

地震科技前沿快报

2019 年第 2 期 (月刊 总第 2 期)

中国地震局科学技术委员会
中国地震科学实验场

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

- 通过机器学习揭示快地震与慢地震的相似性
- 喜马拉雅地区断层摩擦和几何形态控制的双峰式地震活动
- 地震预警系统的准确性和最佳警报策略
- 慢滑重复模式变化：扰动响应以及大逆冲地震的可能前兆

通过机器学习揭示快地震与慢地震的相似性

快地震的物理机制通过粘滑摩擦以及弹性动力学破裂得到了很好地解释，但是人们对于慢地震的认识依然不足。主要的问题包括破裂如何准动态的扩展，它们是否与普通地震遵循不同的方程以及一个单独的地震是否可以包含多种不同的滑移模式。来自美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory) 和宾夕法尼亚州立大学 (Pennsylvania State University) 的研究者通过对石英断层泥物质的实验地震研究发现，快速和慢速滑移之前都伴随着与灾难性地震发生之前相似的大量微破裂事件以及弹性能的释放。通过机器学习，他们发现剪切试验过程中石英断层泥所产生的声音信号可以预测实验地震发生的时间及持续时间，甚至能够预测

地震的大小。

地震发生的机制以及断层蠕滑过程都已经得到了很好地研究，但是对于慢地震却认识不清。核心问题包括：①限制断层滑移速度和破裂扩展速度的机制；②同一断层部位地震和缓慢滑移事件的物理过程；③缓慢滑移如何引起动态破裂；④破裂速度是否可以量化。

研究表明，机器学习可以预测粘滑破裂发生的时间，以及剪切带所处的应力状态。作者通过机器学习来研究真实断层物质即石英断层泥在一系列不同的滑移速度实验下的声音信号特征来推断快速滑移与缓慢滑移是否具有相似的机制，实验地震所产生的地震波是否含有即将到来的地震持续时间与地震大小的信息，以及机器学习是否可以确定断层位移的历史。无论是对于快地震还是慢地震，研究者都通过地震周期做了断层强度与声音信号之间关联分析，这些数据具有判别断层内部状态的信息，可以被用来预测地震以及滑移模式。

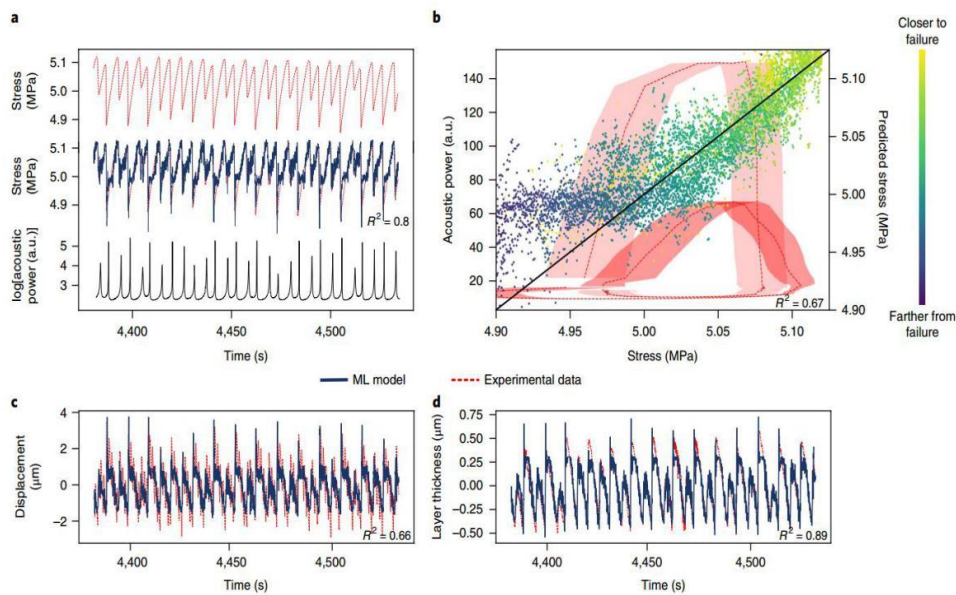


图1 a、c、d：机器学习预测断层应力状态、位移以及体应变；b：区分快地震与慢地震

声音信号预测断层活动。主要是通过输入短时间内的地震波数据，来输出这段时间内断层的应力状态，位移以及断层泥的厚度。模型的建立是

瞬时的，并不利用过去或者将来的地震波信号。一个时间窗口对应一个地震周期持续时间的 5%，这一窗口被分为两个并不重叠的窗口，但是两个窗口的数据都需要参与计算。研究者分析了两个具有几百次滑移事件的完整实验，其中一个包含快地震和慢地震，另一个仅含有慢地震。利用每一个实验的前一半数据来建立机器学习模型，然后预测接下来的数据。同时他们还利用整套数据来建立机器学习模型，当关键特征被提取之后，模型便得以简化。机器学习利用地震波信号确定的应力要比原始数据略显杂乱，在地震周期的早期阶段对应力有所夸大，但是与大小事件之间具有很好的对应关系，预测出现最大应力的时间与实际出现最大应力的时间一致。在声音功率与剪切应力的关系曲线中，快地震与慢地震具有明显不同的模式，声音功率在破裂事件的中途达到峰值，同时断层滑移速率也达到峰值，紧接着便是减速与地震的停止。在慢地震中，声音功率相对较小。连续的地震波也可以被用来确定断层滑移和体应变。这些结果表明，对断层带弹性应变能释放的连续观测可以精确的获得断层的当前状态。

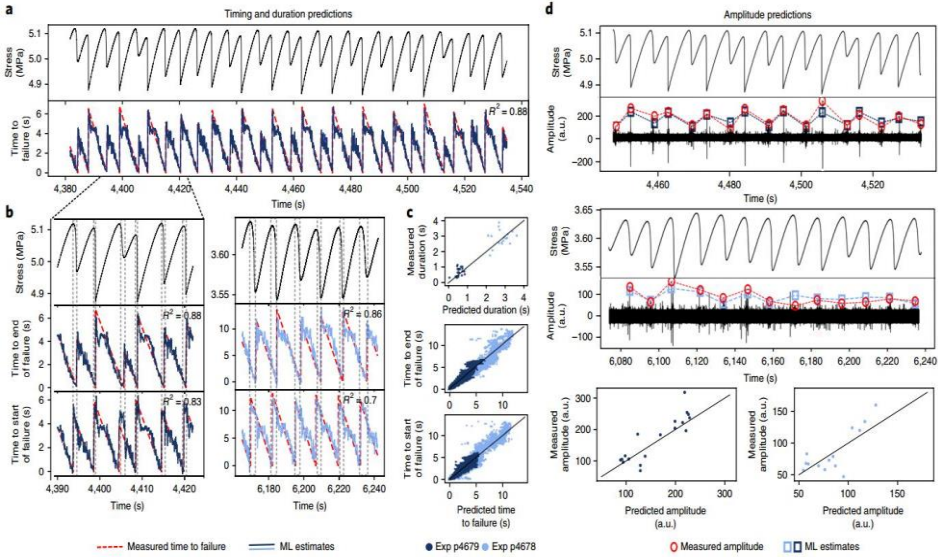


图 2 机器学习预测地震发生时间、持续时间以及大小

早期信号含有即将发生滑移的信息。机器学习证明，声音功率随着时

间的推移具有特殊的模式，这可以被用来精确地确定断层的应力状态以及应变历史。之后，研究者进一步研究了地震周期早期声音信号与即将到来的破裂事件之间的关系。通过对地震周期早期阶段 10% 的声音功率与即将到来的破裂事件持续时间进行分析后发现，他们之间具有相关性。早期阶段声音功率越强，滑移速率也就越快，更易于导致快地震的发生。这一相关关系在很大的范围内都成立，呈连续分布表明快地震与慢地震具有相似的物理过程。地震周期内的声音功率表现出记忆功能，快地震之后往往是低的声音功率。在地震周期早期阶段，高地震能量的释放表明断层是被锁定的，具有不稳定的结构，具有非常强的潜在破坏力。

预测地震的时间与大小。断层带中产生的地震波可以用来预测断层发生的时间、持续的时间以及断层的大小。研究表明，无论是对快地震还是慢地震，地震波都能很好的预测它们发生的时间以及持续的时间。通过机器学习预测地震的置信度高达 0.88，并且预测只需要很短时间内的地震波信号记录。对于地震发生时间的精确预测使得人们能够预测地震的大小。研究者利用所预测地震事件之间的间隔时间、预测的地震持续时间、声音功率以及之间滑移大小作为机器学习分析的特征值，通过建立不同的模型发现，事件间隔时间与预测的滑移持续时间是预测地震大小最重要的变量。

实验结果确实表明，通过地震波信号可以预测地震的发生时间，持续时间以及大小，并可以区分快地震与慢地震，还证明它们具有相同的机制。对 Cascadia 断层的观测发现，在自然界确实存在震颤。但是，将这一结果运用在实际地震预测中还需要处理很多的噪声数据，声音信号可能来自多个断层的叠加，进一步的工作需要检验灾难性的地震发生之前是否具有与实验相似的信号。

来源：Hulbert C, Rouet-Leduc B, Johnson P A, et al. Similarity of fast and slow earthquakes illuminated by machine learning. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 69.

喜马拉雅地区断层摩擦和几何形态控制的双峰式地震活动

越来越多的证据表明，喜马拉雅地区的地震活动是双峰式的，局部地震（达到里氏 7.8 级）趋向于发生在地震带的下部，然而少数超大地震（大于 8 级）可以扩展到喜马拉雅前缘逆冲断层，贯穿整个断裂带。为了解释双峰式地震的成因，研究者建立了一个二维的尼泊尔-喜马拉雅地震周期模式，这种韧-弹-塑性的模型再现了地震周期的重要特征，包括震间应变以及双峰式的地震活动。研究发现，双峰式的地震活动主要是因为主喜马拉雅逆冲断层相对较高的摩擦阻力以及非平面状的几何形态。这一模型包含一个高强度区域，只有局部地震产生足够大的应力并向上传播时，这一区域才会活动。这一结论支持喜马拉雅地区大多数的地区可能产生完全破裂，并伴随超过像 2015 年廓尔喀那样超过 7.8 级的地震，所以需要评估未来可能的地震破坏。相关研究成果与 2019 年 1 月发表在 *Nature Communications* 上。

2015 年 4 月 25 日 7.8 级的廓尔喀地震袭击了尼泊尔-喜马拉雅地区，主喜马拉雅断裂形成了超过 50km 的破裂。廓尔喀地震与 1833 年一个 7.6~7.7 级地震发生在相似的位置，这一地震当时在加德满都造成了巨大的破坏。通过地质学和地球物理方法分析主喜马拉雅断裂的几何学形态，在其震源区域得到了很好的开展。尤其是大地测量的数据以及廓尔喀地震序列详细的位置对主喜马拉雅断裂的几何学形态有了进一步的限制。这些信息使得科学家们可以调查震间应变、地震活动与断层几何学形态之间的关系，以及喜马拉雅增生楔是如何变形的。许多研究者认为，高地形的前缘位置与沿着主喜马拉雅断裂在中部地壳形成的断坡有关，与之相反，另一些研究者认为这与逆序逆冲断层在高喜马拉雅地区的活动有关。理解应力在喜马拉雅地区的什么位置积累是很重要的，因为它影响到震间应变的积

累与地震活动过程中弹性应变能的释放，而后者又可以改善地震破坏的评估。

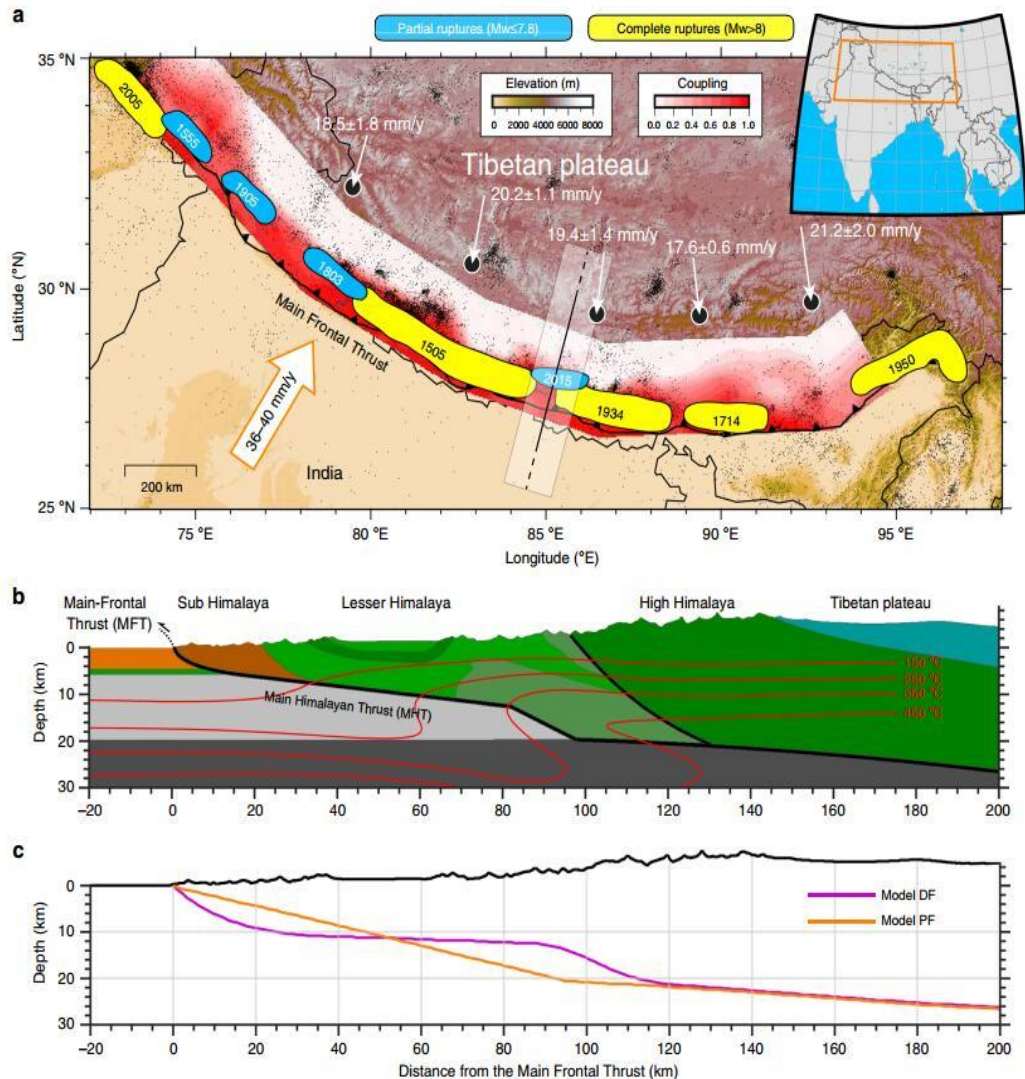


图 1 a: 地形图以及历史曾经发生地震的位置；
b: 初始参考设置及温度；c: 断层的几何形态

喜马拉雅地区的双峰式地震活动在很早之前就已引起人们的关注，局部地震趋向于集中、重复的在主喜马拉雅断裂深部发生，然而少数超大地震（大于 8 级）可以穿过整个地震带。局部破裂主要发生在喜马拉雅前缘

10~15km 的深度，这一位置靠近中部地壳断坡的位置，7.8 级的廓尔喀地震是这类地震中所知的最大地震。另一方面，对于古地震场的研究发现，喜马拉雅前缘断裂的地表破裂与超大地震（大于 8 级）相关。1934 年的 8.4 级的 Bihar Nepal 地震与 1950 年的 Assam 地震都属此列。基于这些观察，双峰式地震活动的成因仍不清楚，越来越多的证据表明断层的摩擦性质对巨型逆冲断裂的破裂具有决定性影响。但是，对于完全破裂与局部破裂、断层几何学形态和力学性质之间关系仍然没有定量的研究。为此，研究者结合前人的研究成果建立了一个二维模型，来探究地震破裂的模式。

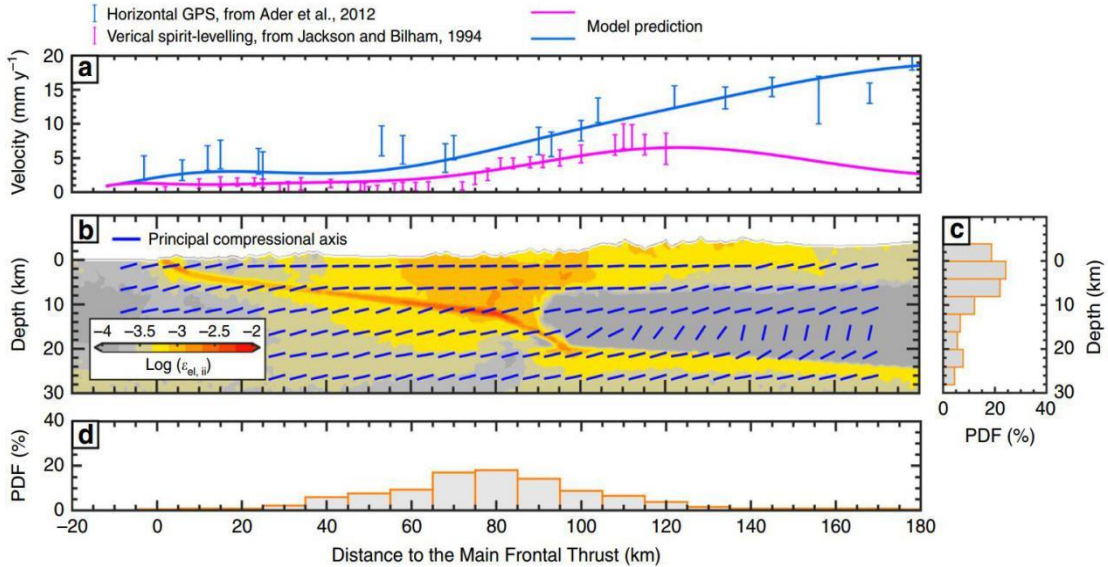


图 2 模型计算的震间行为。a: 观测到的与计算到的速度场；

b: 震间约 350 年的弹性应变场以及主压应力方向（蓝色线）；

c、d: 垂直方向与水平方向巨型逆冲断裂的分布

模型预测与震间变形的一致性。喜马拉雅地区过去几十年一个重要的研究目标就是确定汇聚速率，模型得出的汇聚速率与长期的地质观测得出的汇聚速率一致；这一模型预测的震间变形与大地观测得出的震间应变非

常符合，所有三个断层的几何学形态与测量得出的剥露速率也一致；在中部地壳断坡的位置会发生应变积累，在更深的部位，由于温度的升高导致摩擦非稳态的速度弱化行为向稳态的韧-塑性蠕变转变。弥散的韧性变形也发生在主喜马拉雅断裂的断坪-断坡位置。这一模型还表明，滞弹性的应变集中在高喜马拉雅的前端。事实上，大多数的这些事件都集中在中部地壳断坡的一个窄带内。

模型中的双峰式的地震活动。尽管受到二维模型的限制，但是模型也产生了与自然界断层相似的丰富的地震活动。滑移速率的时空演化表明，同震滑移事件在主喜马拉雅断裂是如何释放的。虽然整个地震带在震间是几乎完全锁定的，大多数模拟地震都在锁定的主喜马拉雅断裂的底部形成和扩展，仅有一小部分穿过整个断坪-断坡系统。超大地震具有相近的大小，以 1250 年为一个准周期。在它们之间有一系列的小的地震发生。

为了分析这一现象背后的物理过程，研究者分析了主喜马拉雅断裂应力和强度的时空演化。结果表明，局部破裂发生在靠近断层带下倾的部位，在中部地壳断坡之前，此处由于构造加载发生了最快的应力积累。破裂的扩展引起了局部应力的降低，并最终停止，这些破裂主要发生在主喜马拉雅断裂深部的断坪位置，深度在 10~15km。只有当锁定区域的下倾边缘被拉开，应力才会向上传播，紧接着新的地震便会形成，破裂也比之前的大，主要是由于应力转换和持续的构造加载导致的主喜马拉雅断裂前缘强度降低。最终，局部破裂导致应力的明显积累，达到一个临界值。只要整个主喜马拉雅断裂的强度变低，一个穿过整个断层断坪-断坡系统的地震才会形成并导致巨大的应力降低。然后，一个新的局部破裂的周期便开始。

研究还表明，脉冲式的滑移与剪切破裂在同一断层中共存，局部破裂与脉冲式的滑移有关，而完全破裂与破裂方式的有关。喜马拉雅增生楔一个典型的特征便是地震-耐震转变带，这与中部地壳断坡位于高喜马拉雅的

前端之下一致。破裂在锁定区域向上传播，而向下扩展很少，这主要是由于向下温度升高，形成了一个耐震域。所以，中部地壳断坡的几何学结构与热-流变学强度控制了主喜马拉雅断裂向下扩展的宽度。

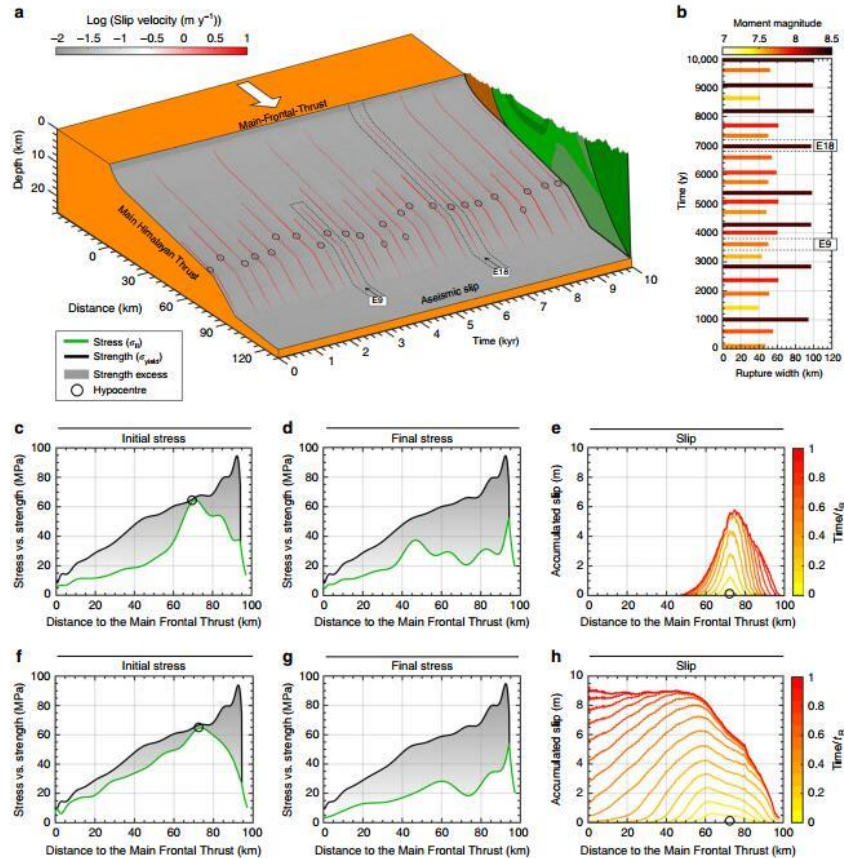


图3 模型计算的1万年内巨型逆冲断裂的活动

断层摩擦阻力与几何形态对地震破裂的影响。主喜马拉雅断裂的摩擦性质以及几何学形态是双峰式地震活动的关键因素。研究发现，断坡-断坡-断坡的模式会在破裂宽度在60~65km以及90~95km之间产生空白，前者与局部破裂有关，后者与完全破裂有关，形成双峰式的破裂。主喜马拉雅断裂的上倾区域的倾角越大，摩擦阻力便越高，进一步增强了断层的强度。摩擦阻力的增加导致每个周期内发生更多的地震事件。

此外，还发现，喜马拉雅地区之前记录的大地震可能并不能代表可能

的最大地震，一部分大地震可能仅仅是局部破裂引起的，完全破裂可能会产生更强的地震，而局部破裂往往给完全破裂提供了应力积累。为了释放震间的应变积累，平均每 600 年会发生一次 8~10m 的同震滑移，并伴随 8 级以上的超大地震，并引起低喜马拉雅前端的变形。局部破裂导致的静态应力改变是地震周期不规律的主要原因。由于这种极端的超大地震仅在地质记录中发现，并且周期近千年，所以其风险被低估。根据该项研究的结果，2015 年的廓尔喀地震需要引起关注，这一地震可能增加了应力，使得断层更加易于发生完全破裂，引起超大地震。同时，超过 500 年已经没有超大地震发生，主喜马拉雅断裂被锁定，很可能发生超过 10m 的滑移。最近的超大地震发生在 1505 年，震级超过 8.5 级。这些因素说明这一地区可能是主喜马拉雅断裂发生完全破裂的地区。近年来对喜马拉雅地区连续的大地测量观测将有助于提供新的线索，确定这些推测。

来源：Dal Zilio L, van Dinther Y, Gerya T, et al. Bimodal seismicity in the Himalaya controlled by fault friction and geometry. *Nature communications*, 2019, 10(1): 48.

地震预警系统的准确性和最佳警报策略

多数情况下，地震预警系统未发出警报，但用户却可能遭遇具有破坏性的震动，因此，当用户决定忍受误报，即选择接收远低于可能造成损害的预期地面运动水平的警报时，地震预警系统才可以显著减轻地震损失。虽然这会导致许多错误警报（对不会产生破坏性地面震动的地震的不必要警报），但它可以最大限度地减少所错过警报的数量，并在整体上产生最佳绩效表现。这是美国地质调查局、南加州大学和加州理工学院的科学家们共同取得的新发现，相关成果发表在2019年2月的 *Scientific Reports* 上。

地震预警（EEW）的目标是提供预先警告，警告用户所在位置的预期地面运动将超过可能导致损害的水平，以便人员和自动化系统可以采取措​​施防止潜在损害。“损害”可以是用户认为的任何东西，可以是结构性的，也可以是非结构性的，甚至是情绪化的。无论目标是防止有价值的制造设备被破坏，还是减轻有人在没有事先通知的情况下感到晃动时而产生的恐惧，EEW 系统都在执行相同的操作：识别用户将经历超过一定临界阈值（对于设备，加速度可能为 $10\%g$ ；对于人，可能为“感觉”到震动时的水平）的地面运动，并在地面运动实际超过该阈值之前提醒用户。

大多数地震预警系统，如日本气象厅（JMA）紧急地震速报系统和美国的 ShakeAlert 系统，使用实时地震数据来确定地震的位置和大小。这些信息被输入到地面运动预测方程（GMPE）计算预期地面运动，然后警告预期地面运动大于某个临界阈值的区域。例如，在日本，如果任何地区内的预期地面运动大于 JMA 规定的地震强度 4，则整个地区都会收到警告。

那么，理想的 EEW 系统能够准确预测地面震动是否超过特定阈值，或者说 EEW 警报准确性的上限如何？为此，研究人员首先假设如果预期的地面运动至少与造成损害的水平一样大，EEW 系统将提醒用户采取行动；

然后，研究人员探讨如果将触发警报的地面运动阈值设置为高于或低于该水平时会发生什么。在模拟过程中，使用了 480000 年的持续地震目录，这些 $4 \leq M \leq 8$ 的破裂由 UCERF3（第三版统一加州地震断裂预测）根据概率产生。

直观上来讲，人们可能期望 EEW 应该提醒用户地面运动预计会超过导致损害的某个水平——假设某些工厂的设备因加速度大于 $50\%g$ 会受损，那么如果预期的地面运动等于或大于 $50\%g$ 就会发出警报以关闭该设备，否则继续运行。然而，该研究表明，这种简单的想法会导致糟糕的警报表现。

首先，地面运动超过规定阈值的大部分情况是由小地震引起的意外强烈地面运动而造成的，在这些情况下，EEW 系统不会发出警报。因此，用户将错失可能具有破坏性地面运动的大多数地震。其次，这种影响会因错过警报比误报的代价更昂贵这一事实所放大。因此，研究人员认为，将警报阈值被设置为显著低于用户的损害阈值的这种方法可以最大限度地减少错过警报的数量，并最大化用户的收益，即使它也会大大增加错误警报的数量。

EEW 可能还有一些社会效益，而这与成功警告用户无关。例如，有人可能喜欢接收实时地震信息，即使是在危险的摇晃已经发生后获得的地震信息，而有人则可能喜欢接收更多的地震信息，即使他们并不能真正理解这些信息。研究人员表示，他们目前无法评估这些可能的社会影响，他们可以做的是评估 EEW 系统能够实现的物理和情感益处（设备和人在危险的地面运动到达某个位置之前被成功警告并采取保护措施），即 EEW 系统的直接有效性和准确性。

用户获得的好处取决于其采取由 EEW 警报所引发动作的相对成本。如果采取行动的成本几乎与行动要避免的损害一样昂贵，那么 EEW 即使

从未产生漏报或误报，其所能提供的益处也非常少。对预期地面运动具有很大不确定性的 EEW 警报也可能对应急行动非常昂贵的用户几乎没有用处。例如，EEW 可能不是核电厂缓解地震风险的好工具，因为紧急停机的成本超过 2.5 亿美元，这不包括其他成本，例如反应堆寿命的减少。

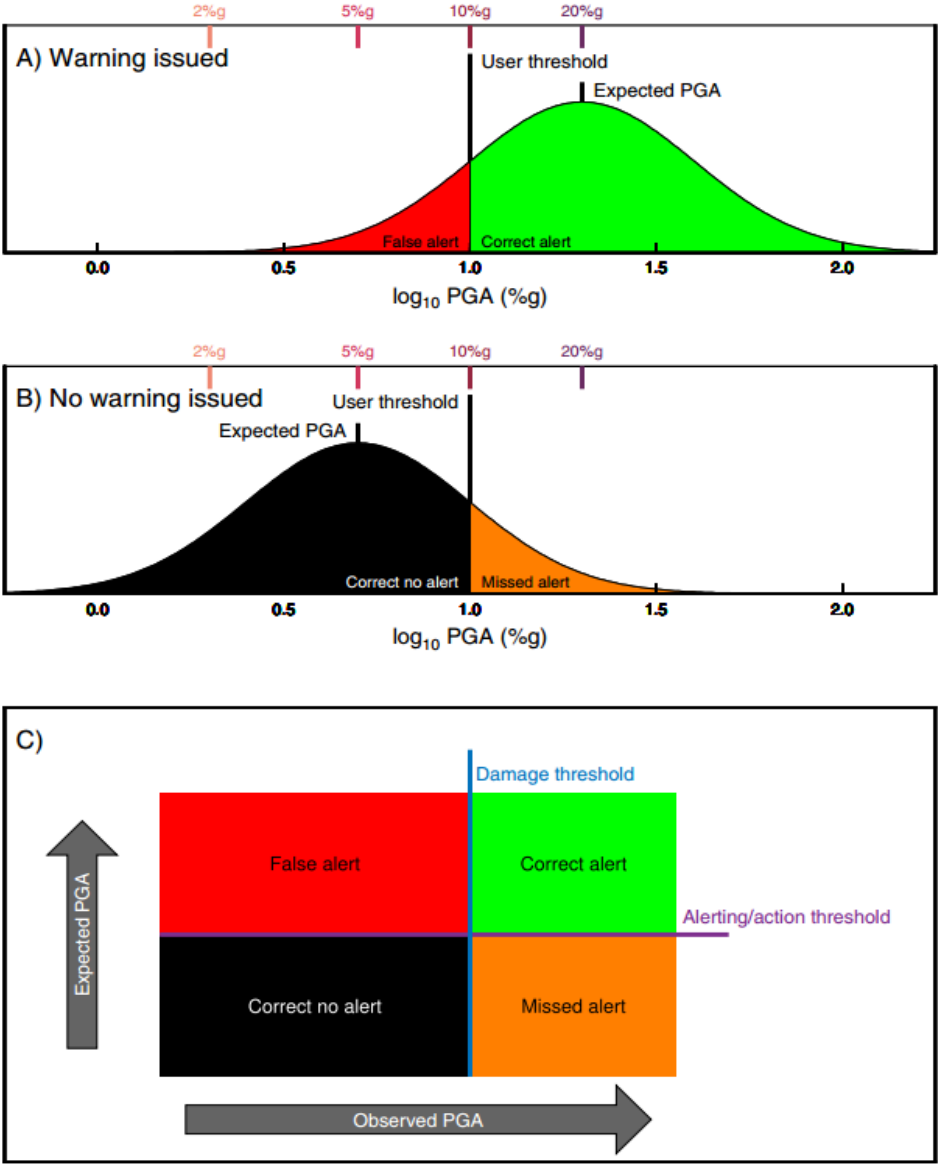


图 1 地面运动与警报准确性

但是，可容忍错误警报的用户是一种更为有趣的情况。几乎所有健全

的人都可以在非常低的地面运动阈值下采取“伏地-遮挡-手抓牢”（drop-cover-hold on）的动作，以减轻地面运动较强时的伤害。“伏地-遮挡-手抓牢”的行为基本上是免费的，只需要几秒钟，因而导致的损失很小。然而，在桌子下面，而不是被倾倒的书架或坠落的灯具砸到所带来的好处远远超过采取行动所带来的损失。也就是说，损失远远超过行动的成本。普通用户在此警报策略下会遇到的许多类似的错误警报甚至可以当作是在进行防灾演习。

在具体分析过程中，研究人员以地震的位置和大小为基础，使用地震预测方程（GMPE）计算预期的地面运动。这是目前使用的最受欢迎的 EEW 类型，目前的所有算法包括美国的 ShakeAlert 系统和日本气象厅 EEW 系统的算法之外的所有算法都属于这种类型。然而，地面运动估计是 EEW 系统的最终目标，而不是源参数确定，并且震级（即使精确估计）不是用于精确预测地面运动的唯一源参数。但幸运的是，其他 EEW 方法正在开发中，这些方法使用地面运动观测直接计算预期的地面运动，而无需推断源参数或进行 GMPE 计算。

整体而言，EEW 存在一些不准确性，但对于可容忍误报的用户而言，仍然可以减轻大部分可预防的地震损害，而这是通过在预期的地面运动远低于可能导致用户损坏的水平时采取行动来实现的。在研究人员对 EEW 时效性的研究中，他们发现相比于高地面运动阈值，EEW 警报对于低地面运动阈值更具及时性。因此，有一条简单的途径可以确保用户拥有最有效的 EEW：接收对低水平地面运动发出的警报。

来源：Minson S E, Baltay A S, Cochran E S, et al. The Limits of Earthquake Early Warning Accuracy and Best Alerting Strategy. Scientific Reports, 2019, 9(1): 2478.

慢滑重复模式变化：扰动响应以及大逆冲地震的可能前兆

大地测量技术的进步让人类能够更高精度地探测出慢滑事件（SSE）的存在及其变化规律，最近的观测表明 SSE 的表现在地震发生前后有着显著地改变。但是，目前人们对这种变化规律仍所知甚少。为了研究 SSE 在地震循环的不同阶段如何变化，以及 SSE 模式受外部应力扰动的变化规律，来自加利福尼亚州帕萨迪纳喷气推进实验室的两位科学家开展了 2D/3D 地震循环模拟实验。结果表明，尽管固有模型和外部应力扰动模型都会使 SSE 模式发生改变，但是两者却有很大不同。在没有外部应力扰动的情况下，SSE 的重复间隔和峰值滑移速率在大地震发生之前会显著降低，这可能被用作地震预警信号。当受外部应力作用扰动时，SSE 模式会发生显著变化，可能会被提前或者推迟。当外部扰动长久持续时，多个 SSE 同样会受到影响。相关成果发表在 2019 年 2 月的 *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 上。

不同于常规地震，SSE 有着缓慢的破裂速度和较低的应力降，但也是有规律的重复发生。但是，在世界的很多俯冲带中都观测到了 SSE 模式的变化。尽管地震诱发和大逆冲事件的自然循环等被用来解释这种现象，但是目前仍然缺乏综合、全面的研究。例如，SSE 区域是如何与大逆冲地震区域相互作用并且影响地震循环动力；SSE 循环如何和大逆冲地震循环混合形成超循环，在这个过程的不同阶段，SSE 模式又是如何变化？不仅如此，观察表明外部影响同样会对 SSE 的模式产生重要影响，这些影响同样需要开展系统研究。

研究者首先建立了包括通常的大逆冲地震带和 SSE 带的模型，两者的重复周期分别为 1000(和 100)年与几年，这与包含 SSE 的俯冲带相符合。模型的理论基础是速度-状态摩擦方程，研究者的模型设置模拟日本的 Bungo 水道和 Boso 区域。之后，研究 SSE 模式在大逆冲地震超循环各阶

段的演化规律。最后引入不同大小、不同持续时间的应力扰动来研究 SSE 模式受外部扰动的变化规律。

简单 SSE 变化参考模型分析表明，在没有外部应力作用干扰时由于 SSE 区域和大逆冲地震区域的相互作用，SSE 模式会在大俯冲地震超循环的各个阶段发生演化。具体来说 SSE 重复间隔在大逆冲发生前后发生显著变化：地震前缩短到两年，地震后延长到七年，而在循环中逐渐缩短，平均间隔为 5 年。在不同阶段，SSE 滑移空间分布也有显著变化。在超循环的主要部分，SSE 的空间分布会变小并且在大逆冲地震发生后的每个事件之间逐渐地向下移，从而造成在每个事件之间 SSE 地重复间隔有一个稳定、少量的减小。更为重要的是，当大逆冲地震区域将要失稳的时候（地震快要发生时），SSE 的重复间隔和最大滑移速率都会显著的降低。

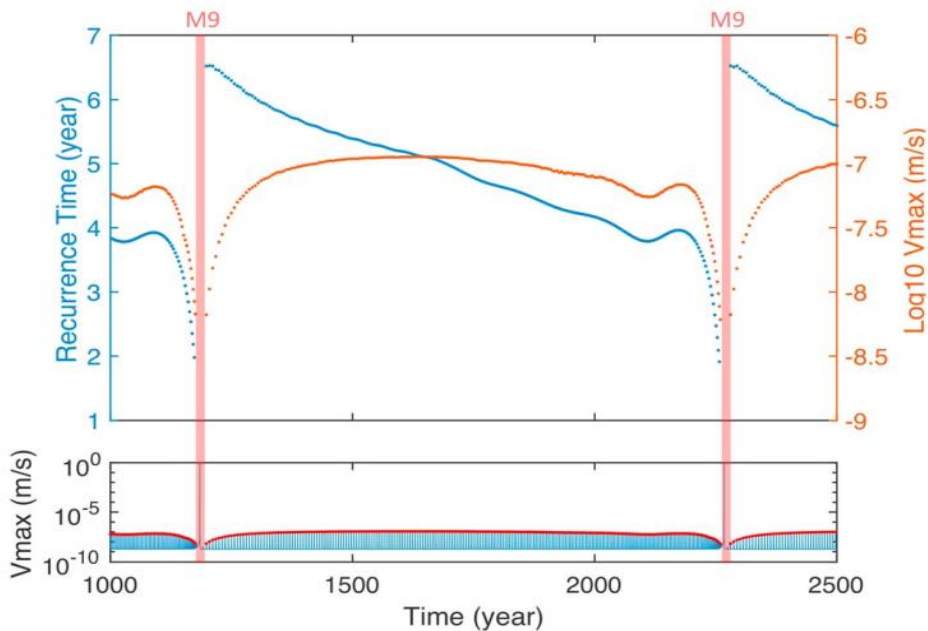


图 1 大逆冲地震超循环中 SSE 模式的变化

上述简化模型代表了俯冲带 SSE 的一般模式，但是事实情况要比之复杂。例如大俯冲地震带会由不同震级的地震组成，SSE 带也包含不同重复间隔的 SSE 事件。新模型在 15~25km 处增加 8 级地震带，重复间隔为 100

年，与原来重复周期为 1000 年的 9 级地震构成双超循环。SSE 也分为长周期（重复间隔为 5 年）和短周期（重复间隔为 1 年）。模型分析显示，类似于单超循环模型中 SSE 重复间隔在循环过程中持续降低，无论是在长周期双超循环还是在短周期双超循环模型中，8 级地震的重复间隔也都持续降低。在长周期模型中 SSE 的重复间隔在每次地震循环中持续降低，但是却没有出现地震前最大滑移速度和重复间隔的显著降低（drop off），可能是因为由于 8 级地震的存在导致循环周期减小了 10 倍，从而导致在地震发生前的最后阶段没有足够多的 SSE 循环而表现不出明显的降低。长周期模型表现出来的规律和墨西哥俯冲带 2014 年地震前 Guerrero SSE 表现出的规律具有相似性。而在短周期模型中，地震发生之前 SSE 的重复间隔和最大滑移速度都有显著的降低（和固有简单 SSE 模型相似）。这可能是因为在短周期模型中，SSE 循环周期较短（1 年），在地震发生前的最后阶段有足够多的 SSE 循环从而能够表现出显著的变化。

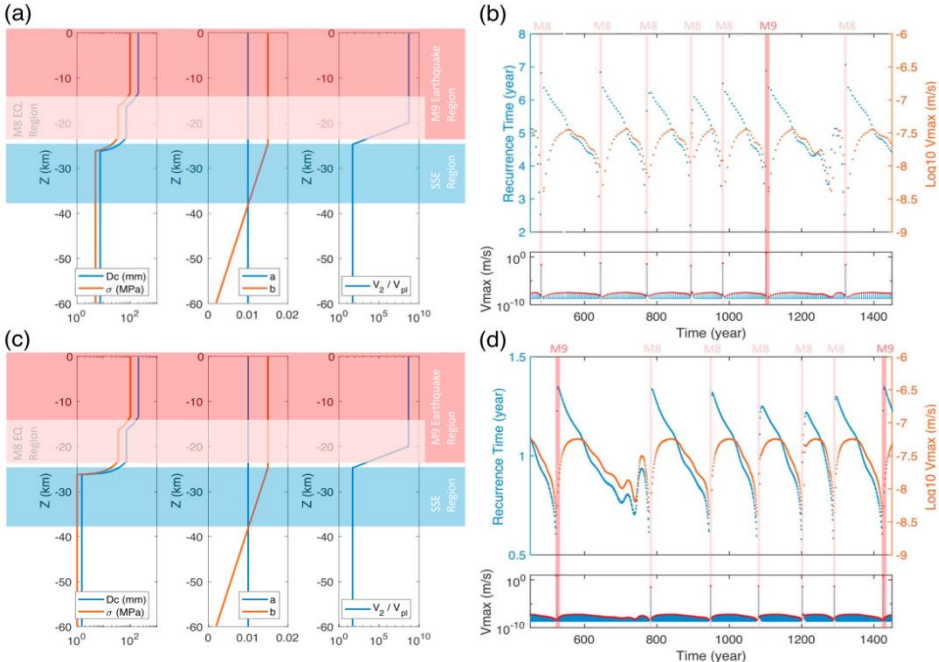


图 2 8 级和 9 级地震区的 SSE 双超循环。

(a) 和 (b)：长周期 SSE 双超循环模型设置和 SSE 模式的变化；

(c) 和 (d)：短周期 SSE 双超循环模型设置和 SSE 模式的变化

研究者在三种外部应力扰动情况（同震动态扰动、同震静态扰动、震后扰动），分别模拟分析了地震波穿过整个模型区域、远处地震造成的瞬时静态荷载和远处地震震后过程引起的连续静态扰动。

(1)同震静态扰动。同震静态扰动持续时间为 200 s, 扰动程度(A_{per})从 1 Pa 到 10 KPa。结果显示，在同震静态荷载的作用下，后续的 SSE 会被提前，当扰动程度为 1 KPa 时，提前大约两个月。随着扰动程度的加大，提前时间也会随之近于呈正比增大。此外，同震静态扰动也会影响 SSE 滑移分布，导致下倾部分的滑移更大。当扰动程度在 20~50 KPa 之间或者更大时，几乎在扰动引入后立即诱发了下一次 SSE。

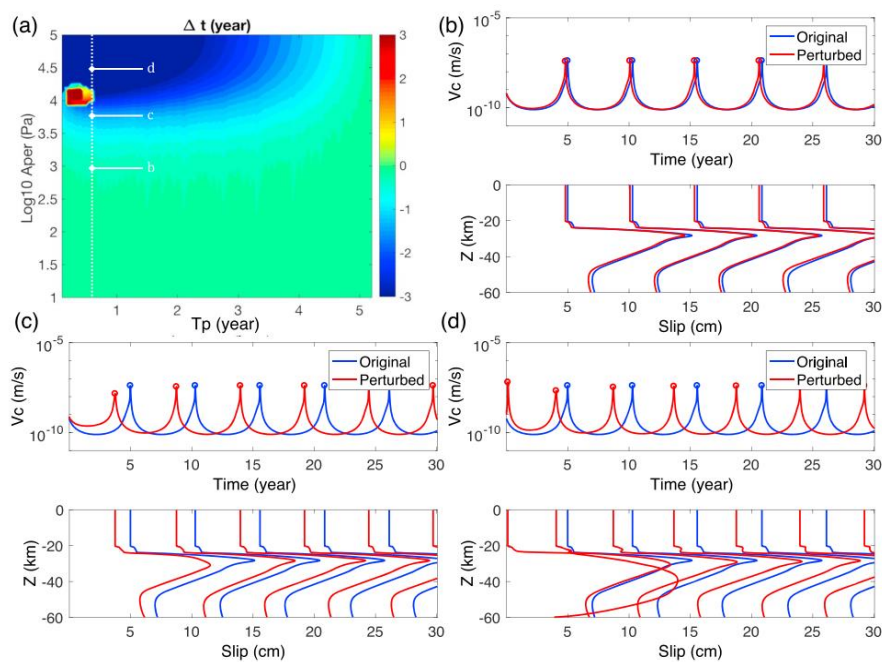


图3 同震静态扰动导致的 SSE 重复时间和滑移量分布变化图

(2)同震动态扰动。同震动态扰动持续时间同样为 200 s, 扰动程度从 1 KPa 到 1 MPa。不同于同震静态扰动，动态扰动只有当扰动程度达到一定程度时才会对 SSE 滑移量产生明显影响。当扰动开始时间为 0.3 年，动态扰动基本不会对滑移总量造成影响。当扰动程度较低时（10 KPa），

SSE 模式基本不会发生变化，而当扰动程度较高时（大于 200 KPa），虽然触发的 SSE 会增加一定的滑移距离，但是扰动会造成 SSE 的延迟，这在一定程度上抵消了增加的滑移距离，导致总的滑移距离基本没有变化。扰动程度越高，触发的 SSE 增加越多的滑移距离，而扰动造成的延迟时间同样也就越大。

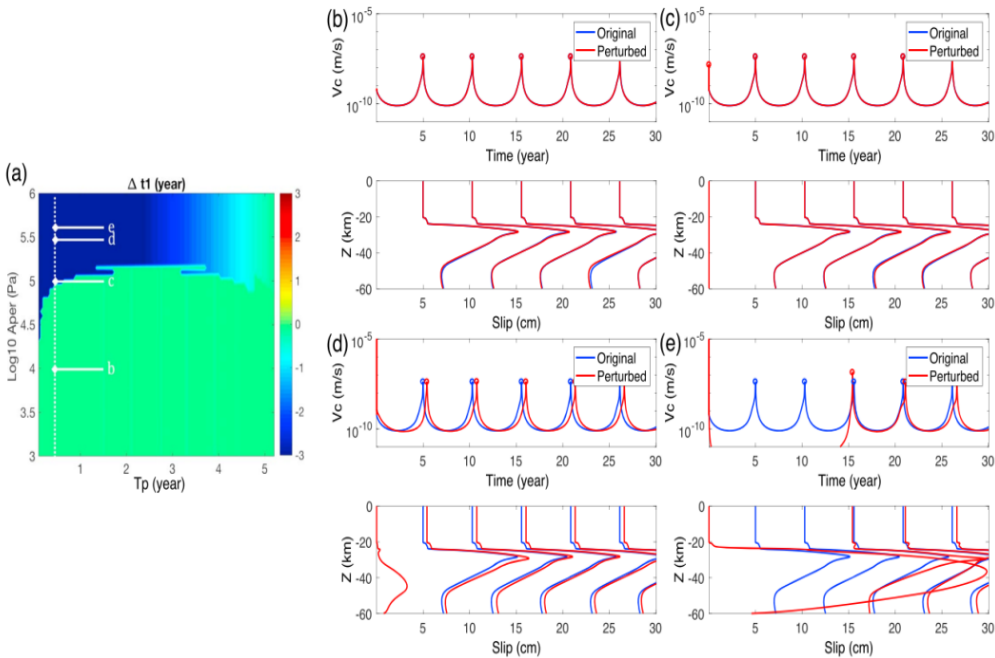


图 4 同震动态扰动导致的 SSE 重复时间和滑移量分布变化图

(3) 震后扰动。震后扰动持续时间从 1 年到 50 年之间变化，扰动程度从 1Pa 到 10 KPa。结果表明，扰动同样会导致 SSE 的提前，提前时间与扰动程度成正比，但是当扰动持续时间较短时，会出现 SSE 的震荡现象。例如，当扰动时间为 2 年，扰动程度分别为 1、10、31.6 和 100 KPa 时，SSE 提前时间分别为 0.2、2、3.2、4.5 年。而后两种情况都会发生 SSE 的震荡。当扰动持续时间更久时，模型的结果和同震静态扰动模型较为相似。

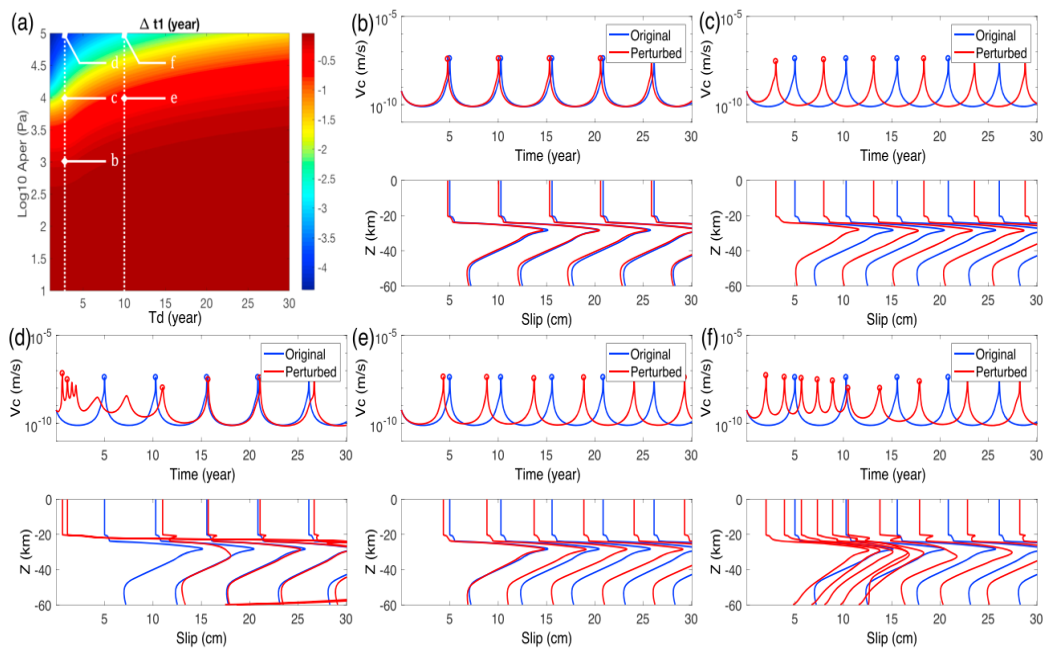


图 5 震后扰动导致的 SSE 重复时间和滑移量分布变化图

综上，SSE 带自身的变化和外部应力的干扰都会使 SSE 模式在大逆冲地震超循环中发生变化，但是两者有明显区别。由内在变化引起的 SSE 在超循环主体部分中重复间隔的降低是逐渐地，而在大逆冲地震发生之前的最后阶段会导致 SSE 重复间隔和滑移距离地突然减小；而外部应力干扰导致的 SSE 重复间隔的突然减小只会发生在干扰作用后受影响的循环中。上述特征可能作为预测大逆冲地震将要发生的依据，即大逆冲地震将要发生前的最后阶段可能会导致 SSE 重复间隔和滑移距离的显著减小。值得注意的是，减小的幅度与地震和 SSE 之间的相对震级大小有很大关系，当地震震级比 SSE 大的多时，这种减小是显著的，否则类似的减小可能不易察觉。

本研究是基于与美国国家航空航天局（NASA）的协定在加利福尼亚州帕萨迪纳喷气推进实验室进行的。

来源：Luo, Y., & Liu, Z. Slow - slip recurrent pattern changes:

Perturbation responding and possible scenarios of precursor toward a megathrust earthquake. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20: 852–871.

主 送：中国地震局领导

联 系：中国地震科学实验场管理部 Email:sycglb@ief.ac.cn