

倪红玉,谭毅培,邓莉,等,2021. 2014 年金寨 M_L 3.9 震群序列遗漏地震检测及发震构造分析. 中国地震, 37(2):379~389.

2014 年金寨 M_L 3.9 震群序列遗漏地震检测 及发震构造分析

倪红玉^{1,2)} 谭毅培³⁾ 邓莉³⁾ 汪小厉^{1,2)}
鲍子文^{1,2)} 方震^{1,2)} 洪德全^{1,2)}

1)安徽省地震局,合肥 230031

2)安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站,安徽蒙城 233500

3)天津市地震局,中国地震局地震工程综合模拟与韧性抗震重点实验室,天津 300201

摘要 针对 2014 年 8 月—2015 年 1 月安徽金寨发生的 M_L 3.9 震群,利用匹配滤波技术补充台网目录遗漏的地震事件,再利用波形互相关震相检测技术标定 P 波和 S 波到时,进一步采用双差定位方法对震群进行重定位,结合震源机制解等分析此次震群活动可能的发震构造。计算结果显示,通过互相关扫描检测到 1376 个地震台网常规分析遗漏的地震,数量约为台网目录给出的 585 个事件的 2.35 倍。检测到的遗漏地震震级估算为 M_L 0~2.3,通过震级-频次统计分析,加入遗漏地震后地震目录的完整性在 M_L 0~1.5 范围内有较明显的改善。重定位后地震走时残差更小,水平位置更集中,沿 NNE 向断裂 F 和 NW 向青山-晓天断裂呈现近直立的条带状分布。结合地质构造、震源机制解和水库因素,推测 2014 年金寨 M_L 3.9 震群可能是由周边水库水下渗引起 NW 向青山-晓天断裂与 NNE 向断裂 F 慢滑动而触发的。

关键词: 匹配滤波 金寨震群 遗漏地震检测 双差定位 发震构造

[文章编号] 1001-4683(2021)02-0379-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

震群活动指在较小区域内发生的无明显主震的地震序列(Yamashita, 1998)。相对于孤立地震事件,地震序列携带的震源体及构造信息更为丰富,其震源参数的时空变化图像能够反映震源破裂过程和发震构造特征。根据其震源参数的时空变化特征,结合地质资料研究地震的破裂过程和发震构造,是地震工作者历来关注的问题之一(吕坚等, 2008; 郑勇等, 2009; 孙长虹等, 2012; 崔子健等, 2012; 谭毅培等, 2016; Ross et al, 2019; 李炎臻等, 2020; 赵明等, 2021)。

地震目录是区域地震活动性研究和地震危险性分析的重要基础资料,编目是否完整、震源参数是否精确,直接影响后续研究结果的可信性和科学性(Woessner et al, 2005; 冯建刚

[收稿日期] 2020-12-16 [修定日期] 2021-04-06

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划(XH20026)、2020 年安徽省地震科研基金(20200501)共同资助

[作者简介] 倪红玉,女,1982 年生,硕士,高级工程师,主要从事数字地震学研究和背景噪声成像工作。

E-mail: hyni@mail.ustc.edu.cn

等,2012)。震群活动时,短时间内在局部小区域发生大量地震,不同地震事件波形相互交叠,微地震震相难以清晰识别,造成地震编目遗漏一定数量的地震,给震后趋势判定和发震构造分析等工作带来一定困难。

目前常用的地震识别方法有2种:一种是基于震相拾取的方法,其中最常用的为长短时间平均法(STA/LTA)(Stevenson,1976;Earle et al,1994),此类方法在数据信噪比较高时能够可靠准确地识别震相(刘希强等,2009);另一种方法是基于波形的匹配滤波技术,其中被广泛利用的是基于互相关的模板匹配滤波技术(Schaff et al,2005;Gibbons et al,2006;Peng et al,2009),该方法基于滑动窗互相关检测技术,能有效地压制噪声干扰,在数据信噪比低时仍然能够提取微弱信号。Shelly等(2007)将波形匹配技术应用到地颤动中的低频地震检测;Peng等(2009)利用匹配滤波法,提升了2004年帕克菲尔德地震余震目录的完备性;Schaff(2010)通过对1999年岫岩5.4级地震序列的研究,指出相比于长短时窗比法,波形匹配技术将完备震级提高了1.3个震级单位;吕鹏等(2011)将波形匹配技术与双差定位结合应用在2008年汶川地震余震序列搜索工作中;郑晨等(2015)在灌县-安县断裂的精细结构研究中应用了匹配滤波法;谭毅培等(2014a,2014b,2016)将匹配滤波法应用到2013年河北蔚县小震群、2013年涿鹿微震群和2015年河北滦县震群的检测及精定位,均获得了较好的结果;Zhang等(2015)利用匹配定位法实现了对朝鲜地区小当量核爆的检测和定位;Liu等(2020)基于GPU(Graphics Processing Unit)对匹配定位技术进行加速,提高了运算速度,且在检测能力上也具有明显优势。近年来,随着地震数据量的快速增长,自动化、深度学习和人工智能技术在小震自动识别、震相挑选、震相关联和定位等方面均取得比较明显的进展(赵明等,2019;刘芳等,2020;Yang et al,2021;Ross et al,2019;Zhang et al,2020)。这些研究的共同点在于,将深度神经网络用于复杂地震波形抽象特征的自动提取,在使用大量标签数据进行监督学习之后,训练好的模型通常在一些与训练数据相似的测试数据集或研究区域具有可媲美甚至超过传统方法的效果。然而深度神经网络方法能否达到比较高的泛化能力,即是否能在训练样本以外的数据上也取得较好的效果,还有待进一步的验证。

2014年8月22日以来安徽金寨地震活动明显增强,出现震群活动,10月22日之后活动水平进一步增强,发生了多次 $M_L \geq 3.0$ 地震,最大为10月26日 $M_L 3.9$ 地震,2015年1月之后震群逐渐衰减。2014年金寨 $M_L 3.9$ 震群发生在大别山北麓,该地区断裂构造复杂(姚大全等,2006),震中附近分布NW向青山-晓天断裂、NW向梅山-龙河口断裂、NNE向商城-麻城断裂和位于震中东侧的NE向落儿岭-土地岭断裂(图1)。其中青山-晓天断裂距离震群最近,仅约2km,该断裂在震区附近被NNE向断裂F切割(邓起东等,2003),但是目前针对断裂F的研究较少。有现代仪器记载以来,震区周边从未记录到像本次震群这样频度高、持续时间长的地震序列活动,并且本次震群的震源深度浅,有感程度强,地声现象明显,造成了较大的社会影响。本文通过模板匹配滤波方法(Peng et al,2009)补充台网目录遗漏的地震事件,再利用波形互相关震相检测技术(谭毅培等,2014b)标定P波、S波到时,进一步采用双差定位方法对震群进行重定位,并结合震源机制解等分析此次震群活动可能的发震构造。

1 资料与数据

资料来源于安徽省测震台网,涉及安徽省、湖北省、河南省等11个台站在2014年8

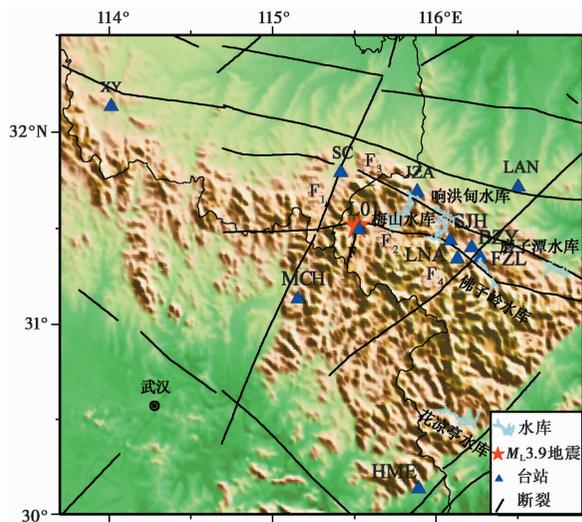


图 1 金寨震群震中位置与重定位所用的测震台站分布

F_1 : 商城-麻城断裂; F_2 : 青山-晓天断裂; F_3 : 梅山-龙河口断裂; F_4 : 落儿岭-土地岭断裂; F: 断裂 F

月—2015 年 1 月的连续地震波形记录,台站分布如图 1 所示。据安徽省测震台网地震观测报告,2014 年 8 月—2015 年 1 月金寨震群共发生 $M_L \geq 0$ 地震 585 个,其中 $M_L \geq 1.0$ 地震 364 个, $M_L \geq 2.0$ 地震 74 个, $M_L \geq 3.0$ 地震 15 个。

2 遗漏地震检测

采用模板匹配识别方法(Peng et al,2009)进行遗漏地震检测。首先选取 71 个 $M_L \geq 2.0$ 的地震事件,对连续波形和事件波形记录进行 4 阶零相位 Butterworth 滤波器 2~8Hz 滤波,根据观测报告的到时信息截取距离震中最近的 3 个台站(金寨台(JZA)、商城台(SC)和麻城台(MCH))三分量直达 S 波到时前 2s 至后 2s 的波形,挑选其中三分量平均信噪比大于 3 的作为备选波形模板,噪声能量水平由 P 波到时前 6s 至前 2s 的波形计算得到。本文共挑选出满足条件的模板地震 69 次,波形模板 207 条。在 2014 年 8 月—2015 年 1 月的连续记录波形上进行波形互相关扫描,为提高计算速度,对连续波形与模板分别经过 5 倍重采样,扫描窗长为模板长度,扫描间隔为 0.05s。对三分向互相关系数取平均,再将同一模板地震各条模板的互相关系数值相加,通过计算序列的绝对离差中位数(Median Absolute Deviation, MAD)检测遗漏地震。其中,绝对离差中位数表达式为

$$MAD = \text{median}(|X_i| - \bar{X}) \quad (1)$$

式中, X_i 为第 i 个互相关系数序列; \bar{X} 为其平均值。取 9 倍绝对离差中位数作为判别地震的阈值,挑选 MAD 大于阈值且台网目录中未记录的地震事件作为疑似遗漏地震事件,再使用原始采样率的连续波形和模板波形进行互相关扫描,若在距离震中最近的 3 个台站至少检测出一个 P 波和 S 波震相,则确认为遗漏地震。扫描得到的互相关序列中互相关系数最大值位置即为遗漏事件 P 波、S 波到时(图 2),遗漏事件的震级则利用遗漏事件水平向波形 S 波段最大振幅与模板地震的振幅比进行估计(谭毅培等,2014a、2016)。

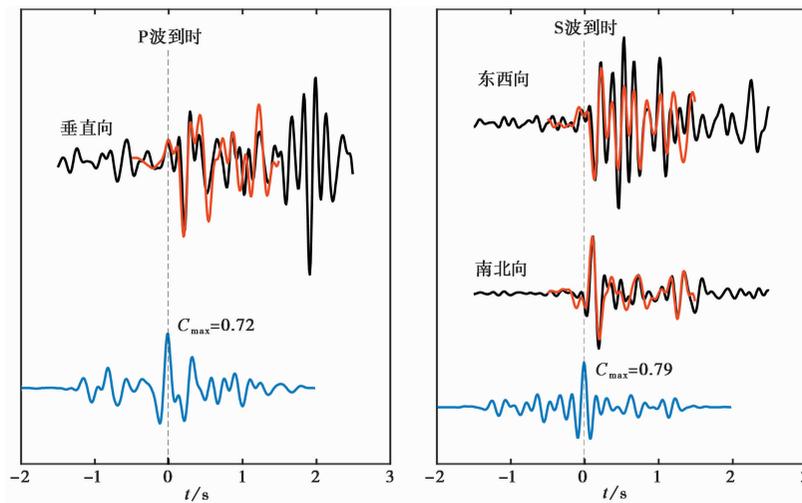


图2 利用波形互相关震相检测技术搜索遗漏地震事件P波、S波到时示意图

黑色表示连续波形;红色表示模板波形;波形模板为2014年10月26日01时26分23.6秒JZA台记录的 M_L 3.9地震;遗漏地震发震时刻为2014年10月29日23时30分32.6秒;地震波形下方蓝色曲线为波形互相关系数,并标注互相关最大值 C_{max}

对采用模板匹配识别方法得到的地震事件震级与台网目录中震级的差值进行统计,结果如图3所示,可以看出93%的震级差在-0.2~0.3内,表明本文得到的震级较为可靠。

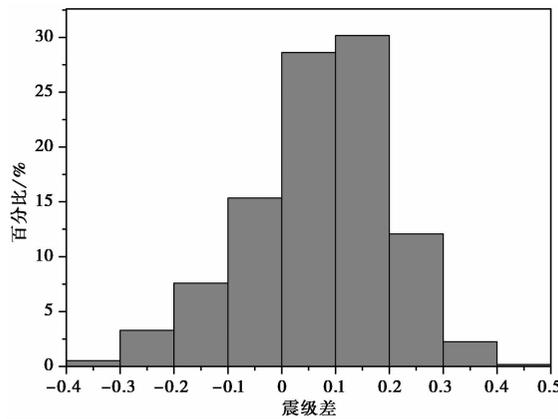


图3 采用模板匹配识别方法得到的震级与台网目录中震级的差值分布

在2014年8月—2015年1月震群活动期间,除了检测到上述台网目录中记录的地震外,共检测到目录遗漏的 $M_L \geq 0$ 地震事件1376个,约为台网目录给出的585个事件的2.35倍,其中 $M_L \geq 1.0$ 地震71个, $M_L \geq 2.0$ 地震2个,最大震级为 M_L 2.3。补充遗漏地震前后震群活动的震级-频度关系如图4所示,其中震级分组间隔取为0.5。由于仅检测到2次 $M_L \geq 2.0$ 的遗漏地震事件,因而在 $M_L \geq 2.0$ 的地震目录中没有变化,而 M_L 0~1.5之间地震目录的完整性有较明显的改善。因此,与台网目录相比,增加了遗漏地震后震级和频度的关系呈现出更好的线性特征。补充遗漏地震后,2014年8月—2015年1月金寨震群共发生

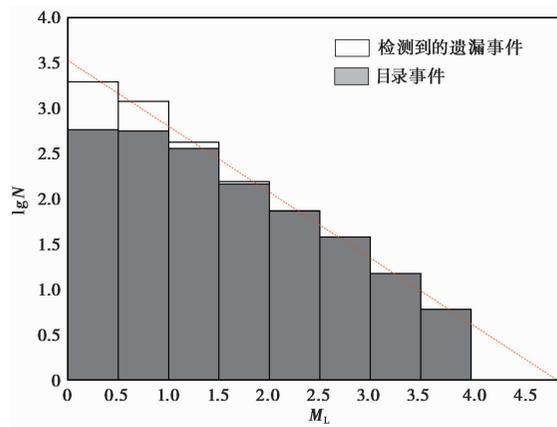


图 4 补充遗漏地震前后地震目录的震级-频度关系
 N 为 $M \geq M_L$ (对应横坐标值) 的地震事件个数

$M_L \geq 0$ 地震 1956 个, 其中 $M_L \geq 1.0$ 地震 435 个, $M_L \geq 2.0$ 地震 76 个, $M_L \geq 3.0$ 地震 15 个。震群活动期间, 台网观测目录和本文检测到的遗漏地震事件的 $M-t$ 图见图 5(a), 其中 2014 年 8 月 22 日和 10 月 28 日的 $M-t$ 图见 5(b)、5(c), 由图可见本文检测出大量的遗漏地震。

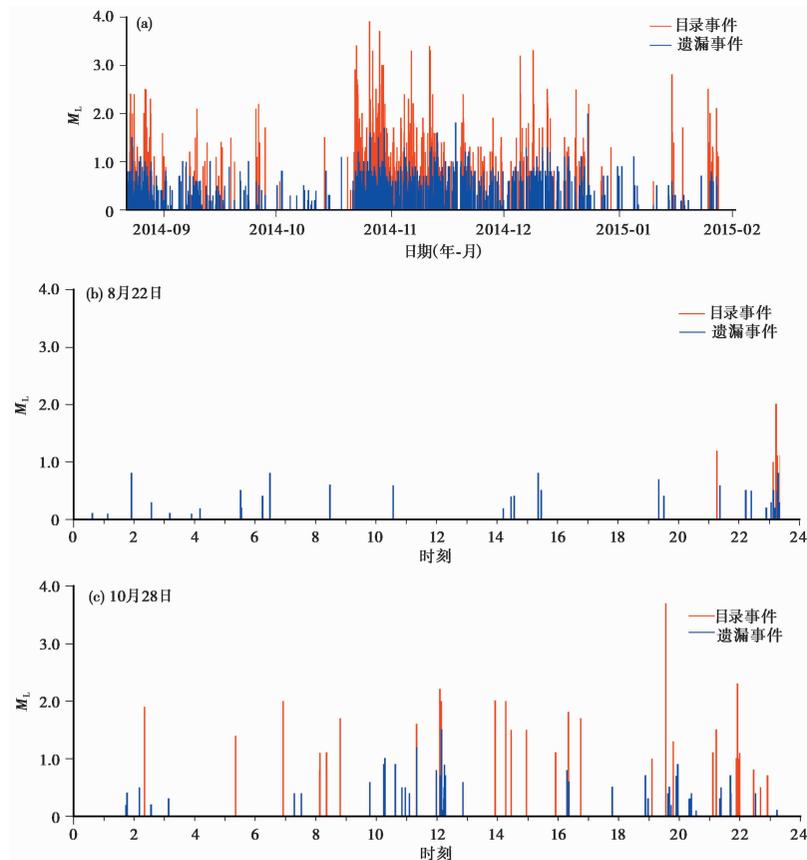


图 5 台网目录和遗漏地震的 $M-t$ 图

3 重定位与发震构造分析

3.1 重定位

区域台网提供的震相到时由人工量取得到,存在一定的误差,影响定位结果的可靠性。本文采用波形互相关震相检测技术对震相到时进行校正,可有效降低到时拾取中人工误差的影响(黄媛等,2006)。

由于金寨震群的波形相似程度较高,首先人工校核震群中最大地震的震相到时,并以此震相到时时为模板,使用波形互相关震相检测技术(谭毅培等,2014a)标定其他地震事件的震相到时。为了避免 Pn 震相的干扰,只选择震中距在 160km 以内的 11 个台站记录,其中 L01 台为 2014 年 8 月 28 日之后架设的流动台(图 1)。基于上述重新标定后的震相,采用 HypoDD 方法对包含 4 个以上台站震相到时的共计 435 次 $M_L \geq 1.0$ 地震事件进行重定位。重定位和震源机制解计算时所采用的速度结构模型,见表 1。

表 1 采用的地壳速度模型(据刘泽民等(2015))

层数	深度/km	层厚/km	P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0~2	2	4.98
2	2~5	3	5.22
3	5~10	5	5.59
4	10~15	5	6.12
5	15~20	5	6.46
6	20~25	5	6.45
7	25~33	8	7.03
8	33~40	7	8.00

在地震组对时,设最小连接数和最小观测数为 8,震源间距小于 10km,事件对到台站的距离小于 200km。经筛选最终得到符合条件的地震共 435 次,参加反演的 P 波绝对到时 4001 个,S 波绝对到时 4117 个,相对到时资料 P 波震相 20754 个,S 波 22930 个。设 P 波到时权重为 1.0,S 波到时的权重为 0.5,地震定位初始值为台网目录给出的定位位置,迭代计算时采用共轭梯度法求解方程。

台网观测报告中 364 次 $M_L \geq 1.0$ 地震事件的定位结果如图 6(a) 所示,采用 HypoDD 方法对基于波形互相关震相检测技术重新标定震相的 435 次 $M_L \geq 1.0$ 地震事件重新定位的结果如图 6(b) 所示。对比结果显示,重定位后走时差的残差大幅降低,平均定位残差由重定位前的 0.12s 减至重定位后的 0.004s;重定位后的震源深度为 4~8km,主要集中在 5~6km,相对于地震台网观测报告中的定位结果,在 5km 以上的比例大大增加;重定位后的震群序列水平位置更加集中,主要位于青山-晓天断裂的北侧、断裂 F 的东侧,震群中心点距离断裂 F 约 1.1km,距离青山-晓天断裂约 1.4km。

为分析断裂在深部的展布形态,绘制 2 条震源深度剖面,分别为垂直于青山-晓天断裂的剖面 AA'和垂直于断裂 F 的剖面 BB'。剖面 AA'显示在 6km 以上呈现出近似直立的条带状分布,而 6km 以下则呈现 25°左右的倾斜(图 7(a));剖面 BB'上的震源深度投影显示近直立的条带状分布,在 6km 以下的深部横向展布范围有所变宽(图 7(b))。

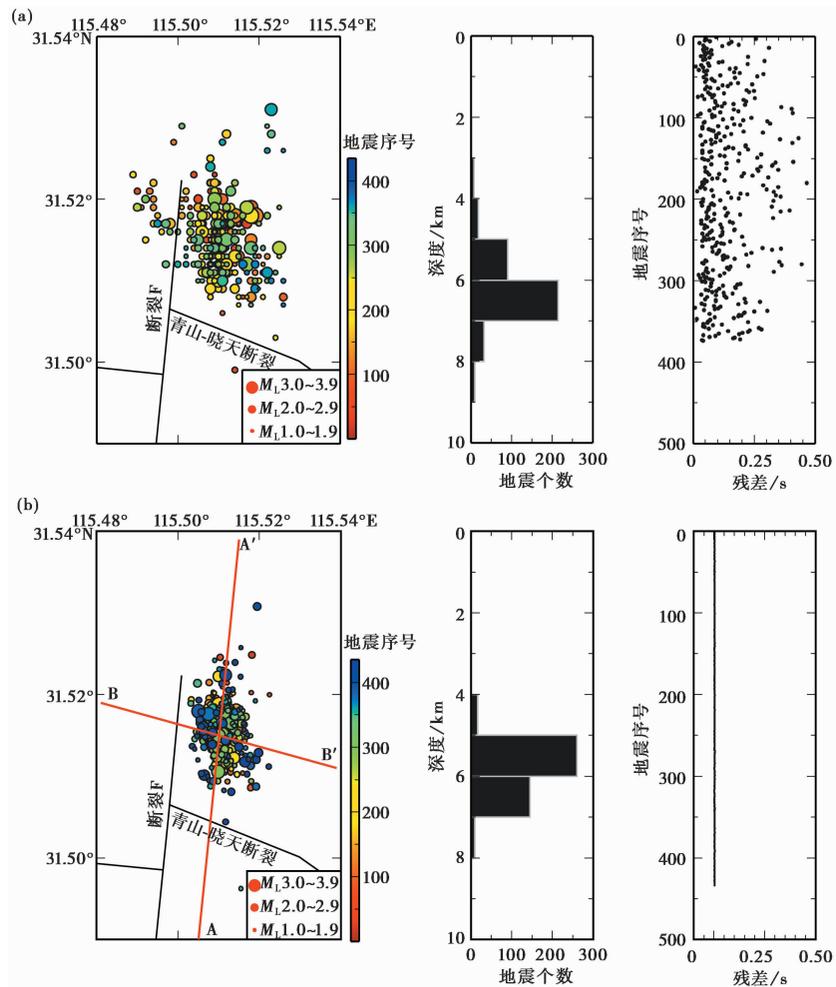


图 6 金寨震群重定位前 (a)、后 (b) 的震中、震源深度及定位残差分布

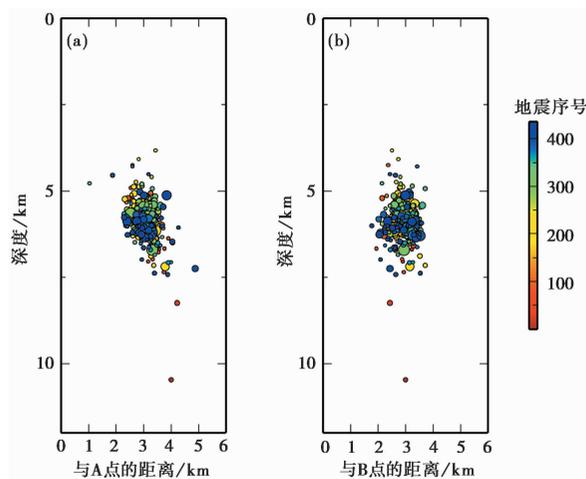


图 7 重定位后的震源在剖面 AA' 和 BB' 上的投影

3.2 发震构造分析

震源机制解揭示了地震破裂的力学特征,对研究地震孕震机理具有重要作用。Snoke 方法是一种常见的反演震源机制解的方法,该方法采用直达 P 波、SV 波和 SH 波的初动以及 SV/P、SH/P 或 SV/SH 的振幅比资料联合求解震源机制(Snoke et al,1984;Snoke,1989)。其优点是充分利用了 P 波、SV 波和 SH 波的初动以及 SV/P、SH/P 或 SV/SH 的振幅比资料,与 P 波初动法相比,约束量由 1 个增至 5 个,降低了对台站分布的要求,反演结果更加可靠。金寨震群中最大 M_L 3.9 地震的震源机制解为:节面 I 走向 125° 、倾角 79° 、滑动角 17° ;节面 II 走向 32° 、倾角 74° 、滑动角 168° ;P 轴的方位角、倾角分别为 258° 、 3° ;T 轴的方位角、倾角分别为 349° 、 20° ;N 轴的方位角、倾角分别为 158° 、 70° 。其余较大地震的震源机制解与最大地震震源机制解的一致性较好(黄显良等,2015;倪红玉等,2015)。

在震群附近有 NW 向的青山-晓天断裂,邓起东等(2003)给出的 1:50 万活动断裂构造图显示该断裂在震区附近被 NNE 向断裂 F 切割,但是针对断裂 F 的研究较少。重新定位结果显示,金寨震群位于青山-晓天断裂的北侧、断裂 F 的东侧,沿 NNE 向和 NWW 向呈现近直立的条带状分布。震源机制解结果表明金寨震群两组节面的走向分别呈 NWW 向和 NNE 向,倾角均较高,但是无法区分哪个节面为发震断层面。因此,金寨震群可能是 NW 向青山-晓天断裂与 NNE 向断裂 F 在交汇区域共同作用的结果,同时也表明在区域构造应力场的作用下,这 2 条断裂有活动的迹象。

金寨震群周边存在 4 个建于 20 世纪的大型水库(图 1)以及 2 座小型水电站(分别为 2007 年建成的黄谷滩电站(库容约 100 万 m^3)和 2012 年建成的关庙电站(库容约 400 万 m^3))(黄显良等,2015)。汪小厉等(2017)利用 sPL 深度震相计算得到震群序列中较大地震的震源深度分布在 $3\sim 4.2$ km 范围,相对较浅。因此,金寨震群具有震源深度浅、发震时间紧密、空间丛集以及震区距离库区较近等特点,推测金寨震群可能与周边水库水下渗有关。综合重新定位、震源机制解和水库影响分析等结果,认为 2014 年金寨 M_L 3.9 震群可能是由流体渗透引起 NW 青山-晓天断裂与 NNE 向断裂 F 慢滑动而触发的。

4 讨论与结论

本文利用匹配滤波技术对 2014 年 8 月—2015 年 1 月的金寨 M_L 3.9 震群中台网目录遗漏的地震进行了检测拾取,通过检测发现了 1376 次遗漏地震事件,并给出其震中位置和震级估计结果。通过对比地震台网目录给出的参数,认为本文对遗漏地震事件的震级估计基本可靠。震级-频次统计分析表明加入遗漏事件后,地震目录的完整性在 M_L 0~1.5 范围内有较为明显的改善。

在利用三分量波形互相关检测遗漏地震后,进一步使用波形互相关标定遗漏事件的 P 波、S 波到时,并采用双差定位方法对震群进行重定位,重定位后走时残差更小,水平位置更加集中,沿 NNE 向的断裂 F 和 NW 向的青山-晓天断裂呈现近直立的条带状分布,结合地质构造和震源机制解,推测金寨震群可能是 NW 青山-晓天断裂与 NNE 向断裂 F 在交汇区域共同作用的结果。同时,根据震群震源深度浅、扩展系数较小及时间丛集、空间紧密等特征,推测金寨震群可能与周边水库水下渗有关。综合重新定位、震源机制解和水库影响分析等结果,认为 2014 年金寨 M_L 3.9 震群可能是由周边水库水下渗引起 NW 向青山-晓天断裂与

NNE 向断裂 F 慢滑动而触发的。

利用匹配滤波技术拾取微震震群遗漏事件,能够改善震群目录的完整性,为进一步利用震群目录开展深入研究工作提供基础。与人工识别地震信号相比,匹配滤波技术能够有效抑制背景噪声、降低地震面波和振荡等造成的低频信号干扰,从而检测出较多的遗漏事件。同时,需要注意的是,由于存在波形信噪比较低的微震,以及不与任何模板地震波形高度互相关的地震,故匹配滤波方法也难以检测到全部的遗漏地震事件(谭毅培等,2014b),这是匹配滤波方法的不足之处。

在研究中强地震余震序列的遗漏地震时,前人多将模板地震震中位置直接置于遗漏地震震中(Peng et al,2007、2009),该方法简单易行,但遗漏地震的加入对地震序列空间分布没有任何影响,因此无法对发震构造分析等后续研究做出贡献。本文所用方法的一个显著特点是在利用三分量波形互相关检测遗漏地震后,进一步采用震相波形互相关对遗漏事件进行重定位,使得遗漏地震的拾取对发震构造的推测和分析工作起到了积极作用。

参考文献

- 崔子健,李志雄,陈章立,等,2012. 判别小震群序列类型的新方法研究——谱振幅相关分析法. 地球物理学报, **55**(5): 1718~1724.
- 邓起东,徐锡伟,张先康,等,2003. 城市活动断裂探测的方法和技术. 地学前缘, **10**(1): 93~104.
- 冯建刚,蒋长胜,韩立波,等,2012. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析. 地震学报, **34**(5): 646~658.
- 黄显良,刘泽民,郁建芳,等,2015. 2014 年金寨 $M_L 3.9$ 震群序列震源一致性研究. 地震学报, **37**(6): 916~924.
- 黄媛,杨建思,张天中,2006. 2003 年新疆巴楚-伽师地震序列的双差法重新定位研究. 地球物理学报, **49**(1): 162~169.
- 李炎臻,李红谊,张力方,等,2020. 基于模板匹配定位法的江苏盐城附近微震检测和构造分析. 中国地震, **36**(3): 581~593.
- 刘芳,蒋一然,宁杰远,等,2020. 结合台阵策略的震相拾取深度学习方法. 科学通报, **65**(11): 1016~1026.
- 刘希强,周彦文,曲均浩,等,2009. 应用单台垂向记录进行区域地震事件实时检测和直达 P 波初动自动识别. 地震学报, **31**(3): 260~271.
- 刘泽民,黄显良,倪红玉,等,2015. 2014 年 4 月 20 日霍山 $M_s 4.3$ 地震发震构造研究. 地震学报, **37**(3): 402~410.
- 吕坚,郑勇,倪四道,等,2008. 2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌 $M_s 5.7$ 、 $M_s 4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究. 地球物理学报, **51**(1): 158~164.
- 吕鹏,丁志峰,朱露培,2011. 结合波形互相关的双差定位方法在 2008 年汶川地震余震序列中的应用. 地震学报, **33**(4): 407~419.
- 倪红玉,沈小七,洪德全,等,2015. 2014 年金寨 $M_L 3.9$ 震群序列特征研究. 地震学报, **37**(6): 925~936.
- 孙长虹,许丰,杨玉波,等,2012. 2003 年青海德令哈 6.7 级地震序列的震源机制解及其构造含义. 地球物理学报, **55**(10): 3338~3346.
- 谭毅培,曹井泉,卞真付,等,2014a. 2013 年 8 月河北蔚县小震群遗漏地震检测与发震构造分析. 地震学报, **36**(6): 1022~1031.
- 谭毅培,曹井泉,刘文兵,等,2014b. 2013 年 3 月涿鹿微震群遗漏地震事件检测和发震构造分析. 地球物理学报, **57**(6): 1847~1856.
- 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.
- 汪小厉,李玲利,杨源源,2017. 金寨震群震源深度确定及成因初步分析. 中国地震, **33**(2): 269~279.
- 姚大全,张杰,沈小七,2006. 安徽霍山地区断层活动习性研究的新进展. 地球物理学进展, **21**(3): 776~782.
- 赵明,陈石,房立华,等,2019. 基于 U 形卷积神经网络的震相识别与到时拾取方法研究. 地球物理学报, **62**(8): 3034~3042.

- 赵明,唐淋,陈石,等,2021. 基于深度学习到时拾取自动构建长宁地震前震目录. 地球物理学报, **64**(1):54~66.
- 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.
- 郑勇,马宏生,吕坚,等,2009. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系. 中国科学:(D辑), **39**(4):413~426.
- Earle P S, Shearer P M, 1994. Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm. *Bull Seismol Soc Amer*, **84**(2):366~376.
- 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.
- 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**(2A):1019~1029.
- Peng Z G, Vidale J E, Ishii M, et al, 2007. Seismicity rate immediately before and after main shock rupture from high-frequency waveforms in Japan. *J Geophys Res*, **112**(B3):B03306.
- Peng Z G, Zhao P, 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nat Geosci*, **2**(12):877~881.
- Ross Z E, Trugman D T, Hauksson E, et al. 2019. Searching for hidden earthquakes in southern California. *Science*, **364**(6442):767~771.
- Schaff D P, 2010. Improvements to detection capability by cross-correlating for similar events; a case study of the 1999 Xiuyan, China, sequence and synthetic sensitivity tests. *Geophys J Int*, **180**(2):829~846.
- Schaff D P, Waldhauser F, 2005. Waveform cross-correlation-based differential travel-time measurements at the northern California Seismic Network. *Bull Seismol Soc Amer*, **95**(6):2446~2461.
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S, 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature*, **446**(7133):305~307.
- Snoke J A, Munsey J W, Teague A G, et al, 1984. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data. *Earthquake Notes*, **55**(3):15~20.
- Snoke J A, 1989. Earthquake mechanism, James D E, *Encyclopedia of Geophysics*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 239~245.
- Stevenson P R, 1976. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana; a study using automatic earthquake processing. *Bull Seismol Soc Amer*, **66**(1):61~80.
- Woessner J, Wiemer S, 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues; estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bull Seismol Soc Amer*, **95**(2):684~698.
- Yamashita T, 1998. Simulation of seismicity due to fluid migration in a fault zone. *Geophys J Int*, **132**(3):674~686.
- Yang S B, Hu J, Zhang H J, et al, 2021. Simultaneous earthquake detection on multiple stations via a convolutional neural network. *Seismol Res Lett*, **92**(1):246~260.
- 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.
- Zhang X, Zhang J, Yuan C C, et al, 2020. Locating induced earthquakes with a network of seismic stations in Oklahoma via a deep learning method. *Sci Rep*, **10**(1):1941.

Missed Earthquake Detection and Seismogenic Structure Analysis of the Jinzhai M_L 3.9 Earthquake Swarm Sequence in 2014

Ni Hongyu^{1,2)} Tan Yipei³⁾ Deng Li³⁾ Wang Xiaoli^{1,2)} Bao Ziwen^{1,2)}
Fang Zhen^{1,2)} Hong Dequan^{1,2)}

1) Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China

2) Mengcheng National Geophysical Observatory, Mengcheng 233500, Anhui, China

3) Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of CEA, Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China

Abstract We herein used matched filter technique to supplement missing earthquakes from seismic network catalogue in Anhui Jinzhai M_L 3.9 earthquake swarm occurred during August 2014 to January 2015, then we determined P and S wave arrival times using seismic phase detection technology based on waveform cross correlation method, and further used the double-difference location method to reposition the earthquake swarm. Combined with the source mechanism solution, the possible seismogenic structure was analyzed. The results show that 1376 missing earthquakes are detected by cross-correlation scanning, which is about 2.35 times of the 585 events given in seismic network catalogue. The magnitude of detected events is from M_L 0 to M_L 2.3. By magnitude-frequency analysis the catalog completeness is obviously improved in the range M_L 0 to M_L 1.5. The relocation result of the newly detected and catalogue listed events shows that the RMS of travel times becomes smaller, the horizontal position becomes more concentrated, showing a nearly erect strip distribution along the NNE-trending fault F and the NW-trending fault Qingshan-Xiaotian. We suggest that the 2014 Jinzhai M_L 3.9 earthquake swarm may be triggered by the slow sliding on both fault F and the fault Qingshan-Xiaotian which caused by the infiltration of the surrounding reservoir water.

Keywords: Matched filter; Jinzhai earthquake swarm; Missed earthquake detection; Double-difference algorithm; Seismogenic structure