

# 地震科技前沿快报

2021年第3期（月刊总第27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

**特稿** 智能手机内置振动传感器在地震预警中的应用前景调研

- 1、大地震之前的前兆应力变化：一种新的地震物理机制
- 2、以交通信号协议管理水力压裂诱发地震的风险告知建议
- 3、新的断层模型帮助理解地震群的形成机制

## 智能手机内置振动传感器在地震预警中的应用前景调研

马 强 王辅臣

中国地震局工程力学研究所

地震预警系统为高时效、高实时的技术系统，其减灾效果的发挥很大程度上取决于监测台网的密度，根据地震波传播时空规律，台站越密集，同一时间段内获取地震动信息的台站触发越多，获取波形也更多，其时效性和可靠性也相对越高。目前地震预警系统的监测子系统主要使用传统强震动台网的强震仪和测震台网地震仪，建设和维护成本较高。此外，地震预警主要监测破坏性地震的近场强震动，如仅对地震预警而言，利用低成

本 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System, 微机电系统)传感器建设的非传统传感器网络亦可实现, 例如 QCN (Quake Catcher network, 震动捕捉网络)、CSN (Community Seismic network, 社区地震网络)、我国台湾地区的 P-alert 网络等, 及我国的地震烈度仪组网。MEMS 加速度传感器相较传统的地震仪、强震仪的优势是体积小、功耗低、成本低, 但也存在动态范围小、灵敏度低、背景噪声高、精度低和低频观测难以实现等劣势, 如达到和传统强震仪和地震仪相近的观测质量, 其成本相差无几, 且大量部署仍会面临与传统地震观测相同建设和维护问题。

随着 MEMS 加速度计的快速发展, 大量的智能手机、穿戴设备和笔记本电脑等内置了低质量 MEMS 加速度传感器或陀螺仪传感器, 用于游戏控制、VR 虚拟现实、惯性导航、大震动检测和计步等用途。研究者开始尝试将发展最快的智能手机内置低质量 MEMS 加速度传感器或陀螺仪传感器作为地震预警的震动观测传感器。如今, 大多数智能手机都配备三分向 MEMS 加速度计, 通过技术手段处理, 可在一定程度上检测到中震或大震事件。2020 年我国仅 4G 用户总数就有 12.89 亿户, 因此利用智能手机作为传感器的地震预警系统具有研究价值和应用潜力。

针对相关问题, 通过相关文献和网页调研, 对智能手机内置振动传感器在地震预警中的应用相关的 MEMS 传感器、待解决的技术与社会问题、国内外研究现状, 分析优势与不足进行分析如下。

## 一、智能手机内置 MEMS 加速度计

随着 MEMS 技术的快速发展, 为更好地感知环境参量等信息, 智能手机所搭载的传感器种类越来越多, 性能越来越高, 且数据接入更为便捷。手机端搭载的 MEMS 传感器主要有三分向加速度计、磁力计、陀螺仪和压

力传感器等。这些传感器是自导式组件，随时随地工作，具有低成本、小尺寸、重量轻、低功耗、高性能等优势。为了验证手机 MEMS 加速度计具有收集可靠信号的能力，D'Alessandro 等人以 LIS331DLH（内置于 iPhone 手机，见图 1）MEMS 加速度计为研究对象，以凯尼公司 ES-T 型三分向力平衡式加速度计（常用强震仪设备）作为参考传感器，进行了振动台测试。测试结果表明，LIS331DLH MEMS 加速度计在地震工程的典型频率和振幅范围内(0.2-20Hz,10-2000mg,其中  $g$  为标准重力加速度,  $1mg \approx 1cm/s^2$ ) 具有与标准 FBA 类似的频率和相位响应，但是测量背景噪较大，灵敏度低，其频带中低频部分与 ES-T 相差甚远，只能有效记录震中附近的中强地震 ( $M_L > 5$ ) 。

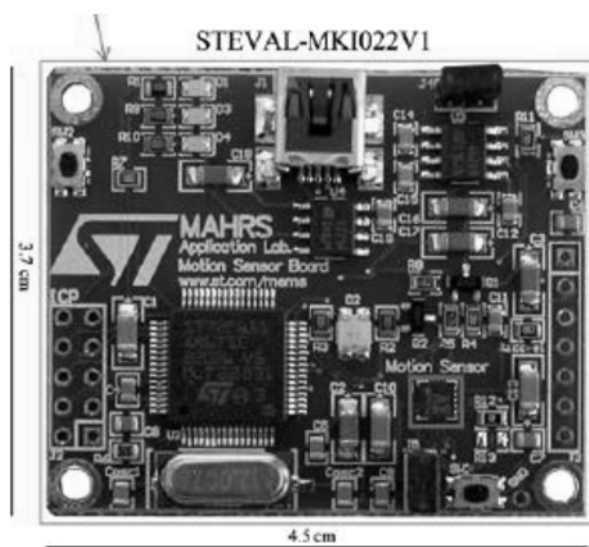


图 1 STEVAL-MKI022V1 套件，其上搭载了 LIS331DLH 运动传感器(红色方框)

## 二、用于地震预警待解决的关键问题

由于智能手机的用途特点和内置传感器的性能特点，其地震预警应用涉及技术问题和用户隐私问题。

### 2.1 如何区分人类活动与地震信号

人类的行为模式十分复杂，个体之间的差异也非常大，地震信号往往淹没于背景噪声中，即使对于充电等处于放置状态的手机，如何从高噪声水平中提取出地震信号，是首要需要解决的基础技术问题。

手机并非固定装置，其内置的 MEMS 加速度计并非为地震观测量身定制。在实际地震来临时，其记录中包含地震动信号、建筑结构的振动、人体的活动、环境噪声、电子设备本身的设备噪声等，也包含大量掉落、碰撞、晃动等脉冲信号。而且不同手机之间所处的情况也不相同，因此从手机记录的波形数据中可靠的提取地震动信号，并确定地震预警中的各项参数是巨大挑战。

## 2.2 涉及隐私问题？

除了技术问题外，手机隐私是一重要的社会问题。以往业界认为传感器数据和个人隐私信息无关，手机 APP 可以“无门槛”调用加速度计读数或是获取相应权限。据科技日报，在国际四大信息安全会议之一的“网络与分布式系统安全会议（NDSS2020）”上，一项来自浙江大学、加拿大麦吉尔大学、多伦多大学学者团队的研究成果显示：部分智能手机 APP 可在用户不知情且无需系统授权的情况下，利用手机内置的加速度传感器来采集手机扬声器所发出声音的震动信号，实现对用户语音的窃听。攻击者可以识别出智能手机播放过的不同用户语音中包含的所有数字、字母和敏感词信息，准确率均接近 90%，即使环境嘈杂，也可以达到 80%。隐私问题也是智能手机内置振动传感器在地震预警中广泛应用的制约之一。

## 三、地震预警系统应用

目前仅有两款应用程序使用智能手机加速度计检测地震动，分别是 MyShake（我的震动）和 The Earthquake Network（地震网）。

### 3.1 MyShake

MyShake 是目前发展较快的手机地震预警系统，由美国伯克利地震实验室(Berkeley Seismology Lab)与德国电信硅谷创新中心(Deutsche Telecom Silicon Valley Innovation Center)共同研发。目前已有超过 32 万的下载量，用户遍布 80 多个国家。图 2 是 MyShake 系统的组成示意图。

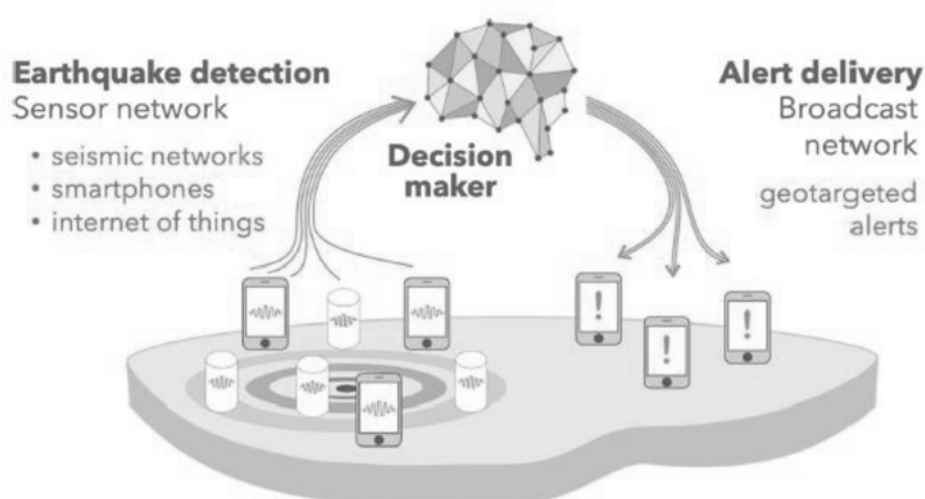


图 2 MyShake 系统的组件

左侧：地震探测器(传感器网路)，包括地震台网，智能手机和物联网；

中上：决策处理器；

右侧：警报发送器(广播网络)，发布基于位置的警报。

MyShake 的工作流程如下：

(1) 首先，智能手机必须保持 30 分钟以上的静止状态，才可作为数据源。

(2) 然后，检测器使用长短时平均 (STA/LTA) 等常用地震预警中地震事件触发判别方法检测加速度。触发后提取特征并用人工神经网络

(ANN, Artificial Neural Network) 的输入, 判别为地震信号后, 智能手机将会把一条包含时间、位置和震动幅值的触发信息发送至 MyShake 的云端决策中心。

(3) 最后, MyShake 根据大量汇总来的多触发信息, 使用改进的“基于密度的带噪声应用的空间聚类”算法识别地震, 进而估算位置和震级。现有的 MyShake 网络可以被 250 公里内 5 级的地震触发。MyShake 已经记录到了 980 多次地震, 其中效果最好的是 2016 年 6 月 10 日的 Borrego Springs 地震 (M 5.2), 技术处理后的波形数据见图 3。

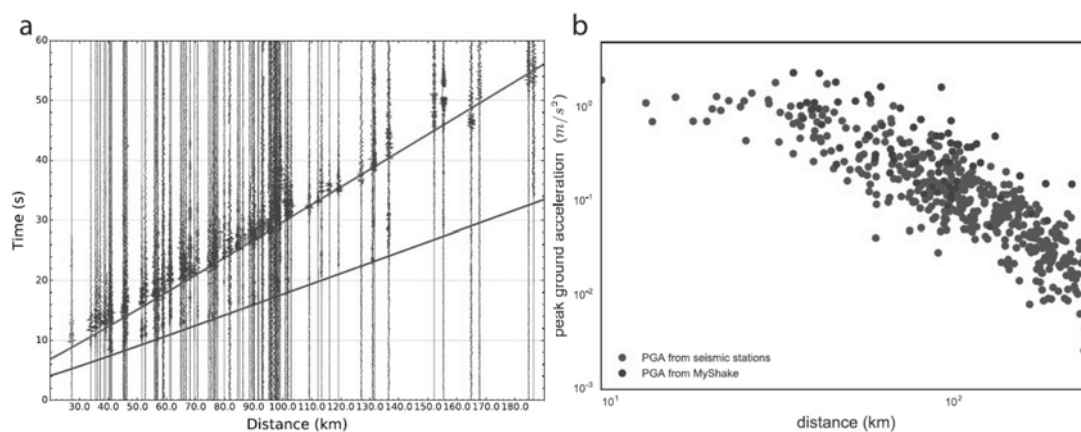


图 3 (a) 200km 内手机的波形记录图。每条蓝色记录道都是来自 MyShake 用户的一道水平分量数据, 而绿色和红色曲线分别是 P 波和 S 波走时曲线。每道记录的振幅都进行了归一化。  
(b) 地震动峰值加速度(PGA)值观测结果随震中距的变化, 包括来自 MyShake 的 PGA 值 (蓝色) 和来自传统地震台站的 PGA 值 (红色) 地震台站数据来自美国南加利福尼亚地震数据中心。

MyShake 研究团队开发了一个仿真模拟平台用于验证系统的可靠性。通过使用 2018 年 1 月 4 日的 Berkeley 地震 (M 4.4) 和 2016 年 6 月 10 日的 Borrego Springs 地震 (M 5.2) 中 MyShake 用户记录到的数据, MyShake 系统的模拟结果表明其网络检测算法可以迅速且相对准确的定位, 可在峰值地震动来临之前向主要地区提供若干秒钟的预警时间 (见图 4)。但截至目前, MyShake 网络没有对公众发布过预警信息。因此目前难以评估

MyShake 系统在真实地震下的预警效果。

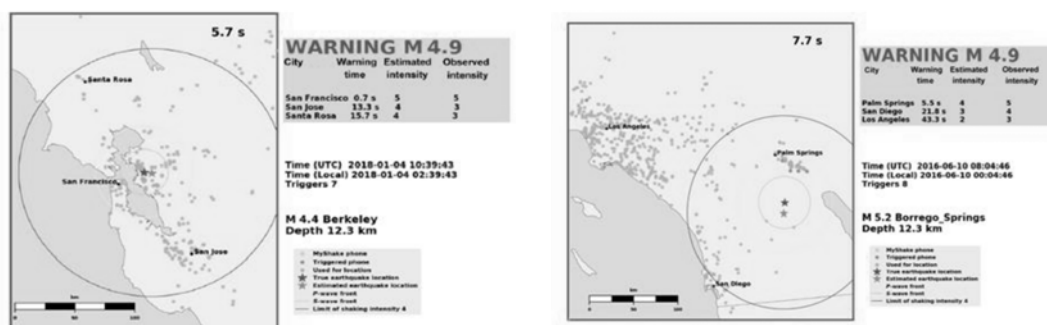


图 4 MyShake 地震预警系统在两次地震下的测试结果

### 3.2 The Earthquake Network

The Earthquake Network APP 同样使用智能手机加速度计来监测手机的突然移动，并将这些触发时间和位置发送到中心服务器，然后中心服务器根据聚类算法尝试检测与定位地震。但是 The Earthquake Network APP 不能区分出信号是地震信号还是非地震信号。

## 四、总结

智能手机内置振动传感器数据在地震预警中的应用借助了大量存在的 MEMS 等新型传感器，应用了大数据、人工智能、物联网和云计算等新一代信息技术。在监测网络、数据处理、信息传播等方面体现出了其先进性和新颖性，在公众科普传播和缺少传统密集地震监测台网地区体现出了其灵活性一面。

现有系统和相关研究应用也表明，现有技术和系统在实际地震中的性能尚不清楚，系统处于概念阶段、原型阶段和长期愿景阶段，当前的结果均是利用事后记录进行仿真模拟验证，仿真模拟无法替代实际地震下的复杂情况，相关的研究还需进一步深入，基于智能手机震动信号的地震预警还有很长的路要走。

综上所述，(1) 在应用层面上，目前凭借着智能手机社会保有量巨大等因素，利用智能手机作为传感器的地震预警系统有着巨大的发展潜力。手机地震预警系统本质上采取的是以数量换质量的做法。即虽然手机 MEMS 加速度计在记录地震动方面不如传统的高精度地震仪，但通过设置严苛的触发条件，可以从大量用户中过滤出适用于地震预警的信息，海量低质量手机震动数据，有望作为传统地震监测台网用于地震预警的一种有效补充，也有望成为地震多发且地震监测网络台网建设落后的国家和地区的可能选择之一。(2) 在技术层面上，当前，高噪声弱信号的地震动提取，地震事件的识别和判断，震级、定位、地震动（烈度）场预测方法，并没有很好地被解决。(3) 在发展前景层面上，随着 MEMS 加速度传感器技术的快速发展，及大数据、人工智能等新一代信息技术的颠覆性发展，技术瓶颈在今后有解决的可能，个人隐私通过“脱敏”处理等方式和法律法规的完善而逐渐得以解决，目前处于概念、原型和愿景的技术系统可望逐步成熟，进而作为基于地震监测台网地震预警系统的有效补充。

中国地震局科学与国际合作司推荐



## 大地震之前的前兆应力变化：一种新的地震物理机制

研究人员首先综述了过去三四十年来人们对大地构造应力认识的进步，包括大致四类研究：①世界应力图项目（WSM）；②断层滑移数据与古应力分析；③库伦应力转移；④广义连续介质理论，尤其是 Cosserat 介质理论。基于这些研究，研究人员提出了一种新的方法，用于计算大地构造应变速率、构造应力以及从震源机制来标准化大地构造剪切应力场。研究表明，该场会随时间发生变化，并非一个常数。研究通过分析震级与标准化构造应力的关系，发现之前未知的一种物理方程，研究人员称之为最大震级定律。随后，研究人员进一步讨论了这种规律的起因、物理背景与它对地震研究的重要性。相关研究成果于 2020 年 12 月发表在 *Journal of Structure geology*。

地壳中的应力被认为是几个过程相互作用的结果，包括重力、构造应力（tectonic stress），结构应力（structural stress）、残余应力。构造应力会引起断裂、破裂以及地震，结构应力源于地壳的不均一性，残余应力是由于岩石变形而锁定在岩石中的应力。最近几十年对于构造应力和结构应力的认识由于大量的研究而显著提高，基于本研究的目的，将这些研究分为以下几类：

**世界应力图项目：**该项目由 Zoback（1980）发起，对全球现存的构造应力信息进行编译。应力指标被分为四类：①震源机制；②井筒破坏以及钻井产生的破裂；③原位应力测量；④来自断层滑移分析和火山口的地质数据。这些研究表明，区域构造应力在一定程度上是均一的，并且明显与全球板块构造有关，因为构造应力产生的最大水平挤压方向在很大的区域内都是平行的。

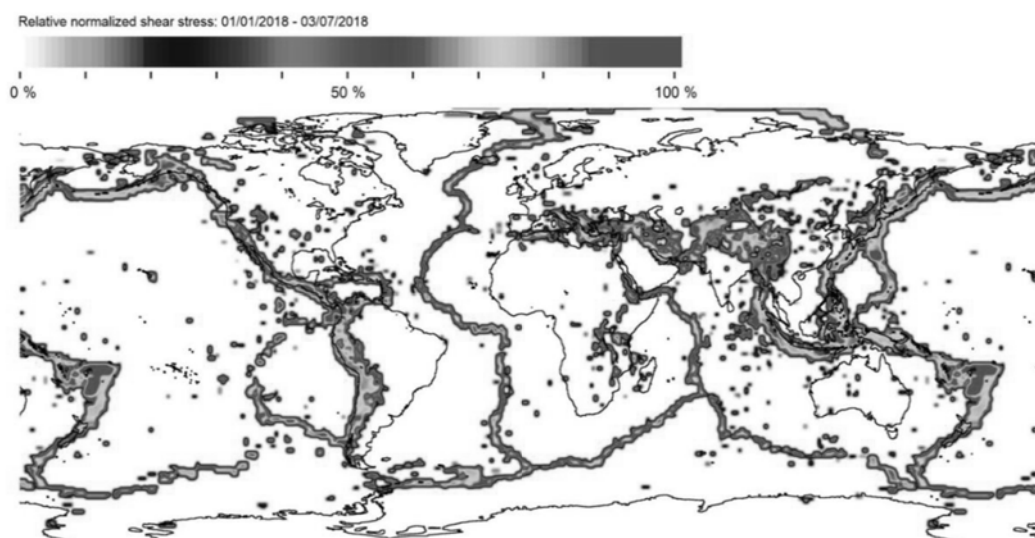


图 1 相对标准化的剪切应力分布图

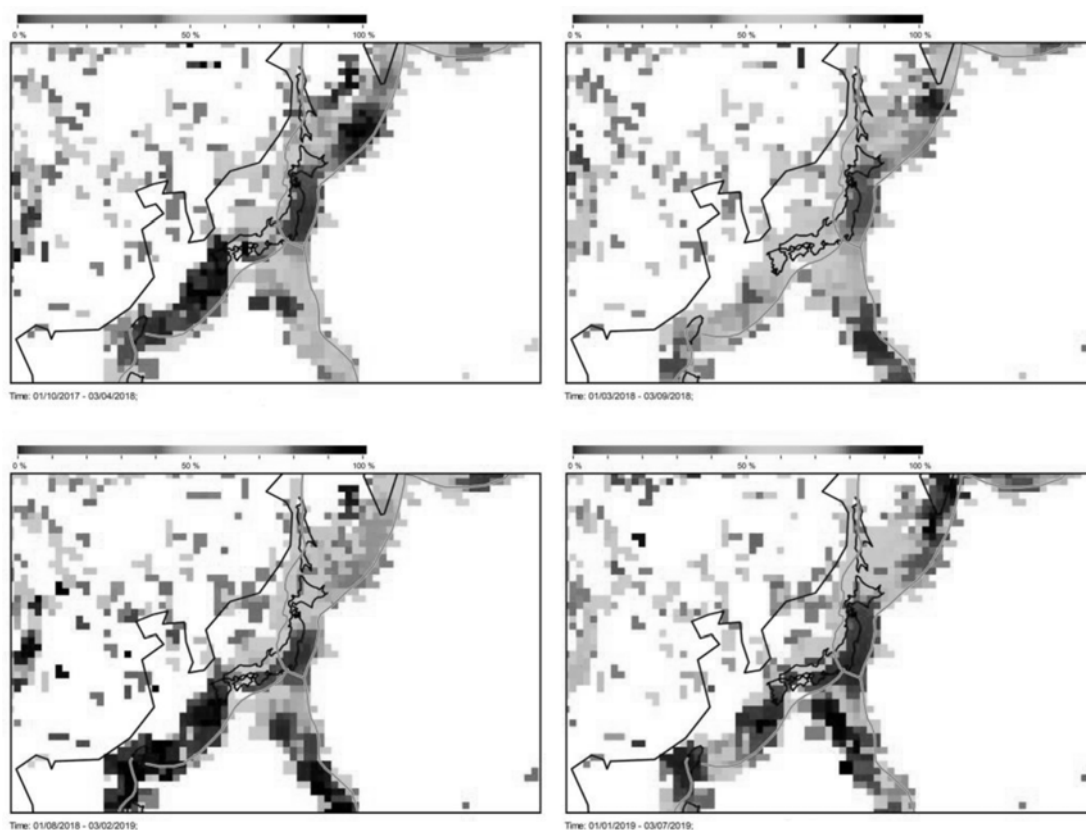


图 2 日本的标准化剪切应力场在不同时间段的变化

**断层滑移分析及古应力重建：**主要来源于对断层面的直接观察与测量。这些研究的核心是 **Wallace-Bott** 假设，其假设断层滑动方向与剪切应力方向是平行的。大量的研究证实了所谓的均一应力假设以及 **Wallace-Bott** 假设，这使得古应力重建得以开展。很多研究表明，古应力在大陆尺度上也是大致均一的，同时，这种构造应力的均一性在很多尺度都是成立的。这种尺度无关的应力-断层滑移关系是构造断裂一个重要的特征，小的构造断裂与大的构造断裂一样也包含着关于局部和区域构造应力的信息。在小尺度上，结构应力的出现仅仅影响断层滑移数据的自然分布。

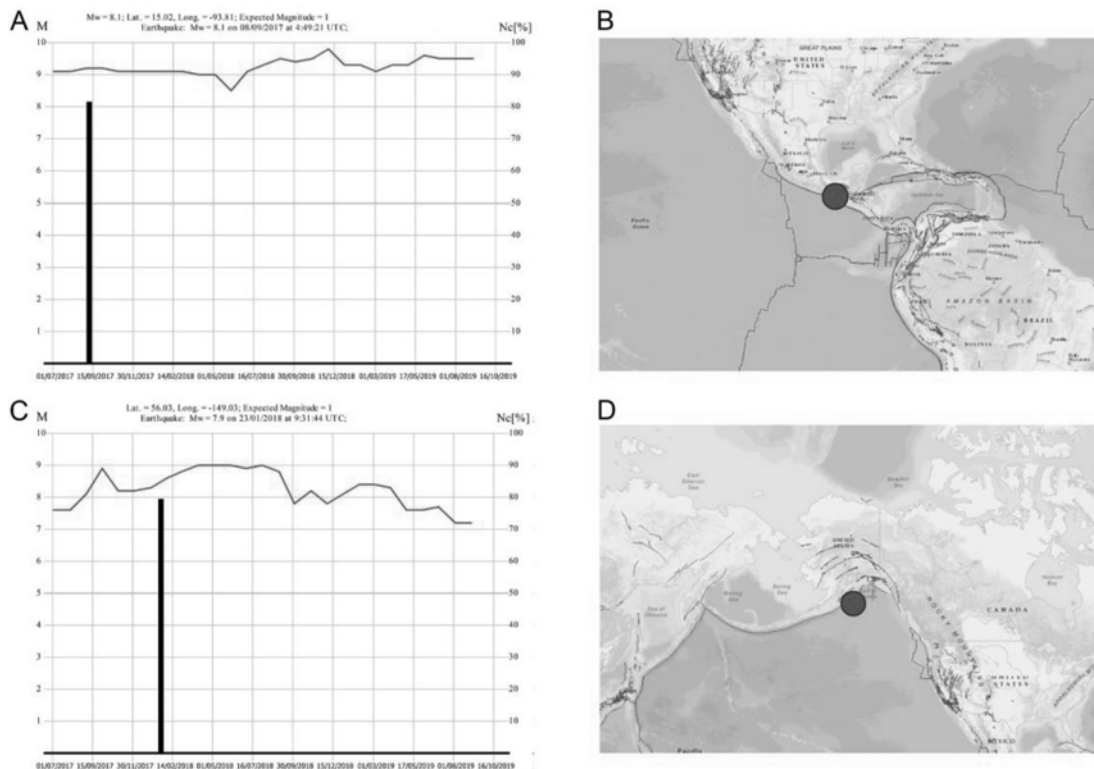


图3 墨西哥与阿拉斯加地震震源 500 km 范围内平均标准化剪切应力场的振荡

**库伦应力转移或者库伦应力改变：**由于沿着构造断裂的局部滑移所引起的结构应力。大量的研究表明，与库伦应力改变相关的结构应力是高度不均一的，并且会在活动构造断裂周围产生很高的应力或者应变梯度。

**广义连续介质理论：** 在地震学、构造地质学以及地球物理中描述岩石变形的框架是柯西（Cauchy）连续介质理论。在这一理论中，应力张量是对称的，耦合应力则不存在。高级或者高阶的连续介质包括位移场的更多衍生物，以及更多的自由度。典型的一个例子是 Cosserat 连续介质，它包含局部的独立旋转。

在该研究中，研究人员提出了一种新的计算全球构造应力的数值方法，可基于震源机制反映它们随时间的变化，同时，探索了构造应力以及地震震级之间的关系，形成了新的计算方法，可反映一个区域可能发生的最大地震与标准化剪切应力之间的关系。

**应力与应变测量：** 地壳中与断层相关变形的应力和应变在本构关系中主要源于：①断层围限块体的弹性性质；②断层面上的摩擦滑移；③岩石的塑性变形及脆性破裂。在 Cosserat 连续介质中，基本的应力应变测量包括 Cosserat 应变张量  $\epsilon_p$ ，扭力弯曲张量  $k_p$ ，应力张量  $\sigma$ ，耦合应力张量  $\mu$ 。根据 J2 塑性理论：

$$\sigma = p_r + 2\mu_a \dot{\epsilon}_p^{(S)}$$

**地震学中地震矩张量总和：** 在一个区域由于断层和地震引起的增量应变可以用地震矩张量总和表示：

$$\dot{u} = \dot{u}_{ij} = \frac{1}{2GTV} \sum_{k=1}^N M_S^{(k)} m_{ij}^{(k)}$$

但是，这一公式的缺点在于不能解释断层滑移数据的分析和古应力重建，并且违背了尺度无关的应力-断层滑移关系假设。断层或者地震对区域或者全球的应变速率场在断层面上最大，在远离断层面方向衰减。因此，可以被改进为：

$$\dot{u} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^N \frac{w_k m_k}{1 + (r_k/L_C)^n}$$

最终，对降低的应力张量进行标准化的方法为：

$$\sigma^{(r)} = \dot{u}_{(nor.)}^{(S)} = \frac{\dot{u}^{(S)}}{\|\dot{u}_{(S)}^{(6)}\|}$$

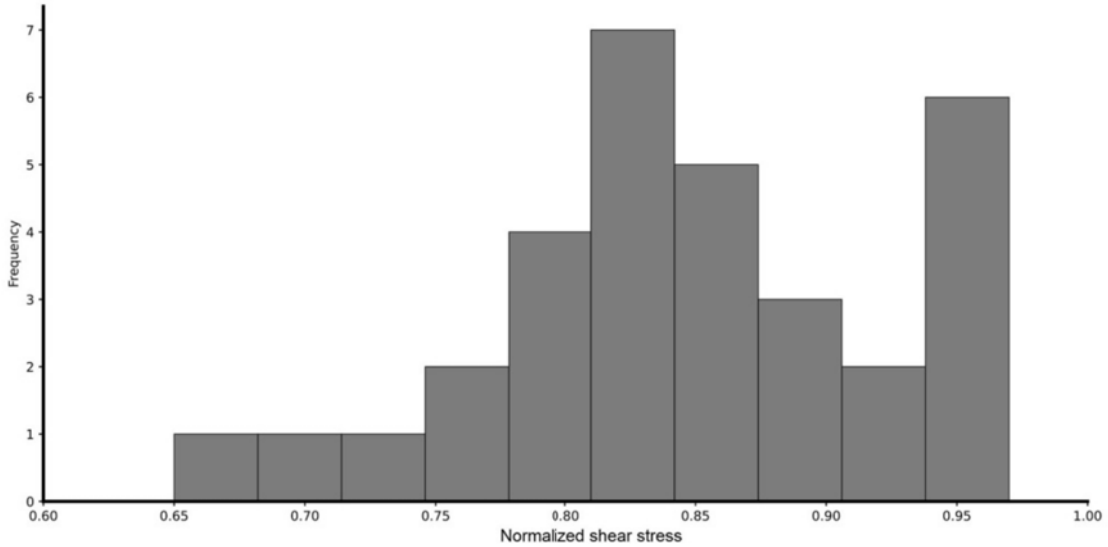


图 4 8 级以上地震发生前的标准化剪切应力值的分布

随后，研究人员进行了测试，主要方法和结果如下：

标准化剪切应力：

$$\tau_{(nor.)} = \left\| \sigma^{(r)} \rightarrow_n - (\sigma^{(r)} \rightarrow_n \cdot \rightarrow_n) \rightarrow_n \right\|$$

相对标准化剪切应力：

$$\tau_{(nor.)}^{(rel.)} = \frac{\tau_{(nor.)}}{\max(\tau_{(nor.)})}$$

在全球尺度  $\max(\tau_{(nor.)}) = 1$ ，但在区域尺度  $\max(\tau_{(nor.)}) \leq 1$

特定点  $\rightarrow_r$  的标准化剪切应力：

$$\tau_{nor.}(\rightarrow_r) = \max\{\tau_{(nor.)}^{(k)}; r_k L_s\}$$

随时间变化的构造应力场和应变场：研究结果表明，标准化剪切应力

场随时间变化显著。在某些时刻，一些区域的标准化剪切应力会达到很高的值，之后该值明显地下降。

**区域尺度上地震震级对剪切应力的依赖性：**通过比较同一区域标准化剪切应力场与地震震级发现，最大的地震都发生在最高标准化剪切应力的区域，并且符合以下规律：

$$M_{max} = M_0 + K \log(\tau_{(nor.)})$$

**大地震之前剪切应力场的振荡：**标准化剪切应力在地震发生时都达到很大的值，大于 0.85。此时，能观察到两种情况：

(1) 标准化剪切应力在地震之前已经很高了。

(2) 在地震之前，标准化剪切应力已开始增加了几个月。

对 1976 年之后历史上发生的大于 8 级的地震的分析同样表明，大震发生在标准化剪切应力很高的时候， $>0.8$ 。

研究人员将这种地震震级与标准剪切应力之间的关系称之为最大震级定律，最大的地震常常遵循这一规律。相对较弱的地震  $M \leq M_0^* + K \log(\tau_{(nor.)})$ 。

$$M_0 - M_0^* = \Delta M_0 < 1$$

主震震级  $M$  与前震或者余震震级之间的差：

$$M - m = \Delta M_0$$

这就是广为人知的巴斯定律 (Bath law)。最大震级定律的本质可以结合地震震级-能量关系解释：

$$\begin{aligned} \log(E) &= 4.8 + \frac{2}{3}M \\ \log(E) &= \frac{3}{2}(M_0 + 4.8) + \frac{3}{2}K \log(\tau_{(nor.)}) \end{aligned}$$

令  $K=4/3$ ，则：

$$E_{max} = k\tau_{(nor.)}^2$$

令  $k=10^{(3/2)(M_0+4.8)}$ ，则最大弹性剪切能量密度：

$$w_{max} = \frac{E_{max}}{V_c} \sim \frac{1}{2} G \tau_{(nor.)}^2$$

$$E_{max} = w_{max} V_c \sim V_c \frac{1}{2} G \tau_{(nor.)}^2$$

因此，最大震级定律可以被解释为地壳中具有 Cosserat 特征长度 ( $L_c$ ) 的圆形构造释放的弹性剪切应变能。

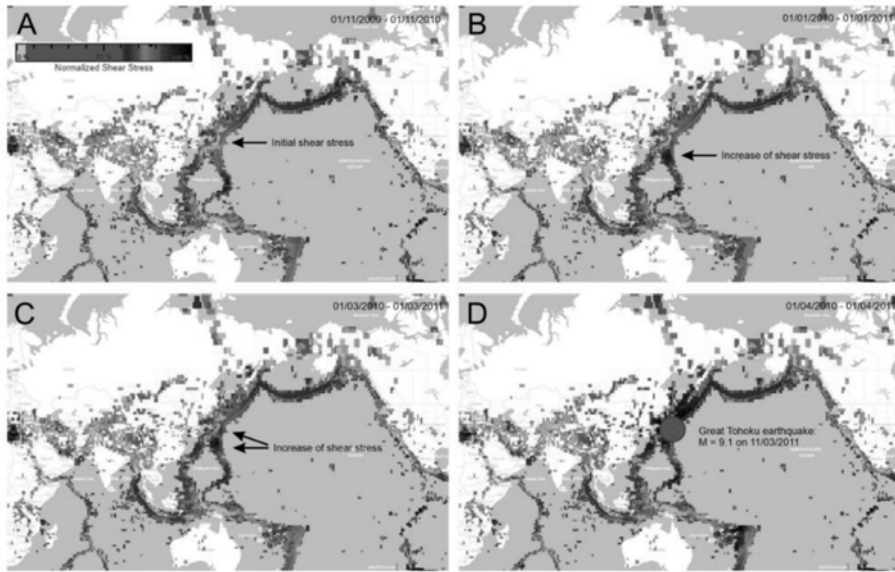


图 5 东日本大地震发生前标准化剪切应力的变化

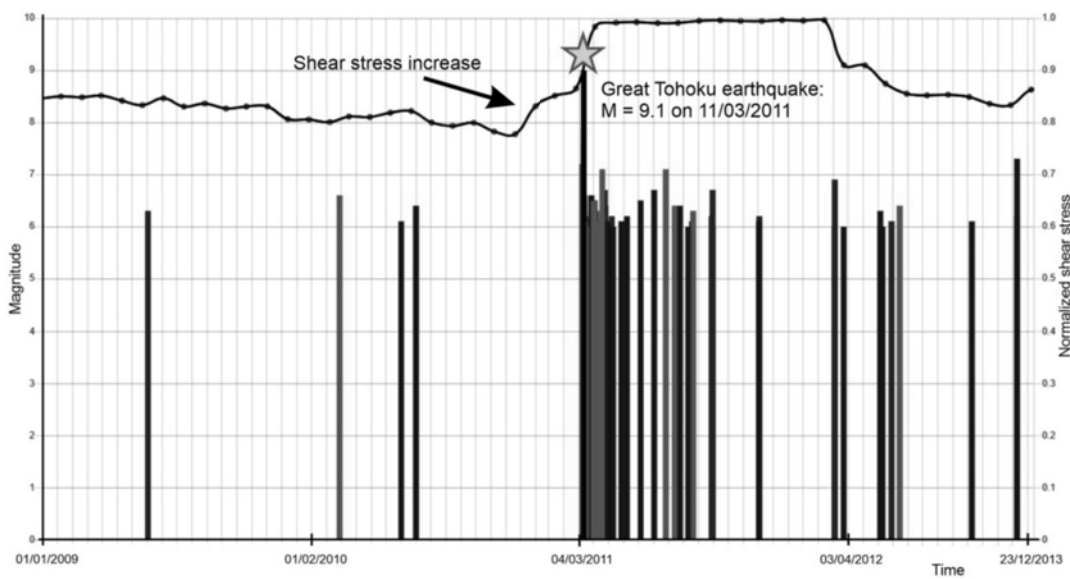


图 6 东日本大地震发生前平均标准化剪切应力的振荡

来源: Alohar J, Vii B, Potonik M, Sokli N. & Dolenec M. Precursory Stress Changes Before Large Earthquakes: On A New Physical Law for Earthquakes. *Journal of Structural Geology*, 2020, 141, 104208.



## 以交通信号协议管理水力压裂诱发地震的风险告知建议

水力压裂诱发地震的风险越来越受到关注，且需要有效的管理。美国斯坦福大学研究人员基于目前对诱发地震的理解，开发了一种风险告知策略来选择红色和黄色交通灯阈值，即利用概率上的最大震级、震级与地面运动的关系、人口密度、场地放大效应的统计分布，以及感觉性或破坏性地面运动阈值来计算破坏或扰动的风险。各种预测情景的风险曲线突出了两个建议。首先，在地面运动的扰动范围内设置红灯阈值，以降低失控地震造成不可接受的损害的可能性。其次，将黄灯阈值设置为比红灯低大约两个数量级，以确保运营商有足够的机会制定减解策略。通过比较几个现实生活中交通灯案例的风险差异，研究者说明了这种方法如何允许监管机构以风险知情的方式设计交通灯协议，从而更有效地平衡决策后果。此外，这种方法还促进了风险向所有相关利益方的透明传达。相关研究成果发表在 2020 年 10 月的 *Bulletin of Seismological Society America* 上。

近年来，与石油开发相关的诱发地震活动已成为一个备受关注的问题。目前，多个地区已经认识到水力压裂可以诱发地震。其中一些情况已经诱发了大到足以被感觉到的地震，并改变了地震灾害的背景，甚至造成生命损失和重大经济损失。随之而来的是管理诱发地震风险的需求。交通信号协议（TLPs）是目前管理诱发地震风险的实际选择，对该协议而言，诱发地震和人为操作（如水力压裂或增强型地热系统）之间有明确和直接的联系。在大多数 TLP 框架内，操作者被允许在绿灯期间继续操作，在黄灯期间必须开始减缓策略，在红灯后必须无限期暂停操作。

从监管角度来看，有效的 TLPs 既要简单，又要稳健，这样才能在有限的时间和信息下有效地做出降低风险的决策。沿着这一路线，基于科学

研究的启发式关系（所有 5 km 以内的地震）被用作快速评估是否是诱发地震的标准，这具有一定的准确性。从科学的角度来看，基于地面运动的阈值是有利的，因为它们更清楚地描述了危险，并且更直接地与后果相联系。然而，在实践中，实施基于地面运动的 TLP 所需的许多信息可能会丢失。地面运动方法需要校准良好的地面运动预测方程（GMPEs）、标度关系、场地放大和大量地震目录的验证。然而，水力压裂诱发的地震通常发生在沉积盆地，在那里地震可能很少，地震仪的覆盖范围通常很小。

研究人员概述了一项定义 TLPs 的分析，该分析平衡了当前监管需求、减轻公众焦虑、实用性和科学准确性之间的冲突。利用目前对水力压裂诱发地震及其触发和机制的理解，对这类诱发事件进行 TLP 分析。分析方法保留了基于震级的 TLPs 的简单性，同时，仍然为地震管理提供了一种风险告知的方法。为了实现这一点，研究人员使用地面运动预测方程（GMPE）和标度关系将局部震级（ML）转化为峰值地面速度（PGV），并简要讨论针对破坏和扰动的适当 PGV 阈值，以及在简单情况下如何围绕这些阈值设计 TLPs。之后，用蒙特卡洛（Monte Carlo）方法对此进行了推广，根据人口密度估算震中距离，将输入变量作为统计分布处理。具体来说，在红灯干预后，预测失控的地震场景，以估计会造成破坏或扰动的比例。这样，破坏或扰动的风险可以类比为 TLP 红光阈值、人口密度、地层深度和场地扩大的函数。最后，讨论如何使用这些结果来构建风险通知，并比较了几种现实生活中 TLPs 的风险容忍度情况。

研究结果显示了不同红灯阈值对不同人口密度下的破坏或扰动风险的影响。因为衡量剩余风险曲线变异性（P99 至 P1，百分比）的置信区间相对较小，所以这两个因素控制了风险。随着人口变得越来越密集（即 Re

变小), 风险曲线开始合并。这既与震中距离 ( $R_e$ ) 相对震源深度 ( $d$ ) 变小有关, 也与近距离 GMPE 饱和度有关。在这个区域内, 站点放大效应的变化等开始发挥越来越重要的作用。为做出解释, GMPE 需要对近距离、浅深度和较小震级的诱发事件进行更合适的校准。参数的偏差 (平均值的变化) 会强烈地影响风险曲线, 对这些因素的经验估计将可能是重要的。分析过程中, 研究者使红灯的阈值在  $ML \pm 0.1-0.2$  间变化。

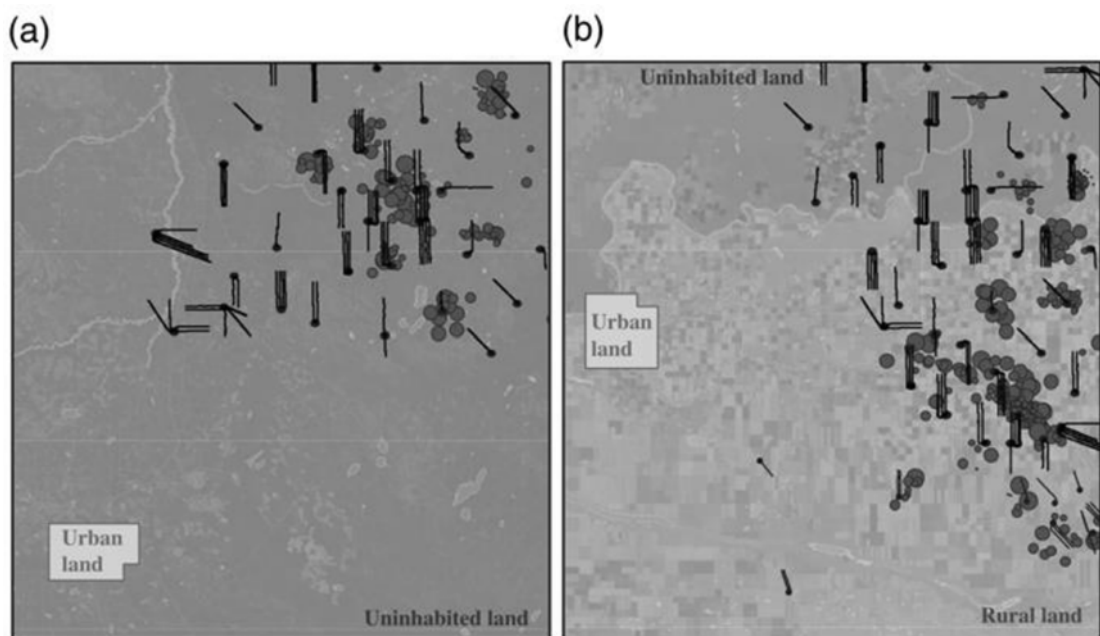


图 1 需要对水力压裂诱发地震进行管理的两种假定情况

TLP 设计方法的优点是, 通过在风险矩阵方法中量化概率轴, 可以在风险被告知的情況下做出决策。此外, 如果扰动抱怨或结构破坏的经济后果进行了预测, 那么风险曲线就可以转化为损失曲线。损失曲线将为私人土地所有者的财务成本 (相对于工业的美元成本) 提供更清晰的经济分析。事实上, 也可以采用经济损失指标或其他地震学技术来估计经济或人员损失情景。尽管如此, 必须制定一个由于扰动而对石油和天然气行业的社会经营许可造成经济损害的模式, 以将其纳入损失评估。

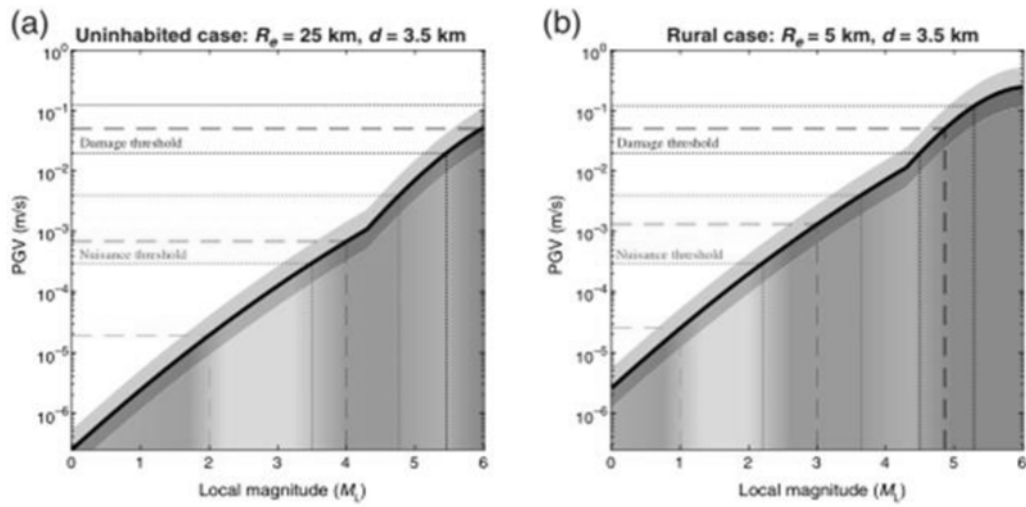


图2 PGV 与 ML 的比例关系

研究人员认为，黄灯的目的是为操作者提供空间，以便他们做出反应，并开始采取减缓策略，最终避免遇到红灯。有了这个想法，黄光需要一个足够的频带，这样在水力压裂的刺激下，失控事件不可能直接从绿色跳到红色。设置黄灯阈值  $ML_{2.0}$  低于红灯阈值，将允许 99% 的情况采取减缓策略，只有 1% 的情况会从绿色直接跳到红色。

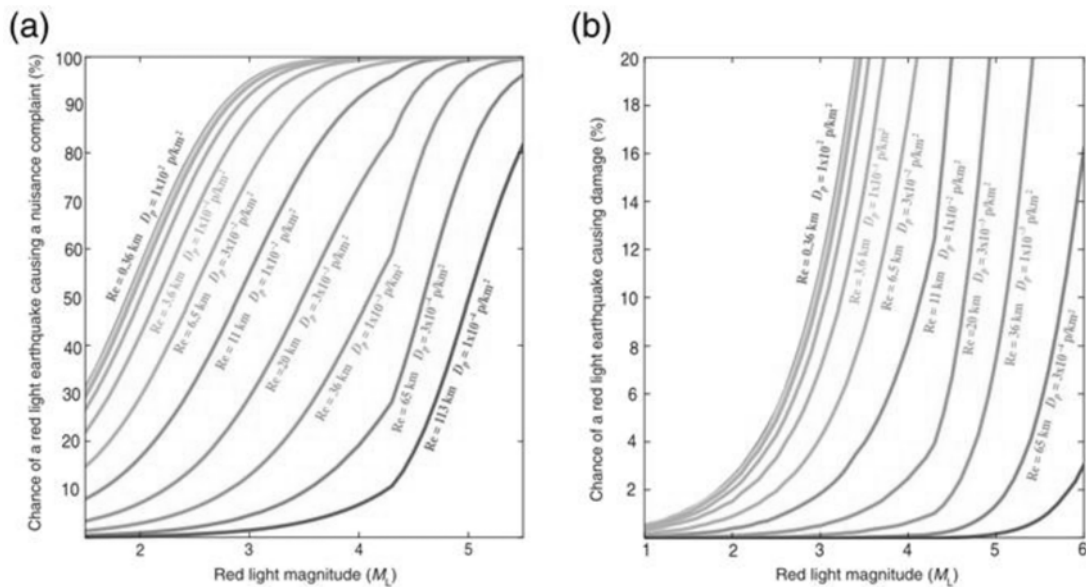


图3 各种 TLP 模拟场景下的风险曲线

红灯的目的是在破坏性地震的地面运动发生之前，提供监管干预。出于这一目的，红灯阈值应设置在扰动范围内，以确保房主安静地使用他们的财产，并且，导致损害的失控事件很少发生（在罕见的情况下，仅导致非结构性破坏）。在无人居住的情况下（图 1a 和 2a），大约在 ML3.5 和 5.0 之间的红灯阈值是合适的。在偏远农村地区（图 1b 和 2b），大约在 ML2.5 和 3.5 之间的红灯阈值将是合适的。红灯阈值的二阶细化（在适当的范围内）可以用风险曲线来执行，以更好地量化扰动或损坏的风险（图 3）。以这种方式，监管者可以根据可接受的风险选择红灯阈值。因此，将红灯阈值设置在 30%~70%的扰动风险和 2%~15%的损坏风险范围内似乎是一个合适的折衷方案。

虽然研究人员的分析提供了一个以风险告知的方式定义 TLP 的框架，但需要进一步考虑拓展这一分析。此外，还忽略了操作者的减缓措施在降低风险方面的功效。这里规定的方法完全是从设计 TLP 的监管角度出发，没有操作或实时地震信息。一旦水力压裂开始，诱发事件的实时编目可为操作人员提供丰富的（通常是专有的）信息：平面断层结构的描绘、地震活动的突然变化、流体注入的地震响应、 $b$  值的变化、震级变化和相应的地面运动。这些信息可为确保地震保持在可接受阈值以下的单个压裂点的减缓策略提供帮助。

与此同时，该研究还忽略了构造对最大震级的限制。通常，在盆地中预先找到一份地震断层的完整清单是不切实际的，所以保守地假设它们在所有尺度上都存在。然而，在许多盆地中可能不会发生更大的地震，因为缺乏合适的大断层。如果发现情况确实如此，则可以很容易地采用本研究中的方法，以涵盖特别的（非自然的）震级分布。

来源：Schultz R, G Beroza, W Ellsworth, et al. Risk-Informed Recommendations for Managing Hydraulic Fracturing–Induced Seismicity via Traffic Light Protocols. *Bulletin of Seismological Society America*, 2020, 110, 2411–2422.

## 新的断层模型帮助理解地震群的形成机制

美科学家开发出新的断层模型，进而描绘出压力、摩擦力和流经断裂带的流体之间的相互作用，以及其如何导致慢地震和地震群的出现。

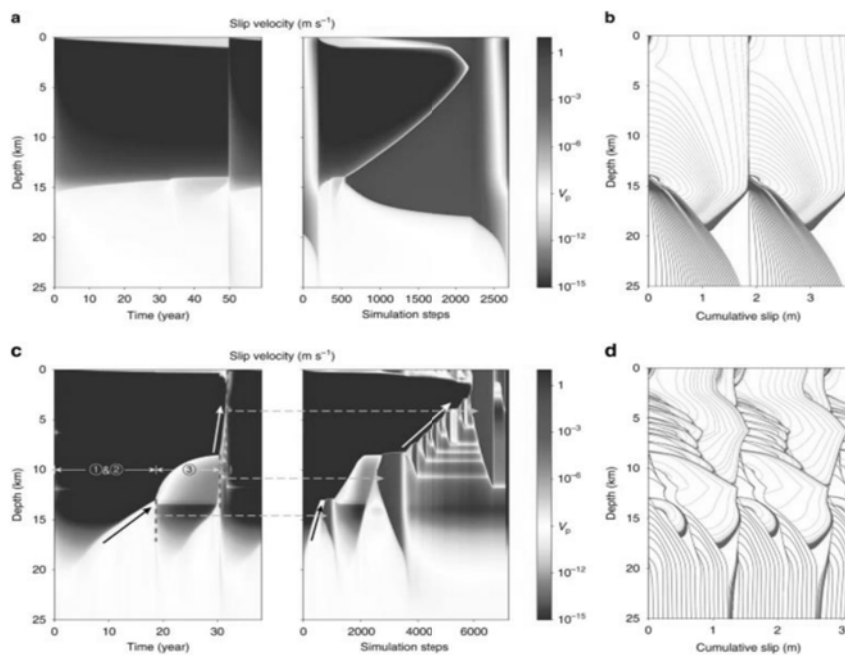


图 1 滑移速率和滑移行为的变化

人们通常认为，断层两侧的板块移动、变形、产生应力，然后，地震就发生了。但是，在地球的更深处，这些岩块可以稳定地彼此相对滑动，沿着地壳的裂缝以指甲生长的速度运动。实际上，断层的下部蠕动部分和上部之间存在一个边界，该边界有时可能闭锁几个世纪。几十年来，科学家们一直困惑于是什么控制着这个边界，它的运动情况以及它与大地震的发生有什么关系。其中，最主要的未知数是流体和压力如何沿断层运移，以及如何导致断层滑动。

美国斯坦福大学的研究人员开发出一种基于物理的新型断层模型，显示出流体如何随着时间的推移而逐渐弱化断层。在孕育大地震的几十年里，它们似乎将边界或锁定深度向上推进了一两英里。随着高压流体的脉冲越

来越靠近地表，它们将引发地震群——一系列地震发生在一个局部地区，通常持续一周左右。这些地震群的震动往往过于微小，以至于人们无法注意到。但并非总是如此，2020年8月，加州圣安德烈斯断层南端附近的一个震群，引发了一场4.6级的地震，这足以使周边城市的居民感到不安。

一个震群中的每一次地震都有自己的余震序列，而不是一次大的主震后又有许多次余震。震群通常包括这些事件沿断层在水平或垂直方向的迁移，新模型则描绘出了这种迁移的机制。过去20年中，许多先进的地震模拟都集中于摩擦在解锁断层中的作用。该研究使用一个简化的二维断层模型来解释断层带中流体和压力之间的相互作用（该断层垂直穿过整个地壳，类似于圣安德烈斯断层），结果发现，在决定断层强度方面，断层周围压力的涨落可能比摩擦力的作用更大。

研究人员利用模型对高压流体脉冲沿断层迁移、打开孔隙、导致断层滑动并引发某些现象的速度进行了定量预测，发现在某些情况下，锁定深度发生变化，而在其他情况下，则是难以察觉的缓慢的断层运动或小地震群。以此为基础，人们就可以根据断层沿线的实际地震活动检验这些预测，即小地震或慢地震最终在何时、何地发生。

但是，这项技术并不是地震预报工具。研究人员解释称，预报地震需要更全面地了解影响断层滑动的过程，以及有关特定断层的几何结构、应力、岩石成分和流体压力的信息。鉴于大部分活动发生在地下深处，要达到这种详细程度十分困难。但即便如此，该模型还是有助于理解一些过程，如流体压力的变化如何导致断层滑动，断层的滑动和滑移如何破坏岩石并使其更易渗透，以及这种增加的孔隙度如何使流体更容易流动，这将有助于认识流体注入诱发地震的风险。



来源： How earthquake swarms arise

<https://earth.stanford.edu/news/how-earthquake-swarms-arise#gs.h0zkw1>

Fault valving and pore pressure evolution in simulations of earthquake sequences and aseismic slip

<https://www.nature.com/articles/s41467-020-18598-z>

---

主送： 中国地震局领导

编发： 中国地震局地震预测研究所