引文格式：孙和平，张一君，郭汝梦，等.密集台阵反投影成像地震破裂过程研究综述[J].武汉大学学报(信息科学版)，2026，51(8):1528-1536.DOI:10.13203/j.whugis20250286

Citation：SUN Heping，ZHANG Yijun，GUO Rumeng，et al.Review of Dense Array Backprojections of Earthquake Rupture Process[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University，2026，51(8):1528-1536.DOI:10.13203/j.whugis20250286

密集台阵反投影成像地震破裂过程研究综述

孙和平[1]　张一君[1]　郭汝梦[1]　汪思学[1]　刘德川[2]

1　中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室，湖北　武汉，430071

2　中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院，湖北　武汉，430074

摘　要：利用密集台阵反投影成像地震破裂过程是认识震源物理性质、理解断层能量释放规律、探究断层结构的重要手段。对密集台阵反投影成像技术近年来的发展及其应用上的进展进行了综述和分析。结合国内外地球物理学者对不同构造环境下地震多尺度时空破裂行为的系列工作，着重介绍了该方法在解析同震破裂过程和探究震源频率特征中的重要作用，并结合该方法的优势对其未来发展方向进行了分析和展望。

关键词：密集台阵反投影成像；多尺度时空破裂行为；地震能量辐射特征

中图分类号：P335　　**文献标识码**：A　　**收稿日期**：2026-01-25

DOI：10.13203/j.whugis20250286　　**文章编号**：1671-8860(2026)08-1528-09

Review of Dense Array Backprojections of Earthquake Rupture Process

SUN Heping[1]　*ZHANG Yijun*[1]　*GUO Rumeng*[1]　*WANG Sixue*[1]　*LIU Dechuan*[2]

1　State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

2　Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geoscience(Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: Backprojection imaging with dense arrays serves as a vital tool for investigating earthquake source physics, characterizing seismic energy release patterns, and constraining fault structures. This technique generates timely, robust rupture images by tracking the spatiotemporal migration of seismic radiation through phase-aligned coherent wavefields recorded by dense networks, with the advantage of least prior constraints. With the deployment of dense seismic networks (Hi-Net array (Japan), USArray (USA), Australia array (AU), etc.) around the globe, this method has been widely applied to earthquakes in diverse tectonic settings, including subduction zones (e.g. 2011 Tohoku earthquake), continental interiors (e.g. 2021 Maduo earthquake), and transform boundaries (e.g. 2023 Kahramanmaraş earthquake doublet). These studies provide a unique perspective for unraveling the complex and multi-scale rupture processes of large earthquakes. Furthermore, they reveal a ubiquitous frequency-dependent radiation style among subduction earthquakes, shedding light on seismic radiation patterns in similar tectonic environments. This paper reviews recent methodological developments and applications of this technique. Methodological advances primarily focus on four key areas: the formulation of the waveform contribution term, the correction of seismic phase travel times, the application of array waveform processing techniques, and the design of weighting schemes. Different formulations of the waveform contribution term serve to amplify the signals of interest. For instance, a function based on waveform cross-correlation can enhance the resolution of neighboring weak subevents, which are often obscured by their low amplitudes in raw waveform data. The correction of travel times is necessary due to the difference between the assumed 1D velocity model and the real 3D velocity structure. Various array waveform processing techniques can further improve the spatiotemporal reso-

基金项目：国家自然科学基金(4240040461)；武汉自然科学基金特区计划(2024040701010065)；精密大地测量与定位全国重点实验室一般项目(L25S640501)。

第一作者：孙和平，博士，研究员，中国科学院院士，现从事地震与地球内部物理方向研究。heping@whigg.ac.cn

lution of backprojection results. A weighting term scales the contribution of each station, thereby mitigating biases from uneven station distribution or anomalous waveform amplitudes.By synthesizing studies on earthquake ruptures across diverse tectonic settings, we highlight its critical contributions to resolve coseismic rupture process and seismic radiation characteristics. For example, the backprojection imaging results for the 2012 Sumatra earthquake indicate a complex rupture path, with the rupture propagating on different fault planes within an orthogonal conjugate fault system. Back-projection results for subduction-zone earthquakes, such as the 2011 Mw 9.0 Tohoku event, reveal a ubiquitous frequency-dependent radiation pattern related to depth-varying frictions along subduction plates.Finally, potential future directions are discussed based on the method's unique advantages. Integrating machine learning with the backprojection method allows for the extraction of more subtle features from seismic waveforms, advancing the detection and location of small earthquakes. Furthermore, multi-scale rupture behaviors of earthquakes in diverse tectonic settings are to be investigated using backprojection results across a broad frequency range.

Key words: dense array backprojection imaging; multi-scale rupture behavior; seismic radiation characteristics

全球地震的探测与特征分析是地震学的基础研究方向。高效准确地解析地震时空破裂过程对于理解地震如何发生和传播极其重要,也是地震预警及震后救援工作的关键。地震的破裂特征具体包括破裂面的几何及大小、断层面滑移分布及大小、破裂速度、破裂所释放的能量及时空分布等。随着震级增大,地震的破裂持续时间从数十秒延长至数分钟,其空间复杂度显著增加。强震(M≥5.5)的破裂往往涉及多断层协同作用,伴随分叉、不连续跳跃、反向传播等复杂行为,破裂速度可从亚瑞利波速增至超剪切速度。因此,精确约束同震破裂的时空演化过程及其物理参数(如破裂速度、方向性等),对揭示断层破裂动力学机制、厘清断层间相互作用与应力调整规律,以及评估未来地震危险性具有关键科学意义。

地震的断层破裂范围较大,通常需要将断层面离散化为多个子断层单元或子事件,如图 1(a)所示,进而通过各子断层(子事件)对应的点源模型的滑动效应叠加来表征整体破裂过程。有限断层反演方法[1-2]和多点源反演法[3]是解析此类破裂运动学特征及断层真实位移信息的主要手段。这两种方法本质上是通过求解断层面上所有子断层(子事件)的震源时间函数来拟合观测波形的振幅、到时和相位等多方面信息。由于地震破裂的时空复杂性,震源建模的参数一般具有高维度和多解特性,需引入大量先验假设和物理约束以保障解的稳定性,这也导致断层破裂的空间分辨率通常有限。另外,反演过程依赖于介质速度结构所生成的格林函数,而高频地震波对速度扰动敏感,在现有速度模型精度下,仅低频段资料(如频率低于 0.2 Hz 的体波和面波)能提供稳定约束,这也导致了多点源建模和有限断层反演方法的分辨率有限。

1　反投影方法的产生

随着密集台阵的布设与发展,一种仅依赖于台站走时信息来追踪地震的整个破裂过程(起始、传播和终止)的逆时成像方法被提出。该方法本质上与地震反射勘探中的偏移技术[4-5]相同。在地震研究中,此类技术最早被应用于近震台站的断层破裂过程估计[6]。通过进一步简化假设条件,ISHII 等[7]于 2005 年首次提出反投影方法,并利用远震台阵解析 2004 年 9.2 级苏门答腊地震的复杂破裂过程,有效还原了该地震巨大的破裂范围以及相对辐射能量的时空演化过程。

反投影方法基于密集台网记录的波形信号(如 P 波、pP 波等),通过逆时回传与信号叠加,直接构建地震动态破裂影像,从而以高时空分辨率刻画不同频带下的辐射能量时空分布、破裂传播速度及方向等关键参数(见图 1)。其核心优势在于:(1)极低的先验需求,无需断层几何等有限断层反演必需的约束条件;(2)极高的计算效率,仅需时移数据网格化叠加,规避了传统反演的矩阵求解问题。这种简洁性不仅使其广受应用,更赋予结果强鲁棒性。与有限断层模型相比,不同团队的反投影结果在破裂主特征上表现出显著一致性。近年来,随着全球性密集台站的布设,该方法已成功应用于不同构造环境的地震事件解析,包括俯冲带(如 2012 年苏门答腊地震[8])、大陆内部(如 2021 年中国玛多地震[9]及转换断层(如 2023 年土耳其双震[10]),为揭示大震复杂且多尺度的破裂过程提供了独特视角。

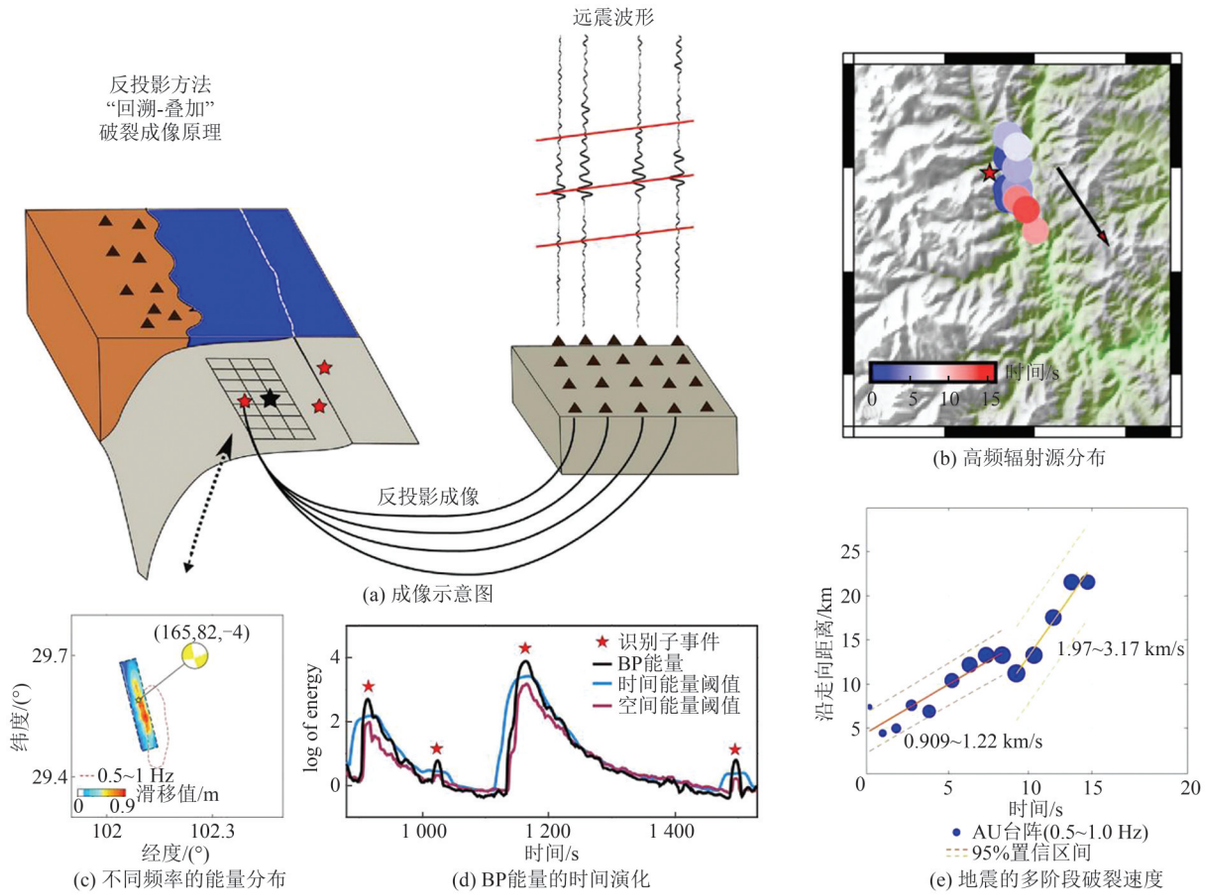


图1 反投影成像及应用[11]((a)成像示意图:矩形网格表示测试震源位置,真实震源位置(红星)通过射线理论连接至远震台站(三角),远震台站上方的黑色曲线表示记录到的地震图,原理上,真实震源位置的走时曲线(红线)使地震图达到相位一致,因此沿移位方向的叠加达到最大值;(b)地震高频辐射源的时空迁移图,箭头指向台阵的方向;(c)地震不同频率能量的空间关系(同震低频滑移和高频能量分布);(d)反投影能量随时间的变化;(e)基于高频辐射源随时间沿走向的迁移距离(相对于震中)估计的地震分阶段破裂速度)

Fig. 1 Backprojection Imaging and Applications [11]((a) Schematic of Backprojection Imaging: The Rectangular Grids Indicate Potential Source Locations. The True Source Position (Red Star) Is Connected to Teleseismic Stations (Triangles) via Ray Theory. The Black Curves Above the Teleseismic Stations Represent Recorded Seismograms. In Principle, the Travel Time Curve (Red Line) at the true Source Position Aligns the Phases of the Seismograms; Therefore, the Stacking Along the Shift Direction Reaches Its Maximum Value;(b) Spatiotemporal Migration of the High-Frequency Seismic Source, with Arrows Pointing Toward the Array Direction;(c) Spatial Relationship of Seismic Energy at Different Frequencies: Coseismic Low-Frequency Slip and High-Frequency Seismic Radiation;(d) Variation of Backprojection Energy over Time;(e) Estimated Rupture Velocity Based on the Migration Distance of the High-Frequency Seismic Source Along the Strike over Time (Relative to the Epicenter)

2 反投影方法的发展

反投影方法通过“叠加-迁移”波形信号的简单思想增强震源处信号的振幅特征和空间分辨率,其计算公式如下:

$$S_j(t)=\sum_{i=1}^{N} W_{ij}(t)\, f_{ij}(t+\tau_{ij}) \tag{1}$$

式中,$S_j(t)$是与格网点源j在时间t相关的叠加时间序列,求和遍及N个地震台站;W_{ij}是台站i对格网点源j的权重函数;f_{ij}表征台站i的观测对第j个网格点的贡献;时间延迟τ_{ij}表示从第i台站到第j格网点源的传播走时。

传播时间τ_{ij}的最初且最简计算方法是将一维地震波速模型的理论走时与经验的台站校正[7]相结合。经验的台站走时校正项一般通过震中处的波形对齐获得,这是因为地震台站的直达P波信号来源于震中,因此可以通过互相关对齐所有台阵波形的直达P波来得到传播走时的校正项。此类“震源走时校正”通常被应用于整个破裂区。然而,由于其未能考虑远离震源区域走时误差的空间变化,该方法仅在震源邻近区域精确有效。鉴于大型地震的

破裂范围巨大(>300 km),一维速度结构与真实三维速度结构的走时偏差受到源区下方不均匀速度结构的显著影响。为修正这一系统偏差,利用精定位的余震位置进一步修正真实三维速度结构造成的理论走时偏差的方法被提出,包括克里金插值[12]、传播路径校正[13]、慢度增强[14]及其分区改进方法[15]。这些方法将平面定位精度优化至~10 km 量级[12,15](见图 2)。另有研究采用高精度三维速度模型直接构建走时表[16],从数据源提升了反投影定位的准确性。

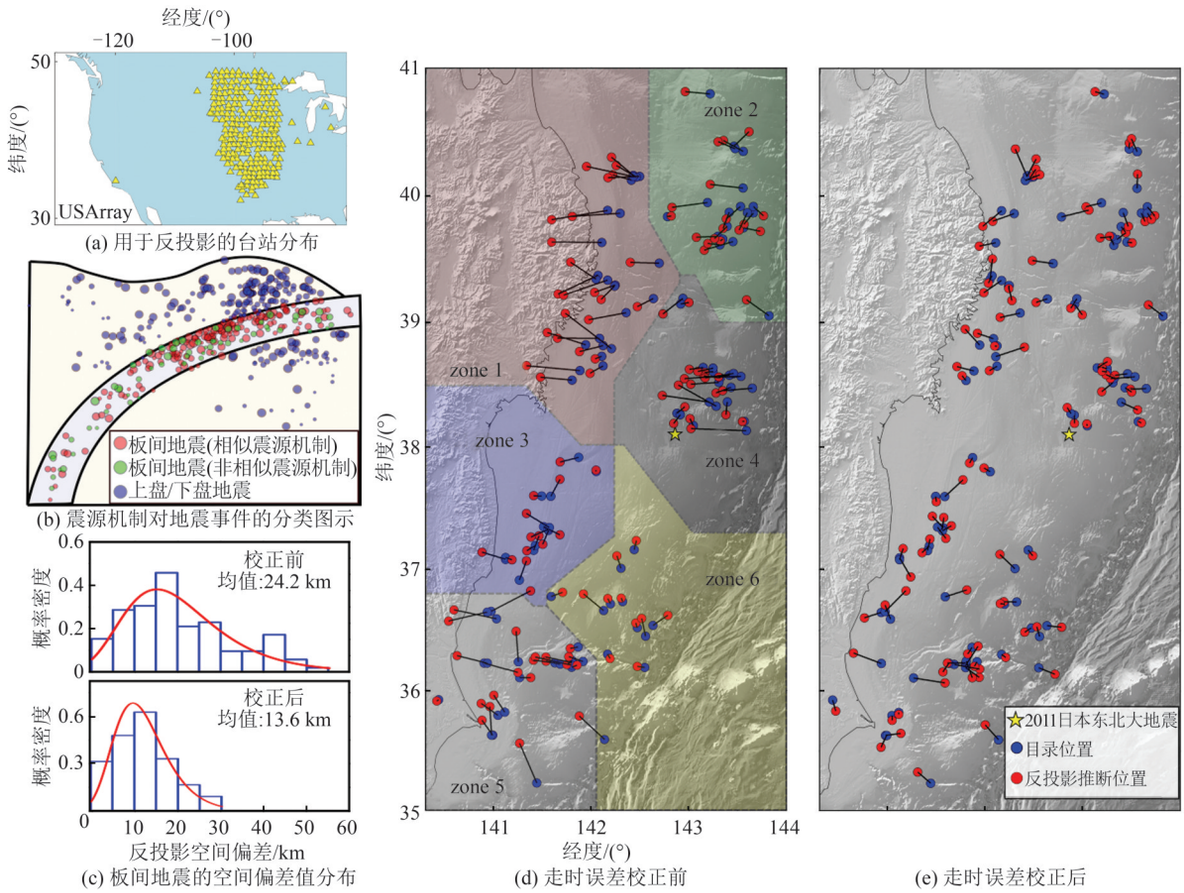


图 2　走时误差校正前后的反投影空间偏差情况((a)用于反投影的台站分布;(b)基于震源与板块边界的相对距离及震源机制对俯冲带地震事件的分类图示;(c)M 4~M 7 板间地震(震源机制与 2011 年 9.1 级东北大地震相似)的空间偏差值分布,拟合的概率密度函数服从广义极值分布;(d)走时误差校正前地震事件的空间偏差矢量;(e)走时误差校正后地震事件的空间偏差矢量)

Fig. 2　Spatial Bias of Backprojection Locations Before and After Slowness Correction((a) Station Distribution Used for Backprojection; (b) Classification Diagram of Subduction Zone Earthquakes Based on Relative Distance Between Hypocenter and Plate Boundary, and Focal Mechanism; (c) Spatial Bias Distribution of Interplate Earthquakes (M 4-M 7) with Focal Mechanisms Similar to the 2011 Mw 9.1 Tohoku Earthquake, the Fitted Probability Density Function Follows a Generalized Extreme Value Distribution; (d) Spatial Bias Vectors of Earthquakes Before Travel-Time Correction;(e) Spatial Bias Vectors of Earthquakes After Travel-Time Correction)

反投影方法在提升定位精度的同时展现出水平分辨率显著高于深度分辨率的特征,这主要是源于两个机制的耦合作用:(1)地震直达 P 波射线近垂直入射的几何约束,(2)震源位置与发震时刻在射线路径上的参数耦合。因此反投影方法将震源位置投影至近水平的二维平面(如大逆冲型地震的缓倾角板块俯冲界面),凭借这些辐射源在平面上的投影位置来反映深度的变化。为解决三维分辨率的瓶颈,研究发展出近远震观测范围下多震相融合的策略:在直达波方面选用直达 P 波[17]、S 波[18]和瑞利面波[19];在转换波方面引入 PP/PKP 波[20]和 pP 波[21]等。典型应用如 CHEN 等[21]通过联合 P 波和 pP 波解析了 2015 年 Bonin 7.9 级深震的精细破裂过程。与此同时,WANG 等[22]开发的成像反褶积反投影技术通过构建多震相(如 pP 和 sP)的联合约束框架,有效抑制了虚假信号的干扰。

反投影公式中的观测波形贡献项 f_{ij} 已针对不

同研究需求发展出多种形式(见图3)。在研究地震破裂能量辐射的时空演化时,通常会对地震台站观测波形进行线性叠加,但这种方法会因大振幅信号主导而掩盖相邻小事件的弱信号。为提高信噪比,ISHII等[23]提出基于波形互相关构造f_{ij}的方法;YAGI等[24]则采用理论格林函数与实际波形的相关信号作为叠加对象。此外,研究者还开发了其他信号增强策略,包括波形包络[18]、峰度函数[3]以及相似度叠加[25],这些方法有效提升了目标信号的识别能力。

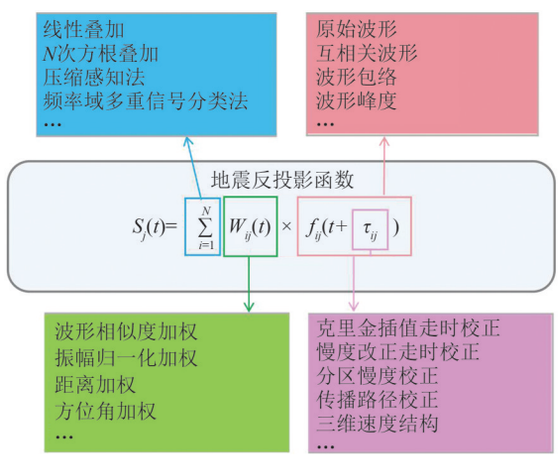


图3 反投影方法的发展与分类

Fig. 3 Evolution and Classification of Backprojection Methods

此外,为提高反投影的空间分辨率,一系列阵列波形处理技术被引入该方法。这些技术包括:(1)提升波形对齐精度的互相关对齐法[26];(2)增强台阵响应的N次方根叠加法[27];(3)分辨多源信号的压缩感知法和相位加权叠加法[28];(4)基于频率域多重信号分类的高分辨率反投影算法[29];(5)采用自动增益控制校正传播路径、场地响应及辐射特性影响的方法[1],该自动增益技术有助于恢复破裂过程中辐射能量的绝对值评估。

反投影计算中的加权项W_{ij}是决定各台站贡献程度的关键因素。通常采用波形归一化策略来有效控制单个台站大振幅主导叠加结果的问题,而TAN等[28]提出的相位加权法则能增强相位一致但振幅较小的信号成分。台阵的几何分布和密度本身可以构成空间加权效应[30]。针对台站分布不均导致的权重失衡,基于遗传算法[31]、波形相似度[32]、震中距[33]和方位角[34]的多维加权方案被进一步提出。此外,为克服单台阵方位覆盖不足引发的“拖尾效应”,研究者采用两种途径有效缓解能量向台阵方向偏移的系统性偏差:(1)优选全球高相关性台站记录[35],(2)开发多台阵加权融合技术[36]。

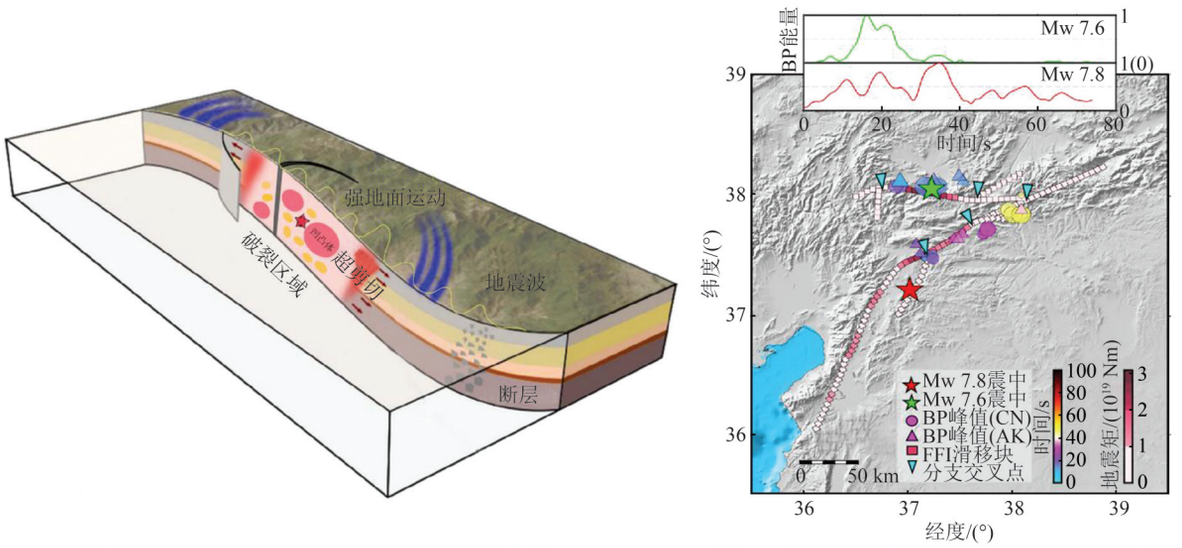
3 反投影方法的应用

3.1 同震破裂过程的解析

地震的破裂过程是从初始破裂点开始,破裂行为在震源区传播的过程[37]。大地震的破裂过程通常包含断层面上若干个凹凸体或障碍体的先后破裂[38](图4),具有复杂的能量释放过程和破裂行为。基于台阵的反投影方法作为解析地震破裂时空演化过程的重要手段,可以在先验信息最少的情况下,约束地震复杂的破裂行为和传播路径,如破裂在断层之间的跳跃[8]、分支/共轭断层的同时破裂[9,39]、破裂的折返[40]等,加深了人们对断层破裂动力学过程与地下结构耦合机制的认识。例如,研究针对2012年苏门答腊地震的反投影震源成像结果表明,破裂发生在正交共轭断裂系统的不同断层面内。其破裂过程在动态应力为压缩状态的两处断层发生分支扩展,这一现象对传统的动态夹持效应理论认知提出了挑战。针对2015年尼泊尔7.8级廓尔喀地震的高精度震源成像揭示:此次破裂为一条宽度不足20 km的单侧东向破裂,撕裂了主喜马拉雅逆冲断层闭锁区的下部底边界。这一有限的破裂范围表明,该地震可能只是大地震震间期间的一次中等规模事件。此类中等事件可通过非均匀加载应力的地震周期模拟予以预测[14]。

另外,反投影得到的高频辐射源时空分布可以有效地约束破裂速度,反映不同破裂阶段的速度变化。地震破裂扩展速度作为一个重要的物理参数,其大小控制了地震辐射能量和破裂能量的分配情况[41-42]。同样规模的地震,破裂速度越快,其破坏性地震辐射释放的能量越高,由此造成的地面震动也会更强(图4(a))。尤其是超剪切地震,较快的破裂扩展速度使得先后破裂的剪切波同时到达,且相互加强从而形成马赫锥,这一过程将产生比亚剪切破裂更具破坏性的地面震动[43]。与同震破裂反演方法得到的破裂速度相比,反投影估计法避免了反演过程中不同参数之间的相互制衡,得到的破裂速度稳健性较高。BAO等[44]利用反投影方法研究了2000—2020年全球海洋及大陆走滑型地震的破裂速度,发现研究期间超剪切地震的比例高达14%,且海洋里发生超剪切的频率与大陆相当。ZHANG等[10]利用发展的分区慢度校正反投影方法解析了2023年土耳其双强震复杂的破裂路径、高频能量辐射过程以

及超剪切行为,如图 4(b)所示。因此,利用反投影方法精准确定超剪切段落,能为强地面运动加速度的空间分布和地震灾害程度的准确模拟提供重要输入源。



(a) 地震破裂传播与强地面运动关系示意图,改自文献[45]

(b) 2023年土耳其双强震高频辐射源的峰值能量点与同震滑移的空间关系

图 4　断层性质(几何、结构等)与地震破裂运动学的关系

Fig. 4　Relationship Between Fault Properties and Earthquake Rupture Kinematics

3.2　地震的频率依赖破裂行为

以高相关性波形为输入源的反投影方法成像频带较宽,可以揭示同震过程中多尺度的破裂行为。通常情况下,低频段的成像结果揭示了地震“大尺度”的破裂特征,如均匀的破裂过程或高滑移体;而高频能量辐射则反映了“小尺度”的破裂性质,包括破裂速度、方向或滑移率变化、断层摩擦参数或者区域速度结构的剧烈变化等[46]。在大型逆冲地震中,一个显著特征是浅部区域通常表现出较大的滑移量,而高频能量则主要集中在下倾断层的深部区域[47]。破裂动力学研究表明,这种频率辐射行为的深度依赖性可能与逆冲型地震随深度变化的摩擦特性有关。另外,断层区摩擦特性的变化还体现在地震活动的空间差异上。如图 5 所示,俯冲板块浅部区域以慢滑移或蠕滑为主;再深一些是速度弱化区,大震经常发生在这里;在区域底部,介质由脆性过渡为韧性,导致脆性破裂无法再向下延伸、成为地震的下倾极限面;突破该极限后,断层滑移行为以慢滑移或蠕滑为主。然而,海洋转换断层上的走滑类型地震不一定符合上述规律,例如,在 2018 年夏威夷区域的 6.9 级火山型地震中,高频能量较强的区域与无震慢滑移区互相重合,说明在大型的慢滑移区域中镶嵌了很多小滑移凹凸体,导致了同震过程中高频能量的释放[31]。

频率依赖的破裂行为在正断层地震中也有发现。以 2015 年意大利 Norcia 6.5 级地震为例,LIU

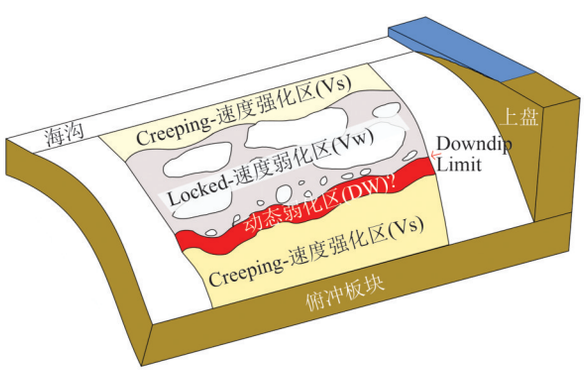


图 5　板间巨型逆冲断层的概念模型示意图

Fig. 5　A Conceptual Model for the Interplate Megathrust Fault

等[46]观测到低频滑移主要分布在浅部区域,而高频信号则集中在低频滑移区的边缘。这种现象可能源于低频滑移区周边复杂的断层结构,这些区域作为“几何障碍体”阻碍了破裂的继续传播,同时激发了高频信号[48]。此外,在流体富集区域,断层结构的复杂性还会导致流体空间分布的不均匀性,进而形成高低频能量的互补关系[49]。

与逆冲型和正断型地震不同,走滑型地震的破裂通常沿断层走向延伸,主要发生在浅部或中部地壳,而在倾向方向上的扩展有限。因此,其滑移行为主要受沿走向不均匀分布的断层属性(应力状态、摩擦特性或三维几何变化)的影响。研究表明,反投影方法获得的高频地震辐射通常源于低频滑移反演所识别的大型滑移体的边缘

区域,例如,2012年苏门答腊8.6级板内走滑地震[50]和2023年土耳其7.8级大陆走滑地震[10]。

4 反投影的未来方向展望

4.1 地震的检测及定位

无震滑移、震颤及有感地震破裂中的复杂行为是断层滑移的不同表现形式。提升地震监测及定位的能力对于及时发现地震前兆、发布地震预警至关重要。反投影方法在俯冲带震颤以及逆冲型地震的余震检测上都已经取得了丰硕的成果。其中,反投影方法和模板匹配法的联合[11]将2011年东北大地震的余震目录扩展了近一倍,在近海沟区域监测到了更多的余震,弥补了该区域的监测空区。另外,该联合方法的空间定位精度达到了~10 km,达到了确定地震灾害影响区域的精度要求。然而,目前它对小震(Mw<4.5)的检测效果较差,这限制了匹配滤波检测中可用高质量BP模板的数量。Mw<4.5的地震振幅较弱,在远震距离上与环境噪声难以区分。因此,需要通过增加额外通道(如不同频段的BP或不同台网的数据)来提高分类输入的维度。此外,还可以利用自定义数学函数(如峰度、偏度和最大绝对偏差)或卷积神经网络从BP能量中提取更多特征。基于增加的通道和特征,探索现代机器学习技术(如支持向量机、卷积神经网络、随机森林和AdaBoost)来有效区分小震(Mw<4.5)和背景噪声将是反投影的一个发展方向[11]。这将有助于长周期火山地震以及俯冲带震颤的研究。

4.2 断层破裂行为的规律探究

反投影技术通过扩展高频信号(>0.5 Hz)的检测能力,揭示了同震破裂过程中多尺度的破裂行为,显著拓宽了人们对破裂动力学频谱行为的认知边界。总的来说,高频地震辐射在破裂性质发生显著变化的位置(如应力突变、几何障碍或摩擦异质性区)能量增强,这与断层属性的非均匀性所导致的破裂波长变化密切相关[51]。因此,研究断层破裂时的频率依赖特征有助于探究断层本身性质及其与外部环境(如流体、滑脱层)的交互作用。

然而,不同台阵所构成的震源-台阵几何差异导致其对地震破裂的方向性辐射模式具有选择性响应。这种方位敏感性差异会调制辐射能量的时-空-频分布特征,进而造成不同台阵的反投影结果呈现显著的频率依赖性(如<0.5 Hz与>0.5 Hz频段的分异现象)。此外,远震P波高频成分(>2 Hz)在传播过程中的强烈衰减,使得震源谱的高频拐角频率与真实辐射能量难以被准确约束。因此,校正路径传播所造成的振幅衰减及频移效应,通过联合不同方位角台阵以减弱单一台阵所造成的多普勒效应,还原震源处的信号特征,对于建立断层本构参数(速率-状态摩擦定律参数、有效正应力)、同震多尺度破裂行为与破裂动力学(从慢滑移到超剪切破裂)之间的物理关联具有重要意义。

参 考 文 献

[1] ALLMANN B P, SHEARER P M. A High-Frequency Secondary Event During the 2004 Parkfield Earthquake[J]. *Science*, 2007, 318(5854): 1279-1283.

[2] AVOUAC J P, MENG L S, WEI S J, et al. Lower Edge of Locked Main Himalayan Thrust Unzipped by the 2015 Gorkha Earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9): 708-711.

[3] BESKARDES G D, HOLE J A, WANG K, et al. A Comparison of Earthquake Backprojection Imaging Methods for Dense Local Arrays[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 212(3): 1986-2002.

[4] BAYSAL E, KOSLOFF D D, SHERWOOD J W C. Reverse Time Migration[J]. *Geophysics*, 1983, 48(11): 1514-1524.

[5] CLAERBOUT J F, DOHERTY S M. Downward Continuation of Moveout-Corrected Seismograms[J]. *Geophysics*, 1972, 37(5): 741-768.

[6] ABRAHAMSON N A. Estimation of Seismic Wave Coherency and Rupture Velocity Using the SMART 1 Strong Motion Array Recordings[D]. Berkeley: University of California, 1985.

[7] ISHII M, SHEARER P M, HOUSTON H, et al. Extent, Duration and Speed of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Imaged by the Hi-Net Array[J]. *Nature*, 2005, 435(7044): 933-936.

[8] MENG L, AMPUERO J P, STOCK J, et al. Earthquake in a Maze: Compressional Rupture Branching During the 2012 Mw 8.6 Sumatra Earthquake[J]. *Science*, 2012, 337(6095): 724-726.

[9] WEI S J, ZENG H Y, SHI Q B, et al. Simultaneous Rupture Propagation Through Fault Bifurcation of the 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(21): e2022GL100283.

[10] ZHANG Y J, TANG X W, LIU D C, et al. Geometric Controls on Cascading Rupture of the 2023 Kahramanmaraş Earthquake Doublet[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(11): 1054-1060.

[11] FENG T, MENG L S, HUANG H. Detecting Offshore Seismicity: Combining Backprojection Imaging and Matched-Filter Detection [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(8): e2020JB019599.

[12] PALO M, TILMANN F, KRUGER F, et al. High-Frequency Seismic Radiation from Maule Earthquake (Mw 8.8, 2010 February 27) Inferred from High-Resolution Backprojection Analysis [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 199(2): 1058-1077.

[13] ZENG H Y, WEI S J, ROSAKIS A. A Travel-Time Path Calibration Strategy for Back-Projection of Large Earthquakes and Its Application and Validation Through the Segmented Super-Shear Rupture Imaging of the 2002 Mw 7.9 Denali Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(6): e2022JB024359.

[14] MENG L S, ZHANG A L, YAGI Y. Improving back Projection Imaging with a Novel Physics-Based Aftershock Calibration Approach: A Case Study of the 2015 Gorkha Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(2): 628-636.

[15] ZHANG Y J, BAO H, MENG L S, et al. Understanding and Mitigating the Spatial Bias of Earthquake Source Imaging with Regional Slowness Enhanced Back-Projection[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2023, 128(5): e2022JB025525.

[16] SONG C, GE Z X. 3D Model Backprojection of the 2017 Mw 8.2 Chiapas Earthquake: A Two-Stage Rupture with a Barrier-Induced Velocity Increase[J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(3): 1121-1130.

[17] MENG L S, INBAL A, AMPUERO J P. A Window into the Complexity of the Dynamic Rupture of the 2011 Mw 9 Tohoku-Oki Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(7):L00G07.

[18] FESTA G, ZOLLO A. Fault Slip and Rupture Velocity Inversion by Isochrone Backprojection [J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(2): 745-756.

[19] ROTEN D, MIYAKE H, KOKETSU K. A Rayleigh Wave Back-Projection Method Applied to the 2011 Tohoku Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(2): 2011GL050183.

[20] SUFRI O, KOPER K D, HUTKO A R, et al. Imaging the Rupture of the 27 February 2010 Chile (Mw 8.8) Earthquake *via* Backprojection of P, PP, and PKP Waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012,117: B02308.

[21] CHEN Y, MENG L S, ZHANG A L, et al. Source Complexity of the 2015 Mw 7.9 Bonin Earthquake[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(7): 2109-2120.

[22] WANG D, TAKEUCHI N, KAWAKATSU H, et al. Estimating High Frequency Energy Radiation of Large Earthquakes by Image Deconvolution Back-Projection[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 449: 155-163.

[23] ISHII M. High-Frequency Rupture Properties of the Mw 9.0 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake [J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63(7): 18.

[24] YAGI Y, NAKAO A, KASAHARA A. Smooth and Rapid Slip near the Japan Trench During the 2011 Tohoku-Oki Earthquake Revealed by a Hybrid Back-Projection Method [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 355/356: 94-101.

[25] HONDA R, AOI S, SEKIGUCHI H, et al. Imaging an Asperity of the 2003 Tokachi-Oki Earthquake Using a Dense Strong-Motion Seismograph Network [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 172(3): 1104-1116.

[26] WALKER K T, SHEARER P M. Illuminating the Near-Sonic Rupture Velocities of the Intracontinental Kokoxili Mw 7.8 and Denali Fault Mw 7.9 Strike-Slip Earthquakes with Global P Wave back Projection Imaging [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114(B2): 2008JB005738.

[27] YAMAMOTO Y, TAKENAKA H. High-Resolution Imaging of Rupture Process of the 2005 Fukuoka Earthquake (Mw 6.6)[C]//AGU Fall Meeting 2026 ,San Francisco, CA,2006.

[28] TAN F Z, GE Z X, KAO H, et al. Validation of the 3-D Phase-Weighted Relative back Projection Technique and Its Application to the 2016 Mw 7.8 Kaikōura Earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 217(1): 375-388.

[29] MENG L, AMPUERO J P, SLADEN A, et al. High-Resolution Backprojection at Regional Distance: Application to the Haiti M 7.0 Earthquake and Comparisons with Finite Source Studies [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B4): 2011JB008702.

[30] KOPER K D, HUTKO A R, LAY T, et al. Imaging Short-Period Seismic Radiation from the 27 February 2010 Chile (Mw 8.8) Earthquake by Back-Projection of P, PP, and PKIKP Waves [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B2): 2011JB008576.

[31] KEHOE H L, KISER E D, OKUBO P G. The Rupture Process of the 2018 Mw 6.9 Hawaii Earth-

quake as Imaged by a Genetic Algorithm-Based Back-Projection Technique[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(5): 2467-2474.

[32] ROESSLER D, KRUEGER F, OHRNBERGER M, et al. Rapid Characterisation of Large Earthquakes by Multiple Seismic Broadband Arrays[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(4): 923-932.

[33] PULIDO N, AOI S, FUJIWARA H. Rupture Process of the 2007 Notohanto Earthquake by Using an Isochrones Back-Projection Method and K-NET/KiK-net Data[J]. *Earth, Planets and Space*, 2008, 60(10): 1035-1040.

[34] JAKKA R S, COCHRAN E S, LAWRENCE J F. Earthquake Source Characterization by the Isochrone back Projection Method Using Near-Source Ground Motions[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 182(2): 1058-1072.

[35] FAN W Y, SHEARER P M, JI C, et al. Multiple Branching Rupture of the 2009 Tonga-Samoa Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(8): 5809-5827.

[36] VERA F, TILMANN F, SAUL J. A Decade of Short-Period Earthquake Rupture Histories from Multi-array Back-Projection[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2024, 129(2): e2023JB027260.

[37] MCMECHAN G A, LUETGERT J H, MOONEY W D. Imaging of Earthquake Sources in Long Valley Caldera, California, 1983[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75: 1005-1020.

[38] LAY T, KANAMORI H. An Asperity Model of Large Earthquake Sequences[M]//Earthquake Prediction. Washington D C: American Geophysical Union, 2013: 579-592.

[39] XU L W, MENG L S, XU W B, et al. Unzipping of the Conjugate Fault System During the 2024 Mw 7.4 Hualien Earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(13): e2025GL115218.

[40] HICKS S P, OKUWAKI R, STEINBERG A, et al. Back-Propagating Supershear Rupture in the 2016 Mw 7.1 Romanche Transform Fault Earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(9): 647-653.

[41] FREUND L B. The Mechanics of Dynamic Shear Crack Propagation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, 84(B5): 2199-2209.

[42] DUNHAM E M, ARCHULETA R J. Near-Source Ground Motion from Steady State Dynamic Rupture Pulses[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(3): 2004GL021793.

[43] 王松, 朱守彪. 断层破裂速度对地震动及其地震灾害影响的有限单元法模拟[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 686-697.
WANG Song, ZHU Shoubiao. Finite Element Method Simulations of the Influences of Fault Rupture Velocities on Ground Motions and Seismic Hazards[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 686-697.

[44] BAO H, XU L W, MENG L S, et al. Global Frequency of Oceanic and Continental Supershear Earthquakes[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(11): 942-949.

[45] KAMMER D S, MCLASKEY G C, ABERCROMBIE R E, et al. Earthquake Energy Dissipation in a Fracture Mechanics Framework[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 4736.

[46] LIU W, YAO H J, WEI S J. Frequency-Dependent Rupture Characteristics of the 30 October 2016 Mw 6.5 Norcia, Italy Earthquake Inferred from Joint Multi-scale Slip Inversion[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(5): e2020JB020706.

[47] KOKETSU K, YOKOTA Y, NISHIMURA N, et al. A Unified Source Model for the 2011 Tohoku Earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310(3/4): 480-487.

[48] OKUWAKI R, YAGI Y. Role of Geometric Barriers in Irregular-Rupture Evolution During the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 212(3): 1657-1664.

[49] DI LUCCIO F, VENTURA G, DI GIOVAMBATTISTA R, et al. Normal Faults and Thrusts Reactivated by Deep Fluids: The 6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila Earthquake, Central Italy[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B6): 2009JB007190.

[50] YIN J X, YAO H J. Rupture and Frequency-Dependent Seismic Radiation of the 2012 Mw 8.6 Sumatra Strike-Slip Earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 205(3): 1682-1693.

[51] LI B, WU B N, BAO H, et al. Rupture Heterogeneity and Directivity Effects in Back-Projection Analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(3): e2021JB022663.