

地震科技前沿快报

2021 年第 8 期（月刊总第 32 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、葡萄牙国家地震台网——产品和服务
- 2、ShakeAlert 为整个美国西海岸提供公共地震警报服务
- 3、印度德里地区地下水抽取诱发的地震活动

葡萄牙国家地震台网——产品和服务

葡萄牙位于欧亚板块西南部，其历史上受到过多次破坏性地震影响，最著名的是 1755 年的里斯本大地震。葡萄牙本土（Mainland Portugal）与亚速尔群岛和马德拉群岛的地震活动，促使其地震监测事业的不断发展——从 1755 年里斯本地震后首次宏观地震调查，直到目前最先进的地震网络。目前，葡萄牙大多数地震监测站都将其数据转送到葡萄牙海洋和大气研究所（IPMA）的通用数据中心，在那里数据会被自动处理，用于人工修正和自动生成下游产品与服务。IPMA 的研究人员总结了固定地震台网的发展、现状、可公开获得的产品和服务、近期发展起来的震后快速部署密集地震台网，以及最先进的海底地震仪的发展。相关成果发表在 2021 年 5 月的 *Seismological Research Letters* 上。

葡萄牙本土位于板块边界正北，该板块边界将南边的努比亚板块

(Nubia plate) 与北边的伊比利亚板块 (Iberia plate) 分隔开来。两个板块以约 5mm/yr 的速率发生斜向碰撞, 汇聚方向为北西-南东向到西北西-东南东向。近几十年来进行的密集海洋地质调查揭示了该地区复杂的活动断层网络。葡萄牙本土最大震级的地震就起源于这片近海区域。尽管震级大, 但这些地震的成因仍存在争议。几次破坏性的内陆、板内地震袭击了葡萄牙大陆。虽然葡萄牙境内最高震级的地震往往发生在远离本土的板块边界, 但地震最频繁的是亚速尔群岛。葡萄牙境内活跃的地震活动, 以及地球科学探索的需求, 是葡萄牙部署地震观测网络的主要驱动力。

研究人员回顾了从 20 世纪初到现在葡萄牙地震仪器的发展历程和现状, 并详细介绍了目前固定地震台网的特点和性能, 展示了各种公开可用的下游产品和服务。同时, 介绍了最近的移动台站部署示例, 即在 2018 年 4.9 级阿拉约卢什 (Arraiolos) 地震之后部署的快速地震网络, 以及最近海底地震仪 (OBS) 的发展, 旨在更好地了解 and 监测海底地震。最后, 研究人员提出当前的挑战以及对未来的展望。

从亚速尔群岛和马德拉群岛到本土, 葡萄牙国家台网的主要目标是监测其领土内的地震, 包括亚速尔-直布罗陀板块边界段的广泛区域。除了局部和区域地震监测外, 该网络还服务于全球地震监测工作。

20 世纪 90 年代, 地震网络配置存在严重的限制, 即缺乏宽频带记录 and 强震记录能力, 实时数字数据也没法传输到里斯本的运营数据中心。2004 年苏门答腊岛 Mw9.1 级地震发生后, 公共和私人部门提供了资金, 使国家地震台网得以成功升级。最近一次升级始于 2005 年, 形成了现今的网络。新台站是连续部署的, 并整合了 PM 网络代码。目前大多数台站安装在高质量的建筑中, 配备了宽频带地震仪 and 强震动传感器, 以及高动态数字转换器。通过卫星的极小孔径终端 (VSAT) 以及不同的互联

网通道连接，使得数据可以实时传输。

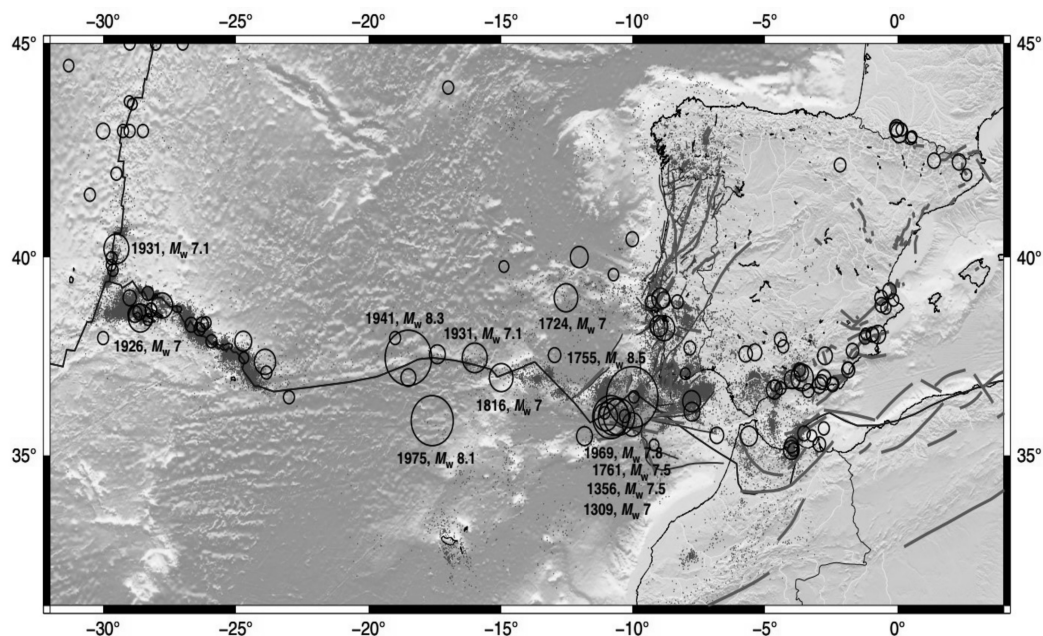


图 1 亚速尔-马德拉-伊比利亚地区的地震活动

目前，固定宽频带地震台网（包括所有机构运营的站点）共有 44 个台站，其中 27 个在葡萄牙本土，3 个在马德拉群岛，14 个在亚速尔群岛。短期网络总共有 19 个台站：5 个在葡萄牙本土，2 个在马德拉群岛，12 个在亚速尔群岛。2015 年，IPMA 和里斯本大学高等技术学院（IST）达成了协议，允许合并现有的强震仪器。因此，所有 IST 强震台站都集中到 IPMA 数据中心，开始近实时数据传输。2018 年，在葡萄牙资源可持续利用和效率计划（POSEUR）资助的一个项目中，IPMA 在里斯本和塔古斯河谷地区部署了一系列新的实时强震监测站，并升级了葡萄牙南部的其他几个监测站。这使得强震实时监测覆盖范围得到了显著改善。目前，葡萄牙共有 72 个强震台站，4 个在马德拉群岛，28 个在亚速尔群岛，40 个在本土。

如今，葡萄牙地震台网几乎可以在全境内实时探测小震级事件。考虑到多震的欧亚-努比亚板块边界位于葡萄牙本土南部，目前，葡萄牙埃武拉大学和 IPMA 致力于加强其最西南端的地震台网。四个新的地震观

测站将包括一个安装在 30 m 深度的宽频带观测站和一个安装在地面的加速度计。

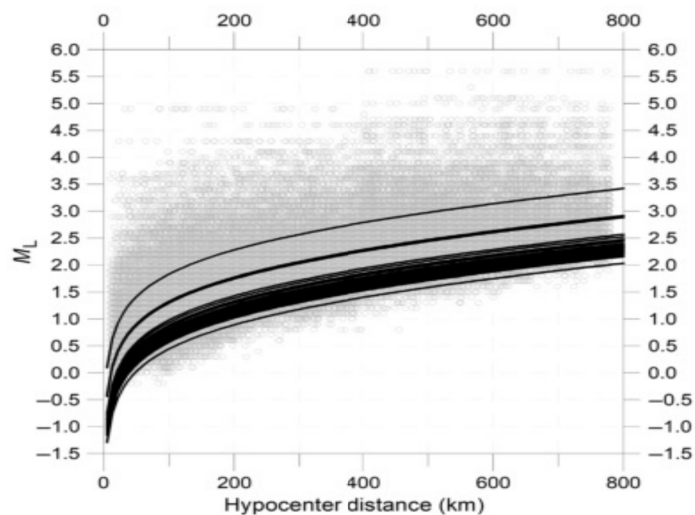


图2 目前葡萄牙本土运行的所有短周期和宽频带台站的检测阈值曲线

IPMA 运行着一个自动化数据处理系统，可在发生局部或区域地震时为民防和公众提供快速信息。该系统是基于 SeiscomP3，结合改进版的 SEISAN 在内部开发完成的。AutoPick 模块用于生成地震相位到达和振幅列表，事件通过关联 P 波拾取生成。首先，计算地方或区域和全球事件的位置并估计当地震级。之后，到达列表由内部包（data_extract）获取，该包根据地理和时间标准重新关联拾取（pickings）。相应的波形之后被 Autopic 的修改版本（SEISAN）加工，其应用了多带的短期/长期平均检测方案并生成一个包含 P 波和 S 波始点（onset）的文件列表，还有震级估算的位移振幅，以及用于震动图（ShakeMap）的峰值地面加速度（PGA）和峰值地面速度（PGV）。这些始点，之后会传送到 Hypocent（SEISAN）迭代会话，以计算震源位置和局部震级值。这个程序能够从经验上区分第一和第二 P 波和 S 波的到达，从而得到了一种更稳健的定位算法。然后，由值班分析人员手动检查和验证自动计算的结果。

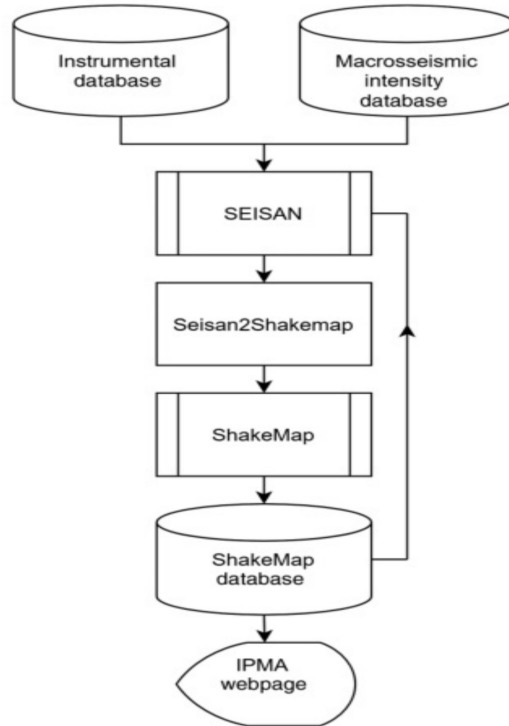


图 3 简化的 IPMA 震动图生成流程

ShakeMap 被设计用于在地震发生后的几分钟内，快速自动地生成地面震动图和由仪器数据分析出的地震强度图。这些图根据仪器对地面运动的观测和预定的场地放大而生成的。这些信息与葡萄牙本土的特定衰减律相结合，产生预期地面运动的快速分析地图。系统中集成的宏观地震观测进一步提高了地图的质量。场地放大是由地表到 30 m 深度的横波速度数据平均得到的。图 3 显示了葡萄牙地震服务机构的 ShakeMap 处理系统的概况示意图。将仪器的数据库链接到 ShakeMap，一个地震分析和处理系统 (SEISAN) 接口 (Seisan2ShakeMap) 就可生成并执行了。

自 2011 年起，对于葡萄牙和近海地区震级 (M_L) 大于 3.6 的事件，IPMA 定期计算区域的 MTs。MTs 是区域地震台网有价值的产品，用于实时地震，如海啸预警和地震风险减轻。每月修订的地震数据定期编制，通过 IPMA 网站分发，并传送给国际地震中心。自 2007 年以来，考虑到地震监测的可能应用，IPMA 基于 Seiscomp 服务器实施了实时数

据共享方案。这种设置允许不同用户有权访问地震监测网的特定数据。最近，设立了一项特别服务，为国家和国际研究活动适当分发和提供地震数据，包括原始数据和元数据。

尽管有固定地震台网，但由于持续的地震活动及其所覆盖的广阔地理区域，葡萄牙本土及所辖岛屿已经呼吁逐步部署更密集的临时地震台网。其主要目的是详细研究地壳结构和变形，或在特别强烈的火山或地震事件后作为快速监测反应进行部署。2018年1月15日11时51分，葡萄牙中南部靠近阿拉约卢什的地方发生震级4.9级地震。主震后，在近震中地区迅速部署了密集的监测网络（ATSN）。ATSN收集到一个独特的数据集，可用于详细研究地震风险。根据对每日波谱图的观察，共识别出466个地震事件，足够多的相位使得定位和分析 $0.5 \leq \text{rms} \leq 0.7$ 的地震成为可能（rms指均方根）。

此外，IPMA正在进行的工作是发展波形和元数据传播服务。这项服务目前正在改进中，目的是整合欧洲综合数据存档（EIDA），从而促进数据的获取并使其更加透明。未来，基于光纤技术的海底监测能力将有重大改善。最近，葡萄牙政府正式批准将地球物理和环境传感器纳入亚速尔-马德拉光纤通信电缆环的更新中。考虑到这样一个系统的潜在积极影响，基于现有陆地强震网络的区域地震预警系统（EEWS）将在欧洲多学科海底及水体观测系统—葡萄牙分站（EMSO-PT）的帮助下得到有力改进。

来源：Carrilho F, Custódio S, Bezzeghoud M, et al. The Portuguese National Seismic Network—Products and Services. *Seismological Research Letters*, 2021, 92: 1541–1570.

ShakeAlert 为整个美国西海岸提供公共地震警报服务

从 2021 年 3 月 11 日开始，基于 ShakeAlert 的地震预警警报直接传送到俄勒冈州的无线设备，也就是说，俄勒冈州可享受到 ShakeAlert 提供的地震预警服务。2021 年 5 月，华盛顿州紧随其后，从而实现 ShakeAlert 公共警报在整个西海岸的发布。此前，加州已在 2019 年 10 月启用了 ShakeAlert 提供的警报。

当巨大的地球板块在西北太平洋沿岸相互挤压时，许多人可能会想知道他们何时会感受到随之而来的地震。虽然美国地质调查局无法预测未来地震发生的地点和时间，但该局与一个团队共同创建了一个系统，即 ShakeAlert 地震预警系统，其可以提供关键的几秒钟警告，以此表明地震正在发生，摇晃即将到来。

ShakeAlert 是一个传感器网络，它收集和分享有关西海岸地震的震级、位置和预期摇晃的实时信息，然后，通过手机和互联网向分发伙伴发出警报。合作伙伴还可以启动自动保护行动，如停止火车以防止脱轨，关闭水阀以保护基础设施等。

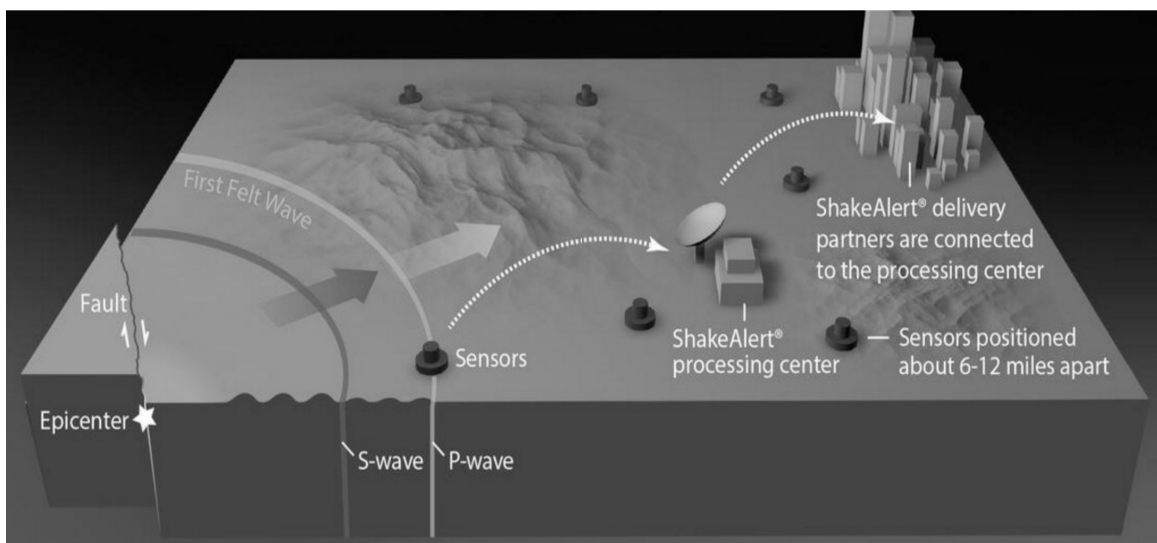


图 1 ShakeAlert 地震预警系统的基本原理

ShakeAlert 可以通过给人们时间采取保护措施来挽救生命和减少伤害，例如远离危险区域，确保“伏地、遮挡、手抓牢”（**drop, cover and hold on**）。对于美国国家现代地震监测系统（ANSS）而言，**ShakeAlert** 是其有益补充，有助于降低地震灾害的风险。

从 2021 年 3 月 11 日起，由 **ShakeAlert** 提供的警报首次直接发送到俄勒冈州的无线设备上。俄勒冈州成为继 2019 年 10 月 17 日加州之后，第二个“上线”的州，华盛顿州在 2021 年 5 月加入。至此，完成了整个西海岸大陆的无线警报发布。

两年多来，这三个州越来越多的 **ShakeAlert** 技术合作伙伴一直在使用 **ShakeAlert** 系统来触发自动行动，以支持公共安全。虽然 **ShakeAlert** 在三个州都已投入使用，但 **USGS** 及其大学和州的合作伙伴正在努力完成地震网络的建设，以支持及时的地震探测。截至 2021 年 1 月 31 日，美国西海岸的地震网络已经完成了 70%，1675 个地震台站中的 1132 个已经安装完毕。

USGS 地震与地质灾害高级科学顾问 Gavin Hayes 表示，**ShakeAlert** 公共警报在太平洋西北部的推出是这一关键系统发展过程中的一个重要里程碑，有可能在用户遭受破坏性震动的前几秒向其提供挽救生命的警报，这代表了 **USGS**、ANSS 以及其州和地区合作伙伴的重大成就。

来源：ShakeAlert Earthquake Early Warning Delivery for the Pacific Northwest

https://www.usgs.gov/news/shakealert-pacific-northwest-rollout?qt-news_science_products=1#qt-news_science_products

Entire U.S. West Coast Now Has Access to ShakeAlert® Earthquake Early Warning

<https://www.usgs.gov/news/entire-us-west-coast-now-has-access-shakealert-earthquake-early-warning>

印度德里地区地下水抽取诱发的地震活动

自然或人为的非构造变形可能影响板块边界或稳定板块内部的地震发生过程和地震活动率。来自印度国立鲁克拉理工学院的几名科学家发现，位于印度板块内部稳定区域的德里地区具有低震级但中等地震速率的特征，地震活动在年度季节尺度（短期）和十年尺度（长期）都表现出显著的变化。这种变化与人为地下水抽取相关，例如大规模灌溉、城市活动和季节性因素控制的水文负荷循环。研究者对基底断层稳定性的耦合水力力学模拟和孔隙力学分析表明，含水层收缩和基底岩石膨胀的共同作用，调节了德里地区基底断层上的有效应力状态和诱发地震活动。相关研究成果发表在 2021 年 5 月的 *Nature Scientific Reports* 上。

在过去几十年里，人类引发的地震日益成为社会和科学关注的焦点。这种人为活动改变了处于临界应力的断层系统的地下应力状态，进而诱发地震，改变了周围地区的地震活动率，并使这些地区更容易受到远距离地震的动态触发。与自然构造地震不同，人类诱发的地震经常与基底隐伏断层有关，这使得地球科学家评估相关的地震危险具有挑战性。因此，地震危险性评估和人类诱发地震的缓解需要识别发震断层系统和表征地下应力状态。

对于德里地区多震的原因一直具有争议，主要原因是其在构造上位于阿拉瓦利-德里（Aravalli Delhi）褶皱带，该褶皱带的地震原因也被归因于构造活动。本文中，研究者首先利用德里地区地震记录、重力数据、气候水文数据等多方面资料分析地震活动与地下水存储变化之间的联系，然后通过新颖的水文和耦合的流体力学模拟以及相关的断层稳定性孔隙力学分析，探究地下水抽取对德里地区地震活动的影响。

(1) 阿拉瓦利-德里褶皱带地区地震活动的季节性调制

对等效水高度（equivalent water height, EWH），垂向位移、区域降

水以及高于阈值的地震活动统计表明，地震的发生与德里周边地区季节性水文负荷的周期变化有很好的相关性。此外，为了使这种结果更具有统计学意义，研究者使用各种物理参数的功率谱分析来计算周期性。结果表明等效水高度、垂向位移以及区域降水量变化具有强烈的一年和较弱的半年周期性。而德里地区的地震活动表现为强烈的半年周期性。此外，在季节性水文负荷加载期（6月到9月，即季风期间），地震活动性最低，而在卸载期间，地震活动性水平相对较高。因此，研究者，提出季风期间积累的水量以及区域含水层的补充稳定了基底的断层，但是这些断层在水文负荷卸载期间则会发生失稳。因此需要探究由地下水抽取导致的十年尺度的水文负荷卸载是否也会影响地震活动性。

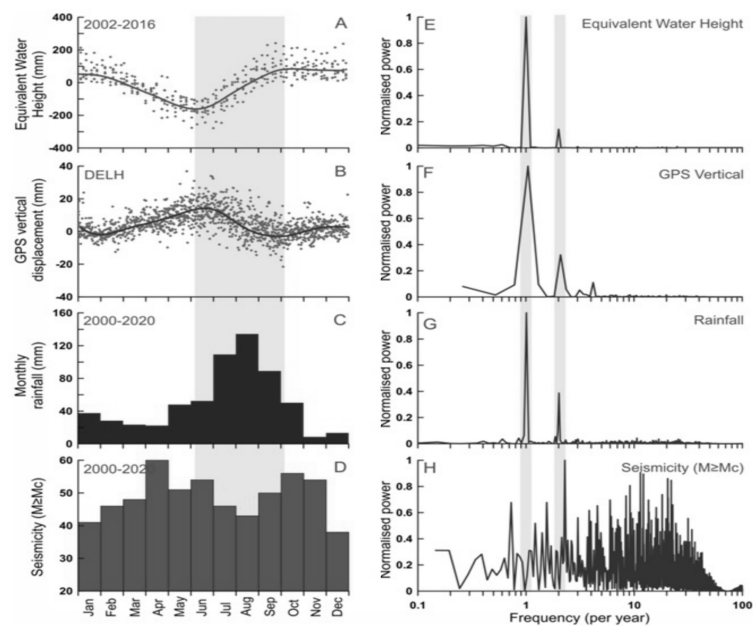


图1 阿拉瓦利-德里褶皱带等效水高度、垂向位移、降雨量以及地震活动之间的联系

(2) 阿拉瓦利-德里褶皱带地区地下水抽取和长期地震活动性调制

为了探究地下水抽取速率对地震的影响，研究者分析了2003年1月到2015年12月间总储水量以及地下水的变化。分析结果表明，地下水储量变化在2002—2015年为 1.6 ± 0.6 cm/yr，其中2003—2009年为 1.9 ± 0.6 cm/yr，2010—2015年间，则基本保持稳定， 0.02 ± 0.5 cm/yr。非常有趣的

是，地下水储量变化与地震活动也有密切关系。图 2 表示了陆地、雪水以及地下水储量异常，以及每月地震活动率。结果表明，阿拉瓦利-德里褶皱带的月地震活动变化和累积变化与地下水储量的趋势变化有很好的相关性。因此，这意味着阿拉瓦利-德里褶皱带周围的地震活动变化可能受到人为地下水抽取的影响。

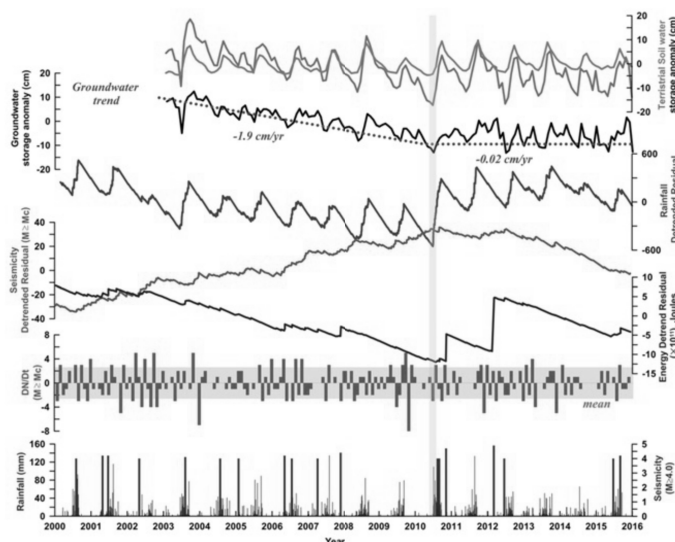


图 2 陆地、雪水和地下水存储异常的时间序列表

(3) 地下水开采引起的耦合孔隙力学模拟与断层稳定性分析

研究者设计了准二维流动-力学模型来探究由地下水开采导致的基底断层稳定性以及应力模式的改变。模拟结果以及相关的断层稳定性分析结果揭示了地下水长期开采的三个效应：①孔隙压力的耗尽导致含水层的有效压缩和孔隙弹性收缩增加，从而导致下沉；②由于水的重量从含水层中移除，导致基底弹性膨胀，从而导致基底载荷卸载；③压力扩散前沿向基底的传播和基底的弹性膨胀引起基底压降。含水层收缩和基底扩张效应共同调节基底断层上的有效应力状态。图 4 展示了在 20 年间由于水位下降导致的断层稳定性变化。据观察，基底断层在逆断层应力状态下会发生失稳，然而，有效法向牵引力的变化因断层相对于负荷源（即含水层）的位置而异。因此，中间断层的失稳速率比其他两个断层略高。过去二十年间观察到的地下水位下降和模拟结果是一致的

(0.3~0.1 cm/yr)。此外，模拟地面沉降速率 (0.2 cm/yr) 似乎与德里周围地区稀少的大地测量点得到的结果一致。

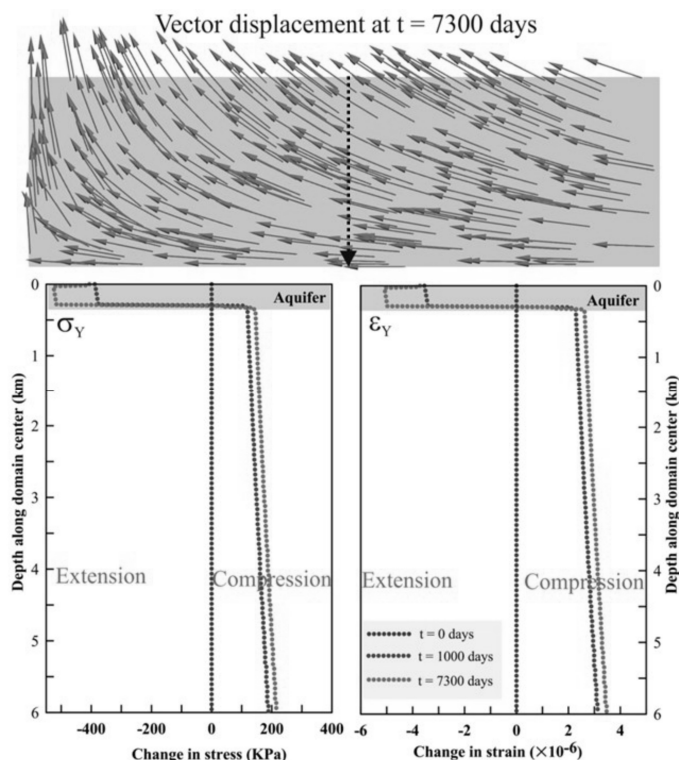


图3 储水层收缩与基底岩石扩张。上图显示模拟的20年后储水层抽水的位移矢量场，其对储水层收缩以及基底岩石扩张的影响以应力、应变变化形式表示在下方

基于以上的模拟结果，研究者认为，阿拉瓦利-德里褶皱带的地震活动可能受到人为地下水抽水诱发的断层失稳和蓄水层季节性水文负荷变化的影响。该地区地震发生在储水层之下的基底断层，是地区构造荷载的结果。然而，由于缺乏该板块内部大地测量结果的约束，构造应力累积的确切速率目前还不清楚。研究者认为，除了基底断层上正在进行的构造加载过程之外，由于大量抽取地下水和季节性水文负荷变化，在过去几十年中，显著的水平压缩已影响到孕震深度。

这一发现无疑提出了一个重要的问题，即人类诱发地震现象背后的物理学及其临界触发阈值。文献中报道了临界应力扰动，地震波：0.1~10 kPa；潮汐：0.15~0.3 kPa；人工地下水负荷卸载：0.05~0.15 kPa/yr。在板块边界（或板块内部）区域的大地震期间，气候引起的应力扰动是可忽

略的，但它仍然足以引起处于临界应力状态的断层系统的共振。此外，也有人认为，美国加州中部不存在较低的地震触发阈值，因为断层几何形状是随机的，地震被延迟或触发的概率相等。鉴于上述估计，研究者认为，德里地区周围含水层大量抽取地下水引起的库仑破裂应力变化接近地震活动的触发阈值。

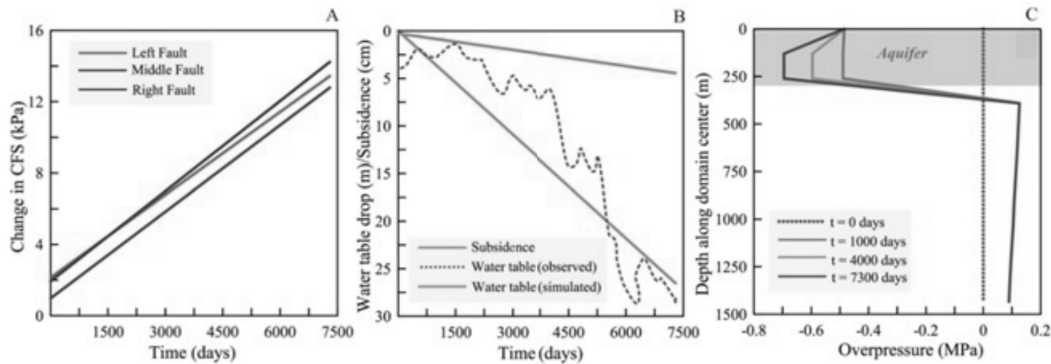


图4 断层稳定性、水位下降、地面下沉以及超压。A：由于水位下降导致的断层稳定性变化；B：观察到的和模拟的水位下降具有一致性；C：不同时间下超压随深度的变化

目前为止，地震数据库中已经报道了人类活动诱发的700多次地震，包括注水诱发地震，抽水诱发地震等。而越来越多的与诱发地震活动相关的自然观测表明，管理流体注入速率可能是一个减轻诱发地震发生的工具。为了评估诱发地震活动区的客观地震危险性，观测到的诱发地震活动的最大震级通常与注入或抽取的流体量成正比。然而，德里地区地下水开采量的时空速率是未知的，而这在碳氢化合物或地热系统中通常是已知的（诱发地震的情况下）。因此，在这里将地震震级与抽水量联系起来是比较困难的。

本文提供了一个新颖的方法，可用以解释德里地区的地震原因。该方法的新颖之处在于将多物理模型与大地测量和水文数据分析相结合，对世界上一个环境敏感地区的地震危险进行客观评估，流体流动和力学变形过程之间的双向耦合也为揭示隐藏的基底断层和有效预测诱发地震提供了希望。

来源: Tiwari, D K, Jha, B, Kundu, et al. Groundwater Extraction-induced Seismicity Around Delhi Region, India. Nature Scientific Reports 2021, 11, 10097.