中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026年 第56卷 第2期：829–849
论 文
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

自适应断层建模统一框架的实现方法与应用

贺克锋[1]，许才军[1,2,3*]，温扬茂[1,2,3]，赵英文[4*]，许光煜[5]，孙龙翔[1]，汪建军[1,2,3]

1. 武汉大学测绘学院，武汉 430079
2. 武汉大学教育部地球空间环境与大地测量重点实验室，武汉 430079
3. 武汉大学自然资源部地球物理大地测量重点实验室，武汉 430079
4. 武汉大学地球与空间科学技术学院，武汉 430079
5. 东华理工大学测绘与空间信息工程学院，南昌 330013
* 通讯作者，E-mail：cjxu@sgg.whu.edu.cn(许才军)，ywzhao@sgg.whu.edu.cn(赵英文)

2025-07-27收稿，2025-11-12修回，2025-11-24接受，2026-01-13网络版发表
国家自然科学基金项目(42130101、42474002、42374003、42564002)和江西省自然科学基金项目(20252BAC240262)资助

摘要 准确刻画断层几何与滑动分布对于理解地震破裂过程和提升地震危险性评估至关重要。本文提出一个适用于多分段、多事件地震场景的统一断层建模框架，将大地测量数据与余震重定位、地质调查及地球物理信息等先验约束相结合，实现断层几何与滑动分布的自适应构建与联合反演。框架包含两部分：首先，根据可获得的先验数据(地表破裂、余震等)自适应构建断层几何；当先验约束不足或存在不确定性时，通过贝叶斯概率推理进一步优化几何，并估计滑动分布的不确定性。为提升计算效率，引入序贯蒙特卡罗Fukuda-Johnson(SMC-FJ)联合优化策略。该策略将非线性参数(几何、数据权重、平滑因子)与线性滑动参数分离，线性滑动参数通过约束最小二乘法求解。几何调整基于点、线和结构单元的分层参数化策略，实现对复杂破裂场景的灵活适应。通过模拟实验与四个真实地震案例(2022年门源地震、2023年土耳其地震双震事件、2022年泸定地震和2019年Ridgecrest地震序列)验证了框架在不同先验约束条件下的稳定性与适用性。针对门源地震，结果显示基于余震重定位构建的断层几何仅需微小调整即可准确拟合地表形变，证明余震约束几何的可靠性。进一步分析表明，断层走向与倾角的变化控制破裂终止位置，并主导震后应力调整及余震激活，体现断层几何在破裂动力学过程中的关键调制作用。

关键词 断层建模，贝叶斯联合反演，大地测量数据，断层几何，地震场景

1 引言

准确解析断层几何和滑动分布是理解地震破裂机制并提升地震危险性评估的基础。近年，统计分析与动态模拟研究表明，断层几何结构(Biasi和Wesnousky，2017；Taufiqurrahman等，2023；Zhang Y J等，2023；Lee等，2024；Wen等，2024；Xu D等，2024)及速率-状态模型假定下的摩擦行为(Kaneko等，2010；Ma等，2024；Xu L等，2024)，共同控制着地震破裂的滑动稳定性与破裂演化过程。断层几何复杂性，如弯曲、阶跃和分支，不仅影响地震破裂的起始、传播和终止，决定能量的释放方式(King，1986；Duan，2019；Duan等，2019)，还会引起局部应力场变化，从而促进或阻滞多段破裂的传播(Elliott等，2015；Zhang Y J等，2023；Liu-Zeng等，2024；Wen等，2024；Xu D等，2024)。几何结构的细微变化常导致破裂行为的显著差异，因此，为刻画复杂破裂场景下断层几何与滑动分布的耦合关系，需要一套能够适应不同断层结构、孕震环境的建模方法。

传统断层建模策略通常依赖人为分段、固定倾角或先验几何假设，通过余震分布或网格搜索推断断层几何(Tung等，2024)，或采用有限参数描述构建弯曲断层面(例如，Dutta等，2021；Wei等，2023)，或直接利用建

中文引用格式：贺克锋, 许才军, 温扬茂, 赵英文, 许光煜, 孙龙翔, 汪建军. 2026. 自适应断层建模统一框架的实现方法与应用. 中国科学: 地球科学, 56(2): 829–849, doi: 10.1360/N072025-0409
英文引用格式：He K, Xu C, Wen Y, Zhao Y, Xu G, Sun L, Wang J. 2026. A unified framework for adaptive fault modeling: Methods and applications. Science China Earth Sciences, 69(2): 805–825, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1773-0

© 2026《中国科学》杂志社

模软件生成结构模型(Carena和Suppe，2002；Riesner等，2017；Plesch等，2020；Lu等，2022；Ren等，2022)。然而，这些方法对先验信息依赖度高，在缺乏明确地表破裂或余震稠密覆盖的情况下，难以准确刻画断层形态。仅基于余震构建断层几何，精度受台站分布与速度结构不确定性影响(Truttmann等，2023)；而基于远震波形矩张量或多点源方法(Yamashita等，2021，2022)得到的几何信息通常空间分辨率有限(Yue和Lay，2020)，难以刻画断层精细特征。现有考虑倾角变化的几何反演技术(Xu等，2022)，多局限于低角度逆冲断层，不适用于走滑、多段破裂等更广泛断层类型。

因此，断层建模的核心挑战在于如何将多学科观测整合到一个统一且内部自洽的框架中。地质调查提供浅部结构约束(潘家伟等，2021；Liu-Zeng等，2024)，地震反射剖面揭示深部结构但分辨率有限，微震定位提供深部断层活动分布但受限于定位误差(Yue等，2017；Ross等，2019；Shelly，2020；He等，2021)，而大地测量观测(如GNSS和InSAR)具备高空间覆盖和高分辨率(Elliott等，2016；Wang等，2018；Fathian等，2021；He等，2021)，可直接监测同震、震后及震间地表形变，对断层几何和滑动分布具有强约束能力(许才军和贺克锋，2023)。然而，现有许多方法无法在同一反演框架下充分融合这些互补的信息，导致断层模型存在信息割裂或结构不一致的问题。

地震波形分析，特别是多点源方法，能够捕捉破裂复杂性与震源机制的时空变化，并已在多次大地震中成功应用(Yue等，2012；Shi等，2018；Lo等，2019；Ross等，2019)。其结果对断层建模提供了有价值的几何先验或外部验证，但有限的空间分辨率同时强调了大地测量建模的必要性(Yue和Lay，2020)。因此，将地质、地震、地球物理和大地测量等多源信息耦合，是构建可靠断层模型的关键。

当前大地测量建模中常见的“两步法”(例如，Xu等，2020)通常先确定断层几何再反演滑动分布，该流程往往引入阶段性误差传递。联合反演技术(Dutta等，2021；Wei等，2023)通过同时求解几何与滑动解决了这一问题，但仍缺乏适用于不同破裂情景的通用性与灵活性。尤其在多段、级联破裂(Ross等，2019；He等，2022；Barbot等，2023；Ren等，2024)、余震分布模糊(Yang等，2022)、或先验约束不足时，几何确定与滑动反演容易产生非唯一性。

为解决这些问题，需要一个能够根据先验信息条件自动调整策略并实现断层建模与滑动反演自适应切换的统一框架。本文提出的场景自适应断层建模框架，将多学科观测整合于同一贝叶斯推理体系中：当存在明确先验约束(如地表破裂或密集余震)时，通过直接几何构建获得断层模型；当先验不足或存在不确定性时，通过贝叶斯联合反演使用大地测量高分辨率数据优化断层几何并估算滑动分布，同时自适应确定数据权重与平滑因子。该框架在多个典型破裂场景中得到验证，具有跨场景的适用性与稳健性，有助于更准确地理解地震破裂过程并提升地震危险性评估能力。

2　方法

地震破裂行为及其孕震环境表现出高度多样性，可划分为若干具有代表性的场景，包括：余震沿断层倾向展布、余震深部集中(例如，Yue等，2017)、地表破裂迹线不清晰或难以连续追踪(例如，Zhang等，2021)、多段破裂或共轭破裂(例如，Wang等，2018；He等，2021)、多事件级联破裂(例如，He等，2022)、历史震源机制已知但小微震活动稀疏的情况(Cai等，2024)，以及余震与主震空间不一致或分布离散(例如，Avouac等，2014)的情形。

这些场景对应不同质量与数量的先验信息。若存在明确的地表破裂迹线或高密度余震簇，则可为断层几何提供可靠约束；而盲断层、深部断层或余震稀疏区域通常缺乏直接观测。因此，一个稳健的断层建模框架必须具有足够的灵活性，以适应不同的先验认知水平和数据环境。

为此，本研究建立了一种场景适应的断层建模框架，包括两种工作模式：当先验约束充分且可靠时，采用自适应断层构建框架，整合多源观测直接生成断层几何；当先验信息有限或存在不确定性时，引入贝叶斯联合反演策略，通过大地测量数据优化断层几何并同时估计滑动分布。该框架能够根据观测条件动态调整断层几何构建方式，使模型在不同破裂类型与先验约束条件下均保持适用性与稳定性。

2.1　自适应断层构建

当先验信息充分且分辨率较高时，依照自适应断层构建框架，通过整合地震、地质与大地测量观测，建立与破裂特征一致的初步断层几何模型。构建流程如图1所示。首先基于野外地质调查、历史断层填图与遥感解析识别地表破裂迹线。SAR偏移追踪以及光学影像相关性可提供高分辨率近断层位移场，为地表断层的延伸与几何形态提供强约束，特别是在历史填图不完整或不连续时，可作为断层几何的地表锚点。

深部几何通过重定位地震目录与地质、地球物理等

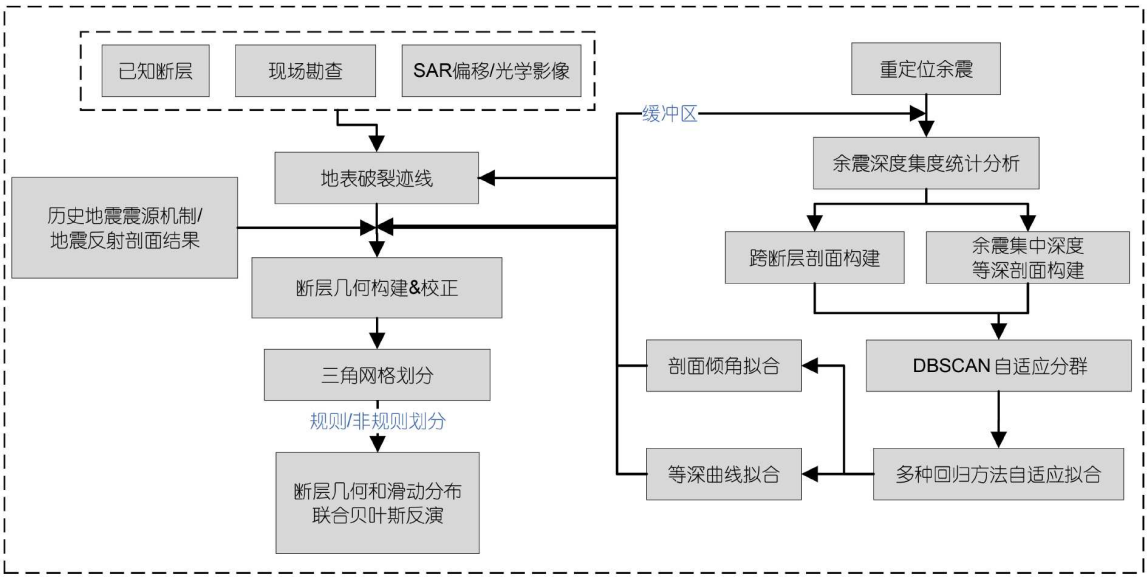

图 1 自适应断层构建框架的工作流程

辅助信息进行约束。依据余震的空间分布特征，可采用两种策略：(i) 通过拟合不同深度的等深曲线刻画地震活动集中带；(ii) 通过沿走向的跨断层剖面拟合倾角。两种策略的选择依据观测数据的分辨率与空间一致性。在多数情况下，综合多源观测能够显著提升断层三维几何的可靠性。

为提取与断层结构最相关的事件簇，采用基于密度的空间聚类方法(DBSCAN)。对基于剖面的聚类，将震中距离与深度归一化后作为特征维度，典型权重分别取1.1与0.5，聚类半径阈值一般控制在0.25–0.35范围，最小样本数设置为5–15以平衡簇紧致性与噪声抑制。确定事件簇后，使用回归方法提取几何参数。回归策略的选择依据数据分散程度、残差与异常值比例等统计指标：当数据连续性好时采用最小二乘法(OLS)，当存在明显异常值时采用鲁棒回归(RANSAC、Theil-Sen、Huber)，而在数据稀疏或噪声较大时则使用正则化回归(LASSO、Ridge、Elastic Net)，以避免过拟合并保持几何形态的稳定性。

地震目录中余震占据主导，但背景事件同样可能携带几何信息，因此仅在余震稀疏、噪声较强或出现多分支重叠时应用过滤。排除不一致事件的目的不是忽略背景地震，而是避免干扰特定断层段几何的确定。当识别出多条断层分支时，分别建模并移除局部不一致点，从而维持回归稳定性。通过自适应聚类、回归与基于情景的事件筛选，该方法能够应对不同数据质量及结构复杂性的情况，生成由数据驱动的断层几何，为后续滑动分布反演和情景建模提供可靠基础。

2.2 断层几何与滑动分布的贝叶斯联合反演

当先验约束不足或存在不确定性时，例如缺少明确的地表破裂证据或余震分布零散，本研究引入贝叶斯联合反演以进一步优化断层几何。反演以第2.1节中构建的初始断层模型为基础，通过分层几何调整单元(见第2.2.1节)为断层几何提供可控自由度，使几何形态能够在反演过程中响应数据自动调整。

在该框架中，正演阶段通过格林函数将断层几何参数与滑动分布信息映射至地表形变，形成观测量与模型参数之间的物理联系。贝叶斯策略则综合观测数据、描述模型一致性的似然函数，以及由滑动平滑度与参数范围构成的先验约束，形成联合后验分布。通过对该后验分布进行采样，可以同时获得断层几何和滑动分布的最优估计及其不确定性。该联合求解策略减少了对固定几何的依赖，使模型能够在不同数据条件下保持自适应，并显著提高结果的可信度。

2.2.1 断层几何调整框架

为适应不同破裂场景下对断层几何精细化表达的需求，本文构建了由点单元、线单元和结构单元组成的分层几何调整框架(图2)。这些单元依据空间尺度及其几何表达能力进行定义：点单元对应断层面的关键节点，包括上边缘、下边缘和中间层；线单元通过连接点单元形成连续几何特征，如上边缘、下边缘或中层等深曲线；结构单元处于最高层级，直接对应断层段的三维几何。结构单元可通过三种方式定义：第一，将上边缘曲线(通常由地表破裂迹线确定)与深部曲线结合，深部曲线可通

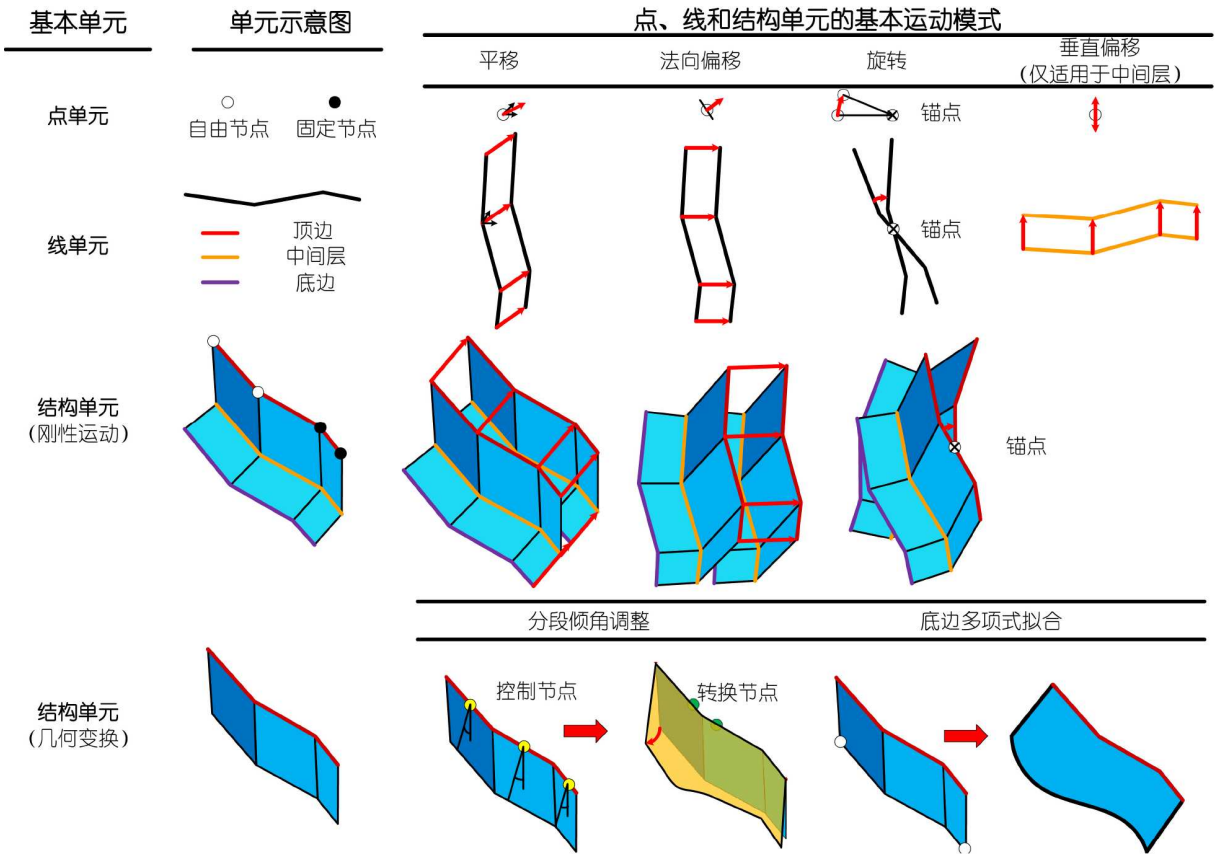

图 2　断层几何优化的分层调整框架。模型包括点单元、线单元和结构单元，每种单元均可进行水平平移、法向偏移及绕垂直轴旋转。中层单元还支持独立的垂向位移。刚体运动用于重新定位断层分段，而几何变换包括分段倾角控制和下边缘的多项式拟合。倾角控制节点用于定义各分段的倾角，转换节点在分段边界处对倾角进行插值，以确保分段间的平滑过渡。自由节点和固定节点在整个调整过程中用于约束运动

过余震等深分布或倾角剖面拟合获得，两者通过放样生成三维断层面；第二，将上边缘曲线与用于约束倾角的控制节点结合。控制节点若为固定值，则结构单元作为刚体仅发生整体平移或旋转；控制节点若允许调整，则结构单元表现为可变形结构，可实现倾角或曲率的变化；第三，将上边缘曲线与由两个控制参数通过预定义曲线生成函数(如样条拟合)构建的下边缘曲线结合，在参数量较少的前提下提供几何灵活度。

点、线和结构单元均支持三种基本几何操作：水平平移、法向偏移以及绕垂直方向旋转。旋转调整需指定锚点，以保持几何结构的连续性。此外，对位于中层的点单元和线单元，可独立施加垂向偏移，增强断层内部几何的层间灵活性。上述调整方式既可整体作用于整个断层，也可局部施加于特定单元，以适应不同层级的几何优化需求。

当破裂呈分段特征时，每个断层段独立定义为一个结构单元，倾角变化由一个或多个控制节点决定。单控制节点对应均一倾角，多控制节点则通过插值形成沿走向的连续倾角变化；每个控制节点与下边缘节点相连，通过法向偏移或倾角调整实现几何修正。当破裂连续但呈弯曲形态时，则可通过三种方式表达：(i) 将上边缘曲线与由余震重定位获得的深部曲线结合；(ii) 在断层端点及几何转折位置布置控制节点，倾角通过插值实现连续过渡；(iii) 通过两个控制参数和曲线生成函数重建下边缘曲线，实现对曲率和深度范围的紧凑描述。三维断层面随后通过上边缘与下边缘之间的放样生成，并延伸至设定深度范围。通过结合分层调整单元与适用于分段破裂、连续弯曲或复杂几何的参数化策略，该框架能够在不同破裂场景下稳定表征断层几何，确保各种复杂程度的断层结构均能够以地质合理的方式纳入联合反演过程。

在每次几何调整之后，保持网格节点与其对应三角单元之间的一致性至关重要。为此，本文采用基于初始断层面的反双线性插值方法，将每个节点映射到参数化网格上。节点的参数坐标在整个过程中保持固定，调整后的节点位置通过参数坐标插值重新计算，从而确保网格拓扑连续且无需重新网格化(图3)。该策略避免了常规自动网格化工具(如Gmsh)在几何更新后可能产生的单元

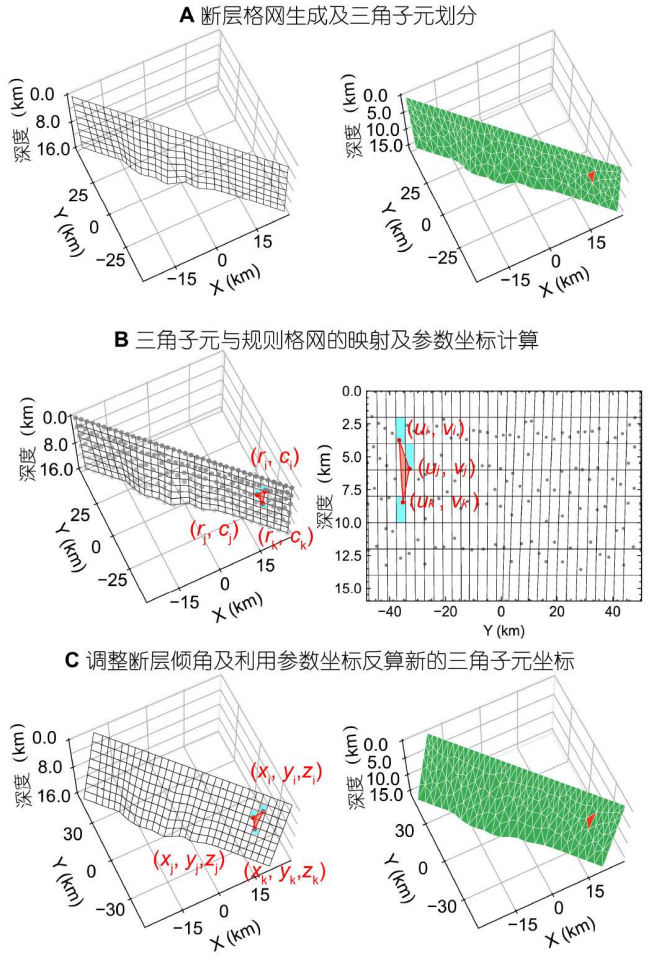

图 3 断层网格生成和匹配映射过程。(A) 断层网格与三角格网生成，建立一个$M\times N$的断层网格，较大的取值对应更强的空间分辨率约束，使用Gmsh(Schlömer，2022)生成三角格网，其单元尺寸从浅部向深部逐渐增大，以适应数据分辨率的变化；(B) 映射与参数插值，将Gmsh生成的三角网格映射到断层格网上，识别每个三角格网节点的行列索引(r，c)，并通过反双线性插值求解参数坐标(u，v)，用于计算参数坐标的投影平面(xy、yz或xz)根据最大投影面积自适应选择，或按需要预先指定，可通过水平或垂向旋转来优化投影面积，红色三角形表示所选网格单元，青色四边形表示其对应的网格单元格；(C) 断层倾角调整与网格重计算，在调整断层倾角并重新生成断层网格后，利用预先计算的参数坐标在新的断层面上重新计算节点位置(x，y，z)

对应不一致问题，也优于通过固定对角线划分四边形等简化方法，可生成更均匀的三角单元，减少数值不稳定性，并保持滑动分布的光滑性。同时，网格密度可按断层深度自适应调整：近地表区域采用更高分辨率，以匹配观测数据的空间细节，深部区域采用较低分辨率，从而兼顾计算效率与反演精度。

在断层几何调整框架建立后，几何更新可直接嵌入概率反演过程。断层几何不再被视为固定量，而是作为可调参数在贝叶斯方法中与滑动分布一同求解。正演模型因此构建为断层几何与滑动分布的函数，通过后验概率分布联合估计几何与滑动参数，并由观测数据与先验约束共同控制其变化。网络版附图S1展示了点—线—结构分层调整与贝叶斯联合反演之间的嵌套关系。

2.2.2 似然函数

在贝叶斯方法中，似然函数用于量化候选模型(断层几何与滑动分布)对观测地表形变的拟合程度。在观测误差服从高斯分布的假设下，似然函数可表示为

$$L\left(d\mid m,s,\alpha^2,\sigma_0^2\right)=L_d\left(d\mid m,s,\sigma_0^2\right)\cdot L_s\left(s\mid\alpha^2\right) \tag{1}$$

其中，m表示断层几何，s表示滑动分布，α^2为平滑超参数，σ_0^2为单位权方差。

数据似然函数L_d用于量化模型预测结果与大地测量观测之间的偏差程度，其定义为

$$L_d\left(d\mid m,s,\sigma_0^2\right)=\prod_k\frac{1}{(2\pi)^{\frac{n_k}{2}}\left|\sigma_{0,k}^2\Sigma_k\right|^{\frac{1}{2}}}\exp\left(-\frac{1}{2\sigma_{0,k}^2}r_k^{\mathrm{T}}\Sigma_k^{-1}r_k\right) \tag{2}$$

其中，$r_k=d_k^{\mathrm{obs}}-G_k(m)s_k$为数据集$k$的残差向量，$G_k(m)$为断层几何$m$对应的格林函数矩阵，$\Sigma_k$为数据协方差矩阵，$\sigma_{0,k}^2$为单位权方差尺度因子，$n_k$为观测值数量。

平滑似然函数L_s通过对滑动分布的空间粗糙度施加惩罚，从而实现正则化约束，其定义为

$$L_s\left(s\mid\alpha^2\right)=\frac{1}{\left(2\pi\alpha^2\right)^{\frac{M}{2}}\left|L^{\mathrm{T}}L\right|^{\frac{1}{2}}}\exp\left(-\frac{1}{2\alpha^2}(Ls)^{\mathrm{T}}(Ls)\right) \tag{3}$$

其中，L为离散平滑算子(例如拉普拉斯算子)，α^2为平滑超参数，M为滑动参数的数量。该项通过对空间粗糙度进行惩罚，约束滑动分布保持连续和平滑，从而确保反演结果具有地球物理合理性。

2.2.3 先验约束

为保持参数在物理可接受范围内，同时允许数据驱动的参数更新，对断层几何m、滑动分布s、平滑超参数α^2及单位权方差σ_0^2施加先验约束。在指定取值范围内，先验分布采用均匀分布，其定义为

$$\pi(p)=\begin{cases}\dfrac{1}{p_{\mathrm{upper}}-p_{\mathrm{lower}}}, & \text{if } p_{\mathrm{lower}}\leqslant p\leqslant p_{\mathrm{upper}}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \tag{4}$$

各参数的联合先验分布可写为

$$\pi\left(m,s,\alpha^2,\sigma_0^2\right)=\prod_k\pi(m_k)\cdot\prod_l\pi(s_l)\cdot\pi(\alpha^2)\cdot\pi\left(\sigma_0^2\right) \tag{5}$$

这些边界条件由地质与地球物理资料、历史地震事

件以及经验判断共同确定。对于断层几何，几何m对应于第2.2.1节中定义的分层调整单元，包括针对各分段的平移、旋转、垂向偏移以及倾角插值等调整参数。

对于平滑因子α和数据权重尺度因子等超参数，其先验范围的设置直接影响反演的稳定性与收敛性。当观测数据具有较高信噪比且覆盖充分时，可在对数空间内采用较宽的均匀先验(如−3至3)，以允许反演过程自适应确定最优值；相反，当数据覆盖不足或噪声显著导致形变模式不一致时，应适当收窄先验范围，以避免反演进入不稳定区间或得到非物理解。例如，对于质量显著高于其他数据集的观测数据，其权比例因子可固定为0，或限制在较窄区间内(例如−0.25至0.25)。这些敏感性设置确保先验约束既保持物理合理性，又能根据数据质量进行自适应调整。

2.2.4　后验分布和采样策略

后验分布将数据似然、正则化约束和先验知识相结合，为模型参数(包括断层几何m、滑动分布s、平滑超参数α^2以及单位权方差σ_0^2)提供概率化表征。根据贝叶斯定理，后验分布可表示为

$$P(m,s,\alpha^2,\sigma_0^2|d)\propto L_d(d|m,s,\sigma_0^2)^{\beta}\cdot L_s(s\alpha^2)\cdot\pi(m,s,\alpha^2,\sigma_0^2) \tag{6}$$

其中，d为观测到的地表形变，$\beta\in[0,1]$为序贯蒙特卡罗(SMC)采样中的温度参数，通过调节其数值逐步强化似然项，从而实现由先验分布向后验分布的平滑过渡。

断层几何m包含第2.2.1节中定义的所有可调整结构参数，如分段平移、旋转、垂向偏移以及控制节点处的倾角调整。这些调整使模型能够灵活适应不同的破裂几何形态。

为提高采样效率，我们采用Fukuda和Johnson(2010)提出的参数分离策略。在该策略下，非线性参数m、α^2和σ_0^2通过SMC采样得到，而滑动分布s在每一步中通过约束最小二乘反演求解：

$$\begin{aligned}\hat{s}\left(m,\alpha^2,\sigma_0^2,d\right)=&\left(\sum_{k=1}^{K}\frac{1}{\sigma_k^2}G_k^{\mathrm{T}}\Sigma_k^{-1}G_k+\sum_{j=1}^{J}\frac{1}{\alpha_j^2}L_j^{\mathrm{T}}L_j\right)^{-1}\\&\times\left(\sum_{k=1}^{K}\frac{1}{\sigma_k^2}G_k^{\mathrm{T}}\Sigma_k^{-1}d_k\right)\end{aligned} \tag{7}$$

因此，后验分布可分解为

$$P\left(m,s,\alpha^2,\sigma_0^2\mid d\right)=P\left(s\mid m,\alpha^2,\sigma_0^2,d\right)\cdot P\left(m,\alpha^2,\sigma_0^2\mid d\right) \tag{8}$$

其中，

$$P\left(s\mid m,\alpha^2,\sigma_0^2,d\right)\propto\left|\sum_k\frac{1}{\sigma_k^2}G_k^{\mathrm{T}}\Sigma_k^{-1}G_k+\sum_j\frac{1}{\alpha_j^2}L_j^{\mathrm{T}}L_j\right|^{-\frac{1}{2}} \tag{9}$$

以及

$$P\left(m,\alpha^2,\sigma_0^2\mid d\right)\propto L_d\left(d\mid m,\hat{s},\sigma_0^2\right)^{\beta}\cdot L_s(\hat{s}\mid\alpha^2)\cdot\pi\left(m,\alpha^2,\sigma_0^2\right) \tag{10}$$

为了高效地从后验分布中采样，本文采用SMC-FJ方法，将条件优化策略与优化后的序贯蒙特卡罗(SMC)方法相结合(Dutta等，2021)。在该方法中，非线性参数通过SMC迭代更新，而滑动分布在每一步中通过解析形式的约束最小二乘反演求得，从而避免将高维线性变量直接纳入采样过程。

整体计算效率通过两类互补策略进行提升。首先，在算法实现层面，通过预计算部分逆矩阵减少重复求逆操作，并在性能关键循环中使用Numba的即时编译(JIT)加速矩阵运算。其次，通过基于消息传递接口(MPI)的并行化设计，使粒子传播、权重计算及重采样过程可在多处理器上同时执行。上述优化策略显著提高了SMC-FJ方法的可扩展性和实际计算效率。图4展示了整个联合反演框架的工作流程。

3　模拟实验

为了验证SMC-FJ方法的一致性及其计算性能优势，本文基于同一地震场景设计了两组模拟实验。第一组实验用于评估在断层几何固定条件下，SMC-FJ方法所得反演结果是否与标准SMC方法一致，并量化计算效率的提升幅度。第二组实验用于测试SMC-FJ方法在完整贝叶斯方法下同时估计断层几何与滑动分布的能力，以验证其在断层几何优化场景中的有效性。

3.1　实验1：SMC与SMC-FJ方法一致性与计算效率验证

实验构建了一个沿走向分为三段的合成断层模型，各段倾角分别为55°、70°和85°，分段之间设置20 km的平滑过渡带。在断层弯曲位置设置两个滑动高值区，最大滑动分别为5和3 m，其空间不确定性分别设定为(走向15.0 km、深度4.0 km)与(走向12.0 km、深度3.0 km)，滑动角为30°。基于该模型生成合成观测数据，包括50个GNSS观测点(不确定度为1 cm)以及一幅InSAR图像(498个像素，分辨率5–30 km，不确定度为3 cm)。InSAR的视线方向(LOS)设定为(0.53，−0.11，0.84)。

在贝叶斯反演中，参数搜索范围设为：单位权方差与平滑参数在−3至3之间，滑动量在0–8 m之间，滑动角

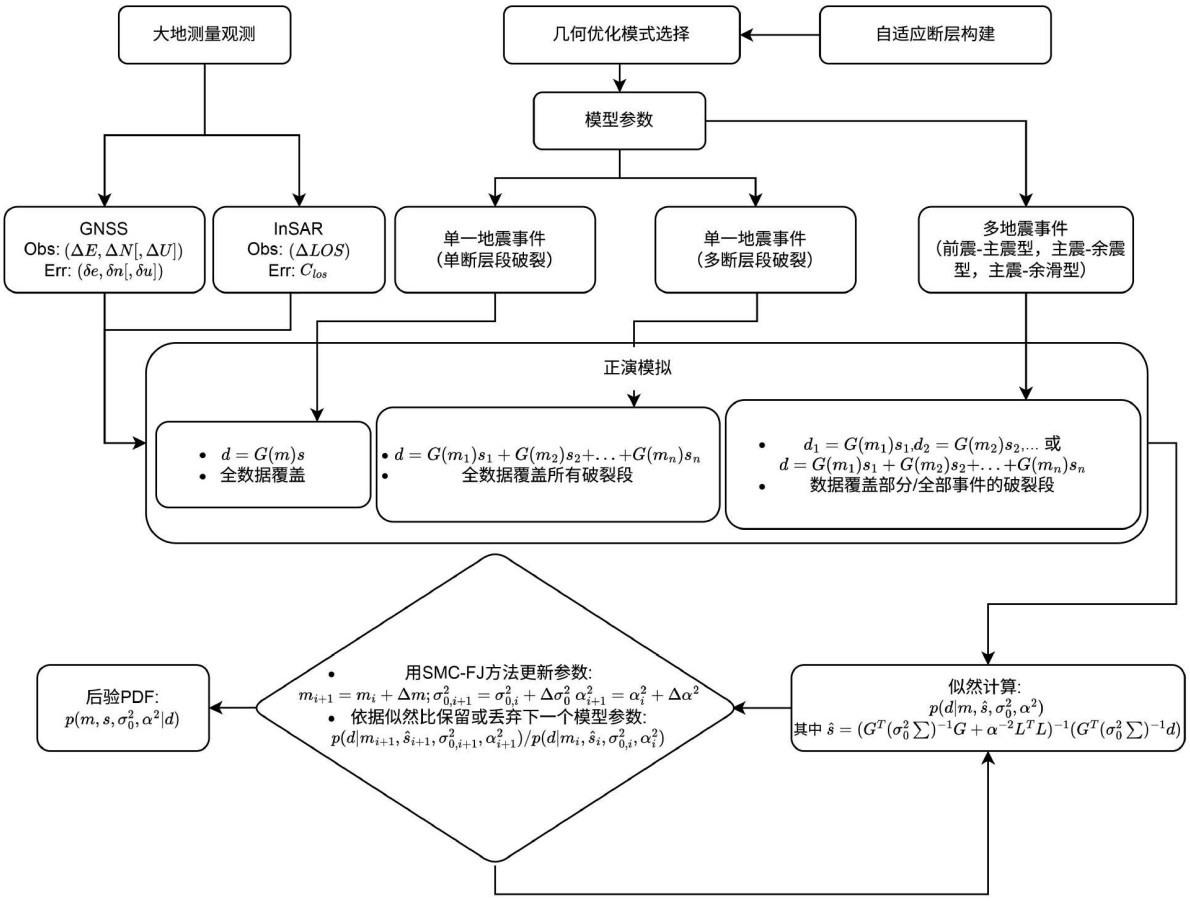

图 4 多类型地震事件与断层破裂场景的贝叶斯反演工作流程。模型参数涵盖反演过程中使用的全部参数，包括基于自适应断层构建框架生成的初始断层结构所需要的几何优化参数。这些几何参数根据分层调整框架的定义，可按单元或组合单元的形式配置，以适应不同的地震场景。其他模型参数包括滑动分布、数据权重、平滑参数以及必要的数据校正项

在−50°至50°之间。输入数据的不确定度为InSAR 0.03 m、GNSS 0.01 m，但在反演过程中假定二者均为0.03 m的不确定性。图5显示了SMC与SMC-FJ方法的反演结果。SMC方法使用1000个粒子和500条链，在25核CPU系统上历经12小时、77个阶段收敛，超参数(单位权方差和平滑参数)收敛至(0.01±0.01，−0.93±0.02，−1.35±0.01)。最大滑动位置准确，最大滑动量分别为5.2和2.9 m，与输入模型高度一致，仅在缺少近断层数据处出现轻微偏差。

SMC-FJ方法仅使用100个粒子和50条链，在相同计算环境下约1.5小时即可完成收敛，超参数收敛至(0.01±0.01，−0.83±0.03，−1.19±0.04)，最大滑动同样在正确位置恢复，最大滑动量为4.8和2.9 m。值得强调的是，两种方法恢复的单位权方差均对应标准差InSAR 0.03 m、GNSS 0.01 m，与输入数据的不确定性一致，表明两种方法均能够有效识别并恢复真实的数据误差水平。

实验结果表明，在断层几何固定条件下，SMC-FJ方法与标准SMC方法得到的反演结果一致，验证了两者在反演精度上的等效性(附图S2与S3)。同时，SMC-FJ方法通过降低采样维度显著加快了收敛速度，体现了其计算效率优势。由于SMC-FJ方法的反演公式在几何固定与几何优化两种场景下保持一致，实验2中直接采用SMC-FJ进行断层几何优化与滑动分布的联合反演，不再与SMC方法进行对比。

3.2 实验2：利用SMC-FJ方法进行几何优化

在第二组实验中，采用与实验1相同的合成断层模型与观测设置，但在反演过程中允许断层几何发生调整，以评估SMC-FJ方法在断层几何与滑动分布联合优化中的适用性。初始几何被有意设置为偏离真实模型，即所有分段倾角统一为南倾85°。在反演过程中，每个分段的倾角通过一个中心倾角控制节点进行调整，同时在分段边界两侧10 km处设置两个辅助过渡节点用于倾角插值，以确保倾角在分段之间平滑过渡，该设置与第2.2.1节所

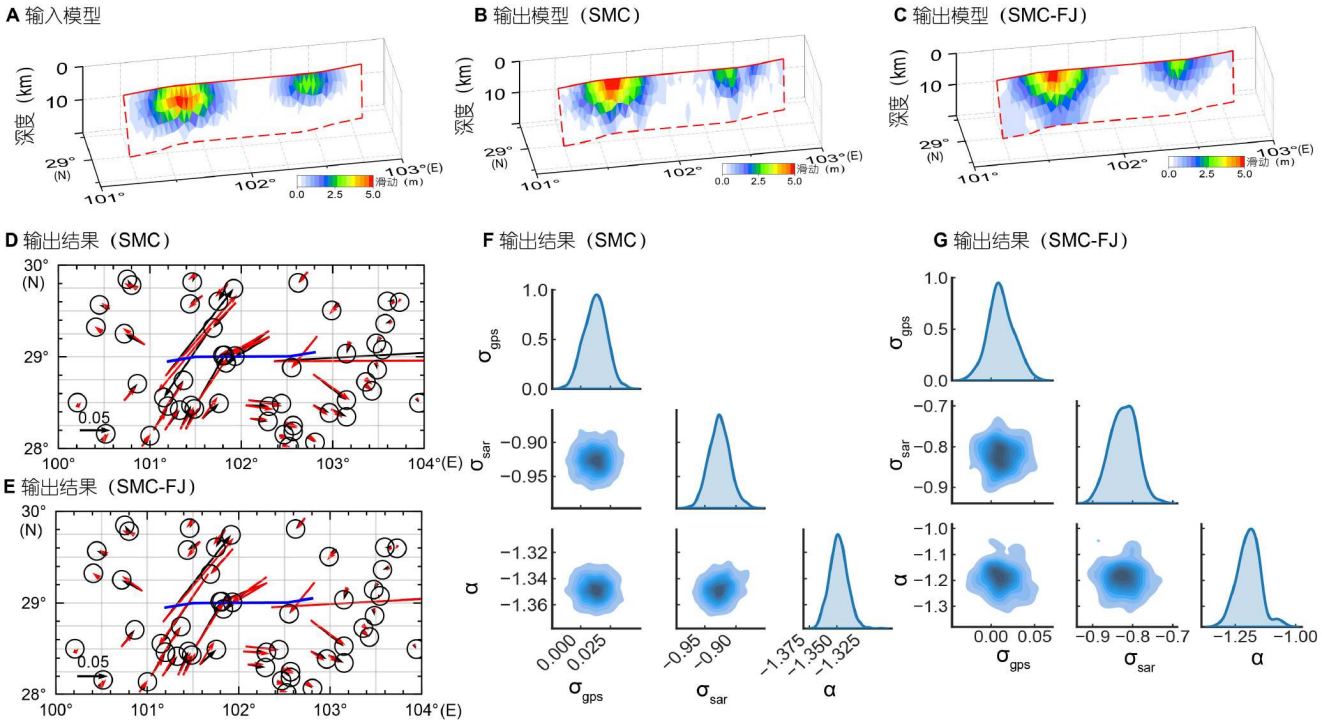

图 5　使用SMC和SMC-FJ方法的实验1结果。（A–C）输入的滑动分布模型、SMC方法反演得到的滑动分布，以及SMC-FJ方法反演得到的滑动分布；（D, E）SMC和SMC-FJ模型的观测与模拟GPS值对比，其中红色表示正演结果，黑色表示合成数据，蓝线表示断层迹线；（F, G）SMC和SMC-FJ方法得到的超参数二维边缘概率密度分布，包括InSAR和GPS的单位权方差以及平滑参数的尺度因子

述的分层调整策略一致。所有反演参数范围(包括超参数)与实验1保持一致，并针对每个倾角参数额外设定±40°的搜索范围。反演采用100个粒子和50次链迭代，在25核系统上约3小时完成收敛。

图6展示了SMC-FJ方法的反演结果，包括优化后的滑动分布、对应的不确定性估计，以及倾角修正参数与超参数的二维边缘概率密度分布。通过贝叶斯反演，倾角得到有效校正，三段倾角校正分别收敛至(−28.5°±3.8°，−15.9°±1.2°，10.0°±6.6°)，最终倾角为(56.5°±3.8°，69.1°±1.2°，−85.0°±6.6°)，与输入模型一致(图6D)。超参数收敛至(0.01±0.01，−0.82±0.03，−1.23±0.04)，滑动高值区准确落在断层弯曲位置，最大滑动分别为4.7和2.8 m，相较于输入模型的5.0和3.0 m，恢复误差约为6%与7%。该误差主要源于缺乏近断层观测数据，使局部滑动存在平滑化倾向，但整体滑动峰值位置与规模仍被准确恢复(附图S4)。

相较于中段和西段，东段倾角的不确定性较大，对应滑动分布的不确定性也相对更高(约0.8 m，图6B)，表明现有观测数据对该分段的几何约束能力较弱。上述结果表明，在断层几何未知的情况下，SMC-FJ方法能够实现断层几何与滑动分布的联合优化，并能有效量化参数不确定性。该方法能够处理复杂的断层建模场景，即使几何参数需要调整，仍可保持较高的求解精度和计算效率。

4　不同先验信息条件下的案例研究

为系统评估所提出框架在实际地震场景中的适用性与性能，本研究选取两类具有代表性的地震案例进行验证。第一类为先验信息充分的情形，如具备明确的地表破裂迹线、重定位余震以及高质量的大地测量观测数据。在此类情形下，仅依托自适应断层构建框架即可获得可靠且精细的断层几何模型，无需进一步几何优化。第二类则对应先验约束有限或存在显著不确定性的场景，例如缺乏系统的地表调查或余震排列不连续，此时贝叶斯联合反演成为解析断层几何与滑动分布并同时量化不确定性的重要途径。

4.1　在先验约束充分的地震场景下的自适应断层构建与验证

本节在具有可靠先验约束的条件下展示自适应断层构建框架的应用。2022年门源地震具有深部余震集中和地表破裂迹线清晰等特征，而2023年土耳其双震事件则属于多事件、多分段破裂场景。在这两类地震中，自适应几何构建策略均能捕捉断层几何的一阶特征，说明在

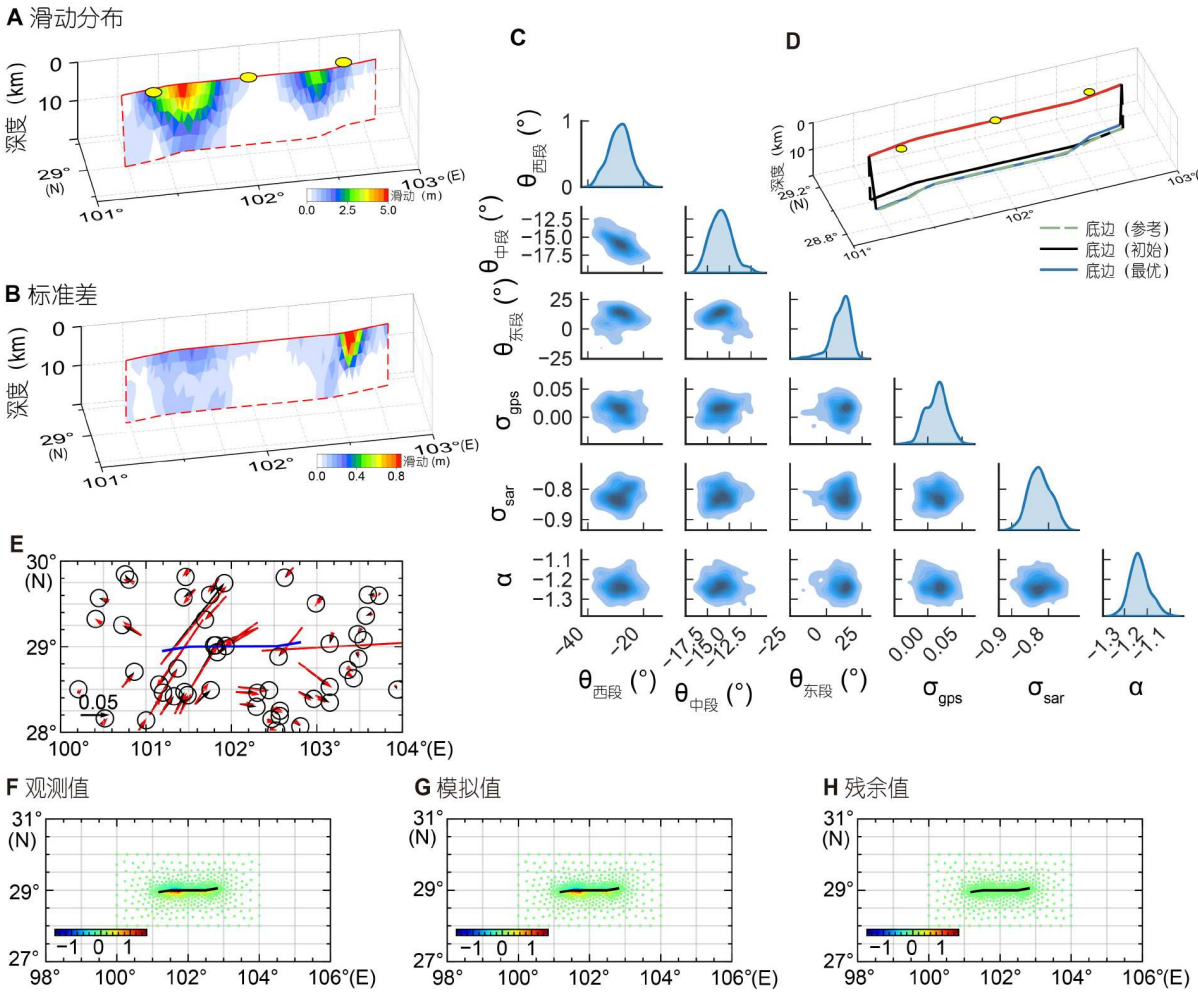

图 6　使用SMC-FJ方法进行几何校正与滑动分布联合反演的结果。(A) 滑动分布；(B) 滑动分布的标准差；(C) 超参数与几何校正参数的二维边缘概率密度分布；(D) 反演后断层几何、初始模型与模拟测试中参考(真实)断层几何的对比；(E) GPS模拟值与观测值的对比；(F–H) 分别表示InSAR的观测值、模拟值及其残差

先验信息充分时，该方法能够在不同构造环境中稳定适用。

4.1.1　2022年门源地震

2022年1月8日，青海省祁连—海原断裂系内的冷龙岭断裂发生M_w6.6门源地震。Fan等(2022)和Yang等(2022)的余震重定位结果显示，震源活动集中于约9 km深处的地震簇；潘家伟等(2022)的现场勘查揭示主破裂位于冷龙岭断裂，次级破裂位于冷龙岭断裂西南侧的托来山断裂。

为刻画深部断层几何，研究对密集余震进行等深度曲线拟合。鉴于走向变化显著，采用三阶多项式及多种鲁棒回归方法(OLS、Theil-Sen、RANSAC)，并根据不同走向区段的数据质量选择最合适的回归方式：数据质量较好处采用OLS，而含有离群值的区段则采用鲁棒回归，从而提高几何表征的稳定性并避免过拟合。图7A展示了不同方法的拟合效果：部分区段中单一拟合方法即可获得可靠结果，而其他区段则需复合方法以获得更合理的拟合曲线。随后，将得到的等深曲线与野外调查的地表破裂迹线结合，构建延伸至约18 km深度的三维断层模型(图7B)。

所得模型揭示了沿走向发生的明显倾向转换：西段向南倾，倾角约74°；东段向北倾，倾角约86°。该结果与Yang等(2023)的研究高度一致，其研究通过主震与最大余震(M_w5.1)的大地测量数据采用格网搜索获得断层几何。与大地测量反演通常返回离散块状几何近似不同，基于余震的几何建模能够生成连续、平滑的空间几何表达，并识别出倾向反转特征。该趋势同时支持最大余震沿北倾断层发生的解释，进一步验证了自适应几何建模策略的可靠性与准确性。

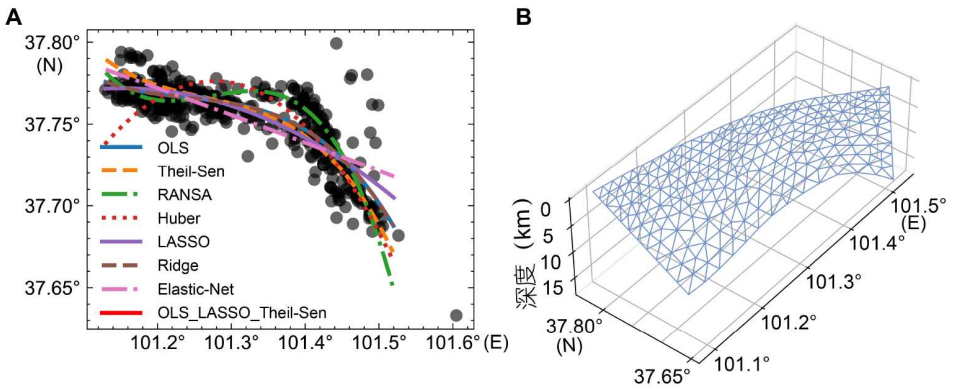

图 7　断层等深曲线拟合及三维几何构建。(A)基于重定位余震数据的三阶多项式拟合结果与(B)通过整合地表破裂迹线与等深曲线构建的断层几何模型。OLS：普通最小二乘法；Theil-Sen：Theil-Sen估计；RANSAC：随机采样一致性算法；Huber：Huber回归；LASSO：最小绝对值收缩与选择算子；Ridge：岭回归；ElasticNet：弹性网回归。红色曲线表示最优拟合结果，由OLS、LASSO和Theil-Sen分段组合构成

4.1.2　2023年土耳其双震事件

2023年2月6日，土耳其南部发生M_w7.8与M_w7.5双震事件，沿东安纳托利亚断裂带(EAFZ)及Sürgü断裂产生破裂，涉及多个断层分段，包括Pazarcık、Erkenek、Çardak和Sürgü等。野外调查与地球物理研究(Jia等，2023；Melgar等，2023；Ren等，2024)均指出破裂带具有整体陡倾的结构特征。

该事件中，断层几何构建基于断层迹线附近缓冲区内提取到的余震数据(图8A)，并将余震投影至垂直于走向的剖面进行拟合分析(图8B)。与2022年门源地震呈现显著走向变化，需要较高阶函数拟合不同，土耳其地震的跨断层剖面显示余震在倾向方向上呈近线性分布。

为量化各分段倾角，余震目录通过DBSCAN算法进行聚类，并在每个聚类内部分别执行线性、鲁棒及正则化回归以估算倾角(图8C)。随后，将得到的倾角估计结果与地表破裂信息结合，生成延伸至约25 km深的连续三角网格断层模型(图9A)。

构建的几何模型显示断层整体保持陡倾特征，倾角从79°(向东倾)变化至−88°(向西倾)，与现有研究结果一致(Jia等，2023；Melgar等，2023；Ren等，2024)。尽管Ren等(2024)在浅部区域采用固定90°倾角，本研究采用的自适应拟合允许局部变化，更准确反映了结构转折附近的几何细节。而Chen等(2024)与He等(2023)在部分区域报道的较缓倾角(约50°)未在本模型中出现，可能与这些区域处于主破裂带之外，或因数据分辨率不足或反演伪影所致。

本方法强调断层几何表达的连续性，避免将断层结构人为割裂。图9B显示，自适应三角网格在保持走向与倾向分段差异的同时，实现了几何的整体光滑表达，提高了断层模型在结构与力学上的合理性，并减少人为分段带来的主观性偏差。所得几何模型与独立观测结果保持一致，充分体现了该方法在多分段破裂场景中的适用性。

4.1.3　余震约束断层几何的贝叶斯验证：2022年门源地震

为评估基于余震重定位构建的断层几何是否能够真实反映破裂结构，本节对2022年M_w6.6门源地震实施断层几何与滑动分布的贝叶斯联合反演。采用第4.1.1节所构建的曲面断层几何(由余震拟合的等深曲线与地表破裂迹线共同确定)作为参考几何，并沿主断层及次级断层下边界的平均局部法向方向施加几何校正。该反演旨在概率框架下检验模型对观测地表形变的拟合程度，以验证基于余震构建的断层几何的物理合理性。

反演使用三景Sentinel-1干涉图(T033D降轨、T026A与T128A升轨)及相应的视线向偏移量约束同震变形(附图S6–S7)。干涉图由GAMMA软件处理(Wegnüller等，2015)，使用30 m SRTM DEM(Rodriguez等，2005)进行地形校正，并通过GACOS(Yu等，2018)消除一阶大气延迟。雷达相位提供主要形变约束，而视线向偏移量对识别断层迹线位置和约束浅部滑动特征具有补充价值(He等，2021)。

采用SMC-FJ方法对断层几何校正与滑动分布进行联合反演，同时估计数据权比例因子和平滑超参数。反演结果(图10B)显示，主断层段仅需微小几何调整(下边缘偏移约−0.6±0.2 km)，表明由余震重定位构建的断层几何与实际破裂面具有高度一致性。相比之下，次级断层的几何校正幅度较大(约−3.1±0.5 km)，可能与末端分叉区地震活动复杂、几何与动力学相互作用较强有关。两段断层的平均倾角分别为78.5°和85.2°。

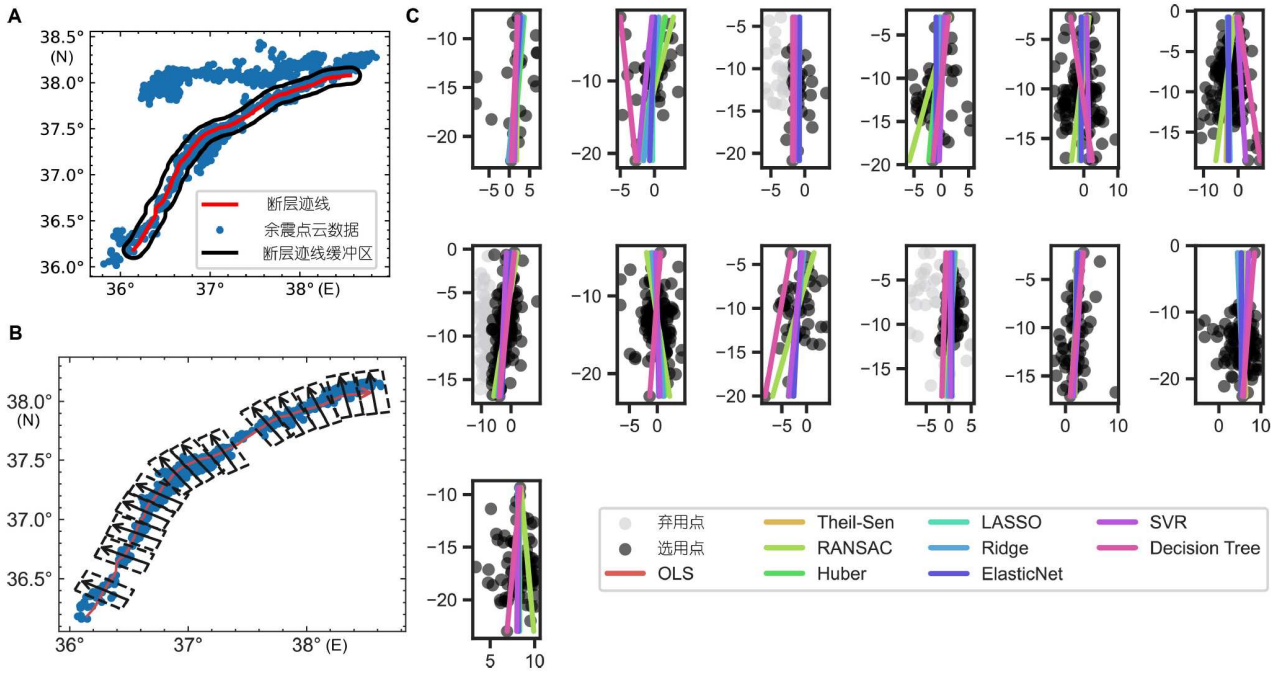

图 8 断层相关余震的识别与拟合。(A) 沿断层提取缓冲区余震点云。(B) 断层与剖面位置及(A)中提取余震分布。红色箭头表示指定的走向方向，用于定义剖面的序列及倾角拟合的正负方向约定。若倾向位于指定走向方向的右侧(右手法则)，则定义为正倾向。带箭头的虚线框表示提取的剖面位置，箭头方向表示剖面的正x轴方向，原点位于与指定断层线的交点处。(C) 剖面点云的倾角回归拟合结果

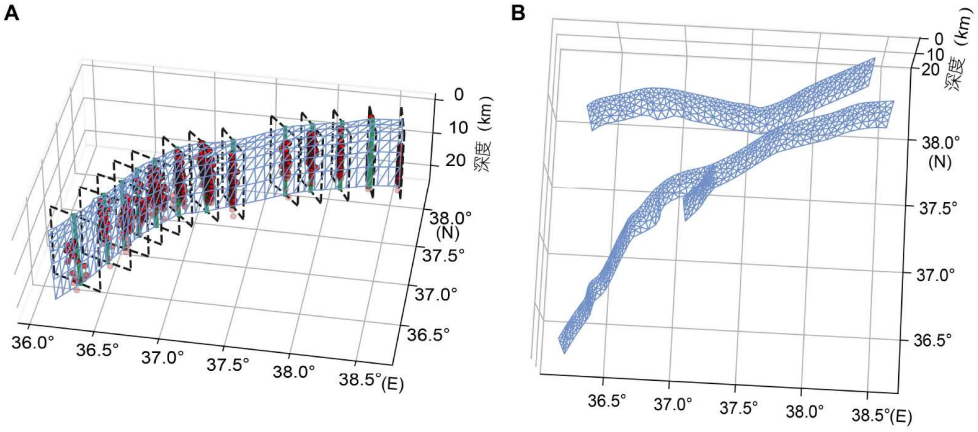

图 9 断层剖面拟合与三维几何构建。(A) 东安纳托利亚断层的剖面分布与投影余震数据，虚线框表示跨断层剖面位置，红点为断层两侧5 km范围内重定位余震的投影位置，绿色实线表示各剖面分段余震的最佳拟合曲线；(B) 2023年土耳其双震事件的整体断层几何结构

滑动分布(图10C)表明，在约3–5 km深度处存在主滑动高值区。最大滑动约为5.0 m，随后向浅部逐渐减小至约2.8 m，略低于野外调查得到的地表最大位移(约3.5 m)。该差异主要来源于地表网格分辨率约1.7 km，使局部大位移被平滑。为验证这一解释，引入改进的三角网格模型(浅部分辨率1 km、深部1.5 km)，在保持数据权比例因子不变的条件下采用有界最小二乘(BLS)方法求解，并通过L曲线搜索最优平滑参数。改进后的结果(附图S8)显示地表最大滑动约为3.5 m，与野外观测一致，并保持滑动高值区位置不变。整个破裂表现出明显的不对称性：滑动自西向东逐渐增强，并在几何弯曲处终止。滑动后验标准差在主滑动高值区普遍低于0.3 m，表明反演具有较高的稳定性(附图S9)。

模型与大地测量数据的拟合程度良好，整体均方根误差(RMS)为0.047 m，方差减小率(VR)为92.7%(附图S6–S7)。干涉图的VR分别为T033D：98.6%、T026A：99.9%、T128A：99.8%；对应偏移量的VR分别为91.9%、90.9%和86.7%。由滑动分布估算的总地震矩为

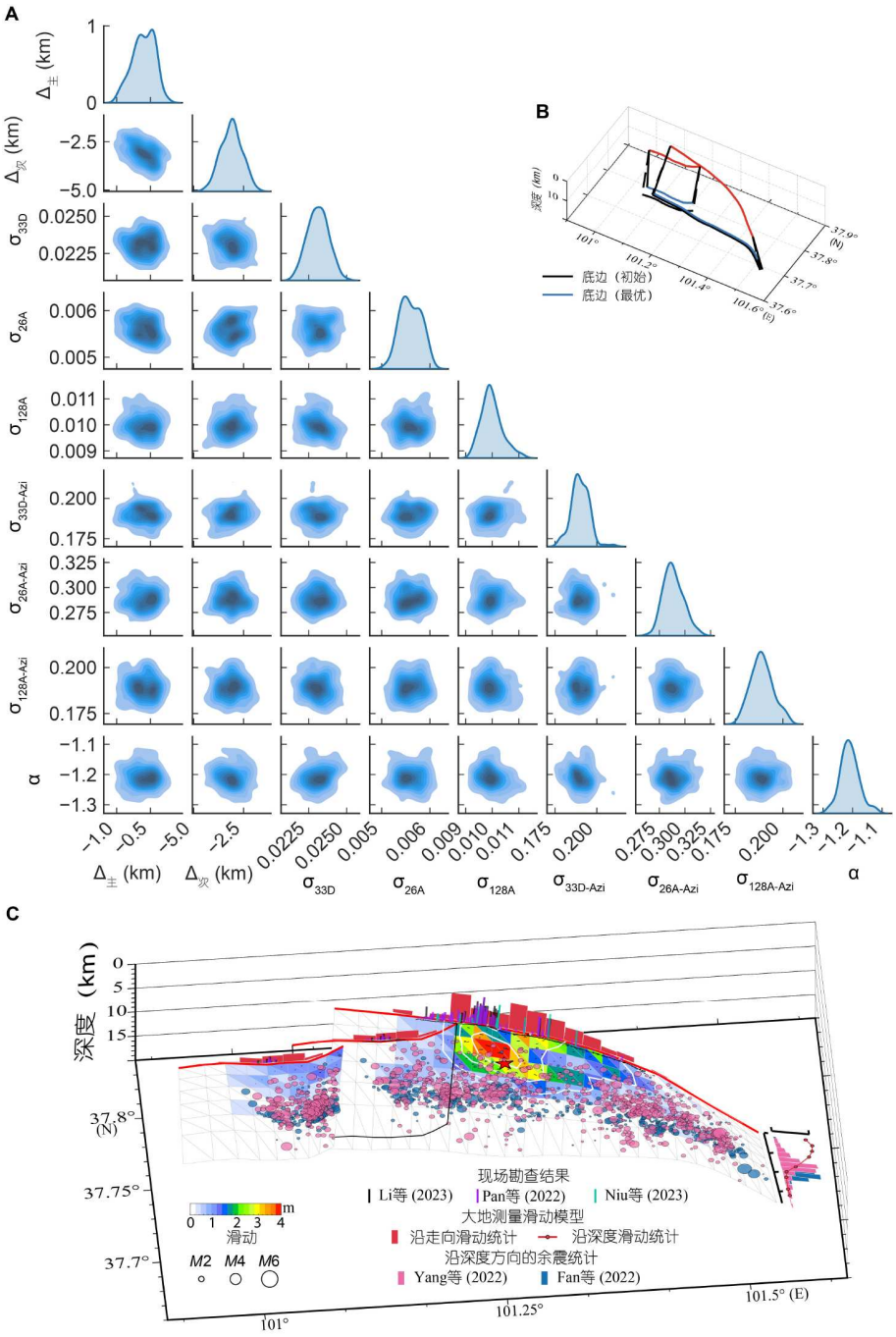

图 10　2022年门源地震单节点贝叶斯反演所得的断层几何、滑动分布与超参数后验分布。（A）单位权方差(σ)与对数倒数平滑参数(α)的二维后验概率密度函数(PDF)。σ的下标表示数据集标识：数字标签对应Sentinel-1轨道号，其中“A”和“D”分别表示升轨与降轨，“Azi”表示方位向(偏移量)观测。Δ表示相对于参考模型的断层倾角修正量；（B）反演得到的后验断层几何(彩色曲线)与初始断层几何(灰线)的对比；（C）三角网格断层面上的后验滑动分布。沿走向的红色柱状图表示近地表滑动分布，沿深度的红色曲线表示深度方向展布的滑动分布。粉色与蓝色圆点分别表示Yang等(2022)与Fan等(2022)的余震重定位结果，其深度分布的柱状图以相同颜色表示。沿走向的彩色条带表示来自不同野外调查的地表破裂观测(潘家伟等，2022；Li等，2023；Niu等，2023)

9.27×10^{18} N m(M_w6.6)，与已有研究结果一致(冯万鹏等，2022；Yang等，2023；He L等，2024；Guo等，2025；Liu等，2025)。以上结果表明，在具备高质量先验信息(如重定位余震)时，余震约束的断层几何可作为破裂面的可信表示，并为后续动力学分析提供可靠基础。然而，对于地震活动稀疏或空间排列模糊的次级断层结构，几何存在一定不确定性，需要通过贝叶斯反演予以评估。

4.2 具有有限或不确定先验约束的事件

当断层几何先验约束较弱或存在歧义时，例如缺乏明确地表破裂或余震空间相关性较差的情况，贝叶斯联合反演方法能够在联合求解断层几何与滑动分布的同时量化不确定性，从而在形变解释中发挥关键作用。本节选取2022年泸定地震与2019年Ridgecrest地震序列作为代表性案例，以展示本文所提框架在观测条件有限或结构复杂破裂场景中的适用性。

4.2.1 2022年泸定地震

2022年泸定地震(M_w6.6)是典型的贝叶斯几何优化场景，其破裂过程中未形成清晰的地表破裂，且重定位余震的绝对位置不确定性较大，这给基于地震数据的几何推断带来挑战。已有研究采取不同策略：如Xu X等(2024)利用GoCAD软件(Riesner等，2017；Plesch等，2020)基于余震构建断层几何，而Xu等(2023)则先进行断层几何的非线性优化，然后使用变分贝叶斯方法(Sun等，2023)反演精细的滑动分布。这些研究表明，仅依赖余震数据的几何模型往往无法解释大地测量观测所体现的三维形变模式，强调了整合不同观测数据约束的重要性。

该案例研究中，断层几何首先通过自适应构建策略来估计倾角(图11A、B)。由于缺乏地表破裂，断层上边界定义为沿余震展布走向的直线，随后结合不同分段倾角生成连续的三维弯曲断层模型(图11C)。考虑到余震绝对位置的不确定性(可能由不均匀台站分布造成)，采用联合非线性-线性贝叶斯反演方法，在反演中同时优化断层几何与滑动分布并估计各自的不确定性。

为表征几何先验的不确定性，设置了四个几何校正参数：断层整体平移、旋转以及断层底边的法向偏移。校正通过结构单元与线单元组合实现，其中结构单元用于描述几何相对均一的断层段，进行整体平移与旋转；

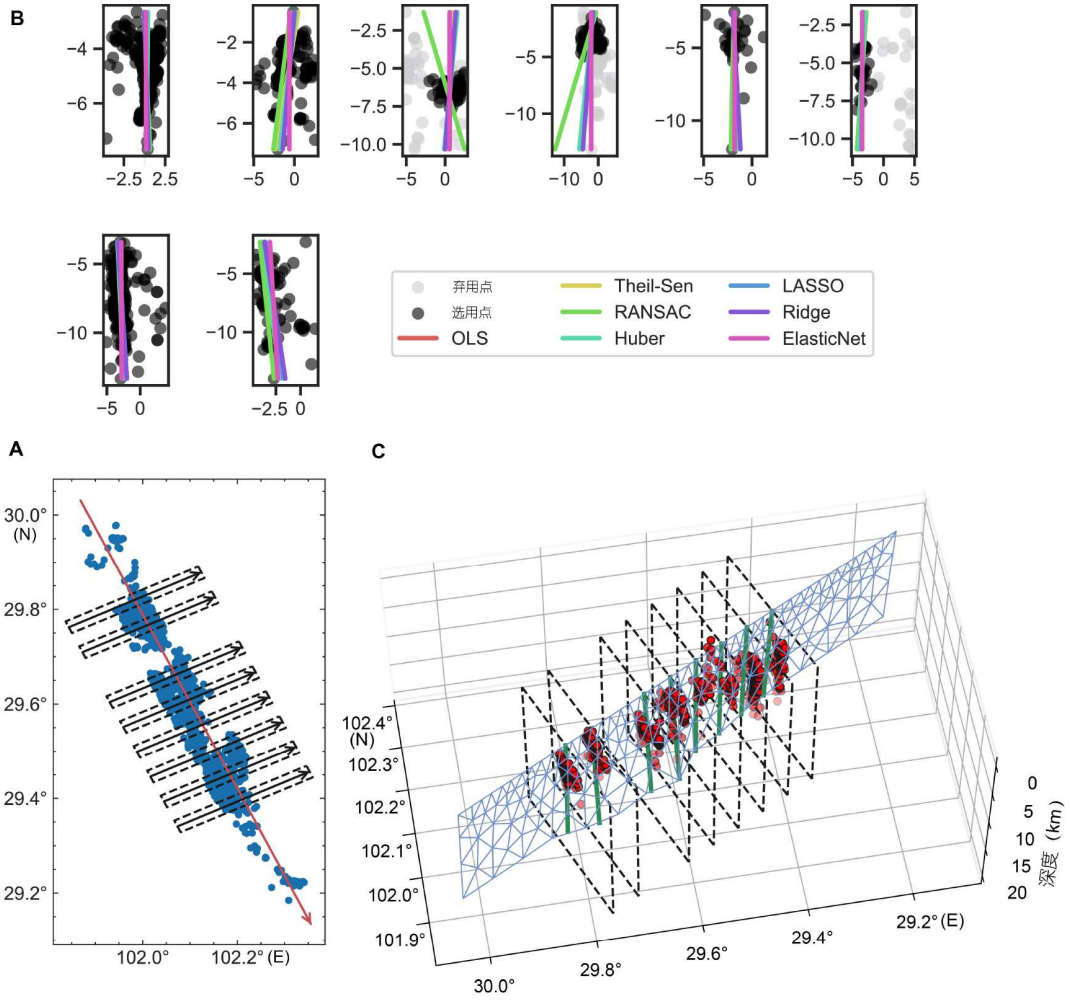

图 11 断层相关余震识别与拟合。(A) 沿断层走向的剖面分布；(B) 对剖面点云数据采用回归方法估算倾角；(C) 基于(B)中剖面倾角构建的断层几何

线单元用于细化断层边界形态，通过局部法向偏移改善几何一致性。

反演整合了Li等(2022)与Xu等(2023)发布的GNSS数据及InSAR升降轨数据。顾及不同数据源的误差水平，引入三个独立的观测方差参数，用于动态平衡GNSS与不同轨道InSAR之间的权重，同时引入平滑超参数以抑制滑动分布的非物理振荡。上述超参数均在贝叶斯反演过程中自适应确定。

联合反演得到的断层几何能够更好地与GNSS和InSAR形变模式相匹配(图12和附图S5)。与仅基于余震的几何模型相比，优化后的断层存在显著的几何修正：发生−11.18°±0.79°的整体旋转，在x与y方向的水平平移分别为2.32±0.80和−4.44±2.39 km，并沿平均走向方向产生4.12±0.94 km的法向偏移，使几何位置与观测形变信息保持一致。基于两种几何模型分别反演滑动分布并与观测对比，采用余震派生几何时的RMS与VR分别为：GNSS：0.0032 m、InSAR升轨数据：0.0161 m、InSAR降轨数据：0.0089 m，总体RMS　0.0116 m、VR为62.01%；贝叶斯优化几何的反演结果显著改善：GNSS：0.0014 m、InSAR升轨数据：0.0109 m、InSAR降轨数据：0.0053 m，总体RMS　0.0076 m，VR提升至83.74%，表明优化后的几何更符合形变观测。

GNSS与InSAR数据权重的最优对数尺度因子分别为0.04±0.03，0.93±0.02和0.64±0.02。这些尺度因子确保反演过程中不会出现单一数据源的主导效应。最优对数平滑尺度因子为−1.43±0.05，其在抑制非物理特征的同时保持了滑动分布的真实性。图13展示了主要参数的二维边缘概率密度分布，揭示了反演结果的不确定性特征。

该案例表明，在贝叶斯约束下融合地震与大地测量信息，不仅能够显著提升断层几何与滑动分布的精度，还能获得稳健的不确定性估计。结果强调了在先验约束不足的复杂破裂情景中，联合贝叶斯反演策略的必要性与有效性。

4.2.2　2019年Ridgecrest地震序列

2019年发生的Ridgecrest地震序列，包括M_w6.4的前震与M_w7.1的主震，为在复杂断层体系中检验贝叶斯优化反演方法提供了典型案例。该地震序列表现出共轭断层破裂与多断层级联破裂的特征。除断层结构复杂外，该事件的观测资料极为丰富，包括大量重定位余震数据以及多源大地测量形变观测，为反演结果的独立验证提供了可靠依据。

Ridgecrest地震序列发生在美国加利福尼亚州。前震破裂沿NE-SW向断层发展，主震破裂沿NW-SE向断层扩展，断层交叉与相互作用复杂，引发广泛关注。已有研究(Ross等，2019；Wang和Bürgmann，2020；Jin和Fialko，2020；He等，2022)利用多源大地测量数据(GNSS、InSAR)与余震重定位结果，开展了断层建模与

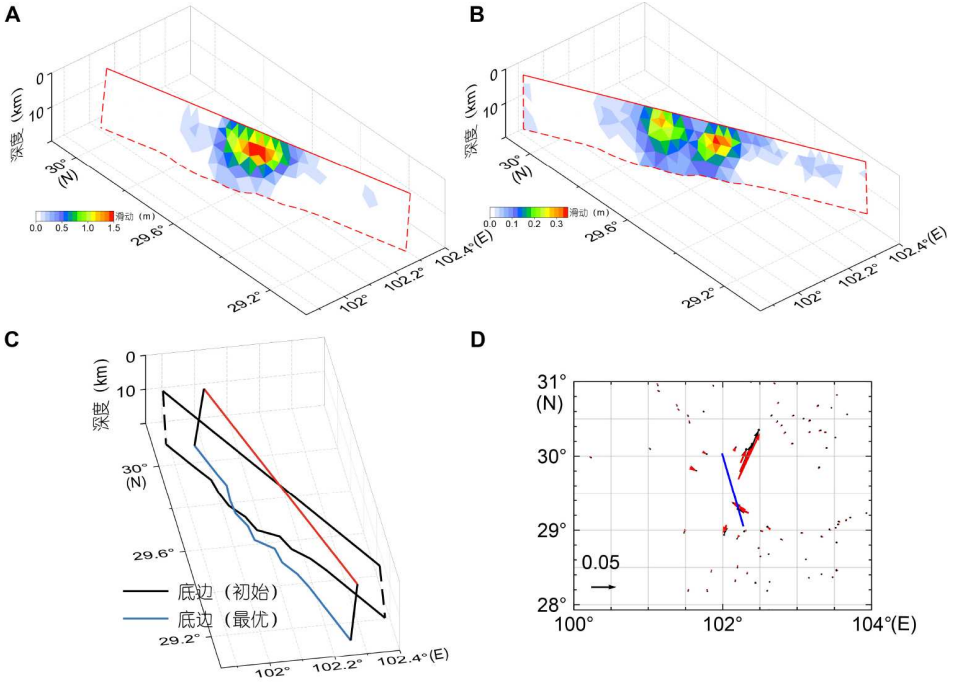

图 12　断层建模与位移拟合结果。(A) 最优滑动分布；(B) 滑动分布的标准差；(C) 后验断层几何与初始断层构型对比，黑线表示初始断层上、下边界迹线，红线与蓝线分别表示修正后的上、下边界迹线；(D) 观测与模拟GPS数据对比。黑色箭头表示观测值，红色箭头表示模拟值

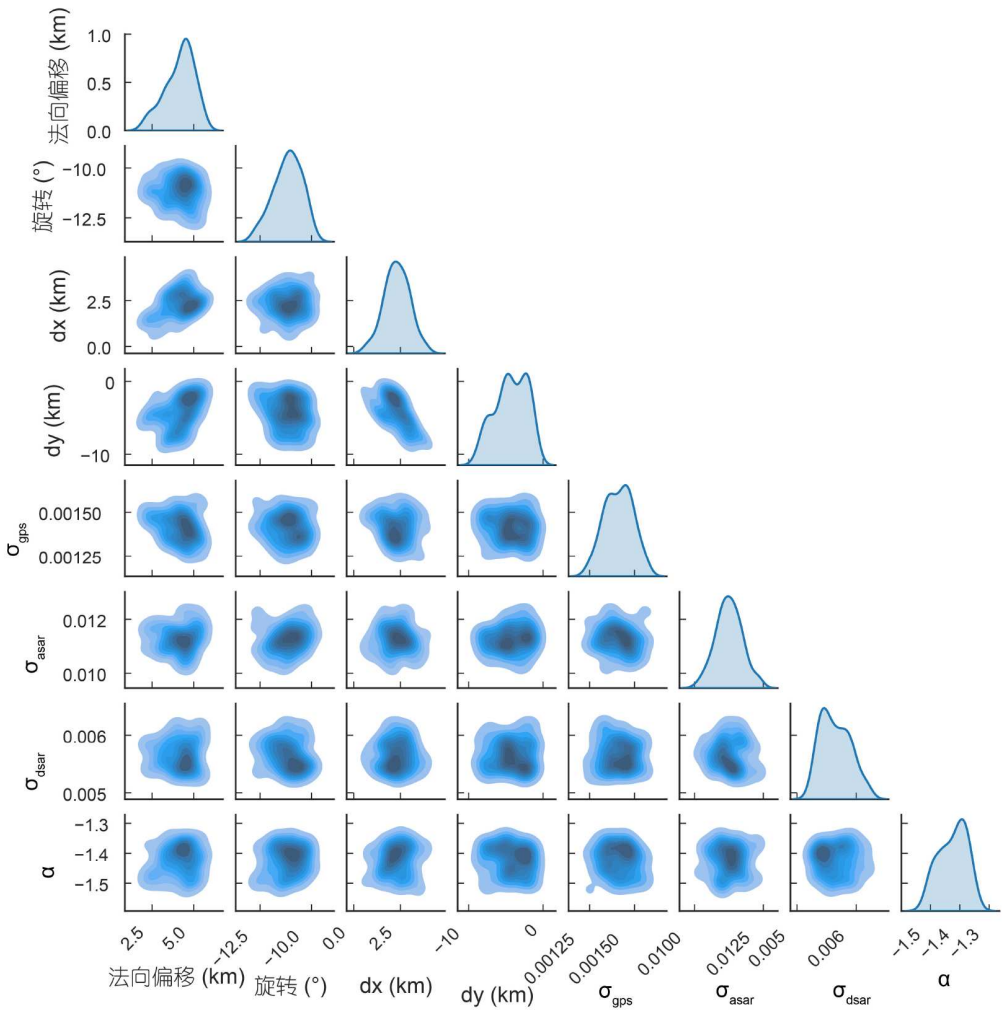

图 13　几何及超参数二维边缘概率密度分布图

地表破裂制图，获得了约束良好的断层几何模型。Ross等(2019)发布了高精度余震目录，美国地质调查局(USGS)绘制了地表破裂分布，这些观测为断层几何提供了充分的先验约束。

本案例的目标并非复制已有断层几何细节，而是验证所提出的多场景贝叶斯反演方法是否能够在复杂、多段、多事件破裂条件下保持灵活性与稳定性。因此，将断层几何适当简化为两条共轭断层，以分别表示前震与主震破裂，以重点检验贝叶斯方法在多段断层情景下的适用性。

本案例使用数据包括前震(M_w6.4)与主震(M_w7.1)的同震GNSS位移观测，以及同时覆盖两次事件的升轨与降轨InSAR数据。考虑到不同数据源之间在可靠性与空间覆盖上的差异，贝叶斯方法中引入三个独立的标准差参数，动态平衡观测数据权重。由于具有明确的地表破裂迹线，需估计的几何参数主要为两条共轭断层的倾角。

在反演中采用线性-非线性贝叶斯联合优化方法，并为前震与主震断层分别设置独立的平滑参数，以避免统一平滑约束导致的过度折中，使滑动分布能够适应不同断层段的数据覆盖与破裂特征。反演结果(图14)表明，简化的共轭断层模型能够有效拟合多源大地测量观测，并与既有研究结果(Ross等，2019；Wang和Bürgmann，2020；Jin和Fialko，2020；He等，2022)保持一致，验证了贝叶斯反演方法的可靠性。主震断层的最优倾角约为87.5°，倾向东北；前震断层的最优倾角约为88.7°，倾向西北。值得注意的是，这些调整并非直接作用于倾角，而是通过对断层下边界位置进行水平法向偏移实现。贝叶斯反演为不同数据集的对数单位权方差提供了稳健估计，保证了各数据源贡献的平衡性。降轨InSAR、升轨InSAR、前震GNSS与主震GNSS数据的最优对数协方差缩放因子分别为−1.70±0.02、−1.81±0.02、−2.39±0.03与−2.33±0.01，反映了各数据集质量与覆盖范围的差异，

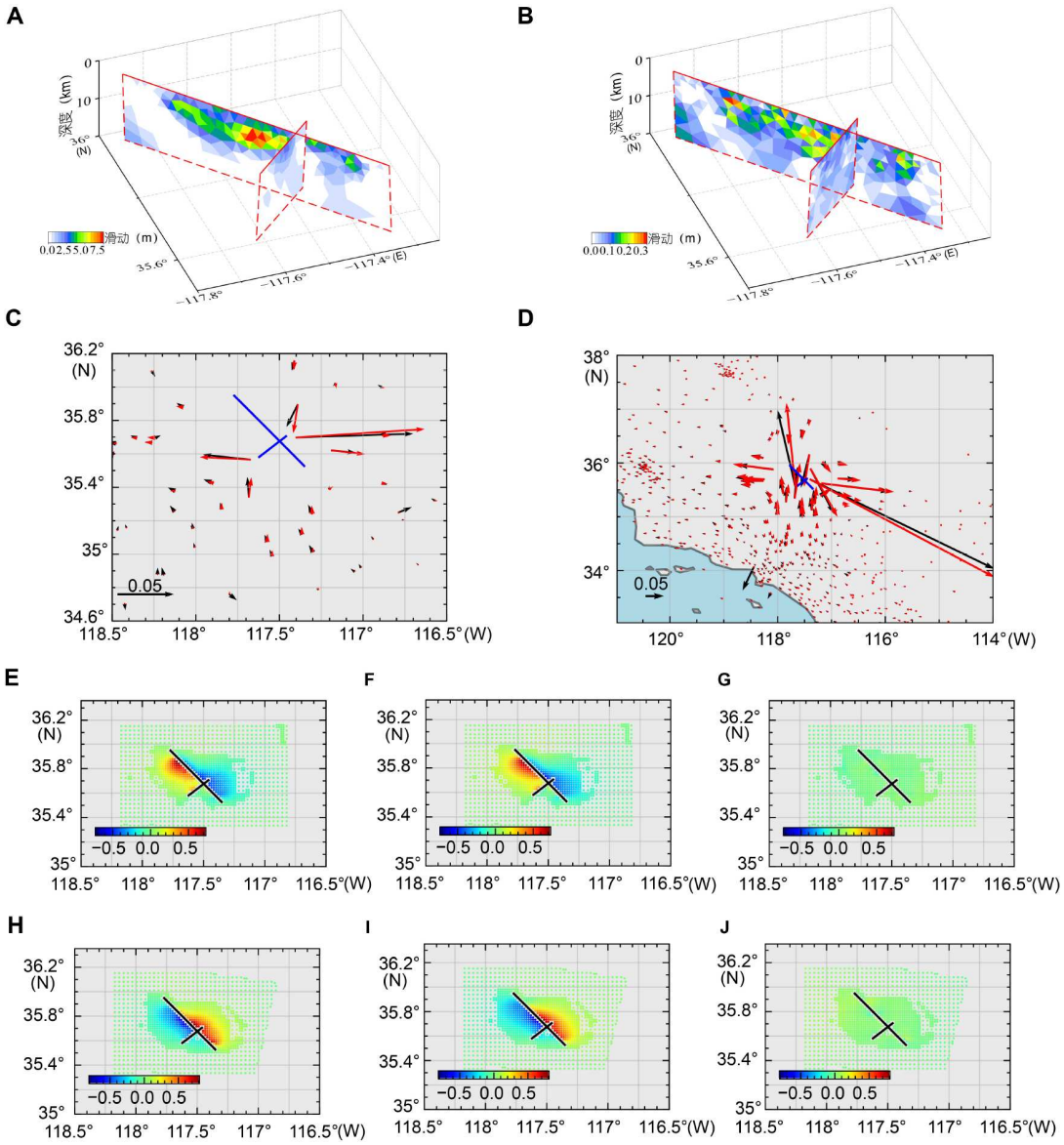

图 14　断层建模与位移拟合结果。(A) 最优断层几何与滑动分布；(B) 滑动分布的标准差；(C) 前震阶段观测与模拟GPS位移对比；(D) 主震阶段观测与模拟GPS位移对比，黑色箭头表示观测数据，红色箭头表示模拟值；(E–G) InSAR升轨观测位移：观测值、模拟值及残差；(H–J) InSAR 降轨观测位移：观测值、模拟值及残差

避免了单一数据类型造成的偏倚。

前震与主震断层段的平滑参数分别为−0.79±0.05与−1.12±0.11。该设置使滑动分布能够在不同断层段上独立约束，避免统一平滑带来的非物理平滑效应。图15展示主要参数的二维边缘概率密度分布，揭示了断层几何、滑动分布和平滑参数之间的相互制约关系。

总体而言，该案例验证了在多段、多事件破裂场景下，贝叶斯几何优化反演方法能够可靠解析断层几何及滑动特征。通过灵活的断层参数化与分段独立平滑策略，该方法能够在复杂断层环境中保持稳健性，并重现与独立研究一致的破裂行为，展现出强适应性与泛化能力。

5　讨论

5.1　自适应断层几何构建与优化的限制

在当前的自适应断层几何构建方法中，我们将与主断层无关的小微震视为噪声。这类噪声可能来源于邻近断层分支、区域构造复杂性或更广泛的构造背景(Carena和Suppe，2002)。尽管新方法已有所改进，但在所有情景下实现完全自动化的断层构建仍具挑战性。研究过程中仍需人工介入，检查拟合结果并在不同拟合策略(如跨断层剖面或等深线拟合)之间进行选择与组合，从而尽可能全面地反映断层特征。这种对人工判断的依赖不可避

免地引入了主观性，也增加了结果的不确定性。

目前的几何构建方法主要依赖于剖面拟合或等深线拟合，尚不具备专业三维建模软件(如GoCAD；Riesner等，2017；Lu等，2022)中的曲面拟合功能。然而，本文框架对应的软件实现与GoCAD输出结果兼容，必要时可实现融合。尽管如此，该方法尚未实现完全自动化，仍需人工参与进行解释与决策。为进一步优化这一过程，未来的研究应着重减少人工干预并提升自动化程度。这可通过引入先进的机器学习技术来实现，使其能够处理复杂断层网络并区分噪声与相关地震事件。此外，在断层构建阶段引入贝叶斯优化也有助于提高模型精度，降低主观影响，从而获得更可靠的断层几何表达。

尽管本文提出的框架已在多种破裂场景下表现出较强适应性，但在断层高度分支化、余震过于稀疏或形变观测空间覆盖受限时，几何构建结果的可靠性可能下降。在此类情形下，需要加强先验正则约束、引入其他信息来源或结合地质解释与构造背景，以保持断层几何表达的稳定性与物理合理性。

5.2 贝叶斯反演的计算效率

SMC-FJ方法的核心优势在于，将线性滑动分布问题以解析方式求解，降低贝叶斯反演中需要采样的参数数量，从而显著提升计算效率。在实验1中，在25核CPU系统上，相同配置条件下SMC方法需要约12小时收敛，而SMC-FJ约1.5小时即可完成收敛。包括泸定地震与Ridgecrest地震等案例在内的联合贝叶斯反演，总收敛时间通常在数小时至数十小时，总CPU耗时仅为数百CPU小时，远低于Dutta等(2021)与Wei等(2023)中所需的数万CPU小时。这充分表明，当需要同时优化断层几何与滑动分布时，SMC-FJ方法具有显著的计算效率与可扩展性。

当前主要的计算瓶颈在于：每次几何更新均需要重新计算对应子单元的格林函数。对于具有大量三角单元的复杂断层模型，这一过程的计算代价会迅速累积。为缓解该问题，引入了“更新标签(update mask)”机制，仅对发生变化的子单元重新计算格林函数，从而按比例减少计算开销。基准测试(附图S10)显示，在串行计算条件下，运行时间与需更新的子单元数量近似线性相关，说明该策略在一定程度上缓解了几何变化导致的重复计算负担。

另一种可能的方案是预计算有限数量的断层几何组合对应的格林函数并进行查询，但此方案仅适用于参数数量较少或几何变化范围受限的场景，对于复杂断层系统难以扩展。相比之下，基于GPU的格林函数实时求解(Tarantola，2005)有望提供更优的可扩展性。例如，Ben Thompson等(2023)开发的cutde程序实现了GPU加速的格林函数计算，可直接在反演中实时调用。未来的研究方向将重点探索GPU加速或CPU-GPU混合框架，以进一步降低大规模贝叶斯断层反演的计算成本，并实现断层建模的实时计算能力。

5.3 复杂断层系统中场景自适应贝叶斯反演的必要性

在地震破裂过程研究中，准确刻画断层几何与滑动分布至关重要。断层几何直接影响破裂的起始、传播与终止过程(Biasi和Wesnousky，2017；Taufiqurrahman等，2023；Zhang Y J等，2023；Lee等，2024；Wen等，2024；Xu D等，2024)。传统方法(如分段倾角搜索、简化或固定几何模型，或过度依赖先验信息而未充分考虑不确定性的方式)往往引入主观偏差，难以全面反映断层与滑动分布之间的复杂耦合关系。由此，这些方法在应对多样化地震场景时，往往无法准确模拟断层系统的真实动力学特征。

贝叶斯反演提供了一种稳健的概率框架，可系统整合先验信息与观测数据，从而捕捉模型不确定性并更全面地揭示断层几何与滑动分布的相互作用。然而，尽管贝叶斯反演具有显著优势，其在断层几何与滑动分布联合反演中的应用仍较为有限。主要原因有二：一是计算成本高昂，二是缺乏在不同地震场景下的普适性(Fukuda和Johnson，2010；Dutta等，2021；Wei等，2023)。传统贝叶斯方法往往需针对特定地震进行定制，难以在多种断层类型中推广应用。

为克服这些限制，本研究提出了场景适应的贝叶斯反演策略。SMC-FJ方法通过将滑动求解与非线性参数搜索分离，降低了反演问题的维度，从而实现了高效且可扩展的复杂断层系统反演。同时，引入分层调整单元以优化断层几何，提高了方法的适应性。这些单元提供了一种灵活而有序的机制，可根据不同破裂场景的特征对断层几何进行调整。

该统一框架首先通过自适应断层构建模块，基于可获得的先验数据快速生成标准化断层模型；随后，利用场景适应的贝叶斯反演进一步精化模型，实现跨不同地震场景的高精度与一致性。自适应断层构建的价值不仅在于单个案例分析，还体现在案例库的构建，从统计学角度来分析破裂机制。此外，这些案例库亦可作为机器学习与人工智能研究的基础数据集，为基于大规模、高质量断层模型的智能化地震研究提供支撑。由此，自适应断层构建与场景适应的贝叶斯反演的结合，不仅能提升实际断层建模的可靠性，也为深化地震动力学认识提

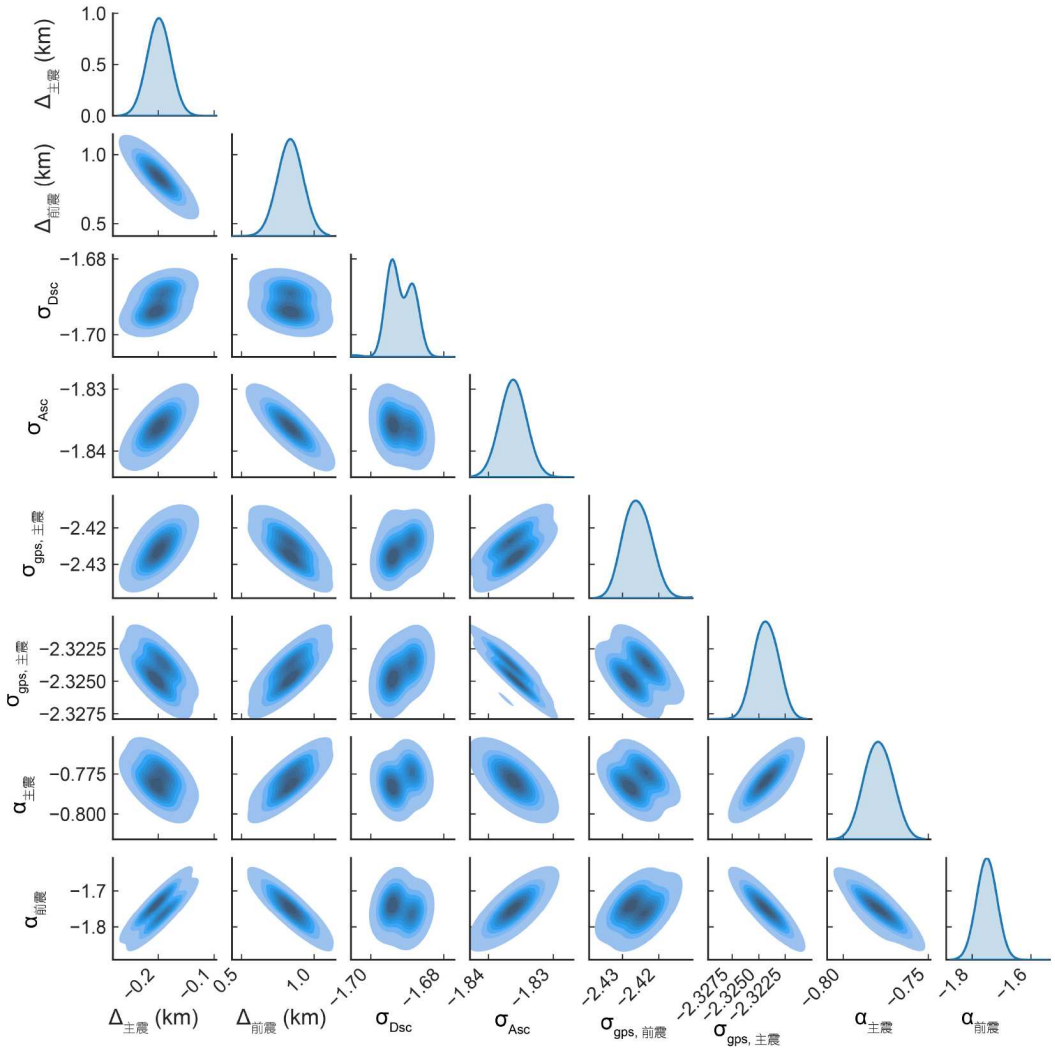

图 15　几何与超参数二维边缘概率密度分布图

供了科学途径。

该框架的有效性在泸定地震与Ridgecrest地震案例中得到验证。泸定地震的滑动分布集中于几何复杂的断层段上，尽管余震延伸至破裂终止点之外，但破裂并未继续传播(Li等，2022；Zhang L等，2023)。Ridgecrest地震的滑动分布呈多峰特征，滑动量随破裂穿越共轭断层系统而变化(He等，2022)。这些结果凸显了断层几何在破裂动力学中的关键作用，进一步强调了灵活且精确建模框架的必要性。

通过引入基于分层调整单元的场景自适应贝叶斯反演，不仅能够恢复最优的断层几何结构，还能同时评估相关不确定性，从而深入揭示断层几何与滑动分布之间的耦合关系(Jia等，2023；Taufiqurrahman等，2023；Wen等，2024)。因此，贝叶斯反演在提升复杂断层系统认知和地震灾害评估能力方面具有巨大潜力。

5.4　断层几何对破裂传播与滞后地震激活的调制作用

2022年门源地震的贝叶斯反演结果(第4.1.3节)显示，主滑动高值区(最大滑动)位于断层陡倾向西的部位，深度约3–5 km，最大滑动量约5.0 m。该滑动高值区在空间上与重定位余震簇及InSAR干涉图中观测到的强烈地表形变区域高度吻合，表明破裂位置与断层几何之间具有紧密对应关系。滑动分布模型、重定位地震活动与地表破裂测量结果(潘家伟等，2022；Li等，2023；Niu等，2023)之间的一致性进一步验证了所推断断层几何的可靠性。这表明，当余震约束的几何与高分辨率大地测量数据相结合时，可有效恢复与破裂动力学相关的结构细节。

一个关键的结构特征是断层向东的平滑几何弯曲，表现为走向与倾向的共同变化。断层从主滑动区的约74°向西倾逐渐过渡到东段约86°向东倾，同时伴随走向的顺时针旋转(图7b)。该弯曲区标志着主滑动区的东缘，并

与滑动幅度的急剧减小相对应，表明破裂在几何弯曲处减速并终止。

尽管弯曲处以东仍有余震活动，但该区域并未解析出显著的同震滑动。最大余震(M_w5.1)发生在主震破裂终止点以东数公里处，位于东倾的断层段上。Yang等(2023)的震后形变观测结果显示，断层东段在震后阶段出现了最大的地表位移，这些位移集中于断层东侧，与东倾破裂面一致，表明M_w5.1余震重新激活了该断层段。上述对应关系表明，断层几何不仅控制了同震破裂的终止，还影响了震后阶段应力集中及余震触发的空间分布。

这种行为说明平滑的几何弯曲可调制破裂的停滞位置，并主导后续地震活动的时空分布。在其他弯曲或斜交断层系统中也观察到类似现象，即弯曲带既作为破裂阻滞区，又是应力集中的构造部位(如，Elliott等，2015；Duan，2019；Duan等，2019)。值得注意的是，Liu-Zeng等(2024)对2021年玛多地震的研究也指出，断层走向变化在控制破裂动力学中起主导作用，其影响甚至超过断层的成熟度。这进一步支持了更广泛的认识——几何结构(尤其是走向偏转)可同时控制破裂分段与震后演化。

从更宏观的构造视角看，此类弯曲相关的几何过渡与海原断裂带东段的观测结果一致。Lei等(2024)记录到，走向与倾向的旋转(例如甘盐池拉分盆地的形成)通常与长期的运动学变化和局部变形集中有关。这些继承性的几何特征影响了断层的长期演化与破裂行为，为门源地震中观测到的破裂终止及震后余震激活提供了动力学背景。

此外，东段近直立的断层倾角可能还影响了区域断层类型的空间分布。在该区域内，主断层以走滑运动为主，而邻近的逆冲断层事件(包括1986年和2016年地震；Zhang等，2020；Luo和Wang，2022)则发生在北侧南倾的北冷龙岭断层上。这种分布模式反映了一种构造应力分配机制：走滑分量主要集中于陡倾主断层，而压缩分量则由邻近的逆冲断层系统吸收。几何与运动学之间的耦合关系表明，继承性断层结构不仅调控了破裂行为，也影响了挤压构造背景下地震应变的分布特征。

6 结论

本研究构建了一个统一的自适应断层建模框架，通过融合形变数据与多学科信息(包括重定位余震)，实现复杂地震场景下断层几何与滑动分布的精细刻画。该框架整合了自适应断层构建框架与场景适应的贝叶斯联合反演技术，并综合利用序贯蒙特卡罗(SMC)与Fukuda-Johnson(FJ)方法，可有效应对先验信息充分或有限的不同建模场景。研究通过模拟实验与实际地震事件应用(2022年门源地震、2023年土耳其地震、2022年泸定地震和2019年Ridgecrest地震)，验证了该框架在不同破裂特征与构造环境下的适应能力，并能在滑动分布反演中实现可靠的不确定性估计。结果表明，将形变数据纳入断层建模过程至关重要；若仅依赖余震重定位结果，模型可能与实际观测形变模式存在显著偏差。联合SMC-FJ方法在保证精度的同时显著降低了计算负担，表现出较高的计算效率。然而，在贝叶斯反演过程中，格林函数的重复计算仍是主要的计算瓶颈，未来可通过GPU并行或预计算策略等进一步优化。总体而言，研究证明了贝叶斯反演在复杂断层系统建模中的有效性，为断层几何精化与地震灾害评估提供了一种稳健的技术手段。研究结果强调了精确刻画断层几何对于理解地震破裂动力学的重要性，并为提升地震科学的预测能力提供了有力支持。

致谢 感谢两位匿名审稿人对本文修改提出的建设性意见和宝贵建议，并对所有为研究提供支持的开源软件的开发者与维护者表示诚挚感谢。文中图件采用GMT与matplotlib软件绘制。研究所使用的全部数据均来源于已公开发表的文献。本文开发的自适应断层构建框架与贝叶斯反演联合优化方法，已集成至地震周期分析工具包(ECAT；https://github.com/kefuhe/ECAT)。贝叶斯反演通过SMC-FJ方法实现，该方法结合了经向量化与MPI并行优化的序贯蒙特卡罗(SMC)以及Fukuda-Johnson(FJ)方法。经典滑动反演方法(CSI)作为基础结构，三角单元格林函数由cutde软件包计算。自适应断层构建的初始网格由pygmsh软件包生成。常规反演任务可在标准多核工作站上高效完成，无需高性能计算平台支持。研究中的全部计算均在一台25核的工作站上完成；在一个典型的大规模案例中(包含约600个断层单元与6000个观测数据点，采用20线程并行计算)，整体计算耗时为数小时，内存占用约为128 GB。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责，详见网络版(http://earthcn.scichina.com)。

参考文献

冯万鹏, 何骁慧, 张逸鹏, 等. 2022. 2022年青海门源M_w6.6地震的发震断层及孕震构造模式. 科学通报, 68: 254–270

潘家伟, 白明坤, 李超, 等. 2021. 2021年5月22日青海玛多M_S7.4地震地表破裂带及发震构造. 地质学报, 95: 1655–1670

潘家伟, 李海兵, Chevalier M L, 等. 2022. 2022年青海门源M_S6.9地震地表破裂带及发震构造研究. 地质学报, 96: 215–231

许才军, 贺克锋. 2023. 地震周期形变的大地测量研究进展和展望. 武汉大学学报(信息科学版), 48: 1736–1755

Avouac J P, Ayoub F, Wei S, et al. 2014. The 2013, M_w7.7 Balochistan earthquake, energetic strike-slip reactivation of a thrust fault. Earth

Planet Sci Lett, 391: 128–134
Barbot S, Luo H, Wang T, et al. 2023. Slip distribution of the February 6, 2023 M_w7.8 and M_w7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone. Seismica, 2: 10.26443
Thompson B, Vasyura-Bathke H, Howell A, et al. 2023. tbenthompson/cutde: v23.6.25 (v23.6.25). Zenodo
Biasi G P, Wesnousky S G. 2017. Bends and ends of surface ruptures. Bull Seismol Soc Am, 107: 2543–2560
Cai J, Wen Y, He K, et al. 2024. Strain partitioning, interseismic coupling, and shallow creep along the Ganzi-Yushu Fault from Sentinel-1 InSAR data. Geophys Res Lett, 51: e2024GL111469
Carena S, Suppe J. 2002. Three-dimensional imaging of active structures using earthquake aftershocks: The Northridge thrust, California. J Struct Geol, 24: 887–904
Chen K, Wei G, Milliner C, et al. 2024. Super-shear ruptures steered by pre-stress heterogeneities during the 2023 Kahramanmaraş earthquake doublet. Nat Commun, 15: 7004
Duan B. 2019. Multicycle dynamics of the Aksay bend along the Altyn Tagh Fault in Northwest China: 1. A simplified double bend. Tectonics, 38: 1101–1119
Duan B, Liu Z, Elliott A J. 2019. Multicycle dynamics of the Aksay bend along the Altyn Tagh Fault in Northwest China: 2. The realistically complex fault geometry. Tectonics, 38: 1120–1137
Dutta R, Jónsson S, Vasyura-Bathke H. 2021. Simultaneous Bayesian estimation of non-planar fault geometry and spatially-variable slip. J Geophys Res-Solid Earth, 126: e2020JB020441
Elliott A J, Oskin M E, Liu-Zeng J, et al. 2015. Rupture termination at restraining bends: The last great earthquake on the Altyn Tagh Fault. Geophys Res Lett, 42: 2164–2170
Elliott J R, Walters R J, Wright T J. 2016. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. Nat Commun, 7: 13844
Fan L, Li B, Liao S, et al. 2022. High-precision relocation of the aftershock sequence of the January 8, 2022, M_s6.9 Menyuan earthquake. Earthquake Sci, 35: 138–145
Fathian A, Atzori S, Nazari H, et al. 2021. Complex co- and postseismic faulting of the 2017–2018 seismic sequence in western Iran revealed by InSAR and seismic data. Remote Sens Environ, 253: 112224
Fukuda J I, Johnson K M. 2010. Mixed linear-non-linear inversion of crustal deformation data: Bayesian inference of model, weighting and regularization parameters. Geophys J Int, 181: 1441–1458
Guo R, Zhang W, Tang X, et al. 2025. Bridging fault kinematics before, during, and after the 2022 Menyuan earthquake. Earth Planet Sci Lett, 666: 119510
He K, Wen Y, Xu C, et al. 2021. Fault geometry and slip distribution of the 2021 M_w7.4 Maduo, China, earthquake inferred from InSAR measurements and relocated aftershocks. Seismol Res Lett, 93: 8–20
He K, Xu C, Wen Y. 2022. Coseismic and early post-seismic deformations due to the 2019 earthquake sequence in Ridgecrest, California. Geophys J Int, 230: 957–975
He K, Xu G, Sun L, et al. 2024. Earthquake Cycle Analyse Toolkits (ECAT). Zenodo
He L, Feng G, Xu W, et al. 2023. Coseismic kinematics of the 2023 Kahramanmaras, Turkey earthquake sequence from InSAR and optical data. Geophys Res Lett, 50: e2023GL104693
He L, Feng G, Wang Y, et al. 2024. Geodetic source models of the 2016–2022 Menyuan earthquake sequence (Northeastern Tibet) inferred from InSAR and optical observations. Geophys J Int, 236: 470–479
Jia Z, Jin Z, Marchandon M, et al. 2023. The complex dynamics of the 2023 Kahramanmaraş, Turkey, M_w7.8–7.7 earthquake doublet. Science, 381: 985–990
Jin Z, Fialko Y. 2020. Finite slip models of the 2019 Ridgecrest earthquake sequence constrained by space geodetic data and aftershock locations. Bull Seismol Soc Am, 110: 1660–1679
Jolivet R. 2020. CSI_ALTAR. Zenodo
Kaneko Y, Avouac J P, Lapusta N. 2010. Towards inferring earthquake patterns from geodetic observations of interseismic coupling. Nat Geosci, 3: 363–369
King G C P. 1986. Speculations on the geometry of the initiation and termination processes of earthquake rupture and its relation to morphology and geological structure. Pure Appl Geophys, 124: 567–585
Lee J, Tsai V C, Hirth G, et al. 2024. Fault-network geometry influences earthquake frictional behaviour. Nature, 631: 106–110
Lei S, Cowgill E, Weldon R, et al. 2024. Transition from reverse to left-slip on the Eastern Haiyuan Fault, NE Tibetan Plateau, from the structure and age of the Ganyanchi Pull-Apart Basin. Tectonics, 43: e2024TC008422
Li K, Tapponnier P, Xu X, et al. 2023. The 2022, M_s6.9 Menyuan earthquake: Surface rupture, Paleozoic suture re-activation, slip-rate and seismic gap along the Haiyuan fault system, NE Tibet. Earth Planet Sci Lett, 622: 118412
Li Y, Zhao D, Shan X, et al. 2022. Coseismic slip model of the 2022 M_w6.7 Luding (Tibet) earthquake: Pre- and post-earthquake interactions with surrounding major faults. Geophys Res Lett, 49: e2022GL102043
Liu-Zeng J, Liu Z, Liu X, et al. 2024. Fault orientation trumps fault maturity in controlling coseismic rupture characteristics of the 2021 Maduo earthquake. AGU Adv, 5: e2023AV001134
Liu T, Hong S, She Y, et al. 2025. Co- and post-seismic deformation of the 2022 Menyuan M_w6.6 earthquake from InSAR and GPS observations. Geophys J Int, 240: 708–720
Lo Y C, Yue H, Sun J, et al. 2019. The 2018 M_w6.4 Hualien earthquake: Dynamic slip partitioning reveals the spatial transition from mountain building to subduction. Earth Planet Sci Lett, 524: 115729
Lu R, Wang M, Li Z, et al. 2022. Three-dimensional community active faults models of CSES. In: Li Y G, Zhang Y X, Wu Z L, eds. China Seismic Experimental Site: Theoretical Framework and Ongoing Practice. Singapore: Springer. 91–109
Luo H, Wang T. 2022. Strain partitioning on the western Haiyuan fault system revealed by the adjacent 2016 M_w5.9 and 2022 M_w6.7 Menyuan earthquakes. Geophys Res Lett, 49: e2022GL099348
Ma Z, Zeng H, Luo H, et al. 2024. Slow rupture in a fluid-rich fault zone initiated the 2024 M_w7.5 Noto earthquake. Science, 385: 866–871
Melgar D, Taymaz T, Ganas A, et al. 2023. Sub- and super-shear ruptures during the 2023 M_w7.8 and M_w7.6 earthquake doublet in SE Türkiye. Seismica, 2: 10.26443
Niu P, Han Z, Li K, et al. 2023. The 2022 M_w6.7 Menyuan earthquake on the northeastern margin of the Tibetan Plateau, China: Complex surface ruptures and large slip. Bull Seismol Soc Am, 113: 976–996
Plesch A, Shaw J H, Ross Z E, et al. 2020. Detailed 3D fault representations for the 2019 Ridgecrest, California, earthquake sequence. Bull Seismol Soc Am, 110: 1818–1831
Ren C, Wang Z, Taymaz T, et al. 2024. Supershear triggering and cascading fault ruptures of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake doublet. Science, 383: 305–311
Ren J, Xu X, Zhang G, et al. 2022. Coseismic surface ruptures, slip distribution, and 3D seismogenic fault for the 2021 M_w7.3 Maduo earthquake, central Tibetan Plateau, and its tectonic implications. Tectonophysics, 827: 229275
Riesner M, Durand-Riard P, Hubbard J, et al. 2017. Building objective 3D fault representations in active tectonic settings. Seismol Res Lett, 88: 831–839
Rodriguez E, Morris C, Belz J, et al. 2005. An assessment of the SRTM topographic products. Jet Propulsion Laboratory Pasadena, California
Ross Z E, Idini B, Jia Z, et al. 2019. Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence. Science, 366: 346–

351
Schlömer N. 2022. pygmsh: A Python frontend for Gmsh. Zenodo
Shelly D R. 2020. A high-resolution seismic catalog for the initial 2019 Ridgecrest earthquake sequence: Foreshocks, aftershocks, and faulting complexity. Seismol Res Lett, 91: 1971–1978
Shi Q, Wei S, Chen M. 2018. An MCMC multiple point sources inversion scheme and its application to the 2016 Kumamoto M_w6.2 earthquake. Geophys J Int, 215: 737–752
Sun L, Wang L, Xu G, et al. 2023. A new method of variational Bayesian slip distribution inversion. J Geod, 97: 10
Tarantola A. 2005. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. Philadelphia: SIAM
Taufiqurrahman T, Gabriel A A, Li D, et al. 2023. Dynamics, interactions and delays of the 2019 Ridgecrest rupture sequence. Nature, 618: 308–315
Truttmann S, Diehl T, Herwegh M. 2023. Hypocenter-based 3D imaging of active faults: Method and applications in the southwestern Swiss Alps. J Geophys Res-Solid Earth, 128: e2023JB026352
Tung S, Sippl C, Shirzaei M, et al. 2024. Structural controls on fault slip models of the 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye earthquake doublet with finite element analyses. Geophys Res Lett, 51: e2023GL107472
Wang K, Bürgmann R. 2020. Co- and early postseismic deformation due to the 2019 Ridgecrest earthquake sequence constrained by Sentinel-1 and COSMO-SkyMed SAR data. Seismol Res Lett, 91: 1998–2009
Wang T, Wei S, Shi X, et al. 2018. The 2016 Kaikōura earthquake: Simultaneous rupture of the subduction interface and overlying faults. Earth Planet Sci Lett, 482: 44–51
Wegnüller U, Werner C, Strozzi T, et al. 2015. Sentinel-1 support in the GAMMA software. Procedia Comput Sci, 100: 1305–1312
Wei G, Chen K, Meng H. 2023. Bayesian inversion of finite-fault earthquake slip model using geodetic data, solving for non-planar fault geometry, variable slip, and data weighting. J Geophys Res-Solid Earth, 128: e2022JB025225
Wen Y, Cai J, He K, et al. 2024. Dynamic rupture of the 2021 M_w7.4 Maduo earthquake: An intra-block event controlled by fault geometry. J Geophys Res-Solid Earth, 129: e2023JB027247
Xu D, Li Z, Zhang Z, et al. 2024. The 2022 M_w6.6 Menyuan earthquake: An early-terminated runaway rupture by the complex fault geometry. Earth Planet Sci Lett, 638: 118746
Xu G, Xu C, Wen Y, et al. 2020. The complexity of the 2018 Kaktovik earthquake sequence in the northeast of the Brooks Range, Alaska. Geophys Res Lett, 47: e2020GL088012
Xu G, Xu X, Yi Y, et al. 2023. A Bayesian source model for the 2022 M_w6.6 Luding earthquake, Sichuan Province, China, constrained by GPS and InSAR observations. Remote Sens, 16: 103
Xu L, Ji C, Meng L, et al. 2024. Dual-initiation ruptures in the 2024 Noto earthquake encircling a fault asperity at a swarm edge. Science, 385: 871–876
Xu X, Wang Q, Ren J, et al. 2024. Three-dimensional fault model and features of chained hazards of the Luding M_s6.8 earthquake, Sichuan Province, China. Earthquake Res Adv, 4: 100326
Xu Y, Zhang Y, Xu L. 2022. Geometry-dependent rupture process of the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake determined using a dip-varying inversion approach with teleseismic, high-rate GPS, static GPS and InSAR data. Geophys J Int, 229: 1408–1421
Yamashita S, Yagi Y, Okuwaki R, et al. 2021. Consecutive ruptures on a complex conjugate fault system during the 2018 Gulf of Alaska earthquake. Sci Rep, 11: 5979
Yamashita S, Yagi Y, Okuwaki R, et al. 2022. Potency density tensor inversion of complex body waveforms with time-adaptive smoothing constraint. Geophys J Int, 231: 91–107
Yang H, Wang D, Guo R, et al. 2022. Rapid report of the 8 January 2022 M_s6.9 Menyuan earthquake, Qinghai, China. Earthquake Res Adv, 2: 100113
Yang J, Xu C, Wen Y. 2023. Coseismic and early postseismic deformation associated with the January 2022 M_w6.6 Menyuan earthquake, NE Tibet, revealed by InSAR Observations. Tectonophysics, 868: 230090
Yu C, Li Z, Penna N T. 2018. Generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS): Validation and implications for InSAR time series analysis. In: Proceedings of American Geophysical Union, Fall Meeting 2018
Yue H, Lay T, Koper K D. 2012. En échelon and orthogonal fault ruptures of the 11 April 2012 great intraplate earthquakes. Nature, 490: 245–249
Yue H, Ross Z E, Liang C, et al. 2017. The 2016 Kumamoto M_w=7.0 earthquake: A significant event in a fault–volcano system. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 9166–9183
Yue H, Lay T. 2020. Resolving complicated faulting process using multi-point-source representation: Iterative inversion algorithm improvement and application to recent complex earthquakes. J Geophys Res-Solid Earth, 125: e2019JB018601
Zhang L, Zhou Y, Zhang X, et al. 2023. 2022 M_w6.6 Luding, China, earthquake: A strong continental event illuminating the Moxi seismic gap. Seismol Res Lett, 94: 2129–2142
Zhang Y, Feng W, Li X, et al. 2021. Joint inversion of rupture across a fault stepover during the 8 August 2017 M_w6.5 Jiuzhaigou, China, earthquake. Seismol Res Lett, 92: 3386–3397
Zhang Y F, Shan X, Zhang G, et al. 2020. The 2016 M_w5.9 Menyuan earthquake in the Qilian orogen, China: A potentially delayed depth-segmented rupture following from the 1986 M_w6.0 Menyuan earthquake. Seismol Res Lett, 91: 758–769
Zhang Y J, Tang X, Liu D, et al. 2023. Geometric controls on cascading rupture of the 2023 Kahramanmaraş earthquake doublet. Nat Geosci, 16: 1054–1060

（责任编委：刘少峰）