

盛敏汉, 储日升, 王清东, 等, 2021. 2019 年 12 月 26 日湖北应城 $M_{4.9}$ 地震震源参数及余震活动性研究. 中国地震, 37(2): 463~471.

2019 年 12 月 26 日湖北应城 $M_{4.9}$ 地震 震源参数及余震活动性研究

盛敏汉^{1,2)} 储日升^{1,2)} 王清东^{1,2)} 曾求^{1,2)} 马海超^{1,2)}

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, 武汉 430077
2) 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 2019 年 12 月 26 日湖北应城发生 $M_{4.9}$ 有感地震, 其震感波及武汉大部分地区。为了分析该地震的发震构造及余震活动性, 本文利用波形拟合方法测定了不同速度模型下该地震的震源机制解和矩心深度, 并用 Bootstrapping 抽样反演技术评价反演结果; 此外, 利用模板匹配技术匹配主震和目录余震波形, 获取了更为完整的余震目录。结果显示, 应城地震以走滑为主, 矩心深度 7.5km 左右, 矩震级 $M_w 4.67$; 应城地震有 1 个前震和 17 个余震, 余震序列缺少 $M_{2\sim 4}$ 事件, 表明应城地震为孤立型地震, M_2 以下地震的 b 值为 0.8。

关键词: 应城地震 震源参数 抽样反演 孤立型地震

[文章编号] 1001-4683(2021)02-0463-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网中心(CENC)测定, 北京时间 2019 年 12 月 26 日 18 时 36 分 34 秒, 湖北省应城发生 $M_{4.9}$ 中等地震(图 1(a)), 震中位于 113.40°E 、 30.87°N , 震源深度 10km。震中距离应城市区不到 20km, 烈度 VI 度, 地震导致附近部分房屋出现开裂, 距离震中 90km 的武汉市有明显晃动。

在地质构造上, 湖北省跨越秦岭褶皱系与扬子地块两大构造单元。以青峰-襄樊-广济断裂为界, 断裂北侧为秦岭褶皱系, 南侧为扬子地块(图 1(a))。秦岭褶皱系属中央造山带的组成部分, 属于强烈变形构造单元, 带内活动断裂发育, 控制着破坏性地震的发生; 扬子地块相对稳定, 但仍存在破坏性地震且沿断裂分布(张丽芬等, 2011)。据湖北省地震志, 自公元前 143 年有地震记载以来, 省内 4.7 级以上的破坏性地震有 30 多次, 其中 M_6 以上地震 3 次, 19 次地震的震级在 $M_{5.0\sim 5.9}$ 之间。全省最大地震为公元 788 年竹山 6.0 级、1856 年咸

[收稿日期] 2020-12-31 [修定日期] 2021-02-24

[项目类别] 国家重点研发计划(2018YFC504200)、国家自然科学基金(U20A2095、42004043、41704066)和中国科学院王宽诚率先人才计划“卢嘉锡国际合作团队项目”(GJTD-2018-12)共同资助

[作者简介] 盛敏汉, 男, 1990 年生, 博士, 主要从事诱发地震与滑坡地震震源参数研究。E-mail: shengminhan@apm.ac.cn
储日升, 通讯作者, 男, 1978 年生, 研究员, 主要从事地震学和地球动力学研究。E-mail: chur@apm.ac.cn

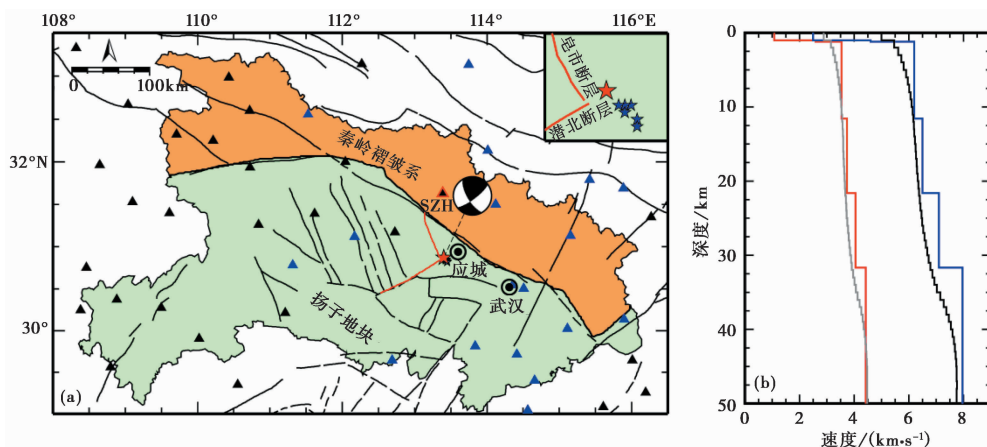


图 1 研究区域构造 (a) 及反演震源参数所用速度模型 (b)

(a) 中红色五角星表示应城地震主震, 蓝色五角星表示目录余震, 震源球表示机制解, 蓝色三角形为参与震源参数反演的地震台站, 其中随州台 (SZH) 离主震近且数据质量高, 用来模板匹配识别余震, 以红色边框标识, 黑色断层数据引自邓起东等 (2003), 红色断层数据引自李恒等 (2020); (b) 中震源区 CRUST1.0 模型引自 Laske 等 (2013), 其中红线对应 S 波、蓝线对应 P 波, 应城及邻区平均一维速度模型引自 Shen 等 (2016), 其中灰线对应 S 波、黑线对应 P 波 (取为 S 波速的 1.732 倍)

丰大路坝 6.0 级以及 1932 年麻城 6.0 级地震 (熊继平, 1986)。自 2000 年以来, 省内最大地震为 2013 年 12 月 16 日巴东 $M_{5.1}$ 地震 (Huang et al, 2018)。2019 年应城 $M_{4.9}$ 地震发生在相对稳定的扬子地块内, 研究其震源参数与余震活动性对于理解该地区发震构造及评估地震危险性具有重要意义。

精确测定地震的震源参数, 如震源机制解和震源深度, 是确定发震构造、评估地震灾害、制定防震减灾策略的基础 (郑勇等, 2009; 易桂喜等, 2017)。本文利用宽频带波形资料, 基于波形拟合方法获取了应城地震的震源机制解和震源深度。基于不同的速度模型, 利用 Bootstrapping 抽样技术测试反演结果, 确保了震源参数的可靠性。此外, 利用模板匹配技术检测了应城地震的前震和余震活动性。

1 方法

本研究利用 CAP (Cut and Paste) 波形拟合方法 (Zhu et al, 1996) 获取应城地震的震源机制解和震源深度。CAP 方法在点源假设的条件下, 利用近震波形数据, 通过波形拟合来获取震源参数。不同震源机制解的地震波辐射花样存在差别, 不同深度的地震其波形在振幅以及深度震相到时上均会体现差异, CAP 方法利用不同震源机制解、不同深度的合成波形来拟合各个台站的观测波形 (Chu et al, 2013; Wang et al, 2020)。计算理论地震图采用的是频率-波数法 (Zhu et al, 2002), 该方法适用于水平层状模型。通过频率域和波数域积分, 由传播矩阵计算理论波形。最后通过网格搜索震源参数, 找到合成波形和观测波形拟合最佳情形下的解。该方法的优点是将三分量波形切割成体波段和面波段分别进行时移拟合, 其优势在于: ①体波段、瑞利面波段以及勒夫面波段波形可以用不同的时移量分别拟合, 从而可以有效降低反演结果对速度模型的依赖, 减小速度模型不准确带来的影响; ②体波、面波

分开反演,使用不同的几何扩散因子矫正振幅,利用不同的权重来反演体波和面波,可以有效降低面波振幅过大从而主导反演结果带来的影响。在点源假设情形下,断层面和辅助面的辐射花样相同,因此 CAP 方法得到的震源机制解需要结合其他信息才能辨别发震断层和辅助断层面,例如破裂方向性、余震的分布等。

模板匹配方法广泛用于检测地震目录中缺失的小地震 (Peng et al, 2009; Zhang et al, 2015; 杨慧等, 2018; Zhu et al, 2019; Ma et al, 2020)。本研究利用滑动时窗互相关 (Sliding-window Cross-correlation, 简称 SCC) 方法 (Yang et al, 2009) 检测应城地震目录之外的余震。SCC 方法以单台单分量或多分量地震波形作为模板,将模板波形和同台站的连续波形进行滑动互相关,当互相关系数大于一定的阈值时,便认为检测到了一个和模板事件位置相近、震源机制解相似的地震。根据被检测地震和模板地震的振幅比 A/A_t , 还可以估算被检测地震的震级 M

$$M = M_t + \lg(A/A_t) \quad (1)$$

其中, M_t 为模板地震的震级。SCC 方法可以有效地检测低信噪比事件,相比于短时平均比长时平均方法 (即 STA/LTA), 能检测到更小的地震事件。

2 数据与速度模型

选用震中距小于 300km 的宽频带地震台来反演震源参数 (图 1(a))。首先人工检查原始数据,剔除质量差的波形记录;然后去除仪器响应,再将东西、南北分量的波形旋转至径向和切向。在反演中,体波段和面波段的时窗长度分别为 40s 和 70s,滤波频带分别为 0.06~0.1Hz 和 0.02~0.1Hz。主震前 1 天和后 7 天的连续波形数据被用于模板匹配方法来检测小地震。

选用了震源区的 CRUST1.0 模型 (Laske et al, 2013) 以及 Shen 等 (2016) 由面波频散获得的剪切波速度结构作为反演震源参数的速度模型。Shen 等 (2016) 的模型为中国地区地壳和上地幔三维剪切波速度模型,经度和纬度方向上的网格间隔为 0.5°, 深度方向上的间隔为 0.5km。将震源区 300km 以内网格的速度均值作为一维速度模型,并令 $v_p/v_s = 1.732$ (图 1(b))。由于频率-波数法合成理论波形不能将震源放在速度分界面上,在用 CRUST1.0 模型反演过程中,震源起始搜索深度设置为 1km,搜索步长 1km;在利用 Shen 等 (2016) 模型时,震源起始深度放置于 1.5km 处,深度方向上的搜索步长也为 1km。

3 结果

由 CRUST1.0 模型获取的最佳双力偶解为:节面 I 走向 150°、倾向 67°、滑动角 15°,节面 II 走向 54°、倾向 76°、滑动角 156°,震级 M_w 4.65 (图 2);由 Shen 等 (2016) 模型获取的最佳的双力偶解为:节面 I 走向 149°、倾向 68°、滑动角 15°,节面 II 走向 53°、倾向 76°、滑动角 157°,震级 M_w 4.67 (图 3);2 个模型对应的最佳深度分别为 7.0km 和 7.5km (图 4)。由此可以看出,由 2 个浅部结构差异较大的模型获得的震源参数,无论是震源机制解,还是震级与深度的差别均极其细微,进一步说明了 CAP 方法不依赖速度模型的优点。另外,震源机制解随深度的变化不明显 (图 4),说明了反演结果的稳定性。用 2 个模型得到的最佳反演结果中,各个台站的合成波形均能较好地拟合观测波形,说明了反演结果的可靠性。

波形拟合获得震源参数属于非线性反演,无法给出误差。大部分复杂的地球物理反演

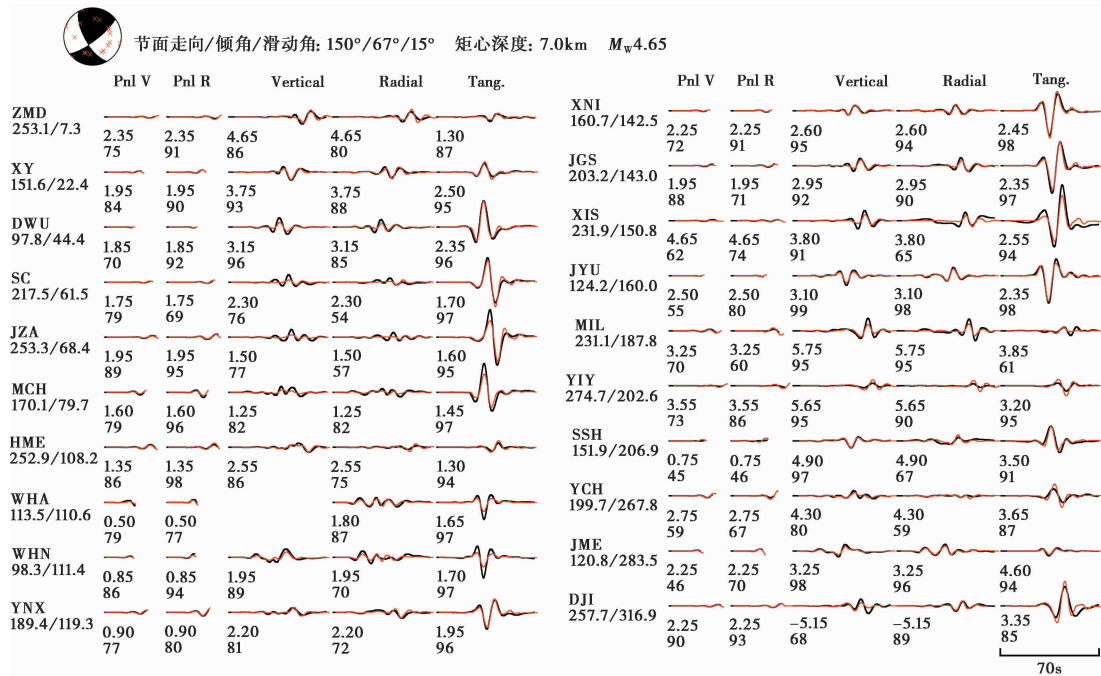


图 2 应用 CRUST1.0 模型反演的震源机制解结果

观测和合成波形分别用黑色和红色表示;每一行波形前分别为台站名、震中距(km)和方位角(°);波形下方的数字表示时移值以及观测波形和合成波形的互相关系数;时移值为正表示合成波形比观测波形早到

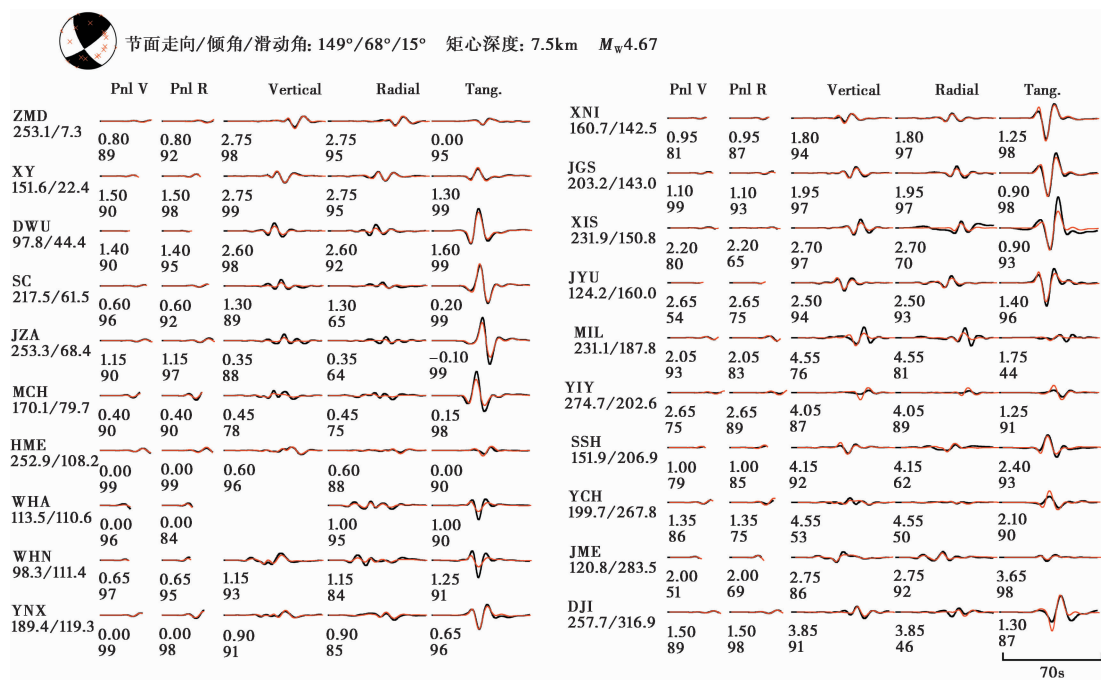


图 3 应用 Shen 等(2016)模型反演的震源机制解结果

图中文字和符号同图 2

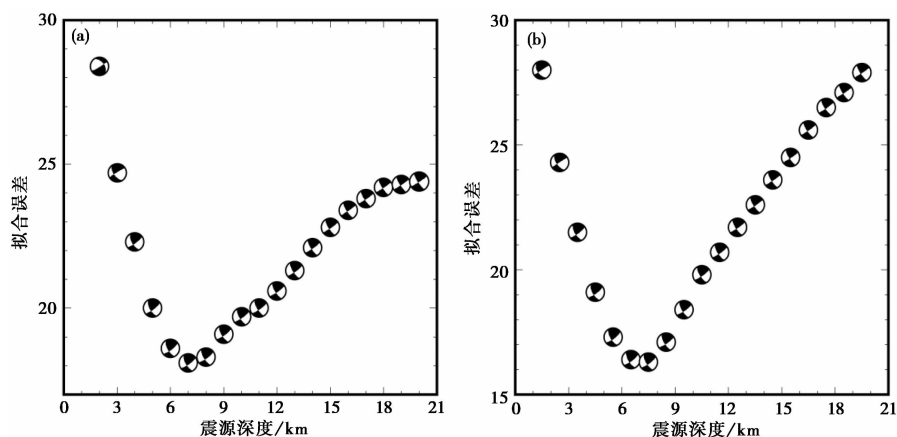


图 4 震源深度反演结果

(a) 应用 CRUST1.0 模型得到的误差随深度分布; (b) 应用 Shen 等 (2016) 模型得到的误差随深度分布

均为非线性问题, 往往需要通过其他方法对结果做出评价。例如, Bootstrapping 技术常用来评估震源参数反演结果 (Tichelaar et al, 1989; Chu et al, 2013; Sheng et al, 2020b)。Bootstrapping 技术是一种抽样反演方法, 假定有 N 个台站, 进行 M 组抽样反演, 每组进行 N 次抽样, 每次抽样均为放回式抽样。在每一组反演中, 各个台站有可能被重复多次抽样, 也有可能未被抽样。在本研究中, 我们对 20 个台站进行 1000 组抽样反演, 所用速度模型为 Shen 等 (2016) 的结果, 搜索深度从 1.5km 至 20.5km, 每千米设置一个反演深度。Bootstrapping 深度反演结果只出现了 3 个数值: 6.5km、7.5km 和 8.5km (图 5 (a)), 其中 7.5km 占绝大部分, 表明了以 7.5km 作为震源深度是稳定可靠的。另外断层的走向、倾向和滑动角均集中分布, 均值分别为 149.6° 、 67.9° 和 15.0° , 3 个角度的标准差均在 3.3° 之内, 也表明了震源机制解的结果稳定可靠。

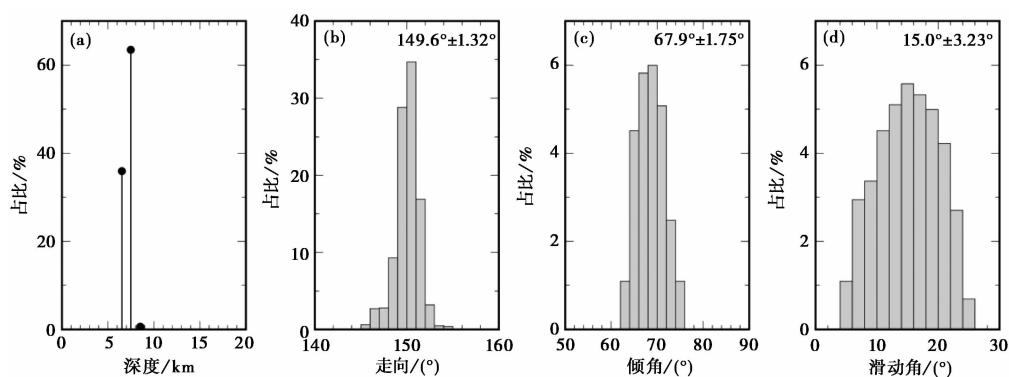


图 5 1000 次 Bootstrapping 反演结果

(a) 最佳深度分布; (b) 断层走向分布, 右上角数值表示走向的均值和标准差; (c) 断层倾向分布, 右上角数值表示倾向的均值和标准差; (d) 断层滑动角分布, 右上角数值表示滑动角的均值和标准差

应城地震余震少 (表 1), 为了验证较少余震是否由目录不全所造成, 我们以主震及目录余震波形作为模板, 利用 SCC 方法检测可能遗漏的地震。通过人工检查连续波形, 发现离主

震较近的随州台(SZH)数据质量高。以随州台记录到的主震和余震的垂直分量波形作为模板进行互相关检测。由于第一个余震在主震之后几分钟内发生,其波形受到了主震尾波的干扰,故从模板中去除了该事件。除了主震外,目录余震震级均在 $M2.0$ 以下,P 波微弱,采用 S 波和其后续波形进行模板匹配。将模板波形和连续数据滤波到 $0.8\sim2\text{Hz}$,以模板事件 S 波前 1s 和后 10s 作为检测时窗(图 6),以互相关系数(CC)0.8 作为阈值。在去除重复检测之后,最终得到 12 个目录之外的事件,其中 1 个事件发生在主震之前(图 7(a)),且没有检测到任何和主震相似的事件,表明应城地震余震确实较少,属于孤立型地震。根据振幅比,估算了检测到的地震震级,从震级分布(图 7(b))可以看出,该地震序列不满足 G-R 关系(Gutenberg et al,1944)。

表 1 应城地震及中国地震台网中心目录中的余震

发震时刻(年-月-日 T时:分)	经度/(°E)	纬度/(°N)	深度/km	M
2019-12-26 T18:36	113.40	30.85	10	4.9
2019-12-26 T18:42	113.45	30.83	7	1.9
2019-12-27 T06:53	113.44	30.85	8	1.0
2019-12-30 T20:10	113.43	30.85	10	1.9
2019-12-31 T13:35	113.43	30.84	6	1.5
2020-01-02 T06:50	113.45	30.82	3	1.3
2020-01-02 T08:44	113.42	30.85	7	1.4

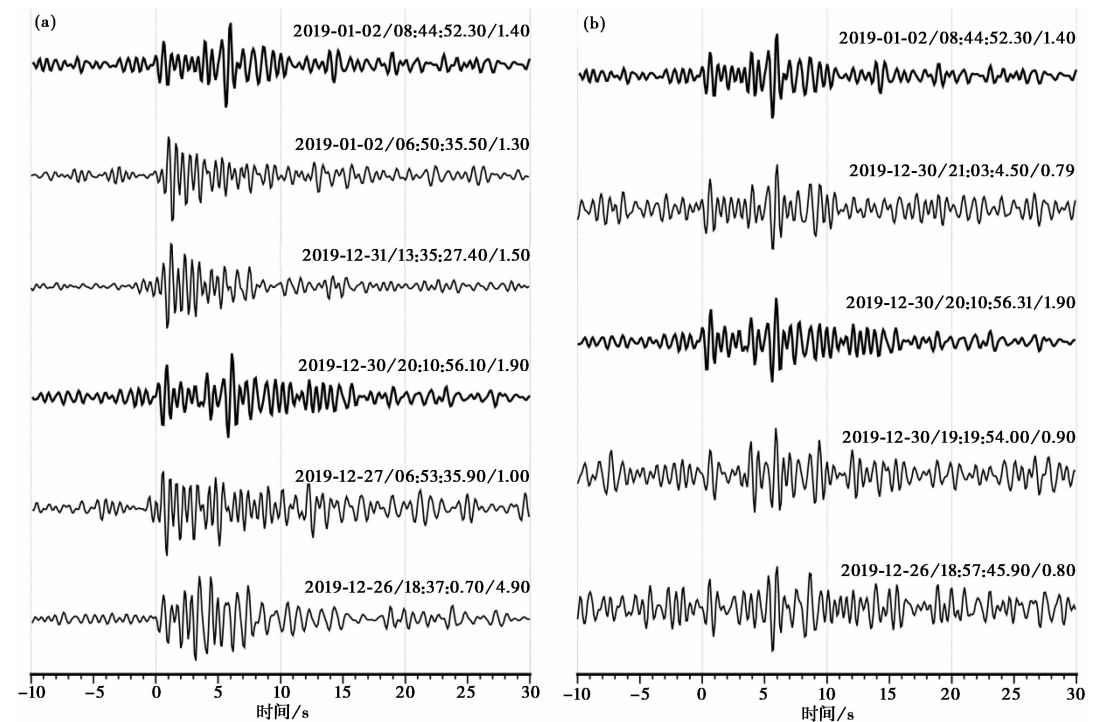


图 6 模板匹配结果

(a) 主震及目录余震作为模板波形;(b) 目录中最后一个余震作为模板的检测结果;加粗波形表示 2 个波形相似,能互相检测到的模板事件;数字表示地震的发生日期/时刻(北京时间)/震级

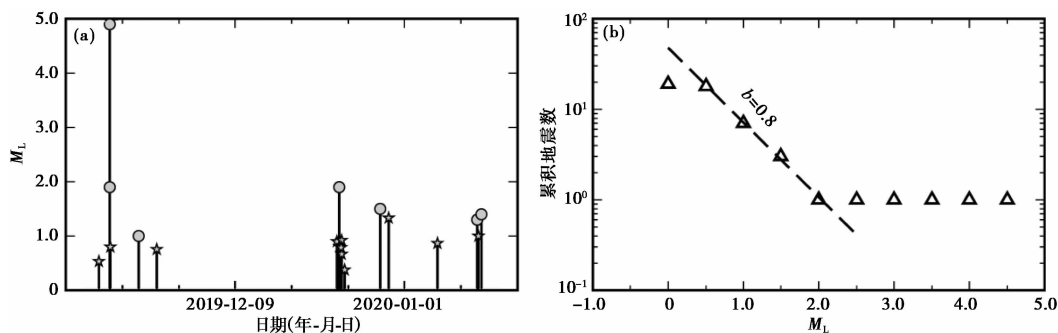


图 7 应城地震序列

(a) 地震序列 $M-t$ 图, 圆圈标记中国地震台网中心目录中的地震, 五角星标记模板匹配检测到的地震; (b) 震级与累计地震数

4 讨论

本研究利用 CAP 方法反演了 2019 年 12 月 26 日湖北应城 $M_{4.9}$ 地震的震源机制解和震源深度。应城地震以走滑为主, 矩心深度约 7.5 km。CAP 方法以点源假设为基础, 得到的震源机制解无法区分发震断层面和辅助断层面。在震中附近存在 2 条近共轭的潜北断层和皂市断层 (图 1(a)), 走向分别平行于应城地震震源机制解的 2 个节面。因此, 应城地震的发震断层应该是这 2 条断层其中之一, 但是具体破裂发生在哪一条断层, 还需要依靠其他方法获取。

发震断层可以通过破裂方向性和余震的时空展布得到 (何晓慧等, 2020; 苏金蓉等, 2013; Sheng et al, 2020a)。稀疏台网下中强地震的破裂方向可通过不同方位角的视震源时间函数的持续时间得到 (Prieto et al, 2017), 这种方法需要主震附近存在位置相近、震源机制解相似的小地震作为经验格林函数, 来去除路径效应的影响。而应城地震余震少, 主震发生之后 7 天内的目录仅有 6 个余震, 最大震级 $M_{1.9}$ 。余震震级小, 波形信噪比低, 难以作为经验格林函数来反演破裂方向性。另外, 该地震余震少, 很难通过其空间展布获得发震断层。

通过模板匹配方法仅检测到 12 个目录中未记录的小地震, 主震和余震震级分布不满足 G-R 关系, 主震震级接近 M_5 , 却缺乏 M_{2-4} 的余震。根据前震和余震稀少、其能量总和不到主震能量千分之一的特点 (王振声, 1982), 应城地震可以被认定为孤立型地震。以 M_2 以下地震估算 b 值, 结果为 0.8, 小于大多数地震序列的 b 值 (1.0)。 b 值采用线性最小二乘估计, 95% 置信区间为 0.8 ± 0.1 。然而, 一般认为用来估算 b 值的地震数量最好在 50 以上 (Eaton et al, 2015), 因此本文的结果可能存在一定的误差。该类型地震的发生可能和低应力降有关联 (张勇等, 2018), 主震应力降越小, 余震序列的 b 值也越小, 余震数量则越少 (Gibowicz, 1973)。湖北地区大部分地震的应力降均在 1 MPa 以下 (申学林等, 2018), 低应力降可能使得余震不易被触发, 可能形成孤立型事件。构造活动强烈的地区应力降则较高, 我国龙门山断裂带北东段汶川地震余震区、青藏高原东北缘以及新疆天山中段地区的中小地震应力释放在 5~10 MPa 的水平 (赵翠萍等, 2011); 美国加州中部帕克菲尔德地区应力降的平均值约为 6.75 MPa (Allmann et al, 2007)。

5 结论

本文基于宽频带地震波形资料及不同速度模型,利用 CAP 方法获取了 2019 年 12 月 26 日湖北应城 $M_{\text{w}}4.9$ 地震的震源参数,并应用 Bootstrapping 抽样技术反演了震源参数,确保反演结果的可靠性;此外利用模版匹配方法识别了小地震。结果表明,应城 $M_{\text{w}}4.9$ 地震的矩震级为 $M_{\text{w}}4.67$,震源矩心深度 7.5km;震源机制解节面 I 走向 149° 、倾向 68° 、滑动角 15° ;节面 II 走向 53° 、倾向 76° 、滑动角 157° 。其发震断层为震源附近的潜北断层和皂市断层中的一条,这 2 个条断层走向分别和 2 个震源机制解节面走向近乎平行,故无法辨别哪一条断层才是发震断层。应城地震的余震异常少,且缺少 $M2\sim4$ 地震事件,通过模板匹配方法得到了目录之外的 12 个小事件,余震的 b 值为 0.8,余震活动显示应城地震为孤立型地震。

参考文献

- 邓起东,张培震,冉勇康,等,2003. 中国活动构造与地震活动. 地学前缘, **10**(S1):66~73.
- 何晓慧,李涛,吴传勇,等,2020. 基于区域地震波形的 2017 年新疆精河 $M_{\text{s}}6.6$ 地震破裂方向性及发震构造研究. 地球物理学报, **63**(4):1459~1471.
- 李恒,雷东宁,范珂显,2020. 2019-12-26 湖北应城 $M_{\text{w}}4.9$ 地震强震动特征分析. 大地测量与地球动力学, **40**(6):551~554, 576.
- 申学林,魏贵春,丁文秀,等,2018. 湖北地区地震震源参数研究. 中国地震, **34**(4):781~787.
- 苏金蓉,郑钰,杨建思,等,2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M7.0$ 地震与余震精确定位及发震构造初探. 地球物理学报, **56**(8):2636~2644.
- 王振声,1982. 从能量及地质条件研究孤立型地震序列活动特征. 地震研究, **5**(3):268~273.
- 熊继平,1986. 湖北地震史料汇考. 北京:地震出版社.
- 杨慧,储日升,盛敏汉,2018. 2015 山东平邑石膏矿塌陷地震震源参数测定. 地球物理学进展, **33**(1):125~132.
- 易桂喜,龙锋,梁明剑,等,2017. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M7.0$ 地震及余震震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, **60**(10):4083~4097.
- 张丽芬,姚运生,廖武林,等,2011. 湖北地区上地幔各向异性及其动力学意义. 地球物理学报, **54**(1):35~43.
- 张勇,陈运泰,宋金,2018. 2018 年 $M_{\text{w}}4.3$ 河北永清地震的震源机制与破裂特征. 科学通报, **63**(22):2296~2301.
- 赵翠萍,陈章立,华卫,等,2011. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究. 地球物理学报, **54**(6):1478~1489.
- 郑勇,马宏生,吕坚,等,2009. 汶川地震强余震 ($M_{\text{s}} \geq 5.6$) 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.
- Allmann B P, Shearer P M, 2007. Spatial and temporal stress drop variations in small earthquakes near Parkfield, California. J Geophys Res: Solid Earth, **112**(B4):B04305.
- Chu R S, Helmberger D V, 2013. Source parameters of the shallow 2012 Brawley earthquake, Imperial Valley. Bull Seismol Soc Am, **103**(2A):1141~1147.
- Eaton D W, Maghsoudi S, 2015. 2b. or not 2b? Interpreting magnitude distributions from microseismic catalogs. First Break, **33**(10):79~86.
- Gibowicz S J, 1973. Stress drop and aftershocks. Bull Seismol Soc Am, **63**(4):1433~1446.
- Gutenberg B, Richter C F, 1944. Frequency of earthquakes in California. Bull Seismol Soc Am, **34**(4):185~188.
- Huang R, Zhu L P, Encarnacion J, et al, 2018. Seismic and geologic evidence of water-induced earthquakes in the Three Gorges Reservoir region of China. Geophys Res Lett, **45**(12):5929~5936.
- Laske G, Ma Z T, Masters G, et al, 2013. A new global crustal model at $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ degrees, <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>.
- Ma H C, Chu R S, Sheng M H, et al, 2020. Template matching for simple waveforms with low signal-to-noise ratio and its application to icequake detection. Earthq Sci, **33**:1~8.

- Peng Z G, Zhao P, 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nat Geosci*, **2**(12): 877~881.
- Prieto G A, Froment B, Yu C Q, et al, 2017. Earthquake rupture below the brittle-ductile transition in continental lithospheric mantle. *Sci Adv*, **3**(3): e1602642.
- Shen W S, Ritzwoller M H, Kang D, et al, 2016. A seismic reference model for the crust and uppermost mantle beneath China from surface wave dispersion. *Geophys J Int*, **206**(2): 954~979.
- Sheng M H, Chu R S, Ni S D, et al, 2020a. Source parameters of three moderate size earthquakes in Weiyuan, China, and their relations to shale gas hydraulic fracturing. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(10): e2020JB019932.
- Sheng M H, Chu R S, Wang Y, et al, 2020b. Inversion of source mechanisms for single-force events using broadband waveforms. *Seismol Res Lett*, **91**(3): 1820~1830.
- Tichelaar B W, Ruff L J, 1989. How good are our best models? Jackknifing, bootstrapping, and earthquake depth. *Eos, Trans AGU*, **70**(20): 593~606.
- Wang Q D, Chu R S, 2020. Earthquake source parameters in southwestern China and their rheological implications. *Seismol Res Lett*, **91**(2A): 936~947.
- Zhang M, Wen L X, 2015. An effective method for small event detection: match and locate (M&L). *Geophys J Int*, **200**: 1523~1537.
- Zhu G H, Yang H F, Lin J, et al, 2019. Along-strike variation in slab geometry at the southern Mariana subduction zone revealed by seismicity through ocean bottom seismic experiments. *Geophys J Int*, **218**: 2122~2135.
- Zhu L P, Helmberger D V, 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1634~1641.
- Zhu L P, Rivera L A, 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophys J Int*, **148**(3): 619~627.

Study on Source Parameters and Aftershock Activity of the $M_{4.9}$ Yingcheng Earthquake on December 26, 2019 in Hubei Province

Sheng Minhan^{1,2)} Chu Risheng^{1,2)} Wang Qingdong^{1,2)} Zeng Qiu^{1,2)} Ma Haichao^{1,2)}

1) State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The $M_{4.9}$ Yingcheng earthquake on December 26, 2019 in Hubei Province were felt by residents in most areas of Wuhan. In order to analyze the seismogenic structure and aftershock activity of this earthquake, the focal mechanisms and centroid depth of the earthquake are determined by waveform modelling with different velocity models. The inversion results are evaluated by bootstrapping sampling inversion technique. We use waveforms of the main shock and aftershocks to obtain a more complete aftershock catalog by template matching technique. The results show that the Yingcheng earthquake is dominant with strike slip movement, and the centroid depth is about 7.5km with the moment magnitude of $M_w 4.67$. There are one foreshock and 17 aftershocks detected, but the aftershock sequence is in lack of $M 2 \sim 4$ events, which indicates that the Yingcheng earthquake is an isolated earthquake. The b -value of the earthquake sequence below $M 2$ is 0.8.

Keywords: The Yicheng earthquake; Source parameters; Bootstrapping; Isolated earthquake