

地震科技前沿快报

2021 年第 7 期（月刊总第 31 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、不同国家地震中死亡的城市人口和农村人口需要独立评估——以哥伦比亚为例
- 2、常见地震仪器信息安全缺陷评估
- 3、约束流体注入诱发地震的最大震级

不同国家地震中死亡的城市人口和农村人口需要独立评估 ——以哥伦比亚为例

研究人员以哥伦比亚（Colombia）为例，来检验特大地震中的死亡人口主要来自于农村这一假设。对发生在哥伦比亚最大的 8 次地震进行模拟，计算了城市和农村死亡人口的假设比例。选择这些曾经的地震，并不意味着它们会在不久的将来再现，而是抽样分析真实模型中的死亡情况。地震造成的死亡人口通过面向救援减灾的地震损失警报工具 QLARM 进行计算，城市被定义为最少有 35000 个居民。但是，最终的结果并不受这一限制。模型计算被接受的条件是，它与文献中报道的最大地震烈度相匹配。

8 次地震的模拟显示，其中四次地震将主要造成农村人口死亡，三次

主要造成城市人口死亡，剩下的一次农村和城市死亡人口相当。然而，在 8 次地震模拟中，死亡总人数中城市人口占 79%，而农村人口占 21%。这意味着全世界地震死亡人口中 90% 来自农村的观测结果在哥伦比亚并不适用。造成这一结果的原因是哥伦比亚地震破裂的平均长度是全球样本破裂模型中的一半。相对短的破裂长度会穿过工业区——哥伦比亚却拥有很高的工业化程度，而非很多村庄。

这一结果意味着，大地震主要造成农村人口死亡的结果并非普遍适用。城市人口和农村人口在地震中死亡的比例必须具体国家具体分析，以评估不同地区需要投入的救灾力量。相关研究成果于 2021 年 3 月发表在 *Seismological Research Letters*。

新闻媒体在报道重大事件时最受关注。2015 年，尼泊尔发生 7.8 级地震，加德满都的几座房屋倒塌，五至八层狭窄建筑物顶部的无数水箱毫发无损。阅读新闻报道发现，其中有一张照片显示救援人员将一名伤员送上救护车，有人根据新闻报道认为，那天在加德满都约有 10 000 人死亡。然而，这张照片和伴随它的新闻报道严重误导了世界。在这次 7.8 级地震中，估计死亡的 10 000 人中只有 8% 的死者位于加德满都的大都市区，而 92% 的死亡人口分布在尼泊尔的小城镇和村庄。

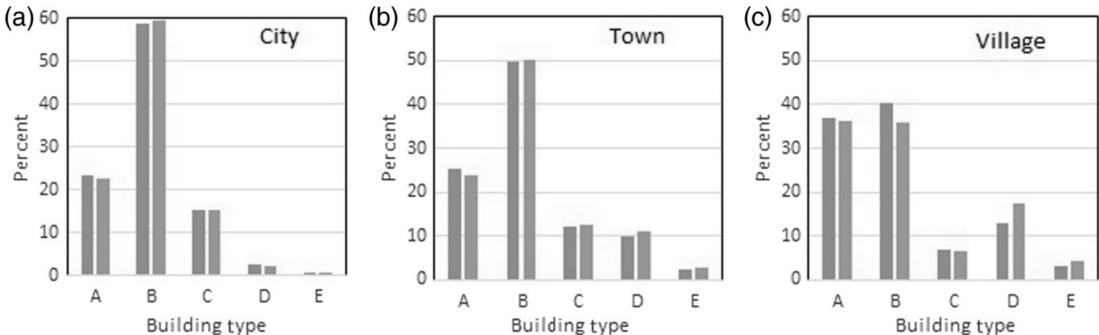


图 1 未来大地震破裂带周围的背景事件导致的岩石破坏

因此，不知情的官员甚至专业人士要求保护城市人口免受地震影响。然而，Wyss（2018）表明，在 53 个特大地震中，总体上超过 90% 的死亡发生在农村。他认为，不应忽视在特大地震中首当其冲的农村人口。

在之前的文献中，35000 居民被用来划分城市和农村。在 Wyss（2018）的样本中，53 个地震中有 10 个是城市地震，这可能表明，在一些国家，农村人口在大地震中更易受到伤害，这一普遍规律可能并不适用。Wyss（2018）采用的城市地震的一个特征是平均震级为 7.1 级，而农村地震平均震级为 7.5 级。这意味着，城市地震破裂的平均长度可达 75 km，而农村地震的平均破裂长度可达 150 km。结果更长的破裂会经过更多的居民点，并给农村造成更多的灾难。相反，在很多国家，由于沿破裂带的人口非常密集，短的地震破裂会造成更多的城市人口死亡。本文的目的是确定哥伦比亚是否也是此类情况，并为其他国家提供参考。

地震烈度公式：

$$I = C_1 \times M - C_2 \times \log(\sqrt{r^2 + h^2}) + C_3$$

QLARM 仅计算由于建筑物垮塌造成的人员死亡。

人口与建筑物数据：QLARM 中哥伦比亚有 4300 个居民点的人口数据是可获得的。1148 个居民点的信息来自哥伦比亚国家统计局 2018 年人口普查——代表了总人口的 98.4%。对于其余的小居民点，数据来源于各种渠道。每一个居民点建筑物信息参考欧洲震级等级 A（最弱）至 F（最抗震）来划分。人口和建筑物被划分为三个等级：村庄（<2000 居民）、城镇（2000~20000 居民）以及城市（>20000 居民）。

QLARM 的可靠性检验：在一些国家，QLARM 警报服务开始以后，很多地震已经造成人员伤亡，因此，实时损失评估可被用来验证 QLARM。本研究中，发布了 8 次警报。其中三个是深源事件，两个震级很小，这些

地震并不会造成人员伤亡。因此，QLARM 响应为绿色警报是正确的，但是它们不能被用于验证用途。

剩下的三个警报，两个未造成人员伤亡，因此，两个绿色警报也是正确的。最后一个警报在 2007 年 9 月 10 日发布，并且是红色警报。然而，事实上它应该是一个绿色警报。出现偏差的原因是美国地质调查局不正确的震源参数，震级被假设为 6.9 级，但最终的震级为 6.8 级。更重要的是，初始的深度估计为 9 km，而实际为 31 km。当使用正确的震源参数时，QLARM 给出了绿色警报。在三个震级大于 6.0 级的浅部地震中，QLARM 正确估算了 0 伤亡，这刺激了 QLARM 在哥伦比亚的使用。

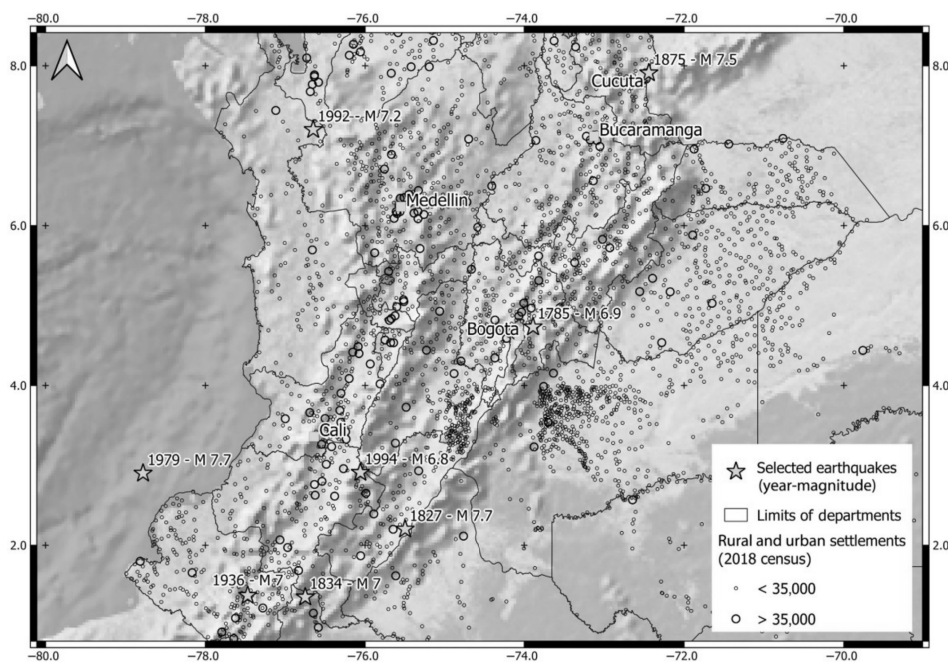


图 2 哥伦比亚历史地震的震中以及不同居民点的位置

震源参数：对哥伦比亚最大的 8 次地震进行分析，目的是确定如果这些地震发生在今天，以现在的人口和建筑物情况，农村与城市的死亡人数比例将如何。震级和深度采用文献中的结果，对于文献中不一致的情况，采取与报道的最大烈度相匹配的值。地震破裂的终点利用余震分布或者等

震线来确定。利用终点之间的连线作为能量释放源，距离这条线最近的距离被用来计算烈度，震中被放在线的中点。对于 1994 年的地震，破裂长度和方向都不确定，所以研究人员使用了点源模型。由于其 40~50km 长的破裂，这一简化也是可接受的。

8 次地震的情况：

1785 年 6.9 级地震：破裂长度为 40 km，由于靠近 Bogota 大都市中心，被划分为城市地震。

1827 年 7.7 级地震：地震破裂长达 200km，地震烈度在 VIII-IX 之间，地震影响区域人口密集，有两个城市中心以及农村社区。

1834 年 7.0 级地震：地震烈度为 IX 级，破裂长度大约 60 km，这一地震被划分为农村地震。

1875 年 7.5 级地震：这一地震据报道造成了 1001 人死亡，现今人口可能是当时的 20 倍，因此，如果发生在现在可能会造成大量人员伤亡，被划分为城市地震。

1936 年 7.0 级地震：烈度为 VIII，破裂长度为 60 km，震源深度 20 km。

1979 年 7.7 级地震：烈度为 VIII-IX 之间，被划分为城市地震。

1992 年 7.2 级地震：地震烈度为 IX，震源深度 14 km。

1994 年 6.8 级地震：造成了 1000 人死亡，大多是由于雪崩和滑坡，20 个人死于房屋倒塌。

8 次地震模拟中，5 次为农村地震，3 次为城市地震。当把农村死亡人数比例与每次地震做关联分析，可以清楚地发现，有四次将主要造成农村人口死亡，三次主要造成城市人口死亡，剩下的一次，农村和城市死亡人数相当。

8 次地震中死亡人数的总和中，城市人口占 79%。这是由于那些靠近

人口中心的地震造成了大量的人员伤亡。虽然仅分析了 8 次地震，但是这一结果是稳健的。当增加分析的地震后，农村和城市死亡人口平均比例并未发生明显的改变。35000 人口是划分农村和城市的标准，但这一结果对此划分标准并不敏感。基于这一结果，大地震主要造成农村人口死亡的假设需要被修正。为了获得可靠的农村与城市死亡人口比例，必须具体国家具体对待，活动断裂的破裂长度与周围人口密度都需要进行考虑。

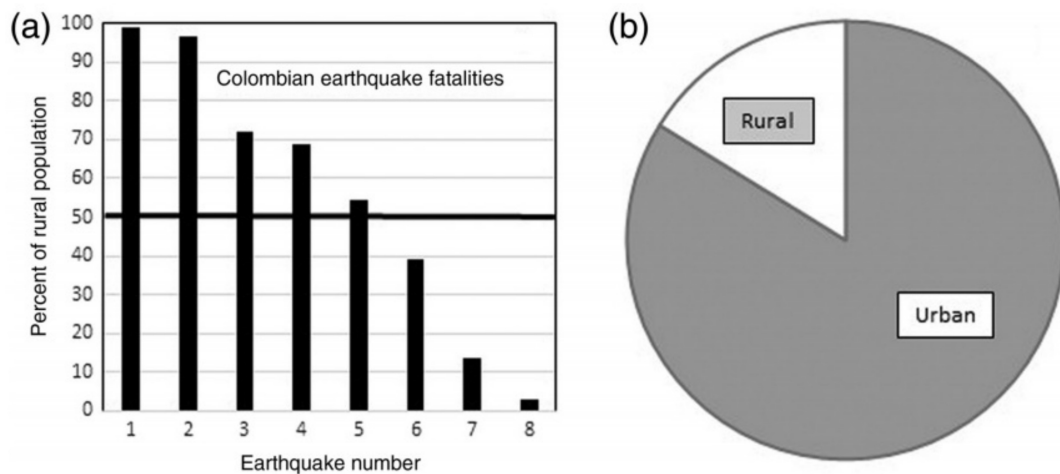


图 3 8 次历史地震中农村和城市死亡人口比例

Wyss (2018) 采用的平均震级为 7.5 级，而本研究的平均震级为 7.2 级。这意味着两个研究中的平均破裂长度分别为 150 km 和 75 km。因此，短破裂将在城市中心造成大量人员死亡，否则就不会引起大量人员伤亡。相反，长破裂会严重影响农村地区。事实上没有城市延伸超过 300 km，这一距离相当于 8 级地震破裂长度。但是，对于 6.9 级地震破裂长度小于 70 km 是可能的，例如 1995 年的神户地震，其仅影响了城市。这一结果与哥伦比亚相似，相对短的破裂主要造成城市人口死亡。地震所引起的滑坡、雪崩、海啸的影响并未计算，死亡人数的估计仅仅是基于房屋倒塌引起。虽然所有的这些灾害在哥伦比亚都很重要，但它们并不会造成研究结论的

变化。

来源：Wyss M, P Rosset. & L Triveno. The Ratio of Rural to Urban People Killed in Earthquakes Needs to be Assessed for Countries Separately, the Example of Colombia, *Seismological Research Letters*, 2020, 92, 1036–1051, doi: 10.1785/0220200252.

常见地震仪器信息安全缺陷评估

现代地震和全球导航卫星系统台站都配备了物联网设备，可以近乎实时地获取、处理和传输各种地球物理数据，同时，也为常见地震探测装置带来了新的威胁。雅典地球动力研究所的研究人员用标准的信息安全方法和实践评估了这种威胁，旨在识别、描述安全缺陷，以及对此类环境的潜在攻击，并预测所需的对策。实际测试和攻击被用于证明数据加密和用户身份验证过程的缺失，结果发现风险主要来自于未加密通信协议、设置和密码方面的不安全做法，以及设计实施的不当。上述因素都可影响并扰乱地震观测站的日常运作，可能会引起不必要的公众关注或不信任、经济损失，甚至国家安全问题。研究人员提出了几种对策和解决方案，并对其进行了评估，以处理每个已识别的漏洞。相关成果发表在 2021 年 3 月的 *Seismological Research Letters* 上。

地震仪器是用于高度准确地记录地面或结构振动，作为典型的物联网（IoT）设备，其操作模式对其安全性构成了很高的风险，涉及到设备本身的可用性、完整性和机密性，以及它们产生和传输的测量结果。测量的变更和无法获得可能导致领导者的疏忽或错误行动，这可能马上危及人类生命或建筑物和结构的安全。

如果一个电子机械设备可以连接到一个网络或另一个网络设备，并通过传输数据、控制命令和监测物理、机械或生物特性进行通信，那么它就被认为是一个物联网设备。通过这种方式，物联网设备在人类活动的几乎所有部门（运输、医疗保健、安全服务、能源、政府服务等）提供创新和复杂服务。物联网生态系统的运行由基于交互所需的异构技术组成，如定制的硬件、操作系统、固件和通信协议。在许多应用领域，物联网设备的

安全操作以及所生成和传输数据的安全性比独立计算设备的安全操作更为关键。这一点在对物联网系统的多次测试性网络攻击中得到了证明，同时，这些攻击也产生了严重影响。因此，非常明显，物联网设备的操作和使用必须在物理安全和电子安全方面得到保证。

本研究的重点是模拟物联网设备的基本信息安全特征（可用性、机密性和完整性）可能在现实中遭受的潜在攻击，并以此为基础进行安全评估。为了演示此类攻击的可行性并分析潜在威胁，研究人员遵循了典型道德黑客过程的五个步骤中的前三个步骤，即侦察、扫描和枚举，以及访问权获取。评估实验室包括三种来自不同品牌制造商的不同装置：地震仪，加速仪和全球导航卫星系统（GNSS）接收器）。这些被用作攻击目标的设备，除了 IP 地址外，都是默认设置。根据从制造商手册中获得的信息和用于安全审查的其他公共信息，创建以下攻击树（图 1）。

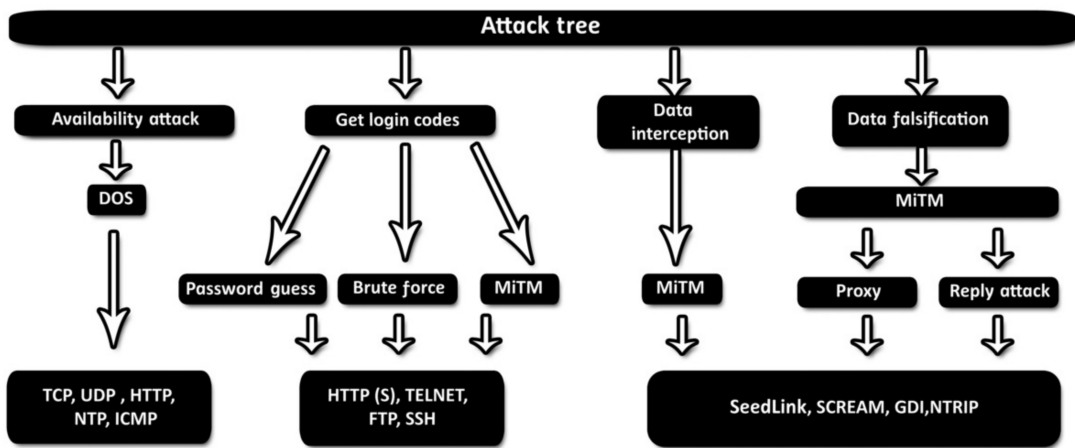


图 1 理论上的安全攻击树

通过中间件攻击，使用一个有恶意的计算机（在研究人员的环境中模拟）在与设备及 Kali Linux 和 Wireshark 软件相同的网络中获得用户凭证，并尝试通过地震仪和加速仪设备使用的 SeedLink 传输协议拦截地震数据。为了攻击这些设备的可用性，使用了低轨道离子炮（LOIC）软件。

漏洞扫描是通过网络访问在设备和软件协议中进行的，而没有检查任何由物理访问引起的安全问题。此外，所有测试都是使用设备上的现有设置执行的，而没有执行任何会减少潜在攻击的辅助加固过程。为了模拟网络互连，一个 8 端口交换机被用于地震物联网以连接设备，一台收集数据的计算机用来充当服务器，一台计算机被恶意用户使用。

为了完成所有渗透测试，Windows 10 操作系统被恶意用户使用，其中包括 LOIC 工具拒绝服务（DOS）攻击，Nmap 和 Nessus 工具被用于执行漏洞评估。使用 Kali Linux 虚拟机模拟中间件攻击，使用 Wireshark 对数据流进行监控和分析。最后，在用户的计算机上使用了 SeisGram2K 地震记录查看器，从加速度计和地震仪设备上实时获取和读取地震数据。

总的来说，所进行的试验表明，这些地震装置的设计重点是所产生测量数据的准确性和实时传输，但潜在的安全问题没有在同水平得到解决。一旦恶意用户能够通过受感染或受损的计算机访问地震设备所连接的网络，其就可以相对容易地绕过安全措施，并根据攻击目的修改设备的操作，从而导致各种类型的问题。

模拟研究中，对设备发起 DOS 攻击成功，导致设备在攻击时间内不可用。这种攻击的目的通常是通过发送过多的数据包来耗尽设备通信能力的所有可用资源，在这种情况下，用户数据报协议（UDP）端口没有被任何设备使用。而设备只是试图应对这些数据包的泛滥，保留所有可用的容量。攻击结束后，通讯立即恢复。对于 GNSS 设备来说，使用 UDP 的 DOS 攻击导致了额外的故障，在这种情况下，通信在攻击结束后没有自动恢复，设备不得不艰难地重新启动以恢复其操作。

通过 web 界面获取 GNSS 设备密码的尝试成功，但对于地震仪和加速度计，只获得了用户名，没有获得密码。对于自动加速仪，破解 Telnet 协

议密码的尝试已经成功。在这种情况下，如果没有强制性用户名(mandatory username)，将降低该设备配置环境的访问安全性。此外，测试结果表明，Telnet 协议密码与 web 服务用户密码一致。因此，该密码很容易被截获，即使 HTTP 使用加密的身份验证。总体而言，对于 GNSS 设备，Telnet 和 FTP 协议的用户名和密码都可能泄露。

最后，可以通过中间件攻击拦截地震数据，这种攻击是在用户计算机和地震设备之间的通信通道上进行的。结果发现，通过中间件攻击，并使用 Paros 代理或传输控制协议重放套件等工具，对实时传输的非加密地震数据进行修改，是所有不安全协议（如 SeedLink）的潜在攻击路径。

	Dos attack	Password trapping			Data interception
	UDP flood	HTTP	Telnet	FTP	SeedLink
Seismograph	Success	Partial success	N/A	N/A	Success
Accelerograph	Success	Partial success	Success	N/A	Success
GNSS	Success	Success	Success	Success	N/A

图 2 安全评估结果

Accelerograph			GNSS			Seismograph		
Country breakdown			Country breakdown			Country breakdown		
Country	Hosts	Frequency	Country	Hosts	Frequency	Country	Hosts	Frequency
United States	52	55.91%	United States	51	30.0%	United Kingdom	17	38.64%
Mexico	14	15.05%	Russia	28	16.47%	Turkey	7	15.91%
Iceland	8	8.6%	Poland	23	13.53%	Pakistan	6	13.64%
Argentina	5	5.38%	Denmark	14	8.24%	Republic of Korea	3	6.82%
Romania	5	5.38%	Italy	14	8.24%	Cayman Islands	2	4.55%
Republic of Korea	3	3.23%	Romania	12	7.06%	Germany	2	4.55%
Bulgaria	1	1.08%	Bulgaria	10	5.88%	United States	2	4.55%
Canada	1	1.08%	Canada	4	2.35%	Czechia	1	2.27%
Costa Rica	1	1.08%	Mexico	3	1.76%	Greece	1	2.27%
Italy	1	1.08%	Bolivia	2	1.18%	Jersey	1	2.27%

图 3 本研究中的地震物联网设备的暴露情况搜索结果

测试结果如图 2 所示，GNSS 接收器成功截获了每个可配置和控制设备在 web 服务中使用的用户名和密码。然而，对于地震仪和加速度仪来说，只是部分成功——只获得了用户名，而没有获得密码。最后，通过 Telnet

和 FTP 协议可以访问 GNSS 设备，通过 Telnet 协议可以访问加速仪，因为这两种设备上的密码很容易被泄露和获取。图 3 则显示了来自搜索引擎的、针对这些特定物联网设备暴露情况的搜索结果。

地震物联网设备是地震网络运行的一部分，对其进行的恶意攻击可能会简单地使单个地震台站或整个网络停止运行。在这种最简单的情况下，对受灾地区进行近实时的地震监测即使不是不可能，也是非常困难的。如果这种恶意攻击在不中断近实时数据采集的情况下影响原始地震数据，它甚至可能改变计算出的地震参数（如震源、位置、震级和地面运动参数），而不能立即被地震部门注意到。

在最坏的情况下，地震预警系统（EEWS）物联网中的恶意攻击可能会中断运行，甚至产生假警报，从而触发所有随后的自动化程序。这些恶意的虚假警报造成了相当大的后果，如不必要的公众关注、重大的工业经济损失和脆弱的国家安全。

物联网设备的漏洞处理需要由制造商和运营商解决，双方不仅应关心科学数据的生产和处理，还应关心这些数据的安全性和可靠性。制造商应：删除不安全的协议、使用更安全的身份验证方法、通过定期的固件更新不断提高设备安全性、在首次使用设备时强制更改默认登录密码；运营商应：更改出厂默认密码、使用加密协议、禁用未加密协议、用最新的版本更新固件设备并定期检查、未加密数据通信时须有 IT 安全专家的评估及应对策略。

来源：Samios M, Evangelidis C P. & Serrelis E. Assessment of Information Security Vulnerabilities in Common Seismological Equipment, Seismological Research Letters, 2021, 92, 933–940.

约束流体注入诱发地震的最大震级

了解流体注入引发地震的机制是做出改善的关键。最近的诱发地震（如 2017 年 5.5 级的韩国浦项地震）所释放的平均能量已经超过预测的 1000 倍，因此需要采用可靠的方法来定义关键的先决条件，并以此约束预期的地震震级。来自宾夕法尼亚州立大学的几位科学家将触发产生的最大地震震级定义为预先存在的临界应力和流体注入量的函数，在预应力实验室断层流体注入实验中证实了不同边界条件和注射速率下触发地震的参数。此外，研究发现，在单个断层上观察到的剪切滑移与扩张的比值是触发地震的信号，可作为即将发生破裂的可测量的替代指标。这一新框架提供了一种稳健的方法来约束断层的最大地震规模，并统一了之前的实验室和现场观测。相关成果发表在 2021 年 3 月的 *Nature Communications* 上。

在过去的几年中，诱发地震的频率急剧增加，这主要是由于工业规模的液体注入（如水力压裂、增强型地热系统和废水处理），小的应力扰动就会引发地震。为了预测注入诱发地震的最大震级，前人基于总的注入量、受应力影响的体积大小、理论上的比例关系以及地震活动变化等因素提出许多模型。基于注入量的模型认为最大震级 (M_0^{max}) 为总的注入体积 (ΔV) 与受影响区域剪切模量 (G) 的乘积，但是，观测到的注入地震震级要远远大于这个值，其中的机制有待深入研究。

为了查明控制诱发地震最大震级的机制，研究者使用封闭在加压岩心支架内的双直剪装置，通过流体增压将预应力实验室断层重新激活，从而模拟流体注入诱发地震。实验在两种边界条件下进行：①恒剪切应力（constant shear stress, CSS），代表上覆岩层压力不变下的正断层作用；②零位移（zero displacements, ZD），代表水平变形下的逆断层作用。实验分

为三个阶段：①以 $10\mu\text{m/s}$ 的恒定速率进行剪切加载，使裂缝达到峰后稳定状态；②剪应力降低到峰值强度的一定比例；③应用一系列流体增压脉冲来诱导剪切滑移。

(1) 流体注入诱发滑移

图 1 显示了两种边界条件下剪应力、滑移量、孔隙压力、注入体积以及累计矩震级的变化。恒剪应力边界条件下（图 1a），当外加剪应力超过剪切强度时，滑移开始。随着孔隙压力的增加，断层进一步弱化，接下来的加压阶段剪切位移增加。流体增压也促进孔径打开或正向扩张。在 750 s 时，累计剪切位移与垂向位移相等。总注入体积是根据滑移面积和测量的孔口开度来评估的，累计变形矩震级是由之前所有滑移产生的矩震级和得到的。

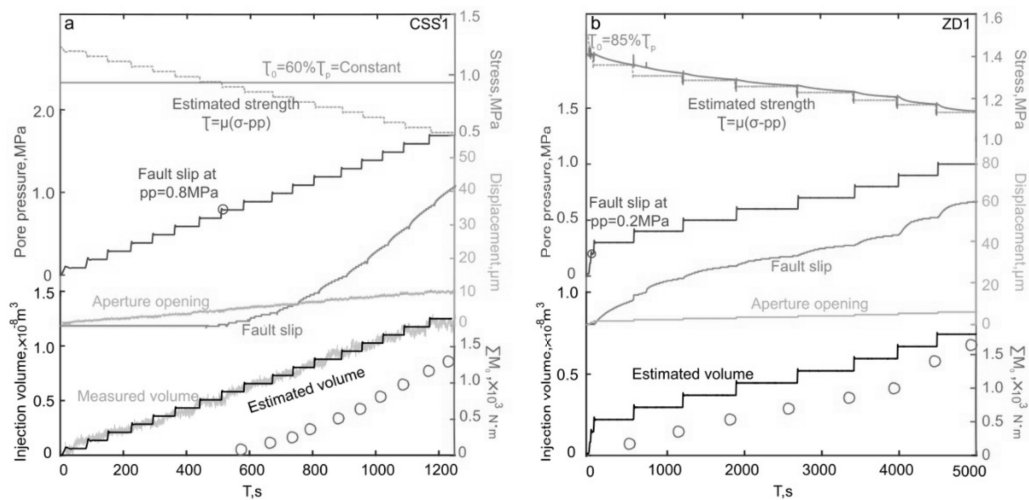


图 1 流体注入诱发的断层位移与累计地震矩随时间的变化，a：恒剪应力边界条件，

b：零位移边界条件

图 1b 显示了零位移边界条件的实验结果。剪切加载在流体增压之前停止，这代表在诱发滑移期间的剪应力松弛。流体压力以 0.1MPa 的增量施加，直到产生滑移。断层滑移会在下次压力增量之前停止，在这个过程

中剪应力松弛并逐渐降低到对应的摩擦断层强度。流体加压后，断层立即被激活，这是因为主剪切应力接近临界压力。断层在重新激活后迅速滑动，并在每一个加压步骤结束时减慢。断层剪切位移在加载早期很快达到张开量，并且以更高速率增加。

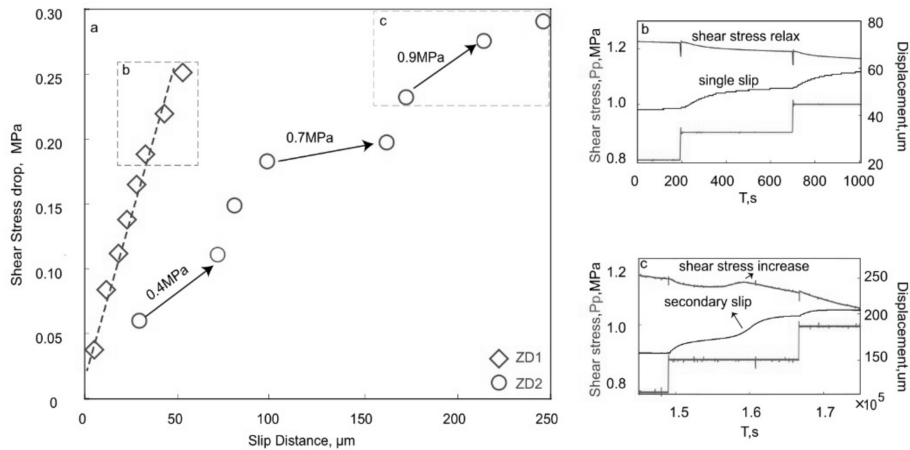


图 2 流体增压过程的剪应力降

(2) 流体加压过程中的二次滑移

图 2 显示了在零位移边界条件下剪应力降与剪位移的关系。在实验 ZD1 (初始应力为 $90\% \tau_p$) 中，两者显示近线性相关，但在 ZD2 (初始应力为 $85\% \tau_p$) 中，斜率在某些位置发生变化。应力-位移曲线显示，ZD2 实验中剪应力发生第二次应力松弛，一种可能的机制可能是在加压步骤中存在局部抗滑移的凹凸体，并在加压步骤中产生剪应力。

(3) 出乎预料的大震级地震

断层的初始应力状态是控制诱发地震震级的关键参数之一。但是，经典的最大震级估计只是简单的将初始应力作为峰值强度 (peak strength) 和剩余应力的均值 (图 3 的 50% 曲线)。但是这忽略了有些断层在地震之前已经临近失稳的情况 (图 3 中 99.9% 曲线)。考虑到该窗口内所有可能的初始应力状态，研究者将应力比 c 表示为全部应力下降幅度的比例，并将最

大地震震级重新定义为 $M_0^{\max} = \frac{1}{2(1-c)} G\Delta V$ 。当 $c > 50\%$ 时，会预测更大振幅的地震。这种定义不再要求初始应力位于应力降窗口的正中位置，从而可以预测比 $M_0^{\max} = G\Delta V$ 更大震级的地震。

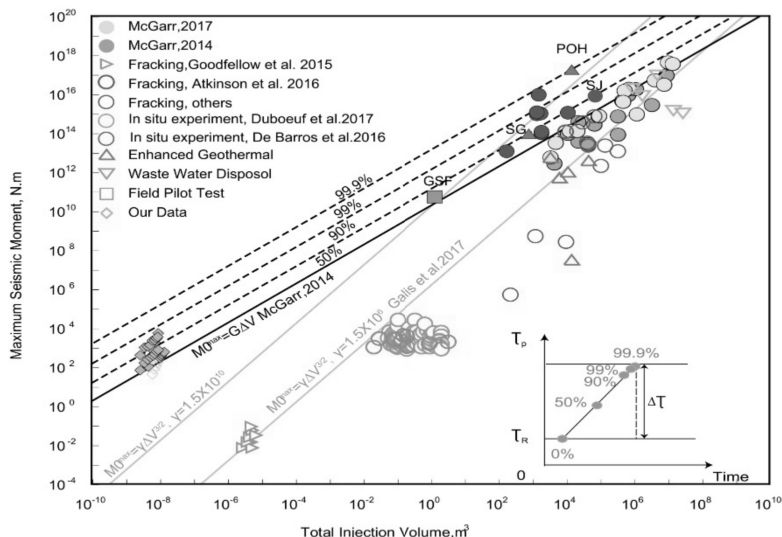


图 3 流体注入诱发地震最大地震矩与总注入量的关系。黑色实线代表所假设平均应力下的地震矩上限；黑色虚线代表不同 c 值下预测的最大地震矩；灰色实线代表不同 γ 值下预测的最大地震矩

大多数报道的流体注入诱发地震的震级都被经典模型预测的阈值所约束，但是也有一些地震震级要远远超过这个阈值。而这些地震可能是由于更高的初始应力导致的。研究者分别绘制了 $c=75\%$ 、 $c=99\%$ 以及 $c=99.9\%$ 的曲线，结果表明，对于给定体积的注入量，预测的最大震级随着 c 值增大而增大，并且预测的最大震级很好的约束了所有观测到的诱发地震。

有两个条件可能导致这些观测到的意想不到的大震级地震的发生：应力边界条件的形式和局部凹凸体。一般来说，如果保持恒定的应力（即 CSS 边界条件），可以期望诱发地震产生更大的矩震级。这是因为，孔隙压力的增加降低了断层强度，因此相对于 CSS 驱动的断层破裂和断层加速而言，强度亏损增加。

在实验中，总注入体积大致由断层扩张定义 $\Delta V = aA$ ， a 是断层开口变化量， A 是滑块面积。由面积为 A 的区域 a 重新激活产生的总矩震级为 $\Sigma M_0 = AGu$ ， u 代表滑动位移。当 $\Sigma M_0 = 2G\Delta V$ 时， $u = 2a$ 。这种关系表明，在平均应力的初始条件下，当滑动位移 u 等于或者超过两倍断层扩张量时 ($2a$)，累计矩震级可以达到最大预测矩震级 ($\Sigma M_0 = 2G\Delta V$)。图 4 中实验 CSS1 显示了这种关系，计算出的最大矩震级随着滑动位移与断层扩张比例的增大而增大。当滑移与断层扩张量的比例达到 2 时，实验 CSS1 的累计矩震级达到经典的阈值。而其他实验在流体开始注入时，这个比值就已经超过 2。这似乎是这些实验的初始应力状态接近相应临界应力状态的结果。

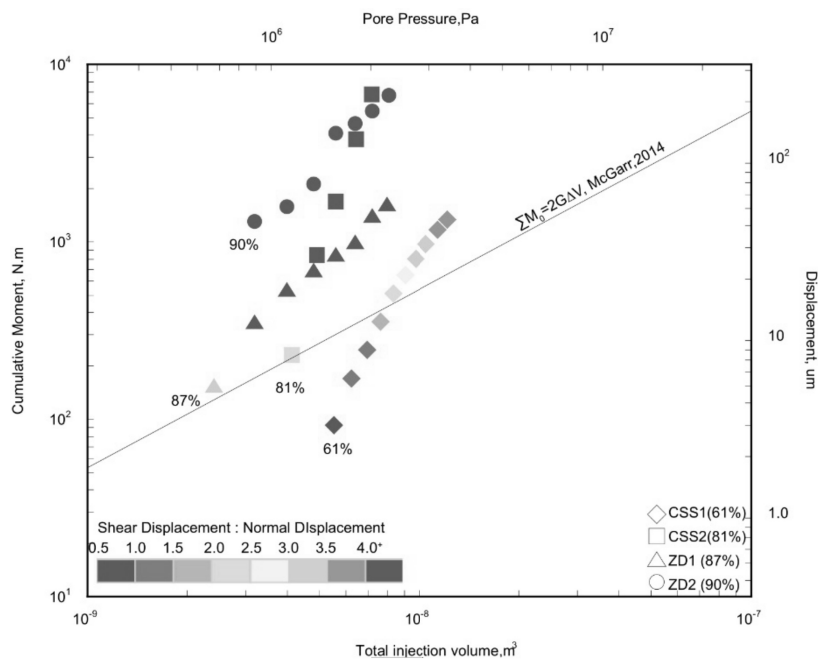


图 4 实验中所有流体增压步骤累计矩震级与总注入量的关系。颜色由暖色向冷色的变化表示滑动位移与断层扩张比例的增大

4) 加压约束与不受约束的断层破裂

McGarr 模型 (2014) 与本文中的模型具有相等的从超压体积中恢复的

弹性应变能。断层不会在流体增压体积以外的区域扩张，并且震级-体积成正比关系。基于更复杂物理性质的模型，断裂可在非均匀流体增压的区域扩张，剪切破裂再次在构造预应力区域传播，但在断层的边缘不遵守 II/III 型断裂韧性。这一特征遵循 $M \propto \Delta V^{3/2}$ ，研究者也将该模型预测的最大震级表示出来（图 3），以与本文的模型进行比较。

这两种模型本质上是不同的，但是两者在当今观测到的 $2 < M < 6$ 的地震中，与观测结果均较为一致。这两种模型分别适用于约束破裂（contained rupture）与非约束破裂（uncontained rupture）。约束模型是指均匀的流体增压、均匀的预应力、破裂空间一致的剪切滑移，且没有内聚性或 II 型断裂韧性。非约束模型代表了平面破裂在均匀的预应力范围内，从非均匀流体压力的中心高度局部化的区域传播，以抵抗裂缝边缘的摩擦阻力和 II 型断裂韧性。

综上，实验结果表明，断层初始应力是连接最大地震震级与注入体积的关键因素。因此，确定产生破裂的先存应力是决定地震最大震级的关键。

来源：Li Z, Elsworth D, Wang C. et al. Constraining Maximum Event Magnitude During Injection-triggered Seismicity. Nature Communications, 2021, 1528.

主送：中国地震局领导

编发：中国地震局地震预测研究所