

地震科技前沿快报

2023 年第 2 期（月刊总第 49 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、连续地球物理观测 30 年后全球宽带地震网的成就及未来

全球地震台网（GSN）出现在 19 世纪末和 20 世纪初，历经 100 多年的不断发展，得益于理论、技术、仪器、数据交换等方面的巨大进步，对解析地壳、地幔和地核结构、阐明板块构造和地幔对流系统的特征、快速表征地震、识别潜在海啸、监测全球核试验、环境变化分析等发挥了至关重要的作用。

全球地震台网（GSN）的维护专家系统回顾了 GSN 的历史、科学和监测成就，总结了关键发现，并讨论了在仪器校准、改进站点分布和多尺度分布、增加带宽和多仪器集成、旋转地震学、宽带阵列、提高长周期信噪比、改善定时、台站位置条件、正常模式的分辨率、计算地震学、机器学习、行星地震学等方面的机遇和挑战。

本文对于重大观测设施的运行、产出、未来发展方向等均具有重要的参考价值。

2、欧洲高地集水区洪水检测和表征的一种地震方法

欧洲约 10% 的地表区域容易被山谷中的河流快速淹没。现有水文测量网络站点密度和记录频率低，对水位高度以外的观测信息缺乏，加剧了洪水的潜在破坏性。研究者使用 2021 年 7 月德国 Ahrtal 洪水的地震观测数据，重建这一事件的演变过程。

结果表明，地震台站可以提供洪水强度、传播速度和碎屑（debris）运输率等指标。这些来自地震观测台站的信息可提供对未来灾难性洪水行为的高分辨率实时分析结果，也可以在当前无数据情景中提供宝贵的应急响应时间。

该文为地震数据的扩大应用提供了明确的实例。

3、贝加尔裂谷带地震速度和重力模型的 P 波接收函数检验

地震接收函数（RF）技术是一种经济的地球深层成像方法。研究人员比较了贝加尔裂谷带的 RF 和受控震源地震学结果，结果表明，不同的频率滤波器、沉积物中复杂相的存在以及地壳层性质的逐渐变化，都可能导致对 RF 和地质特征的错误解释。因此，对 RF 成像的解释应该与其他地球物理方法相结合。

连续地球物理观测 30 年后全球宽带地震网的成就及未来

全球地震台网（GSN）出现在 19 世纪末和 20 世纪初，这主要得益于理论、技术、仪器和数据交换方面的巨大进步。20 世纪中后期，世界标准化地震台网（WWSSN）和国际加速度计部署台网（IDA）的建立，提升了监测的全球覆盖度，同时，随着地震仪带宽的大幅增加，开始记录地球的主要地震谱图。全球观测和数据快速访问的现代化始于 1980 年代，特别是 GEOSCOPE 全球宽带地震台网（1982）和 GSN（1988）的启动。通过不断的改进，GEOSCOPE 和 GSN 已经实现了近乎实时的地面运动记录，具有最先进的数据质量、动态范围和计时精度，涵盖 180 个地震台站，其中许多位于非常偏远的地区。来自 GSN 的数据越来越多的与其他地球物理数据相结合。来自全球的地震数据对于解析地壳、地幔和地核结构，阐明板块构造和地幔对流系统的特征，快速表征地震，识别潜在海啸，监测全球核试验等至关重要，此外，还可用于环境变化分析。随着地球科学界不断推进对地球结构和弹性波传播过程的理解，GSN 的基础设施为实现越来越多的多仪器地球物理观测提供了一个跳板。在这里，研究人员回顾了 GSN 的历史、科学和监测成就，总结了关键发现，并讨论了未来的相关机遇。相关研究成果于 2022 年 9 月发表在 *Review of Geophysics*。

全球地震台网（GSN）在获取地面运动数据以监测和研究震源，利用地震波对地球内部结构进行成像方面具有百年历史。同时，这些网络在全球范围内广泛分布，在得到区域网络的补充后，成为跨固体地球、海洋、冰冻圈和大气圈的地球物理研究的多用途平台。在过去 40 年中，技术进步从根本上改变了获取和分发地震数据的方法和规模。近实时地震数据的传输对于快速表征全球地震和海啸警报至关重要，宽带地震数据对理解断层破裂过程十分重要。GSN 对全球核监测至关重要，这为其创建提供了大

量额外动力。全球常年的连续性地震观测还揭示了气候信号的时间演变，如风暴活动、海洋温度。尽管创建 GSN 的重点是尽可能提供高质量的地震数据，但许多台站已经发展到可记录其他类型的数据，如次声、磁场和气象数据。

1. 全球地震台网的发展历史

建立全球网络的开创性努力可以追溯到 Milne 网络，其部署于 1890 年代末 1900 年代初，在对地震波传播的基本理解和揭示地球一维结构方面发挥了重要作用。

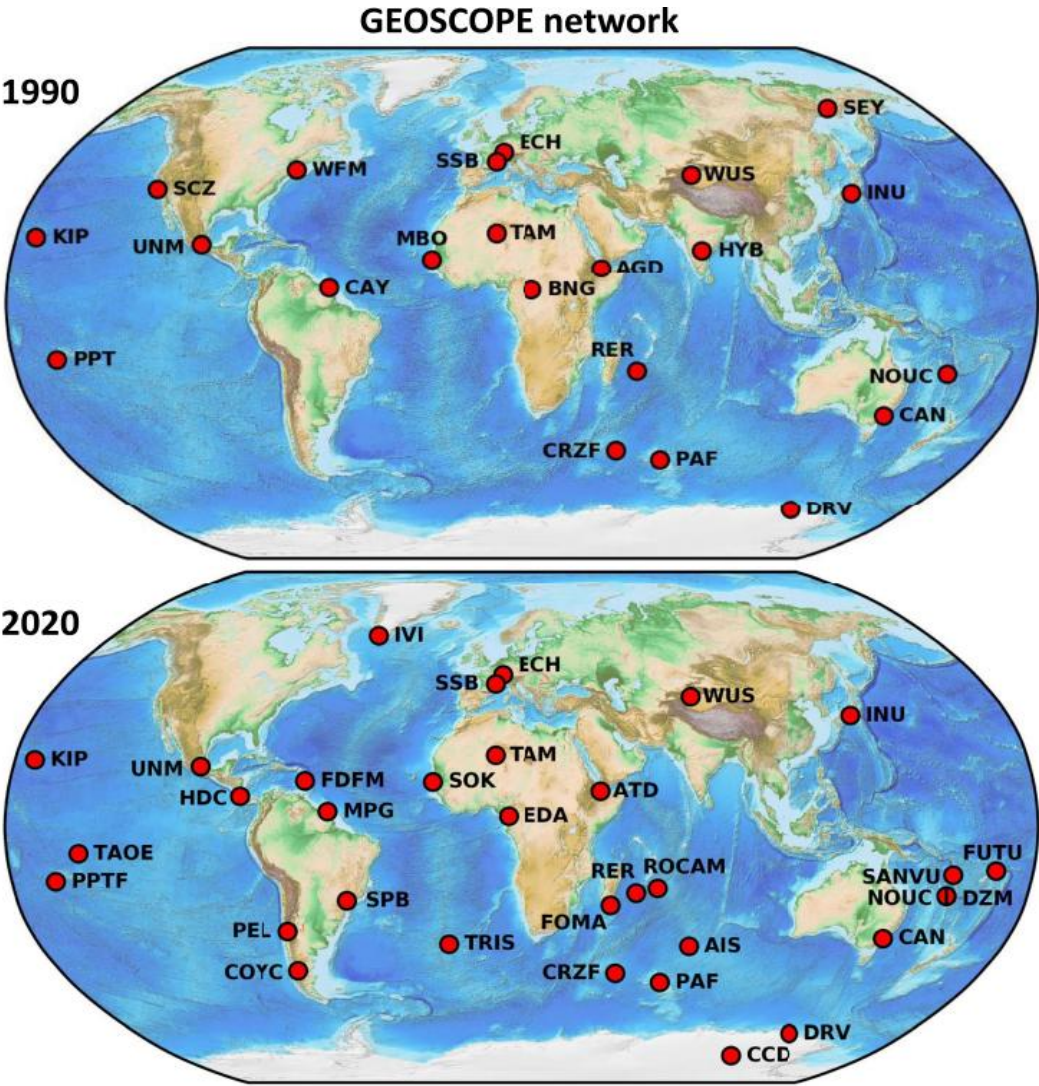


图1 GEOSCOPE 台网

低频和宽带全球传感器网络的发展: 1960 年代初期部署的世界标准化地震台网 (WWSSN) 大大改善了全球地震台站的覆盖范围, 并增强了对核爆炸和地震的监测能力。随着数字技术等的进步, WWSSN 在 1970 年代演变为全球数字地震台网 (GDSN)。在大地震后, 持续记录 >100 s 周期地面运动的需求导致了 1970 年代国际加速度计部署台网 (IDA) 的发展。这是一个由 24 台 LaCoste 和 Romberg 重力仪组成的开创性网络, 其首次提供了超长周期地震信号的高质量全球记录。

然而, IDA 重力仪网络无法对水平波场进行采样, 并且动态范围相对有限, 当存在大振幅面波时, 会导致地面运动记录失真。虽然 GDSN 中的仪器动态范围有所改善, 但对地面运动的长期观测会被当地压力和温度变化引起的噪声所掩盖。为了改善这些网络的缺点, 法国启动了 GEOSCOPE 全球宽带地震台网计划, 以部署一个由 Streckeisen STS-1 地震仪组成的全球网络, 超宽带 (VBB) 的 Streckeisen STS-1 能够记录比任何地震仪系统都多的地震频谱。

全球地震台网: GEOSCOPE 的早期成功凸显了 1980 年代初期同时运行的全球网络的局限性。1984 年, 美国地震学研究联合会 (IRIS) 提出了具有近实时遥测技术的由 150 个台站组成的 GSN。GSN 站点主要使用 IDA 和 GDSN 网络中现有站点的位置, 在 1980 年代后期开始部署, 许多站点在 1990 年代中期开始运行。

GSN 的模块化设计允许在新技术可用时轻松集成。2000 年代中期, GSN 台站开始部署新仪器, 如二级宽带地震仪、强运动加速度计和环境传感器。目前, GSN 的最新设备更新包括 Streckeisen STS-6 和 Nanometrics T-360 地震仪。这些传感器具有类似于 Streckeisen STS-1 的噪声性能, 但可以安装在钻孔和柱孔中。

其他一些国家的网络也做出了重要贡献，如 1990 年代德国创建的 GEOFON 宽带网络，其旨在提供多用途数据，并补充全球覆盖度。

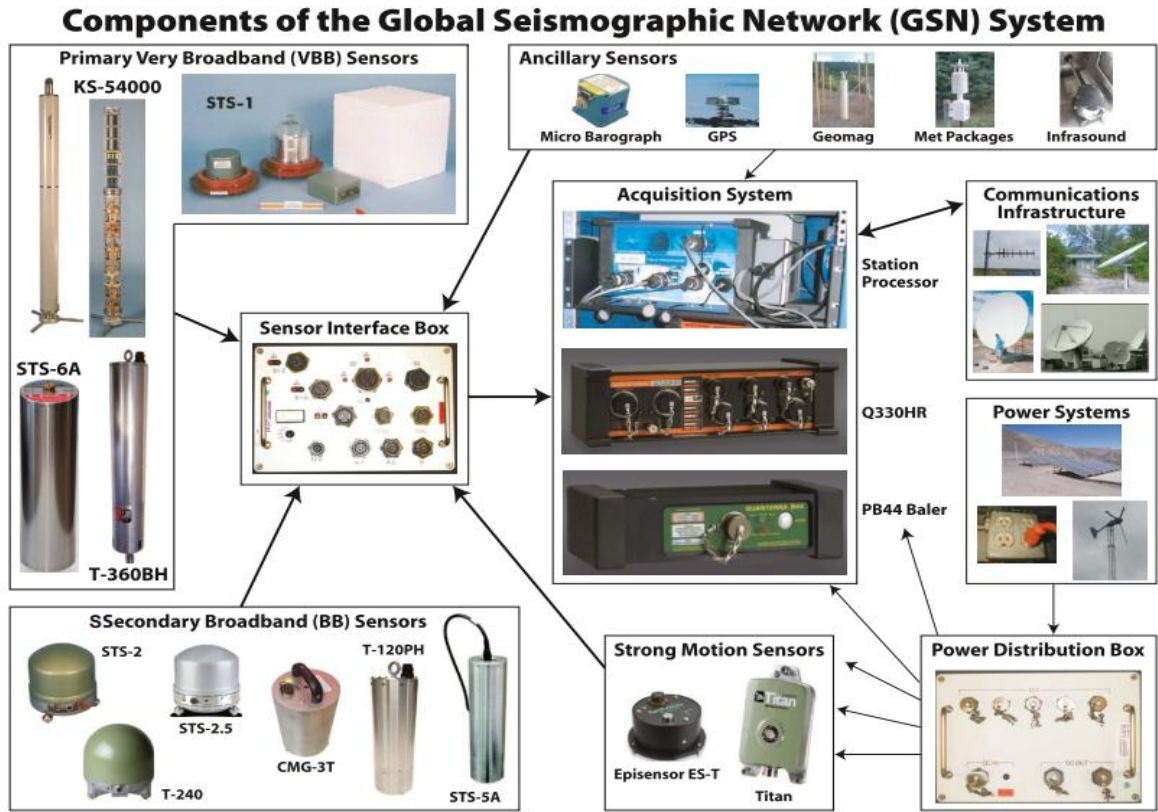


图 2 现今 GSN 相关组件

2. 全球地震监测

现代全球地震数据的遥测使依赖这些数据的组织能够几乎即时地对地震和核事件进行全球监测。来自位于偏远地区的站点提供的数据，使人类可以更好地改善定位精度和震级估计。

地震监测和辨别：全球地震监测网是为了满足三个需求而开发的：大地震的探测与震源表征；核监测和震源辨别；用于地震构造调查和地震灾害评估的综合性全球震源参数目录的开发。地震检测能力取决于给定地震台站的背景噪声水平，全球网络中许多地震台站的高质量安装和质量控制，使得这些数据对国家机构地震监测工作特别有吸引力。不同地震监测系统

和组织的优先级各不相同。例如，美国海啸预警系统使用 GSN 大约 5 分钟内提供的基本震源参数。作为这项工作的补充，USGS 国家地震信息中心（NEIC）专注于提供应急响应所需的地震位置、震级和震源机制的快速准确估计。

地震定位：高数据可用性、低噪声特性和良好约束的响应信息使 GSN 数据在确定震源位置、震级和地震矩张量解中被经常使用。重要的是，GSN 及其前身提供了过去 60 年或更长时间内唯一一致的全球到达时间集。除了提供到达时间外，这些长期运行的网络还促成了全球质心矩张量等工作。NEIC 等合作开发了全球地震位置校准目录，以确保位置偏差最小。ISC-GEM 全球仪器地震目录（Global Instrumental Earthquake Catalogue）是一项特殊的工作，旨在为所有 M 5.5 及以上地震生成一个统一的全球位置目录。

运行监测：可靠的矩张量反演和断层源估计依赖于分布良好、校准良好和低噪声的台站。GSN 对于 NEIC 计算矩张量解和更详细的震源研究至关重要，GSN 台站中包含的 VBB 传感器允许开发新颖且强大的矩张量技术，包括 W 相观测。GSN 和互补的 GEOFON 和 GEOSCOPE 网络的数据，可确保像 NEIC 这样的监测机构能够定期、统一地报告全球所有 M_w 5.8 或更大事件的 W 相震级及机制。

3. 超宽带地震观测

由于 GSN 在广泛频率范围内的全球覆盖和敏感性，其提供了支持整个地球结构的断层成像的数据集。大多数研究进一步用区域网络补充这些站点，以提高覆盖范围。GSN 和 GEOSCOPE 记录的低噪声和高保真数据对于估计衰减和探测地球深部相位的到达至关重要。

正常模式 (normal mode)：小于 1 小时周期的可见频谱峰值群对应于地球的自由振荡（即正常模式）。由于正常模式的振荡发生在几十分钟的周期内，并且地震数据在这些周期内往往会变得嘈杂，因此需要非常低的台站噪声水平来观察它们。大多数正常模式研究大量使用来自 GSN、GEOSCOPE 和其他 VBB 台站的观测。

面波：在对地壳和上地幔进行成像的研究中，严重依赖面波观测。它们传播的频率、偏振和方向相关性使地震学家能够估计 3D 速度变化，并绘制径向和方位各向异性图。由于面波随距离衰减的速度比体波慢，并且受到地球频繁的浅层地震的强烈激发，因此面波的全球普遍性和强度使人们能够使用其他方法来研究地壳和上地幔结构，特别是在没有地震台站的海洋之下。

体波：尽管可以通过临时部署地震仪来检测体波的到达，但 GSN 和 GEOSCOPE 等永久性网络提供了许多独特的功能，可以持续对地球深部结构进行成像。从地震尾波（seismic coda）中提取体波到达的、基于相关性的技术的出现，提供了一种新方法研究地震相位对（传统方法不易识别）之间的不同传播时间。高质量永久性全球网络所支持的地震观测时长和长期稳定性对于监测地下特征的微小变化至关重要，这是通过利用所谓的“重复”地震来完成的，其波形在相隔数年或数十年的事件之间几乎相同。

4. 全球震动图

正常模式中的地球参数：许多断层扫描模型的一个关键是将正常模式数据合并到地球结构反演中。在大多数 3D 地幔结构的研究中，正常模式数据被参数化为分裂函数，然后针对地球结构进行反演，这大大降低了反演所需的计算能力。与地球结构反演中的典型情况一样，参数权衡是正常模式反演中的一个重要考虑因素，特别是考虑到数据对多个参数敏感时。

到目前为止，还没有任何反演包括完全耦合的全部影响。一些理论研究探索了耦合近似（coupling approximation），并表明考虑这一点很重要，特别是对于密度。

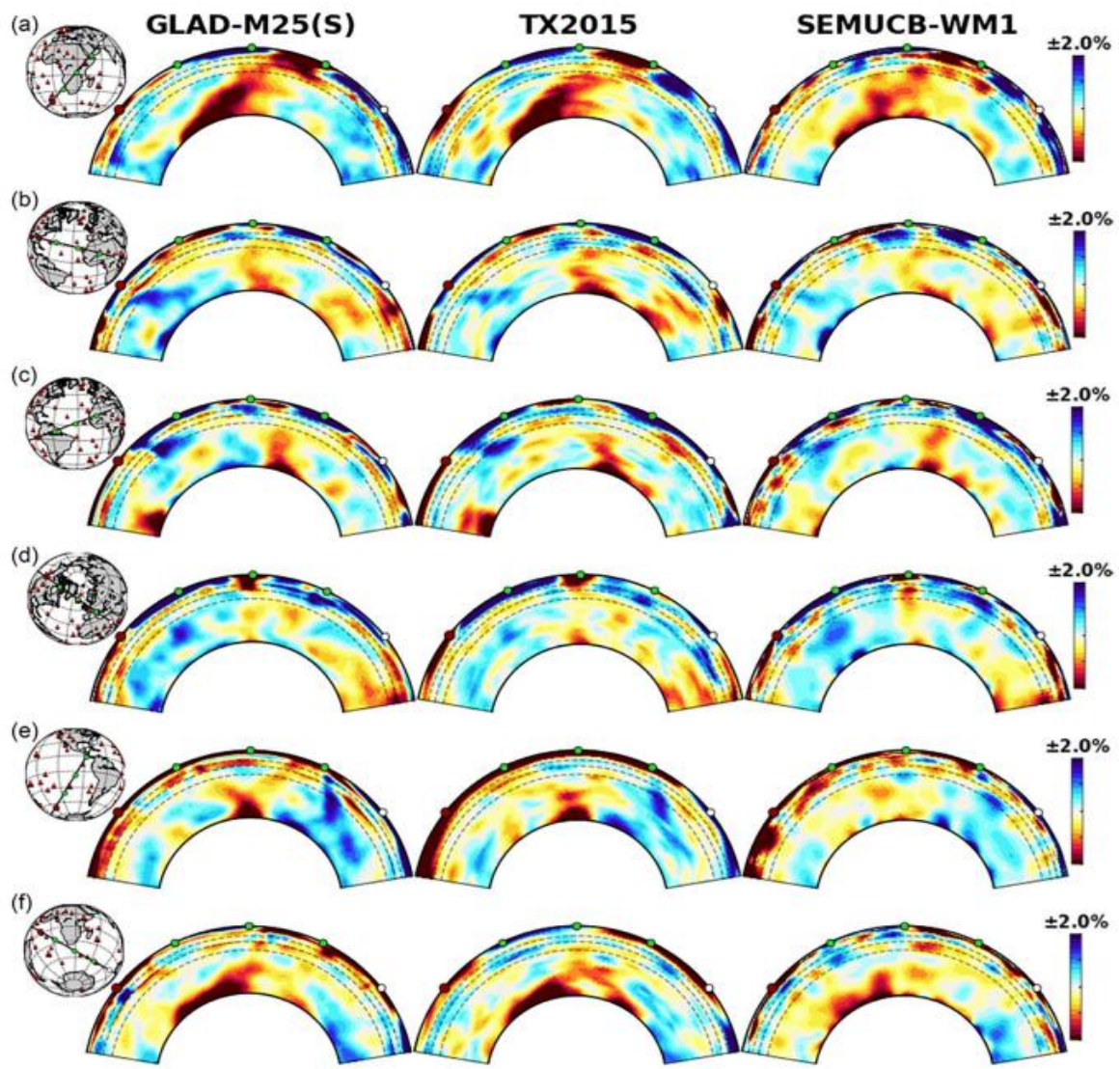


图3 地幔剪切波波速变化

研究发现，存在一组对地核敏感的不同的正常模式。目前，仍然存在的一个谜团是确定地核中存在哪些轻元素。矿物物理学家试图分析哪些铁合金可以解释从地震数据观察到的密度不足，而这一点的关键是改进地球的密度分布模型。

地球内核（来自随时间变化的地震波证据）：长期运行的台站能够记录几十年来对地核敏感的地震相。大多数探索内核旋转可能性的研究都有两个简化的假设：内核作为一个刚体在观测时间尺度上移动；近几十年来，这种旋转一直保持不变。许多早期论文中报道的向东的超自转速率可能在过去 10 年发生了变化。在不稳定的整体内核旋转框架内，存在解释所有详细观测的可能性，但在其整个体积中应该存在一定程度的叠加变形。这样的模型将具有更多的参数，而不仅仅是单个旋转速率。

全球地球模型：全球地震学对于揭示地球的大尺度结构至关重要，包括发现地壳、地幔以及外核和内核。全球地震波场如此丰富，再加上长期的观测历史，以及层析成像理论和方法的进步，使得地球模型的分辨率越来越高。增加区域网络的全球覆盖范围和维持台站的长期运行对于层析成像的进一步发展至关重要，正在开发的全波形反演将逐步有效地整合新数据，计算能力的进步正在推动更高频率的地震记录的利用。

地球结构调查：GSN 的升级和区域网络的全球覆盖范围不断扩大，不断揭示出可以纳入地球结构研究的新信号。一个值得注意的应用领域是对地球潮汐（地震仪器记录的部分最大信号）的进一步分析，使用地球潮汐进行成像的一个优点是它们在日周期内不断被激发。结合海洋载荷模型和局部场地效应校正技术的进步，地球结构反演（使用地球潮汐观测数据）有望在不久的将来取得进展。

5. 大地震和断层破裂成像

大地震破裂模型：在最短的时间内对大地震进行可靠的量化和表征是一项重要的科学和社会任务。相关方法都依赖于地震台站的地理分布、数据的实时传输和宽带特性。使用 W 相和最早到达的体波可以在地震发生后 15~20 分钟内对最大地震的关键参数进行稳健的全球估计，同时，全球地

震数据也可用于稳健地反演大地震断层破裂的时空演化。几种方法，如多点源反演、连续线源分析（continuous line source analysis），已被应用于来自 GSN 的数据。

大地震破裂过程及地震和大地测量的联合分析：对于发生在陆上或仪器设备良好地区的大地震，来自 GSN 的数据补充了其他地球物理观测，并与其他数据类型一起进行了最全面和最详细的分析。强运动记录和全球导航卫星系统（GNSS）的衍生位移对最近的源发射高度敏感，因此将它们添加到远震数据中可以提高局部分辨率。干涉合成孔径雷达（InSAR）可提供由大地震和浅部地震造成的近源地表变形的密集地表测量。目前，GNSS 和 InSAR 数据集越来越多地与地震数据集成，以实现联合反演，大大提高地震后大断层或断层系统的滑动分辨率。对于俯冲带地震，增加海洋和海底测量将有助于分析破裂特征，特别是在靠近海沟的地方。

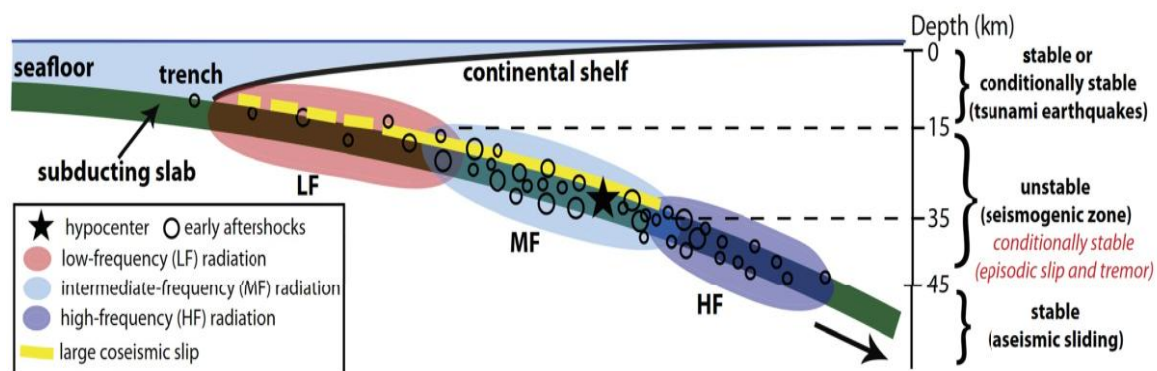


图 4 俯冲带大型逆冲地震的地震观测

大地震的弹性重力信号（elastogravity signal）：在几十到几千秒的时间范围内，安装在全球低噪声地点的高质量 VBB 传感器可检测新类别的信号，包括与地球上最大地震相关的信号。除了超长周期的正常模式信号外，人们对地震产生的动态重力扰动研究很少。当前的一个研究热点是即

时弹性重力信号（PEGS），其由两个过程产生：密度扰动引起的重力的自身变化；重力扰动地球后，弹性的重新调整。

6. 核实验辨别与监测

核试验的地震监测历史：继 1945 年 7 月 16 日美国的核试验爆炸和对日本使用核武器之后，另有七个国家相继承认进行了核试验。《不扩散核武器条约》（NPT）于 1970 年生效，截至 2022 年 3 月，共有 191 个国家成为 NPT 成员。《全面禁止核试验条约》（CTBT）的文本于 1996 年定稿，然而截至目前，其尚未生效。尽管如此，1996 年以来，旨在验证 CTBT 遵守情况的全球地球物理网络已经部署并运行。

GSN 促进爆炸监测：在大多数情况下，详细分析基于远震记录。然而，远震信号有时被证明是不够的。P 波与 S 波的傅里叶振幅谱比在 1980 年代被开发为判别式，但 1997 年在诺瓦亚·泽姆利亚（Novaya Zemlya）附近发生的事件使其成为区分地震和爆炸信号的有效方法。对该判别式的广泛研究表明，只要有足够高的信噪比记录可用，它就具有实用性。

7. GSN 促进地震事件定位

当地震学家谈到“地震数据”时，通常指的是震动图。然而，对于更广泛的地球科学家、工程师和其他利益相关者，“地震数据”是多种多样的。其中，最基本的是地震和爆炸位置、起源时间、震级和其他震源特征及强度信息。

传统的事件定位方法基于从震动图测量的特定震相的到达时间。研究表明，使用波形段定位方法可改善地震活动性较高地区的事件检测和定位。与应用于本地和区域台网的传统方法相比，使用来自稀疏台站网络的区域波形进行事件定位能更好地确定事件位置。此外，利用少数区域台站的波形相关性可以非常有效地发现余震事件，并且可以进行精确定位。

8. 环境地震学

全球分布式宽带地震数据采集和分析的大幅扩展推动了环境地震学的发展，其主要利用地震记录研究在固体地球（如冰冻圈）、大气圈和水圈中产生和耦合的近地表过程，包括与气候变化相关的影响。

海浪引起的全球地震激发：海洋重力波产生了全球最连续、最普遍观测到的地震信号。每个部署在地球上安静环境中的宽带地震仪都会记录地震能量中的两个频谱峰值，称为“初级”和“次级”微震。微震带（microseism band）创建了一个环境地震波场，可以使用地震干涉测量来处理该波场，以开展地球结构及时间变化研究。几十年来，微震波场被视为不受欢迎的噪声源，但在持续记录的高质量地震数据的推动下，背景噪声方法的进步使其被广泛用于从地壳到地幔最上层的成像，特别是通过瑞利波反演。

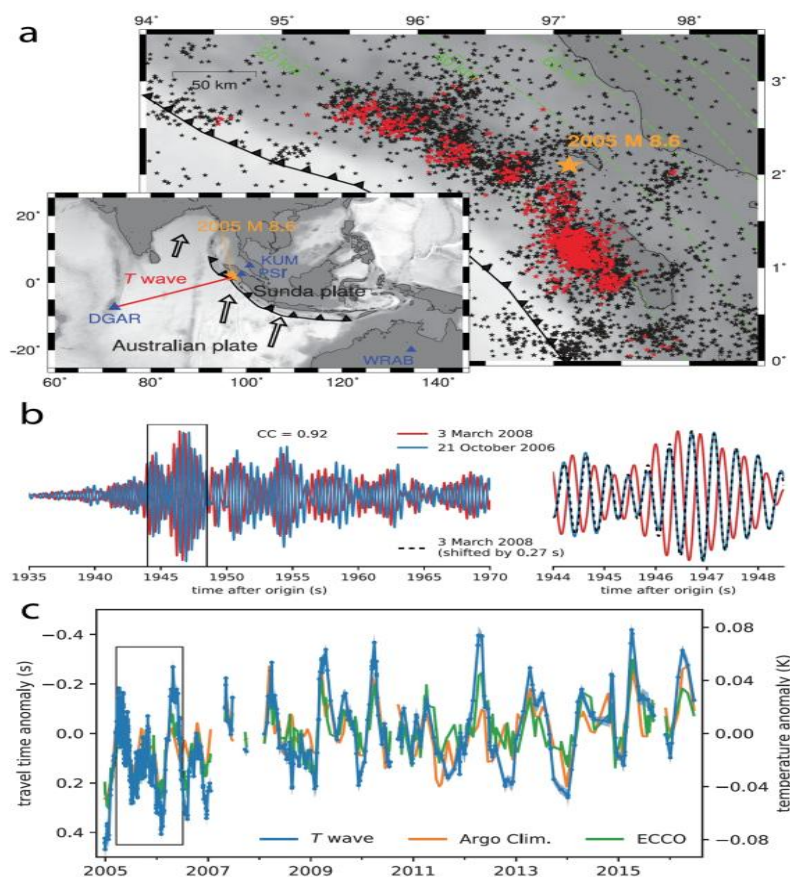


图5 海洋声学测温

海洋声学层析成像：利用海洋远距离的声波传播进行大规模海洋声学层析成像，早已得到认可。最近，来自长期运行的地震台站的数据开始被用于估计海洋温度变化。

冰川地震学：地震波很容易通过致密的冰传播，位于冰川和冰山附近或顶部的地震台站有助于监测冰冻圈的地震活动。越来越多的地震观测被用于检测脆性破裂、基底滑移和弹性响应，并为太阳系其他地方的冰体地震研究提供对比。

此外，地震记录还被用于其他研究领域，如冻土和冻湖的地震活动，雪崩、落石和山体滑坡等。

9. 非地震信号

现代地震系统的高灵敏度和大动态范围使其能测量由非地震波过程产生的许多信号。目前，许多地震台站都配备了辅助传感器，用于记录其他环境和地球物理现象。

次声和压力：声传感器与地震仪的联合部署为更好地表征地球物理和人为噪声源等提供了机会。在 1996 年决定部署全球次声阵列网络作为 CTBT 验证系统的一部分之后，次声研究有了显著增长。在过去的 20 年里，国际监测系统（IMS）发展成为了第一个现代全球次声网络。IMS 网络支持的研究随后推动了本地和区域次声网络的部署，这些网络通常与地震仪位于同一地点。在全球范围内，在多个台站观测到的大多数次声信号都是由火流星、火山、地震等产生的。

地磁：自 1970 年代以来，人们就注意到地震仪对磁场变化的敏感性，特别是在高纬度地区。科学家建议使用 μ 金属（一种具有高磁导率的镍铁合金）或其他铁磁材料来使地震仪免受磁场波动的影响，并记录局部磁场，以从地震数据中去除不需要的磁信号流。

气象：许多全球地震台站都配备了气象仪器，目前尚不清楚是否可以消除由局部风和温度效应引起的噪声。无论怎样，风速和风向的影响研究都有助于确定减轻这些有害信号的措施。

10. 未来机遇和挑战

仪器校准：GSN 的设计目标是将仪器的整个可用地震带宽校准到 1% 以内。试图验证 GSN 校准情况的研究表明，这一目标尚未实现，但随着时间的推移已经取得了稳步的改进。然而，在大型地震仪组成的网络中进行校准，仍然存在其他挑战。

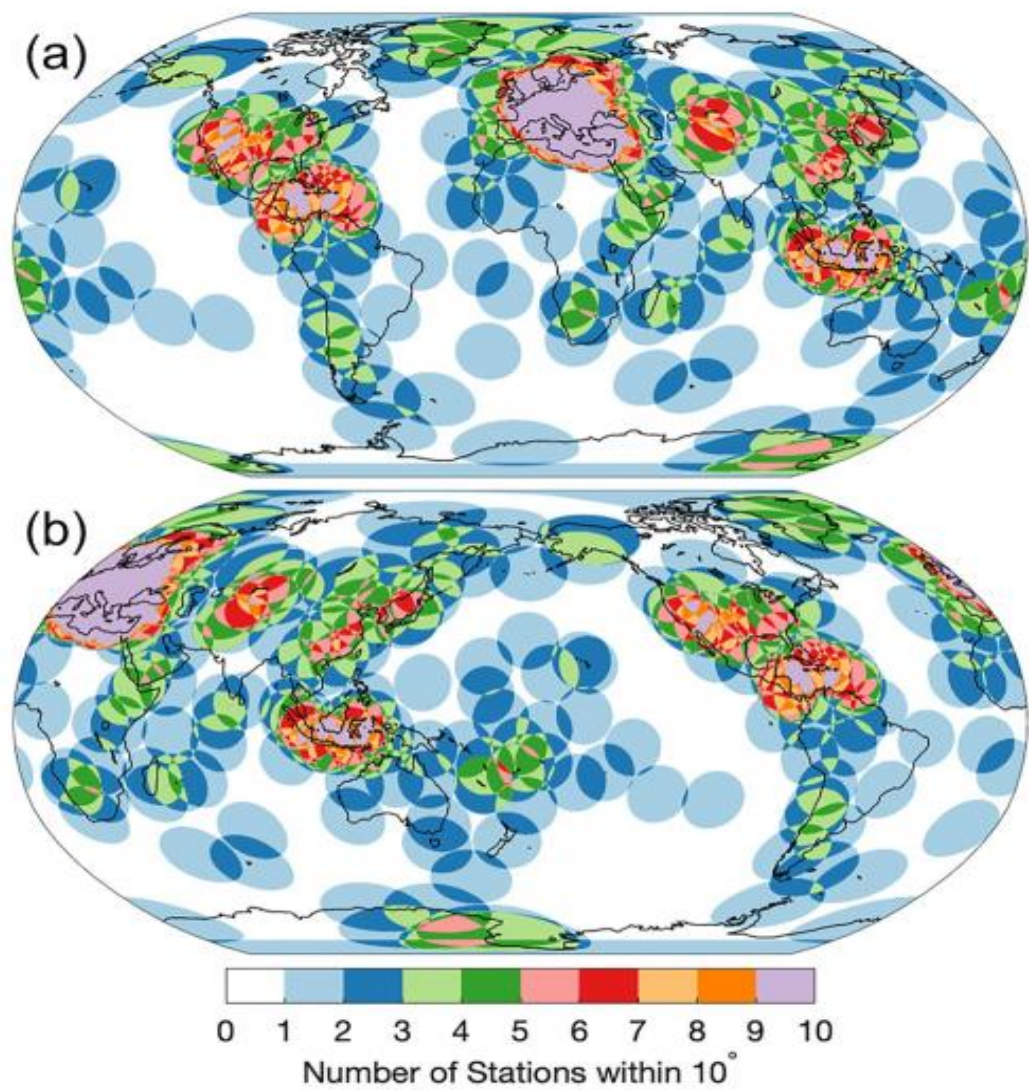


图 6 GSN、GEOSCOPE 等的总体台站密度

改进站点分布和多尺度分布：与发展海底基础设施相关的技术和地理挑战阻碍了统一、长期的全球宽带地震网的建设。几乎所有地震台站都局限于大陆和岛屿，导致对地球结构的检测能力不均匀。目前很有前景的方法是部署海洋水听器，特别是在海洋深处。但迄今为止，这些装置很少，而且比陆地台站成本高得多。最近的一项进展是 VBB 分布式声学传感技术的进步，该技术利用光纤散射和偏振将海底或陆地的光纤电缆当作大规模通道。在陆地上，开发具有较低设备成本和维护成本的下一代高质量地震台站为提高台站覆盖率提供了途径，特别是在采样相对稀疏的地区。

增加带宽和多仪器集成：GSN 多专注于大约 1 mHz~100 Hz 的主要“地震频谱”。然而，通过多仪器集成可增加全球弹性和非弹性变形的有效带宽，为进一步研究和理解地球的广泛动态过程，以及估计地球结构提供了绝佳的机会。随着全球近实时 GNSS 大地测量能力不断增强，提供了将全球观测带宽扩展到极长周期的途径。为了合并地震和非地震多仪器数据流，需要仔细的仪器协同校准和一致性评估。

旋转地震学：旋转地震学观察和利用在强、弱地震激发期间发生的惯性框架旋转，但惯性和平移传感器无法检测到。研究发现，旋转（卷曲）场可以使用专门仪器来检测。地震和旋转数据的综合解释可区分剪切波和勒夫波能量，并有助于提高局部剪切波速度结构的分辨率。低噪声旋转传感器的发展为全球旋转数据流网络提供了前进的道路，这可以提高对全球地震现象的理解。

宽带阵列：从 1960 年代初开始，地震学家开始构建地震阵列，其中包含主要以 L 形模式部署的地震仪，它们跨越几十公里的距离。随着地震仪器的不断发展，在过去 30 年中，三分量宽带地震仪阵列已在全球范围内部署，推动了对断层破裂动力学的理解，提高了地幔成像的分辨率。然

而，地震阵列绝大多数都位于北半球，并且通常需要长时间的操作来校准。GSN 设计委员会于 2002 年提议在选定的全球地震台站部署小孔径阵列，全球宽带地震阵列（GABBA）重点小组于 2013 年建议在全球范围内部署更大孔径（>100 km）的宽带阵列。

提高长周期信噪比：地震仪器的长周期自噪声水平改善缓慢，但对屏蔽仪器免受不必要非地震噪声源影响的研究已经取得了进展。最新研究发现，超导重力仪能够产生低于 1 mHz 的频谱，但迄今为止，用于这一目的的此类仪器相对较少

改善定时：现代地震数据使许多地震学家能够假设所有时间都是极其精确的，这与历史地震数据中必需的大量校正形成对比。然而，目前的计时精度可能不足以满足未来对地球内部的研究。

台站位置条件：多年来，局部应变-倾斜耦合一直作为强噪声源困扰地球潮汐研究者，同时，其亦在大于 25 s 的周期内产生异常的水平地震记录。近来的研究发现，进行局部应变倾斜校正有助于减少不良影响。

正常模式的分辨率：最近关于正常模式分裂函数的工作，为更好地解析密度提供了新的机会。未来的研究应特别关注奇次系数（odd-degree coefficient）的更可靠测量，这需要 GSN 台站提供高质量的低噪声频谱。同时，有必要加大从水平数据中测量环形模式分裂函数的工作，以约束对地幔各向异性的估计。

计算地震学：随着地震台站全球覆盖范围的提高，数值方法和计算基础设施也取得了进展，其中一些进展直接改善了全球地震学研究。合成震动图的改进与伴随法的结合允许通过全波形反演实现更高分辨率的 3D 地球模拟。尽管这些方法极大地提高了人类对地球内部进行成像的能力，但

它们仍然仅限于相对较长周期的相。随着计算能力和方法的改进,3D 震动图的获取和计算也有了改善的趋势。

机器学习：网络地震学在局部、区域和全球范围内的最新进展之一是机器学习重新成为处理地震数据的可行工具。最近对这些工具的关注,部分归因于机器学习工具广泛的可获取性和地震数据集的可访问性,将机器学习应用于地震学的一个重点将是开发辅助地震监测的工具。

行星地震学：截至目前,InSight 火星任务部署的 VBB 地震仪已经从这颗红色星球传输了超过 1200 个火星日的地面运动数据。开发 VBB 并确定其噪声要求得益于使用 GSN 站点进行的初步测试,同时 InSight 任务的数据的处理在很大程度上依赖于根据 GSN 数据开发并验证的技术。到目前为止,InSight VBB 数据已经导致了許多关于火星内部和地震活动的一系列重大发现。鉴于 InSight 任务的巨大科学回报,行星地震学的未来应该是光明的。

来源: Ringler, A. T., Anthony, R. E., Aster, R. C., et al. Achievements and prospects of global broadband seismographic networks after 30 years of continuous geophysical observations. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60, e2021RG000749.

高地集水区洪水检测和表征的一种地震方法

欧洲约 10% 的地表区域容易被山谷中的河流快速淹没。现有测量网络的缺陷（如较低的站点密度和记录频率），以及水位高度以外的信息缺乏，加剧了此类洪水的潜在破坏性。在本研究中，研究者使用 2021 年 7 月德国 Ahrtal 洪水的地震数据来提取信息，以补充稀疏的水文测量数据，并重建这一致命事件的快速演变过程。研究证明，地震台站可以提供洪水指标，如强度、传播速度和碎屑（debris）运输率。这些来自地震的信息可提供对非线性洪水行为的高分辨率洞察。研究认为，将分布式低成本地震仪与现有地震台站相结合的方法，可以提供有关高地集水区未来灾难性洪水和相关灾害的重要实时数据，也可以在当前无数据情景中提供宝贵的响应时间。相关研究成果发表在 2022 年 10 月的 *Geophysical Research Letters*。

对于覆盖了 10% 欧洲地表的狭窄高地山谷而言，河流洪水是一个主要危害。虽然阿尔卑斯山社区普遍对这种危害有所了解，但其他高地地区的认知度较低。此类流域中的社区需要有效且可靠的洪水预警，但即使现有的水文站网，也无法充分预测、跟踪和描述 10~100 km² 集水区内快速演变的洪水。而且，洪水输送的碎屑和伴随的沉积物负荷会大大增加单独由洪水造成的破坏。

2021 年 7 月 14 日—15 日，德国埃菲尔（Eifel）高地地区在三天内排放了高达 250 mm 的降雨后，迅速演变成洪水。淹没了 15 个城镇的部分地区，并造成 134 人死亡。附近水文站数据的非线性增长，加上缺乏动态信息，决策者的双眼基本被蒙蔽。水文过程线的互相关分析并不能为充分的预警提供坚实的基础。为了提高对快速发展的洪水的预测，需要更详细的信息，至少是关于水位和洪水传播速度的信息，最好还可以提供关于洪水泛滥河流中的大块碎屑的信息。

安装在距洪水河道安全距离处的地震仪对水位、流量和事件传播速度等多个洪水参数敏感，它们可记录河流过程的地面运动特征，例如湍流驱动的力的波动和床载颗粒（bedload particle）对河床影响，并叠加在许多其他地震信号上。

本研究使用位于阿尔韦勒（Ahrweiler）附近阿尔（Ahr）集水区的德国区域地震台网的地震台站数据，对其进行质点运动分析。通过基于湍流和床载运输的物理模型进行水位和碎屑通量地震谱的反演，实现提取不断演变的高地河谷洪水基本信息的目标。其中，欧洲容易发生洪水的山谷景观总面积的估计采用 30 m 数字高程模型进行。

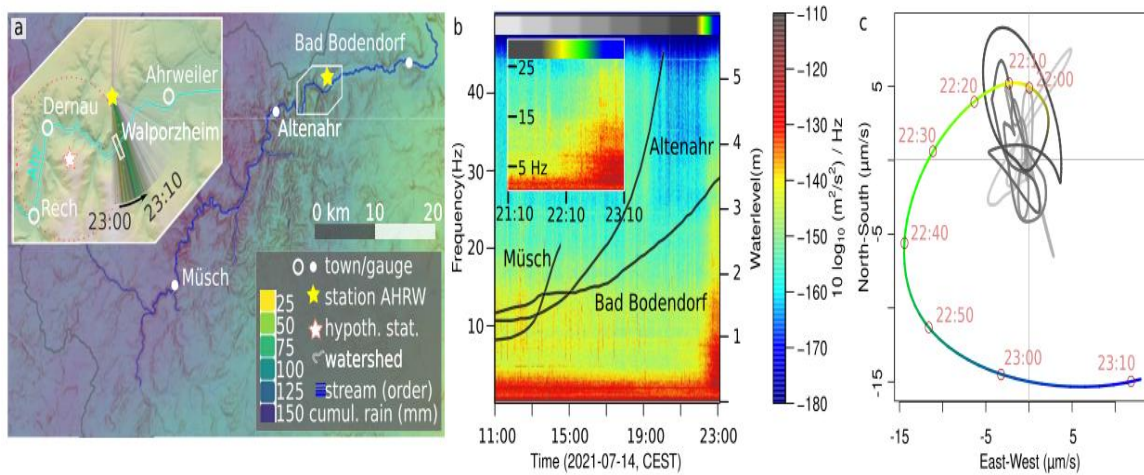


图 1 洪水影响下的 Ahrtal 和洪水的地震印记。(a)地形和降水强度（2021 年 7 月 12—15 日，共 72 小时）；(b)以可用的水文过程线记录的 AHRW 站频谱图；(c)AHRW 站地震质点运动的水平轨迹

（1）洪水的地震足迹。在洪水过程中，2 Hz 左右的恒定地震功率很可能是由 Ahr 在水位<1 m 时的湍流引起的。随着洪水的推进，所有频段的地震功率都增加了 300 倍。AHRW 站的地震质点运动主要围绕坐标原点。系统质点运动模式可以归因于地表倾斜，此地表倾斜是由一个大的、可移动的质量从西南逐渐接近台站，经过台站向南，然后又向东移动导致的。因为有几公里外洪水的地表荷载造成的，所以清晰的倾斜轨迹可以是洪水

传播的一阶指标。如果它随着时间的推移逐渐演变，则震源沿着河道移动，并且在地震仪的可感知距离内。因此，谱图和质点运动分析允许一阶的定性洞察，这对洪水早期探测和预警有用。

(2) 有关洪水动力学的洞察。 研究人员根据地震湍流信号对水流深度的依赖性和移动固体颗粒在洪水河床上所引起的地面运动来估计水位。研究发现，基于蒙特卡罗的反演在计算上是高效的，且可以大致描述洪水过程中 Ahrweiler 附近的水位，以及非线性脉冲式演化。

与反演水位的狭窄的不确定性范围相比，碎屑通量的可能模型解的离散程度要大得多。水位和碎屑的时间序列不是以线性方式演变的，这突出了地震信号的复杂性，引发这些地震信号的原因是大量湍流与河床条件（在空间和时间上不断变化）及分布式基础设施的相互作用。

研究发现，使用单一传感器振幅模拟方法可以近实时地确定和传递不同定居点的洪水到达时间和计算出的水动力指标。在区域仪器网络部署到位的地方，则可以跟踪快速移动的洪水。

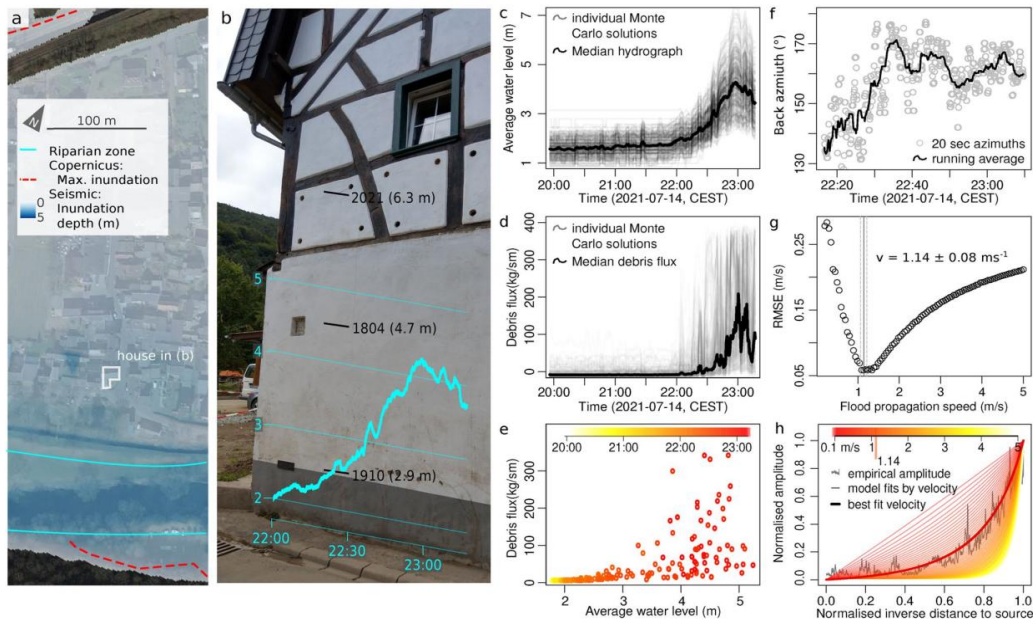


图2 洪水的地震信息（包括地震反演的水文过程线、碎屑通量、水位和碎屑通量之间的关系等）

(3) 迈向实时洪水预报。整体而言，从为地震学设立的单个地震台站记录的数据中提取关于不断演变的高地河谷洪水的基本信息是可能的。地震方法可以支持无水文站集水区的洪水预警，并且明显有助于优化目前仅配备水文站的高地集水区的洪水预警。此方法是一种通用工具，原则上适用于类似地形环境中的任何地方，其依赖的具体现场参数只需要被估计一次，以校准模型。在此过程中，需要谨慎解释水位和碎屑的反演时间序列。

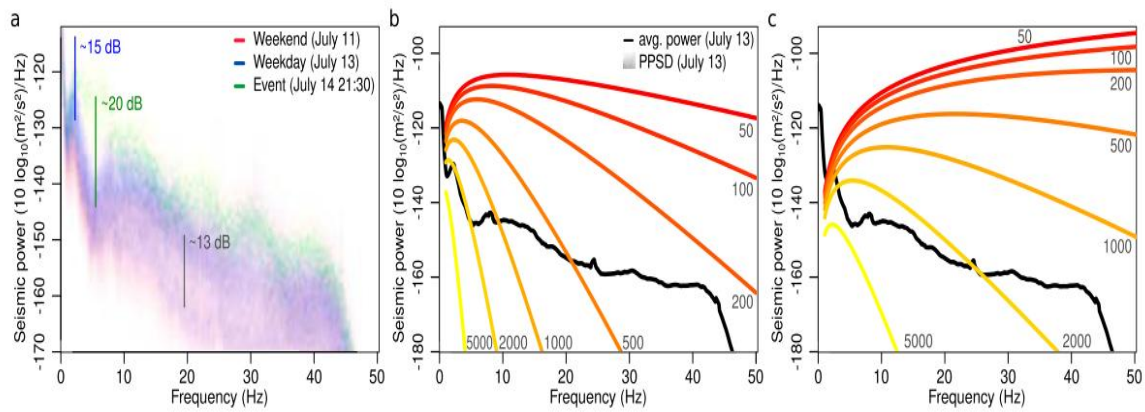


图3 在距河道不同距离处记录的洪水地震背景和理论谱图。(a)洪水（绿色）之前周日（红色）和周二（蓝色）的功率谱密度；(b)不同距离的湍流引起的地震功率谱；(c)不同距离的碎屑输送引起的地震功率谱

利用地震信号检测洪水的局限性在很大程度上受控于洪水信号相对于地震噪声水平的强度。研究发现，可以通过选择一个适当的位置来降低背景噪声水平。地震台站位置的优化以及多个台站数据的结合，可以提供更多的有关洪水位置、速度、水位以及因此被淹没区域和碎屑的更加稳健的信息。在这一过程中，需要辅以额外的遥测站，而且需要部署于最适合洪水检测和量化的位置。

正常运行的洪水检测网络需要可进行预定义处理例程的稳健工作流，机器学习在其中发挥着重要作用。但是，有关快速发展的高地洪水的地震

数据比较稀缺，这一局限使研究人员更倾向于使用经典的基于规则的方法来进行洪水的地震学检测。在此方法中，参数在大多数情况下是独立的，可以通过设置用于洪水识别的独立指标的阈值数量来抑制误报。

欧洲近 10% 的地表由高地集水区组成，这些集水区容易发生快速演变的洪水。当应用基于高分辨率过程的洪水模型来识别易受洪水直接威胁的景观元素时，这一面积甚至更小（1.3%）。当所有面临洪水威胁的欧洲区域都配备实时遥测地震台站后，这一分布式网络将系统性地留出几个小时的准备时间，以向居民通报即将到来的洪水，并帮助优化快速响应和救援活动。

来源：Dietze M, Hoffmann T, Bell R, *et al.* A seismic approach to flood detection and characterization in upland catchments. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(20): e2022GL100170.

贝加尔裂谷带地震速度和重力模型的 P 波接收函数检验

地震接收函数 (RF) 技术是一种经济的地球深层成像方法。P 波接收函数 (RFs) 通过分析 Ps 相位和倍数 (反射波/转换波) 限制地壳厚度和平均 V_p/V_s 。区域研究经常显示, 受 RF 和反射/折射方法限制的莫霍面 (Moho) 深度之间存在显著差异。通过计算地震折射/反射速度模型的 1480 个合成 RFs, 并使用两种常见 RF 技术 (H- κ 和通用转换点堆积) 对其进行处理, 研究人员比较了贝加尔裂谷带的 RF 和受控震源地震学结果。之后, 将所得到的合成 RF 结构与速度模型、密度模型 (由重力和速度模型导出) 以及观察到的 RF 结构进行了比较。结果表明, 不同的频率滤波器、沉积物中复杂相的存在以及地壳层性质的逐渐变化, 都可能导致对 RF 和地质特征的错误解释。因此, 对 RF 成像的解释应该与其他地球物理方法相结合, 特别是在复杂的构造区域, 长波长的布格重力异常信号可以为从 RF 成像结果中确定正确的莫霍面深度提供有效校准。相关研究成果于 2022 年 8 月在线发表于 *Geophysical Journal International*。

地壳和上地幔深部结构的地球物理图像为了解区域地球动力学过程和地表地质提供了重要信息。常用的地震方法有深地震法向入射反射、折射/广角反射、接收函数 (RF) 和各种层析成像方法。这些方法通常提供类似的结果, 特别是前两种方法, 而可控震源地震与 RF 的结果之间的一致性变化较大。对原始地震波形和反卷积所采用的不同滤波器会影响 RF 结果和相关的地质解释。因此, 研究 RF 与其他地震/地球物理方法之间的差异非常重要。贝加尔裂谷带 (BRZ) 位于西伯利亚克拉通和阿穆里亚 (Amurian) 板块之间, 前人用各种地球物理方法对 BRZ 下的地壳和地幔结构进行了研究, 基于不同地球物理模型的解释有助于讨论 BRZ 之下岩石

圈和/或地壳是否因裂陷而显著变薄，以及导致裂陷过程的机制（如地幔底辟作用或构造伸展）。

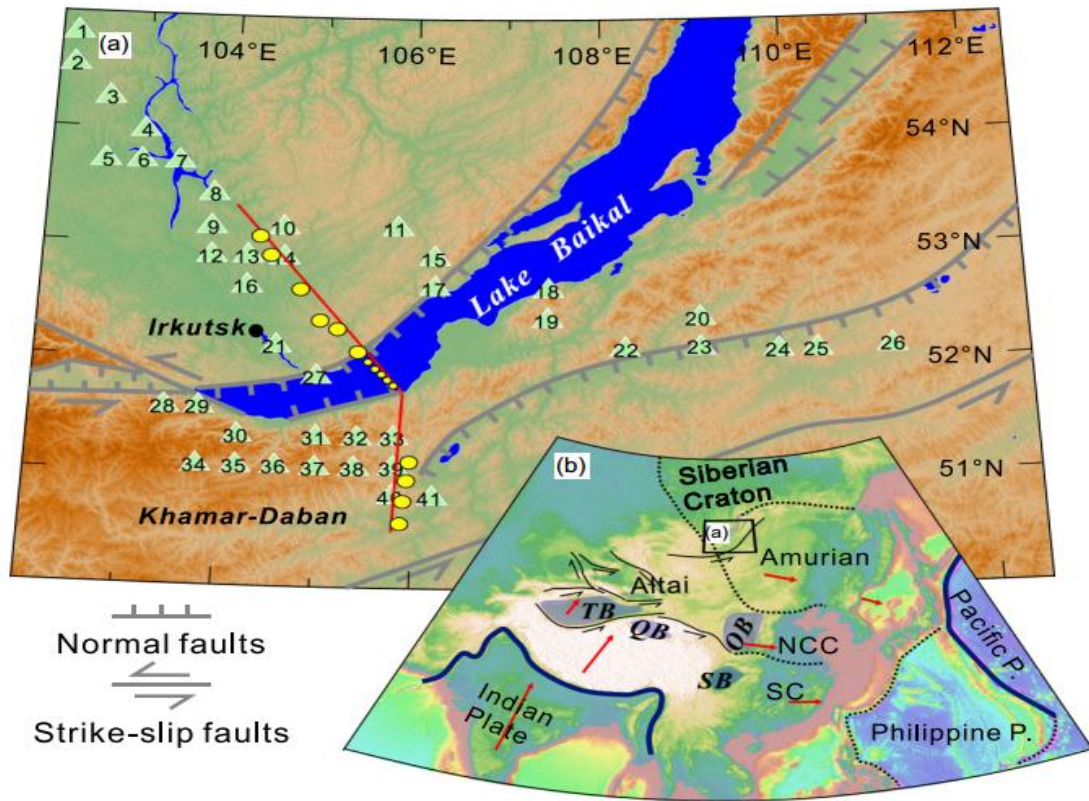


图1 研究区概况

研究人员系统地研究了 BRZ 接收函数地震方法与可控震源地震方法的区别。基于从地震速度模型中提取的一维速度剖面，计算了 74 个虚拟地震台站（每 5 km 一个）沿 370 km 长速度剖面的合成 RF。在计算过程中，使用高斯滤波器 $G(\omega) = e^{1\omega^2/4\alpha^2}$ 来去除高频噪声，其中 $\omega(2\pi f)$ 是角频率，术语“ α ”是控制 RF 的有效频率的高斯因子。在高斯因子为 1.0、2.5、5.0 和 10.0 的情景下（等价于截止频率 0.5、1.2、2.4 和 4.8 Hz），对范围为 0.04~0.08 s/km 的射线参数(ray parameter)进行反卷积，步长为 0.01 s/km。

(1) 合成接收函数。为了将 RF 从时间域迁移到深度域，通过以下方法计算一维速度模型中不同界面的 T_{Ps} ：

$$T(Z, p) = \int_0^{Zp} \frac{u^2(z)}{(u^2(z) - p^2)^{1/2}} dz$$

其中 p 是射线参数, $u(z)$ 是慢度 (slowness) 或逆速度 (inverse velocity), z 被用于定义向下为正的深度。对于射线参数 p , 在深度 Z 处, 正演计算 $T_{Ps}(Z, p)$ 为:

$$T_{Ps}(Z, p) = T_s(Z, p) - T_p(Z, p)$$

对于给定的 $T_{Ps}(Z, p)$, 相应的深度 Z 是唯一定义的。Ps 射线的水平投影计算公式为:

$$X(Z, p) = \int_0^{Zp} \tan \theta dz = \int_0^{Zp} \frac{p}{(u^2(z) - p^2)^{1/2}} dz$$

其中 $u(z)$ 为 Ps 波的慢度, θ 为射线的入射角。

假设介质为单层介质 (即地壳为一层, 性质均匀, 莫霍面平坦), 通过 H - κ 堆积可确定地壳厚度和地壳平均 V_p/V_s , 其中 H 为地壳厚度, $\kappa = V_p/V_s$ 。对于每一个 H 和 κ , 可以计算出直接 P 波与三种转换波 (Ps, PpPs 和 PpPs+PsPs) 的理论传播时间差:

$$T_{Ps} = H_{\text{Moho}} (\sqrt{Vs^{-2} - p^2} - \sqrt{Vp^{-2} - p^2})$$

$$T_{\text{PpPs}} = H_{\text{Moho}} (\sqrt{Vs^{-2} - p^2} + \sqrt{Vp^{-2} - p^2})$$

$$T_{\text{PpPs+PsPs}} = 2H_{\text{Moho}} (\sqrt{Vs^{-2} - p^2})$$

对应着:

$$H_{\text{Moho}} = \frac{T_{Ps}}{\sqrt{\frac{\kappa^2}{p^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{Vp^2} - p^2}}$$

$$H_{\text{Moho}} = \frac{T_{\text{PpPs}}}{\sqrt{\frac{\kappa^2}{p^2} - p^2} + \sqrt{\frac{1}{Vp^2} - p^2}}$$

$$H_{\text{Moho}} = \frac{T_{\text{PpPs+PsPs}}}{2 \sqrt{\frac{\kappa^2}{Vp^2} - p^2}}$$

其中射线参数 p 是已知的。假设 Vp 已知，可以计算出每对 H - κ 值的 T_{Ps} 、 T_{PpPs} 和 $T_{\text{PpSs+psp}}$ 。将 T_{Ps} 、 T_{PpPs} 、 $T_{\text{PpSs+psp}}$ 对应的 RF 振幅堆积如下：

$$s(H, \kappa) = W_1 r(T_{\text{Ps}}) + W_2 r(T_{\text{PpPs}}) - W_3 r(T_{\text{PpPs+PsPs}})$$

W_1 是加权因子， $\sum W_i = 1$ 。研究人员使用常用加权因子 0.6、0.3、0.1，普通地壳 $Vp = 6.3 \text{ km/s}$ 进行 H - κ 堆积。

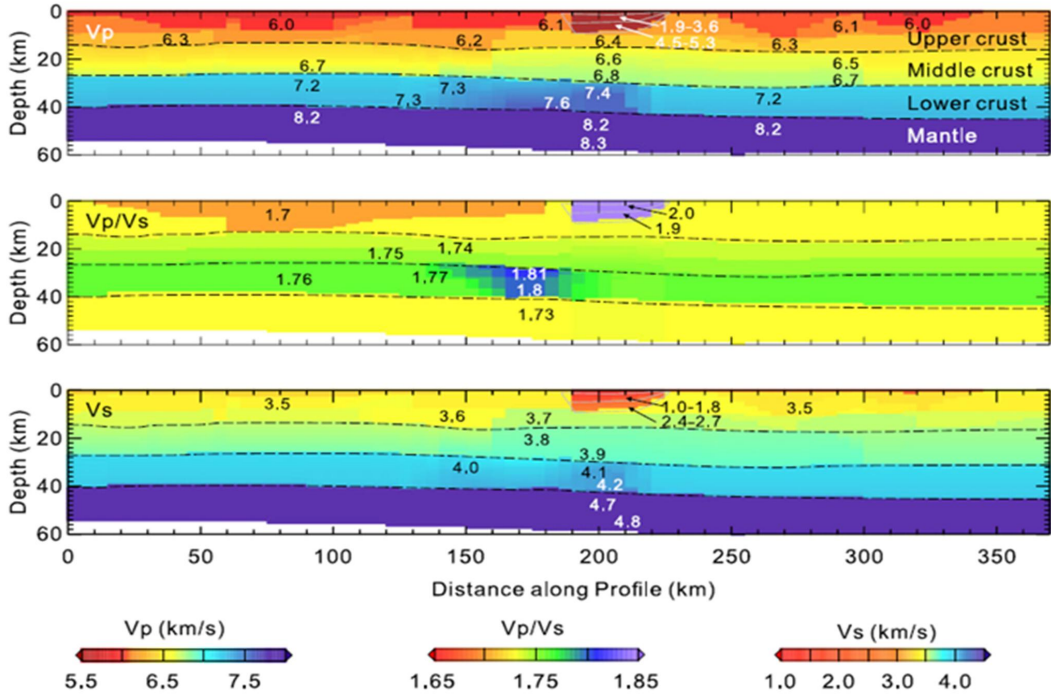


图2 用于 RFs 正演模拟及地壳几何形状和密度约束的折射/反射速度模型 (R/RVM)

基于三种不同的速度模型将 RFs 迁移到深度域：①地震 R/RVM，用于生成合成 RF；② H - κ 堆积速度模型 (HVM)，即假设地壳平均 Vp 恒定为 6.3 km/s ，由 H - κ 堆积得到 Vp/Vs ；③平均区域速度模型 (ARVM)，其地壳参数对应于 BRZ 的典型大陆地壳，即地壳平均 $Vp = 6.35 \text{ km/s}$ 、 $Vp/Vs = 1.75$ ，用于 RFs 向深部迁移。

(2) 重力限制。在 ICGEM 网站 (<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>) 上, 研究人员计算了 BRZ 及其周边地区的布格重力异常。基于统计密度-速度关系, 将地震速度模型转换为密度模型, 计算理论布格异常。

为了简化这一过程, 利用区域 RFs (或 H- κ 结果) 得到的深度, 推导布格重力异常与莫霍面深度之间的局部经验关系, 然后应用该关系得到布格重力异常的近似莫霍面深度。

假设莫霍面深度与布格异常符合 $\Delta g_B = a + b \times H$, Δg_B 为布格重力异常, a 和 b 为经验参数, H 为莫霍面深度。据此, 计算莫霍面深度为:

$$H_{g(Moho)} = (\Delta g_B - a) / b$$

最后的 $H_{g(Moho)}$ 由最佳拟合 a 、 b 和 Δg_B 确定。通过这种方法, 确定了在所有 $H_{RF(Moho)}$ 中与 $H_{g(Moho)}$ 偏差最小的最终 $H_{RFi(Moho)}$ 。来自近地表密度异常 (如沉积地层) 的短波布格异常可能具有较大振幅, 为此, 研究人员平滑了重力信号。

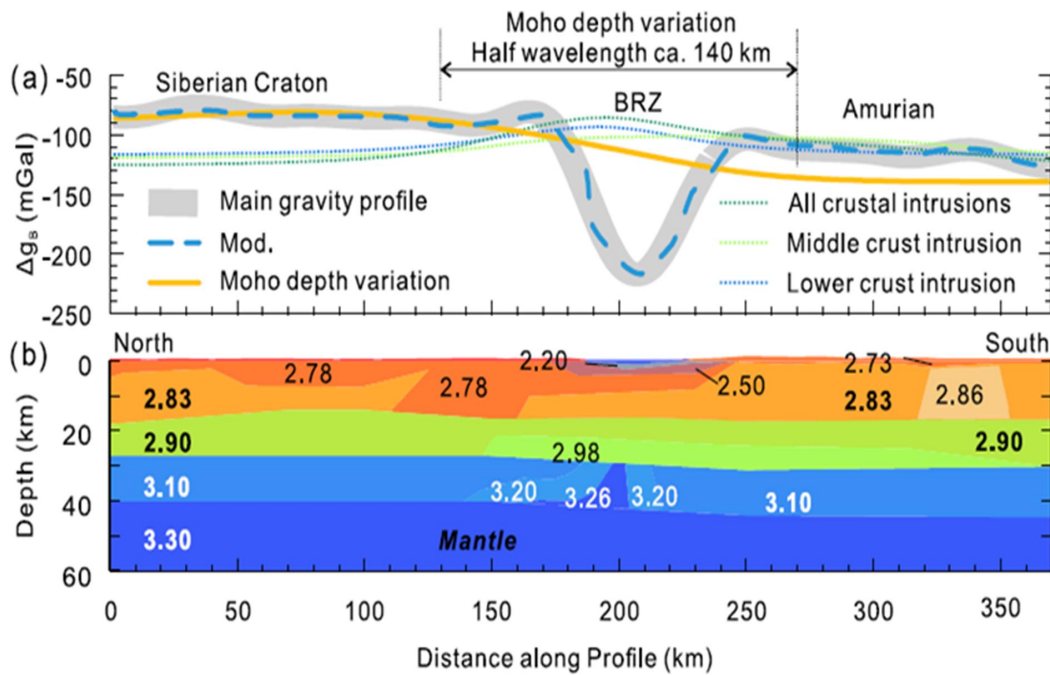


图3 BRZ 的重力模型

(3) 讨论。根据频率组成 (frequency content) 的不同, 可以从 RFs 剖面中解释不同的地质模型, 但没有一个与综合计算中使用的实际速度模型相对应。一般来说, 高频 RFs 比低频 RFs 具有更好的地壳模型分辨率, 尽管信噪比 (SNR) 也可能随着频率的增加而降低。由于分辨率和信噪比之间的权衡, 通常在计算 RF 时选择没有强随机噪声的最高可能频率。从理论上讲, H- κ 堆积的主要能量可能来自于实际速度的不连续。然而, 在厚的低密度沉积层存在的情况下, 莫霍面 Ps 会被沉积序列的倍数隐藏。在更简单的结构中 (没有沉积物的显著影响), 高频 RF H- κ 堆积可以获得稳定和正确的莫霍面深度和平均地壳 V_p/V_s (在使用重力插值法进行选择后)。然而, 由于不同信号组合导致真实信号失真, 低频 RF 估计的 V_p/V_s 通常过低。

在使用 HVM 和 ARVM 将 RF 迁移到深度域时, 需要假设整个下半无限空间具有相同的速度。不同速度模型偏移的低频 RF ($\alpha=1.0$) 剖面有显著差异。高斯因子 $\alpha \geq 2.5$ 时, RF 的通用转换点 (CCP) 堆积剖面与真速度模型一致, 得到的莫霍面 Ps 相 (无干扰) 和 H- κ 堆积的 V_p/V_s 都相对准确。

将重力校正应用于贝加尔湖地区, 结果表明, 具有最佳拟合 a 值和 b 值的 $H_{g(Moho)}$ 约束了正确的莫霍面深度, 如同 R/RVM 模型一样。即使在贝加尔湖下面 (距剖面离 200 km 左右), 公式 $H_{g(Moho)} = (\Delta g_B - a)/b$ 仍旧提供了稳健的结果。重力信息的 RF 莫霍面深度校正可以指导 RF 解释, 从而得到正确的值, 而地壳结构效应会使纯 RF 解释得到错误的结果。

合成 RF 与堆积的真实 RF 差别较小。重力信息约束下的模型与 R/RVM 模型基本一致。密度模型的敏感性检验表明, 大多数重力异常源的密度都得到很好的限定。一般来说, 地壳和地幔之间的密度差异很大。但是, 地壳与地幔之间的实际密度差异并不影响采用本文插值方法的可能性, 只是

密度差异小的地区，其不确定性可能比密度差异大的地区大。

一般认为，地壳最强的 **Ps** 相来自莫霍面。然而，在许多构造环境中，**RF** 莫霍面信号并不是最强的振幅，这种情况需要对台站信号进行综合分析，并与其他地球物理观测进行比较。下地壳底垫存在于各种环境中，它通常会导致像 **BRZ** 一样的高速下地壳，这直接降低了莫霍面的速度比，并导致 **RF** 中微弱的 **Ps** 振幅。同样，下地壳物质变质为榴辉岩相岩石会导致密度和 **V_p** 增加。相反，地壳的部分熔融形成了一个强烈的低速层。

在所有这些情况下，可以预计来自莫霍面的 **Ps** 信号可能比来自地壳内部界面的信号弱得多，正如在 **BRZ** 的底垫层所说明的那样。在这种情况下，为了识别正确的莫霍面信号，特别是当信噪比不允许确定非常高频的 **RF** 时，考虑深部的弱 **Ps** 相位是很重要的。

来源：Zhou Z P, Thybo H, Tang C C, *et al.* Test of P -wave receiver functions for a seismic velocity and gravity model across the Baikal Rift Zone. *Geophysical Journal International*, 2023, 232: 176–189.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所