

冯甜,吴建平,房立华,2021. 微震研究与应用进展. 中国地震,37(2):261~272.

微震研究与应用进展

冯甜 吴建平 房立华

中国地震局地球物理研究所,北京 100081

摘要 随着地震观测台站密度的不断增加以及地震检测技术的快速发展,微震研究受到了地震学界的广泛关注。与发震周期较长的大地震相比,微震复发周期短、发生频次高,可以获得更高分辨率的地壳内部介质物性和应力状态等变化信息。微震在许多领域具有广泛的应用,如研究断层几何形态、前震与地震成核的关系、余震时空演化特征及余震触发机理、远程动态触发现象、重复地震、诱发地震以及非火山震颤信号的检测等。高精度的微震定位结果可以揭示断裂带的精细几何形态和深部活动过程,促进对断层特性和地震物理过程的深入认识。本文简要总结了国内外微震研究的主要进展,包括微震检测的主要方法和微震在多个领域的研究实例,并对微震在地震科学中的应用前景进行了展望。

关键词: 微震 微震检测 模板匹配方法 波形互相关 断层几何形态

[文章编号] 1001-4683(2021)02-0261-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震发生的频度和震级通常符合古登堡-里克特关系式 $\lg N = a - bM$, N 表示震级高于 M 的累积地震数量, a 代表地震的产出率, b 值指示大、小地震的比例 (Gutenberg et al, 1944)。这一统计关系表明小地震发生的频度要比大地震多很多。在世界上大多数地方, 3 级地震的数量是 4 级地震的 10 倍, 4 级地震的数量是 5 级地震的 10 倍 (Brodsky, 2019)。微震震级通常较小, 由于背景噪音干扰或者地震波形的重叠, 微震常常难以被识别。改善地震观测条件或利用先进的地震识别技术检测微震信号, 可以获得更多数量的地震, 为相关科学研究提供更丰富的资料。

微震检测已被应用到多个研究领域, 例如探寻前震和地震成核 (Kato et al, 2014; Yoon et al, 2019)、研究余震的时空分布特征及余震触发机理 (Wu et al, 2017; Yao et al, 2017)、远程动态触发 (Peng et al, 2010b)、确定断层分布 (Warren-Smith et al, 2017)、研究重复地震 (Yao et al, 2017)、研究诱发地震 (Skoumal et al, 2014)、检测非火山颤动中的低频地震 (Shelly et al, 2006) 等。数量众多的微震可以促进更高分辨率的地震发生过程的研究, 为深

[收稿日期] 2021-02-03 [修定日期] 2021-03-25

[项目类别] 国家重点研发计划(2018YFC1503400)、国家自然科学基金(41774067)和中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB20X07)共同资助

[作者简介] 冯甜,女,1994年生,博士研究生,主要从事微震检测与定位研究。E-mail:fengtian@cea-igp.ac.cn

吴建平,通讯作者,男,1963年生,博士,研究员,主要从事地球深部结构与地震定位研究。

E-mail:wjpwu@cea-igp.ac.cn

入理解地震和断层的物理特性提供了更好的约束。

本文基于国内外微震研究进展,总结了主要的微震检测方法,列举了微震在多个领域的应用实例,并对微震的应用前景进行了展望。

1 微震检测方法

近年来,随着固定地震台站数量的增长以及密集流动地震台阵的广泛使用,地震观测数据呈指数增长,一个亟需解决的问题是如何自动处理这些地震数据,获得更加完备的地震目录。由于幅度小、信噪比低或受到大震后尾波干扰等多种原因,微小地震难以被识别。目前地震学家发展了多种地震检测方法用于微震检测,除了传统的长短时窗比法(Stevenson, 1976; Allen, 1978; Baer et al, 1987),近年来模板匹配(Gibbons et al, 2006; Shelly et al, 2007; Peng et al, 2009; Yang et al, 2009; Meng et al, 2013; Yao et al, 2017)、模板匹配定位(Zhang et al, 2015; Wang et al, 2017, 2018)、波形自相关(Brown et al, 2008)、FAST(Fingerprint and Similarity Thresholding)(Yoon et al, 2015, 2019)、局部相似度(Li et al, 2018)、机器学习(Ross et al, 2018; Perol et al, 2018; Kong et al, 2019; Zhu et al, 2019)等方法逐步受到人们的重视。

长短时窗比法采用短时窗和长时窗的平均能量比值来检测地震信号,具有简单直观、运算速度快等特点,在地震台网的地震自动检测中得到了广泛应用,但该方法难以检测到信噪比较低的地震信号。模板匹配方法和模板匹配定位方法是以模板地震为参考,利用波形互相关找出与其相似的地震,可以检测到信噪比较低的地震信号,有效降低地震目录的最小完整性震级,检测到的地震数量可达到人工检测目录的数倍至数十倍。若用该方法扫描时间跨度较长的连续地震波形数据,耗时则是一个需要重点考虑的问题。波形自相关方法是将连续地震波形分成若干时窗,然后进行两两互相关检测地震,该方法无需模板地震,信噪比较低时检测效果也较好,但耗时较长。FAST地震检测方法首先对连续地震波形提取出可区别的关键性特征,以创建二进制指纹,然后进行相似性搜索来检测地震,搜索效率较高。局部相似度方法需要有较密集的台站分布,通过对每个台站及其邻近台站记录的波形进行滑动互相关计算,得到平均互相关函数,将所有台站的平均互相关函数叠加来检测地震事件,该方法可以检测到低于噪音水平的微弱地震事件,检测速度较慢。机器学习方法通过从上百亿的波形中不断提取地震震相特征,训练卷积神经网络,从而快速拾取较高精度的震相到时,该方法可应用于海量数据,但需要大量的训练样本和较长的模型训练调试时间,是目前正在快速发展和具有重要应用前景的新方法。鉴于篇幅,仅对模板匹配类方法的原理进行详细介绍。

模板匹配方法是将已知地震的波形(一般为S波或P波)作为模板,与连续波形数据做滑动互相关,从而找到模板地震附近、与模板地震相似的地震信号。将各个台站分量的互相关结果叠加,可有效加强地震信号,抑制噪音信号,从而识别出噪音级别甚至低于噪音水平的地震信号。模板匹配定位方法是模板匹配方法的进一步发展,由于考虑了新检测地震在三维空间的位置,并根据地震位置与模板地震位置的差异对各个台站的震相走时进行了矫正,可使波形匹配程度更高,从而识别到更微弱的地震信号,同时获得更可靠的检测地震的位置。模板匹配方法和模板匹配定位方法的核心技术均为对微弱信号十分敏感的波形互相关方法,由于模板波形需要与连续波形的每一个采样点做滑动互相关,因此程序耗时一直是

需要重点考虑的问题。在利用模板匹配方法和模板匹配定位方法处理大量的连续波形观测数据时,通常会采用基于 GPU 的并行算法 (Meng et al, 2012; Beaucé et al, 2017; Yin et al, 2018; Liu et al, 2020) 提高处理效率。模板匹配方法也可以通过适当降低数据的采样率来减少程序运行时间 (Yin et al, 2018; Wu et al, 2017)。对于模板匹配定位方法,可以设置较粗的网格间隔,或设置粗网格-细网格的多步骤搜索方案 (Feng et al, 2021)。需要指出的是,降低数据的采样率或设置较粗的网格搜索方案通常会在一定程度上降低地震的检测数量 (Feng et al, 2021)。

2 微震的应用

近 20 年来,关于微地震的论文研究数量逐步增加,微震已成为当下研究的热点(图 1)。微震检测在许多领域有着广泛的应用,并在多个方面取得了令人瞩目的研究进展。

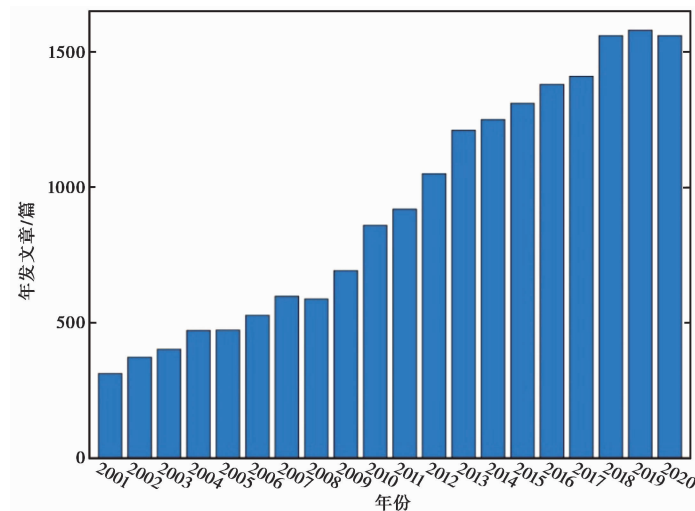


图 1 基于谷歌学术统计的 2001—2020 年微震研究论文数量

2.1 确定断层几何形态

基于断层破裂分布的反演可以大致确定孕震断层 (Sun et al, 2018; Zhao et al, 2018), 更直接的方式是采用精定位后的地震分布刻画断层形态 (Fang et al, 2015; 房立华等, 2018; Yin et al, 2018)。地震数量越多, 断层形态刻画得越清晰。利用微震检测方法识别更多的地震并对其进行精定位, 可以得到时空分辨率更高的地震目录, 从而有助于认识断层的三维形态。Ross 等 (2019) 采用模板匹配方法扫描了美国南加州地区近 10 年的连续波形数据, 获得了 181 万个地震, 其数量约为原始地震目录的 10 倍, 然后采用双差地震定位方法获得了高精度的相对地震位置。相较于原始地震目录, 基于新检测目录的南加州地区的断裂明显被刻画得更加清晰, 一些明显的非对称性破碎带、大量交叉线性小断裂以及以前未知的小断裂均被描绘出来, 如西南方向的 Coyote Creek 断裂在深度方向上表现出高度弯曲的结构, 该断裂的西北和东南端较深, 而中间部位较浅。Fang 等 (2015) 和 Wu 等 (2017) 采用双差地震定位和模板匹配检测等方法对 2013 年芦山 M_w 6.6 地震的余震序列进行了研究, 揭示了发震断裂高分辨率的空间分布形态, 并发现该发震断层出现“Y”型结构的时间在主震发生后的

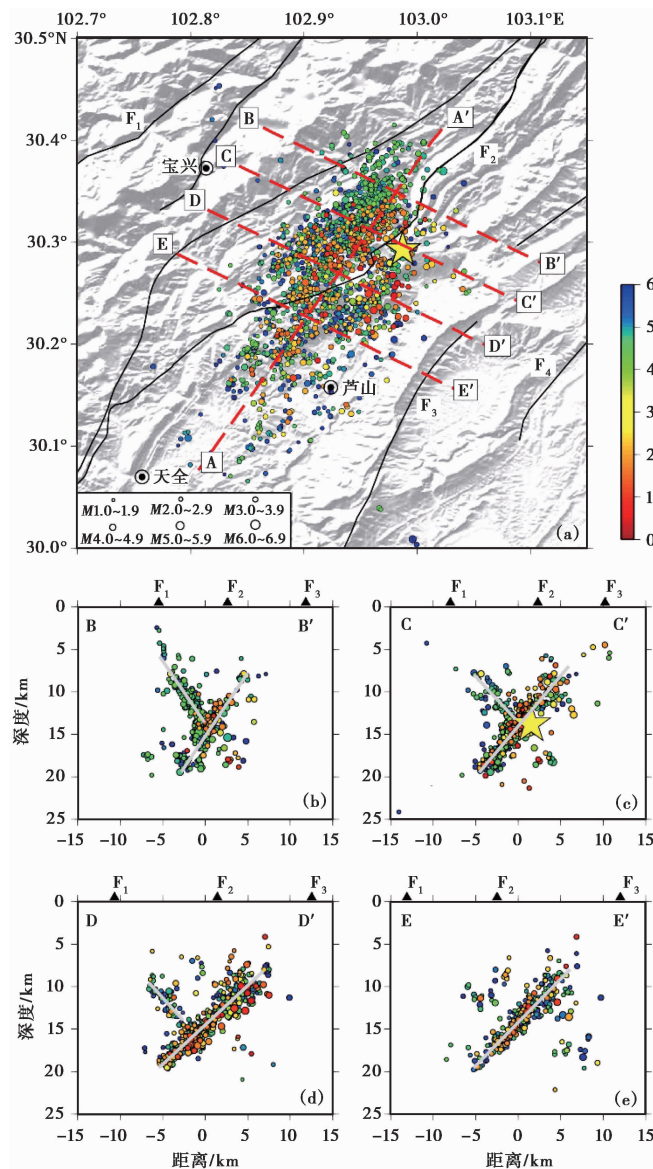


图 2 2013 年芦山 M_w 6.6 地震重定位后的余震分布 (据 Fang 等 (2015))

(a) 中圆圈大小指示地震震级, 圆圈颜色代表距主震 (黄色五角星) 发生时间 (天) 的对数; 红色虚线表示剖面的位置; 黑线代表主要断裂: F_1 : 盐井-五龙断裂, F_2 : 大川-双石断裂, F_3 : 新开店断裂, F_4 : 大邑断裂; 地图的背景代表地形; (b) ~ (e) 为余震 (距垂直剖面 3km 以内的地震) 在各个剖面上的投影; 断裂在每个剖面上的位置用三角形表示; 灰线表示采用线性回归方法拟合的断层平面

20min 内 (图 2)。Liu 等 (2019) 检测到 2016 年门源 M_s 6.4 地震的余震数量为原始目录的 11 倍, 发现主震发生后 10min 的余震分布显示出一个具有 $50^\circ \sim 60^\circ$ 倾角的断裂, 而后余震分布揭示了近直立的发震构造。Shelly (2020) 利用模板匹配方法和双差地震定位方法得到高精度、高分辨率的地震目录, 根据地震分布发现 2019 年里奇克雷斯特 (Ridgecrest) M_w 7.1 地震

序列的发震断层具有高度复杂的结构,存在大量与西北走向主断裂交叉垂直的小断裂。通过微震检测降低地震目录的最小完整性震级,使用更多数量的地震来确定未知断裂以及断裂的形态,是地震学研究的重要发展方向。

2.2 前震探寻和地震成核

前震活动可以为地震成核过程提供至关重要的信息,前震一直被认为是预测地震的手段之一(Jones et al, 1979; Dodge et al, 1995、1996; Ben-zion, 2008; Brodsky et al, 2014)。然而,历史上有的地震发生前存在前震活动,有的地震发生前不存在前震,这种前震发生的偶然性阻碍了其在地震成核和地震预测方面的发展。前人研究发现仅有 10%~50%的主震发生前存在前震活动(Jones et al, 1976、1979; Abercrombie et al, 1996; Reasenber, 1999; Marsan et al, 2014; Chen et al, 2016),另有研究认为板内中强地震一般不存在明显的前震活动(Yang et al, 2009; Wu et al, 2014; Ruan et al, 2017; Meng et al, 2018)。自然界中的前震可能由于震级小而未被识别,对前震发生率的认知可能会随着可检测到的最小前震震级而改变(Mignan, 2014)。Trugman 等(2019)系统分析了经过模板匹配检测后获得的南加州 2008—2017 年高精度地震目录(Ross et al, 2019),该地震目录的最小完备性震级在某些区域低至 0.3 级,在局部地区低至 0 级。基于此目录发现 72%的主震存在明显的前震活动,因此自然界的前震发生率可能要比以前认为的更加普遍。

微震检测不仅可以促进对前震发生率的理解,也可以提高对单个地震成核过程的认识。目前关于前震和地震成核的关系存在 3 种观点,第一种观点为地震成核的级联破裂模型,即每个前震通过应力扰动触发邻近的下一个前震发生,主震刚好是一个更大的被触发事件(Helmstetter et al, 2003; Felzer et al, 2004);第二种观点为震前预滑模型,即主震发生前存在一些准备性的物理过程,例如无震蠕滑或者孔隙压力变化,由此导致了主震的发生(Dodge et al, 1995、1996; McGuire et al, 2005; Gomberg, 2018);第三种观点为主震发生前级联破裂和震前蠕滑过程均存在的混合模型(McLaskey, 2019; Yao et al, 2020)。Ross 等(2019)基于常规目录认为 2012 年美国加州布劳利震群发生的 10h 之前存在的 3 个地震可能是与此次震群不相关的地震事件,但模板匹配检测后,发现在这 10h 内实际上存在 36 个活跃的前震事件。Kato 等(2012)采用模板匹配方法检测到 2011 年日本 9.0 级大地震的前震数量是原始 JMA 目录的 4 倍,更加明确地揭示了震前存在 2 个向主震震中迁移的前震序列,并认为该现象与板块边界的慢滑移过程有关。利用 FAST 地震检测方法,Yoon 等(2019)检测到 1999 年加利福尼亚州赫克托尔 M_w 7.1 地震的前震数量约为原始目录的 3 倍,通过对前震序列进行精定位和震源参数分析,发现前震序列向北发生直至主震爆发,前震-主震发生过程符合应力的级联破裂模型。对于中等震级的主震,Feng 等(2021)采用模板匹配定位方法检测到 2018 年石棉 M_L 4.0 地震的前震数量是原始目录的 2 倍,结合精定位以及常数应力降假设,发现前震-主震的发生与级联应力触发机制一致。Yao 等(2020)对 2010 年墨西哥(El Mayor-Cucapah) M_w 7.2 地震的前震序列进行模板匹配检测、精定位以及波谱比分析发现,主震震前断层蠕滑过程和级联应力触发共同促进了主震的成核作用。通过微震研究获得前震的高精度时空分布特征以及更多数量的前震震例,对深入认识地震成核过程、发展地震预测技术方法具有重要意义。

2.3 余震时空演化特征研究

主震发生后,余震发生率较高,不同地震的波形相互重叠(信噪比低),可能导致大量地

震信号未被识别。近年来,大量研究基于先进的信号识别技术检测到更多数量的余震,获得余震详细的时空扩展过程,进而探讨余震的触发机制和震后变形特征。Peng等(2009)通过模板匹配方法识别到2004年帕克菲尔德6级地震的余震数量是原始目录的11倍,并观测到余震沿着走向随时间的对数存在明显的扩展现象,与余滑导致余震扩展的数值模拟结果一致,表明余震扩展主要是由震后余滑驱动的,而基于原始余震目录很难观测到明确的余震扩张迁移现象。类似的研究也表明模板匹配等微震检测方法在研究余震迁移方面具有独特的优势(Wu et al, 2017; Yin et al, 2018; Liu et al, 2019)。Meng等(2016)对10个 $M > 4.0$ 的地震序列进行了模板匹配检测,新检测目录的地震数量至少是原始目录的5倍,最小完整性震级降低了0.5~1级,此外,该研究发现在大地测量推断的闭锁深度之下,存在异常大的余震带,可能被主震发生后的深部蠕滑驱动,认为11~12km之下蠕滑带的存在可能对限定该地区地震的最大震级具有重要意义。Sugan等(2019)通过模板匹配方法对2012年意大利艾米利亚2个6级主震之间的地震进行了研究,获得的地震数量约为原来的4.5倍,其发现第一个主震的余震序列向第二个主震的成核点迁移,迁移距离与时间的对数成正比,认为前者的震后余滑对断层产生了应力加载,并促使了9天后6级地震的发生。通过新的技术方法检测常规目录可能遗漏的微小余震、获取更加完备的余震序列、揭示更详细的余震时空分布及迁移特征,有助于深入认识余震触发机制和震后变形过程。

2.4 远程动态触发

大地震除了可以触发近场余震外(Freed, 2005),其面波导致的动态应力变化还可以触发成百上千千米外的地震活动(Hill et al, 2015)、深部震颤信号(Peng et al, 2010a)和慢滑移事件(Peng et al, 2015)。通过微震检测方法识别大地震发生后常规目录遗漏的地震信号,完善地震目录,可以获得更真实的地震发生速率的变化。基于SCSN目录,2010年墨西哥(El Mayor-Cucapah) M_w 7.2地震发生后,震中175km范围内的地震活动速率增加,然而基于模板匹配检测后的地震目录,实际上远至275km范围内的地震被触发了(Ross et al, 2019)。Li等(2019)利用模板匹配方法研究2012年印度洋 M_w 8.6地震发生后腾冲火山区的地震活动性,新检测的地震数量为原始目录的4倍。基于原始目录未观测到地震活动速率明显的变化,但基于新检测后的目录,发现主震发生数天后,地震活动速率显著增加,表明2012年印度洋地震在该地区产生了延迟动态触发作用。Li等(2017)对2015年尼泊尔 M_w 7.8地震发生后西藏南部地区的地震活动性进行了研究,基于模板匹配检测,发现尼泊尔地震发生后西藏南部地区地震活动性立即增强,藏南地区产生了广泛的远程动态触发作用。Yao等(2015)通过模板匹配检测发现,2004年苏门答腊9.1级地震和2005年尼亚斯8.6级地震触发的西藏中南部微震活动存在持续时间的差异,认为可能是由2个大地震的面波能量不同引起的。上述震例均表明,识别到更多的微震活动可以更明显地揭露大地震的远程动态触发作用,从而有利于探讨地震之间的相互关系和地震触发机理,有助于评估重点地区的构造应力水平,为地震预测预报提供新的信息。

2.5 基于重复地震研究断层深部滑移特征

断层蠕滑会导致凹凸体被重复加载和破裂,从而产生了重复地震。分析重复地震序列可以研究地下断层的滑动特征,例如震后余滑、自发性或周期性的慢滑移、断层稳定蠕滑等(Uchida et al, 2019; Uchida, 2019)。微震的缺乏或地震目录的不完备可能导致重复地震的

遗漏,从而引起对断层蠕滑量的低估(Deng et al,2020)。通过检测微震,有可能提取更完备的重复地震序列,获取更可靠的断层蠕滑特征。Kato 等(2012)和 Kato 等(2014)基于模板匹配方法扩充了 2011 年日本 9.0 级大地震和 2014 年智利伊基克 8.1 级地震的前震数量,观测到显著的重复前震活动和重复地震迁移特征,表明主震发生前存在大规模的慢滑移现象,断层界面的慢滑移产生的应力加载可能促进了主震的发生。Yao 等(2017)通过模板匹配方法检测到 2012 年尼科亚 7.6 级大地震的余震数量是原始模板数量的 17 倍,发现 53 组重复地震序列,认为沿板块界面的震后余滑驱动了余震的时空扩展。基于中国地震台网中心提供的区域地震目录,Deng 等(2020)从海原断裂老虎山段 2009—2018 年发生的震级大于 1 级的地震中提取了重复地震序列,估算的断层蠕滑速率略小于大地测量和地质学观测的结果,认为其可能是由于缺乏小地震或者地震目录不完备导致的。这些研究均表明,新的微震检测技术可以获得更完备的重复地震序列(郑晨等,2015;谭毅培等,2016),揭示更高精度的断层蠕滑过程,有助于认识断层活动性和进行地震危险性评估。

2.6 诱发地震

诱发地震是指因人类活动而引发的地震,最初的报道来源于采矿和水库蓄水所诱发的地震,目前已有长达数十年的观测历史(Foulger et al,2018)。近年来,人们越来越关注由废水注入地下(Petersen et al,2016)、水力压裂页岩气开采(Schultz et al,2017)、地热能开采(Brodsky et al,2013)、油气开采(Priolo et al,2015)等人为工业活动导致的诱发地震(主要诱发大量微震,极少数情况下可能会导致 5 级左右地震的发生(Keranen et al,2013))。工业开采过程中的流体注入地下,可能引起孔隙压力和应力的时空变化,降低断层或破碎带上的有效正应力,从而促进应力接近临界状态的断层的滑动。对于无限均匀各向同性的三维介质,流体(地震)扩散距离可以近似表达为 $r(t) = \sqrt{4\pi Dt}$ (Shapiro et al,1997),其中 D 为扩散系数(单位: m^2/s), t 为距第一个地震发生的时间间隔(单位: s)。通过检测具有更低震级下限、更完备的地震目录,并对地震进行精定位,可利用上述时空迁移关系式,并结合油气开采和废水处理等工业活动的注水特点,来确定地震发生和流体之间的关系。

Skoumal 等(2014)使用模板匹配方法结合地震精定位对 2011 年俄亥俄州扬斯敦地震序列进行了研究,发现废水处理井开始注水后,地震活动性明显增加,注水停止后地震活动性显著降低,该地震序列在距废水处理井不到 100m 处开始发生,并向西南方向发展迁移,形成一个 800m 左右的线性地震条带,地震扩散距离随时间的演化符合上述关系式。水力压裂法是通过注入增压流体将页岩层等渗透率较低的岩石压裂或使预先存在的断层滑动,产生裂缝,从而使石油或天然气从裂缝中流出。加拿大艾伯塔省的福克斯克里克(Fox Creek)在 2010 年 3 月开始水力压裂作业之前曾是一个地震静止区,自 2013 年 12 月首次在该地区报道压裂引起的地震以来,地震活动急剧增加(Schultz et al,2017)。发生于韩国浦项地热发电厂之下的 2017 年 M_w 5.5 地震,是 20 世纪以来韩国最大和最具破坏性的地震之一,研究认为此次地震的发生与该增强型地热发电厂在过去 2 年中曾进行过高压液体注入有关(Grigoli et al,2018)。张致伟等(2012)研究发现,四川自贡-隆昌地区天然气生产井所产生的工业废水回注至家 33 井中,在加压注水阶段,地震活动的频度、强度明显增强,与注水量呈现较好的相关性。深入研究工业开采等人为活动诱发地震的机理,有利于指导工业活动的开展,减轻诱发地震的灾害。

2.7 检测震颤 (Tremor) 信号

构造震颤信号是在日本西南俯冲带首次被发现的,这是一种微弱、低幅度、持续时间较长的地震信号,并经常伴有慢滑移事件发生(Obara, 2002; Rogers et al, 2003; Shelly et al, 2007)。普通地震大多发生在较浅的脆性地壳,而构造颤动信号常发生于较深的韧性地壳中(Guilhem et al, 2010)。Shelly 等(2007)使用 677 个低频地震作为模板,采用模板匹配方法在日本四国岛(Shikoku)识别到了 2 组活跃的震颤序列,发现第二组震颤信号沿着板块界面以 45km/h 的速度向上发生迁移。这种震颤信号由低频地震震群组成,其本质为板块界面的小的慢滑动事件。基于模板匹配方法,Shelly (2010)发现在圣安德烈斯断层下的地壳基底(26km)存在迁移的震颤信号,大约在 90min 内沿着断层走向往西北迁移了 25km,迁移速率为 15~80km/h。震颤信号对认识断裂带的深部活动具有重要的意义。

3 结语

虽然能量较强的中强地震常常是地震学界关注的焦点,但微震的数量优势提供了丰富宝贵的地震资料,有利于揭示精细而重要的地震物理过程。高精度的地震目录对揭示盲断层的精细形态、了解地震速率的变化特征、探讨前震、余震时空分布特征等具有重要意义。目前存在多种微震检测方法,每种方法均具有各自的优势和局限性,应根据研究的连续波形时间长度、台站密度等实际条件选取应用。

Ross 等(2019)使用美国南加州地区 2000—2017 年发生的约 28 万个地震作为模板,对 2008—2017 年的连续地震波形数据进行了模板匹配扫描,共检测到了近 181 万个地震,该高精度地震目录表明,地震与地震之间的时间间隔由原来的 1753s 减至现在的 174s。随着地震检测算法的改进以及计算机存储和运算能力的发展,从大量连续地震波形数据中提取地震信号的效率和能力将会不断提高,检测到的地震与地震之间的时间间隔将会继续缩短,进而揭露出更加精细的地震活动性随时间的演化过程。随着我国固定台网台站密度的增加和密集流动地震台阵的广泛使用,如何实时处理地震数据并获取高精度地震目录是一个需要重点考虑的问题。在未来的工作中,可以考虑将微震识别技术和精定位方法相结合,应用于密集台阵数据的自动化处理,从而有利于实时获取高精度地震目录、分析地震活动性、 b 值和应力状态等的时空变化,提高中短期地震预测预报水平。

参考文献

- 房立华,吴建平,苏金蓉,等,2018. 四川九寨沟 M_s 7.0 地震主震及其余震序列精定位. 科学通报, **63**(7):649~662.
- 谭毅培,邓莉,曹井泉,等,2016. 2015 年河北滦县震群发震机理分析. 地球物理学报, **59**(11):4113~4125.
- 张致伟,程万正,梁明剑,等,2012. 四川自贡-隆昌地区注水诱发地震研究. 地球物理学报, **55**(5):1635~1645.
- 郑晨,丁志峰,周晓峰,等,2015. 利用波形互相关方法识别分析灌县-安县断裂重复地震. 地震学报, **37**(2):299~311.
- Abercrombie R E, Mori J, 1996. Occurrence patterns of foreshocks to large earthquakes in the western United States. *Nature*, **381**(6580):303~307.
- Allen R V, 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bull Seismol Soc Am*, **68**(5):1521~1532.
- Baer M, Kradolfer U, 1987. An automatic phase picker for local and teleseismic events. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(4):1437~1445.
- Beaucé E, Frank W B, Romanenko A, 2017. Fast matched filter (FMF): An efficient seismic matched-filter search for both CPU and GPU architectures. *Seismol Res Lett*, **89**(1):165~172.
- Ben-Zion Y, 2008. Collective behavior of earthquakes and faults: continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes,

- and different dynamic regimes. *Rev Geophys*, **46**:RG4006.
- Brodsky E E, 2019. The importance of studying small earthquakes. *Science*, **364**(6442):736~737.
- Brodsky E E, Lajoie L J, 2013. Anthropogenic seismicity rates and operational parameters at the Salton Sea geothermal field. *Science*, **341**(6145):543~546.
- Brodsky E E, Lay T, 2014. Recognizing foreshocks from the 1 April 2014 Chile earthquake. *Science*, **344**(6185):700~702.
- Brown J R, Beroza G C, Shelly D R, 2008. An autocorrelation method to detect low frequency earthquakes within tremor. *Geophys Res Lett*, **35**(16):L16305.
- Chen X W, Shearer P M, 2016. Analysis of foreshock sequences in California and implications for earthquake triggering. *Pure Appl Geophys*, **173**(1):133~152.
- Deng Y F, Peng Z G, Liu-Zeng J, 2020. Systematic search for repeating earthquakes along the Haiyuan fault system in Northeastern Tibet. *J Geophys Res:Solid Earth*, **125**(7):e2020JB019583.
- Dodge D A, Beroza G C, Ellsworth W L, 1995. Foreshock sequence of the 1992 Landers, California, earthquake and its implications for earthquake nucleation. *J Geophys Res:Solid Earth*, **100**(B6):9865~9880.
- Dodge D A, Beroza G C, Ellsworth W L, 1996. Detailed observations of California foreshock sequences: Implications for the earthquake initiation process. *J Geophys Res:Solid Earth*, **101**(B10):22371~22392.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al, 2015. Aftershock observation and analysis of the 2013 M_s 7.0 Lushan earthquakes. *Seismol Res Lett*, **86**(4):1135~1142.
- Felzer K R, Abercrombie R E, Ekström G, 2004. A common origin for aftershocks, foreshocks, and multiplets. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(1):88~98.
- Feng T, Wu J P, Fang L H, et al, 2021. Foreshocks of the 2018 M_L 4.0 Shimian earthquake in the Anninghe fault and its implications for earthquake nucleation. *Seismol Res Lett*, **92**(3):1937~1949.
- Foulger G R, Wilson M P, Gluyas J G, et al, 2018. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Sci Rev*, **178**:438~514.
- Freed A M, 2005. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **33**:335~367.
- Gibbons S J, Ringdal F, 2006. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophys J Int*, **165**(1):149~166.
- Gomberg J, 2018. Unsettled earthquake nucleation. *Nat Geosci*, **11**(7):463~464.
- Grigoli F, Cesca S, Rinaldi A P, et al, 2018. The November 2017 M_w 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. *Science*, **360**(6392):1003~1006.
- Guilhem A, Peng Z G, Nadeau R M, 2010. High-frequency identification of non-volcanic tremor triggered by regional earthquakes. *Geophys Res Lett*, **37**(16):L16309.
- Gutenberg B, Richter C F, 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bull Seismol Soc Am*, **34**:185~188.
- Helmstetter A, Sornette D, Grasso J R, 2003. Mainshocks are aftershocks of conditional foreshocks: How do foreshock statistical properties emerge from aftershock laws? *J Geophys Res:Solid Earth*, **108**(B1):2046.
- Hill D, Prejean S, 2015. Dynamic triggering. In: Kanamori H. *Treatise on Geophysics*. vol. 4. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 273~304.
- Jones L M, Molnar P, 1976. Frequency of foreshocks. *Nature*, **262**(5570):677~679.
- Jones L M, Molnar P, 1979. Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on faults. *J Geophys Res:Solid Earth*, **84**(B7):3596~3608.
- Kato A, Nakagawa S, 2014. Multiple slow-slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile M_w 8.1 earthquake. *Geophys Res Lett*, **41**(15):5420~5427.
- Kato A, Obara K, Igarashi T, et al, 2012. Propagation of slow slip leading up to the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, **335**(6069):705~708.
- Keranen K M, Savage H M, Abers G A, et al, 2013. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 M_w 5.7 earthquake sequence. *Geology*, **41**(6):699~702.

- Kong Q K, Trugman D T, Ross Z E, et al, 2019. Machine learning in seismology: Turning data into insights. *Seismol Res Lett*, **90** (1): 3~14.
- Li L, Wang B S, Peng Z G, et al, 2019. Dynamic triggering of microseismicity in Southwest China following the 2004 Sumatra and 2012 Indian Ocean earthquakes. *J Asian Earth Sci*, **176**(9): 129~140.
- Li L, Yao D D, Meng X F, et al, 2017. Increasing seismicity in Southern Tibet following the 2015 M_w 7.8 Gorkha, Nepal earthquake. *Tectonophysics*, **714~715**: 62~70.
- Li Z F, Peng Z G, Hollis D, et al, 2018. High-resolution seismic event detection using local similarity for large-N arrays. *Sci Rep*, **8**: 1646.
- Liu M, Li H Y, Peng Z G, et al, 2019. Spatial-temporal distribution of early aftershocks following the 2016 M_s 6.4 Menyuan, Qinghai, China Earthquake. *Tectonophysics*, **766**: 469~479.
- Liu M, Li H Y, Zhang M, et al, 2020. Graphics processing unit-based match and locate (GPU-M&L): An improved match and locate method and its application. *Seismol Res Lett*, **91**: 1019~1029.
- Marsan D, Helmstetter A, Bouchon M, et al, 2014. Foreshock activity related to enhanced aftershock production. *Geophys Res Lett*, **41**(19): 6652~6658.
- McGuire J J, Boettcher M S, Jordan T H, 2005. Foreshock sequences and short-term earthquake predictability on East Pacific rise transform faults. *Nature*, **434**(7032): 457~461.
- McLaskey G C, 2019. Earthquake initiation from laboratory observations and implications for foreshocks. *J Geophys Res: Solid Earth*, **124**(12): 12882~12904.
- Meng X F, Peng Z G, 2016. Increasing lengths of aftershock zones with depths of moderate-size earthquakes on the San Jacinto Fault suggests triggering of deep creep in the middle crust. *Geophys J Int*, **204**: 250~261.
- Meng X F, Peng Z G, Hardebeck J L, 2013. Seismicity around Parkfield correlates with static shear stress changes following the 2003 M_w 6.5 San Simeon earthquake. *J Geophys Res: Solid Earth*, **118**(7): 3576~3591.
- Meng X F, Yang H F, Peng Z G, 2018. Foreshocks, b value map, and aftershock triggering for the 2011 M_w 5.7 Virginia earthquake. *J Geophys Res: Solid Earth*, **123**(6): 5082~5098.
- Meng X F, Yu X, Peng Z G, et al, 2012. Detecting earthquakes around Salton Sea following the 2010 M_w 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake using GPU parallel computing. *Procedia Comput Sci*, **9**: 937~946.
- Mignan A, 2014. The debate on the prognostic value of earthquake foreshocks: A meta-analysis. *Sci Rep*, **4**: 4099.
- Obara K, 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, **296**(5573): 1679~1681.
- Peng Z G, Gomberg J, 2010a. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena. *Nat Geosci*, **3**: 599~607.
- Peng Z G, Hill D P, Shelly D R, et al, 2010b. Remotely triggered microearthquakes and tremor in central California following the 2010 M_w 8.8 Chile earthquake. *Geophys Res Lett*, **37**(24): L24312.
- Peng Z G, Shelly D R, Ellsworth W L, 2015. Delayed dynamic triggering of deep tremor along the Parkfield-Cholame Section of the San Andreas Fault following the 2014 M 6.0 South Napa earthquake. *Geophys Res Lett*, **42**(19): 7916~7922.
- Peng Z G, Zhao P, 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nat Geosci*, **2**(12): 877~881.
- Perol T, Gharbi M, Denolle M, 2018. Convolutional neural network for earthquake detection and location. *Sci Adv*, **4**(2): e1700578.
- Petersen M D, Mueller C S, Moschetti M P, et al, 2016. Seismic-hazard forecast for 2016 including induced and natural earthquakes in the central and eastern United States. *Seismol Res Lett*, **87**(6): 1327~1341.
- Priolo E, Romanelli M, Plasencia Linares M P, et al, 2015. Seismic monitoring of an underground natural gas storage facility: The Collalto seismic network. *Seismol Res Lett*, **86**(1): 109~123.
- Reasenber P A, 1999. Foreshock occurrence before large earthquakes. *J Geophys Res: Solid Earth*, **104**(B3): 4755~4768.
- Rogers G, Dragert H, 2003. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip. *Science*, **300** (5627): 1942~1943.
- Ross Z E, Meier M A, Hauksson E, et al, 2018. Generalized seismic phase detection with deep learning. *Bull Seismol Soc Am*, **108** (5A): 2894~2901.

- Ross Z E, Trugman D T, Hauksson E, et al, 2019. Searching for hidden earthquakes in Southern California. *Science*, **364**(6442): 767~771.
- Ruan X, Meng X F, Peng Z G, et al, 2017. Microseismic activity in the last five months before the M_w 7.9 Wenchuan earthquake. *Bull Seismol Soc Am*, **107**(4): 1582~1592.
- Schultz R, Wang R J, Gu Y J, et al, 2017. A seismological overview of the induced earthquakes in the Duvernay play near Fox Creek, Alberta. *J Geophys Res: Solid Earth*, **122**(1): 492~505.
- Shapiro S A, Huenges E, Borm G, 1997. Estimating the crust permeability from fluid-injection-induced seismic emission at the KTB site. *Geophys J Int*, **131**(2): F15~F18.
- Shelly D R, 2010. Migrating tremors illuminate complex deformation beneath the seismogenic San Andreas Fault. *Nature*, **463**(7281): 648~652.
- 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**(4): 1971~1978.
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S, 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature*, **446**(7133): 305~307.
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S, et al, 2006. Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip. *Nature*, **442**(7099): 188~191.
- Skoumal R J, Brudzinski M R, Currie B S, et al, 2014. Optimizing multi-station earthquake template matching through re-examination of the Youngstown, Ohio, sequence. *Earth Plant Sci Lett*, **405**: 274~280.
- Stevenson P R, 1976. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana; a study using automatic earthquake processing. *Bull Seismol Soc Am*, **66**(1): 61~80.
- Sugan M, Vuan A, Kato A, et al, 2019. Seismic evidence of an early afterslip during the 2012 sequence in Emilia (Italy). *Geophys Res Lett*, **46**(2): 625~635.
- Sun J B, Yue H, Shen Z K, et al, 2018. The 2017 Jiuzhaigou earthquake: a complicated event occurred in a young fault system. *Geophys Res Lett*, **45**(5): 2230~2240.
- Trugman D T, Ross Z E, 2019. Pervasive foreshock activity across southern California. *Geophys Res Lett*, **46**(15): 8772~8781.
- Uchida N, 2019. Detection of repeating earthquakes and their application in characterizing slow fault slip. *Prog Earth Planet Sci*, **6**(1): 40.
- Uchida N, Bürgmann R, 2019. Repeating earthquakes. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **47**: 305~332.
- Wang C T, Liang C T, Deng K, et al, 2018. Spatiotemporal distribution of microearthquakes and implications around the seismic gap between the Wenchuan and Lushan earthquakes. *Tectonics*, **37**(8): 2695~2709.
- Wang R J, Gu Y J, Schultz R, et al, 2017. Source characteristics and geological implications of the January 2016 induced earthquake swarm near crooked Lake, Alberta. *Geophys J Int*, **210**(2): 979~988.
- Warren-Smith E, Chamberlain C J, Lamb S, et al, 2017. High-precision analysis of an aftershock sequence using matched-filter detection; the 4 May 2015 M_L 6 Wanaka earthquake, Southern Alps, New Zealand. *Seismol Res Lett*, **88**(4): 1065~1077.
- Wu C Q, Meng X F, Peng Z G, et al, 2014. Lack of spatiotemporal localization of foreshocks before the 1999 M_w 7.1 Duzce, Turkey, earthquake. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(1): 560~566.
- Wu J, Yao D D, Meng X F, et al, 2017. Spatial-temporal evolutions of early aftershocks following the 2013 M_w 6.6 Lushan earthquake in Sichuan, China. *Geophys Res: Solid Earth*, **122**(4): 2873~2889.
- Yang H F, Zhu L P, Chu R S, 2009. Fault-plane determination of the 18 April 2008 Mount Carmel, Illinois, earthquake by detecting and relocating aftershocks. *Bull Seismol Soc Am*, **99**(6): 3413~3420.
- Yao D D, Huang Y H, Peng Z G, et al, 2020. Detailed investigation of the foreshock sequence of the 2010 M_w 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(6): e2019JB019076.
- Yao D D, Peng Z G, Meng X F, 2015. Remotely triggered earthquakes in South-Central Tibet following the 2004 M_w 9.1 Sumatra and 2005 M_w 8.6 Nias earthquakes. *Geophys J Int*, **201**(2): 543~551.
- Yao D D, Walter J I, Meng X F, 2017. Detailed spatiotemporal evolution of microseismicity and repeating earthquakes following the 2012 M_w 7.6 Nicoya earthquake. *J Geophys Res: Solid Earth*, **122**(1): 524~542.

- Yin X Z, Chen J H, Peng Z G, 2018. Evolution and distribution of the early aftershocks following the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake in Sichuan, China. *J Geophys Res: Solid Earth*, **123**(9): 7775~7790.
- Yoon C E, O' Reilly O, Bergen K J, et al, 2015. Earthquake detection through computationally efficient similarity search. *Sci Adv*, **1**(11): e1501057.
- Yoon C E, Yoshimitsu N, Ellsworth W L, et al, 2019. Foreshocks and Mainshock Nucleation of the 1999 M_w 7.1 Hector Mine, California, Earthquake. *J Geophys Res: Solid Earth*, **124**(2): 1569~1582.
- Zhang M, Wen L X, 2015. An effective method for small event detection: Match and locate (M&L). *Geophys J Int*, **200**(3): 1523~1537.
- Zhao D Z, Qu C Y, Shan X J, et al, 2018. InSAR and GPS derived coseismic deformation and fault model of the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake in the Northeast Bayanhar block. *Tectonophysics*, **726**(B8): 86~99.
- Zhu W Q, Beroza G C, 2019. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophys J Int*, **216**(1): 261~273.

A Review on Research and Application of Microseismicity

Feng Tian Wu Jianping Fang Lihua

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract With the increasing density of seismic stations and the rapid development of earthquake detection methods, microseismic research has received extensive attention from the seismology community. Compared with strong earthquakes with longer recurrence period, small earthquakes, however, have a shorter recurrence period and a higher occurrence frequency, which can be used to obtain higher resolution information on changes in the physical properties and stress state of the crust. Small earthquakes have a wide application in many seismological studies, such as the fault geometry, the relationship between foreshocks and earthquake nucleation, the spatial-temporal evolution characteristics and triggering mechanism of aftershocks, remote dynamic triggering, repeating earthquakes, induced seismicity, and detection of non-volcanic tremors, etc. High-precision earthquake location results can reveal the precise fault geometry and the fault activity process, and therefore promote our further understanding for fault characteristics and earthquake physical process. In this paper, we briefly review some important advance in recent microseismic research, including major methods of earthquake detection and case studies of microseismicity in many fields. Lastly, we make some prospects on microseismic applications in earthquake science.

Keywords: Microseismicity; Microseismic detection; Template matching; Waveform cross-correlation; Fault geometry