

地震科技前沿快报

2019 年第 11 期 （月刊 总第 11 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、地面峰值位移在预期时间达到饱和对地震早期预警的意义
 - 2、地震震级的转换及其对地震危险性分析的影响
 - 3、PLUM 地震早期预警算法在南加州的地震监测表现
-

地面峰值位移在预期时间达到饱和对地震早期预警的意义

美国西部正在开发地震早期预警原型系统 ShakeAlert，其可以根据由事件触发的、站点测量的地面 P 波峰值位移对地震震级进行实时估计。地震预警的算法假设各站点的位移测量值在统计学上是独立的，并且对数地面峰值位移与震级之间存在线性和时间无关的关系。本研究利用迄今为止最全的数据集（由 K-NET 和 KiK-net 强震网记录的、1997 年至 2018 年发生在日本的 M4.5~M9 级地震的 14 万多个垂向分量波形数据）来挑战这一基本假设。通过分析这些地震 P 波峰值位移随时间的演化，研究者发现，地震的震级-位移关系存在一个突变或称饱和，这取决于测量时间窗的长度。研究者用一个简单的、非确定性的地震断裂模型很好地解释了该饱和发生时的震级。基于这一饱和模型的预测，研究者开发了一个贝叶斯框架来估

计实时震级预测中的后验不确定性。相关成果发表在 2019 年 6 月的 *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 上。

大地震和小地震开始时是否一致是关于地震如何成核、破裂和停止的核心问题。自相似类破裂 (*self-similar crack-like ruptures*) 模型可以用来解释地震波频谱的许多关键特征 (Brune, 1970; Eshelby, 1957; Madariaga, 1978)。但是,地震的实际断裂过程在几个显著的方面偏离了自相似破裂的行为特征。Meier 等 (2017) 发现大地震的震源时间函数普遍遵循一个不确定性的演化规律; Kanamori (2005) 的研究表明破裂过程早期的测量不能预估地震最终的大小; Leyton 等 (2018) 分析了智利俯冲带的地震和大地波形,发现延长测量时间窗可以显著改善地震早期预警 (EEW) 的震源特征。而通过仔细分析地震或大地数据,可以观察到一种微弱的或概率形式的决定论。

本研究从美国西部正在建设的地震预警系统的角度,探讨了断裂决定论问题及其意义。研究者关注了地震记录的地面峰值位移 (P_d) 随时间的演化。 P_d 是地震预警系统中的一个关键参数,其精确测量是实时点震源描述算法的核心。通过模拟地震预警系统处理波形的流程,研究者处理了日本 K-NET 和 KiK-net 强震网记录的 14 万多个波形记录,这些记录来源于 2409 次 M4.5~M9.0 级地震。

该研究的新贡献包括: ①使用迄今为止的最全面数据集,确认和量化了对数峰值位移 P_d 与时间相关的震级饱和度; ②确定了 EEW 系统中 P_d 饱和与震级不确定性的关系; ③发展了快速计算基于位移的震级预测 (*displacement-based magnitude estimates*) 不确定性的贝叶斯方法。

地震峰值位移 P_d 随时间的演变表明,初始增长的普遍模式与地震断裂的确定性模型并不一致。研究者发现许多 EEW 系统的线性 $\log_{10}P_d$ -M 关系中存在着一个与震级相关的饱和度,这可以用一个简单而非确定的恒断裂

速度地震断裂模型来解释。该饱和模型为计算基于位移震级预测中的不确定性提供了进行快速分析的贝叶斯方法基础。

研究者通过评估确定性断裂模型的支持和反对证据，绘制了不同震级 Pd 随时间的演变图（图 1），其中 6 个 4.5~7.5 级的震级 $\log_{10}Pd$ （实线）的中值被归一化为 10 公里的震中距离。结果表明，每个震级 Pd 的中值普遍遵循较陡的初始指数级增长模式，然后随时间演变趋于平稳，该转折时间与预期的断裂持续时间成比例。

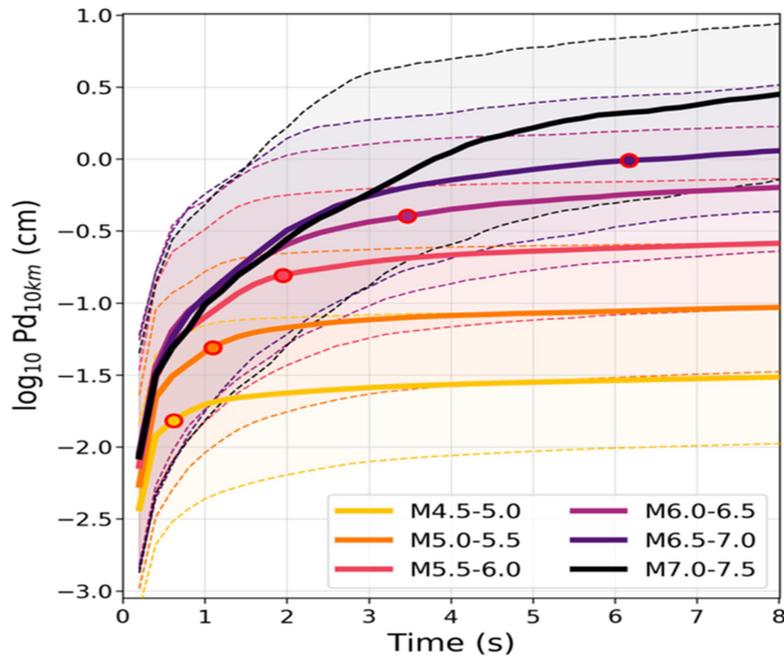


图 1 不同震级的 $\log_{10}Pd$ 随时间演变

使用简单的函数形式来表示似然分布和先验概率分布可以快速估计后验概率分布。图 2、图 3 和图 4 使用同一组观察结果和测量时间窗。每个时间窗中绘制了不同 $\log_{10}Pd$ 测量值的似然分布（图 3）和相关后验概率分布（图 4）。结果表明，测量时间窗长度对震级估计的不确定性有根本性的影响。短时间窗导致更大的后验不确定性，而且 Pd 接近饱和值时后验分布变得高度不对称。

本研究的贝叶斯公式中，后验分布 $P(M | \log_{10}Pd, TW)$ 对之前震级分布 $P(M)$ 的假设有一定敏感性。研究者使用适用于地震学广泛背景的 GR 先验 $P(M) \sim 10^{-M}$ ，获取了数据集的基础震级分布。由于 Pd 提供了一个震级演变的快照，所以如果测量时间窗超过破裂持续时间 ($Trup$)，震级估计可以提供非常丰富的信息。然而计算 Pd 更可靠，如何最好地处理实时地震数据流值得进一步探索。结合大地测量数据可能是一个更精确估计的潜在方案，也是 ShakeAlert 系统正在探索的功能。本研究发展的贝叶斯框架在原则上适用于大地 EEW 系统计算依赖于时间的不确定性。该方法能够对测量峰值静、动态地面位移进行可靠测量，但由于与 S 波形数据相关，导致报警速度明显较慢。

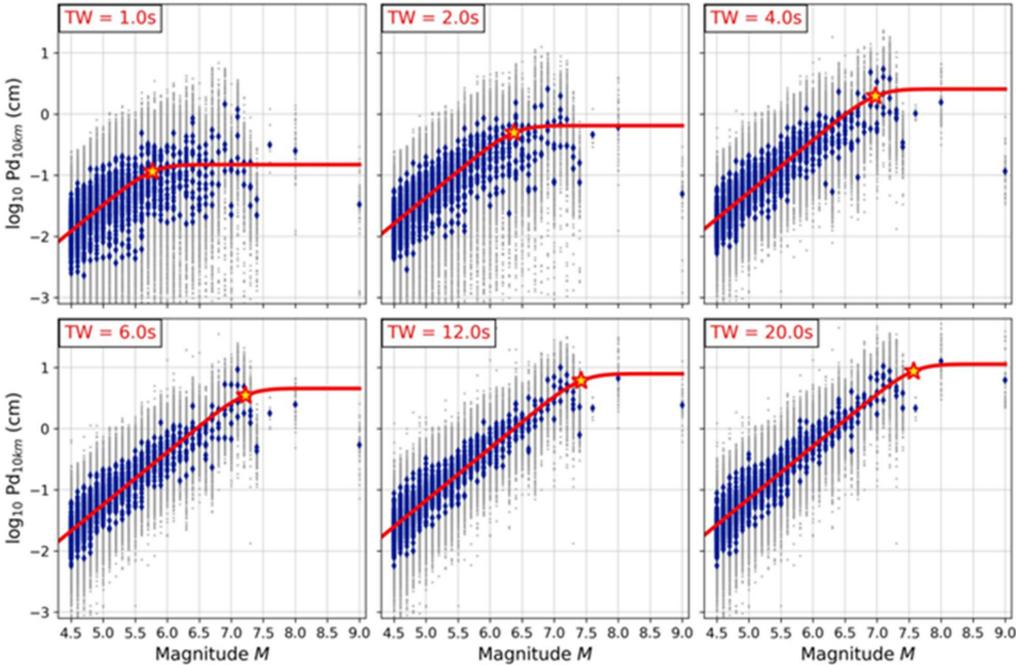


图2 震级 M 与 $\log_{10}Pd$ 关系图及与饱和模型预测结果对比

研究者对大范围地震震级的 Pd 测量结果似乎并不支持断裂决定论，至少在较强震级下是这样。Colombelli 等 (2014) 观察到大地震时 Pd 的初始增长较慢，但如图 4 所示，这种行为很难被实时识别。一种较弱的决定论形式，即最终地震规模与几十秒后的滑移脉冲行为 (slip pulse behavior)

相关。虽然这是相当可信的，但仍然超出了单以 P 波形进行 Pd 测量的分辨率。对近源记录的仔细分析表明，类脉冲破裂行为可能有助于深入了解断裂决定论的基本问题，但仅有限适用于目前构建的 EEW 系统。

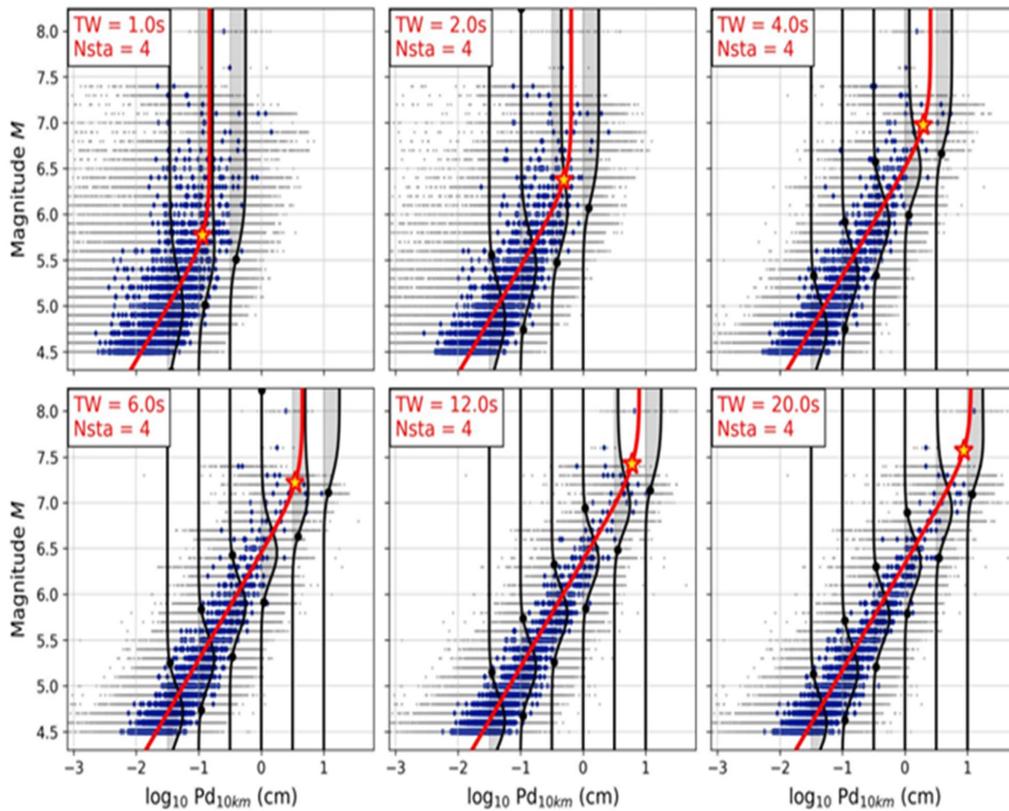


图 3 震级 M 与 $\log_{10}Pd$ 关系图及与似然分布对比

在该领域取得更多科学进展之前，依赖于 P 波 Pd 测量的 ShakeAlert 等 EEW 系统应该在更谨慎的不确定性断裂假设下工作，并在地震预测中纳入与时间相关的震级不确定性。在这方面，2011 年 3 月的 M9 级东日本大地震（Tohoku-Oki）是一个特别值得注意的例子。如果在 P 波开始后的短时间内观察波形振幅，几乎没有迹象表明这次地震会发展成有史以来最大的地震之一。但事实上，东日本大地震却以其瞬间能量释放之快速而闻名于世，特征波形现象至少在开始的 4 秒之后才显现出来，而直到断裂后期，其归一化的位移振幅才明显小于 2003 年的 M8 级十胜-隐歧

(Tokachi-Oki) 地震。这种缓慢的初始增长现象到底是东日本大地震所特有的，还是其他大地震常见的，仍是一个悬而未决的问题。但研究结果表明，最初几秒钟的断裂状态可能无法决定最终的地震规模。

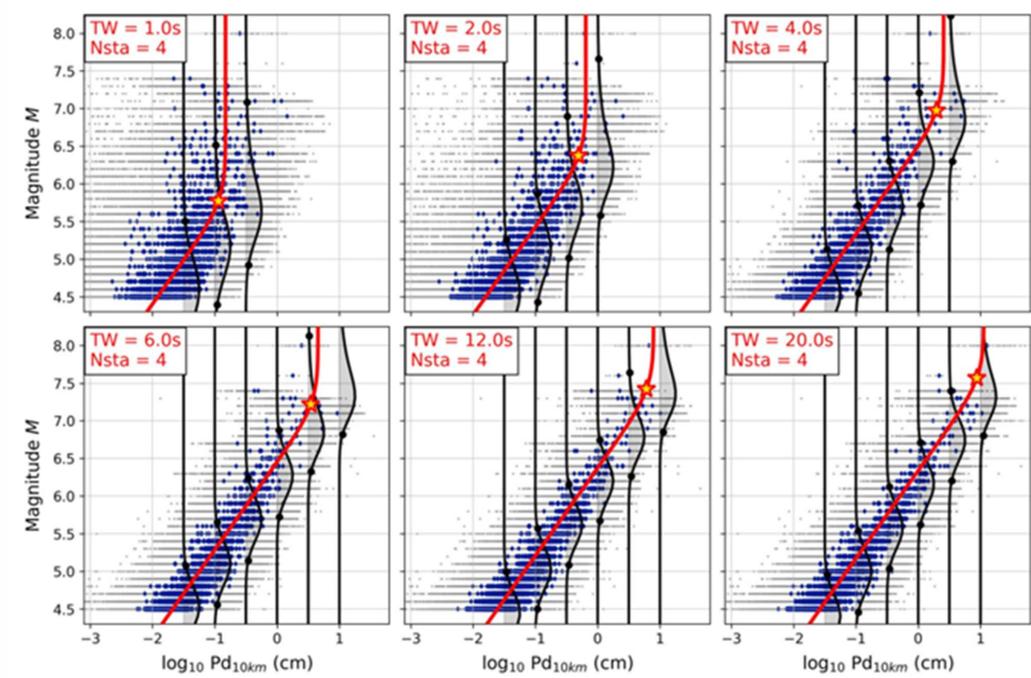


图4 震级 M 与 $\log_{10}Pd$ 关系图及相关后验不确定性

来源: Trugman D T, Page M T, Minson S E. & Cochran E S. Peak ground displacement saturates exactly when expected: Implications for earthquake early warning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124, 4642–4653, doi: 10.1029/2018JB017093.

地震震级的转换及其对地震危险性分析的影响

本研究的目的是证明在地震危险性研究中由于选择没有任何统计基础的震级标度方程产生的偏差。印度特里普拉邦的地震目录被用于本研究，使用适合于该区域的各种比例方程对目录进行均质化，然后证明了在参数上产生的偏差，如完整性震级（magnitude of completeness, M_c ），古登堡—里克特（G-R）递归关系的 a 和 b 值，最大震级（ M_{max} ）和峰值地面加速度（PGA）。观察到 M_c ， a 和 b 参数的标准差分别为 0.23、0.27 和 0.037，发现 M_{max} 和地面运动估计的最大变化分别为 0.7 个震级单位和 0.2g。然后，证明了在克服观测变化后区域破裂特征的稳健性，发现震源破裂行为的变化趋势似乎不受震级标度方程变化的影响，观察到基于破裂过程计算的 M_{max} 高于概率方法计算的 M_{max} 。最后，研究人员利用 M_{max} 估算的这种差异来评估特定研究区域的震级标度方程的适用性。相关成果发表在 2019 年 7 月的 *Journal of Seismology* 上。

地震目录是进行地震危险性评估所需的重要数据来源之一。地震目录提供了研究区域内所发生地震的空间和时间信息，并在建立 G-R（古腾堡-里克特）递归关系中发挥重要作用，这有助于了解该地区的地震活动状态。因此，地震目录应该仔细编制。然而，只有在检查了同质性、完整性和相关事件的去除之后，编制的地震目录才可用于进行地震危险性分析。这可以通过均质化、去集群和估计完整性的大小来进行。本研究涉及地震目录处理的第一步也是最重要的步骤，即均质化（将不同震级标度转换为共同参考震级标度的过程），以及它在估计印度特里普拉邦地震活动区域的潜在地震源最大震级和峰值地面加速度上的影响。

印度气象局（IMD）、印度地震和全球导航卫星系统网络（ISGN）等国家机构以及美国地质调查局（USGS）和欧洲地中海地震中心（EMSC）等国际机构在区域范围和全球范围内监测和记录地震活动。然而，它们以

不同的震级表示地震的大小。最常用的是区域震级标度/近震震级 (M_L), 其他常用的震级标度是面波震级 (M_S) 和体波震级 (m_b)。 m_b 、 M_S 和 M_L 的缺点在于它们在各种较高震级水平下倾向于饱和。因此, 将这些震级用于大地震会导致低估地震的大小。Hanks 和 Kanamori (1979) 提出了一种称为矩震级 (M_W) 的非饱和震级尺度, 它与地震中释放的地震能量有关。因此, 为了真实地表示地震事件的大小, 将所有震级标度转换为矩震级标度变得十分必要。而将所有震级标度转换成矩震级的这个问题可以通过使用震级标度方程来解决。

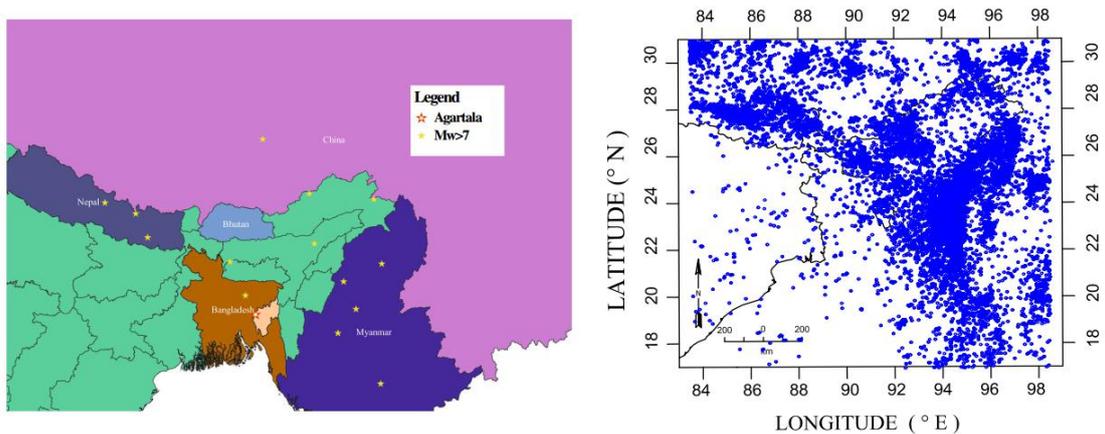


图 1 研究区的主要地震 (左); 已汇编的研究区地震位置 (右)

各种研究人员通过采用标准最小二乘回归、正交标准回归、一般正交回归和卡方回归等不同的回归技术建立了控制震级标度转换的经验关系。随着最新的地震目录和回归技术的改进, 已经开发了许多新的方程。选择合适的震级转换方程是最重要的, 因为它可能引起地震危险参数的变化。关于使用震级标度方程的当前实践仅基于专家判断, 而没有任何统计基础。考虑到研究区域的可用数据对, 很少有作者开发新的方程。本文论证了在估计震级完整性和地震活动参数 ($G-R$ 递归关系的 a 和 b 值) 时选择震级标度方程引起的偏差, 及其对地震源和地面最大震级估计的影响, 还讨论了区域破裂特征在抑制由震级标度方程的选择所产生的偏差方面的潜力。

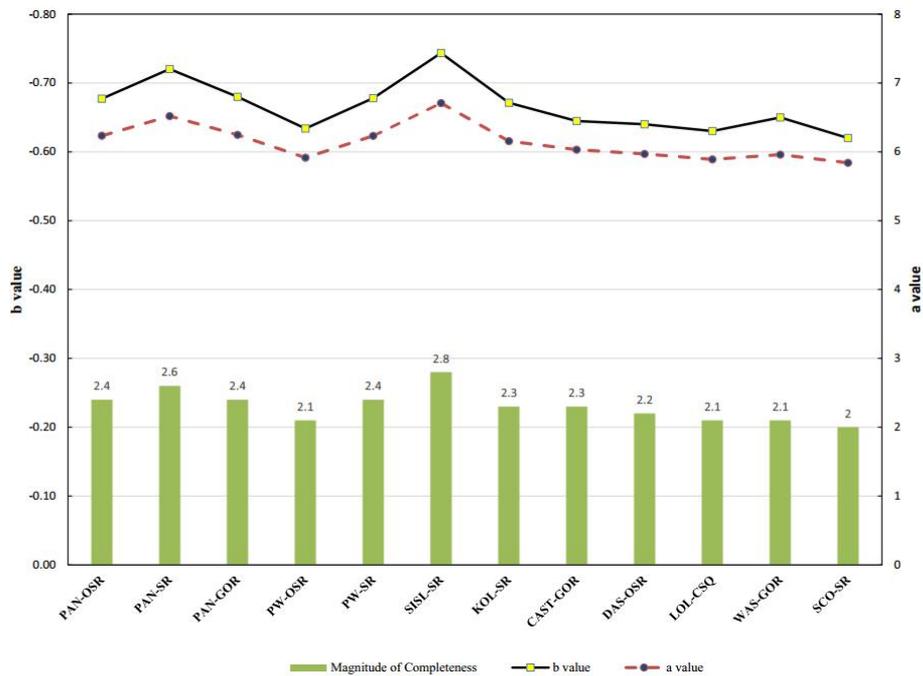


图2 Mc的变化和不同震级标度方程的地震活动参数

研究者编制了特里普拉邦和印度东北部相邻地区的地震目录，地震数据均来自世界各地的各个机构，编制的目录包括以不同震级标度报告的20980次地震事件，例如 M_L ， m_b ， M_S 和 M_W 。然后，分析了各种回归方法的特点，根据地震目录，利用标准最小二乘回归(SR)和正交标准回归(OSR)来开发新的震级标度方程。为此，分析了具有700 km半径的地震研究区域中特里普拉邦地震活动性目录中的完整性震级，以及作为各种震级标度方程的函数中的地震活动性参数。

之后，研究者分析了计算最大震级的方法，先通过Kijko和Sellevoll (1989)提出的概率方法研究地震活动参数偏差对最大震级估计的影响。然后，考虑区域破裂特征，计算不依赖于地震目录的稳定 M_{max} 。为此，开发了三种不同的地震目录：一个未被去除（独立事件）的目录，一个去除最大百分比的目录，以及一个去除最小百分比的目录，以研究破裂特征。之后，分析了潜在震源最大震级估算的差异以及对最终地面运动估算的

影响，并讨论了稳定最大震级估算中区域破裂特征的稳健性。

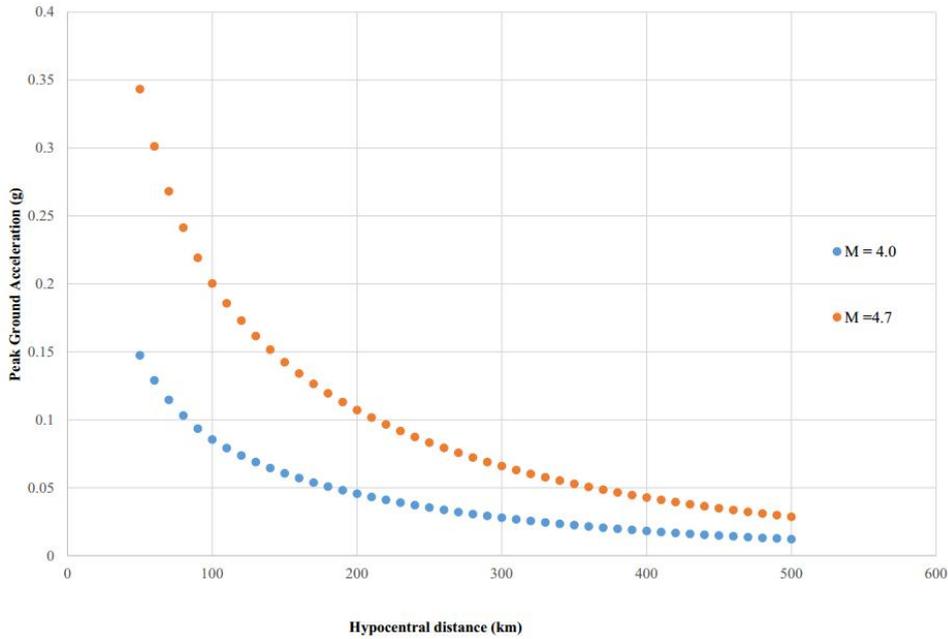


图 3 不同 M_{max} 估计值的峰值地面加速度的变化

地震目录的同质性对于危险性研究至关重要。随着方程数的增加，大多数人基于无统计基础的判断选择标度方程。但是，由于判断因人而异，因此结果会受到个人判断的影响。在这项研究中显示选择震级标度方程可以为完整性震级产生 0.23 U 的偏差。例如，由 SCO-SR 均质化的目录报告完整性的大小为 2.0，而由 SISL-SR 均质化的目录报告完整性震级大小为 2.8。观察到这两个目录的 a 和 b 值的差异分别为 0.87 和 0.12。在本研究中，完整性震级的差异影响 a 和 b 参数的估计，这些参数构成了地震危险性研究和地震预报的基础。

G-R 关系的 b 参数在估计每个断层的最大震级以及用于量化震级不确定性的概率地震危险性分析 (PSHA) 研究中起着至关重要的作用。最大震级和地面峰值加速度的估计值的差异可以分别高达 0.7 个震级单位和 0.2g。这可能导致两个不同的人对同一地区产生显著不同的认识，使其对

该地区地震状况的了解可能有所不同。这种情况可以通过两种方式纠正：

(1) 使用区域破裂特征估计最大震级，该破裂特征对地震目录的变化或所使用的震级标度方程的选择是不透明的。断层破裂的区域性行为是地震危险性研究中更有效的工具，因为它不依赖于地震活动性参数。但是，在区分长度元时应小心谨慎。建议在仔细检查区域破裂特征图后区分长度元，并由专家判断佐证。

(2) 标准化选择震级标度方程的程序。可以采用模型选择的统计检测来以更有条理的方式选择震级标度方程。建议用统计分析来支持震级标度方程的选择，以便消除个体视角产生的偏差。此外，区域破裂特征可以用于评估震级标度方程对特定研究区域的适用性。区域破裂特征有助于科学家更多地了解震级标度方程的稳健性，以表征该区域中地震源的实际破裂行为。

来源：Anbazhagan P. & Balakumar A. Seismic magnitude conversion and its effect on seismic hazard analysis. *Journal of Seismology*, 2019, 90(3):1155-1167.

PLUM 地震早期预警算法在南加州的地震监测表现

绝大多数地震早期预警系统使用的是基于震源的方法，利用 P 波估计地震的位置、震级以及起始时间，然后利用地面运动方程预测可能发生强烈摇晃的地区。而日本的局部无阻尼运动传播（propagation of local undamped motion, PLUM）地震早期预警（EEW）算法则是基于观测到的地表运动直接决定预警地区。来自美国地质调查局和加州理工学院等机构的多位研究者利用在 2012—2017 年间发生的 193 次 3.5 级以上的地震以及 ShakeAlert 系统中测试和认证的 49 次地震对 PLUM 进行评估。结果表明，当应用的触发阈值 I_{mmi} 低于日本地区时，PLUM 能够成功发出地震预警。例如使用两个站台，第一个的触发阈值 $I_{\text{mmi}}=4.0$ ，第二个站台的阈值为 2.5 时 PLUM 能够成功预测出 13 个 5.0 级以上的地震中的 12 个，并且没有发出错误警报。PLUM 在一定程度上比基于震源的算法提供更早的预警，而且能够减少震源附近（具有强烈地表运动）无法预警区域的大小，因此可以应用到现有的基于震源的 EEW 系统中。相关成果发表于 2019 年 8 月的 *Bulletin of the Seismological Society of America*。

世界上大多数 EEW 都是通过对震源参数的估计然后利用地表运动方程对不同地区地表摇晃程度进行计算。ShakeAlert 作为其中一种预警系统在 2018 年末也开始在洛杉矶地区发送有限的公共预警。但是，是以二进制形式进行的（有或没有预警），而不能提供关于地表运动的任何信息。随着近些年的发展，ShakeAlert 已经测试了多种基于震源参数的 EEW 算法。结果表明这些算法存在许多缺陷，例如低估地震造成的地表运动、将多个独立地震时间预报成一个或者将一次地震分离成多个。

PLUM 不同于基于震源参数的 EEW, PLUM 不需要对震源参数进行估计，而是直接通过对观测到的实时地表运动进行分析计算。其在 2011 年东京 9.0 级地震和 2016 年熊本 7.1 级地震中都有良好的预测表现。对于美国

南加州地区而言，其具有较少的地震监测台，地震主要是由 5 级以上的地震构成。最为重要的是，**ShakeAlert** 使用了更低的地表运动阈值，这会对算法的表现产生重要影响。

表 1 评估 PLUM 表现的六种条件

	描述
1	单站
2	双站, $\Delta I_{MMI}=0:0$
3	双站, $\Delta I_{MMI}=0:25$
4	双站, $\Delta I_{MMI}=0:5$
5	双站, $\Delta I_{MMI}=1:0$
6	双站, $\Delta I_{MMI}=1:5$

研究者利用一种简单的基于事件的方法对 **PLUM** 算法进行评估。同时，将算法报道的地震起始时间、位置和震级等信息与美国国家地震监测台网（**ANSS**）综合地震目录（**ComCat**）报道的进行比较。对于起始时间而言最大的差值为 15s,最大的震中距为 100km, 最大震级差为 2 级。在这些范围之内，被认定为预警正确，之外，被认为预警错误。而当库中地震没有相关算法解与其对应时，则被认为地震被遗漏。但是，**PLUM** 不提供任何震源信息，而是提供观测站位置以及更新的传播时间。因为需要利用地震波的速度对震源到观测站的传播时间进行估计。对于库中的每一个事件，最小和最大允许预警时间由下式给出：

$$T_{\min}=D/V_{\max} - a, T_{\max}= D/V_{\min} + b$$

D 表示库中的地震事件震源与第一个触发的观测站之间的震中距。

$$V_{\max}=6.5\text{km/s}, V_{\min}=2.0 \text{ km/s}, a=1\text{s}, b=5\text{s}。$$

评估采取了两套数据进行，第一套数据为 2012—2017 年发生的 193

次 3.5 级以上的地震，第二套数据为 ShakeAlert 系统中测试和认证的 49 次地震（其中包括 17 次历史地震事件和 32 次有问题的地震事件）。此外，为了比较不同阈值对 PLUM 表现的影响，根据检测站数量、不同监测站阈值差 (ΔI_{mmi}) 等不同设置了 6 中评估条件（见表 1）。

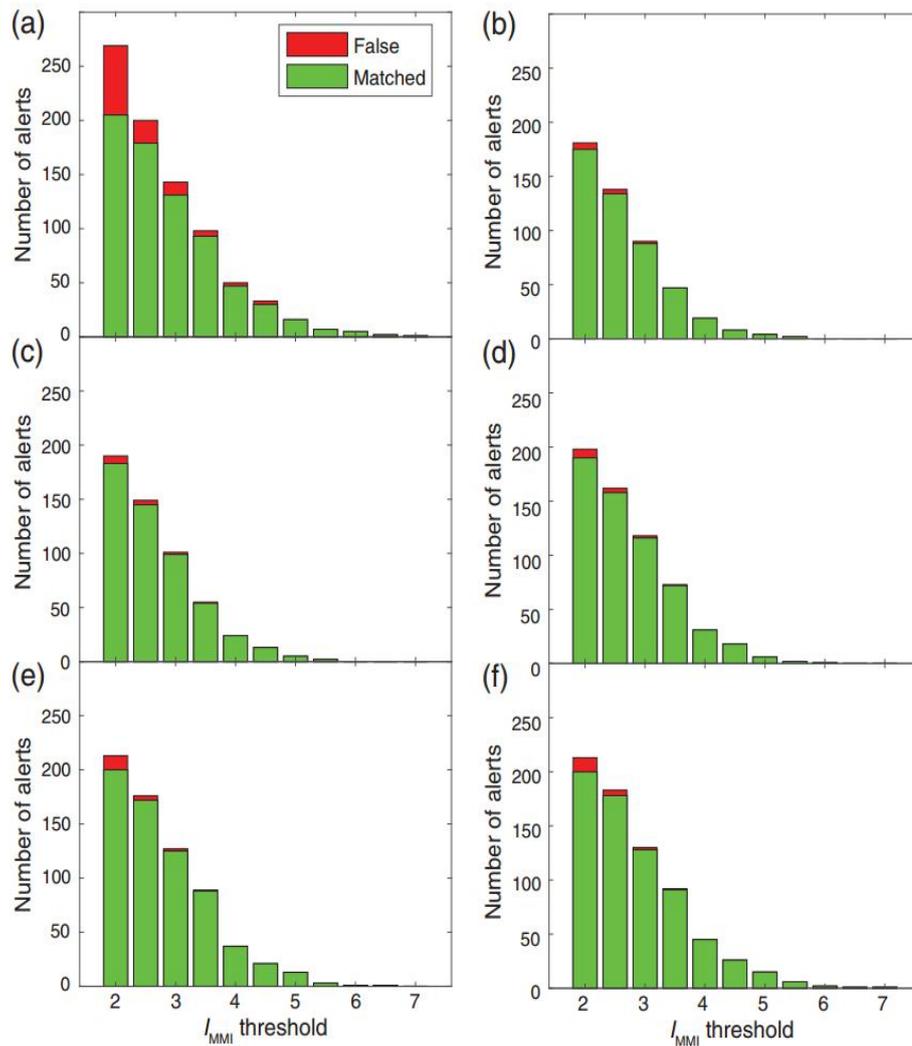


图 1 正确的和错误的预警数与 I_{mmi} 的关系（绿色表示正确预警，红色表示错误预警；

a、b、c、d、e、f 分别对应条件 1、2、3、4、5、6）

(1) 2012—2017 年间南加州 195 次 3.5 级以上地震数据分析。 总的地震事件数量要超过 193，因为还存在一些 3.5 级以下的地震（大于 2.0），

图 1 给出了每种条件下成功预警和错误预警的数量与阈值 I_{mmi} 的关系。和期待的一样，在所有条件下，低阈值往往对应了更高的预警数。此外，对于低阈值的情况，错误预警的数量和比例也会更高。例如，条件 1 中当阈值为 2.0 时，总预警数为 368，包括 205 次正确预警，99 次重复预警与 64 次错误预警。同样，在条件 1 中当阈值为 4.0 时，总预警数下降到 51，包括 47 次正确预警 1 次重复预警和 3 次错误预警。低阈值的错误预警主要是由局部噪音造成的。

两个监测站的条件比只有一个监测站时，发出更少的预警，而且随着第二个预警阈值的减小，预警数量会逐渐增加。更重要的是，两个监测站时错误预警数也会减少。当阈值为 2.0 时，条件 1 和条件 6 总的预警数是相似的（205 和 200），但是错误预警数由 64 下降到了 13。图 2 显示了每一个条件中错误预警的数量和比例与阈值的关系。对于条件 2 来说，当阈值大于等于 3.5 时，错误预警数降为 0。对于条件 3-6 而言，当阈值大于等于 4.0 时，预警数同样降为 0。而条件 1 当阈值小于 5 时，就会产生错误预警。

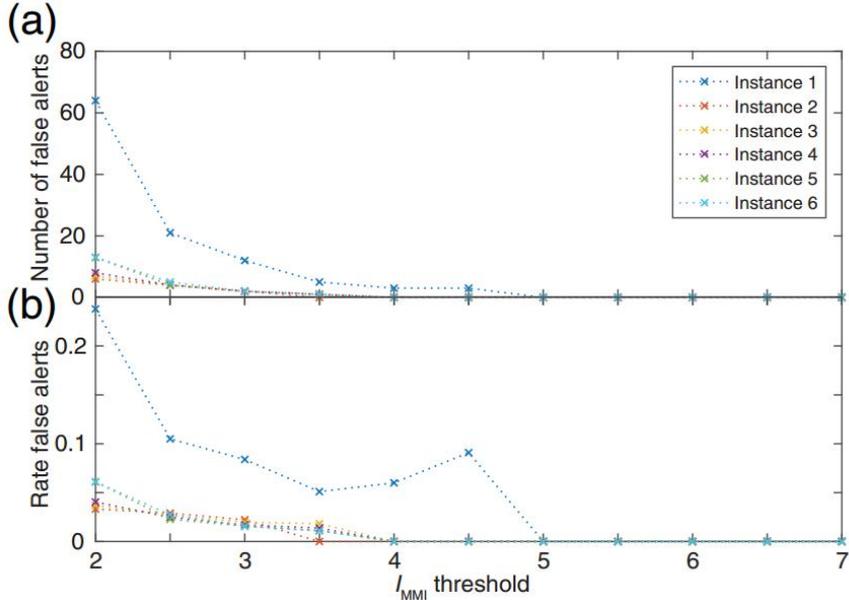


图 2 3.5 级以上地震数据中错误预警数 (a) 和错误预警比例 (b) 与 I_{mmi} 的关系

在条件 6 中遗漏地震事件与阈值的关系也有一定规律。评估的地震主要包括一些低震级地震（3.5 级、4.0 级、4.5 级和 5.0 级）。结果表明，随着第一个检测台阈值的增加，遗漏地震的数量和比例稳定的增加。这个结果和预期的一致，因为很少能够产生 $I_{\text{mmi}}=3$ 的地震，所以 $I_{\text{mmi}}=6$ 的地震的数量要少得多。

(2) ShakeAlert T&C 测试体系 49 次历史地震数据分析。首先测试南加州地区 17 次历史地震事件。结果显示，在条件 6 中 PLUM 具有与 3.5 级以上地震数据体系相似的错误预警率（图 3），当第一个观测站阈值大于等于 3.5 时，没有错误预警。当地震震级较低时，遗漏的（missed）地震比例要更高，这是因为记录这些地震数据的地震观测台密度较低。在检测延迟方面，这套数据要比 3.5 级以上地震数据体系有着较高的检测延迟。例如，在条件 6 中，当阈值为 4.0 时这套数据的延迟时间为 5.28S，而后者为 5.07 秒，较高的检测延迟同样归因于监测站的低密度。

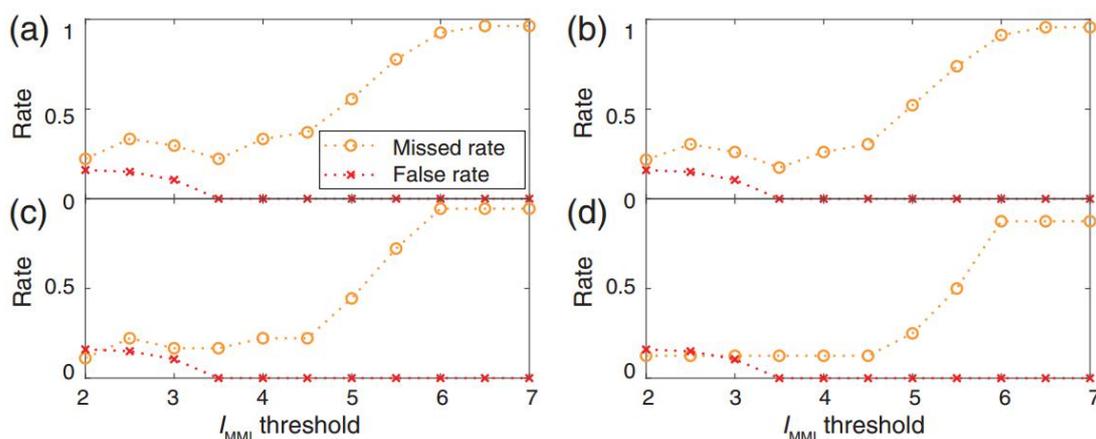


图 3 17 次历史地震数据中条件 6 遗漏预警和错误预警比例与 I_{mmi} 的关系

(a: 3.5 级地震; b: 4.0 级地震; c: 4.5 级地震; d: 5.0 级地震)

对有问题的地震事件的检验结果表明，在条件 6 中当第一监测站阈值为 2.0 时，错误预警数达到了 13，而当阈值增加到 3.5 和 4.0 时，错误预警数降到了 1。当阈值大于 4.0 时，没有错误预警。而阈值为 3.5 和 4.0 时，看似错误的预警其实是属于异常的高振幅事件，并不是真正的错误预警。

因此，可以说即使是利用有问题的地震事件进行检验，当阈值大于等于 3.5 时，PLUM 同样不会发出错误预警。

综上，两套数据的评估结果均表明，将两个监测站应用到 EEW 中能够减少错误与预警的风险。而 PLUM 在预警 5 级以上的地震中的表现可以通过两个监测站（第一个阈值为 4.0，第二个阈值为 2.5）得到完善，甚至不会产生错误预警。结合实际预警需求，建议在以后的 EEW 中采取这种方案。评估结果表明，PLUM 的确能在较低阈值的情况下（相比于日本）成功预警中级以上地震（5.0 级以上）而不会发出错误预警。即使用有问题的地震事件进行评估时，PLUM 依然没有发出一次真正意义上的错误预警。因此，可以考虑将 PLUM 应用到现有的基于震源参数的 EEW 系统中，包括 ShakeAlert，可以改善 EEW 系统的表现，并且降低检测延迟时间。

来源：Elizabeth S Cochran, Julian Bunn, Sarah E Minson, et al. Event detection performance of the PLUM earthquake early warning algorithm in Southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2019, 109(4):1524-1541.

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