

地震科技前沿快报

2024 年第 8 期（月刊总第 67 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、利用古地震记录预测地震

基于古地震数据汇编的地震复发周期统计模型可用于进行大地震预测。研究人员比较了五种模型，并使用贝叶斯模型平均法预测生成了全球 93 个断层段上大地震随时间变化的概率，结果表明大地震复发没有通用模型，处理数据点少和测量误差较大的古地震记录时，要采用综合预测方法。

2、利用电信光纤网络进行地震监测

研究人员通过分析在陆基电信电缆上获得的数据，探测到了包括弱震在内的、广泛震级范围内的地震，分析表明，利用电信光纤网络进行地震定量分析是可能的，这种技术适用于地球的全球化监测和人口稠密地区日常地震活动监测。

3、贝叶斯算法下利用大地测量多源数据反演震源参数的简易加权方法

在贝叶斯算法约束下，更高精度地反演震源断层的几何形状与滑移参数成为大地测量反演领域的研究热点。本研究提出了一种在贝叶斯框架下简单易推广的震源断层参数多源数据联合反演加权方法，并且该方法可以推广到其他非线性搜索算法，同时也证实了该方法在复杂地震中的适用性。

利用古地震记录预测地震

沿着活动断层对大地震进行预测对于地震灾害评估具有至关重要的意义。基于古地震数据汇编的地震复发周期统计模型提供了一种预测工具。研究人员比较了五种模型，并使用贝叶斯模型平均法（**Bayesian model-averaging**）预测生成了全球 **93** 个断层段上大地震随时间变化的概率。这种方法可以更好地利用与古地震记录相关的测量误差，并解释了模型选择过程中的不确定性。研究结果表明，尽管目录中大多数断层段（**93** 个断层段中的 **65** 个）倾向于单一最佳模型，但 **28** 个断层用贝叶斯模型平均法更好。此外，研究人员提供了未来 **50** 年的地震破裂概率，并预测了所有断层段下一次破裂的发生时间。结果表明，对于大地震复发并没有通用的模型，当处理具有少量数据点和较大测量误差的古地震记录时，需要一种综合预测方法。相关研究成果发表在 **2024** 年 **3** 月的 *Nature Communications*。

大地震是最具破坏性的自然灾害之一，因为它不仅会造成大量人员伤亡，还会导致广泛的基础设施破坏。弹性回弹理论构成了应变积累和释放的标准地震周期的基础。这一理论基础，结合对长期地震记录的分析，支持用更新过程（**renewal process**，一个更新过程是一个统计模型）来模拟沿同一断层的大地震的复发次数。以前利用古地震资料进行地震预报，主要是根据一种信息准则（如赤池信息准则，**Akaike Information Criterion, AIC**）从许多候选模型中选择一个最佳模型。这种方法忽略了模型可能存在不确定性的事实，即哪个模型是最好的，存在不确定性。在实际应用中，这种模型的不确定性可能比每个模型中参数估计的不确定性有更大影响，尤其是当样本规模相对较小时。

研究人员利用全球 **93** 个断层段的古地震记录，使用 **5** 个候选更新过

程研究了大地震的重现模式，分别为泊松过程、伽马过程、威布尔过程、布朗通过时间（Brownian passage-time, BPT）过程和对数正态过程。研究人员使用贝叶斯模型平均法来进行未来大地震的概率预测，以解释模型的不确定性。同时，将每个模型的预测与贝叶斯模型平均法的预测进行了比较。此外，研究人员还给出了未来 50 年内沿每个断层段至少发生一次大地震的概率分布。最后，进行了留一法检验（leave-one-out test），以比较贝叶斯模型平均法预测和泊松预测（常用于国家危险模型）的性能。

1. 没有大地震的通用模型

对于模型平均法，研究人员为所有 93 个断层段的每个模型计算了渡边-赤池信息准则（WAIC）权重（图 1）。对于权重 ≥ 0.95 的单个模型，模型平均法预测结果与该模型预测结果非常接近。其中，威布尔模型、伽马模型和 BPT 模型分别最好拟合了 41 个（44.1%），5 个（5.4%）和 4 个（4.3%）断层段，对数正态模型最好拟合了 15 个（16.1%）断层段。泊松模型的权重小于 0.7。其余 28 个（30.1%）断层段的每个单一模型的权重都 < 0.95 ，表明模型平均法对这些断层段来说最适合。

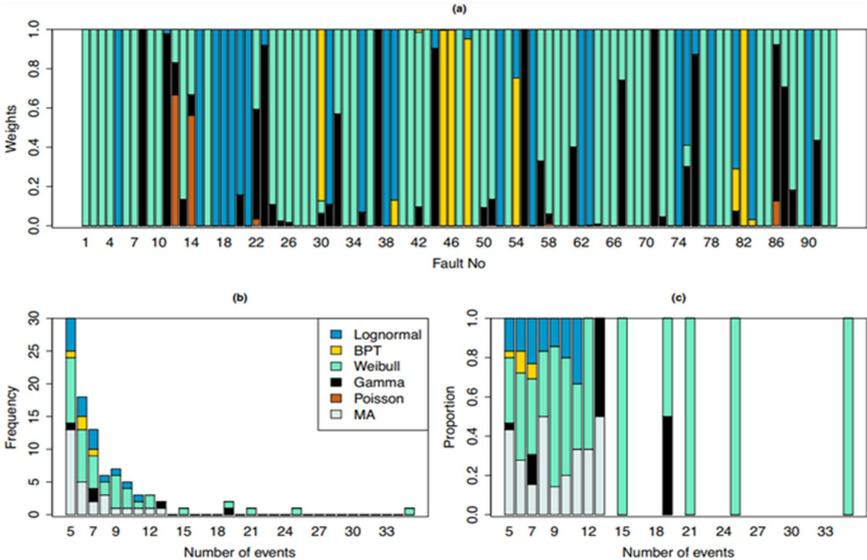


图 1 93 个断层段上每个模型的 WAIC 权重

从图 1a 的 WAIC 权重可以看出，威布尔模型的预测性能并不都优于其他模型。对于 33 个断层段，威布尔模型的 WAIC 权值接近于 0，表明对于这些断层段而言，其他模型的预测精度要远远好于威布尔模型。在 11 个圣安德烈斯断层段中，研究人员找到了三种不同的最佳拟合模型。尽管它们表明每个断层段都表现出准周期行为，但威布尔模型最适合样本量较大的断层段。目前，尚不清楚这是否仅仅是采样的结果，还是由于不同断层段之间的重复行为的真正差异，包括邻近断层段的相互作用。

图 1b 和 1c 中的最佳模型频率表明，与 BPT 更新过程相比，威布尔更新过程更有可能最好地再现具有较长记录的断层段的复发时间。以威布尔更新过程为单个最佳模型的断层段比以 BPT 更新过程为单个最佳模型的断层段平均多发生约 1.59 倍的大地震。以 BPT 更新过程为单一最佳模型的断层段，拥有的古地震记录均小于 10 次。当删除每条记录中的最后一次地震时，发生超过 15 次地震的断层段都以威布尔更新过程作为单一最佳模型，只有一个包含 12 个地震的断层段将 BPT 更新过程作为单一最佳模型。因此，很难确定最佳模型对样本量的依赖是由于最佳模型的实际差异，还是仅仅是数据较少的结果。

2. 概率预测

图 2 显示了未来 50 年内沿每个断层段至少发生一次大地震的概率。未来 50 年发生大地震的最高概率出现在圣安德烈斯断层的 Carrizo 段和 Wrightwood 段，以及苏门答腊大逆冲断层的 Mentawai 段，中位数概率超过 50%。未来 50 年发生大地震概率最低的是东昆仑断裂带的库赛湖段、Futugawa 断裂带、贺兰山断裂带的山前东段和祁连山断裂带的老虎山段，其概率 95% 可信区间上限均小于 0.001%。平均而言，板块边界断层在未来 50 年内发生大地震的可能性是板内断层的 32 倍。

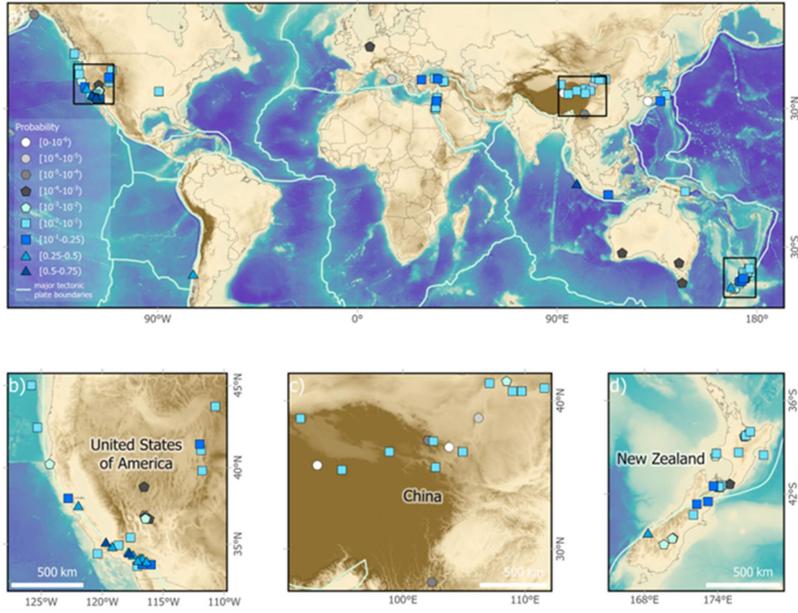


图 2 93 个断层段未来 50 年内发生地震的概率预测

此外，模型平均法和最佳模型法对未来 50 年内地震发生概率的预测有显著差异。对于圣安德烈斯断层的 Thousand Palms 段，两种方法预测概率的最大差异约为 14%，其中模型平均法的预测概率高于最佳模型法。尽管如此，对于大约 90% 的断层段，这种差异小于 0.1%。

3. 聚类或周期性行为

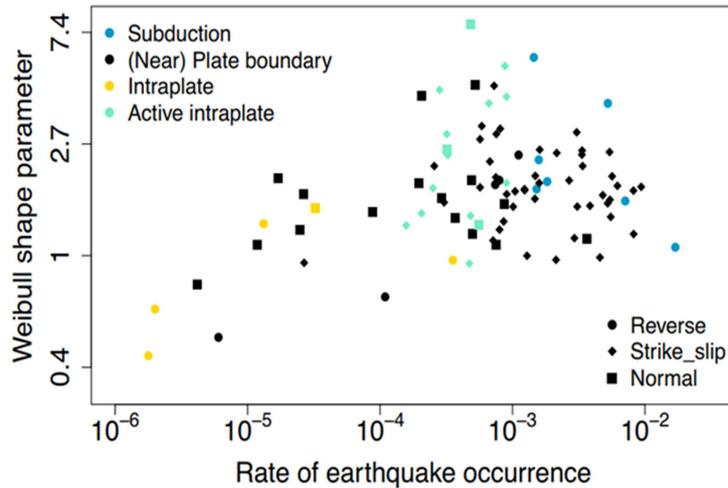


图 3 威布尔形状参数与断层参数的关系

基于伽马和威布尔更新过程的参数估计，五个断层段表现出聚类行为（形状参数的 95% 可信上限小于 1），它们是 Cadell、Dunstan、Lake Edgar、

Solitario Canyon 和 Waitangi，这些地方的地震发生率都很低。6 个断层段表现出近泊松行为，分别是 Dead Sea Beteiha、Dead Sea Qatar、Dead Sea Taybeh、Langshan Piedmont Xibulong East、Reelfoot 和 Wharekuri。其余 82 个断层段表现为准周期行为。威布尔更新过程的形状参数与 93 个断层段的地震频率、构造背景、断裂类型和地震次数之间回归关系（图 3）表明，当地震发生率增加 10 倍时（例如从 0.0001 到 0.001），威布尔更新过程的形状参数增加约 24%。这表明，地震频率较高的断层段往往具有更强的周期性行为。

4. 评估预测误差

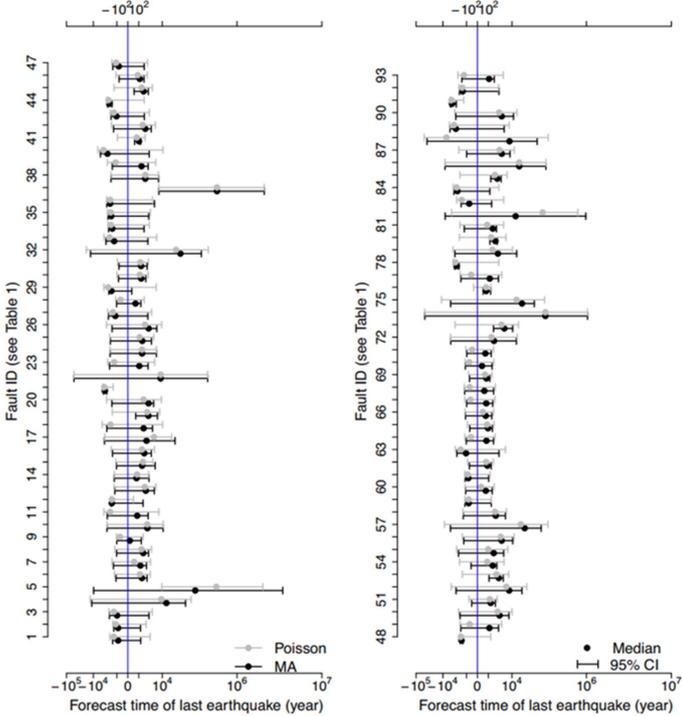


图 4 最近一次地震发生时间的回顾性预测

对于每个断层段，研究人员删除了记录中的最后一次地震，以使用模型平均法和单一最佳模型法进行回顾性预测。对于 49%的断层段（93 个断层段中的 46 个），单一最佳模型与完整数据集的模型相同。对于地震记录较少的断层段，单一最佳模型似乎更有可能发生变化，同时，这些断层

段的地震次数比单一最佳模型保持不变的断层段的地震次数少 27%。这表明古地震数据的模型有很大的不确定性，并再次表明模型平均法是可取的。

图 4 显示了最后一次地震发生时间预测的 95%可信区间，其中 0 表示记录的最后一次地震发生时间的平均值。在 93 个断层段中，模型平均法的预测成功地覆盖了 79 个平均真实发生时间，泊松预测成功地覆盖了 89 个平均真实发生时间。乍一看，这可能表明泊松预测优于模型平均法预测。然而，它是通过更宽的可信区间来做到这一点的（是平均模型预测可信区间的两倍）。也就是说，它在预测中有更大的不确定性。因此，当有足够的地震记录时，模型平均法预测通常优于泊松预测。但是，当可用的数据有限时，泊松模型可能仍然是一个有价值的模型。

综上，研究人员提出的贝叶斯模型平均法明确考虑了基于数据和相关测量误差的模型不确定性，而不是依赖于最佳模型的选择。与单一最佳模型法或泊松过程相比，模型平均法提供了更多信息和更准确的预测。本研究中提出的地震概率也为未来全球范围内的地震评估提供了一个可检验的假设。

来源：Wang T, Griffin J, Brenna M, *et al.* Earthquake forecasting from paleoseismic records. *Nature Communications*, 2024, 15: 1944.

利用电信光纤网络进行地震监测

激光干涉法可以远程测量地震引起的电信电缆的微观长度变化。电信电缆的大覆盖范围和数据传输的兼容性使其在偏远地区和人口密集地区（在这些地区，光纤网络普遍存在）的探索中极具吸引力。然而，对其结果的解释仍然受到可用数据集数量有限的影响。研究人员系统地分析了一年半以来在陆基电信电缆上获得的数据，并将其与同一位置的地震传感器数据进行了比较，成功地探测到了包括弱震在内的、广泛震级范围内的地震。此外，研究人员确定了电缆的探测概率与地震震级和距离之间的关系，并引入了光纤数据的频谱分析作为地震动力学研究的工具。分析表明，利用电信光纤网络进行地震定量分析是可能的，证实了这种技术在地球的全球化监测和人口稠密地区日常地震活动监测中的适用性。相关研究成果发表在 2024 年 4 月的 *Communications Earth & Environment*。

通过探测已部署电信光纤的长度变化来获取地面运动情况的方法，已经引起了地球科学家和网络运营商越来越大的兴趣，他们预见到以可扩展和可持续的方式利用现有全球电信基础设施，来实施分布式、无空间混叠的传感器网络的可能性。虽然其他分布式声传感（DAS）技术的范围较小，不能应用于承载互联网流量的光纤，但基于连续波相干激光干涉和偏振态分析的新方法，使可操作通信链路（operational telecommunication link）上的地震探测成为可能（无论是陆地上和越洋距离上），从而为行星地球的全球化监测提供了机会。

研究人员利用在意大利运行两年的波长复用（wavelength-multiplexed）通信链路描述了基于激光干涉法的地震监测的实现过程，并展示了长时间连续采集的第一个结果。之后，研究人员系统地将光纤数据与意大利永久地震台网（IV 网）附近站点的数据进行了比较。开展实验的光纤长 39 km，

除约 100 m 的架空部分外，大部分安装在道路基础设施沿线的管道内。光纤经过的桥梁很少，最终在中型城镇结束，因此遭受到了多样化的、随时间变化的噪音过程。

图 1a 显示了电缆布局 and IV 网络附近传感器的位置。具体来说，在本实验中，IV.ASCOL（地震台站）在电缆一端，并与 IV.TERO 一起用于整个分析的比较。在第一种方案中（图 1b），研究人员测量了往返信号与本地参考波束之间的干扰。在这里，单个激光询问器（laser interrogator）能够从光载波在往返中积累的相位测量中获得光纤变形信息。在第二种方案中（图 1c），研究人员使用一对激光源，以相反的方向发射到电缆中，并在另一端使用局部辐射干扰。在该方案中，通过整合电缆两端收集的测量数据来提取信息。

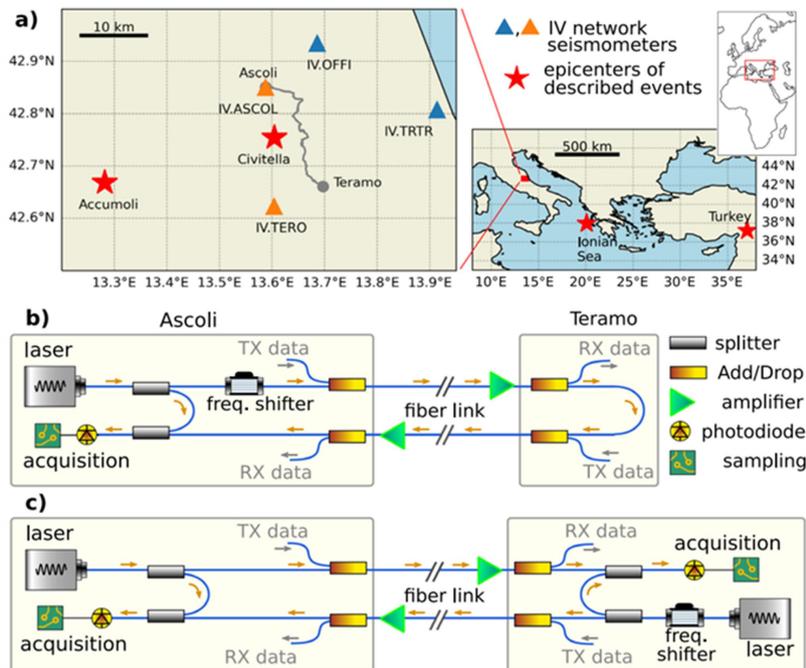


图 1 实验布局

在标准地震传感器上，探测到地震的概率 P 取决于其震级 M 和震源到光纤的距离 d 。假设 P 与记录的物理量（例如地面加速度或速度）的峰值

有关，则下列关系成立：

$$P = A_2 \frac{10^{A_1 M}}{d}$$

其中， A_1 取决于物理量的类型， A_2 是一般标度系数。

灵敏度阈值线（图 2a 中的蓝色曲线）是通过对比检测到的地震和线上未检测到地震的最小累积数迭代找到的，对应于 $A_1=0.403\pm 0.001$ 和 $A_2=3280\pm 10$ m。尽管与地震传感器相比，光纤的综合噪声水平更高，但光纤和 IV.ASCOL 的 A_1 的数量级相同。观测到的最弱地震的 $M_L=1.4$ ，发生在噪声较低的夜间，其震中距离光纤最近点 2.4 km，震源深度 17.5 km。

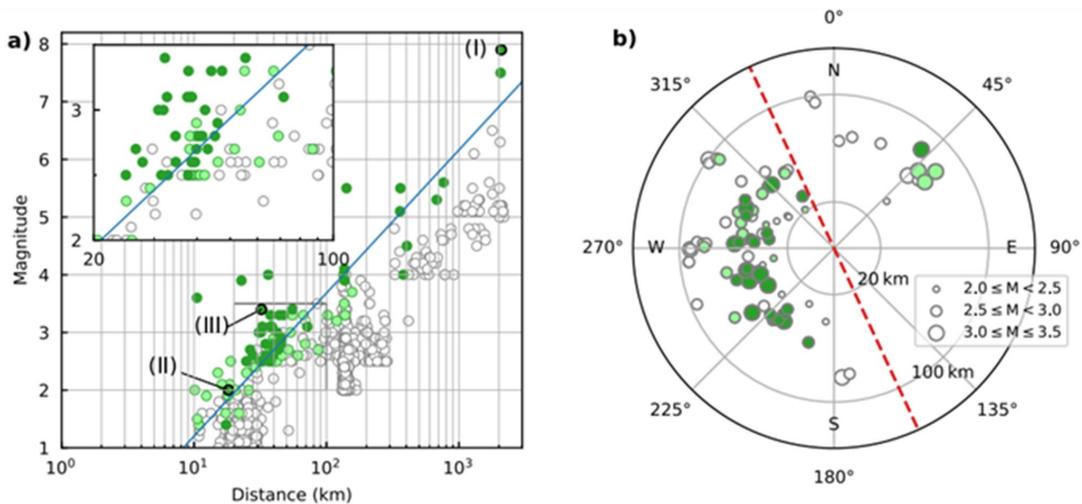


图 2 光纤作为地震探测器的灵敏度

研究人员还分析了局部地区一般地震的探测概率（作为其角分布的函数，图 2b），并观察到横向成功探测的比例较大。这表明，波前曲率和相对于电缆局部的入射角可能在电缆响应的建立中起到了作用，并强调了增加地震目录大小，以获得更加结论性声明的重要性。

图 3 比较了图 2 中标记的三次地震的 $\Delta v(t)$ （橙色，最上面的图区）与地震传感器沿着垂直、南北和东西轴（蓝色，图区 2 至 4）测量的 $v(t)$ 的关系。对于每次地震，P 波和 S 波的到达被放大显示在右边的图中。正

如预期的那样，地震传感器的三个轴所记录的地面速度可能差别很大。这取决于许多因素，其中包括到震源的距离、地震震级、地震破裂历史、传播媒介以及局部影响等。

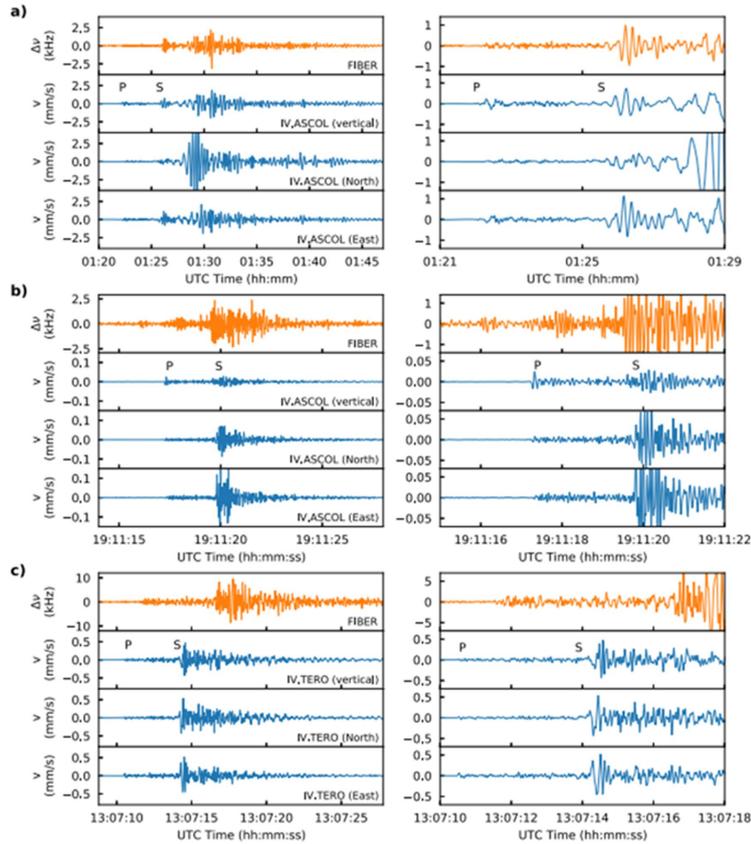


图 3 相关案例研究的时间轨迹

研究人员分析了距离观测站 100 km 范围内光纤和 IV.ASCOL 检测到的所有地震的频谱组成（例如，图 4a 显示了三个震级增加的地震的频谱），并推断出各自的拐角频率（corner frequency）。更远的地震被排除在外，因为它们的频谱预计会受到传播的显著影响。

光纤记录的频谱内容重现了 IV.ASCOL 获得的内容，强调了电缆作为传感器的宽带响应，并证实了将 Δv 的记录与 v 或相应的时间导数进行比较的正确性。此外，研究人员注意到，在所有频谱中，电缆和地震传感器之间的比例关系与从 2022 年 Civitella 地震和 2022 年 Accumoli 地震（图 3b、

3c) 中观察到的一致，并且通常高于从 2023 年土耳其地震（图 3a）中观察到的。

图 4b 显示了从光纤（橙色，左）和 IV.ASCOL（蓝色，右）推断出的拐角频率值与震级的函数关系，在这两种情况下都强调了与预期一致的下降趋势。两个传感器（图 4c）所得拐角频率的皮尔逊检验返回的 r 为 0.81，证实两者之间有良好的相关性。然而，光纤推断出的值似乎系统性地高于 IV.ASCOL，这通过对图 4c 中数据的线性拟合得到证实。

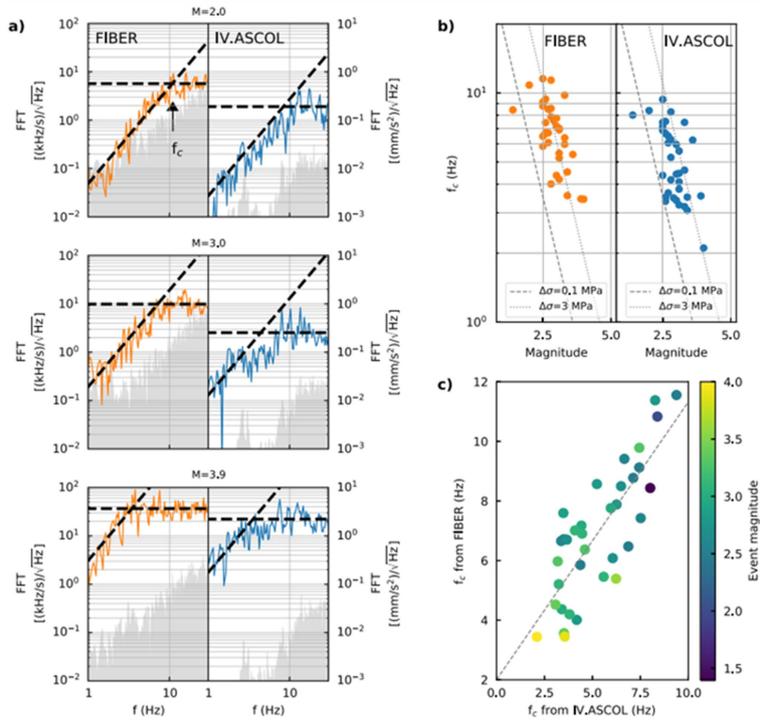


图 4 光谱分析和地震震级确定

这项分析揭示了基于光纤进行地震监测的一个关键方面，即光纤变形的频谱分析实际上可以对中小规模地震的震级进行估计，即使在无法校准电缆对地面运动的绝对响应（由未知的光纤对地耦合参数或集成效应导致）的情况下。整体而言，通过在一条与数据流量共享的陆基光纤上进行 1.5 年不间断的数据收集，研究人员将激光干涉法表征为一种用于地震探测的工具，同时也利用了同地存在的、响应良好的地震传感器的优势。

研究人员证明， $M_L=2$ 或更大地震可以在局部距离上被可靠地检测到。对于意大利地震目录， $M_L=2$ 代表完整性震级的平均大小。在监测系统中，民防部门的警报阈值为 $M_L=2.526$ ，除非震源非常浅，或者发生在一天中最安静的时刻，否则不会感觉到较小的地震。

在考虑大规模应用和批量生产时，激光询问器的尺寸、重量和功耗以及成本都是重要问题。在此次实验中，研究人员使用了研究级的亚赫兹线宽激光器，其尺寸是商业 DAS 系统的几倍，成本相似。然而，结果表明，性能可以有所降低，以提升紧凑性和可维护性。与此同时，激光集成技术也在不断进步，有望实现大规模生产，并降低相关成本。这些激光器最终可以集成到相干收发器中，从而允许从相干通信信号的载波相位中提取信息（类似于已经证明的偏振）。虽然目前在电信中使用的激光源不可能做到这一点，但它可能代表了未来以可扩展和可持续的方式将传感能力集成到现代智能多服务网格中的最有效途径。

来源：Donadello S, Clivati C, Govoni A, *et al.* Seismic monitoring using the telecom fiber network. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 178.

贝叶斯算法下利用大地测量多源数据反演震源参数的 简易加权方法

在贝叶斯算法约束下，更高精度地反演震源断层的几何形状与滑移参数成为近年来大地测量反演领域的研究热点。在非线性反演中，多源数据联合反演权重比的确定较为复杂。在此背景下，研究人员提出一种在贝叶斯框架下通过联合大地测量多源数据反演震源断层参数的、简单易推广的加权方法。该方法通过均方根误差（RMSE）值确定多源数据的相对权重比，并可推广至其他非线性搜索算法。为验证该方法的有效性，研究人员设置了4组模拟地震实验方案。反演结果表明，与等权重联合反演、单数据源联合反演方法相比，研究所提出的联合反演加权方法的大残差值（large residual value）有明显下降。东西向变形 RMSE 为 0.1458 mm，南北向变形 RMSE 为 0.2119 mm，垂直变形 RMSE 为 0.2756 mm，3个方向的 RMSE 均小于其他方案，表明所提方法适用于贝叶斯算法下的震源参数联合反演。为进一步验证所提方法在复杂地震中的适用性，研究人员对青海玛多地震的震源参数进行了反演，反演所得震源深度与全球质心矩张量（GCMT）项目发布的震源深度较为接近，在走向角和倾角方面，联合反演的结果也更接近 GCMT 的结果。联合反演结果总体上符合左旋走滑特征，证实了该方法在复杂地震中的适用性。相关研究成果发表在 2024 年 5 月的 *Geophysical Journal International*。

利用大地测量数据反演震源参数并揭示地震震源机制是研究地球科学问题的一种重要方式。随着信息时代的到来，空间大地测量技术迅速发展，如全球导航卫星系统（GNSS）、合成孔径雷达干涉测量（InSAR）和卫星重力观测技术等，为研究地震震源机制提供了丰富的数据。在震源机制研究中，最经典的模型是 Okada（1992）提出的弹性半空间矩形位错模

型，在此基础上，各种非线性启发式搜索算法的应用成为主流趋势。随着机器学习算法的兴起，以及硬件和软件设施的改进，需要消耗大量算力的贝叶斯方法变得流行。

贝叶斯框架下的震源参数反演具有明显优势，该算法不仅可以更准确地反演震源参数，而且可以解释数据中的不确定性，并将其表示为后验概率密度函数。尽管之前的研究在非线性反演中很少涉及多源数据的联合反演权重比问题，并更多地采用等权重处理方法，但多源数据权重比的合理设置在非线性反演中具有潜在应用价值。同时，在非线性反演中，结合多源数据并设定适当权重比反演的地震断层几何参数优于单一数据源的反演结果。

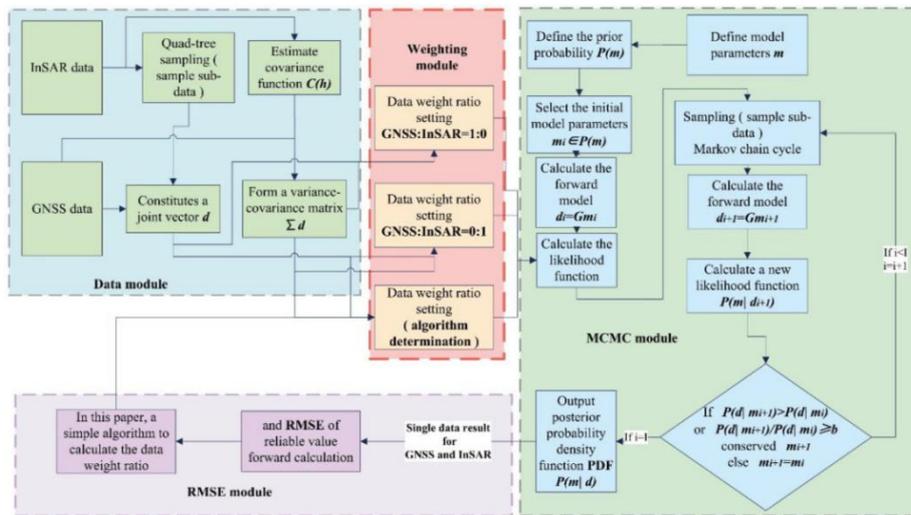


图1 算法实验的整体流程

本研究提出了一种在贝叶斯框架下简单易推广的震源断层参数多源数据联合反演加权方法，并且该方法可以推广到其他非线性搜索算法。受到权重比设置思想的启发，在地震断层参数联合反演方面，在贝叶斯算法的框架下，研究人员首先利用单源数据反演地震断层参数，并推导出各类源数据反演的地震断层参数和可信值。然后，计算形变拟合残差与均方根

误差 (RMSE)，通过 RMSE 确定各类源数据对地震源参数贡献的权重比。

为验证方法的有效性，研究人员设置 4 种实验方案，开展了模拟地震实验。这四种方案分别为：①仅使用 GNSS 数据进行反演；②仅使用 InSAR 数据进行反演；③使用 GNSS 和 InSAR 数据进行等权重联合反演；④使用 GNSS 和 InSAR 数据进行加权联合反演，权重比通过方案 1 和方案 2 的 RMSE 值计算得出。具体实验操作为：

(1) 模拟一个斜滑断层地震，以震中为原点，在 25 km×25 km 范围内模拟 100 个 GNSS 点和 10 000 个 InSAR 数据点。

(2) 使用预设的震源参数真值，通过 Okada 模型获得三维变形模拟值，并加入服从正态分布的随机误差。

(3) GNSS 数据在水平变形方向上加入 (0 mm, 3² mm²) 的误差，在垂直方向上加入 (0 mm, 15² mm²) 的误差。

(4) InSAR 数据的三维变形加入 (0 mm, 10² mm²) 的误差，并转换为视线方向 (LOS) 变形场。

(5) 使用马尔可夫链蒙特卡罗方法 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 进行贝叶斯反演，并进行一百万次采样。

对于方案 4，通过方案 1 和方案 2 的反演结果，计算每个数据源的变形拟合残差和均方根误差 (RMSE)，并根据 RMSE 确定各数据源的权重比：

$$\lambda_{\text{GNSS}} = \frac{\text{RMSE}_{\text{InSAR}}}{\text{RMSE}_{\text{GNSS}} + \text{RMSE}_{\text{InSAR}}}$$

$$\lambda_{\text{InSAR}} = \frac{\text{RMSE}_{\text{GNSS}}}{\text{RMSE}_{\text{GNSS}} + \text{RMSE}_{\text{InSAR}}}$$

反演结果表明，与等权重联合反演和单数据源联合反演方法相比，联合反演加权方法的大残差值有明显的下降，东西向 RMSE 为 0.1458 mm，

南北向形变 RMSE 为 0.2119 mm，垂直向形变 RMSE 为 0.2756 mm。三个方向的 RMSE 均小于其他方案，东西向形变场的 RMSE 最低，分别符合南北向和垂直向上两类数据源的特征。由此说明，研究人员提出的方法适用于贝叶斯算法下的震源参数联合反演，且该方法易于实现，操作简便，易于推广。

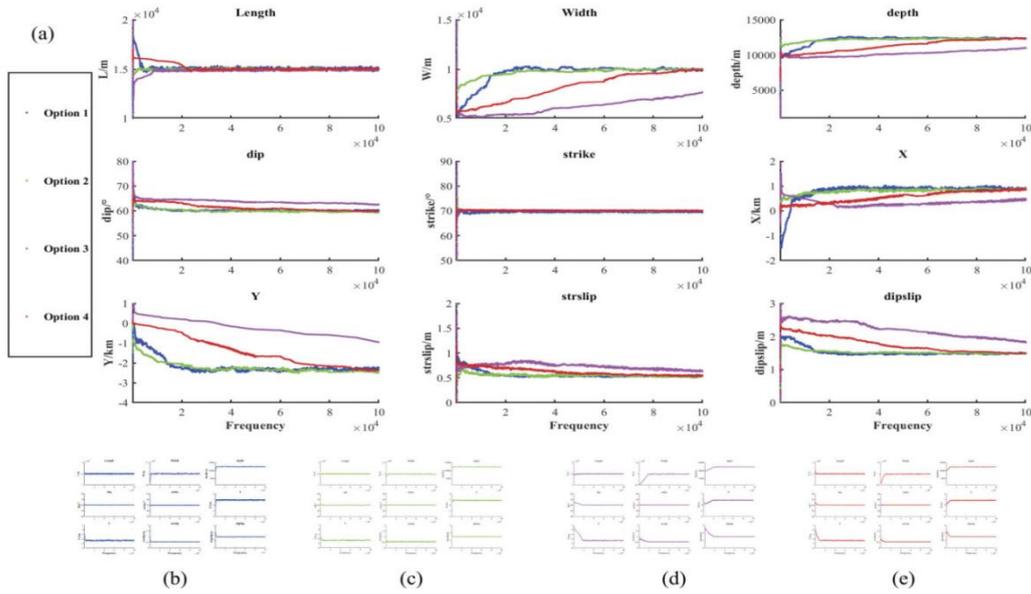


图 2 四种方案下马尔可夫链收敛速度对比。(a)为四种方案十万步的收敛速度，(b)-(e)依次为四种方案一百万步的收敛速度

研究人员在模拟地震时发现，贝叶斯算法联合反演比单源数据反演需要更长的步长才能达到马尔可夫链的收敛状态。为了讨论其中原因及发展趋势，研究人员舍弃（燃烧）了 4 种方案实验数据中的前 200 000 个点，同时为降低相关性，将剩余 1000 步的点间隔取为 1，即取 1600 个点。最终得到 4 种方案下震源参数不确定性的蒙特卡洛分析结果。按照 4 种地震模拟方案反演得到的震源参数的置信区间分别为 97.5%和 2.5%，进而得到这两个置信区间下正演模拟的拟合残差。

从结果可以发现，去除燃烧值后，联合反演确实比单震源反演更接近真实值。不去掉燃烧值时，联合反演达到马尔可夫链所需的步长会稍微大

一些，这就导致如果不去掉燃烧值，联合反演的拟合度会比单源数据反演低，因为包含不收敛数据的数据比单源反演的数据要大。收敛慢的原因可能是数据源种类的增多，或者是 InSAR 降采样数据仍然太大，或者两者兼而有之，最终增加了马尔可夫链探索的自由度。这可能需要专门的文章来讨论这个现象，同时这也说明，对于贝叶斯算法来说，去掉燃烧值或者改进算法以提升蒙特卡洛计算效率是非常必要的。

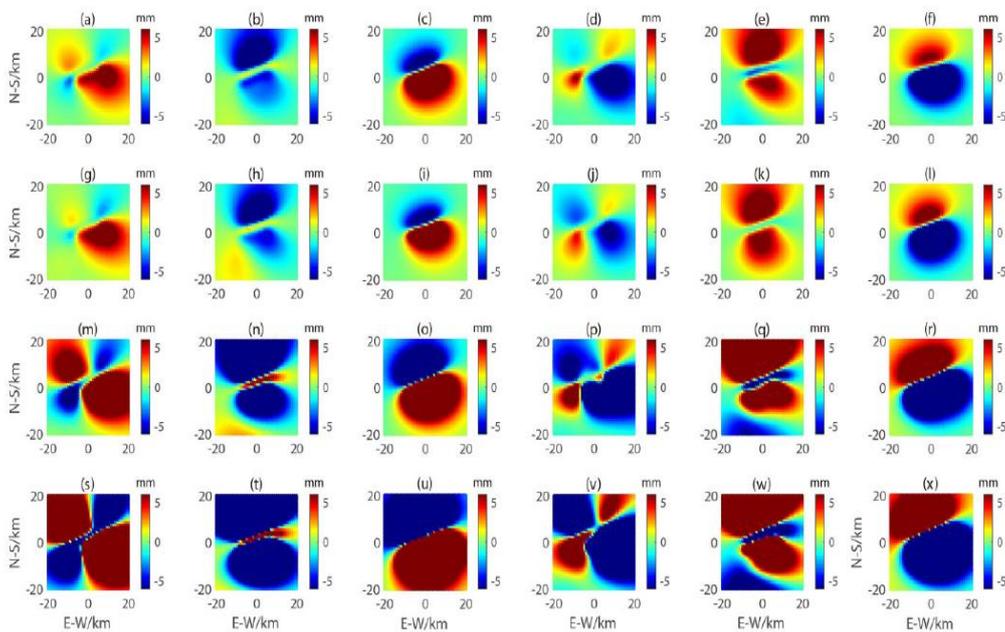


图 3 四种方案下震源参数正交建模后的拟合残差图（第一、第二、第三和第四行分别代表方案 1、2、3 和 4，每行依次显示 97.5% 的东西、南北和垂直残差，以及 2.5% 的东西、南北和垂直残差）

为了验证所提出方法在复杂地震中的适用性，研究人员对青海玛多地震震源参数进行了反演。反演所得震源深度与 GCMT 发布的震源深度较为接近，在走向角和倾角方面，联合反演的结果也更接近 GCMT 的结果。总体上，联合反演结果符合左旋走滑特征，证实了该方法在复杂地震中的适用性。

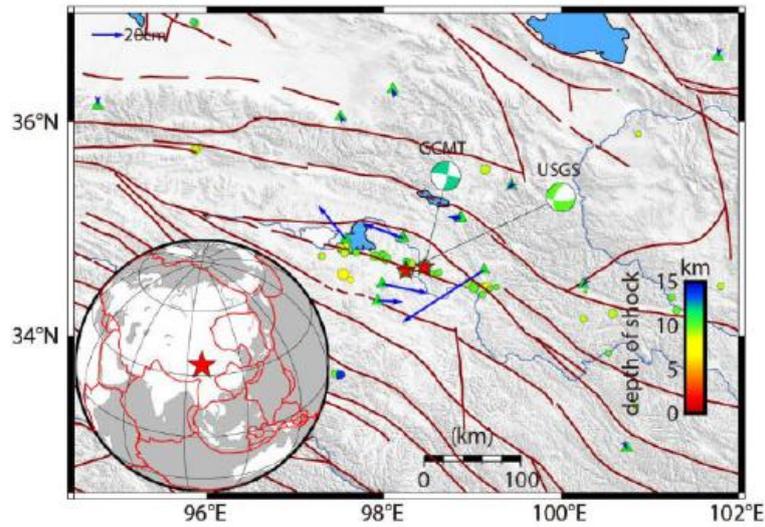


图 4 玛多地震震源图

因此，研究人员提出的贝叶斯框架下的加权方法在震源参数的确定及其不确定性分析方面具有一定的优势，为震源参数联合反演提供了一种新方法，具有较强的实用意义。

未来，贝叶斯框架下的联合反演收敛性有待进一步研究，且本研究采用的玛多地震单断层模型难以适应玛多地震复杂的断层结构，玛多地震等复杂地震震源机制的具体结构也值得继续关注。

来源：Xi C, Wang L, Zhao X, *et al.* A simple weighting method for inverting earthquake source parameters using geodetic multisource data under Bayesian algorithm. *Geophysical Journal International*, 2024, 237(2): 1142-1156.