

# 地震科技前沿快报

2019 年第 10 期 （月刊 总第 10 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

- 1、寻找南加州的隐蔽地震
  - 2、卫星观测将有效改进对地震的监测和响应
  - 3、用持续时间模型改进震群期间的地震预测
- 

## 寻找南加州的隐蔽地震

地震遵循著名的幂律关系，较小事件的发生频率大于较大事件。因此，地震目录由小地震主导，但由于信号保真度问题，仍然缺少更大数量的更小事件。为了克服这些限制，研究人员将模板匹配检测技术（**template-matching detection technique**）应用于南加州区域地震网络的整个波形存档。这项工作产生了 181 万次地震目录，增加了 10 倍，这为深部断层带的几何形状，前震行为和成核过程以及地震触发机制提供了重要的信息。在此类目录中解决的丰富细节将有助于下一代地震和断层分析。相关研究成果发表在 2019 年 5 月的 *Science* 上。

自地震仪器时代开始以来，地震目录已成为许多地震和断层研究的基础。①随着局部震级的发展，地震大小可以首次进行定量比较；②这直接

导致地球科学中第一个幂律关系的建立；③这种经验关系表明，对于幅度（ $M$ ）的量级减小，地震频率将增加十倍。这种关系的意义是深远的：地震目录本身都是不完整的，因为在可检测性阈值以下总会有更多的小地震。这些隐藏事件填补了地震记录中的空白，是更好地了解断层深部几何形态、前震和群体过程、以及地震触发和成核的关键。然而，将这种幅度范围扩大到越来越小的事件时会受到信噪比问题的困扰以及需要从近同步地震中解读重叠地震图。

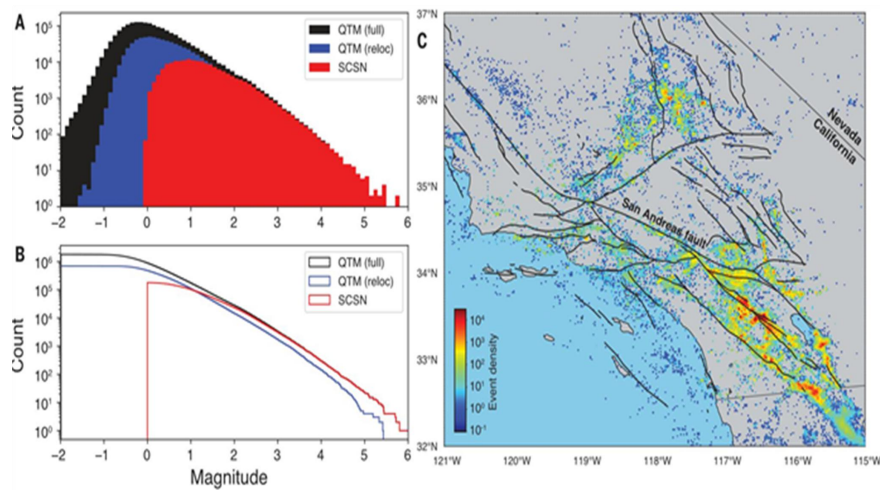


图 1 QTM 地震目录

一种称为模板匹配的技术在各种情况下成功地检测到传统技术遗漏的小地震。模板匹配将先前已识别地震的地震图作为模板，利用邻近事件之间的地震波形的相似性，将其与连续波形数据进行交叉相关。该技术的应用将检测到的地震数量扩大了 10 倍（新的地震目录简称 QTM）。然而，其庞大的计算需求限制了其对较小地震网络的使用以及仅持续数天至数周的数据集。为了克服这些限制，研究人员使用了 200 个 NVIDIA P100 图形处理单元阵列，在南加州地震网络（SCSN）的连续波形存档上执行模板匹配，并为整个南加州地区制作了地震目录。在这些计算过程中，在 2000—2017 年期间 SCSN 目录中列出的近 284 000 次地震被用作模板事件。然后，使用基于聚类的双重算法重新定位所得到的检测，以获得精确的相

对震源。

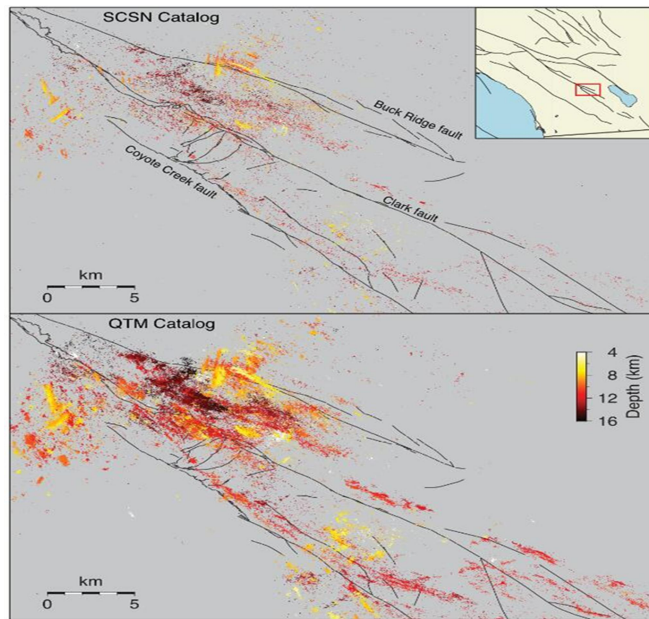


图 2 San Jacinto 断层带地震活动

QTM 目录展示了预期的幂律关系。在 10 年的研究期，最初的 SCSN 目录有近 180 000 次地震，而 QTM 目录包含 181 万次地震。QTM 目录几乎含有所有  $M > 0.3$  的地震，而 SCSN 目录中只有  $M > 1.7$  的地震。检测率的系统性提高导致南加州每天发现约 495 次地震，事件发生时平均时间仅为 174 s。而 SCSN 目录，地震平均间隔约 1753s，证明 QTM 目录中新发现的事件提供了关于地震活动如何随时间演变的更详细的图像。

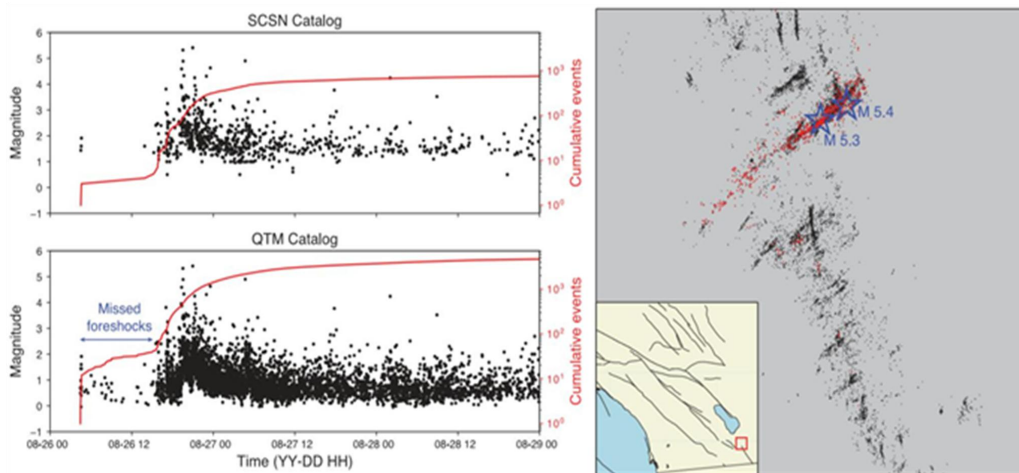


图 3 2012 年期间布劳利地震群

QTM 目录中重新定位的震源提供了对孕震深处断层带几何形状的深入了解。在 QTM 目录中，断层带的内部结构明显更清晰，最终将改进断层图，更好地了解断层带的三维几何形状，以及对地震和断层过程进行更真实的模拟。

地震序列如何开始是地震科学中最基本的问题之一。在典型的地震序列中，主震之前偶尔会出现较小的前震，其中地震群可能受到流体或地震滑动等外部因素的驱动，并且具有复杂的时间模式而没有明显的主震。关于序列开始的详细观察是至关重要的，因为它们可以提供对地震触发机制的深入了解并限制地震成核的物理过程。QTM 目录提供了重新审视这些重要问题的机会。研究人员展示了 2012 年加利福尼亚州布劳利地震群发生期间地震活动的幅度-时间分布，其中包括 3 天内 10 次  $M > 4$  的地震和非常多的小震。在 QTM 目录中，序列开始的时间似乎比 SCSN 目录中的时间早了近 10 小时，并且在此期间观察到另外 36 起  $M \sim 0.5$  的地震。通过使用模板匹配目录，能够更好地解决地震群和震后序列的时空演变，从而提高对这些过程的理解。

地震之间相互作用及相互触发的物理机制尚不清楚。地震触发的最常见解释是由断层位移引起的静态应力变化或由地震波引起的动态应力变化。这些物理过程对距离为  $r$  的应力变化的预期空间衰减有特定的预测，静态应力变化随  $r^3$  而衰减，动态应力变化随  $r^2$  衰减。大地震能够在较大的震源距离内引发小地震，但是在大地震发生后地震触发的空间特征的详细分析十分缺乏数据。

在研究人员研究的时间段内，地震网络附近发生的最大地震是 2010 年瞬时震级 7.2 的 El Mayor-Cucapah 地震，发生在下加利福尼亚州，靠近美国-墨西哥边境。QTM 目录中的大量事件提供了对地震触发率的改进限制，例如，允许在主震后的一周内检查 El Mayor-Cucapah 地震如何影响整

个南加州的地震活动率。研究人员展示了该地区的地震活动率变化相对于地震前 2 年每周平均地震活动率的情况。南加州板块边界的很大一部分表现出高于平均水平的地震活动率，这与主断层强烈活动相关。

使用非参数检验，研究人员还原了地震活动率变化与距离的函数关系。对于 SCSN 目录，地震活动率的显著增加只能到达大约 175 km。这是主震的静态应力变化达到与固体地球潮汐应力 ( $\sim 2$  kPa) 相当的近似距离。因此，不能排除静态触发效应作为单独的触发机制。然而，在 QTM 目录中，地震活动率显著增加，远远超过这一深度，延伸到 275 km。这表明 El Mayor-Cucapah 地震引发了南加州大部分地区的低震级地震活动，这在标准目录中无法解决。由于这些更远距离的事件是在震源距离处触发的，静态应力变化可忽略不计 ( $< 1$  kPa)，这些观测结果表明地震的广泛动态触发的发生并不局限于少数特别敏感的位置。对 San Jacinto 断层带和 Salton Sea 地热区进行的类似观察表明，这些都包含在研究者的分析中。这些结果意味着单一的物理机制不太可能触发地震，并且在 El Mayor-Cucapah 发生地震的情况下，机制清单还可能包括诸如耐震滑移和破裂附近的流体压力的震后扩散等过程。因此，通常在余震中观察到的复杂时空模式可能部分源于多个驱动机制的存在。

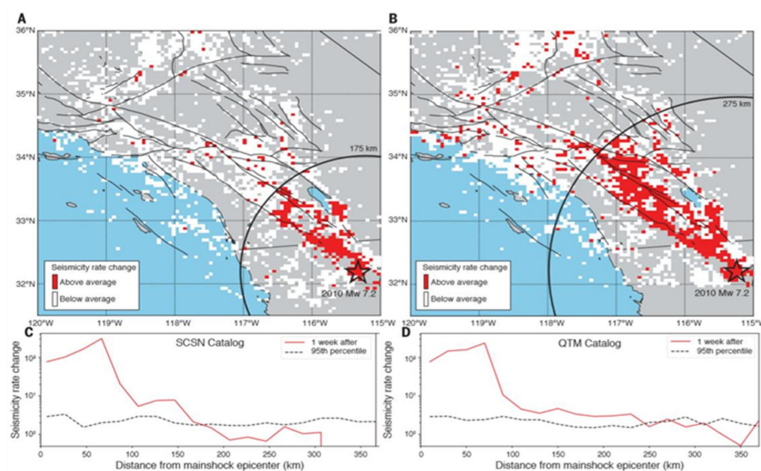


图 4 2010 年 El Mayor-Cucapah 地震之后对地震触发的分析



虽然模板匹配可以产生非常详细的地震活动目录，但结果仅限于已知地震的源区。模板事件通常仅与~100到200米范围内的其他地震交叉相关，这意味着某些事件将在模板不可用的区域中保持不被发现。但是，由于研究人员使用了一个跨越17年的起始目录，该目录对于 $M > 1.7$ 的地震已经完成，因此模板目录中的限制可能导致的小事件总数是可以忽略不计的。模板可用性的未来改进可能源于深度学习技术的应用，这些技术最近在地震图的自动事件检测和表征方面显示出巨大的潜力。

在QTM目录中，事件间隔的时间分辨率是2.0 s，这是为了最小化不同模板事件之间重复检测的可能性而施加的限制。因为对于大多数记录而言，地震波列通常比这更长，所以目录将解决许多事件，这些事件至少部分地与其他事件重叠。但是，几乎同时发生但位置不同的事件将无法解决。

未来对地震活动性和相关危害的综合分析将有利于为其他地区构建类似的模板匹配目录。这将需要可靠的模板事件目录和高质量的三分量连续波形数据集。随着地震学家发现越来越小的地震，观测事件之间的平均时间将继续减少，从而揭示出更复杂的动态行为。这些丰富的时空模式为地震的物理过程和潜在的断层结构的反射特性，以及可引发地震的各种机制和外部载荷提供了有价值的约束，并且，还可以提供关于各个事件的破裂过程的额外信息。本研究中产生的地震目录是迄今为止最全面的，并且，未来此类目录将促进下一代地震和断层分析。

来源：Ross Z E, Trugman D T, Hauksson E, et al. Searching for hidden earthquakes in Southern California. *Science*, 2019, 364(6442): 767-771.

## 用持续时间模型改进震群期间的地震预测

地震震群对可操作地震预报提出了挑战，因为它们主要受瞬态外部过程驱动，如流体流动，其行为和持续时间难以预测。在这项研究中，研究者基于特定区域历史震群精算的统计数据，发展了震群持时模型，用于估计震群可能持续时间。研究者用震群演示了这种方法，该震群在加州南部的索尔顿海槽被识别出，研究者发现震群的平均持续时间平均为 7 天左右，并且在震群第一个 14 天内有相对恒定的 15%~16% 的机会每天终止。编目的群体持续时间呈指数分布，因此研究者使用泊松模型进行震群终止以确定和扩展精算统计数据。然后，研究者展示了如何使用地震持时模型影响 2016 年加州孟买海滩震群期间发布的地震预报，发现通过结合概率模型（有关震群可能持续多长时间）可以显著改善地震预报。相关成果发表在 2019 年 6 月的 *Bulletin of the Seismological Society of America*。

地震震群可以模拟为地震活动率的瞬态升高，并且被认为主要由外部过程驱动，例如流体流动或无震蠕变。因此，它们通常在地震聚类模型中表示为自发地震的基本速率（背景速率）的暂时增加。震群对可操作地震预报提出了挑战，因为很难预测经常隐藏的整个驱动过程的行为和持续时间。

这个问题在 2016 年孟买海滩震群中非常明显，该震群于 9 月 26 日在加州南部的索尔顿海开始，持续了大约一周。该震群由一百个震级在  $2 \leq M \leq 4.3$  的地震组成，其前两天的活动最为强烈。该震群发生在位于索尔顿海槽的布劳利（Brawley）地震带的北部，此处发生了从加利福尼亚湾的伸展裂缝到沿着圣安德烈斯（San Andreas）断层系统向北的走滑运动的过渡。2016 年的震群发生在距离圣安德烈斯断层南端只有几公里的区域，该区域过去有几个震群，最明显的是 2001 年和 2009 年。这些震群可能是圣安德烈斯断层发生大地震的前兆。因此，2016 年的震群得到了美国地质调

查局 (USGS), 加州地震预报评估委员会和加州紧急服务办公室 (CalOES) 的回应, 并在 CalOES 发布地震咨询后引起了大量媒体和公众利益的关注。用可操作余震预报的语言来说, 关键问题是在某个特定时间窗口 (例如一周) 内在圣安德烈斯南部断层发生大 ( $M \geq 7$ ) 地震的可能性是多少? 但是, 计算震群的这种可能性并非易事。

另一种地震预报模型是流行型余震序列 (ETAS) 模型, ETAS 模型也基于经验余震定律, 但它将时间  $t$  处的地震发生率  $\lambda$  视为独立地震背景率  $\mu$  与每个地震触发的余震率之和。ETAS 模型是美国地质调查局用于生成 2016 年孟买海滩震群的概率地震预报的两种预测模型之一, 在预测发布后的下一周估计南圣安德烈斯断层发生  $M \geq 7$  地震的概率增加到  $0.03\% \sim 1\%$ 。将模型参数调整为过去在该区域中发生的震群作为初始估计 (不包括非地震性), 然后更新以适应正在进行的序列, 包括恒定的背景速率项  $\mu$ 。具有恒定背景速率项的 ETAS 预测的准确性在很大程度上取决于假设增长率持续多久。

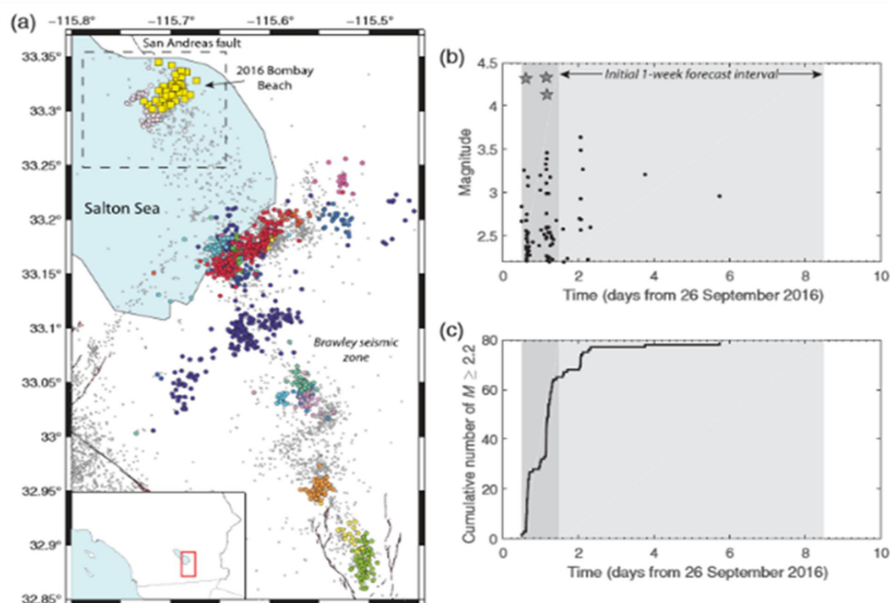


图 1 (a) 1981-2016 年索尔顿海槽区  $M \geq 2$  的地震活动图;  
 (b) 2016 年孟买海滩震群中  $M \geq 2.2$  地震的震级时间历程;  
 (c) 震群中随时间累积的  $M \geq 2.2$  地震的累积数量



目前，预测震群的持续时间仍然是未解决的挑战。虽然改进的大森定律可以用来模拟余震序列的时间衰减，但是更难以预测震群背景速率的变化将持续多长时间，因为它是由流体流动或不可观察或预测的缓慢滑动等瞬态过程驱动的。因此，在预测间隔期假设高背景率将以恒定速率继续，可能会存在问题，因为地震和概率的预期值可能被高估。即使在具体区域内，震群持续时间也可能存在很大差异。以此为基础，研究者基于精算统计数据开发了一个震群持时模型，并展示了如何在震群期间的地震预报中进行应用。

在研究方法上，研究者采用类似于用于估算预期寿命的精算表，给定区域内的一组震群观测数据，研究者可以测量它们的持时并构建精算表来表征该区域的预期震群持续时间。为了将精算表转变成为一个有用的预测工具，研究者开发了一个震群持续时间的模型，并在索尔顿海槽展示这种模型的用法。在孟买海滩震群期间，研究者进行了预测未来活动的 ETAS 预测，假设背景速率在训练窗口上是恒定的，并计算两个端元模型。然后，比较两个不同的时间窗口：一周和一个月，对比其预测效果，进而展示了这种模型如何影响 2016 年孟买海滩震群期间报告的地震概率。

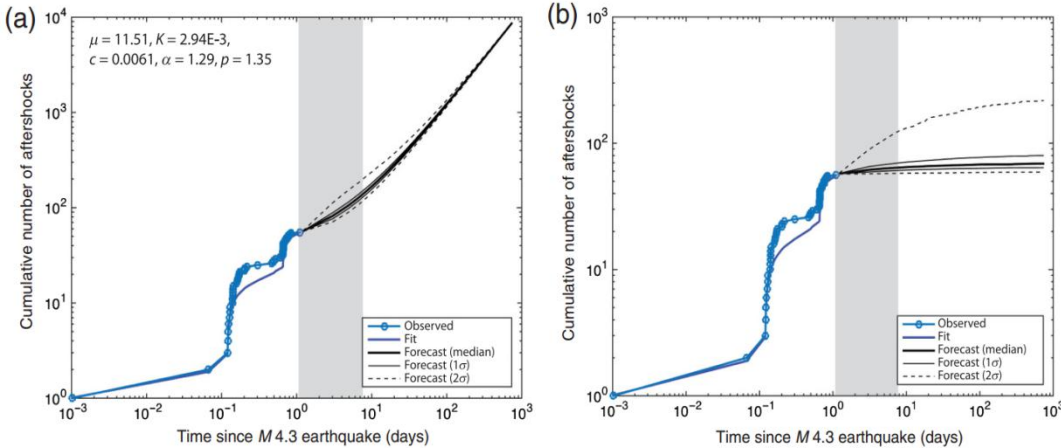


图 2 ETAS 适用震群的第一天，并预测两个端元情景下  $M \geq 2.2$  地震的累积次数：  
 (a) 在预测间隔期高背景率的持续情况；(b) 在预测区间开始时高背景率的停止情况

精算表是有效表示一般人群存活的方法。研究者的结果表明，它们也可以用于表征给定区域内典型震群的持时。这是一种灵活的方法，因为只要使用的定义在整个数据集中是一致的，它可以用于任何震群数据集，不论震群如何被识别、持时如何被定义。

正如模型描述中所讨论的，在使用精算方法时需要牢记几个警告。任何描述性统计数据会受到样本量小的影响。尽管对于假设统计模型要考虑样本大小的影响，精算方法仍最适合那些像索尔顿海槽等已经观测到一些震群的地区。幸运的是，震群终止似乎很适合简单的时间独立的泊松过程，该过程只有一个参数：平均震群持续时间。简单的统计数据意味着，尽管样本量很小，研究者仍可能很好地捕获过程。对于平均震群持时估计对索尔顿海槽和 San Jacinto 断层数据集的样本大小的敏感程度，直到样本量达到完整数据集的约 50% 时才开始稳定。在以前很少或者没有震群的地区，研究者推荐在 2016 年孟买海滩震群中采用的方法，该方法计算两个端元模型，一个在震群刚终止，一个在震群持续到预测间隔结束的时候。

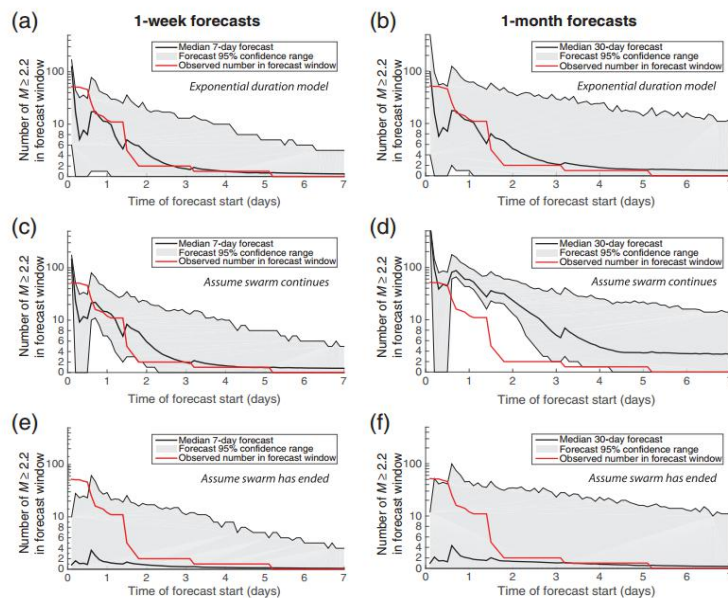


图 3 (a, c, e) 一周和 (b, d, f) 一个月预测 (中位数和 95% 置信区间), 从第一次  $M \geq 4.3$  的地震开始, 增量为 0.1 天。(a, b) 预测将群体持续时间视为指数随机变量。(c, d) 预测假设震群在预测持续时间内持续不减, 只留下早期的余震。

精算方法严重依赖于迄今为止观测到的震群，但由于多种原因，研究者的数据集可能受到限制，这使得很难确定持时分布的尾部是否被解决。对于任何样本总体，到目前为止观察到的最大震群持时几乎肯定低于可能的最大值。并且，当更多群体数据随时间变得可用，持时模型需要再次完善。在没有这样的数据的情况下，泊松指数模型仍然是一种简约的选择。

寿命长但相对不常见的震群也很难用精确方法来表征，长寿命震群活动很难用那些时间窗口通常是几周的准则来识别，因为那些准是被设计用于专门识别空间和时间上紧凑的地震活动。这种检测方案可以发现在以后基于视觉识别合成的更大震群的子突发地震，但不适合长寿命震群活动。研究者可以将长寿命震群定义为不可能由假设的指数模型生成的震群。对于平均震群持时为 6 天的指数持时模型，震群有大约 1% 的机会超过 27 天。如果一个震群持续超过这个持时，那么泊松终止模型应该被放弃以支持端元模型。

未来的工作可能需要开发更复杂的震群检测算法，这些算法能够更客观地识别更长寿命的震群，以及探索 ETAS 模型的使用，确定在较长寿命震群中使用时变背景速率是否比使用恒定背景速率能提供更好的预测。

来源：Llenos A L. & van der Elst N J. Improving earthquake forecasts during swarms with a duration model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2019, 109(3): 1148-1155.

## 卫星观测将有效改进对地震的监测和响应

美国爱荷华大学和美国地质调查局（USGS）的研究人员发现，从轨道卫星收集的数据可以提供有关大地震影响的更准确信息，从而有助于提供更有效的应急响应。卫星图像提供了有关地震发生位置、地表形变程度以及地震相对于人口中心的详细位置信息。尤其是在地震发生后的两到三天内，这些信息十分重要。将这些信息纳入由美国地质调查局国家地震信息中心（NEIC）管理的一套业务响应指南后，将给决策者、搜索和救援行动等提供重要帮助。

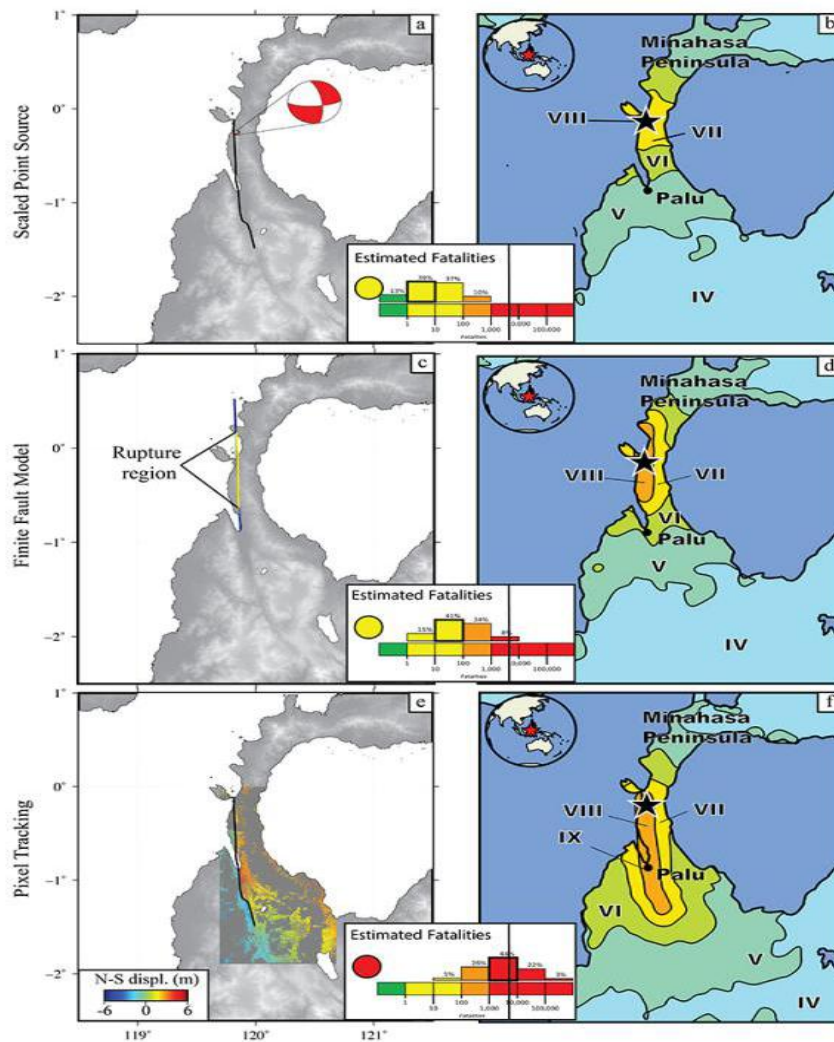


图1 地震响应产品的演变：详述2018年印尼地震预期死亡人数

相关研究成果发表在 2019 年 6 月出版的 *Remote Sensing*, 研究人员确定从每次地震中收集的卫星图像提供了新的信息, 从而改进了对地震影响的分析。因此, 形成了更准确的死亡人数和经济损失估计, 这对于在毁灭性地震发生后的几天和几周里的更准确决策至关重要。

确定地震影响的主要方法是测量全球地震活动的地基地震仪, 但是这些仪器并不是随处都可部署, 因此, 可能导致某些地震发生后的关键时刻内的影响信息不完整。此外, 一些地震更加复杂, 单靠地震仪无法精确测量。所以, 越来越多的地震专家转向大地测量方法——基于数学的地球形状变化研究, 利用卫星和其他仪器补充地震仪收集的数据。

爱荷华大学的科学家与美国地质调查局合作, 将卫星图像作为 NEIC 全球地震监测和响应工作的系统组成部分, 从而进行可操作性地震响应。研究人员对 2018 年 8 月袭击印度尼西亚的 6.9 级地震雷达图像进行了处理, 然后利用这一图像生成了地震模型及其所在地, 美国地质调查局直接利用这一模型更新了其灾害响应系统中对地面震动和地震影响的预测。事实证明, 这改善了地震影响分析, 进一步证明了卫星方法可以提供有益于社会的可行信息。

来源: William D B, Gavin P H. & David J Wald. Global Earthquake Response with Imaging Geodesy: Recent Examples from the USGS NEIC. *Remote Sensing*, 2019, 11 (11): 1357.

---

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