

王鹏、侯金欣、吴朋, 2017, 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震序列活动特征分析, 中国地震, 33(4), 453~462。

2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震 序列活动特征分析

王鹏^{1,2)} 侯金欣²⁾ 吴朋³⁾

1) 山东省地震局, 济南市历城区港西路 2066 号 250102

2) 中国地震局地球物理研究所, 北京市海淀区民族大学南路 5 号 100081

3) 四川省地震局, 成都 610041

摘要 中强地震序列的主震发生后, 短时间内受台站距震中较远、尾波干扰和波形重叠等因素的影响, 往往会遗漏大量的地震, 而地震目录的完整性会直接影响到震后趋势判定和余震序列特征分析的科学性和可靠性。本文利用基于 GPU 加速的模板匹配方法对 2017 年 8 月 1~12 日的连续波形进行扫描计算, 检测九寨沟 M_s 7.0 地震前后遗漏的地震事件, 选取台网目录中信噪比较高的 1033 个地震事件作为模板, 在主震前 7 天至震后 5 天期间识别出 4854 个检测地震事件, 为台网可定位目录的 3.3 倍, 除去对台网单台地震事件的修正外, 还检测到 1797 个遗漏地震事件, 将完备震级从 1.6 级降低到 1.4 级。基于补充了遗漏地震的完整地震目录, 对 2017 年 8 月 8 日九寨沟 M_s 7.0 地震序列活动特征进行分析。结果表明, 前震序列在主震前短时间内出现了地震活动的密集增强, b 值也显示为低值状态, 可能是深部断层发生破裂之前的加速蠕动的结果。随着时间的推移, 余震序列的完备震级逐渐下降并趋于稳定, b 值存在缓慢升高的趋势, 未来较长时期内余震序列仍将处于持续衰减的状态。

关键词: 九寨沟 M_s 7.0 地震 模板匹配 遗漏地震检测 完备震级 b 值

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0453-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分, 四川省阿坝州九寨沟县发生 M_s 7.0 地震, 震源深度 20km。此次地震是继 2008 年汶川 M_s 8.0 地震和 2013 年芦山 M_s 7.0 地震之后在青藏高原东部边缘发生的又一次破坏性地震, 地震波及到四川、甘肃、青海、宁夏、陕西等省份, 共造成 24 人死亡, 近 500 人受伤(郭安宁等, 2017)。地震发生在东昆仑断裂带东端、构造转换地区、呈帚状分叉的次级走滑树正断裂带上, 向南东为雄黄山隆起区, 其边界断裂为岷江断裂、塔藏断裂、雪山断裂和虎牙断裂等(袁道阳等, 2016)。此次地震为走滑型地震(USGS), 发震断层——树正断裂位于岷江断裂带与塔藏断裂中间, 地震时断层向两端破裂扩展, 北段向塔藏断裂方

[收稿日期] 2017-10-26; [修定日期] 2017-12-28

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划(XH18026Y)、山东省重点研发计划(2016GSF120011)、山东省自然科学基金(ZR2017QD014)和山东省地震局重点基金(JJ1704Y)共同资助

[作者简介] 王鹏, 男, 1983 年生, 高级工程师, 主要从事地震活动性和震源参数的研究。E-mail: wangpengeq@163.com

向扩展,南段与虎牙断裂贯通。该区历史上地震活动较为活跃,震中附近 200km 范围内共发生 26 次 5 级以上地震(高曙德等,2017)。

当一次强震发生后,人们最关心的问题莫过于震后是否还会有强余震或者更大的破坏性地震发生。对余震序列衰减特征以及早期序列参数特征的研究一直是地震学和地球物理学研究的热点问题(蒋海昆等,2007)。余震序列衰减特征研究是震后趋势判定、强余震预测和发震构造分析等研究的重要组成部分,对于理解主震发震过程、分析地震危险性和抗震救灾等工作具有重要作用(宋金等,2009)。余震序列的衰减特征和激发余震的能力可通过序列的统计参数来表征,由于震源区的孕震条件和物理状态的不同,不同的构造区域、序列类型、主震的震源机制类型、震源区局部构造应力水平及大地热流等地球物理特征都会有不同的序列参数特征(Kagan et al,2010)。因此,深入分析强震的余震序列活动特征具有重要的意义。

余震序列活动特征主要包括序列时间演化、空间展布及强度分布特征等 3 个方面。其中,序列时间演化,一方面可基于 b 值、 h 值、 k 值等序列活动参数判定早期发展趋势(刘正荣等,1986;刘正荣,1984;朱传镇等,1989;吴开统等,1996;马玉虎等,2012;宋春燕等,2014);另一方面可采用具有一定物理背景统计模型,如修正的大森公式(Utzu,1961、1965;谭毅培等,2015a、2015b)、ETAS 模型(Ogata,1988、1989、2001;蒋海昆等,2007;蒋长胜等,2013)以及 BASS 模型(Sheherbakov et al,2004;Turcotte et al,2007)等来判定。

地震目录是研究余震序列衰减的基础资料,目录的完整性直接关系着研究结果的科学性和可信性。强震发生后短时间内往往伴随着大量的余震事件,其地震波形受主震和强余震的尾波干扰,波形相互叠加,一些地震事件的震相难以清晰识别,因此,测震台网的地震目录往往会遗漏大量的地震事件。研究显示,主震后短时间内遗漏的余震可达到地震目录给出余震数量的数倍甚至十几倍(Peng et al,2007、2009;Lengliné et al,2012;谭毅培等,2015c),如此大量的遗漏地震势必会影响余震序列地震目录的完整性,进而影响以地震目录为基础的地震活动性、发震构造和发震机理等研究的可靠性。

基于波形互相关的模板匹配技术近期发展迅速且应用广泛。Gibbons 等(2006)证实了模板匹配方法在微震检测方面更有优势;Shelly 等(2007)研究了非火山地脉动与低频地震间的关系;Schaff(2008)及 Schaff 等(2010)进一步证实了在地震监测中模板匹配方法的识别能力;Peng 等(2009)完备了 2004 年 Parkfield 地震的余震目录并分析了余震的迁移特征;Yang 等(2009)确认了 2008 年 Illinois Monut Carmel M_w 5.8 地震的断层面;Meng 等(2013)发现了 2003 年 San Simeon $M6.5$ 地震之后 Parkfield 地区的地震活动性与静剪切应力间的对应关系;谭毅培等(2016)研究了滦县震群的发震构造;马腾飞(2015)研究了 2008 年汶川地震序列中的“重复地震”;Zhang 等(2015)实现了对朝鲜地区多次核爆位置的精确检测。虽然模板匹配技术已成功应用在地震学研究的多个领域,但由于其计算量过于庞大,传统的 CPU 计算会花费大量的时间,Meng 等(2012)利用 GPU 并行计算实现了模板匹配技术算法加速,并完备了 2010 年 Mayor-Cucapah M_w 7.2 地震之后 Salton Sea 地区的地震目录。

本文利用基于 GPU 加速的模板匹配技术来检测九寨沟 M_s 7.0 地震前后的遗漏地震,再基于补充遗漏地震后的完备地震目录,利用 b 值和 M_c 值对地震序列的时间演化特征进行分析。

1 遗漏地震检测

强震序列震后短时间内波形相互交叠,不易标识,容易造成大量余震的缺失。研究表明,西南地区的强震序列在震后 5 天以内衰减的能量最为显著,此后,激发次级余震的能力明显减弱(郭路杰等,2014)。2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M_s7.0$ 地震发生之前,仅在 8 月 7 日发生 1 次 1.5 级地震,前震序列偏少。因此,为了考察完整的地震序列的活动特征,本研究选取了主震前 7 天和主震后 5 天的连续波形进行分析计算,所用数据为地震序列周边的九寨沟台(JZG)、若尔盖台(REG)、松潘台(SPA)、平武台(PWU)、舟曲台(ZHQ)和文县台(WXT)等 6 个固定台站记录的三分量连续波形(图 1),数据采样率为 100Hz。

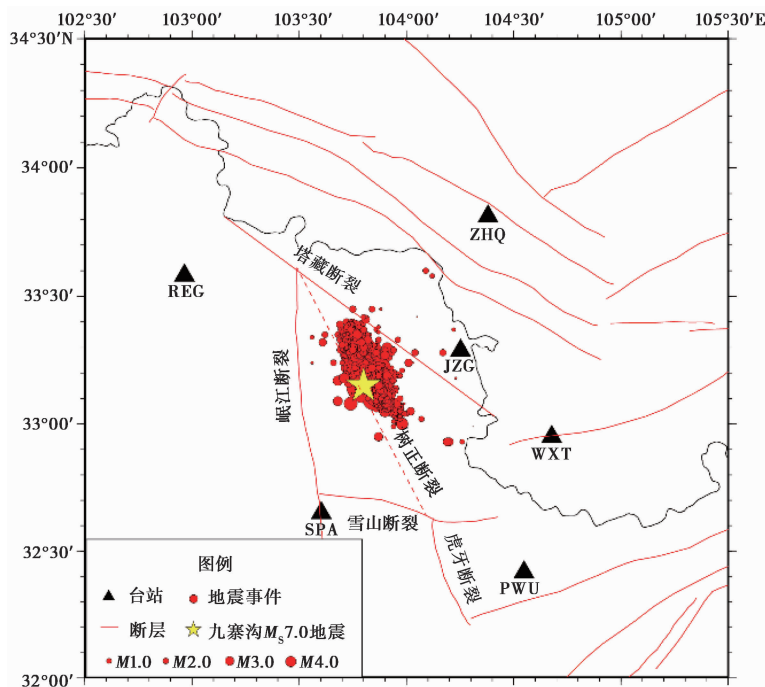


图 1 台网目录地震和台站分布

模板匹配技术是在滑动窗互相关(sliding-window cross-correlation, SCC)检测技术的基础上发展起来的(Yang et al, 2009),是在低信噪比和稀疏台网情况下提取信号的一种有效方法。模板匹配技术是以已知的震相清晰的地震事件作为模板,利用波形相关性,扫描连续波形数据,寻找与模板事件波形相似度高的一段连续波形作为新检测事件,以实现遗漏地震的自动识别和检测。

利用研究时段内台网记录到的 1336 个 $M_L \geq 0$ 地震事件作为候选模板,其中,最大震级为 $M_s7.0$ 。对数据进行去均值、去线性趋势等预处理后,采用 2~12Hz 的 Butterworth 带通滤波器滤波;利用震相报告中的 P、S 波到时计算模板事件的信噪比,舍弃信噪比小于 5 的模板事件,最终选取了满足条件的 1033 个地震事件作为模板。利用 P 波、S 波到时的前 1~5s 作为扫描窗长,分别与被检测连续波形的垂直分量和水平分量作互相关计算

$$CC = \frac{\sum_{t_0}^{t_1} \{ [x(t) - \bar{x}] \times [y(t) - \bar{y}] \}}{\sqrt{\sum_{t_0}^{t_1} \{ [x(t) - \bar{x}]^2 \times [y(t) - \bar{y}]^2 \}}} \quad (1)$$

其中, \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的均值; t_0 、 t_1 为扫描时窗的开始、结束时间; CC 为互相关系数 (cross-correlation coefficient, CC)。

将各台站垂直、水平分量的 CC 值所对应的时间分别减去模板对应的 P、S 波到时与连续波形起始时间之差, 将各台站、各分量的互相关系数序列进行偏移后的叠加处理, 最后, 除以所用分量的有效个数来计算平均 CC 值, 得到平均互相关系数波列。同时, 计算 CC 值波列的绝对离差中位数 (median absolute deviation, MAD), 若平均 CC 值大于其阈值, 则判定为 1 次地震事件。本文采用 12 倍 MAD 作为阈值 (Peng et al, 2009; 谭毅培等, 2014; 侯金欣等, 2017), 考虑到采样率为 100Hz 时, 0.01s 的移动扫描间距会造成大量的误检测事件, 因此, 取 2s 内相关系数最大的地震为检测事件。

基于模板匹配方法的假设, 检测事件与模板事件具有相同的走时, 由此得到检测事件的时间。检测事件的震级可以通过检测事件与其对应的模板事件在各台站的水平分量上 S 波到时前 2s 至后 2s 内的最大振幅比的平均值求得 (图 2)。

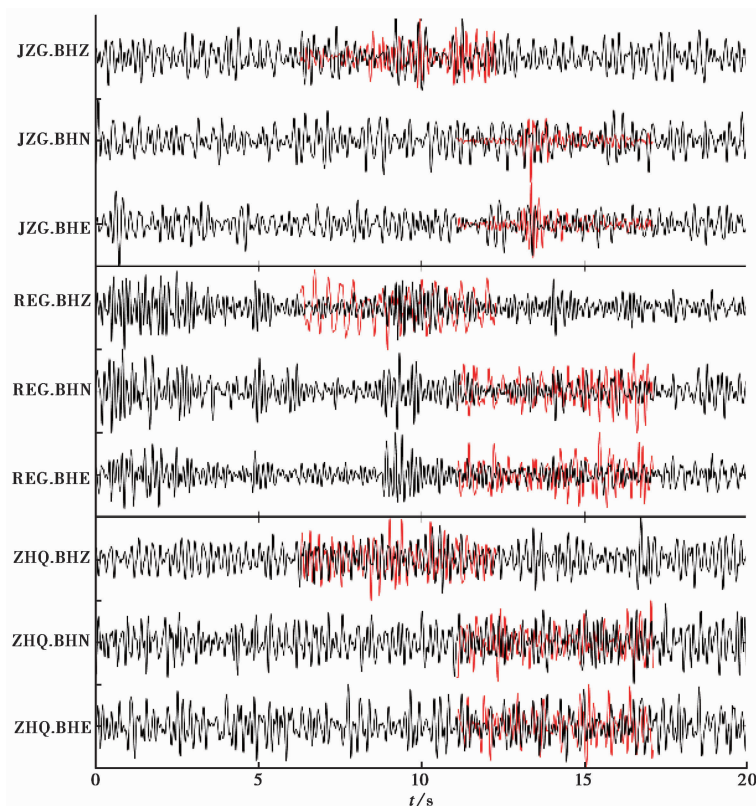


图 2 模板匹配方法检测遗漏地震示例

红色为模板事件波形; 黑色为连续波形; 检测到的事件为 2017 年 8 月 7 日 22:44:11 M_L 2.4 地震

通过计算,共检测到九寨沟地震序列 2017 年 8 月 1~12 日间的 5887 个地震事件,其中,包括 1033 个模板事件的自检测,因此,共 4854 个检测事件。中国地震台网中心的地震目录共记录到地震事件 3057 个,其中,可定位地震事件 1460 个,单台事件 1597 个。由此可见,本文的检测事件个数为台网可定位地震个数的 3 倍多,共检测到 1797 个遗漏地震事件,该数量远大于可定位地震和单台事件的数量。单台事件为震后仅在震中距最近的 1 个台站能检测到 P、S 波震相的地震事件,多出现在主震发生后较短的时间内,是受强震后续震相干扰、余震波形相互重叠等因素的影响,因记录的余震波形信噪比较低而造成的。此次地震序列的单台事件数略大于可定位事件数,约占台网目录的 52.2%,与谭毅培对岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震序列主震后 1h 内单台事件所占的比例一致(谭毅培等,2015b)。单台事件震中缺失且震级可靠性较差,而检测事件是基于多个台站检测到的地震事件,对震级的估计更为准确,因此,基于补充了遗漏地震的地震目录对地震序列的活动特征进行分析具有更强的科学性和可靠性。

将检测到的遗漏地震补充到台网目录中(台网目录截至 2017 年 9 月 30 日),得到更加完整的地震序列目录,这使得 8 月 8 日主震之前的前震序列更加丰富完整,而不仅是台网目录中记录的 1 次地震(图 3)。从前震序列的演化可见,8 月 1 日以来存在着地震活动的平静—增强过程,特别是主震前地震活动短时间内的增强,可能是应力的积累导致震源区发生微小破裂所致,这一阶段可能是深部更大的断层发生破裂之前加速蠕动的临震阶段(牛志仁,1978)。同时,主震后 5 天内的余震序列目录也更加完整,主要体现在 0.0~1.0 级震级档的补充,遗漏地震事件大多集中在这一震级区间内(图 3),而从震后 5 天以后的台网目录记录地震的分布可见,0.0~1.0 级震级区间的地震较震后 5 天内的数量明显增多,台网目录的完整性较好,因此,仅对震后 5 天作了遗漏地震检测。从补充后的整个地震序列来看,震级主要集中在 1.0~2.0 级区间内,地震频次的统计也呈现较好的正态分布。

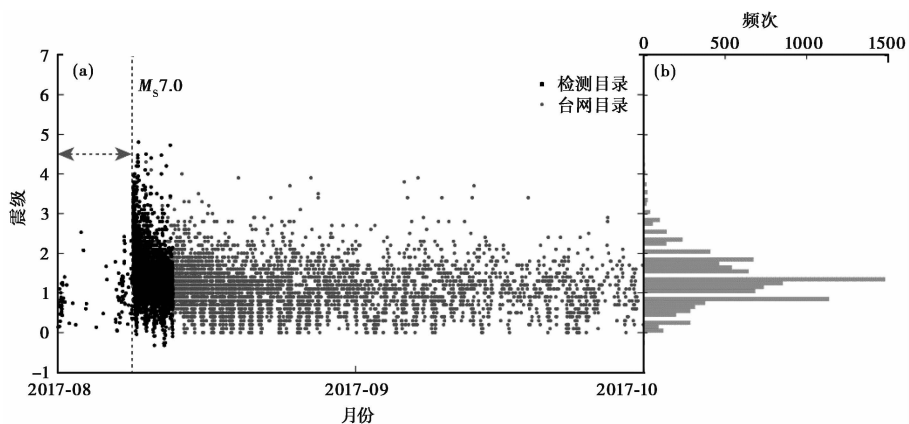


图 3 地震序列震级-时间(a)和震级-频度(b)分布

2 地震目录完备性分析

地震目录是进行地震活动性分析、活动构造研究、地震预测与地震危险性评估的重要基础资料(徐伟进等,2014),而地震目录的质量则依赖于研究区域地震台网的检测能力。完备

震级 M_c 是国际上普遍采用的评估地震台网检测能力的定量标准,通常被定义为在一个时空范围内,地震能被台网 100% 监测到的最小震级 (Rydelek et al, 1989)。假设地震的发生是自相似过程,则观测到的地震累积发生频率应满足 G-R 定律。在震级较大处,地震发生频率偏离线性 G-R 定律,其原因可能是因大地震数目太少而引起的随机波动或特征地震现象 (黄亦磊等, 2016)。而小震级处的偏离,则被解释为台网监测能力的不足造成震级小于完备震级的地震事件可能未被台网监测而在地震台网目录中被遗漏,导致地震目录的不完备,从而影响到基于地震目录的相关研究结果的可靠性 (李智超等, 2014)。而通过检测遗漏地震来补充地震台网目录,则会使得地震目录更加完备 (Schaff, 2008), 更有利于提高分析结果的科学性和可靠性。

本文利用最大曲率法 MAXC (The Maximum Curvature technique) (Wiemer et al, 2000) 和拟合优度测试法 GFT (The Goodness of Fit Test) (Wiemer et al, 2000) 分析地震序列的完备震级,其中,最大曲率法选取震级-频率曲线中斜率最大值所对应的震级作为 M_c 。在实际中,这个震级往往对应非累积震级-频率分布中拥有最多地震数目的震级。而拟合优度法则是通过计算不同假定起始震级与 G-R 关系间的拟合情况来确定起始震级的方法。

通过最大曲率法对 8 月 1~12 日的检测目录和台网目录进行分析 (图 4)。由图 4 可见,检测目录的频次明显大于台网目录,但非累计频次与震级的关系均显示 2 种目录在 1.2 级处记录的地震频次最高,因此,完备震级都是 1.2 级。利用最大似然法对累计频度与震级的拟合发现,完备震级也相差不大,检测目录为 1.2 级,台网目录为 1.3 级。检测目录拟合得到的 b 值为 0.8558, 略高于台网目录的 0.7682 (图 4)。由于拟合优度法对于每一个震级下限都采用最似然估计计算,因此,在处理台网探测地震能力随震级变化较快和有不均匀性的地震目录时更加有优势。在拟合优度测试法的结果中,检测目录的完备震级为 1.4 级,小于台网目录的 1.6 级 (图 5)。研究表明,主震后短时间内记录的单台事件给出的震级明显偏低 (谭毅培等, 2005b)。2 种目录的完备震级相差不大,可能是因为大量单台事件的加入使得台网目录在小震级区间内的地震数增多,使得完备震级被低估。

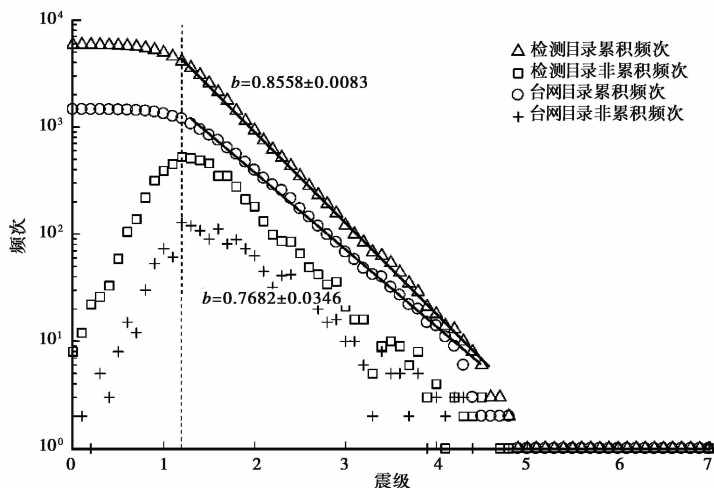


图 4 2017 年 8 月 1~12 日 2 种不同目录频次及 b 值对比

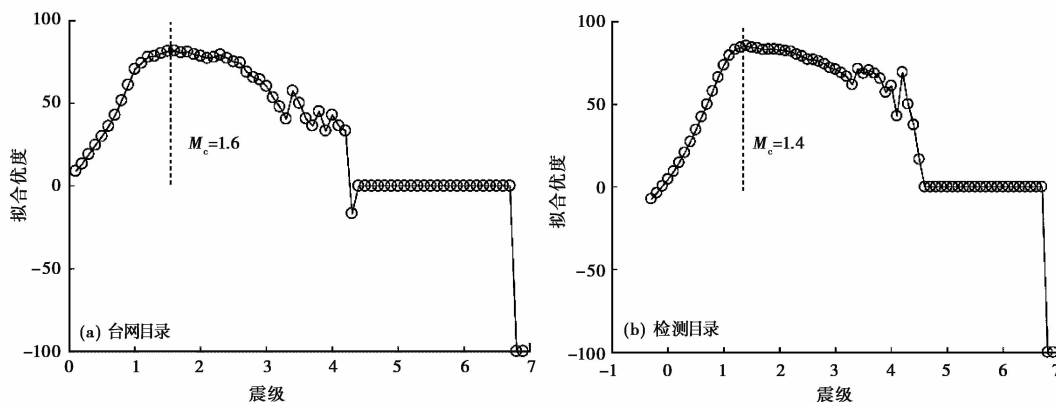


图 5 拟合优度测试法计算的 2 种目录的完备震级

3 序列活动特征分析

基于补充了遗漏地震的完整地震目录(截至 2017 年 9 月 30 日),以天为单位,逐渐增大统计时窗,分别利用拟合优度法和最大似然法计算统计时段的完备震级和 b 值,分析余震序列的完备震级和 b 值随时间的演化特征。主震发生后短时间内的完备震级较高,出现 3.5 级的突跳,这可能与主震尾波的严重干扰有关,随着时间的推移,完备震级缓慢降低并趋于稳定,在 1.2 级左右波动,且呈现准周期的波动(图 6),这可能与晚间噪声水平较低有关(侯金欣等,2017)。

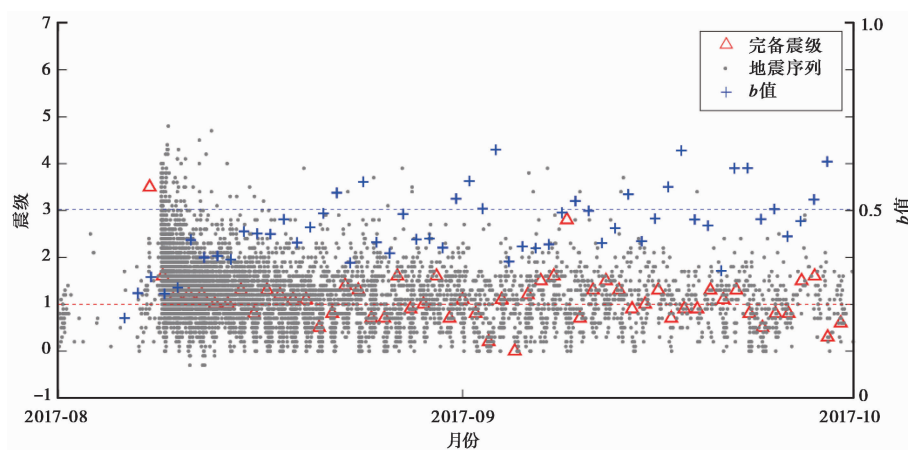


图 6 地震序列完备震级和 b 值随时间的演化

研究表明, b 值与研究区域的应力状态(Chan et al, 2012; 易桂喜等, 2011)等因素有关,序列的低 b 值反映了震源区的高应力状态。主震前的低 b 值反映了震源区应力积累到了较高的水平,伴随着主震前地震的密集增强后而发震,此时可能正处于主震前应力加速释放的临震阶段。主震发生后,随着震源区应力的释放, b 值快速升高,8 月 15 日以后逐渐平缓,在 0.5 左右波动,并仍有缓慢升高的趋势(图 6),表明余震序列的衰减过程减缓,而该区的背景 b 值为 1.0 左右(易桂喜等, 2011),说明余震序列仍会在未来较长一段时间内处于衰减的

状态。

4 讨论与结论

本文利用模板匹配技术,结合 GPU 并行运算加速,识别了 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M_s7.0$ 地震序列在主震前 7 天和震后 5 天的遗漏地震,检测地震事件数量是台网可定位地震事件的 3 倍多,将余震的完备震级从 1.6 下降到 1.4 级,并基于补充了遗漏地震的完整地震目录,分析了余震序列的活动特征。

以九寨沟 $M_s7.0$ 地震为中心,对半径为 100km 的范围进行统计,2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震后地震活动开始明显增强,尤其是 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震以来地震活动进一步增强,一直处于较活跃状态。但 2017 年以来,该区域地震活动明显减弱,特别是 3 月之后,地震活动处于低活动背景,这与传统意义上强震前地震活动由增强到平静的过程相符。

从完备目录的震级-时间分布来看,此次地震序列为前震-主震-余震型。前震序列存在平静—增强的过程,特别是主震前的地震活动短时间内增强,明显高于该区域 2017 年以来每天 1 次的地震日次均值,这种高于背景地震活动水平的增强可能是应力的积累导致震源区发生微小破裂所致,这一阶段可能是深部更大的断层发生破裂之前加速蠕动的临震阶段。与之对应,主震前序列的 b 值处于低值水平,表明了震源区处于较高的应力状态,而主震发生后 b 值随时间的推移快速回升,维持在 0.5 左右,仍存在缓慢升高的趋势。与之相反,序列的完备震级在主震发生后短时间内达到最高值,这可能与主震尾波的严重干扰有关,随后,完备震级缓慢降低并逐渐稳定在 1.2 级左右。与该区域 1.0 的背景 b 值相比,目前序列的 b 值仍处于低值水平,从 b 值缓慢升高的趋势来看,余震序列仍会在未来较长一段时间处于衰减的状态。

本文仅对九寨沟 $M_s7.0$ 地震序列震前、震后几天的连续波形进行扫描,并基于发震前后几天的完备目录结合 b 值进行初步分析。对于序列衰减系数和其他地震参数的分析,以及对于前震序列的相关推断的论证,将在后续工作中进一步研究。

参考文献

- 高曙德、郭安宁、王军燕等,2017,四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震前地电阻率的异常变化,地震工程学报,39(4),645~651。
- 郭安宁、白雪见、任栋等,2017,四川九寨沟 7.0 级地震中长期预测的回顾认识,地震工程学报,39(4),639~644。
- 郭路杰、蒋长胜、韩立波,2014,2014 年云南鲁甸 6.5 级地震序列参数的早期特征,地震研究,37(4),503~507。
- 侯金欣、王宝善,2017,2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震前后地震活动性,地球物理学报,60(4),1446~1456。
- 黄亦磊、周仕勇、庄建仓,2016,基于地震目录估计完备震级方法的数值实验,地球物理学报,59(4),1350~1358。
- 蒋长胜、庄建仓、龙锋等,2013,2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震序列参数的早期特征:传染型余震序列模型计算结果,地震学报,35(5),661~669。
- 蒋海昆、郑建常、吴琼等,2007,传染型余震序列模型震后早期参数特征及其地震学意义,地球物理学报,50(6),1778~1786。
- 李智超、黄清华,2014,基于概率完备震级评估首都圈地震台网检测能力,地球物理学报,57(8),2584~2593。
- 刘正荣,1984,根据地震频度衰减预报地震的工作细则,地震,(1),35~37。
- 刘正荣、孔绍麟,1986,地震频度衰减与地震预报,地震研究,9(1),6~8。
- 马腾飞,2015,连续波形中“重复地震的识别”与 WFS 相联系的汶川地震序列分析,博士学位论文,北京:中国地震局地球物理研究所。
- 马玉虎、陈玉华、王培玲等,2012,2010 年玉树 7.1 级地震序列时空演化特征及早期趋势判断,地震,32(3),109~116。

- 牛志仁, 1978, 构造地震的前兆理论——震源孕育的膨胀-蠕变模式, 地球物理学报, **21**(3), 199~212。
- 宋春燕、张琳琳、聂晓红等, 2014, 2014 年新疆于田 $M_s 7.3$ 地震序列特征及早期趋势判断, 地震研究, **37**(4), 558~564。
- 宋金、蒋海昆, 2009, 序列衰减与余震激发研究进展及应用成果, 地震地质, **31**(3), 559~571。
- 谭毅培、曹井泉、陈继锋等, 2015, 2013 年甘肃岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震余震序列时域衰减特征分析, 地球物理学报, **58**(9), 3222~3231。
- 谭毅培、曹井泉、刘文兵等, 2014, 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、陈继锋、曹井泉等, 2015b, 2013 年甘肃岷县-漳县 $M_s 6.6$ 地震余震序列目录完备性研究——基于对单台记录地震事件震中与震级的估计, 地震学报, **37**(5), 806~819。
- 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。
- 谭毅培、徐甫坤、曹井泉等, 2015, 2014 年云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震早期余震序列遗漏地震检测与衰减特征分析, 地球物理学进展, **30**(4), 1592~1596。
- 吴开统、彭克银, 1996, 地震序列类型早期判断的可能性, 地震, **16**(1), 1~8。
- 徐伟进、高孟潭, 2014, 中国大陆及周缘地震目录完整性统计分析, 地球物理学报, **57**(9), 2802~2812。
- 易桂喜、闻学泽、辛华等, 2011, 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前龙门山-岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布, 地球物理学报, **54**(6), 1490~1500。
- 袁道阳、杨青云、雷中生等, 2016, 四川北部地区三次中强历史地震补充考证, 地震工程学报, **38**(2), 226~235。
- 朱传镇、王林瑛, 1989, 震群信息熵异常与地震预测, 见: 国家地震局科技监测司, 地震预报方法实用化研究文集: 地震学专辑, 229~242, 北京: 学术书刊出版社。
- Chan C H, Wu Y M, Tseng T L, et al, 2012, Spatial and temporal evolution of b-values before large earthquakes in Taiwan, *Tectonophysics*, 532~535, 215~222.
- 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.
- Kagan Y Y, Bird P, Jackson D D, 2010, Earthquake patterns in diverse tectonic zones of the globe, *Pure Appl Geophys*, **167**(6/7), 721~741.
- Lenfliné O, Enescu B, Peng Z, et al, 2012, Decay and expansion of the early aftershock activity following the 2011, $M_w 9.0$ Tohoku earthquake, *Geophys Res Lett*, **39**(18), doi:10.1029/2012GL052797.
- 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*, **118**(7), 3576~3591.
- 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 Computer Science*, **9**, 937~946.
- Ogata Y, 1988, Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *J Am Statist Assoc*, **83**(401), 9~27.
- Ogata Y, 1989, Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis, *Tectonophysics*, 169(1/2/3), 159~174.
- Ogata Y, 2001, Increased probability of large earthquakes near aftershock regions with relative quiescence, *J Geophys Res*, **106**(B5), 8729~8744.
- 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. doi:10.1029/2006JB004386.
- Peng Z G, Zhao P, 2009, Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake, *Nature Geoscience*, **2**(12), 877~881.
- Rydelek P A, Sacks I S, 1989, Testing the completeness of earthquake catalogues and the hypothesis of self-similarity, *Nature*, **337**, 251~253.
- Schaff D P, 2008, Semiempirical statistics of correlation-detector performance, *Bull Seism Soc Am*, **98**(3), 1495~1507.
- Schaff D P, Waldhauser F, 2010, One magnitude unit reduction in detection threshold by cross correlation applied to Parkfield (California) and China seismicity, *Bull Seism Soc Am*, **100**(6), 3224~3238.
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S, 2007, Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, *Nature*, **446**(7133), 305~307.

- Turcotte D L, Holliday J R, Rundle J B, 2007, BASS, an alternative to ETAS, *J Geophys Res*, 34, L12303.
- Utsu T, 1961, A statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys Mag*, 30, 521~605.
- Utsu T, 1965, A method for determining the value of bin a formula $\log n = a - bm$ showing the magnitude frequency for earthquakes, *Geophys Bull Hokkaido Univ*, 13, 99~103.
- Wiemer S, Wyss M, 2000, Minimum magnitude of completeness reporting in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, *Bull Seism Soc Am*, 90, 859~869.
- 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 Seism Soc Am*, 99(6), 3413~3420.
- Zhang M, Wen L X, 2015, Seismological evidence for a low-yield nuclear test on 12 May 2010 in North Korea, *Seism Res Lett*, 86(1), 138~145.

Temporal evolution of the seismicity of the 2017 Jiuzhaigou $M_s 7.0$ earthquake sequence

Wang Peng^{1,2)} Hou JinXin²⁾ Wu Peng³⁾

1) Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250102, China

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

3) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

Abstract After the mainshock occurred in moderately strong earthquake sequence, a large number of earthquakes are likely to be missed due to the far distance from the epicenter, the interference of the coda wave and the overlap of the waveform in the short time, but the integrity of seismic catalog directly affects the scientific and reliability analysis of post earthquake trend determination and aftershock sequence characteristic analysis. In this paper, we adopt a matched filter technique based GPU parallel computing method to detect the missing seismic events in the period from August 1, 2017 to August 12, and obtained 4854 detected events by using 1033 events with high signal-to-noise ratio listed in the seismic network catalog as templates. The number of earthquakes detected was 3.3 times as much as that of the network catalog. In addition to the correction of the single earthquake event in the network, 1797 missing earthquake events were detected, and the complete magnitude was reduced from 1.6 to 1.4. Based on the complete earthquake catalog supplemented with missing earthquakes, we analyzed the activity characteristics of the $M_s 7.0$ earthquake sequence on August 8, 2017 in Jiuzhaigou, Sichuan. The results show that: the foreshock sequence had intensive seismicity enhancement, in a short period of time before the mainshock, and the b -value also showed a low value state, which may be the result of accelerated creep before the rupture of a deep fault. As time went by, the complete magnitude of the aftershock sequence decreased gradually and tended to be stable, and the b -value had a slowly rising trend, so the aftershock sequence would remain in a state of sustained decay in the long term.

Key words: Jiuzhaigou $M_s 7.0$ earthquake; Matched filter technique; Missing earthquakes detection; Magnitude of completeness; b -value