

地震科技前沿快报

2024 年第 2 期（月刊总第 61 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、区分水力压裂诱发地震活动的主要和次要机制

水力压裂往往会诱发相对低到中等震级的地震活动，了解水力压裂诱发地震的相关机制至关重要。来自加拿大的科学家以加拿大阿尔伯塔省西部的蒙特尼（Montney）地区为例，确定了该地区诱发地震的次级机制和余震序列，发现余震序列的统计特性可以让人们确定是否存在明显的断层活化，以及活化断裂带是否处于临界预应力状态。

2、主动源地震实验激发时间的自动估计

许多地震学应用都需要精确估计纵波（ p 波）和横波到达时间。研究人员开发了一种新的混合方法（CORREL），该方法是 REST 和互相关的混合，并添加了基于 REST 拾取的、多项式函数形式的约束，该约束提供了激发时间的合理预测。与最初通过 REST 和常规波形互相关获得的结果相比，CORREL 不仅显著增加了激发时间的估计数量，而且大大减少了异常值的数量。两种技术的组合保留了互相关方法的精度和绝对时间拾取的准确性。

3、考虑非结构构件地震破坏的室内地震安全混合现实演习

地震中室内非结构构件的破坏往往会造成人员伤亡，因此，通过地震安全演习来减少地震中的人员伤亡至关重要。研究人员提出了一种考虑非

结构构件地震破坏的室内地震安全混合现实（Mixed Reality, MR）演习方法，这种方法兼具现实演习和虚拟演习的优点，可以让参与者在真实世界中自由移动，同时体验较为真实的地震场景。结果表明，该方法可使移动到安全区域的平均效率提高 43.1%，有效地提高居住者的地震安全能力，从而减少人员伤亡。

区分水力压裂诱发地震活动的主要和次要机制

水力压裂作业通常与诱发地震事件有关，其震级往往低于构造地震。虽然流体运移和由此产生的孔隙压力增加似乎是主要的驱动机制，但还需了解导致余震序列产生的断层活化和次级触发过程。来自加拿大的科学家以加拿大阿尔伯塔省西部的蒙特尼（Montney）地区为例，确定了该地区诱发地震的次级机制和余震序列，发现余震序列的统计特性可以让人们确定是否存在明显的断层活化，以及活化断裂带是否处于临界预应力状态。特别是，研究人员使用不同的统计方法找到了有关余震序列的证据。识别的余震序列以长的空间余震带为特征，这将其与流体驱动环境下的其他地震区别开来，但其与构造余震序列相当，表明存在断层的活化。尽管如此，研究人员发现小的触发对余震序列和与大震级地震相关的余震具有主导作用。这表明活动断裂带整体上未处于临界预应力状态，与构造情况相比，相应的初始地震危险性显著降低。相关研究成果发表在 2023 年 10 月的 *Bulletin of the Seismological Society of America*。

水力压裂往往会诱发相对低到中等震级的地震活动。为了评估诱发地震的危险性并制定相关的预测和缓解策略，了解水力压裂诱发地震的相关机制至关重要。一般认为，高压流体的注入引发了断层内部的应力松弛和先前断层的局部不稳定，由此产生的地震通常被称为“背景”地震活动（有时也被称为独立或诱发地震活动）。但由于地震间触发和次级机制，随后可能发生进一步的激活，导致地震活动的级联，这些地震被称为相关的、触发的事件或余震。一般而言，次级机制可归因于静态应力传递、动态触发或两者的结合、孔隙弹性以及粘弹性松弛等。

在本研究中，研究人员调查了加拿大阿尔伯塔省西部蒙特尼地区的水力压裂作业，以该地区地面阵列和钻孔检波器数据为基础，评估了地震间

触发和可能由次级机制引起的余震分布情况。研究人员利用统计地震学方法从地震目录中识别出余震，之后进一步确定识别的余震，发现与背景事件（流体注入的直接后果）相比，这些余震与流体注入的相关性较小。最后，研究人员讨论了触发特性与时间、距离和地震震级的关系。

1. 注入活动交叉相关分析

研究人员分析了与水力压裂作业相关的高精度地震目录，并利用前人建立的方法识别触发地震（余震）和背景地震。通过设定合适的阈值，确定了接近 25% 的触发比（triggering ratio）。为了验证分类的可靠性，研究人员开展了注入体积速率 $\dot{V}(t)$ 和测量的地震活动率 $\lambda(t)$ 之间的交叉相关分析，以量化前者对后者的潜在影响。结果显示，相对于涉及地震总活动率的基本情况，事件分离导致相关性的数量略有增加。另一方面，随着相关系数 $c(t-t')$ 在早期滞后时进入噪声底，触发速率（triggering rate）与注入速率几乎没有相关性。这表明识别的背景地震事件是可靠的，因为根据定义，它们的时间速率（temporal rates）在更大程度上（与触发速率相比）与注入流速相关。

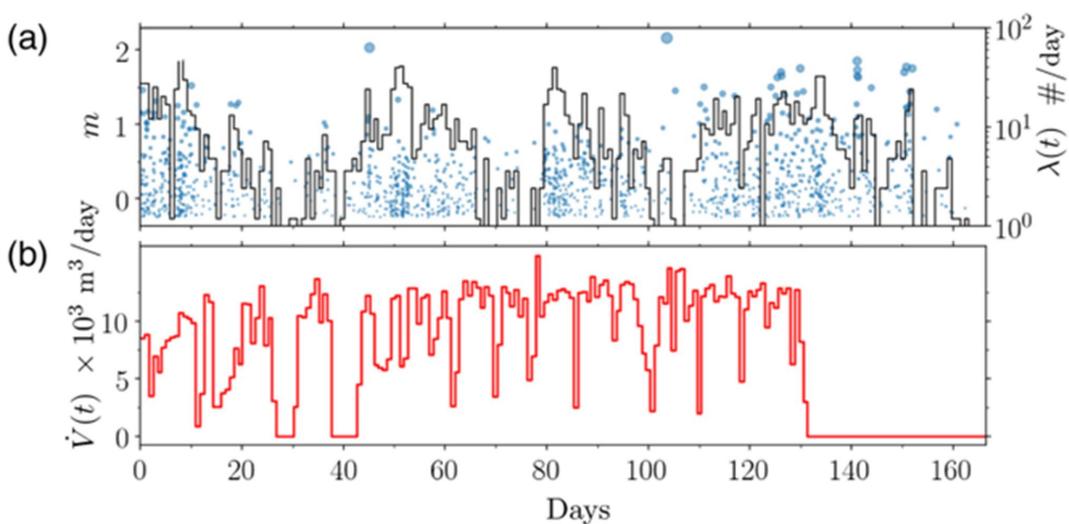


图 1 (a) 加拿大阿尔伯塔省西部蒙特尼地区诱发地震的震级时间序列和每日地震活动率 $\lambda(t)$ ；
(b) 每日流体注入的体积速率 $\dot{V}(t)$

2. 空间余震带

研究人员评估了与 m 级地震(或主震)触发相关的线性余震密度 $\rho_m(r)$ 。应该注意的是,触发的地震通常可能再次触发其他地震,在触发级联中导致多代余震(图 2a)。图 2a 所示的箭头表明主震-余震序列会更大程度爆发,这意味着主震之后会有大量的第一代余震。分析显示,几乎所有的余震密度都表现出一个初始的平稳状态,具有一个特征大小(约 30 m),超过这个特征大小后,余震密度以 r^v 的方式衰减。研究人员获得的 v 约等于 1.7,比在其他流体驱动的自然和诱发地震中观察到的要小得多 ($v \geq 2.3$)。远程余震触发的存在可能是由于注入井附近已有断层结构的激活。在构造环境下,余震密度在破裂长度以外的缓慢逆幂律行为可以用分形断裂分布与脆性地壳内非局部静应力传递的相互作用来解释。另一种断层触发机制可能与孔隙压力沿可渗透裂缝带的扩散有关。

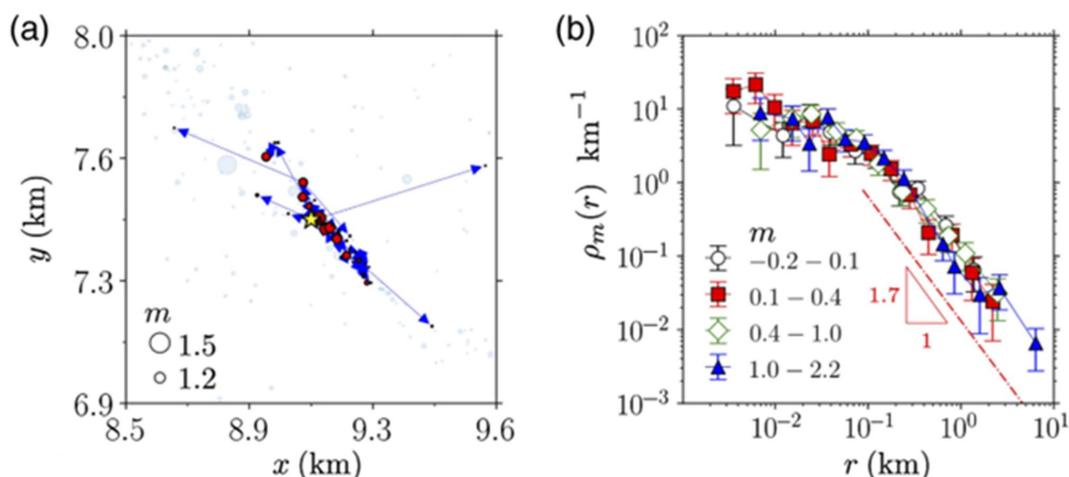


图 2 (a) 所触发级联地震的震中分布,包括背景地震(黄色星号)和触发地震(红色圆圈);
(b) 给定范围内平均主震震级 m 的余震 ρ_m 对距离 r 的概率密度函数

3. 余震产生力 (aftershock productivity)

研究人员计算了触发地震数量或第一代余震 N_{as} 随触发震级 m 的变化(图 3)。如果对具有相同 m 的触发进行平均,在所有情况下触发地震的

数量与 m 呈指数关系，即 $N_{as} \propto 10^{\alpha m}$ ，在构造环境中也观察到这一点。研究获得的 α 约等于 0.3，如果使用矩震级，这一数值将略微增加到 0.4，但与加拿大西部其他水力压裂引起的地震活动相比仍然较小。这表明活动断层可能在注水操作前不处于临界应力状态，导致观察到的余震数量不足。此外， $b - \alpha$ 约为 0.7 (b 为古腾堡-里克特指数， α 为余震产生力指数)， $\alpha < b$ 表明触发过程是由大量的小触发主导的。

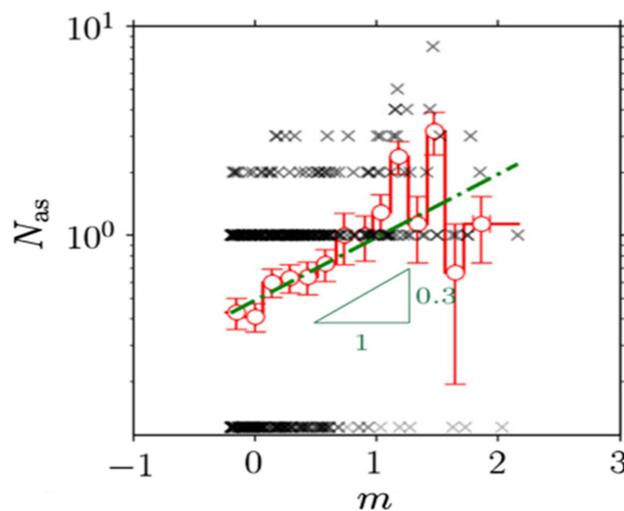


图3 余震数量 N_{as} 与触发震级 m 的关系

4. 时间余震发生率 (temporal aftershock rates)

对于给定的地震事件，其所触发地震的时间速率随时间而变化。图 4b 显示了与 m 级地震触发相关的每日余震发生率。对于所有的震级，它们在几十年里大致遵循大森-宇津关系：

$$\lambda(t) = \frac{K}{(c+t)^p}$$

其中， t 为触发地震或主震后的时间， c 为特征时间标度。在所有情况下， p 大约等于 1，类似于在构造地震中观察到的结果。比较不同触发震级的触发速率，总的趋势是触发速率随 m 的增大而增大。假设 c 和 p 不随 m 变化，且 m_c 固定，则前面讨论的余震产生力关系意味着 $K \propto 10^{\alpha m}$ 。

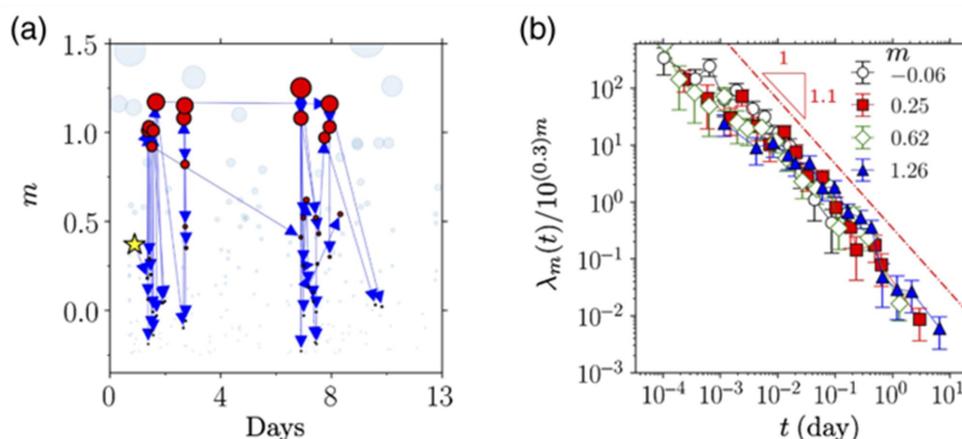


图4 (a) 所触发级联地震的时间演化；(b) 余震发生率 $\lambda_m(t)/10^{0.3m}$ 与时间 t 在多个主震震级范围内的关系，平均震级为 m

综上所述，研究人员利用统计方法将流体注入直接引起的地震事件与主要由次要机制(如静态和/或动态应力触发)引起的地震事件区分了开来。后者与构造地震在许多方面非常相似，表明存在共同的潜在机制。余震的空间密度随距离的变化呈现出相当慢的衰减，这与构造地震活动中通常观察到的远程行为非常一致，但与其他流体驱动的地震活动案例研究(包括水力压裂引起的天然震群)明显不同。这有力地表明，地震密度的缓慢衰减可能是由明显的断层活化引起的，而且在注入区附近已经独立确认了这种断层活化。尽管如此，地震环境似乎以相当小的余震产生力指数 α 为特征，这可能表明(再)激活过程可能只发生在断层网络的一个小的(但远的)临界预应力子集内，导致有限的(但远的)余震触发。交叉相关分析结果表明，余震相关的时间速率与注入流体体积的时间速率之间的相互关系很弱，这突出了次级触发机制的直接相关性。

需要强调的是，该项研究中关于低余震产生力和断层激活的证据是相当间接的，可能不能明确地证明研究人员解释的正确性。这需要详细了解局部库仑应力和相关的稳定性阈值，以评估断层对流体诱发扰动的敏感性。然而，该地区粗略的断层滑动潜力分析结果有力地支持了研究人员的

解释。该研究提出的假设可以最好地描述两个重要观察结果，即低余震产生力和远程触发特征。两个观察结果初看可能是矛盾的，但都得到了合理的解释，可以在未来的研究中进一步测试和明确验证。作为一种可能的探索途径，未来可以将断层属性（即深度、长度和倾角）纳入流行型余震序列（ETAS）模型，该模型与预应力和流体压力信息一起，可能有助于推断该地区的相关触发参数。

来源：Karimi K, Davidsen J. Separating primary and secondary mechanisms for seismicity induced by hydraulic fracturing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2023, 113: 1982-1991.

主动源地震实验激发时间的自动估计

估算主动源实验中 P 波的激发时间可以有效地用于开发波速模型，因此大量的此类实验激励人们去开发自动获取激发时间的方法。气枪源的简单性和可重复性（例如为了解震源区的 2016 年智利北部皮萨瓜/伊基克地壳层析成像项目中使用的气枪源）表明，对于由内陆地震台网记录的 P 波到达时间来说直接应用波形互相关的方法是足够的，但由于波形形态的显著变化而效果不佳。出于类似原因，PhaseNet 机器学习算法的应用效果也不佳。在被动源调查中通常使用的一种与波形形态无关的替代算法，即回归估计器（Regressive ESTimator, REST）自动拾取包，也被证明不能令人满意，这主要是因为气枪源的有限频谱带宽和频繁发生的局部地震活动会导致许多错误的拾取。这推动了一种名为 CORREL 的新方法的开发，该方法联合 REST 和互相关方法，并添加了基于 REST 拾取的、多项式函数形式的约束，从而提供了对激发时间的合理预测。与最初通过 REST 和简单波形相关获得的结果相比，对前述智利项目（简称 PICTURES）的数据应用 CORREL，不仅显著增加了估计的到达数量，而且大大减少了异常值的数量。两种技术的组合保留了互相关提供的精度和绝对时间拾取提供的准确性。预测多项式还为 CORREL 提供了更好的方法，以从丰富的自然地震活动中区分出真实的发射（shot）。相关研究成果发表在 2023 年 10 月的 *Pure and Applied Geophysics*。

许多地震学应用都需要精确估计纵波（p 波）和横波到达时间，例如震源定位和局部地震层析成像（LET）。随着地震记录的进步和密集网络的部署，大量地震数据的采集已经实现，自动化方法也变得越来越重要。这些技术的发展已经取得了长足的进步，并且已经有了一些成功的应用。然而，其中许多需要在实际分析之前处理某些波形集，来作为互相关的模

板或机器学习（ML）程序的训练集。机器学习的成功在很大程度上归因于最近公开了非常大的数据集，其中包含数百万个先前选择的到达时间，因为相关波形可能与相关数据集的波形足够相似，以允许准确的关联。同时，如果记录的波形与训练数据集中的波形不够相似，这些方法可能会失败。对于源或传播介质在现有机器学习模型中没有得到很好体现的地区来说，这种情况更有可能发生。这两个因素都可以发挥作用的一个常见例子是主动源调查，其中构建适当的模型可能需要整个数据集的很大一部分。

在本研究中，研究人员描述了一种混合方法（CORREL），用于处理2016年智利 PICTURES 项目收集的一个此类数据集的地震图。虽然特定于 PICTURES，但开发这种方法是了解决该数据集的两个一般特征：①由于在复杂介质中传播而产生的波形形态的多样性；②相对较窄的源带宽（与本地记录的地震相比）。本研究首先介绍 PICTURES 调查项目及数据特征，然后分别采用 REST 和 CORREL 对开始时间进行估计，并对比结果。

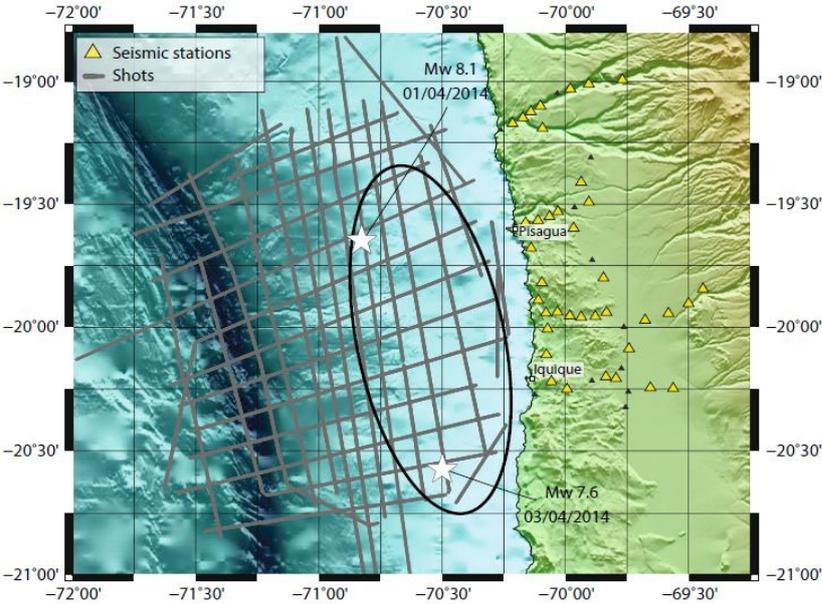


图 1 PICTURES 实验的研究区地图。海上灰线指示发射剖面位置，闭合三角形（黑色）指示陆上临时地震台网，该项目所分析的 38 个台站由较大的三角形（黄色）表示

REST 结果受到大量异常值的污染，但这些异常值一般可以通过它们与平滑变化的背景的偏差来识别——该平滑变化的背景是从一致的到达时间估计序列推导出来的。由此表明，这样的背景可以作为相关波形的识别指南。这种方法的组合导致了 CORREL 算法的创建。

CORREL 首先使用 REST 的修改版本根据单个站点记录的发射轮廓来估计到达时间，然后用低阶多项式来拟合这些估计。如果大量的误报（假阳性）阻止了合理多项式的确定，则与多项式预测的到达时间估计值相差超过 15 s（或行程时间 10%）的到达时间估计值将被删除，并重复该过程。虽然在大多数情况下，这种自动化过程被证明是足够的，但偶尔需要手动编辑。然后，对指定宽度（通常 ± 2 s）窗口内的波形（以多项式的预测时间为中心）进行互相关分析。

随着与源的距离增加，研究人员使用上述移动平均“蛙跳”（leapfrog）技术来分析参考波形的演变性质。这种方法提供的改进在于，通过将相关波形锚定到多项式，一旦相干信号重新出现，只需重新定义参考波形，即可克服由低质量的到达造成的差异。

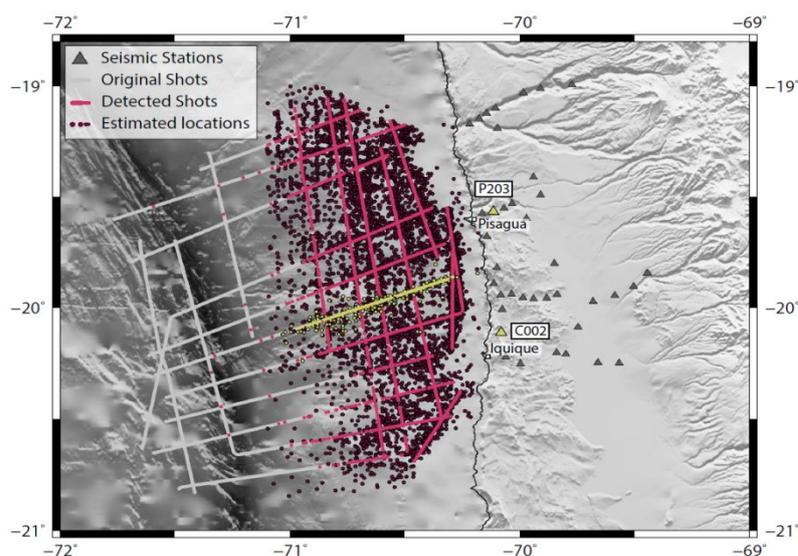


图 2 应用 REST 算法的结果。该图显示了使用 REST 处理的地震台站和发射，由 REST 识别的发射的真实位置位于线上，由 REST 确定的位置由实心圆圈表示

一般来说，当相关过程通过增加发射-接收器距离按序工作时，其执行效果最好，因为较短的距离通常会具有更高质量的信号，因此对参考波形的估计更稳健。

在生成发生时间初始集后，应用三个标准来进一步减少潜在的异常值。首先，要求蛙跳相关过程中（leapfrog correlation process）计算出的相关系数超过指定的阈值（通常为 0.5，根据对结果的观察）。其次，要求到达时间估值在多项式预测的指定范围（1.6 s）内。最后，邻近发射之间的到达时间差异应小于指定阈值（0.1 s）。最后一个要求旨在考虑互相关中周期跳跃的可能性，这是窄带宽信号的潜在后果。

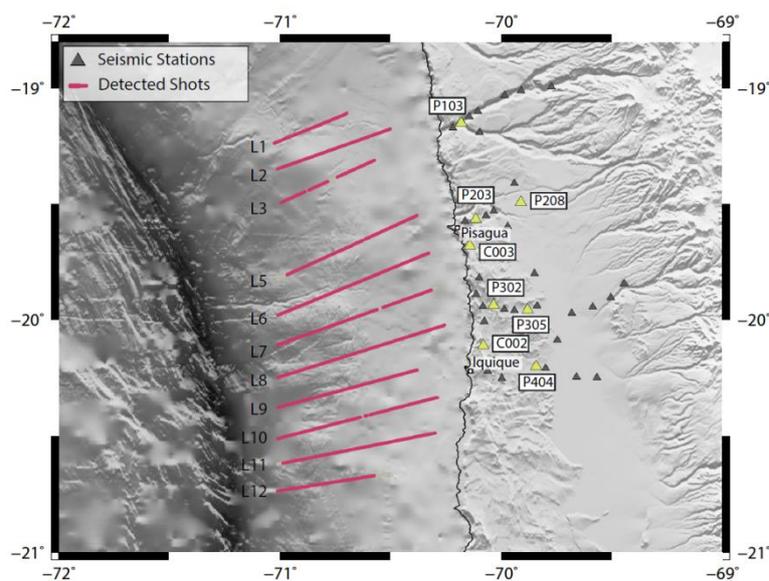


图 3 应用 CORREL 方法的结果（显示了使用 CORREL 处理的地震台站和发射）

总体而言，为了自动化和改进 PICTURES 项目 38 个陆地地震台站所记录地震图上纵波初始到达时间的估计，研究人员认为，尽管震源具有重复性，但波形形态的变化会导致标准互相关技术只能可靠地恢复一小部分可用的到达信息。采用一种已知的与波形类型无关的技术（REST）会增加到达数量，但代价是异常值数量增加，并且会丢失一些本来可以通过相关

性估计获得的到达数量。**REST** 的失败是由于信噪比低、气枪源信号带宽有限，以及无法区分发射和地震等综合因素造成的。

在 **REST** 方面的经验促使研究人员创建了一种名为 **CORREL** 的混合技术。该技术使用 **REST** 的正识别来生成近似实际行程时间的低阶多项式，然后使用这些预测作为互相关的指导。一般来说，**CORREL** 能够区分数据中的发射和其他信号（例如地震），从而仅选择发射信号。**CORREL** 相对于 **REST** 的另一个优点是，当连续几次发射的信号清晰时，它可以确定更多的拾取。由于将多项式函数（用作最终拾取的输入）和蛙跳相关方法相结合，**CORREL** 与 **REST** 不同，几乎不会错过任何清晰的连续波形。但是，该算法的当前版本仍然存在一些需要手动干预的缺点。例如，在某些情况下，**CORREL** 会产生系统错误，估计一组拾取的到达时间要么太晚，要么太早。

CORREL 的结果与 **REST** 的结果比较表明，**CORREL** 的激发时间估计数量增加了 31.3%。将互相关与 **REST** 结合使用的另一个好处是，所得到的时间将互相关提供的更高精度（在信号中最小周期的数量级上）与绝对时间估计提供的准确度相结合，从而显著提高了拾取的总体准确性。此外，**CORREL** 的错误拾取和错失的到达大大减少，从而显著提高了与实际发射相关的到达次数识别率。然而，当应用于低信噪比的记录时，**CORREL** 仍然会在一组拾取中产生系统误差。

来源：Reyes-Wagner V, Comte D, Roecker S W, *et al.* **CORREL**: Automated onset estimation for controlled-source seismic experiments. *Pure and Applied Geophysics*, 2023: 1-15.

考虑非结构构件地震破坏的室内地震安全混合现实演习

地震中室内非结构构件的破坏往往会造成人员伤亡。为了提高居住者的室内地震安全能力，研究人员提出了一种考虑非结构构件地震破坏的室内地震安全混合现实（**Mixed Reality, MR**）演习方法。首先，利用 **MR** 设备 **HoloLens**（一种头戴式显示器）捕捉室内点云，利用点云重建室内三维场景。然后，建立室内构件的地震运动模型，从而利用物理引擎构建室内非结构震害场景，并利用 **HoloLens** 进行显示。最后，为演习设计了一种安全区域引导算法。研究人员以某典型办公室为例，进行了室内地震安全演习。结果表明，该方法可使移动到安全区域的平均效率提高 **43.1%**。因此，该项研究结果可以有效地提高居住者的地震安全能力，从而减少人员伤亡。相关成果发表在 **2023 年 9 月** 的 *Scientific Reports*。

尽管抗震设计和施工技术的进步使地震中建筑结构倒塌的发生率大大降低，但是非结构构件破坏（例如天花板坍塌和家具的翻倒）同样会造成严重人员伤亡。因此，通过地震安全演习来减少地震中的人员伤亡至关重要。利用混合现实（**MR**）技术进行的地震演习兼具现实演习和虚拟演习的优点，让参与者在真实世界中自由移动，同时体验较为真实的地震场景。目前，利用微软公司的 **MR** 头戴设备 **HoloLens** 进行安全演习的研究已有一些，但是，考虑非结构构件地震破坏的室内地震安全演习还未有相关研究。

研究人员利用 **HoloLens** 实现了一种考虑非结构构件地震破坏的室内地震安全混合现实演习方法。该方法包括三个部分：①室内 **3D** 场景重建；②非结构构件震害模拟与 **MR** 显示；③安全演习指导。最后，以某典型办公室为例，进行了室内地震安全演习，验证了该方法的优势。

(1) 室内 3D 场景重建。通过 HoloLens 的空间映射重建场景，可以轻松快速地创建室内非结构构件，并保持真实室内环境与所构建场景的一致性。因此，研究人员采用三维点云模型进行室内三维重建，高效地建立了建筑信息模型（BIM）。该模型提供了必要的信息，并可转换为各种模型格式，如 FBX。3D 场景重建由三个步骤实现：①模型采集；②数据提取；③参数化建模。

(2) 非结构构件地震破坏模拟。准确的震害模拟可以为 MR 演习提供有效的震害场景。该研究计算了吊顶和活动家具的地震破坏，利用物体运动模型和物理引擎模拟了非结构构件的地震破坏过程，并利用 HoloLens 对室内 MR 地震破坏场景进行了可视化。

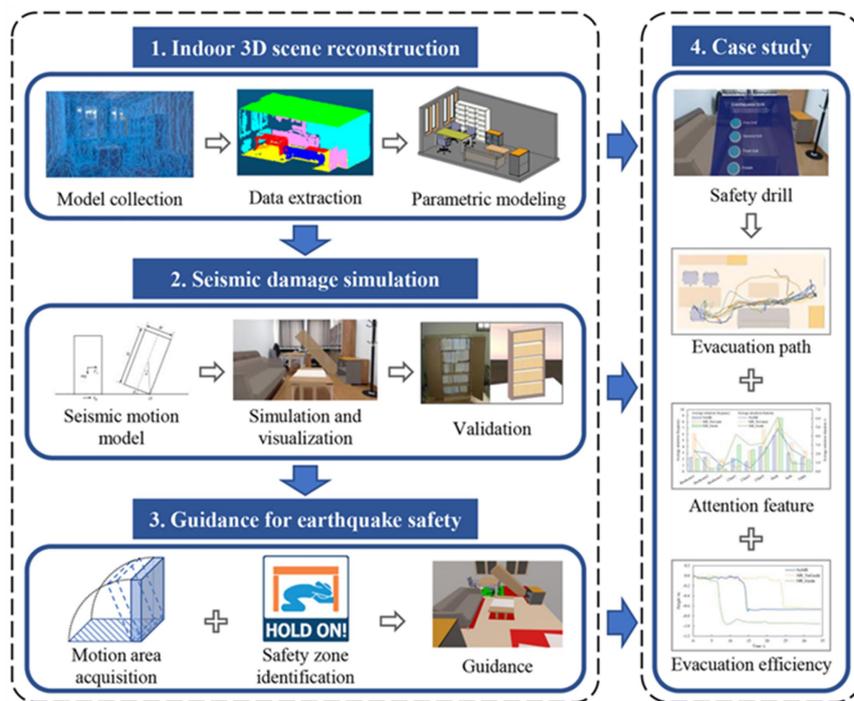


图 1 研究框架

(3) 地震安全指导。在室内地震安全演习中，参加者应在指导下学习正确的地震安全策略。根据美国联邦、州和地方应急管理专家以及其他官方防备组织推荐的“蹲下、掩护、抓牢”策略，寻找一个可以覆盖参与

者身体的安全区对室内地震安全演习非常重要。为了帮助参与者识别这样的安全区，研究人员提出了一种新的指导地震安全演习的算法，该算法包括三个部分：①运动区域获取；②安全区域识别；③引导。

演习地点选择了一幢教学楼的一间办公室，房间里有三个书柜和椅子、一张桌子、一张茶几和一张沙发。首先，用 HoloLens 进行扫描。然后，将获取的几何和空间数据导入 Dynamo 进行参数化建模，在 Dynamo 中分配各种构件类型、尺寸数据和空间坐标，生成室内三维场景的 BIM 模型。之后，将室内 BIM 模型导入到 Unity 中，在 Unity 中为每个构件分配相应的属性，包括物理参数、震害脚本等。最后，将应用程序部署到 HoloLens 上，以完成安全演习前的准备工作。

演习分三种情况进行：①无地震破坏场景的传统现场地震安全演习（NoMR），参与者观察室内非结构构件的全息图像，根据自己的经验进行疏散，没有任何地震响应或指导；②MR 地震安全演习（MR_NoGuide），参与者观察室内家具晃动和天花板坍塌的随机全息图像，并采取适当的安全措施；③有指导的 MR 地震安全演习（MR_Guide），向参与者展示地震破坏的全息场景，并提供地震安全指导。

1. 疏散路径分析

在 NoMR 演习中，只有一名参与者到达了安全区，而其余的参与者分散在不同的位置。在 MR_NoGuide 演习中，没有一个参与者能够到达安全区域，他们中的大多数人都在一个开放的角落里寻求庇护，以远离剧烈摇晃的物体，比如书柜。同时，参与者的路线很混乱，因为他们试图避开翻倒的家具和掉落的天花板。

在 MR_Guide 演习中，九名参与者中有八名以相对规则的疏散路径成功到达了安全区，这表明他们在此过程中几乎没有犹豫。只有一名参与者

未能到达安全区域。从演习结束后对参与者的采访来看，他们都很害怕 MR 中的地震场景，未能到达安全区的参与者表示太害怕了，无法完成演习。这进一步反映了 MR 演习的真实性。

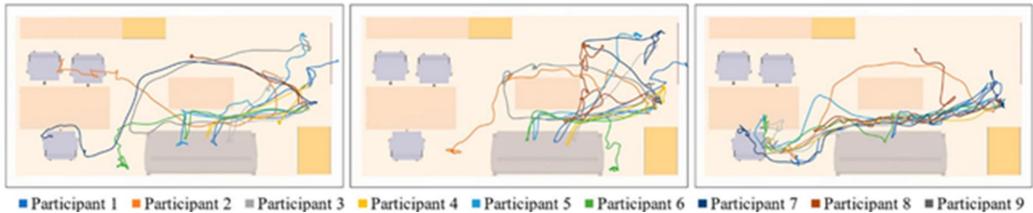


图 2 地震安全演习中参与者选择的路径。(a) NoMR 演习；(b) MR_NoGuide 演习；(c) MR_Guide 演习

2. 注意力特征分析

图 3 提供了参与者在疏散过程中对室内构件的注意力统计数据，这有助于分析参与者的注意力特征。值得注意的是，参与者对“桌子”和“3号椅子”表现出更高的注意力，这可能归因于演习开始时他们最初面对的方向。因此，有必要在分析中排除外部因素。

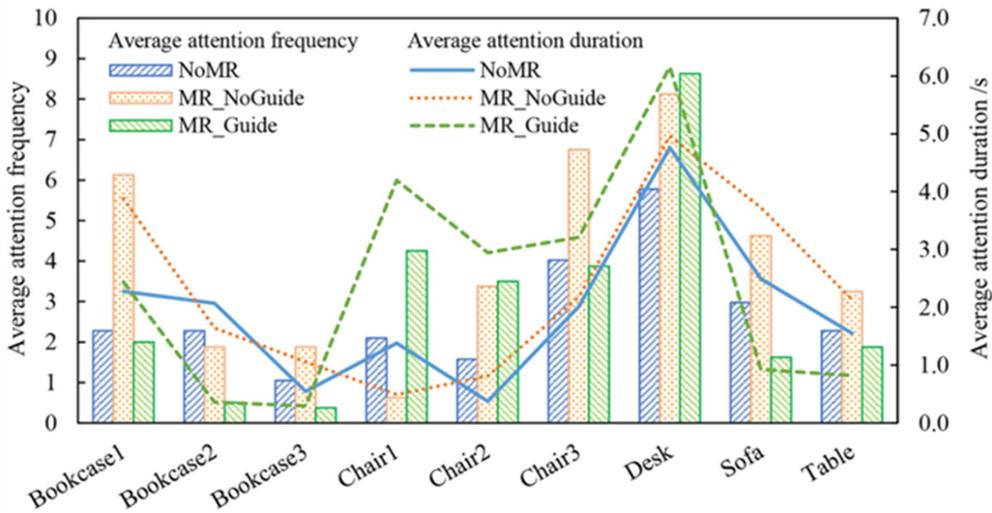


图 3 参与者的注意力情况

在 NoMR 训练中，参与者对家具的注意力被分散了，平均注意两次。在 MR_NoGuide 演习中，加入 MR 地震场景后，参与者更加关注容易摇晃的危险家具。比如，参与者关注“书柜 1”的平均频率从 2.3 次增加到 6

次。在 MR_Guide 演习中，加入地震安全指导后，参与者对室内构件的平均关注频率有显著差异。尤其是参与者在安全区内对“书桌”的平均关注频率达到 8.6 次，比其他室内构件的关注频率更高。

3. 疏散效率分析

疏散效率指从地震演习开始到参与者完成安全行动所花费的时间。NoMR、MR_NoGuide 和 MR_Guide 演习的平均完成时间分别为 13.20 s、16.87 s 和 9.60 s。经 T-test 分析，NoMR 演习与 MR_NoGuide 演习之间有显著差异 ($P=0.0444<0.05$)。同样，MR_NoGuide 与 MR_Guide 之间 ($P=0.0018<0.01$)，NoMR 与 MR_Guide 之间 ($P=0.0116<0.05$) 也有显著差异。这表明三次演习的结果有显著差异。

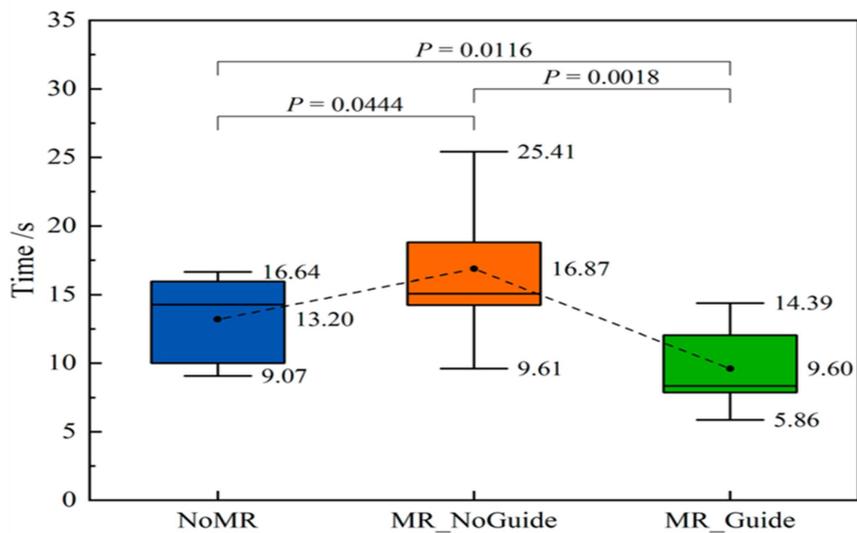


图 4 演习完成时间

与 NoMR 演习相比，MR_NoGuide 演习的完成时间增加了 3.25 s，疏散效率降低了 23.9%。这是因为构建的地震破坏场景使参与者的反应更加真实，从而导致恐惧和犹豫等行为。因此，参与者需要花费更多的时间来响应和决策，这延长了疏散过程，降低了疏散效率。与 MR_NoGuide 演习相比，MR_Guide 演习完成时间缩短了 7.25 s，疏散效率提高了 43.1%，说明 MR_Guide 演习大大提高了疏散效率。

4. 小结

在该项研究中，参与者在 MR 场景中的疏散反应更接近真实地震中的行为。他们更了解危险的非结构构件，在无指导演习中，疏散路径更混乱，完成时间更长。总体而言，MR 地震安全演习为参加者提供了更真实的地震破坏场景体验。因此，MR 演习方法有助于加深参与者对地震的印象，增强他们的防灾准备，提高地震安全演习的有效性。

在无指导演习中，由于缺乏室内地震安全知识，参与者做出了错误的行动。他们可能会躲在角落里，靠近书柜，或者试图逃离房间，往往无视来自头部的危险，比如掉下来的天花板。通过提供 MR 地震指导，参与者学习了“蹲下、掩护、抓牢”的安全策略，这使他们能够在地震期间安全地寻找掩护。此外，在指导下，参与者的疏散效率显著提高，在不到 10 s 的时间内完成了疏散。因此，MR 的引导可以提高地震疏散效率，显著提高参与者的安全性。

来源：Xu Z, Yang Y, Zhu Y, *et al.* Mixed reality drills of indoor earthquake safety considering seismic damage of nonstructural components. *Scientific Reports*, 2023, 13: 16461.