2018年 $M_w4.3$ 河北永清地震的震源机制与破裂特征

张勇^{1*}, 陈运泰^{1,2}, 宋金³

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

3. 中国地震台网中心, 北京 100045

* 联系人, E-mail: zhygn@163.com

2018-04-16 收稿, 2018-06-04 修回, 2018-06-05 接受, 2018-07-12 网络版发表

国家自然科学基金(41574035)资助

摘要 采用区域宽频带地震波数据, 反演确定了2018年2月12日河北永清地震的地震矩张量解和破裂过程. 震源机制结果显示, 这次地震的矩心深度约为16 km, 发生在走向北东、倾向南西的断层上, 断层错动以左旋走滑为主、兼具少量正断层分量. 破裂模型显示, 地震的最大滑动量约为1.3 cm, 破裂尺度约2 km, 二者皆明显高于根据现有地震定标律估计得到的结果. 断层最大应力降和平均应力降分别约为0.6和0.3 MPa, 明显低于板内地震应力降平均水平. 分析认为, 这一较低的应力降水平与缺少余震的“孤立型”地震序列对应, 反映了较弱的断层强度和破碎的震源区介质, 可能是华北部分地区地震的共有特征.

关键词 永清地震, 震源机制, 破裂过程

2018年2月12日, 在河北省永清县境内发生了一次 $M_L4.3$ 地震, 京津冀三地地震感明显. 根据中国地震台网中心发布的定位结果, 此次地震震中位于 39.37°N , 116.67°E , 震源深度20 km. 此次地震是继2006年7月4日文安 $M_S5.1$ 地震之后, 首都圈近10年来发生的规模最大、震感最强烈的一次地震事件. 强震记录显示, 此次地震的最大仪器烈度超过IV度^[1]. 根据河北地震局发布的余震信息, 震后2小时只记录到余震22次, 最大震级仅1.8级, 表明此次永清地震与2006年文安 $M_S5.1$ 地震以及许多其他华北地区地震一样, 具有“孤立型”地震特征^[2].

地震发生后, 中国地震局多个研究机构测定了此次地震的震源机制解. 结果一致显示永清地震以走滑错

动为主, 具有少量正断层分量^[1], 与2006年文安 $M_S5.1$ 地震的震源机制接近^[3]. 然而, 由于余震数目稀少, 且震级偏小, 无法开展有效的地震序列精确定位工作, 难以根据余震序列的空间分布进一步分析此次地震的断层走向、破裂尺度与破裂分布等震源信息、获取更多更精细的震源参量. 作为华北地区又一次典型的“孤立型”地震, 余震短缺这一特点和主震震源特征之间是否存在某种内在的联系, 是值得研究探讨的问题. 因此, 有必要进一步通过同震资料反演确定和分析永清地震更细致的震源参量和破裂特征.

由于震级较小, 震源深度在20 km左右, 地震造成的地表形变极小, 低于大地测量资料的误差水平, 导致无可用的同震形变数据; 另一方面,

由于地震波信号随距离衰减, 远震距离上地震波信号的信噪比较低. 因此能够用于确定震源特征的只剩区域距离上的宽频带地震数据和强震数据. 考虑到中小地震强震数据的不完整性和相对较小的放大倍数, 本文主要采用信噪比相对较高的区域宽频带地震波数据, 来研究永清地震的地震矩张量和破裂过程.

我们从国家测震台网数据备份中心^[4]获取了震中距200 km范围内的宽频带地震台站, 挑选了38个三分量波形数据质量较高的台站. 由图1可见, 多数台站位于震中以北, 方位覆盖并不均匀. 考虑到在震源反演中既需要台网对震源的方位覆盖, 也需要较好的离源角覆盖, 较好的离源角覆盖在某些情况下可以提高对震源机制

引用格式: 张勇, 陈运泰, 宋金. 2018年 $M_w4.3$ 河北永清地震的震源机制与破裂特征. 科学通报, 2018, 63: 2296–2301

Zhang Y, Chen Y T, Song J. Source mechanism and rupture characteristics of the 2018 $M_w4.3$ Yongqing earthquake (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2296–2301, doi: 10.1360/N972018-00364

图1 2018年2月13日河北永清地震震中及附近区域构造背景. 三角形为宽频带台站; 震中位置和震源机制分别由八角星和红色海滩球给出; 黄色圆圈为1976年前主要历史地震($M \geq 6.5$)的震中位置, 橙色海滩球为1976年后的地震矩心位置和震源机制; 红线为该区域的活动断层分布

Figure 1 Tectonics around the epicentral area of the 12 February 2018 Yongqing earthquake. Triangles are the broadband seismic stations. The epicenter and the focal mechanism are presented by the aniseed star and red beach ball, respectively. Yellow circles are the historic earthquakes ($M \geq 6.5$) before 1976, and orange beach balls denote the centroid locations and mechanisms of the earthquakes after 1976. Red lines are the active faults

的约束, 并可以有效分辨破裂在深度方向上的分布. 因此我们未对这38个台站进行进一步筛选.

本文采用德国地学中心汪荣江博士发展的格林函数计算程序^[5], 基于CRUST1.0地壳模型^[6]来构建格林函数数据库. 为降低反演对地球模型的依赖性, 提高反演的稳定性, 观测数据和格林函数都被积分成低频信息更占优势的位移记录.

在时间域的地震矩张量反演一般考虑同步震源模型, 即震源机制不随时间发生变化, 地震矩张量元素具有相同的时间过程^[7]

$$U_n(x, t) = G_{np,q}(x, t; \mathbf{O}) * s(\mathbf{O}, t) \cdot \mathbf{M}_{pq}(\mathbf{O}). \quad (1)$$

式中, $U_n(x, t)$ 为观测点 x 处 n 方向的地震波形, $G_{np,q}(x, t; \mathbf{O})$ 为位置 $\mathbf{O}$ 处的点源力偶(p, q)在 x 处产生的 n 方向的格林函数, $s(\mathbf{O}, t)$ 为同步源震源时间函数, $\mathbf{M}_{pq}(\mathbf{O})$ 为地震点源矩张量元素, “*”表示褶积. 式(1)中, $s(\mathbf{O}, t)$ 和 $\mathbf{M}_{pq}(\mathbf{O})$ 皆为未知量, 一般需要给定其中一个, 求解另外一个未知量. 目前一般的矩张量反演工作都假定 $s(\mathbf{O}, t)$ 为等腰三角形, 基于不同的起始时间和半宽度, 得到不同的三角形形态, 分别用于求解地震矩张量解, 最终选择波形残差最小的三角形, 作为震源时间函数结果. 当前USGS的W震相反演和GCMT开展的地震矩张量反演工作都是基于以上技术路线来确定震源时间函数.

不同的是, 为节省参量搜索的时间, USGS将三角形的起始时间固定在发震时刻, 只搜索三角形半宽度; GCMT反演则通过震级-持续时间经验关系固定了三角形的半宽度, 只搜索矩心时间(三角形中心点时间).

本文同时搜索了表征同步源震源时间函数的等腰三角形的起始时间和半宽度, 根据反演得到的残差大小, 确定地震矩张量解和震源时间函数. 在此基础上, 采用两步迭代法确定最终的矩张量解和具有复杂形态的震源时间函数: (1) 以残差最小的三角形反演得到的地震矩张量解作为先验认识, 线性求解确定可能具有复杂形态的震源时间函数; (2) 给定复杂形态

的震源时间函数, 确定地震矩张量解. 两步迭代至残差稳定后, 即确定最终结果.

在将宽频带速度记录积分成位移记录后, 对其进行了0.04~0.08 Hz的带通滤波, 用于地震矩张量反演. 反演中, 我们对所有可能的矩心深度都进行了反演尝试. 如图2所示, 地震的深度矩心位置约为16 km (图2(a)). 地震矩张量解显示, 标量地震矩为 3.1×10^{15} Nm, 对应的矩震级约为 $M_w 4.3$. 震源机制以走滑运动为主, 兼具少量正断层分量, 与中国地震局

地球物理研究所和中国地震台网中心确定的初步震源机制解基本一致^[1]. 最佳双力偶对应的两个断层面参数为走向=50°, 倾角=71°, 滑动角=-148°与走向=308°, 倾角=60°, 滑动角=-23°. 搜索得到的三角形震源时间函数的起始时间为0 s, 半宽度为1.75 s, 表明地震持续时间为3.5 s(图2(b)); 迭代反演最终确定得到的震源时间函数持续时间约为4 s, 略长于三角形震源时间函数的持续时间; 地震矩率的峰值出现在1.25 s左右, 也早于三角形震源时间函数所显示的1.75 s(图2(c)).

大多数台站处的三分量地震波形都得到了较好的拟合, 所有38个台站114个分量波形的平均相关系数0.84(见图S1).

永清地区的活断层多以北东向走滑断层为主(图1), 且根据强震加速度记录反映出来的地表峰值加速度分布, 震中东南方向的震感更为强烈, 表明断层的倾向可能指向东南^[1]. 结合地震矩张量结果中双力偶对应的两个节面, 我们选取走向=50°, 倾角=71°, 滑动角=-148°对应的节面, 作为破裂过程反演的断层模型.

图2 地震矩张量解和破裂过程模型. (a) 地震矩张量解和残差随震源深度的变化; (b) 地震矩张量反演中搜索等腰三角形的破裂时间和破裂半宽度得到的残差分布; (c) 矩张量反演得到的等腰三角形震源时间函数(红线)及最终得到的复杂震源时间函数(蓝线); (d) 破裂过程反演得到的断层静态滑动量分布; (e) 破裂过程反演得到的震源时间函数; (f) 断层上滑动分布随时间的变化图像

Figure 2 Seismic moment tensor solution and rupture model. (a) Variations of misfit and moment tensor with depth. (b) Misfit obtained in the grid search of rupture time and half-duration of the triangular source time function. (c) The triangular (red line) and the final determined (blue line) source time functions from seismic moment tensor inversion. (d) Static fault slip distribution estimated in rupture process inversion. (e) Source time function results of rupture process inversion. (f) Temporal variations of cumulated fault slip distributions

经过若干次尝试,以震源为中心,给定一个足够大的长宽各为6.3 km的断层面,并将其划分成 $21 \times 21=441$ 个子断层,每个子断层尺度为0.3 km.采用文献[8]中的方法,通过求解每个子断层的震源时间函数,确定破裂模型.

经过反演尝试,注意到反演全波得到的数据拟合较差,相当比例的台站处的面波难以被有效拟合.造成这一问题的原因是面波观测记录受地表起伏和高程变化的影响.而这一影响很难在基于一维分层模型的格林函数计算中予以考虑.为解决这一问题,压制了面波波形的幅度,并对剩下的P波和S波数据进行了0.04~0.4 Hz的带通滤波,用于破裂过程反演工作.整个反演过程包括两次反演操作.首次反演后,根据观测波形和合成波形,计算每个台站处两者的相位差并对观测波形进行相位改正,保证其与合成波形具有最大的相关系数,在此基础上再次进行反演得到破裂模型.如此可以有效减弱地下结构的不均匀性和各向异性对波形拟合造成的干扰.

反演结果如图2(d)~(f)所示.断层滑动区域尺度约为2 km,最大滑动量约1.3 cm(图2(d)).震源时间函数结果显示,地震矩率峰值出现在破裂开始后1 s左右,主要破裂持续时间持续约2 s,地震总的破裂持续时间长度约为3.5 s(图2(e)).相对于地震矩张量反演得到的震源时间函数结果,破裂过程反演得到的震源时间函数在主要特征上非常相似(图2(b)),只是由于频率更高,细节更为丰富.断层上的滑动分布随时间的变化图像显示,破裂主要以初始破裂点为中心向四周扩展,主要破裂区域在前2 s形成,与震源时间函数显示的主要持续时间一致(图2(f)).破裂开始2 s之后,破裂空间分布的规律性下降,可能意味着断层周边受主要破裂的影响发生了一些零星的破裂,其中在主要破裂区域右上方形成了一块较小的滑动区域.由于规

模较小且可能受后续震相干扰的缘故,这一小块区域的可靠性相对较差.根据破裂模型得到的合成波形较好地解释了观测波形(见图S2).

需要说明的是,由于震源尺度小、持续时间短,中小地震的破裂过程反演存在一定的困难.本文选择反演位移波形来确定断层上的滑动分布.其原因是位移波形中低频成分占优,有助于减少地球模型不确定性的影响,更多地反映有效的震源信息.此外,低频信息反演可以更好地确定断层上的静态滑动分布形态.但与此同时,对滑动分布时空过程的分辨率降低,与此相关的参量的不确定性增加,因此不建议对破裂速度等参量做过多的讨论.

受限于资料缺乏和研究工作开展的时间不长等因素,目前的震源研究多集中于强震和大地震,对中小地震的震源性关注还不是特别多.然而,建立对地震震源全面和深刻的认识需要涉及更广的震级范围.从这个角度上讲,小地震和大地震的震源研究同等重要.本文开展的2018年2月12日永清 $M_w 4.3$ 地震的震源研究工作得到了4级左右地震的震源特征,其结果有助于扩展对震源破裂性质认识的震级下限,为建立和完善震源参数随震级的变化关系(震源定标律)提供新的观测数据.根据本文的反演结果,2018年永清 $M_w 4.3$ 地震的破裂尺度约为2 km,最大滑动量约为1.3 cm.对比Wells根据中强地震得到的震源定标关系^[9],此次地震的破裂尺度相当于 $M_w 4.8$ 地震,滑动量则相当于 $M_w 5.3$ 地震,相对于永清地震 $M_w 4.3$ 的实际规模,偏大0.5~1级.因此,如果能够引入此次地震的破裂参量,将在一定程度上更新和改进已有的震源参量定标关系.

基于得到的破裂模型,采用文献[10,11]中的方法,计算了永清地震的静态应力降,发现最大应力降约为0.6 MPa,平均应力降约0.3 MPa.为

排除较高的空间光滑约束导致的较小的应力降水平,本文也尝试了更小的空间光滑权重,发现平均应力降始终小于1 MPa.也就是说,相对于板内地震10 MPa左右的平均应力降水平,永清地震的应力降明显偏低.实际上,无论是地震矩张量还是破裂过程反演,此次地震的破裂持续时间约为3.5~4.0 s.对于一个 $M_w 4.3$ 地震,这一持续时间明显偏长,表明地震具有较低的拐角频率.如果采用拐角频率来分析此次地震的破裂尺度,估计应力降,同样也将得到较低的应力降水平.

永清地震较低的应力降水平可能与震中附近区域特殊的构造背景和断层性质有关.对1966年邢台地震和1975年海城地震的大地测量资料研究显示,这些发生在华北及其附近区域的地震的应力降都不大,断层上不同区域的应力降介于0.5~5 MPa之间^[12,13].相对于大震,中小地震的应力降数值则普遍更低,多数中小地震的应力降介于0.1~1 MPa之间^[14],只有少数地震的应力降超过1 MPa.这些研究和本文结果都一致表明,华北地区地震的低应力降特征可能具有普遍性.

较低的应力降和“孤立”型地震的发震模式可能存在联系.已有研究表明,主震应力降与余震序列的 b 值相关^[15,16]:主震应力降越小,余震序列的 b 值也越小.另外,主震较低的应力降有可能对应着较低的断层强度.根据对华北地区速度结构成像的研究结果,2018永清地震和2006年文安地震皆位于华北的盆地凹陷区,地壳减薄,地壳结构复杂,内部介质松散,可能造成较低的断层强度^[17],进而形成低应力降的地震事件.松散的介质和低强度的断层可能在一定程度上削弱了断层上的应力传递作用,减少了余震被触发的可能.华北地区的断层强度偏低是否具有普遍性,在多大程度上控制着此地的孕震和发震特征,可能是一个需要深入研究和确认的问题.

参考文献

- 1 China Earthquake Network Center. Comprehensive Atlas of the $M_{4.3}$ Yongqing Earthquake, Langfang, Heibei Province (in Chinese). <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05LargeEQ/201802121831M4.3/zonghe.html>, 2018 [中国地震局地震台网中心. 河北廊坊市永清县 4.3 级地震综合图集. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05LargeEQ/201802121831M4.3/zonghe.html>, 2018]
- 2 Diao G L, Zhang S C, Sun P Q, et al. The $M_{5.1}$ Wen'an earthquake of July 4, 2006. *Seismol Geol*, 2006, 28: 497–502 [刁桂苓, 张四昌, 孙佩卿, 等. 2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级地震. *地震地质*, 2006, 28: 497–502]
- 3 Huang J P, Ni S D, Fu R S, et al. Source mechanism of the 2006 $M_{w5.1}$ Wen'an earthquake determined from a joint inversion of local and teleseismic broadband waveform data (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 52: 120–130 [黄建平, 倪四道, 傅容珊, 等. 综合近震及远震波形反演 2006 文安地震($M_{w5.1}$)的震源机制解. *地球物理学报*, 2009, 52: 120–130]
- 4 Data Management Centre of China National Seismic Network. Waveform Data of China National Seismic Network (in Chinese). China Earthquake Administration, Institute of Geophysics. doi: 10.11998/SeisDmc/SN, <http://www.seisdmc.ac.cn>, 2007 [国家测震台网数据备份中心. 国家测震台网地震波形数据. 中国地震局地球物理研究所, <http://www.seisdmc.ac.cn>, 2007]
- 5 Wang R, Heimann S, Zhang Y, et al. Complete synthetic seismograms based on a spherical self-gravitating Earth model with an atmosphere-ocean-mantle-core structure. *Geophys J Int*, 2017, 210: 1739–1764
- 6 Laske G, Masters G, Ma Z, et al. Update on CRUST1.0-A 1-degree global model of earth's crust. *EGU General Assembly*, 2013, 15: EGU2013–2658
- 7 Liu C, Zhang Y, Xu L S, et al. A new technique for moment tensor inversion with applications to the 2008 Wenchuan $M_{s8.0}$ earthquake sequence. *Acta Seismol Sin*, 2018, 21: 333–343
- 8 Zhang Y, Feng W P, Chen Y T, et al. The 2009 L'Aquila M_{w} 6.3 earthquake: A new technique to locate the hypocentre in the joint inversion of earthquake rupture process. *Geophys J Int*, 2012, 191: 1417–1426
- 9 Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull Seism Soc Amer*, 1994, 84: 974–1002
- 10 Andrews D J. A stochastic fault model 1. Static case. *J Geophys Res*, 1980, 85: 3867–3877
- 11 Ripperger J, Mai P M. Fast computation of static stress changes on 2D faults from final slip distributions. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L18610
- 12 Chen Y T, Lin B H, Lin Z Y, et al. The focal mechanism of the 1966 Hsingtai earthquake as inferred from the ground deformation observations (in Chinese). *Acta Geophys Sin*, 1975, 18: 164–182 [陈运泰, 林邦慧, 林中洋, 等. 根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程. *地球物理学报*, 1975, 18: 164–182]
- 13 Gu H D, Chen Y T, Gao X L, et al. Focal mechanism of Haicheng, Liaoning Province, earthquake of February 4, 1975 (in Chinese). *Acta Geophys Sin*, 1976, 19: 270–285 [顾浩鼎, 陈运泰, 高祥林, 等. 1975 年 2 月 4 日辽宁省海城地震的震源机制. *地球物理学报*, 1976, 19: 270–285]
- 14 Chen X Z, Li Y E, Guo X Y. Temporal-spatial variations of focal dynamic parameters in the capital circle and surrounding areas before the 2006 Wen'an $M_{s5.1}$ earthquake in Hebei Province (in Chinese). *Earthquake*, 2011, 31: 15–25 [陈学忠, 李艳娥, 郭祥云. 河北文安 $M_{s5.1}$ 地震前首都圈及邻区震源动力学参数时空变化特征. *地震*, 2011, 31: 15–25]
- 15 Gibowicz S J. Stress drop and aftershocks. *Bull Seism Soc Amer*, 1973, 63: 1433–1446
- 16 Wetzler N, Brodsky E E, Lay T. Regional and stress drop effects on aftershock productivity of large megathrust earthquakes. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 12012–12020
- 17 Jia S X, Zhang X K. Crustal structure and comparison of different tectonic blocks in North China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2005, 48: 611–620 [嘉世旭, 张先康. 华北不同构造块体地壳结构及其对比研究. *地球物理学报*, 2005, 48: 611–620]

补充材料

图 S1 地震矩张量反演得到的观测(黑线)与合成(红线)数据比较

图 S2 破裂过程反演得到的观测(黑线)与合成(红线)数据比较

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “2018 年 M_w 4.3 河北永清地震的震源机制与破裂特征”

Source mechanism and rupture characteristics of the 2018 M_w 4.3 Yongqing earthquake

Yong Zhang^{1*}, Yuntai Chen^{1,2} & Jin Song³

¹ School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

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

³ China Earthquake Network Center, Beijing 100045, China

* Corresponding author, E-mail: zhygn@163.com

The 12 February 2018 M_w 4.3 Yongqing earthquake, is the largest shock around the Beijing area since the 2006 Wen'an M_s 5.1 earthquake. Similar to the 2006 Wen'an earthquake and many other earthquakes in this region, very few after-shocks were recorded after the Yongqing mainshock. It raises a question whether the isolated earthquake sequence is related or not to the source characteristics. To answer this question, investigations of the source mechanism and rupture process are necessary.

We estimated the moment tensor solution and rupture process by inverting seismograms of 38 local broadband stations within the epicentral distances of 200 km. The duration and shape of the source time function were considered in the moment tensor inversion. Through a grid search, we found a centroid depth of about 16 km of the earthquake. The scalar seismic moment is 3.1×10^{15} Nm, equivalent to a moment magnitude M_w 4.3. From the source time functions, the rupture duration is about 3.5–4.0 s. The mechanism solution suggested a strike slip event, with a minor normal-faulting component. Combined with the geological background, the NE striking and SE dipping nodal plane was identified as the causative fault.

The rupture model was estimated on the NE striking fault plane by using a linear technique. From the static slip distribution, the peak slip is about 1.3 cm, and the rupture dimension is approximately 2 km. Most slips are concentrated around the major slip asperity. The source time function suggests a source duration of about 3.5 s, and the peak moment rate appearing at 1 s, which are well consistent with those from the moment tensor inversion. The earthquake ruptures expanded from the hypocenter in a circular dislocation model at 0–2 s. A few weak slips appeared at shallow depth after 2 s, which might be caused by errors in observation and Green's functions and were less reliable.

Both the peak slip and the rupture dimension of the 2018 Yongxing earthquake are higher than the values of an M_w 4.3 earthquake estimated from existing earthquake scaling law. They may provide additional constraints for further correction of the parameter-magnitude scaling laws. The maximum and average stress drops are about 0.6 and 0.3 MPa, respectively, remarkably lower than 10 MPa of a typical intraplate earthquake. The relatively low stress drop indicates that the fault strength is weak. Seismic tomography in the Huabei area has found that the crust is fractured, which may lead to weak faults there. The fractured crust and weak fault can block the stress transformation to some extent, and are likely to cause isolated earthquake sequence.

Yongqing earthquake, focal mechanism, rupture process

doi: 10.1360/N972018-00364