

姜祥华、韩颜颜、杨文等,2017,2017年精河  $M_s$ 6.6地震序列及震源特征初步分析,中国地震,33(4),682~693。

# 2017年精河 $M_s$ 6.6地震序列 及震源特征初步分析

姜祥华 韩颜颜 杨文 孟令媛

中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街5号 100045

**摘要** 2017年8月9日新疆博尔塔拉州精河县发生  $M_s$ 6.6地震,震中  $44.3^\circ\text{N}$ 、 $82.9^\circ\text{E}$ ,震源深度11km,精河地震发生在库松木契克山前断裂附近,基于远震波形记录反演的震源机制为逆冲型,地质调查结果显示主震破裂未出露地表。利用地震精定位研究余震的空间分布,结果显示,余震展布与库松木契克山前断裂的走向基本吻合,且余震主要分布在主震西侧,单侧破裂特征明显,余震的深度集中在5~15km。基于  $M-t$  图分析序列的衰减特征发现,截至2017年8月20日,序列中  $M_L$ 2.0、 $M_L$ 3.0余震相对丰富,衰减基本正常。G-R关系给出的  $b$  值为0.54,外推最大余震震级为  $M_s$ 5.6,  $h$  值为2.17,均显示该序列为主-余型。 $M_s \geq 4.0$ 余震的等待时间与发生时间较好地满足双对数线性关系,同样为主-余型地震的特征。断层面上静态滑动量分布相对单一且集中,最大滑动位于沿倾向10km处附近,与地质调查主震断层未出露地表的结果一致,同时也表明主震破裂较充分。基于数字波形资料计算出的余震视应力与震级间很好地符合指数关系,扣除震级变化影响后的序列视应力未出现显著高值,也表明此次破裂的能量释放比较充分。

**关键词:** 精河  $M_s$ 6.6地震 精定位 地震序列 震源参数

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0682-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

北京时间2017年8月9日7时27分,新疆博尔塔拉州精河县发生  $M_s$ 6.6地震,震中  $44.3^\circ\text{N}$ 、 $82.9^\circ\text{E}$ ,震源深度11km ([http://10.5.160.59/netoffice/moduleinfoportal/custom/dzj/dzj\\_news\\_display.jsp?GeneralID=17676](http://10.5.160.59/netoffice/moduleinfoportal/custom/dzj/dzj_news_display.jsp?GeneralID=17676))。震中距精河县城约37km,距博尔塔拉蒙古自治州博乐市约95km,距伊犁哈萨克自治州伊宁市约130km,距乌鲁木齐市约380km,石河子、昌吉、乌鲁木齐等多地有震感。截至8月9日11时,地震共造成精河县32人受伤,其中,重伤2人。地震还造成精河县142间房屋倒塌,1060间房屋受损,61处院墙、26座畜圈倒塌,4条牧道受损,县城62栋楼房裂缝;伊犁州2间房屋、1座畜圈倒塌,544间房屋、36座畜圈受损。

[收稿日期] 2017-10-24; [修定日期] 2017-12-18

[项目类别] 川滇国家地震监测预报实验场项目(2016CESE0101)、国家自然科学基金(41504047、41404045)共同资助

[作者简介] 姜祥华,男,1987年生,博士,工程师,主要从事地震活动性、地震波数值模拟和速度结构反演等方面的研究。

E-mail: jiangxh@seis.ac.cn

韩颜颜,通讯作者,女,1985年生,博士,高级工程师,主要从事固体潮调制性、速度结构层析成像和复杂地震波场数值模拟等方面的研究。E-mail: hanyy@seis.ac.cn

精河  $M_s$ 6.6 地震发生在库松木契克山前断裂附近, 该区域地震活动水平较高, 有历史记录以来, 震中附近 100km 范围内共发生 5.0 级以上地震 27 次, 其中, 6.0 级以上地震 9 次, 6.5 级以上地震 5 次, 分别为 1765 年 2 月 9 日精河 6.5 级地震, 1812 年 3 月 8 日尼勒克东 8.0 级地震, 1944 年 3 月 10 日新源东北 6.5 级、7.2 级地震和 1955 年 4 月 24 日乌苏西南 6.5 级地震。5 次 6.5 级以上地震中, 距离最近的为 1765 年 2 月 9 日精河 6.5 级地震, 震中位于此次震中正北方向约 48km 处; 时间最近的为 1955 年 4 月 24 日乌苏西南 6.5 级地震, 震中距此次震中约 56km; 震级最大的为 1812 年 3 月 8 日尼勒克东 8.0 级地震, 震中距此次震中约 80km (图 1)。

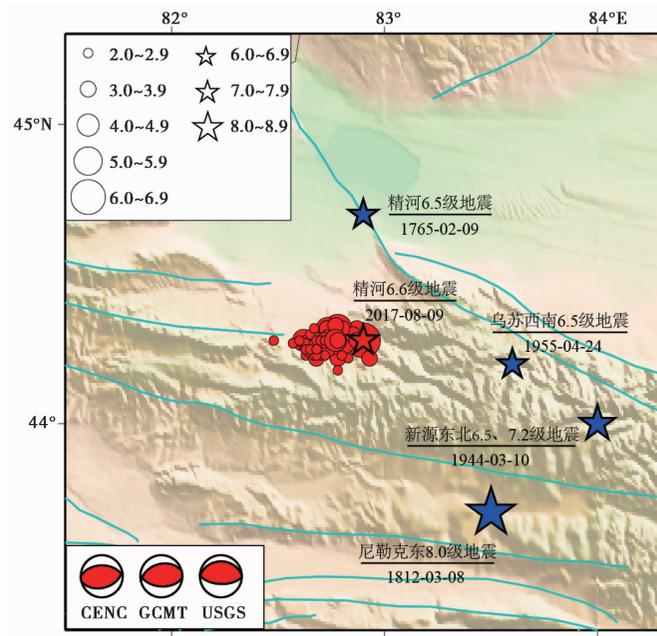


图 1 精河  $M_s$ 6.6 地震震中、震源机制、 $M_L \geq 2.0$  余震分布

以及距此次震中 100km 范围内 6.5 级以上地震分布

截止日期 2017 年 8 月 20 日; 红色五角星为精河地震震中; 红色实心圆为  $M_L \geq 2.0$  余震;

蓝色五角星为距此次震中 100km 范围内 6.5 级以上地震

根据中国地震台网中心数据, 截至 2017 年 8 月 20 日 23 时 59 分, 精河  $M_s$ 6.6 地震序列共记录到余震 324 次, 其中,  $M_s$ 3.0~3.9 地震 16 次,  $M_s$ 4.0~4.9 地震 6 次, 最大余震为 8 月 9 日 7 时 44 分发生的  $M_s$ 4.7 地震(表 1)。根据中国地震局地质研究所给出的发震构造, 此次地震的发震断层未出露至地表, 震中位置靠近库松木契克山前断裂附近, 该断裂为全新世右旋逆断层, 断层走向  $290^\circ \sim 300^\circ$ , 断层倾向 SSW, 断层倾角  $40^\circ \sim 60^\circ$  ([http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05\\_LargeEQ/201708090727M6.6/zonghe.html](http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05_LargeEQ/201708090727M6.6/zonghe.html))。中国地震台网中心(CENC)基于远震波形记录给出该地震的震源机制, 结果显示精河地震为逆冲型, 震源机制所显示的节面方向与断层走向基本符合, 余震空间分布呈近 EW 向特征, 与附近发震断层走向及震源机制解节面方向相对一致(图 1、表 2)。

本文主要研究精河  $M_s$ 6.6 地震序列及震源参数特征。首先, 利用余震精定位结果分析

表 1 精河  $M_s 6.6$  地震、 $M_s \geq 3.0$  余震及视应力

序号	发震日期 (年-月-日)	发震时刻	北纬 /(°)	东经 /(°)	深度 /km	震级 $M_s$	震中地点	视应力 /MPa
1	2017-08-09	07:27	44.3	82.9	11	6.6	新疆精河县	—
2	2017-08-09	07:31	44.3	82.8	6	4.0	新疆精河县	—
3	2017-08-09	07:32	44.3	82.7	12	4.0	新疆精河县	—
4	2017-08-09	07:35	44.3	82.9	8	3.2	新疆精河县	—
5	2017-08-09	07:36	44.3	82.7	13	3.3	新疆精河县	—
6	2017-08-09	07:39	44.3	82.7	7	4.5	新疆精河县	3.4381
7	2017-08-09	07:44	44.3	82.8	8	4.7	新疆精河县	3.6259
8	2017-08-09	08:22	44.3	82.7	6	4.0	新疆精河县	1.7855
9	2017-08-09	08:27	44.3	82.7	5	3.1	新疆精河县	0.9886
10	2017-08-09	08:40	44.3	82.6	14	3.7	新疆精河县	1.5738
11	2017-08-09	08:51	44.3	82.7	12	3.0	新疆精河县	0.7152
12	2017-08-09	08:52	44.3	82.7	5	3.1	新疆精河县	0.747
13	2017-08-09	08:54	44.3	82.7	12	3.1	新疆精河县	0.6826
14	2017-08-09	13:22	44.3	82.8	8	4.6	新疆精河县	4.7043
15	2017-08-09	18:02	44.3	82.9	7	3.2	新疆精河县	0.7426
16	2017-08-09	23:47	44.3	82.8	7	3.3	新疆精河县	0.7563
17	2017-08-10	01:14	44.3	82.7	7	3.3	新疆精河县	0.7208
18	2017-08-10	08:10	44.3	82.7	8	3.3	新疆精河县	1.1124
19	2017-08-12	02:20	44.3	82.8	7	3.1	新疆精河县	0.5698
20	2017-08-12	06:19	44.3	82.7	16	3.3	新疆精河县	0.6665
21	2017-08-13	15:41	44.3	82.9	8	3.0	新疆精河县	0.7152
22	2017-08-16	20:33	44.3	82.8	7	3.0	新疆精河县	—
23	2017-08-18	17:19	44.3	82.7	8	3.4	新疆精河县	—

表 2 精河  $M_s 6.6$  地震主震震源参数

研究机构	震中		深度 /km	节面 I			节面 II			地震矩 /( $10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$ )	矩震级 $M_w$
	北纬 /(°)	东经 /(°)		走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)		
CENC <sup>①</sup>	44.27	82.89	11	76	44	80	269	47	99	—	6.3
GCMT <sup>②</sup>	44.36	82.75	27.9	255	41	75	94	50	103	3.87	6.3
USGS <sup>③</sup>	44.30	82.83	20.0	269	30	87	92	60	92	3.99	6.3

注:①中国地震台网中心 ([http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05\\_LargeEQ/201708090727M6.6/zonghe.html#\\_图07](http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05_LargeEQ/201708090727M6.6/zonghe.html#_图07)、震源机制解);②美国 GCMT (<http://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt/cgi-bin/CMT4/form?type=ynd&yr=2017&mo=8&day=8&oyr=1976&omo=1&oday=1&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&oday=1&otype=nd&nday=1&lmw=0&umw=10&lms=0&ums=10&lmb=0&umb=10&llat=-90&ulat=90&llon=-180&ulon=180&lhd=0&uhd=1000&lts=-9999&uts=9999&lpe1=0&upe1=90&lpe2=0&upe2=90&list=0>);③美国地质调查局 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/us2000a65e#moment-tensor>)。

序列的空间分布特征;然后,基于  $M-t$  图分析序列随时间的衰减特征,并计算  $b$  值、 $h$  值等参数;再结合已知的主震震源参数反演结果,利用波形资料计算序列中显著余震的视应力等参数,通过分析余震视应力随时间及震级的变化特征,进一步明确该地震序列的震源参数特征和序列类型。

### 1 余震精定位的空间分布特征

地震活动与构造密切相关,分析小震时空特征有助于推断断层几何形态及地壳内部应力状态(陈佳维等,2017),因此,准确地确定余震的位置,尤其是深度,对判断序列发展趋势具有重要作用(郑勇等,2017)。为了更好地考察余震在空间上的分布情况,本研究对精河  $M_s6.6$  地震序列采用双差定位方法进行重新定位,到时数据基于 2017 年 8 月 9~20 日  $M_L \geq 2.0$  地震事件相应的新疆地震台网震相观测报告(Waldhauser et al,2000;朱艾澜等,2005;杨文等,2017)。选择震中距 300km 以内台站记录到的 Pg、Sg 波震相资料,共计 1039 条,一般情况下,P 波震相为初至波,读数精度高于 S 波,故在计算过程中对 P 波读数赋予 1.0 的权重,对 S 波读数赋予 0.5 的权重,并采用 Crust1.0 模型作为地壳速度模型。

共重新定位出 53 个地震事件,重新定位后的余震分布如图 2(a) 所示,与前文所述的余震分布基本一致,也明显地沿近 EW 向分布,与库松木契克山前断裂的走向基本一致。图 2(a) 中 AA'、BB' 为 2 条测线,图 2(b)、2(c) 给出了余震在相应剖面上的分布情况。余震的深度主要集中在 5~15km, BB' 剖面上余震主体分布较窄,集中在主震附近,其中,  $M_L \geq 3.0$  地震分布整体呈向北倾斜状,与库松木契克山前断裂的倾向大体吻合。AA' 剖面显示,余震均位于主震西侧, A' 至 A 由东至西呈现明显的单侧破裂特征,表明此次地震沿走向的破裂比较充分。

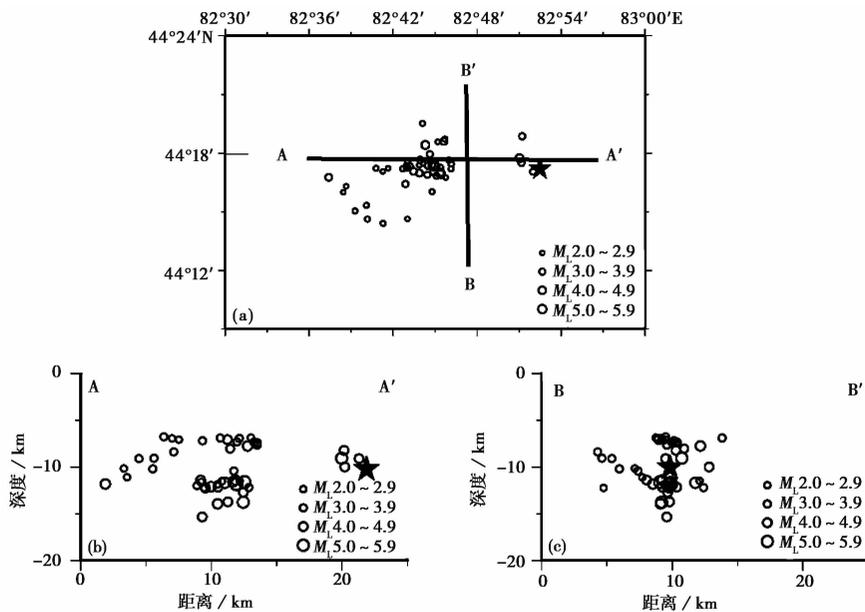


图 2 精河  $M_s6.6$  地震及余震重新定位后震中分布及其不同方向深度剖面

五角星为精河地震;空心圆为  $M_L \geq 2.0$  余震

## 2 余震序列随时间的衰减特征

据中国地震台网测定,精河  $M_s6.6$  地震的最大震级余震为 8 月 9 日 7 时 44 分  $M_s4.7$  地震,其发生在主震之后约 17min。图 3 给出了精河  $M_s6.6$  地震序列的  $M-t$  图。由图 3 可见,主震之后 2、3 级余震相对丰富,余震整体呈现明显的随时间衰减特征。8 月 10 日 8 时之后,余震活动明显地减弱, $M_L \geq 3.0$  地震活动的时间间隔明显变大,且在 13~16 日出现了超过 2 天的  $M_L \geq 3.0$  地震平静。自 8 月 9 日 13 时 22 分  $M_s4.6$  地震之后直到 8 月 20 日 23 时 59 分,其间再无  $M_s \geq 4.0$  地震活动,震级最大的余震为 8 月 18 日 17 时 19 分的  $M_s3.4$  地震(表 1、图 3)。

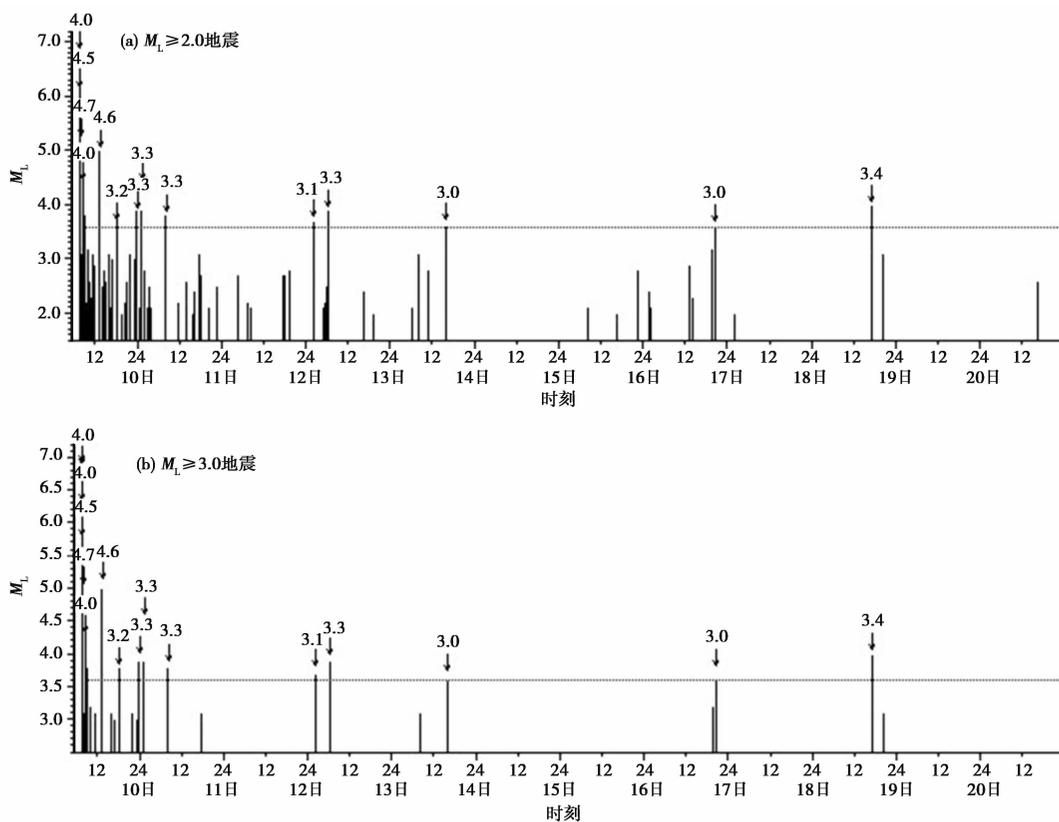


图 3 2017 年 8 月 9~20 日精河  $M_s6.6$  地震序列  $M-t$  图

由蒋海昆等(2006b、2006c)对中国大陆中强地震序列类型的统计研究结果可知,1970 年以来记录相对完整的 294 次 5.0 级以上地震序列中,绝大多数为主-余型或孤立型,约占 82.3%,1970 年以来新疆地区可明确判定序列类型的 10 次 6.5 级以上地震全部都为 主-余型。最大震级地震与次大震级地震的震级差也可用来进行序列分类, $\Delta M \geq 2.5$  且余震次数较少的为孤立型地震, $0.6 \leq \Delta M \leq 2.4$  为主-余型地震, $\Delta M < 0.6$  为多震型地震(蒋海昆等,2006a)。参照表 1,截至 2017 年 8 月 20 日最大余震震级为  $M_s4.7$ ,与主震的震级差为 1.9 级,小于 2.4,因此,可以排除序列为孤立型的可能,进一步结合前文关于历史地震的统计结果及图 2、3 余震的空间、时间分布初步判定,此次精河  $M_s6.6$  地震序列为主-余型的可能性较大。

G-R关系  $\lg N = a - bM$  是古登堡和里克特在研究全球地震活动性时提出的经验公式,它表明地震频度的对数与震级之间存在线性关系,其中, $b$  值为直线斜率, $b$  值的大小直接反映了不同震级地震之间的比例关系。 $h$  值则是判断在较短时间、较小区域内发生的一群地震是否为前震的参数(张国民等,2001;刘正荣等,1986)。图 4、5 分别为精河  $M_s6.6$  地震余震序列的G-R关系和衰减系数  $h$  值拟合图。由图 4、5 可见,序列的  $b$  值为 0.54,反映出较小震级地震所占比例较小,外推最大余震震级约为  $M_s5.6$  ( $M_L5.9$ ),与主震震级差大于 0.6 且小于 2.4, $h$  值为 2.17,明显大于 1,以上参数结果均呈现主-余型地震序列的特征。

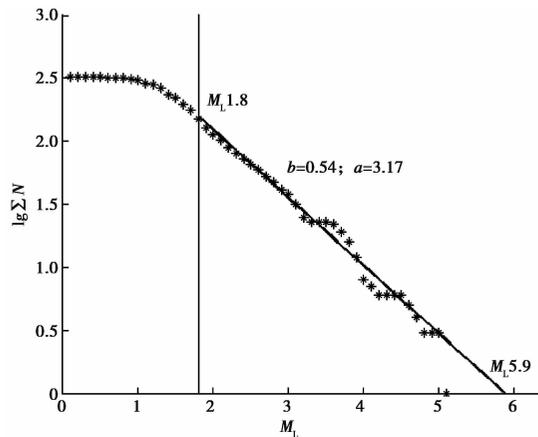


图 4 精河  $M_s6.6$  地震余震G-R关系拟合图  
截至 2017 年 8 月 20 日 23 时 59 分

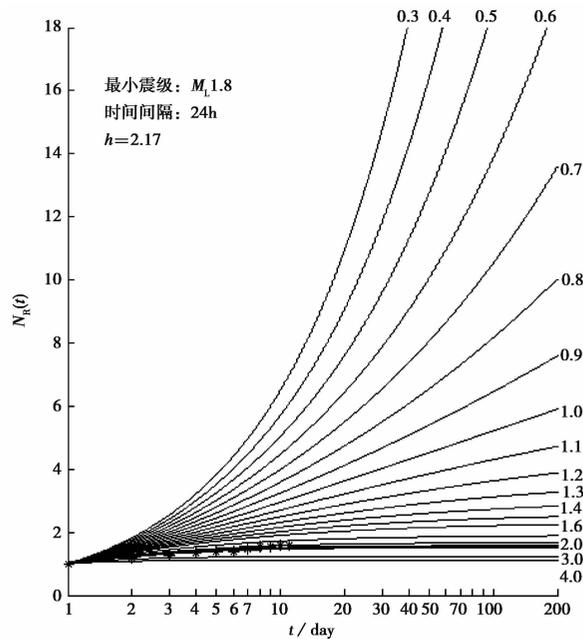


图 5 精河  $M_s6.6$  地震余震衰减关系  $h$  值拟合图  
截至 2017 年 8 月 20 日 23 时 59 分

谷继成等(1979)针对主-余型地震指出,其余震的等待时间  $\Delta t$  与发生时间  $t$  遵从双对数线性关系

$$\lg \Delta t = A \lg t + B \quad (1)$$

其中,等待时间  $\Delta t$  指余震距上次余震的时间;发生时间  $t$  指余震距主震的时间。图6对此次精河  $M_s 6.6$  地震序列中  $M_s \geq 4.0$  余震的等待时间与发生时间在双对数坐标下进行了拟合,结果显示出较好的线性关系,同样符合主-余型地震序列的特征,这进一步表明精河  $M_s 6.6$  地震序列为主-余型的可能性较大。

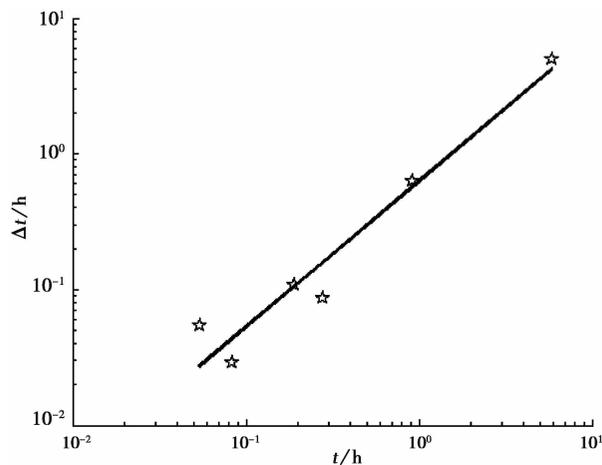


图6 精河  $M_s 6.6$  地震序列中  $M_s \geq 4.0$  余震的等待时间法计算结果

### 3 主震震源参数及余震视应力特征

#### 3.1 主震震源参数

主震的震源机制解和主要滑动量分布对于确定发震断层和孕震机制具有重要意义(Xie et al, 2015)。精河  $M_s 6.6$  地震的矩震级  $M_w$  约为 6.3。断层节面 I 走向  $76^\circ$ , 倾角  $44^\circ$ , 滑动角  $80^\circ$ ; 节面 II 走向  $269^\circ$ , 倾角  $47^\circ$ , 滑动角  $99^\circ$ ; 其中, 节面 I 为发震断层, 波形拟合的最佳质心深度为 23km ([http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05\\_LargeEQ/201708090727M6.6/zonghe.html](http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05_LargeEQ/201708090727M6.6/zonghe.html))。GCMT (<http://www.globalcmt.org>) 和 USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000a65e#moment-tensor>) 所给出的震源机制解相关结果与中国地震台网中心的结果基本一致, 震源机制所显示的节面方向均与库松木契克山前断裂走向基本吻合(表 2)。由陈运泰院士小组对精河地震断层面上静态滑动量分布的反演结果可知(图 7) (<http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw275885.html>), 发震断面上的滑动量分布范围较小, 有效破裂面积不大, 最大滑动量集中在大约沿倾向距离 10km 处, 与主震破裂未出露地表的野外地质调查结果一致。滑动量较一致的梯度分布反映出主震破裂较为充分, 相应的后续小震会相对偏少, 这可能是前文算得的序列  $b$  值偏低的原因。另外, 主震的主要滑动量分布与余震位置间有明显的对应关系, 通常余震主要分布在主震破裂区的周围(郑勇等, 2017)。前文精定位结果显示, 余震均分布在初始破裂点西侧, 此处滑动量反演结果也显示破裂主要

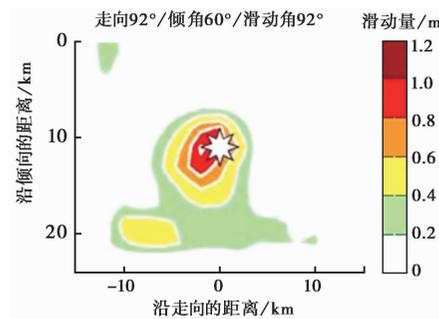


图 7 精河  $M_s6.6$  地震断层面上静态滑动量分布  
结果来自陈运泰院士研究小组(张勇、许力生、陈运泰)

发生在主震西侧,两者高度吻合,这都一致表明主震为一次单侧破裂。

### 3.2 余震视应力

地震视应力作为一种震源参数,被认为能够反映震源所在区域的应力水平。地震视应力越高,震源所在区域的应力水平就越高;反之,震源所在区域的应力水平则低(陈学忠等, 2003)。刘红桂等(2006、2007)对云南地区中小地震视应力的研究发现,对于云南地区,中小地震的视应力超过某一特定值即可作为预测该地区未来发生中强地震的一个参考指标。李艳娥等(2012)研究了 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震前四川地区视应力的空间分布及随时间的变化发现,震前 5 年的时间内,汶川地震震源区的视应力呈现先上升、后下降的过程,且在临震前有一定幅度的上升。

本文利用中国地震台网中心提供的数字波形资料,计算了精河  $M_s6.6$  地震余震序列的视应力,计算采用距主震震中 300km 范围内的 17 个台站所记录的波形资料。地震视应力的计算公式为(Wyss, 1970)

$$\sigma_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (2)$$

其中,  $\sigma_{app}$  为地震视应力;  $\mu$  为剪切模量,通常取值为  $3 \times 10^{10}$  Pa;  $E_s$  为地震波辐射能量;  $M_0$  为地震矩。地震视应力的物理意义为发震断层单位面积每单位错动所释放的地震波能量。

利用波形资料对震源谱进行反演,可以计算出地震波辐射能量和地震矩,进而利用式(2)求得视应力。中小地震的震源谱可用 Brune 圆盘模型描述(Brune, 1970),震源谱可用下式表示

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (3)$$

其中,  $\Omega_0$  为零频极限值;  $f_c$  为拐角频率,利用实际波形数据可计算得到  $\Omega_0$  和  $f_c$ ,计算步骤可参见陈学忠等(2007),进一步可用下式求得地震矩  $M_0$ (李艳娥等, 2015)

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 \Omega_0 d}{R_{\theta\varphi}} \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为地壳介质密度(取  $2.71 \text{g/cm}^3$ );  $v$  为波速(P 波取  $6.1 \text{km/s}$ , S 波取  $3.5 \text{km/s}$ );  $d$  为震

源距;  $R_{\theta\varphi}$  为辐射因子。地震波辐射能量  $E_s$  可以通过对速度谱  $V(f)$  的平方积分计算得到 (Andrews, 1986)

$$E_s = 8\pi\rho\beta \int_0^{\infty} V(f)^2 df \quad (5)$$

$\beta$  为 S 波速度, 计算过程中需考虑低频和高频的补偿 (陈学忠等, 2007; 李艳娥等, 2015), 则

$$E_s = 8\pi\rho\beta \left\{ \frac{1}{3} (2\pi f_1 \Omega_0)^2 f_1 + \int_0^{\infty} V(f)^2 df + [2\pi f_3 \Omega(f_3)]^2 f_3 \right\} \quad (6)$$

式中,  $f_1$ 、 $f_3$  分别为拟合震源谱过程中选取的最低频率和最高频率, 具体计算时通常采用多个台站的波形数据, 采用下面 2 个公式 (Archuleta et al, 1982) 对各台站的  $M_0$  和  $E_s$  求平均值, 再代入式(2)即可求得视应力

$$\bar{x} = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i\right) \quad (7)$$

$$\Delta x = \exp\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln x_i - \ln \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中,  $x_i$  为各台站的地震矩或地震波辐射能;  $N$  为台站数;  $\Delta x$  为误差因子。

表 1 最后 1 列为第 6~21 个地震的视应力计算结果, 第 2~5 个地震由于发震时间相隔较近, 前后波形相互干扰, 无法准确地算出其视应力。第 22、23 个地震, 由于尚未下载到相应的波形资料, 故未参与计算。对于第 11、12 个地震, 也存在波形相互干扰的情况, 无法利用波形直接算出可靠结果, 但为了保证序列的连续性, 故采用序列中相同震级地震视应力的平均值替代。由表 1 可见, 余震的视应力呈现出按震级分档的特征, 即 3 次  $M_s \geq 4.5$  地震, 视应力均大于 3.0MPa; 2 次  $3.5 < M_s \leq 4.0$  地震, 视应力为 1.5~2.0MPa; 11 次  $M_s \leq 3.5$  地震, 视应力几乎都小于 1.0MPa, 只有第 18 个地震的视应力达到了 1.1MPa。整个余震序列的视应力与震级间存在正相关性, 即余震震级大时, 视应力也较大; 余震震级小时, 视应力也较小。王琼等 (2005)、王生文等 (2014) 研究了 1999 年 11 月 29 日岫岩  $M_s 5.4$  地震序列的视应力, 发现余震视应力与震级间成指数关系; 郭寅等 (2017) 对于新疆几次 6 级地震序列视应力特征的研究也发现, 余震视应力与震级间的指数关系特征。精河地震余震视应力随震级的分布如图 8(a) 所示, 也呈现出指数变化特征, 视应力与震级间的拟合关系如下

$$\lg \sigma_{\text{app}} = 1.11 M_s - 3.80 \quad (9)$$

相关系数为  $r=0.96$ 。利用上述拟合关系将所有余震的视应力换算成  $M_s 4.0$  震级的值, 得到扣除震级影响后的余震视应力变化如图 8(b) 所示, 由于前几个余震的时间间隔较短, 为了显示清晰, 采用序号作为横坐标将视应力等间隔画出。由图 8(b) 可见, 视应力整体上较为一致, 只有第 14 个地震 ( $M_s 4.6$ ) 的视应力相对偏高, 该地震为序列中震级第 2 大余震, 发震时间距主震发生不到 6h, 且此后序列中再未有  $M_s \geq 4.0$  地震 (表 1), 因此, 不排除该视应力高值与主震发生后该区的应力调整有关。此后, 余震视应力虽略有起伏, 但并未出现明显的高值异常。综上所述, 精河地震余震的视应力与震级间呈现良好的指数关系, 扣除震级影响后的序列视应力未出现显著高值异常特征, 没有证据表明序列会再次发生强震, 因此, 可初步判定精河  $M_s 6.6$  地震序列为主-余型。

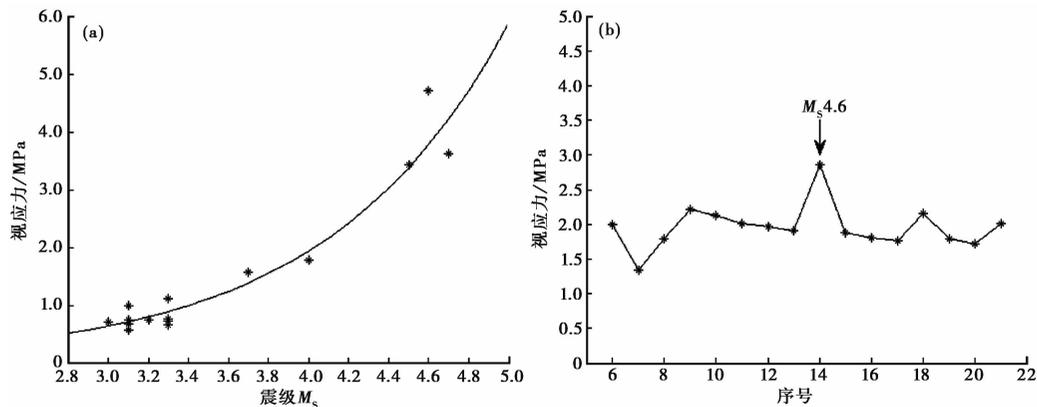


图 8 精河地震余震序列的视应力-震级关系(a)及扣除震级影响后的序列视应力(b)

## 4 讨论和结论

精河  $M_s$ 6.6 地震发生在库松木契克山前断裂附近,该断裂为全新世右旋逆断层,断层走向近 EW 向,推测发震断层破裂未出露至地表。余震总体沿近 EW 向分布,与附近断层走向基本一致。此次地震所在区域历史地震活动水平较高,距震中 100km 范围内据历史记载曾发生过 5 次 6.5 级以上地震,最大震级为 8.0 级(1812 年 3 月 8 日尼勒克东 8.0 级)。对历史地震的统计显示,震中附近 1970 年以来的强震多为主-余型,如 1973 年 6 月 3 日精河东南  $M_s$ 6.0、2011 年 11 月 1 日尼勒克  $M_s$ 6.0、2012 年 6 月 30 日新源  $M_s$ 6.6 等地震。

小震精定位结果显示,精河  $M_s$ 6.6 地震的余震分布与库松木契克山前断裂的走向相对吻合,剖面结果显示,余震深度主要集中在 5~15km,与主震的震源深度较为一致。余震基本都位于主震西侧,具有明显的单侧破裂特征,表明此次地震的破裂比较充分。截至 2017 年 8 月 20 日 23 时 59 分,精河  $M_s$ 6.6 地震序列中 2、3 级余震丰富,序列衰减基本正常,序列的  $b$  值为 0.54,外推最大余震震级为  $M_s$ 5.6, $h$  值为 2.17, $M_s \geq 4.0$  余震的等待时间与发生时间也较好地满足主-余型地震序列的双对数线性关系特征。因此,可判定精河  $M_s$ 6.6 地震序列为主-余型。

中国地震台网中心、GCMT 和 USGS 给出的震源机制解相对一致,且所给节面方向均与该处断层走向吻合;陈运泰院士小组反演给出的断层面静态滑动量分布相对单一,最大滑动量集中分布在沿倾向 10km 处附近,与地质调查主震断层未出露地表的结果一致,且表明主震破裂较充分;滑动量分布与精定位显示的余震分布高度一致,并且也显示主震为一次单侧破裂。基于数字波形资料计算出的余震视应力与震级间存在正相关性,且很好地符合指数分布特征,扣除震级变化影响后的视应力整体上稳定,未出现显著高值特征,未显示出序列会再次发生强震的证据。综合分析认为,精河  $M_s$ 6.6 地震破裂的能量释放比较彻底。

综上所述,精河  $M_s$ 6.6 地震序列为主-余型,主发震断层未破裂至地表,主震破裂所释放的能量较彻底,地震序列衰减正常。

致谢:感谢李金、郭凯等人为本研究提供的数据资料,感谢刘桂萍研究员、蒋海昆研究员、张永仙研究

员、周龙泉研究员及中国地震台网中心预报部测震组全体等对本文给予的启发和帮助,感谢评审专家对本文提出了宝贵建议。

### 参考文献

- 陈佳维、崔效锋、胡幸平,2017,唐山及周边地区中小地震重定位及其构造特征,《华北地震科学》,35(1),1~9。
- 陈学忠、李艳娥、郭祥云,2007,河北文安  $M_s$ 5.1 地震前震中周围地区小震视应力随时间的变化,《中国地震》,23(4),327~336。
- 陈学忠、王小平、王林瑛等,2003,地震视应力用于震后趋势快速判定的可能性,《国际地震动态》,(7),1~4。
- 谷继成、谢小碧、赵莉,1979,强余震的时间分布特征及其理论解释,《地球物理学报》,22(1),32~46。
- 郭寅、王琼,2017,新疆几次6级地震序列视应力特征研究,《地震》,37(3),169~179。
- 蒋海昆、代磊、侯海峰等,2006a,余震序列性质判定单参数判据的统计研究,《地震》,26(3),17~25。
- 蒋海昆、李永莉、曲延军,2006b,中国大陆中强地震序列类型的空间分布特征,《地震学报》,28(4),389~398。
- 蒋海昆、曲延军、李永莉等,2006c,中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征,《地球物理学报》,49(4),1110~1117。
- 李艳娥、陈丽娟、王生文等,2015,山东地区地震视应力时空变化特征研究,《地震》,35(2),80~90。
- 李艳娥、陈学忠、王恒信,2012,汶川8.0级地震前四川地区地震视应力时空变化特征,《地震》,32(4),113~122。
- 刘红桂、刘杰、丁页岭等,2006,地震视应力在云南地震序列中的前兆特征,《地震》,28(5),462~471。
- 刘红桂、王培玲、杨彩霞等,2007,地震视应力在地震预测中的应用,《地震》,29(4),437~445。
- 刘正荣、孔绍麟,1986,地震频度衰减与地震预报,《地震研究》,9(1),3~14。
- 王琼、陈学忠、王林瑛,2005,岫岩地震序列视应力变化及其预测意义,《地震》,25(2),91~97。
- 王生文、李艳娥、郭祥云等,2014,1999年11月29日岫岩  $M_s$ 5.4 地震序列视应力的再研究,《地震》,34(3),50~61。
- 杨文、龙海云、姚琪,2017,2015年7月3日新疆皮山  $M_s$ 6.5 地震序列活动性及重新定位研究,《地震》,37(1),166~174。
- 张国民、傅征祥、桂燮泰等,2001,地震预报引论,26~31,北京:科学出版社。
- 郑勇、谢祖军,2017,地震震源深度定位研究的现状与展望,《地震研究》,4(2),167~175。
- 朱艾澜、徐锡伟、周永胜等,2005,川西地区小震重新定位及其活动构造意义,《地球物理学报》,48(3),629~636。
- Andrews D J, 1986, Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, In: Das S, Boatwright J, Scholz C H, Earthquake Source Mechanics, Washington D C; AGU, 259~267.
- Archuleta R, Cranswick E, Mueller C, et al, 1982, Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, earthquakes sequence, *J Geophys Res*, 87, 4595~4607.
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic waves from earthquakes, *J Geophys Res*, 75, 4997~5009.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull Seism Soc Am*, 90, 1353~1368.
- Wyss M, 1970, Apparent stresses of earthquakes on ridges compared to apparent stresses of earthquakes in trenches, *Geophys J R, astrSoc*, 19, 479~484.
- Xie ZJ, Zheng Y, Liu C L, et al, 2015, Source parameters of the 2014  $M_s$ 6.5 Ludian earthquake sequence and their implications on the seismogenic structure, *SRL*, 86(6), 1614~1621.

## Preliminary analysis of the 2017 Jinghe $M_s6.6$ earthquake sequence and its seismic source characteristics

*Jiang Xianghua Han Yanyan Yang Wen Meng Lingyuan*

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract** On August 9, 2017, the earthquake with  $M_s6.6$  occurred in Jinghe County, Xinjiang, China, with epicenter at  $44.3^\circ\text{N}, 82.9^\circ\text{E}$ . Its focal depth was 11km. The Jinghe  $M_s6.6$  earthquake occurred near Kusongmuqike piedmont fault. Its focal mechanism inverted from teleseismic waveforms is reverse faulting. Geological investigation shows that the rupture in the earthquake didn't reach to the earth surface. According to the results of high-resolution event relocation, the aftershocks distribute nearly along the strike of the Kusongmuqike piedmont fault. As most of the aftershocks locate in the west of the mainshock, the rupture is likely to propagate in single direction. The focal depths of the aftershocks concentrate between 5km to 15km. In order to study the feature of the earthquake sequence, we graph their magnitudes against time up to August 20, 2017. The earthquakes with  $M_L2.0$  and  $M_L3.0$  are abundant and the sequence attenuates near regularly. The  $b$ -value from the G-R law is 0.54, and the extrapolated maximum aftershock magnitude is  $M_s5.6$ . The  $h$ -value from Omori's law is 2.17. The relation between the 'wait time' of an aftershock with magnitude over  $M_s4.0$  and its 'occurrence time' is studied. We find the logarithmic of the 'wait time' is linear with the logarithmic of the 'occurrence time'. So the Jinghe earthquake sequence should be a mainshock-aftershock type. Inversion from the teleseismic data shows that slips distribute simply on the fault. The maximum slip concentrates on 10km along the dip. This result is consistent with the geological investigation which proposed the rupture didn't extend to the earth surface. The fault slips also indicate that the rupture in the mainshock is sufficient. Apparent stress of aftershocks calculated from digital waveforms increases exponentially with magnitude. Relative apparent stress which removed the change with magnitude doesn't have significantly high value. That also indicates energy was released sufficiently in the rupture process.

**Key words:** Jinghe  $M_s6.6$  earthquake; High-resolution earthquake location; Earthquake sequence; Seismic source parameter