Mechanisms, EETM**）对于地震灾害评估、预测等具有重要意义。此外，流体驱动的诱发地震与自然地震有多大程度的相似性，仍是一个悬而未决的问题，而如何区分两者也存在巨大争议。

根据前人的研究结果，流体驱动的诱发地震与天然地震的余震特征具有显著差异，但是这些结论还存在巨大争议。为了查明流体驱动的诱发地震与天然地震的 **EETM** 的共性与差异，研究者分析了（a）俄克拉荷马州和堪萨斯南部的地震，以及其他四类地震，分别位于（b）加州 **Long Valley Caldera**、（c）加州 **Fillmore**、（d）内华达州 **Mogul**，以及（e）加州 **Yuha**

沙漠。(a) 代表了流体驱动的诱发地震，(b)、(c)、(d) 代表了流体驱动的天然地震群，(e) 用来判断流体活动是否是主要的发震机制。

余震空间分布

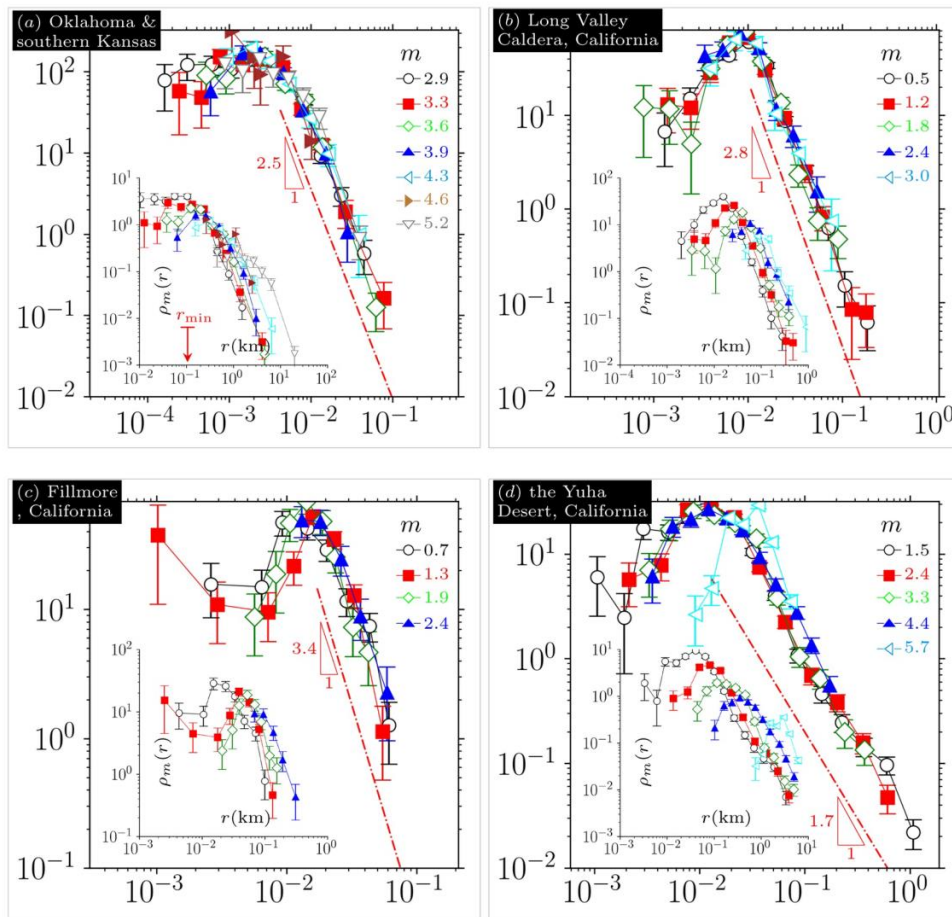


图 1 余震密度 ($10^m \times \rho_m(r)$) 与距离 ($r/10^m$) 的关系

研究者评估了 m 级主震引起的余震密度 $\rho_m(r)$ 随距离变化 (图 1)，发现几乎所有余震的密度都是先增加，达到峰值，然后按幂律递减。同时，研究者将距离 r 缩小 10^m 分析了余震密度的变化，结果表明，在破裂长度范围之外，余震密度以 r^{-v} 的形式衰减。而俄克拉荷马州和堪萨斯南部、Long Valley Caldera、Fillmore，以及 Mogul 的余震区表现为较陡的衰减，衰减指数 $v \geq 2.3$ ，而 Yuha 沙漠的余震区具有较长范围 (v 约为 1.7)，与南

加州构造地震具有相似特征。

余震活动

接下来,研究者分析了第一代余震的数量 N_{as} 随主震震级的变化(图 2),结果表明,余震数量随震级呈指数式变化,即 N_{as} 与 $10^{\alpha m}$ 成正比,标度 α 控制指数随震级的增长速率。在不同的地震区, α 具有很大差异。在俄克拉荷马州和堪萨斯南部, α 在 0.7~0.8 之间,明显大于天然地震区的 α 值。

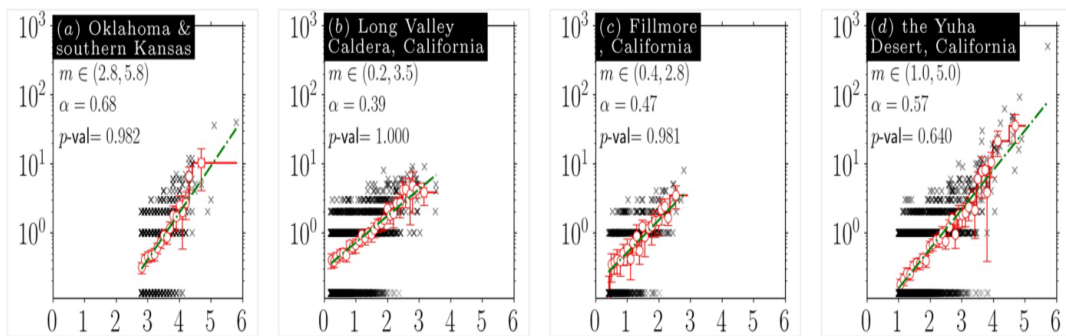


图 2 余震数量随触发震级的变化

余震速率

对于给定的地震,触发余震的瞬时速率随时间变化。图 3 展示了不同地震类别下每日余震速率的变化。在所有的地震类别中,余震速率变化在几十年内都大致遵守 OU 关系(Omori-Utsu, 大森-宇津定律) $\lambda(t) = K/(c+t)^p$ 。图 3 通过分析余震速率随时间的变化来表示这种关系。对所有的地震类型,数据几乎都被缩放到主曲线上。但是, Yuha 沙漠 5.7 级地震对应的余震速率变化是个例外,其以近指数的形式衰减,这可对应于单个余震序列,可能是余震发生率的自然变化导致的。

Long Valley Caldera 和 Fillmore 地区的数据表现为两个不同的幂律区域:在 $t < 10^{-2}$ (天) 时,为 $p=0.8$ 的衰减,随后变为 $p > 1.5$ 的快速衰减。该特征可能与从岩石破裂中观察到的现象有关,但是不能外推到其他自然地震群中。这表明, c 值随触发的震级而变化,类似于在南加州观察到的

构造地震。尽管估计的标度 p 存在差异，但不同类型的地震可能在统计上具有相似的瞬时余震特征。

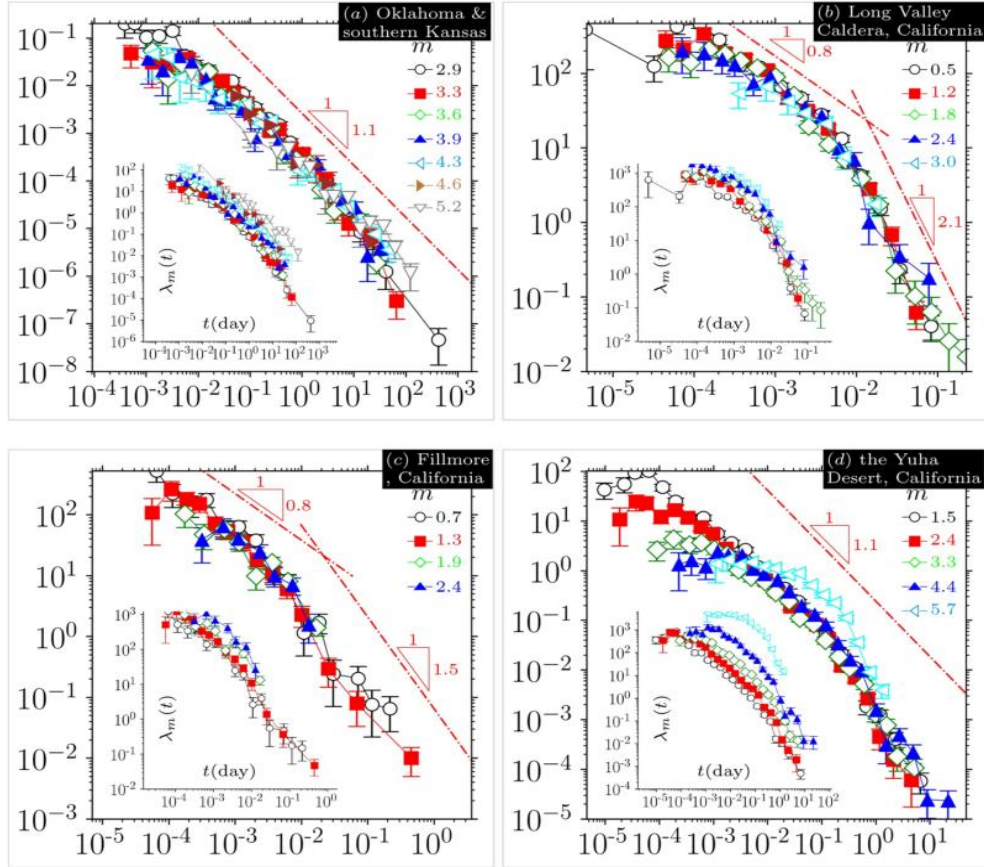


图3 余震速率 ($\lambda_m(t)/10^m$) 随着时间的变化

触发拓扑

除了第一代余震，研究者同样关注了完整的余震序列。余震序列始于一个单一的事件，该事件触发了第一代余震，然后又触发了下一代余震，以此类推。这对应了根树拓扑结构。叶深 d_f 指给定的叶（不会再触发地震的余震）与树根之间的最少余震代数。小叶深与大触发级联（triggering cascade, N_{tc} ）表示爆发式（burst-like）拓扑，而小触发级联和大叶深代表了群式（swarm-like）拓扑。图4用散点图描绘了叶深与触发级联的关系。Long Valley Caldera、Fillmore 以及 Mogul 地区的 N_{tc} 值相对较小，而 d_f 相

对比较大，Yuha 沙漠地区则具有相反的特征。因此，Long Valley Caldera, Fillmore 以及 Mogul 具有群式拓扑结构，而 Yuha 沙漠表现为爆发式拓扑结构。图 4 显示，在俄克拉荷马州和堪萨斯南部发生的诱发地震具有典型的群式拓扑结构，这和其他地区的诱发地震具有相似特征。然而，由最大地震引发的第二大余震序列几乎完全是第一代余震（代表了一个明确的爆发结构），与经典余震范式一致。

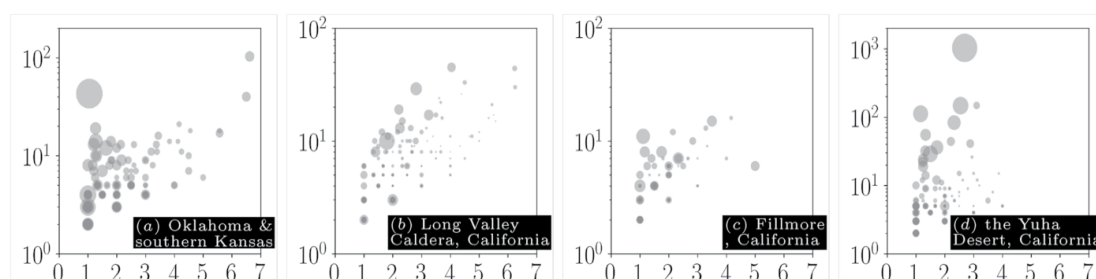


图 4 余震数量与平均叶深的关系

根据上述结果，可以直接系统地比较流体驱动的自然地震与诱发地震的余震特征。俄克拉荷马州和堪萨斯南部地区的余震发生率的 α 比较高，在 0.7~0.8 之间，这与其他地区发生的诱发地震具有相同特征。同时，所有的天然地震群具有较小的 α 值。因此，可以用 α 值来区分诱发地震与天然地震。但是，这种区别特征在多大程度上可以用相关的震源参数（例如高应力降，特定的断层类型或者空间各向异性）来解释仍是个有待解决的问题。

此外，研究者识别了流体驱动地震的余震密度 $\rho(r)$ 的分布共性：在主震破裂长度之外，余震密度会快速衰减。这种现象在俄克拉荷马州和堪萨斯南部，Long Valley Caldera、Fillmore、Mogul 都有发现，被认为是流体迁移的结果。流体所驱动地震的余震的另外一个特征就是拓扑结构，研究者发现，其基本都有群式拓扑结构。

不同于流体驱动地震，Yuha 沙漠的地震余震具有较长范围，衰减指数 ν 小于 2。这种慢速衰减可以用脆性地壳内静态应力的非局部转移来解释。考虑到与南加州地震具有相似的 ν 值，Yuha 沙漠的 EETM 很可能是由静态应力变化所导致。流体驱动地震的另外一个共性就是，事件-事件速率基本遵循 OU 关系。

综上，该项研究表明流体所驱动地震的余震具有以下特征：在主震破裂后快速衰减，以群式触发序列为主。而与天然地震相比，诱发地震具有较高的余震活动，而且，较小的地震对余震触发具有更重要的作用。

来源：Karimi K. & Davidsen J. Aftershock Triggering and Spatial Aftershock Zones in Fluid-driven Settings: Discriminating Induced Seismicity From Natural Swarms. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(15): e2020GL092267.

首次利用气球上的声学信号探测地震

金星表面的极端温度和压力给地震观测带来了巨大的技术挑战。理论上，金星大气层和固体部分之间的有效耦合允许使用大气层之上的气球来研究地震产生的声波。然而，尚未有人实现用气球探测地震。美国加州理工学院的研究人员于 2019 年 7 月在里奇克莱斯特（Ridgecrest）附近通过气球上的微气压计首次探测到地震，并详细分析了从气球测量的地震次声波与震源参数、地形、地壳和大气结构的相关性。对地震声学现象的综合分析表明，地震活动可以从高空平台上探测到，而且瑞利波引发的次声可以用来估算地震波速度，这为在金星上探测和表征这类信号建立了基础。相关研究成果发表在 2021 年 6 月的 *Geophysical Research Letters* 上。

由于缺乏地震观测，金星的内部结构仍然未知。金星表面的不利温压条件将着陆器的寿命缩短至几个小时，这对进行地震学观测提出了技术挑战。金星上的地震能量和地球上的一样，可以通过耦合传输到大气中，并以低频声（次声）传播。地震产生的次声能传播很长一段距离，地面接收站也能探测到。这种机制将使用气球探测金星上地震产生的压力扰动成为可能，从而能够从高层大气进行远程地震观测。当然，高层大气的温度和压力条件要温和得多，仪器寿命可能更长。然而，使用自由漂浮的气球来探测地震后的地面运动，这种技术的可行性还没有得到验证。

研究人员首次利用实验数据和模拟相结合的方法在自由漂浮的气球平台上探测天然地震，基于从气球上获得的数据详细分析了地震的性质，如深度和断裂机制、地壳结构、地形和大气条件对气球上地震次声信号的产生、传播和探测的影响。最后，研究人员分析了可通过表征气球上的次声信号来收集关于地壳结构的信息。

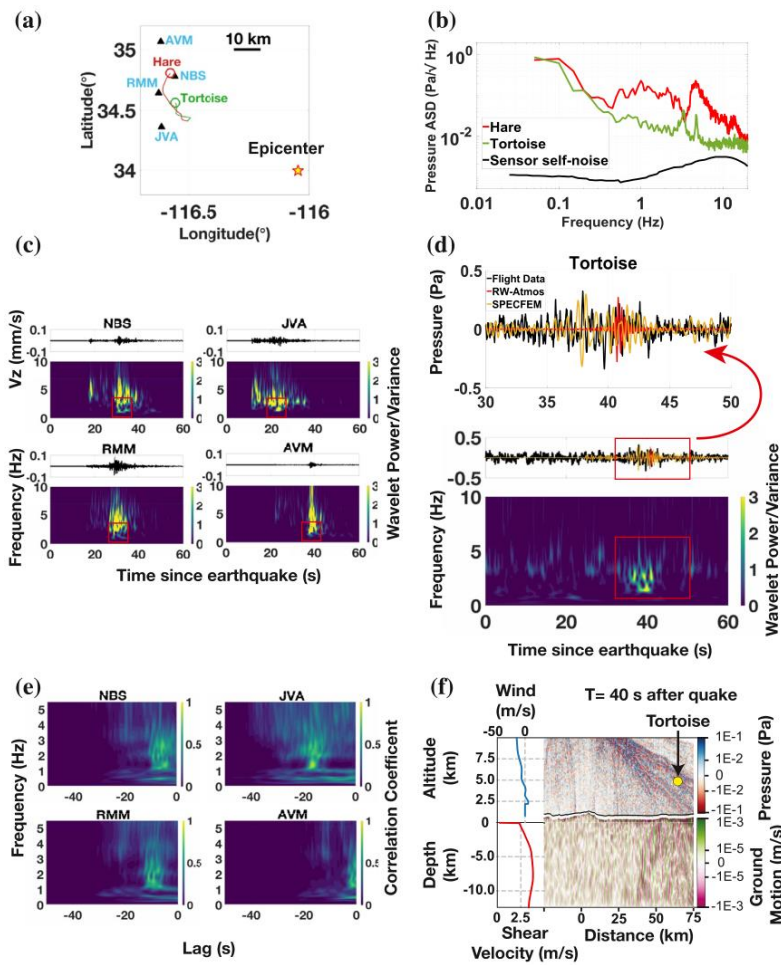


图 1 首次借助气球探测到地震

2019 年，Ridgecrest 6.4 级和 7.1 级地震序列的两次主震分别发生在 7 月 4 日和 7 月 7 日。作为震后快速应急响应的一部分，研究人员制造、测试并发射了四个“Heliotrope”太阳能加热的平流层气球，这些气球配备了高空传感器包。2019 年 7 月 22 日和 8 月 9 日发生的地震主要是强走滑，很少有事件显示出大型正断裂或逆断裂。与同震级的正断层或逆断层相比，以走滑为主的断层通常导致较小的垂直地面运动，并通过地空耦合产生较低的次声振幅。这种次声振幅随断层方向的变化在电离层中可观察到。由地震引起的大气中的声波场包括震中声波（由震中的地面运动产生）和瑞利波（由地震波穿过地壳产生）产生的次声相。为了优先考虑地震事件和

简化压力信号的调查，研究人员采用了一个四步程序，包括通过每种相位到达时间和振幅的数值模拟来进行事件筛选。

模拟分析结果表明，在 7 月 22 日 R1b（地震事件编号，唯一一个预期峰值压力大于噪声水平的事件）事件后 42 秒，“乌龟”和“野兔”（气球昵称）都出现了强烈的声波到达。图 1c 显示了每个台站的时间序列和相应的谱图，证实了“乌龟”在 38 秒有 1~3 Hz 的地震波到达，表明可能是瑞利波诱发的次声引起的。压力谱图与地面 1~3 Hz 的地震速度谱图具有较强的相关性，进一步证实是瑞利波所诱发的次声。3~5 Hz 频段的声波信噪比并不大，这是由于气球在该频段存在较强的涡流脱落现象。

为了进一步确定地震声波到达事件，研究人员使用 SPEC-FEM2D-DG（高保真地震声学模拟包）对 R1b 事件的地震—声波耦合进行了全波形模拟，包括地形和衰减。图 1d 中“乌龟”处的模拟压力时间序列，显示了与第一个瑞利波列数据在 1~3 Hz 和 40 秒内相一致的振幅和到达时间。研究人员在 CVMH 模型中观察到，由于横向速度不均一引起 RW-atmos（计算格林函数）和 SPEC-FEM2D-DG 的波列形状和持续时间的差异，这在 RW-atmos 使用的一维模型中不存在。快速的横向速度变化导致更分散的瑞利波列和更多的模内/模间转换，这种到达与以 3.5 km/s 的速度到达地震台站的高阶模态有很强的相关性。

研究人员通过使用各种衰减模型、地震模型、震源机制和地形模型来进行模拟，以评估“乌龟”压力波形的唯一性。使用 CVMS4.26 模型的模拟表明，无论衰减模型如何，缺乏浅层波导会导致接近 50 s 的延迟到达，且不管衰减模型如何，数据中没有显示。此外，引入深低速层的模拟显示出更大的持续时间和更晚的到达时间（与数据观测相比）。波列包络对速

度模型的强烈依赖性进一步支持 CVMH 速度模型的选择，因为它提供了对观测信号特征的最佳拟合。

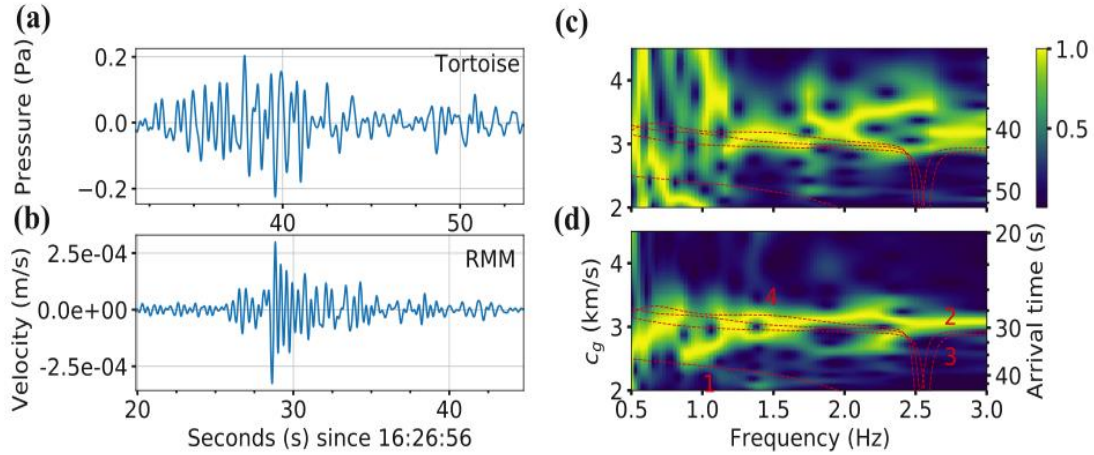


图 2 地震和声学记录的频率-时间分析 (FTAN)

垂直地面运动和压力信号之间的巨大相关性允许从观测到的压力分散特征中分析地下速度 (图 1e)。从图 2a 和 2c 可以看出, RMM (最近的地震台站) 处地震数据和“乌龟”处声学数据的峰值振幅之间存在 10 s 的延迟, 这与大气中的声波传播时间一致。研究人员对声波和地震信号进行了频率-时间分析 (FTAN), 以确定气球下方的瑞利波的分散特性。推导出的群速度曲线并未清楚地显示出预期的速度随频率的增加而降低, 这是因为每个频率都是独立归一化的, 而地震波场由存在干扰的高阶模态混合而成。然而, 研究人员观察到, >1 Hz 的群速度值与检测到 R1b 事件后 35~45 秒内到达“乌龟”的群速度值有很强的关联性。震中理论群速度曲线表明, 高阶瑞利波模式与 FTAN 分析得到的群速度范围和变化相匹配。

基于格林函数的反演方法, 研究人员从频散数据中建立了一维速度模型。与图 2c 和图 2d 的理论群速度曲线对比表明, 在 1~2.5 Hz 范围内, 波形以前三个次声为主。从 FTAN 分析所得到的 1~2.5 Hz 的群速度范围

2.7~3.3 km/s, 可以计算出占主导地位的瑞利波长。通过 FTAN 分析确定的剪切速度估计值与 CVMH 模型所获数值的一致性表明, 可以利用次声数据对地下剪切速度的不连续性进行深度范围的约束。

研究人员还对 R1b 事件进行了其他模拟分析, 使用平坦的地空界面来评估不同震源机制、地形和震源效应的影响。震源机制变化的数值模拟表明, 逆断层和正断层导致的绝对压力幅值高达走滑的 5 倍, 但压力信号包络线的时间变化相似, 表明推断出的分散特性可比震源效应对路径提供更多约束。最后, 有地形和无地形的模拟结果表明, 体波和面波通过地形的散射和模态转换大大增强了第二波列的相对强度。

在高空气球揭示了天然地震的次声探测能力后, 研究人员将通过模拟研究和收集更多的近地表航空地震声学数据, 来推动这项技术在金星上的应用。气球压力波形的解释在很大程度上依赖于震源深度和位置的预先确定, 对于单个传感器来说, 这是一个相当大的技术挑战, 需要外部数据的约束。在目前情况下, 该方法依赖于地面地震台网生成的地面真实数据, 而未来的发展重点是在没有地面数据的情况下进行信号识别和反演。探测由同一事件的多个地震相产生的声波是特别有意义的, 因为这将能够从一个气球反演出地壳地震的速度范围, 可能还会反演出发震层的深度。如果气球上有额外的传感器, 或有来自多个气球的观测数据, 那么到达时间的优化将大大改善信号解释。

来源: Brissaud Q, Krishnamoorthy S, Jackson J M, Bowman D C, Komjathy A, Cutts, J A, et al. The First Detection of an Earthquake From a Balloon Using its Acoustic Signature. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48, e2021GL093013.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所