地震科技前沿快报

2025 年第 3 期（月刊总第 74 期）

中国地震局科学技术委员会　　中国科学院兰州文献情报中心
中国地震局科技与国际合作司　　中国科学技术信息研究所

本期概要

1、跨走滑断层的大跨度铁路斜拉桥的非线性地震响应

中国研究团队针对西部山区铁路斜拉桥跨走滑断层抗震问题，开发混合模拟技术整合高频/低频地震动，建立非线性有限元模型。研究表明：断层跨越角度显著影响桥梁响应，纵向位移在 0° 或 180° 最大，横向残余位移受滑冲效应主导；桥塔截面曲率保持弹性，但大位移变形控制为设计关键。

2、地下水中钍、氡和微生物群落可作为地震活动的支持指标

韩国研究团队首次了提出钍（^{220}Rn）、氡（^{222}Rn）与微生物群落耦合指标。结果显示余震前 ^{220}Rn 与 ^{222}Rn 浓度显著相关，异域菌门、厚壁菌门及硫/氢氧化菌属为地震活动敏感标志。SOM 和 PCA 分析证实多维指标有效性，^{220}Rn 可定位断裂带影响区，微生物弥补同位素半衰期缺陷。

3、智能手机在地震和结构监测方面的性能

意大利学者通过对比三种不同的智能手机与参考加速度计的响应特性，发现其灵敏度达 10^{-4} m/s^2，可捕捉 0.01 m/s^2 地震信号，证实了构建分布式同步传感器网络的可行性。该网络通过集群架构能监测微地震事件，为低成本地震预警和结构健康监测提供新方案。

跨走滑断层的大跨度铁路斜拉桥的非线性地震响应

中国西部山区铁路沿线的活动断层对桥梁安全构成了重大挑战。为确保复杂地质条件下大跨度铁路桥梁的安全运行，多名科学家联合对跨越走滑断层的桥梁进行人工合成地震动研究，并分析其非线性地震响应。首先，研究开发了一种基于有限断层和等效速度脉冲模型的高频和低频地震动模拟的理论方法。然后，以某大跨度铁路斜拉桥为例，利用 OpenSees 软件建立非线性有限元模型。最后，考虑不同的跨越角度（crossing angle）、地震振幅、断层破裂方向性和滑冲效应（fling-step effect），评估桥梁主要构件的地震响应。研究结果表明，跨越角度对地震响应有显著影响，纵向和横向响应呈现相反的模式。此外，地震动的标度因子对桥梁响应有显著影响。对于跨越走滑断层的桥梁，由于瞬时速度脉冲，纵向响应表现出位移的突然增加，而横向响应则表现出明显的受滑冲效应影响的残余位移。然而，桥塔和桥墩的临界截面曲率在所有跨越角度上保持在弹性范围内，这表明控制大位移变形对于跨越走滑断层的桥梁的抗震设计至关重要。相关研究成果发表在 2024 年 10 月的 *Scientific Reports*。

随着全球桥梁工程的迅速发展，尤其是在高地震烈度山区，跨越或邻近活动断层的桥梁建设数量增加，使地震对桥梁结构的影响引起了工程界的广泛关注。地震对跨越地表断裂带的桥梁影响尤为严重，对于跨越活动断层的桥梁，地震波的脉冲效应、断层位移及断层走向角度等因素会显著影响桥梁的地震响应。

此外，大跨度桥梁的自然周期较长，结构柔性较大，容易在近场地震中发生共振，因此对大跨度桥梁跨断层影响的研究具有重要意义。现有的跨断层桥梁地震设计主要依赖国外的地震波记录，这些记录不能准确反映山区的地质条件，同时，现有的理论方法也尚不完善，需要进一步研究。

研究还表明，近场断层运动具有显著的方向性、滑动效应、垂向效应及抬升效应，因此需要开发新的合成地震波方法，以更好地模拟近场地震对桥梁结构的影响。

研究人员以一座跨越活动断层的大跨度铁路斜拉桥为研究对象，利用OpenSees软件建立了该桥的有限元模型。通过实现等效速度脉冲模型，在MATLAB中编写了一个低频程序，以在低频时间过程分量中模拟垂直于断层的破裂方向性效应和平行于断层的破裂方向性效应。高频时间过程分量则使用有限断层模拟方法的FORTRAN程序来模拟。研究利用MATLAB将高频和低频时间过程分量组合起来，生成合成地震动时间过程。然后，将模拟的地震动输入到有限元桥梁模型中，提取桥塔、桥墩、主梁的位移、剪切力、弯矩响应数据，进行广泛分析，研究不同断层位置、断层跨越角度、永久断层位移对结构的地震响应的影响。

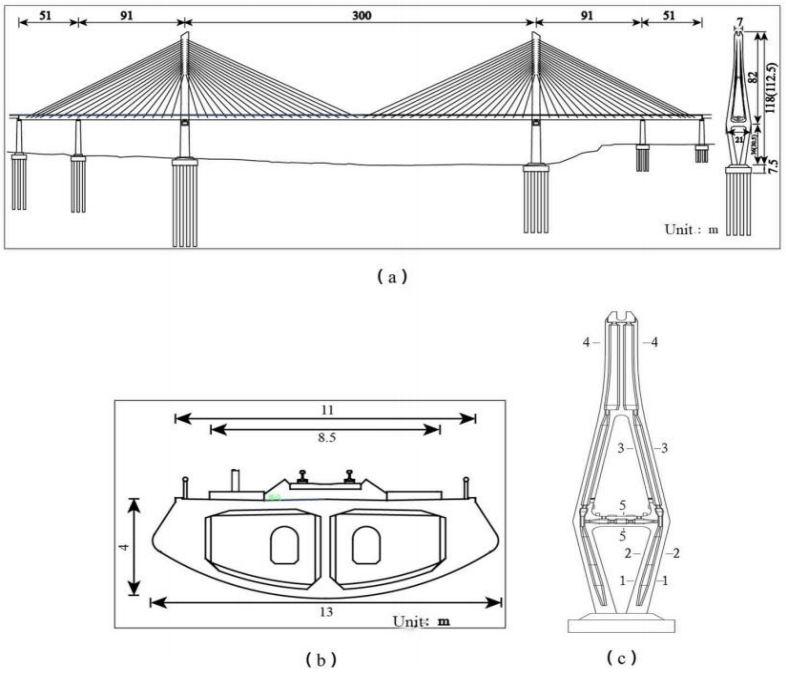

图1　主桥布局

研究人员分析了走滑断层带地面运动的人工合成，以及随后的大跨度铁路斜拉桥的地震响应，目的是为受跨越断层影响的近场区域的抗震设计提供指导。研究人员开发了一种模拟跨断层地面运动的方法，使用有限断层和等效速度脉冲模型整合了高频和低频地面运动。

对于桥梁模型，研究中的斜拉桥跨度为 51+91+300+91+51 m，为半漂浮体系。边跨与主跨之比为 0.473，桥梁总长度（包括端部接头）为 584 m。主桥位于平坡上，呈直线形。主梁截面为单箱双室等截面预应力混凝土箱梁，塔楼为菱形结构，桥面以上为倒 Y 形，桥面以下为收缩菱形。

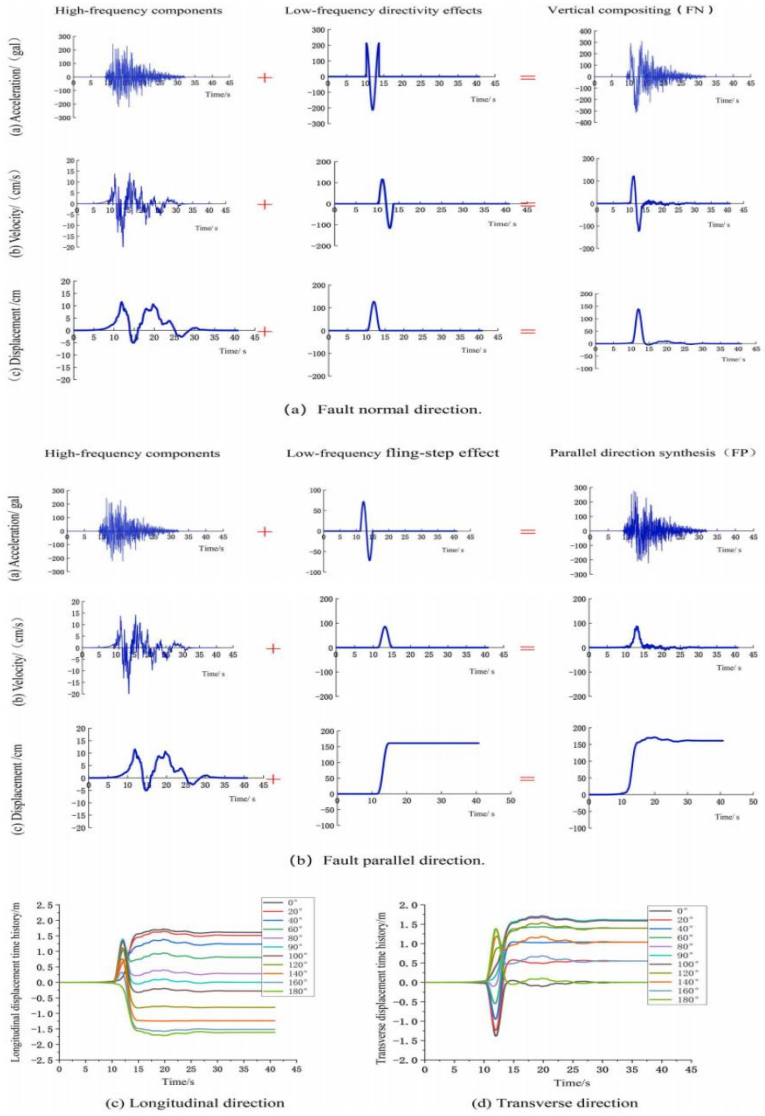

图 2　走滑断层的地震动输入

对于地面运动的输入，由于地质勘探数据有限，研究假设该地区存在一个重要断层，断层长度约为 150 km，倾角为 40°~60°。该断层为正断层，根据地震风险评估，估计最大潜在地震震级为 7.0 级，震中位于 20 km 处。当桥梁结构跨越活动断层时，跨越角度对其地震响应有显著影响。由于断层破裂角在地震过程中不可预测，因此研究人员以跨断层角为基础变量，分析跨断层角对桥梁结构纵横两个方向地震响应特性的影响。同时，将方向效应地震动和滑移效应地震动转换为纵向桥向地震动和横向桥向地震动进行位移输入。

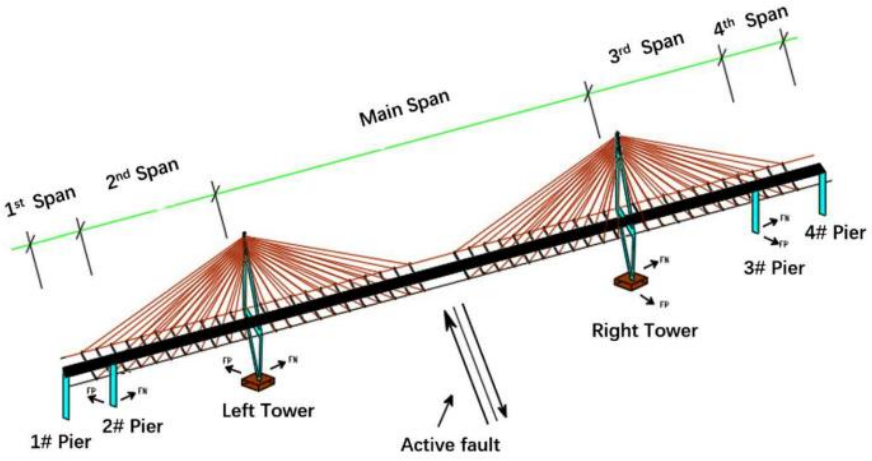

图 3　整个走滑断层的输入方向示意

研究人员的分析重点是断层跨越角度、支撑位移和振幅调整系数对桥梁地震响应的影响，主要发现总结如下：

（1）开发了一种针对走滑断层的混合模拟技术，通过有限断层和等效速度脉冲模型整合高频和低频地面运动。该方法确保了两个频率范围内的地面运动总持续时间一致，并且确保了均匀的载荷子步时间。同时，跨断层地震波的时程在整个时间域上叠加。该方法在捕捉断裂方向性和滑移效应方面的有效性和准确性已得到验证，为模拟跨断层桥梁的地面运动提供了一种新方法。

（2）断层跨越角显著影响大跨度铁路斜拉桥的地震响应。桥墩底部的纵向剪切力和弯矩在 80°~100°范围内达到峰值，在 0°或 180°处观察到最小响应。相反，横向剪切力和弯矩呈现相反的模式。桥墩 1 和桥墩 2 的滞回曲线表明，能量耗散和塑性变形较大，而桥墩 3 和桥墩 4 显示出细长的滞回曲线，能量耗散和变形最小。研究认为，左右桥墩弯曲曲率响应的差异归因于非一致性。

（3）桥塔的纵向和横向位移随高度显著增加。最小纵向位移发生在跨越角度 90°附近，最大纵向位移发生在跨越角度 0°或 180°附近。内力响应在 6 m 和 35.63 m 高程处发生突变，这是由于梁的约束和梁与塔之间的横向相互作用引起的。梁连接处的剪切响应大于桥塔底部，表明了该位置在抗震设计中的重要性。纵向滞回曲线比横向滞回曲线更饱满，反映了不同地震动输入方式的影响。

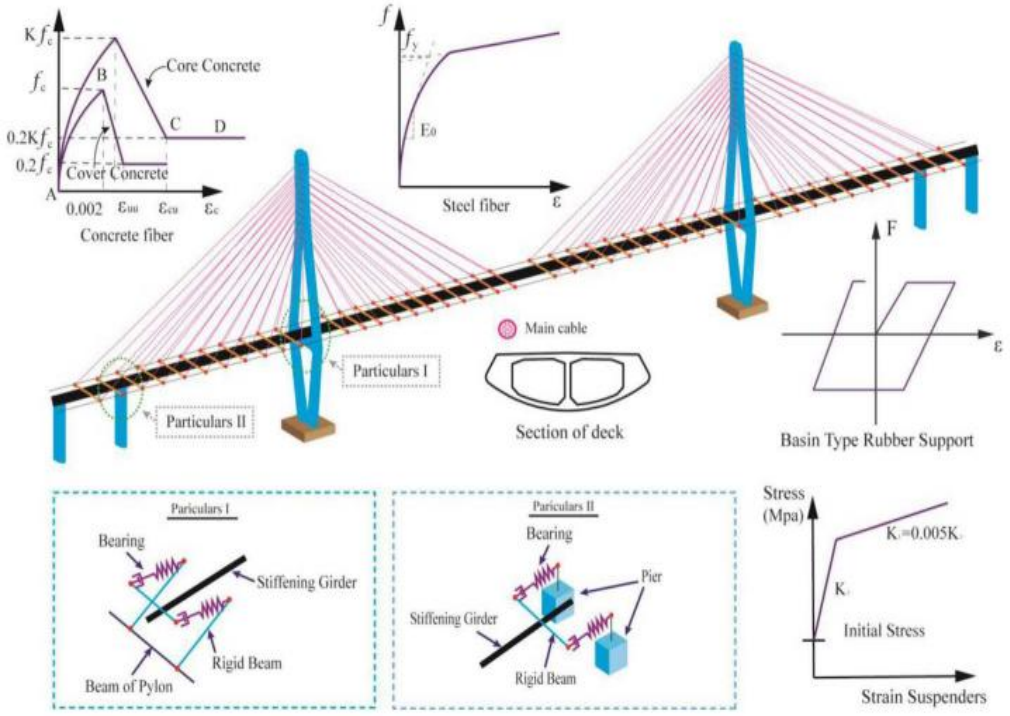

图 4　考虑材料非线性的斜拉桥有限元模型

（4）在相同的跨越角度和调整系数下，2 号支座的位移响应大于 1 号支座的位移响应，表明越靠近断层，响应越大。三维位移响应面在 90°跨越角度处呈现对称趋势。随着振幅调整系数的增加，桥墩和桥塔的剪切力、弯矩和曲率均增加。随着断层跨越角度的增大，桥塔纵向剪切力、弯矩和曲率先增大后减小，在 80°~120°之间达到峰值，在 0°至 180°之间最小。相反，横向剪切力、弯矩和曲率则呈现相反的模式。这些响应的三维面在 90°跨越角度处呈现对称变化的特征。

研究人员认为，未来的研究应模拟近断层地面运动下桥梁的整个倒塌过程，以了解不同构件的失效顺序，这对于防灾减灾至关重要。未来的研究方向应包括：

（1）全过程模拟。对近断层桥梁行为进行全面模拟，以确定地震荷载下结构部件的损坏顺序，这将提高中国西部地区桥梁的防灾减灾能力。

（2）地震后分析。利用研究人员提出的近断层地面运动合成方法，分析复杂山地桥梁的地震后状况，应特别注意近断层脉冲对滑坡、落石和其他影响桥梁结构的自然灾害的影响。

（3）易损性和可靠性分析。对近断层地震影响下的大跨度桥梁进行易损性分析和可靠性研究，将为改进未来的桥梁设计和抗震措施提供重要见解。

来源： Zhang J, Liu X, Cao Y, *et al*. Nonlinear seismic response analysis of long-span railway cable-stayed bridges crossing strike-slip faults. Scientific Reports, 2024, 14(1): 25479.

地下水中钍、氡和微生物群落可作为地震活动的支持指标

地震对地下水环境和人类生活都有重大影响，然而，利用同位素和微生物多样性指标从地震活动中识别地震活跃和受影响区域仍然是一个具有挑战性的前沿领域。为了验证该耦合方法在地震实时分析中的适用性，来自韩国的研究人员首次对 2017 年韩国浦项地震期间地下水样品中的钍（^{220}Rn）、氡（^{222}Rn）、微生物群落组成和水文化学特征进行了分析。结果发现，余震发生前，在地下水中检测到的 ^{220}Rn 与 ^{222}Rn 浓度有较高的相关性，这表明 ^{220}Rn 和 ^{222}Rn 可以作为地震实时分析的可靠指标。微生物数据可以帮助确定受影响的地下水区，特别是在无法实时检测到 ^{220}Rn 的情况下。在门水平上，只在检测到钍的样品中发现了异域菌门（Peregrinibacteria）和厚壁菌门（Firmicutes）。在属水平上，氢氧化菌或硫氧化菌可作为地震活动带的指示标志。两种统计分析——自组织图（SOM）和基于水文化学参数的主成分分析（PCA），也与这些耦合指标的结果一致。该研究证明了 ^{220}Rn、^{222}Rn 和微生物群落组成作为新的多维生态指标在地震实时分析或者其他方面的理论和实际适用性。相关研究成果发表在 2024 年 10 月的 *Scientific reports*。

2017 年 11 月 15 日，韩国东南部浦项地区发生了里氏 5.5 级地震。该地震发生在阳山断裂（Yangsan fault）附近的浦项增强型地热系统附近。当前，许多研究都致力于寻找地震前兆并进行地震预报。水文化学参数，尤其是同位素，已被广泛用作示踪剂。已有研究结果表明，地下水中的钍（^{220}Rn）和氡（^{222}Rn）可以确定地震活跃区和受影响区，这些同位素不仅可以作为地震事件的前兆，还可以用于研究地震期间的水文响应。同时，某些环境中的微生物可能受到地震等环境干扰的影响。借助这些微生物可能解决同位素半衰期短的局限性，然而，与钍和氡有关的微生物很少被确

定，特别是作为多维指标时。

该研究的主要目的是根据同位素（^{220}Rn 和 ^{222}Rn）和微生物群落组成提出一种新的耦合地震指示方法，并评估其在地震中实时调查地下水环境异常的适用性。主要分析步骤包括：①基于主要离子和环境同位素开展自组织图（SOM）统计分析，明确相关性和聚类特征；②地下水中 ^{220}Rn-^{222}Rn 浓度的同震变化分析；③鉴定微生物群落组成，揭示与 ^{220}Rn-^{222}Rn 浓度的相关性；④利用主成分分析（PCA）对地下水水位时间序列数据进行检验，进而判定对同位素和微生物多样性指标结果的支持情况。

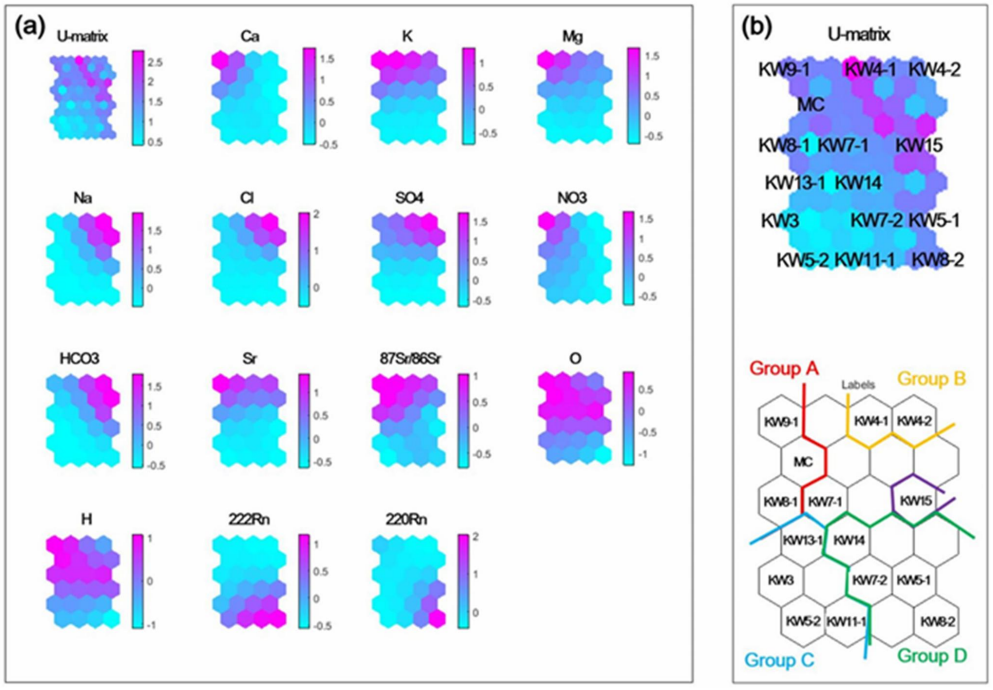

图 1　（a）基于 SOM 结果的浦项地区水文地球化学数据成分面的可视化图；（b）浦项地区 SOM 结果的 U 矩阵和组分可视化

（1）基于自组织图（SOM）的水文地球化学和环境同位素统计分析。研究人员对主要离子（Ca、K、Mg、Na、Cl、SO_4、NO_3 和 HCO_3）和环境同位素（Sr、$^{87}Sr/^{86}Sr$、$\delta^{18}O$、$\delta^{2}H$、^{222}Rn 和 ^{220}Rn）进行 SOM 分析。各变量的贡献图如图 1a 所示，值得注意的是，$\delta^{2}H$ 和$\delta^{18}O$ 平面，以及 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 平面之间表现出很强的相关性，并且与其他变量关系不大。此外，

通过目测 U 矩阵结果进行聚类（图 1b）。U 矩阵上的粉色阴影所对应相邻节点之间的距离较短，而天蓝色阴影表示节点之间的距离较长。根据这些距离，水样的分布可以分为四组：A 组（KW 8−1、KW 9−1 和 MC）、B 组（KW 4−1 和 KW 4−2）、C 组（KW 3、KW 5−2、KW 11−1 和 KW 13−1）和 D 组（KW 5−1、KW 7−2、KW 8−2 和 KW 14）。

（2）地下水中钍（^{220}Rn）和氡（^{222}Rn）的浓度。在监测期间，地下水中 ^{220}Rn 浓度分别为 700 Bq/m^3（KW 5−1）、120 Bq/m^3（KW 7−2）、120 Bq/m^3（KW 8−1）、1400 Bq/m^3（KW 8−2）、470 Bq/m^3（KW 9−1）、200 Bq/m^3（KW 14）和 100 Bq/m^3（KW 15)（图 2）。这些井是在余震前取样的。KW 3、KW 4−1、KW 4−2、KW 5−2、KW 7−1、KW 9−2、KW 11−1、KW 11−2、KW 13−1、KW 13−2 和 KW 16 的 ^{220}Rn 浓度为 0 Bq/m^3。其中，KW 3、KW 4−1、KW 4−2、KW 13−1 和 KW 13−2 在第三个采样日（2018 年 11 月 24 日）进行采样，而不是在余震之前。

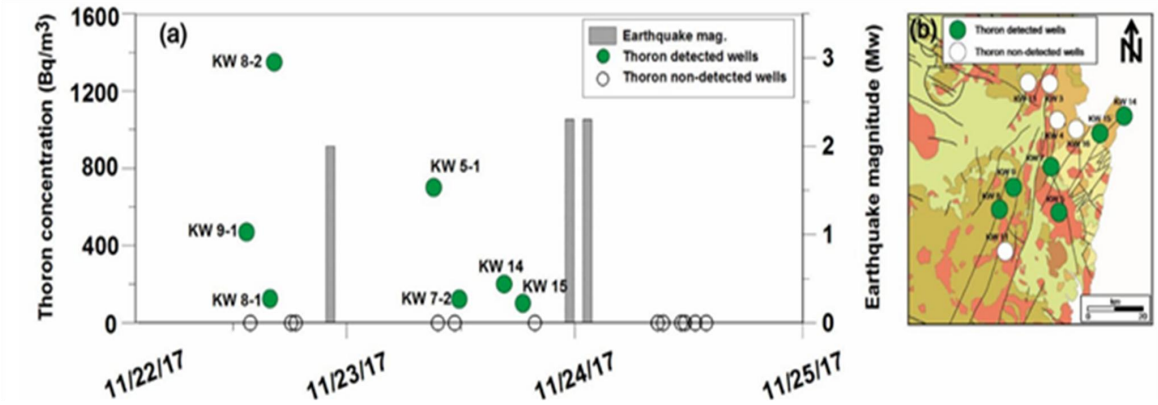

图 2　（a）2017 年 11 月 22 日至 25 日地震震级数据和地下水井的 220Rn 浓度；（b）地质图显示含钍的井（绿色圆圈）和不含钍的井（白色圆圈）

浦项地区 18 口地下水井的氡浓度为 680~65000 Bq/m^3。^{220}Rn 浓度与 ^{222}Rn 浓度呈正相关（n=7，r^2=0.8462）。尽管样本量较小，但两种同位素之间的相关性非常高。在 KW 7−2、KW 8−1、KW 9−1 和 KW 15 中，检测

到氡浓度较低时（<10000 Bq/m³）的较高浓度钍。相反，在 KW 5−1 和 KW 14 中观察到相对较高的氡浓度和较低的钍浓度（<1000 Bq/m³）。

（3）地下水中的微生物群落组成。研究人员采用 16s rRNA 焦磷酸测序技术对地下水监测井中的细菌微生物群进行了表征。然后，对主要微生物群落进行分析，在门水平上对含钍和不含钍两组地下水样品进行比较（图 3）。结果表明，变形菌门（Proteobacteria）是两组中最丰富的门，占细菌群落的 50%以上。异域菌门和厚壁菌门仅存在于含钍地下水样品中，而浮霉菌门（Planctomycetes）和衣原体门（Chlamydiae）仅存在于不含钍的地下水样品中。线性判别分析（LDA）的效应值（effect size）分析也揭示了含钍和不含钍地下水井在属水平上的微生物组成差异，共确定了丰度不同的 26 个属。进一步分析发现，不含钍探测井中的类群比含钍井中的类群丰富。

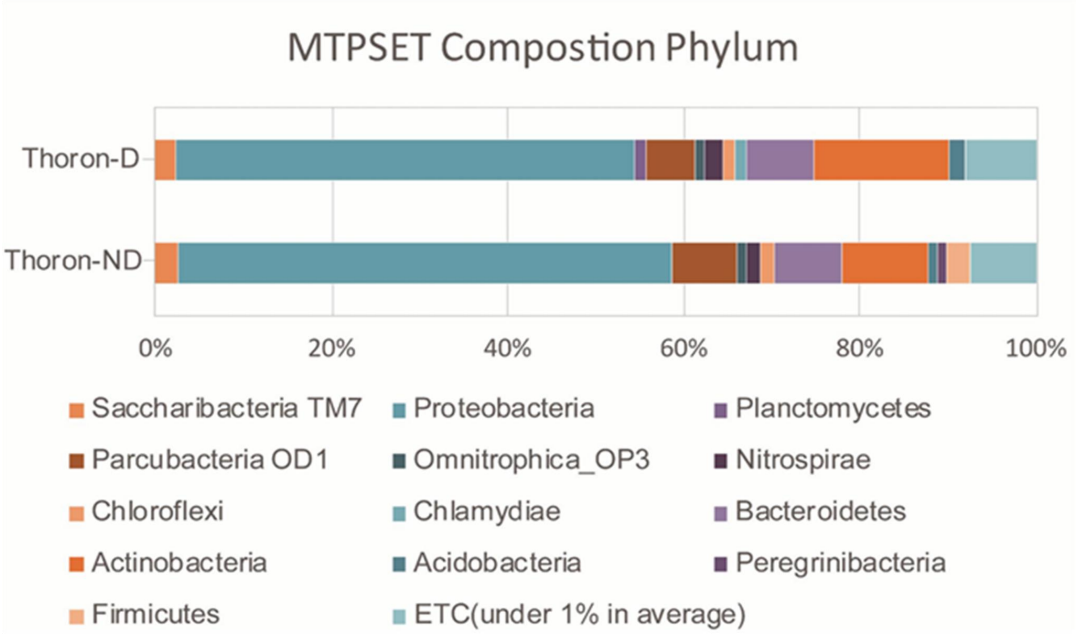

图 3　含钍和不含钍地下水样品在门水平上的平均分类组成

综上所述，探测到 ^{220}Rn 表明地下水井受到震源带或活动断裂带的影响，因此 ^{220}Rn 是地震影响评价的重要指标。特别是，^{220}Rn 检测对于地震

事件的实时分析是有效的。自组织图（SOM）统计分析进一步支持了这一观点，显示了含钍井和不含钍井之间的清晰分类。这凸显了 ^{220}Rn 作为识别受地震活动影响断裂带的可靠指标的潜力。为了支撑这一解释，研究人员采用主成分分析（PCA）来检验地球化学过程的差异。结果表明，含钍井和不含钍井之间的差异更可能归因于水文变化，而不是含水层系统中纯粹的地球化学变化。

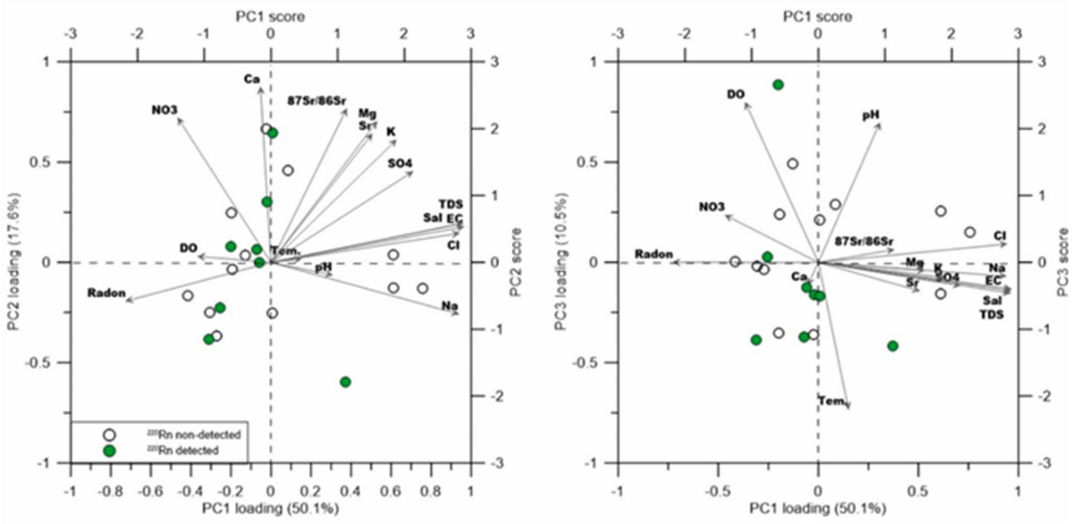

图 4　水样数据的主成分得分和加载向量（含钍的井用绿色圆圈表示，不含钍的井用白色圆圈表示）

为了支持观测到的 ^{220}Rn 的变化，氡（^{222}Rn）可以作为补充指标。^{220}Rn 和 ^{222}Rn 浓度之间的高度相关性表明 ^{222}Rn 的示踪应用是有效的。考虑到 ^{222}Rn 检测通常比 ^{220}Rn 检测更容易，这种相关性支持使用 ^{222}Rn 作为 ^{220}Rn 的替代。$^{220}Rn/^{222}Rn$ 比值可用于区分与地震有关的深层和浅层压裂。例如，^{220}Rn 异常高而 ^{222}Rn 较低时，表明 ^{222}Rn 是从较近的来源通过微裂缝输送到浅层地下的。在井 KW 7−2、井 KW 8−1、井 KW 9−1 和井 KW 15 中都观察到了这种模式。相反，在井 KW 5−1 和井 KW 14，相对较高的 ^{222}Rn 浓度与较低的 ^{220}Rn 浓度可能表明存在更深的来源。然而，^{220}Rn-^{222}Rn 本身不足以最终确定一个带是否地震活跃带，因为 ^{220}Rn 并不总是能在与地震

相关的所有活动带中检测到。

微生物群落组成为识别受地震影响的活动带提供了额外的支持，特别是在 ^{220}Rn 检测具有挑战性的情况下。在这种情况下，^{222}Rn 的检测结合特定的微生物指标可以帮助识别受地震活动影响的地下水系统。例如，在含有可检测到的 ^{220}Rn 的地下水样品中观察到的门，如异域菌门和厚壁菌门，可以作为重要的指标。此外，硫氧化菌或氢氧化菌是受地震事件影响的活动带更可靠的指标，而来自不含钍样品的属则与较不活跃、更常见的环境有关。

来源： Kim J, Kim H, Kaown D, *et al*. Thoron, radon and microbial community as supportive indicators of seismic activity in groundwater. Scientific Reports, 2024, 14: 25955.

智能手机在地震和结构监测方面的性能

随着地震对城市基础设施持续构成重大威胁，利用配备加速度计的智能手机实时监测地震已成为人们关注的焦点。为了确定基于智能手机测量的可靠性和灵敏度，深入表征它们的响应是必不可少的。来自意大利的学者对安装在三种不同型号智能手机上的典型加速度计性能进行了全面描述。他们开发了一种新型实验装置，以将三种不同的智能手机与参考加速度计进行比较。研究人员确定了每个加速度计在傅里叶频率 0.1~40 Hz 内的传递函数，查明了主要差异，并证明了比预期更高的灵敏度。此外，研究人员还讨论了未来异构和同步传感器分布式网络实现的可能，这样的分布式网络能够在特定地震中独立生成并及时验证警报。相关成果发表在 2024 年 10 月的 *Scientific Reports*。

智能手机已经配备了一系列微机电传感器（MEMS），能够收集有关外部环境的数据，可以直接获取实时位置、运动和生物特征数据。采集到的数据可以广泛应用于各个领域，包括地震预警（EEW）、结构健康监测（SHM）、临床研究等。目前，正在开发的新智能手机应用程序也在提高地震探测和表征的整体覆盖范围和准确性。

为了确保来自不同传感器的信号被正确合并，必须测量加速度计的响应以及该响应是否随时间变化。研究人员扩展了之前在该领域的研究，通过使用一种略有不同的测量技术，在更广泛的频率范围内准确确定智能手机的加速度计传递函数，特别是低频区域（这对地震检测极有意义）。研究人员在三种不同的智能手机（苹果 iPhone 8，苹果 iPhone 13Pro 和小米 Mi9T）上重复并验证了这些测量结果，并将它们与作为参考的高精度低频加速度计（EpiSensor）进行了比较，显示了用于数据收集的传感器和软件的主要差异。最后，应用测量到的智能手机传递函数模拟了一次大地震

（2009 年 4 月 6 日意大利拉奎拉地震），以分析智能手机在地震探测中的真实能力。

1. 数据分析和传递函数比较

研究人员的重点是 0.1~40 Hz 不同频率下垂直方向（z 轴）的加速度。结果表明，在低于 2 Hz 的傅立叶频率下，智能手机不再能够检测到所应用的调制。同时，记录的频谱显示，信号在噪声水平附近。

与声称的灵敏度仅为 $10^{-2}\,m/s^2$ 相反，智能手机的加速度计确实可以观察到幅度小两个数量级的信号，灵敏度高于 $10^{-4}\,m/s^2$ 水平。为了进一步探索传感器的灵敏度，研究人员深入分析了当不受外部信号调制时，灵敏度水平如何在不同的积分时间内演变。按照这个过程，研究人员估计了传感器灵敏度（在固定带宽内测量的噪声层的平均振幅）作为积分时间的函数。

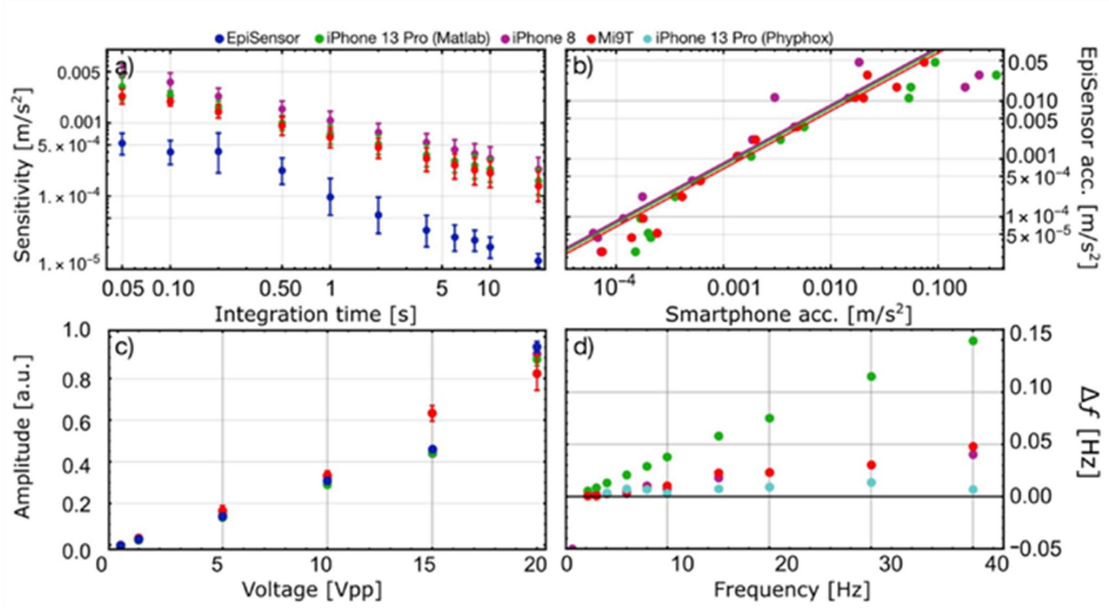

图 1　（a）50 Hz 带宽下不同积分时间的灵敏度水平；（b）EpiSensor 在智能手机上的加速度校准曲线；（c）传感器响应（归一化）作为驱动低音扬声器的正弦波振幅的函数；（d）EpiSensor 与智能手机之间的频移（Δf）

分析结果（图 1）显示了所有四个传感器在不同积分时间内在 50 Hz 带宽内测量的灵敏度。值得注意的是，图 1a 显示了智能手机灵敏度的不同

变化趋势，随着积分时间的延长，灵敏度向 10^{-4} m/s^2 收敛，而随着积分时间的缩短，灵敏度降低。

此外,研究人员调查了 40 Hz 时测量的加速度与传输到执行器（actuator）的正弦信号振幅之间的关系。超过 10 轨迹（trace）的每个电压值都计算了平均加速度和标准偏差（用误差条表示）。在所有传感器上观察到的线性趋势都是明显的（图 1c），表现为所测量的加速度归一化到最大值。这一发现减轻了对测量中潜在非线性效应的担忧。

图 1b 显示了 EpiSensor 的振幅与智能手机的校准结果的比较。值得注意的是，在三个传感器的双对数坐标上出现了线性趋势，为精确的智能手机加速度校准提供了一个至关重要的校正曲线。iPhone 8、iPhone 13Pro 和 Mi9T 的校准斜率值分别为 0.87、0.79 和 0.69。此外，频率测量的精度是另一个关键参数。如图 1d 所示，通过将智能手机的测量频率与 EpiSensor 的频率进行比较，可以描绘出傅里叶频移（Δf）。

在 iPhone 8 和 Mi9T 的测量中可以观察到线性趋势，然而，在 iPhone 13Pro 的所有频率测量中，明显有更高的频移。iPhone 8、iPhone 13Pro 和 Mi9T 线性拟合的斜率值分别为 0.9 mHz/Hz、3.8 mHz/Hz 和 1.1 mHz/Hz。这些趋势表明智能手机存在额外延迟，可能源于精确时基设计（硬件）或处理（源于软件的延迟）的缺陷。

2. 地震探测中的应用

研究人员通过归一化 Episensor 的传递函数获得了每个智能手机的全传递函数。插值归一化的传递函数如图 2 所示，三个传递函数并不是平坦的，而且彼此之间差别很大，因此所获得信号将存在差异和一些相对失真。

归一化传递函数反映了每个智能手机在检测不同频率的地震地面运动方面的有效性。作为所测传递函数的应用，研究人员展示了每个智能手

机如何检测大的地震，并以实际振动（m/s^2）表明差异。为此，研究人员将这些传递函数应用于 2009 年 4 月 6 日发生在意大利的一次大地震的地面运动数据。

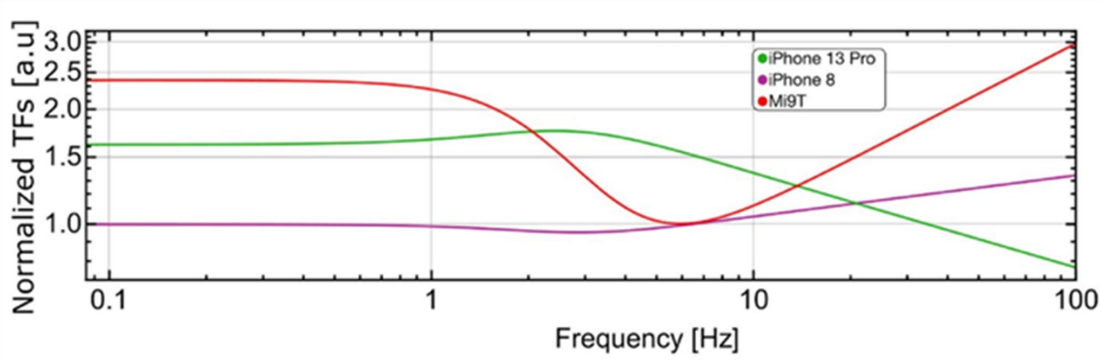

图 2　归一化到 EpiSensor 传递函数的智能手机的传递函数（线条表示实验数据的插值）

图 3 显示了地震的加速度振幅（红线）和对应的智能手机轨迹。值得注意的是，在两个放大图中可以看到传递函数的明显作用，图 3b 是在地震开始后大约 2 s，图 3c 是在地震发生后 5 s（几乎是在地震的最大振幅处）。

图 3b 还显示了两个区域：黑色区域，对应于智能手机的平均灵敏度（约 0.01 m/s^2）；浅蓝色区域，代表地震振幅信号的平均值加一个标准差。这表明智能手机的灵敏度明显高于预期，可以检测到最常见的和最重要的地震。

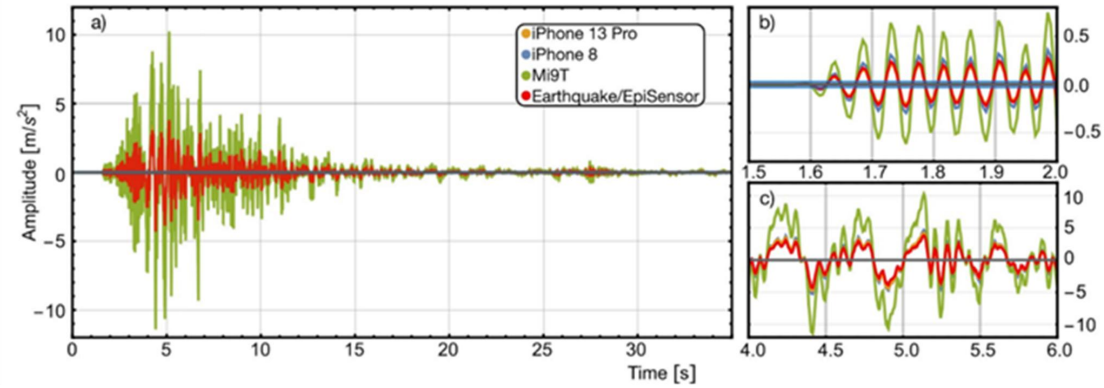

图 3　（a）红线表示由精密加速度计记录的 2009 年拉奎拉地震的传递函数，蓝线、黄线和绿线分别描绘了 iPhone 8、iPhone 13Pro 和 Mi9T 可能观测到的信号；（b, c）信号分别在 2 s 和 5 s 处的放大图

3. 面向同步的分布式传感器网络

从上面的分析可以看出，当前的加速度计已经达到高灵敏度水平和相当大的频带宽度，能被用来观察低频地震事件，这是向同步传感器网络发展的关键。在这里，研究人员简要概述了一种新型同步传感器网络的框架和主要设计思想，讨论了未来理论和实验工作可能解决的潜在灵敏度等可能问题。

图 4　移动传感器同步网络集群示意图。每个集群都是独立的，但它们彼此相连，并有一个中心站用于校准

图 4 给出了不同源实时干涉测量的集群架构的示意图。研究人员设想存在一组传感器，它们组成独立集群，这些集群相互连接，并有可能不时连接到中心站进行重新校准。对于实时、同步的网络，可期望每个集群的灵敏度增加$\sqrt{N}$，其中 N 是集群中传感器的数量。考虑到测试的传感器的最小加速度灵敏度，仅由 10 个传感器组成的单个集群将达到远远超过 0.1 Gal（1 mm/s^2）的灵敏度，从而形成一个网络，可以在地震强度远远低于人类感受能力的情况下监测到地震。在未来，这个网络可以为当前的高精度传感器网络增加价值，允许对微地震进行低成本的研究。

此外，在该概念网络中，与灵敏度更高、长期稳定性更好的经典（或量子）惯性传感器进行直接比对，有助于降低移动传感器在低频时的典型噪声（响应函数的长期变化和漂移），同时保持高重复率的实时检测。反过来，这可能有助于减少智能手机日常使用带来的非地震运动信号。虽然已发展出过滤类似噪声源的技术，但实时分析和连续重新校准能力将有助于更有效地去除随时间变化的噪声源。

综上所述，该研究是迈向未来实现同步传感器网络的重要一步。虽然网络拓扑可以帮助解决来自异构数据源的数据在合并中出现的部分问题，但该研究阐明了精确了解每个传感器传递函数的重要性。

来源： Vezio P, Mingozzi E, Passarella A, *et al*. Characterizing smartphone capabilities for seismic and structural monitoring. Scientific Reports, 2024, 14: 23017.