

白兰淑、刘杰、张莹莹等,2017,2017年精河6.6级地震余震序列重新定位和发震构造,中国地震,33(4),703~711。

2017年精河6.6级地震 余震序列重新定位和发震构造

白兰淑¹⁾ 刘杰¹⁾ 张莹莹¹⁾ 吴清²⁾ 安艳茹¹⁾

1) 中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街5号 100045

2) 中国地震局地球物理研究所,北京 100081

摘要 采用双差定位方法,利用中国地震台网的数据对2017年8月9日精河6.6级地震的余震序列进行了重新定位。截至2017年8月14日16时,共获得209个余震的重新定位结果。结果显示,余震主要呈近EW向或NW向分布,余震区长约50km,宽约17km。余震分布在主震的西侧,推断此次地震单侧破裂。余震震源深度为1~25km,其中,震级较大余震深度为8~17km。精河地震序列的余震活动随时间呈起伏状衰减,震后2天内比较活跃,此后出现较快衰减。随时间推移,余震区呈现中西部衰减慢、东部衰减快的特点。此次地震震中距2011年精河5.0级地震震中21km,相比2011年精河地震,其震源更深,震级更大,但震源机制解相近,均为逆冲型。结合区域构造背景分析认为,库松木契克山前断裂为此次地震发震构造的可能性较大。

关键词: 精河6.6级地震 双差定位 地震序列 震源机制 库松木契克山前断裂

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0703-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网测定,2017年8月9日7时27分52秒,新疆博尔塔拉州精河县发生6.6级地震,震中位于44.27°N、82.89°E,震源深度为11km(数据来自中国地震台网中心)。此次地震震中距精河县城约37km,地震共造成32人受伤,其中,2人重伤^①。

此次地震发生在天山北脉博罗科努山北沿、准噶尔盆地西南端的库松木契克山前断裂的东段附近(图1),该地区处于准噶尔板块与塔里木-天山板块之间的逆冲-褶皱构造活动带。古生代时期的碰撞造山作用形成了早期的天山雏形,中生代构造活动相对不活跃。到了新生代以后,欧亚板块与印度板块的碰撞挤压作用通过从青藏高原到天山的宽达几千千米的地壳缩短和青藏高原东部地壳块体向东的挤出得到释放和分解,从而天山再次经历强烈的构造变形和地壳缩短,形成天山新的构造格局。天山南北两侧发育山前褶皱-逆断裂带,由山前向盆地扩展,是控制本区强烈地震孕育和发生的主要构造(陶钧政等,1982;冯先岳,1985;胡军等,1985;张培震等,1996;冯先岳等,1991;李志海等,2006;沈军等,2008、2011;

[收稿日期] 2017-10-31; [修定日期] 2017-12-19

[项目类别] 中国地震台网中心青年基金(17404031570510)资助

[作者简介] 白兰淑,女,1989年生,工程师,博士,主要从事地震监测、地球物理反演方法研究。E-mail: bailanshu@seis.ac.cn

① <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/464/515/20170811155854958700643/index.html>

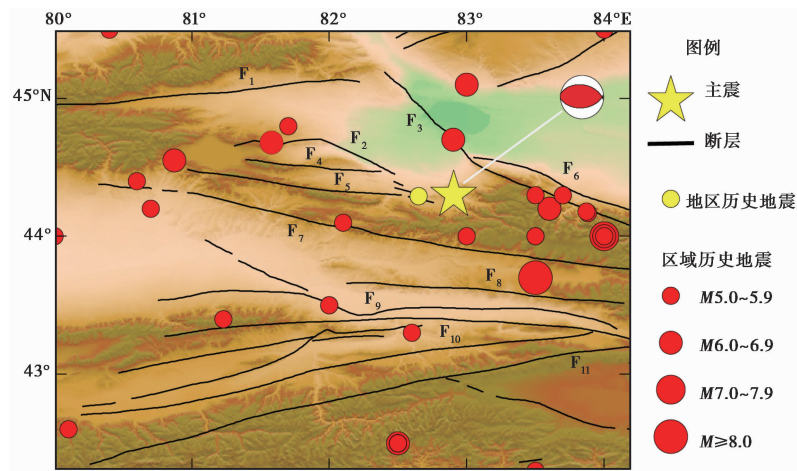


图 1 精河 6.6 级地震的区域构造背景(据邓启东(2007))、
库松木契克断裂信息(据陈剑波等(2012a))和历史强震分布

黄色五角星为精河地震震中位置;黄色圆圈为 2011 年精河 5.0 级地震;红色圆圈为区域历史地震;黑色线条为断层; $F_1 \sim F_{11}$ 为区域内主要断层, F_1 :库松木契克断裂, F_2 :库松木契克山前断裂, F_3 :博罗科努断裂, F_4 :科古琴断裂, F_5 :喀什河断裂, F_6 :亚马特断裂, F_7 :阿吾拉勒山南缘断裂, F_8 :雅马渡断裂, F_9 :乌孙山脊断裂, F_{10} :巴音布鲁克断裂, F_{11} :包尔图断裂

杨少敏等,2008;李杰等,2016)。准噶尔-北天山过渡带 NWW 走向(近 EW 向)(漆家福等,2008),主压应力 P 轴方位近 NS 向,构造走向与主应力方向近乎正交(龙海英等,2008;鲍子文等,2017)。库松木契克山前断裂是发育在天山推覆体前缘的褶皱-逆断裂带上的一条新生活断层(陈建波等,2007)。陈建波等(2007)通过野外考察获得了该地区地层、构造的资料,发现库松木契克山前断裂的东段主要由 4 条走向 $280^\circ \sim 290^\circ$ 、长约 160km、向南倾斜的断层斜列组成,倾角 $40^\circ \sim 60^\circ$,表现为逆断层性质,地表存在地表变形带,晚更新世-全新世仍在强烈活动(陈剑波等,2012a、2012b),晚更新世以来的垂直活动速率为 $0.23 \sim 0.33 \text{mm/a}$ (陈剑波等,2007)。库松木契克断裂是 2011 年新疆精河 5.0 级地震的发震构造。该断层所在地区断裂和褶皱发育,构造活动非常活跃,属中强地震多发地带。

1900 年以来,距震中 200km 范围内共发生 6 级以上地震 6 次,最大震级地震为 1944 年 3 月 10 日新源 7.2 级地震,距此次地震震中 127km(国家地震局震害防御司,1995;中国地震局震害防御司,1999)。精河县境内最近一次大地震为 2011 年 10 月 16 日 5.0 级地震(陈建波,2012a、2012b),其震中与此次地震相距约 21km^②。

地震发生后,中国地震台网中心迅速产出此次地震的震源机制解,具体为节面 I : $76^\circ/44^\circ/80^\circ$ 、节面 II : $269^\circ/47^\circ/99^\circ$ 。国内外机构给出的震源机制解如表 1 所示^{③④}。

本文利用中国地震台网提供的数据,采用双差定位方法对精河 6.6 级地震的余震序列进

② <http://data.earthquake.cn>

③ <http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/event.php?id=gfz2017plxq>

④ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000a65e#moment-tensor>

表 1 国际不同地震学研究机构给出的精河 6.6 级地震的断层面解

机构名称	节面 I			节面 II			质心深度/km
	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	
美国 USGS	92	60	92	269	30	87	30.5
德国 GFZ	85	47	81	277	44	99	24
中国 CENC	76	44	80	269	47	99	23

行了重新定位,并结合区域构造背景、历史地震和震源机制解等作了相关讨论,相关结果为研究精河地震的发震构造、分析余震活动的时空分布特征以及判定余震活动趋势等提供了参考信息。

1 定位方法和资料选取

1.1 双差定位方法原理

双差定位法是一种常用的地震定位方法 (Waldhauser et al, 2000)。该方法假设当 2 个地震之间的距离远小于其到观测台站的震中距且可忽略这 2 个地震附近的速度不均匀性时,则 2 个地震的地震波到达同一个台站的传播路径非常相近。双差定位法基于射线理论,利用地震台网数据中的地震波走时信息和已知的区域速度模型,建立以地震参数为未知变量的反演问题,并通过求解该反演问题得到地震序列重新定位结果。双差定位公式为

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^j = dr_k^{ij} \quad (1)$$

或

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j + \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j + \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j + \Delta \tau^j = dr_k^{ij} \quad (2)$$

其中, t_k^i 为第 i 个地震震源位置到第 k 个台站的走时; $\Delta \mathbf{m}^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)$, 为双差走时 dr_k^{ij} 对应的第 i 个地震震源参数更新量。其中, (x, y, z) 、 τ 分别为地震发震位置和发震时刻。双差走时 dr_k^{ij} 表达式为

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (3)$$

其中,上角标 obs 和 cal 分别代表实际观测走时和理论计算走时。式(3)中,等号右侧第 1 项是第 i 个与第 j 个地震事件在第 k 个台站对应的实际走时差,第 2 项是其理论走时差。相比于传统方法只利用单个事件走时信息进行重新定位,双差定位基于 2 个相近地震事件传播路径的相似性,利用 2 个地震事件的走时差进行震源参数更新,其定位精度依赖于 2 个相邻地震事件附近的速度,不依赖于整条射线路径上的介质速度。因此,只要震源附近的速度结构精度足够高就可以获得准确、可靠的地震序列重新定位结果。

1.2 观测报告选取

本文采用了中国地震台网 73 个台站的数据,其中,国家台 15 个,区域台 63 个,精河地震震中附近的台站分布情况如图 2 所示。我国西部地震台站稀疏,距此次地震震中最近的台站为精河台,震中距为 40km,震中距小于 100km 的台站仅有 2 个,监测能力相对有限。研究具体选取了自主震发生至 2017 年 8 月 14 日 16 时中国地震台网产出的 $44.00^\circ \sim 44.50^\circ \text{N}$ 、 $82.40^\circ \sim 83.10^\circ \text{E}$ 范围内 $M \geq 0.1$ 地震作为震后余震序列进行重新定位。

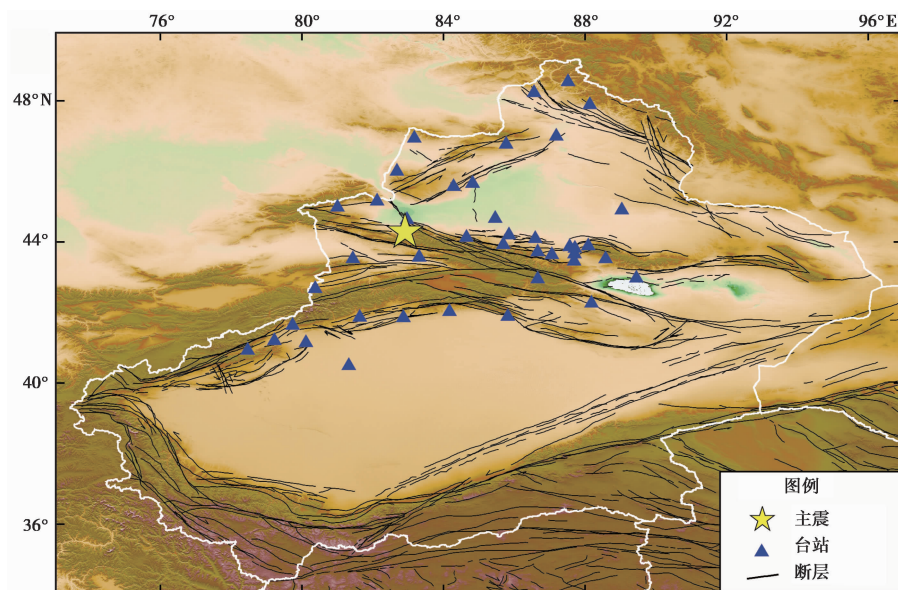


图 2 震中附近台站分布

1.3 速度模型选取

天山地区曾发生多次隆升和夷平,地质构造十分复杂,北天山、中天山、南天山的地下速度结构存在较大差异。邵学钟等(1996)采用贯穿天山造山带的野外测线数据进行地震资料处理和解释,提出了天山造山带不同地区的速度模型。野外测线大致沿 NEE 走向长达 350 多千米,测点间距为 5~10km,因此,对天山不同地区的层厚和速度大小

解释得更加精确。该速度模型中北天山地下构造分为 6 层(表 2),第 1 层为表层,第 2~5 层为结晶地壳,第 6 层为上地幔顶部,地壳总厚度为 45km。此次地震震中处于北天山的西边,故本研究采用北天山地区的 P 波速度,S 波速度由 P 波速度和纵横波速度比 1.73 获得。

表 2 北天山地壳水平层状速度模型

地层深度/km	P 波速度/(km/s)	S 波速度/(km/s)
0~<4	4.00	2.31
4~<16	5.81	3.36
16~<25	6.10	3.53
25~<34	6.65	3.84
34~<45	6.83	3.95
≥45	8.09	4.68

注:地层深度和 P 波速度模型据邵学钟等(1996)

2 余震序列重新定位

本研究采用 255 个余震数据进行重新定位,其中,参与定位的台站共 73 个。定位计算共使用 25 次迭代,事件对间的最大间距阈值从第 1 次迭代的 50km 降至最后一次迭代的 6km,其中,大部分迭代的阈值都控制在 20km 以内。重新定位后最终获得 209 个重新定位结果,SN 向、EN 向和垂直向定位误差分别为 0.9、0.7、1.1km。重新定位前后的地震序列分布分别如图 3(a)、3(b)所示。由图 3 可见,余震序列分布在重新定位前比较离散,无明显的分布特点和优势展布方向。重新定位后余震震中分布变得更加集中,余震区沿库松木契克断裂附近呈近 EW 向或 NWW 向延伸,长约 50km,宽约 17km。余震几乎都分布于主震震中西

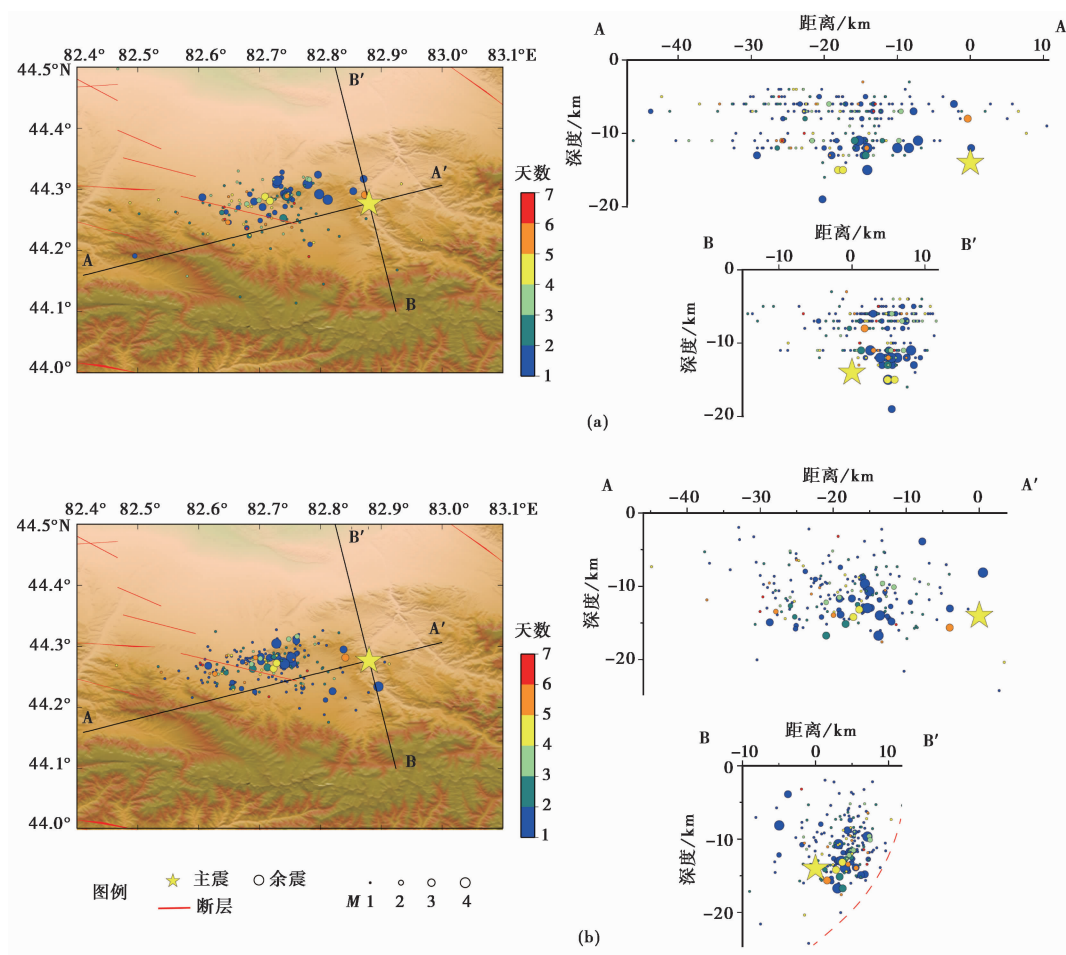


图 3 精河 6.6 级地震序列余震重新定位前、后分布 (截至 2017 年 8 月 14 日 16 时)

图 (a) 左、右图分别为重新定位前地震序列水平分布图和沿 AA'、BB' 方向的垂向分布图；

图 (b) 与图 (a) 相同，但为重新定位后的分布

侧,可以认为,此次地震破裂是由主震震中位置向西边延伸的单侧破裂。重新定位后余震分布图(图 3(b))中可见 1 个主要优势分布区域和 1 个次优的分布区域。图 4 为次级优势分布区的余震分布图。主要优势分布区以 82.72°N、44.28° E 点为中心,呈近 EW 向展布;次优势区以 82.59°N、44.26° E 为中心,呈 NWW 向展布,即图 4 中 CC' 直线附近。其中,图 3(b) 中 AA' 直线走向为 76°,参考了中国地震台网中心给出的震源机制解中的节面 I 走向;图 4 中 CC' 直线走向为 197°,该方向通过求解次优分布区域所有余震的发震位置到该直线的距离总和的最小化问题获得。

图 5 为余震在经度、时间上的分布。由图 5 可见,主震后 2 天内余震震级较大,地震活动较活跃,分布范围广。随后,大部分区域余震活动衰减较快,但余震区中西部 82.60° ~ 82.78° E 范围内地震活动仍较为活跃,震后 2~5 天内该范围内分布的余震占比高达 84.7%。

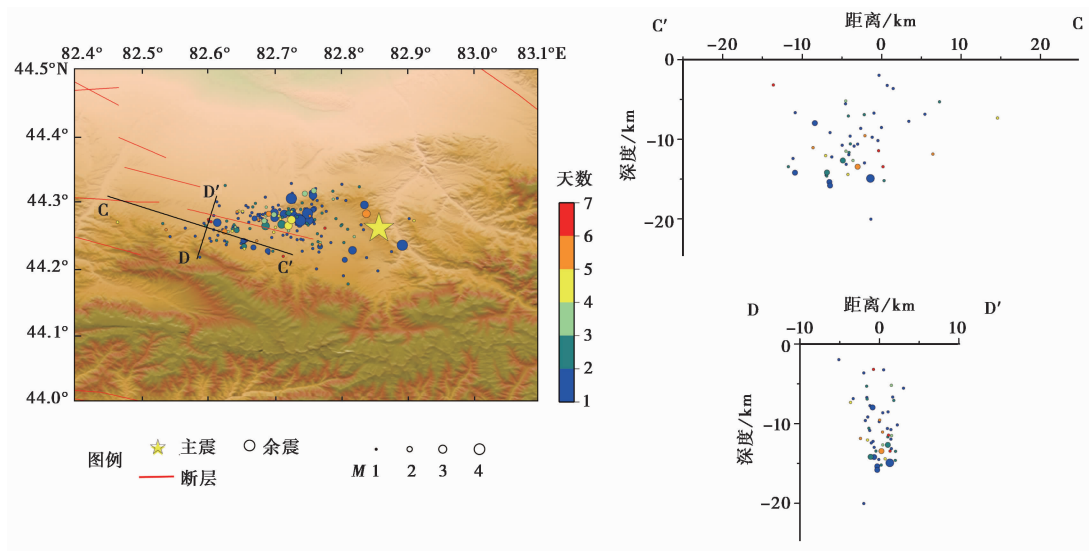


图4 精河6.6级地震序列次级优势分布区的余震分布(截至2017年8月14日16时)
左图为重新定位后次优分布区域的地震序列水平分布图;右图为沿CC'、DD'方向的垂向分布图

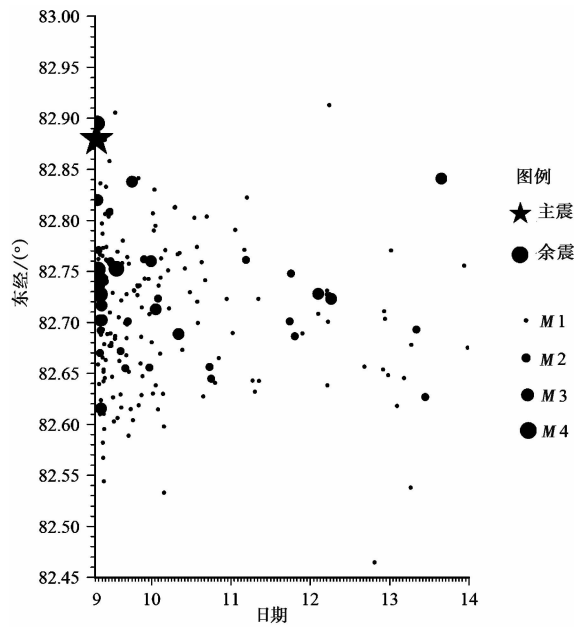


图5 2017年8月余震序列在经度、时间上的分布

主震破裂过程显示,主震破裂后余震区东侧的破裂强度大(82.8°~82.9°E),西侧相对较小^⑤。因此,余震区东侧的应力得到了较为充分的释放,中西部构造活动相对东部活跃,东侧余震分布要少于中西侧。但在震后5天后,余震区东部(82.85°E附近)地震活动再次开始活跃。

重新定位后,余震深度分布也变得更加集中。由沿AA'、BB'剖面的震源深度分布图

⑤ <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/275885.html>

(图 3) 和震源深度分布柱状图(图 6) 可见, 余震序列深度为 1~25km, 尤其是震后 1 天内的较大震级余震的深度非常相近, 为 8~17km。另外, 大多数余震的震源深度小于主震。图 3(b) 右下图中用红色虚线画出了所有余震序列沿 BB' 方向的深度分布下边界, 红色虚线向南倾, 且其斜率随着深度的增加由陡变缓, 倾角大致范围为 $50^{\circ} \pm 10^{\circ}$ 。此次地震发震位置位于库松木契克山前断裂的东段附近, 该构造为 NWW 走向, 向南倾斜, 倾角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。重新定位后的余震分布与该断裂具有很好的一致性, 可以认为, 此次地震与库松木契克山前断裂密切相关。西南部的次优分布区的余震序列沿着 DD' 剖面的深度分布则相对比较平均, 其分布近乎直立。考虑到该次级分布区南侧发育的 NWW 向山体与该次优分布区走向基本一致, 推断该局部区域可能由山体的阻挡作用和 NEE 向的挤压作用共同产生了次级断裂。

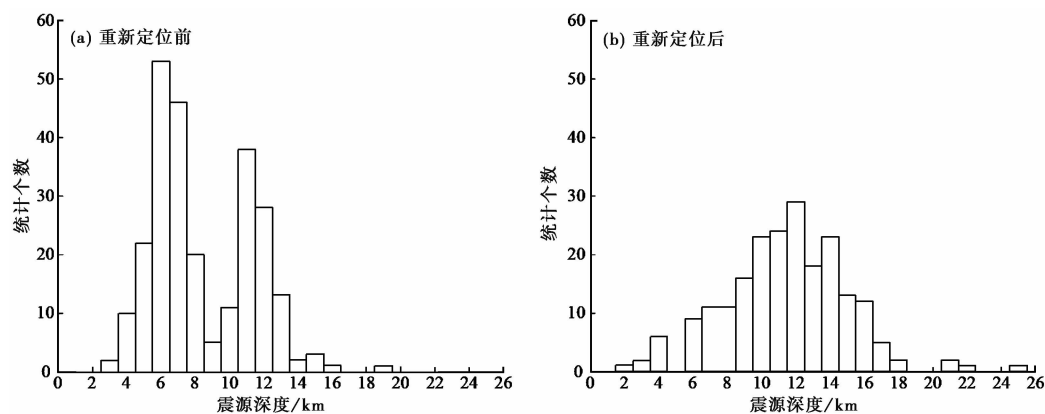


图 6 震源深度分布柱状图

3 结论和讨论

2017 年 8 月 9 日精河 6.6 级地震是继 2011 年 10 月 16 日精河 5.0 级地震后, 近年来该地区发生的又一次强烈地震。本研究利用中国地震台网提供的地震数据, 通过双差定位方法对精河 6.6 级地震的余震序列进行了重新定位, 最终获得了 209 个余震的重新定位结果, 为进一步认识此次地震的发震构造、机制等提供了可靠的依据。

重新定位后余震序列分布更加集中, 余震区长约 50km, 宽约 17km, 呈近 EW 向或 NWW 向分布, 该优势分布方向与余震区附近的库松木契克山前断裂走向基本一致。在空间上, 余震均分布在主震的西侧, 可以认为, 此次地震破裂是由主震震中位置向西边延伸的单侧破裂。重新定位后余震序列震源深度为 1~25km, 较大震级余震震源深度为 8~17km。根据余震区空间分布特点初步推断, 该地区发育有 2 条断层, 这 2 条断层分别位于余震中心区和西南部。中心分布区断层走向为近 EW 向, 向南倾; 西南部断层走向大致为 NWW 向, 近乎直立。

此次精河地震发生在库松木契克山前断裂附近, 根据 GCMT 历史矩张量分布^⑥, 精河地震邻区的历史地震震源机制多为逆冲型(图 7)。库松木契克山前断裂是长期以来受欧亚板

⑥ <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

块和印度板块的SN向挤压应力在北天山西段山前形成的全新世活动断层,性质为逆断层。该断层东段由NW向、向南倾斜的断层斜列组成,此次地震即位于该断层东段斜列附近。中国地震台网中心给出的此次地震的矩震级为 M_w 6.3,波形拟合的质心深度为23km,断层节面解见表1,由此推断,此次地震为一次逆冲型为主的事件。根据余震活动的分布情况可以认为,此次精河地震与其附近的库松木契克山前断裂密切相关。此次地震的地震序列深度分布相对地震质心深度较小,这与震中附近无台站分布有关,真实的震源深度可能要在参考本研究的重新定位结果的基础上再整体向下移。2011年精河5.0级地震震中在此次地震震中往西约21km处,其质心深度为4km,震源机制解为节面I: $92^\circ/105^\circ/41^\circ$ 、节面II: $252^\circ/77^\circ/51^\circ$ (陈建波等,2012a、2012b)。2次地震均位于库松木契克山前断裂附近,但此次地震震源更深,震级更大。综合考虑余震分布、历史地震和震源机制解等,库松木契克山前断裂是此次精河6.6级地震发震构造的可能性较大,且节面I是发震构造的断层面。

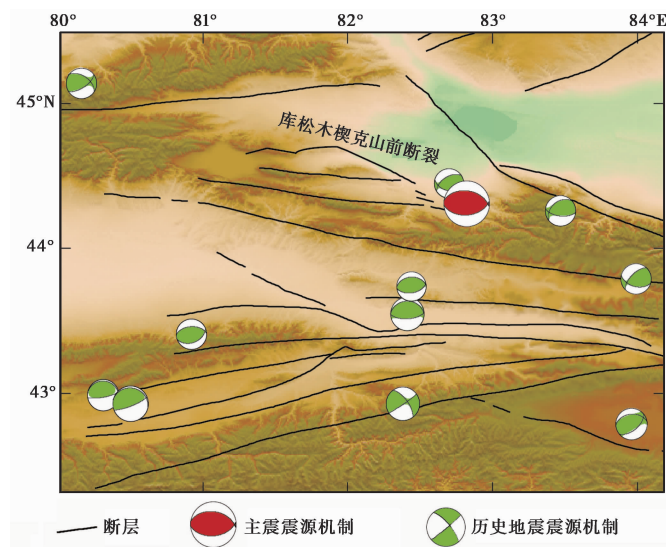


图7 精河6.6级地震及邻区GCMT历史矩张量分布
数据来源于Global CMT官网;库松木契克断层信息参考陈剑波等(2012b)

参考文献

- 鲍子文、高原,2017,天山构造带及邻区地壳各向异性,地球物理学报,60(4),1359~1375。
- 陈建波、沈军、李军等,2007,北天山西段库松木契克山山前断层新活动特征初探,西北地震学报,29(4),335~340。
- 陈建波、谭明、吴国栋等,2012a,2011年10月16日新疆精河县5.0级地震灾害特征及发震构造,内陆地震,26(3),233~241。
- 陈建波、谭明、吴国栋等,2012b,2011年10月16日新疆精河县5.0级地震震害特征及原因,震灾防御技术,7(2),164~172。
- 邓起东,2007,中国活动构造图,北京:地震出版社。
- 冯先岳,1985,论新疆地震地质特征,地震地质,7(2),76~82。
- 冯先岳、邓起东、石监帮等,1991,天山南北缘活动构造及其演化,见:《活动断裂研究》编委会,活动断裂研究(第1期),1~16,北京:地震出版社。
- 国家地震局震害防御司,1995,中国历史强震目录:公元前23世纪-公元1911年,北京:地震出版社。
- 胡军、丁德轩、胡方秋等,1985,天山地区岩石圈动力学特征初探,新疆地震,3(2),85~94。

- 李杰、陈刚、魏文薪等, 2016, 基于 GPS 观测的北天山主要断裂现今构造运动特征研究, 地震学报, **38**(5), 751~760。
- 李志海、王海涛、赵翠萍等, 2006, 2003 年新疆石河子 5.4 级地震序列重新定位及发震断层与机制分析, 地震研究, **29**(2), 109~113。
- 龙海英、高国英、聂晓红等, 2008, 北天山地区中强地震震源机制解分析, 中国地震, **24**(1), 23~30。
- 漆家福、陈书平、杨桥等, 2008, 准格尔-北天山盆山过渡带构造基本特征, 石油与天然气地质, **29**(2), 252~260。
- 邵学钟、张家茹、范会吉等, 1996, 天山造山带地壳结构与构造-乌鲁木齐-库尔勒地震转换波测深剖面, 地球物理学报, **39**(3), 336~346。
- 沈军、柏美祥、石广岭等, 2011, 新疆及邻区地震构造图简介, 内陆地震, **25**(2), 97~108。
- 沈军、吴传勇、陈建波等, 2008, 新疆主要逆断层-褶皱构造区基本地震构造特征与潜在震源划分问题, 震灾防御技术, **3**(2), 101~110。
- 陶钧政、吕正、朱诚等, 1982, 新疆板块构造基本轮廓, 新疆大学学报(自然科学版), **1**, 3~20。
- 杨少敏、李杰、王琪等, 2008, GPS 研究天山现今变形与断层活动, 中国科学: D 辑, **38**(7), 872~880。
- 张培震、邓起东、杨晓平等, 1996, 天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题, 中国地震, **12**(2), 127~140。
- 中国地震局震害防御司, 1999, 中国近代地震目录: 公元 1912 年-1990 年, $M_s \geq 4.7$, 北京: 中国科学技术出版社。
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, Bull Seism Soc Am, **90**, 1353~1368。

Relocation of the 2017 M_s 6.6 Jinghe, Xinjiang earthquake sequence and its seismogenic structure

Bai Lanshu¹⁾ Liu Jie¹⁾ Zhang Yingying¹⁾ Wu Qing²⁾ An Yanru¹⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

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

Abstract In this paper, the relocating of the aftershock sequence of the 2017 M_s 6.6 Jinghe earthquake in Xinjiang was implemented using CENC data with the Double Difference relocation method. By the time of 16:00 p.m. on August 14, 2017, totally 209 aftershocks were relocated. It shows that the aftershocks are distributed along EW direction or NWW direction with the length of 50km and the width of 17km. Since the most aftershocks are located at the western area of the epicenter, the main earthquake might rupture unilaterally from the east to the west. The hypocenters of the aftershock sequence ranges from 1km to 25km, among which most strong aftershocks range from 8km to 17km. The first 2 days after the mainshock is an active period of seismicity, after which it becomes inactive. Horizontally, the seismicity of the eastern aftershock area attenuates rapidly while the western area decays slower. The mainshock is much stronger and deeper compared with the 2011 M 5.0 Jinghe earthquake which occurred 21km away from this earthquake. But still the focal mechanism solutions of these two quakes are similar, and both are thrusting earthquakes. Considering the regional structure background, it is highly likely that the Kusongmuqike piedmont fault might be the causative structure of the earthquake.

Key words: Jinghe M_s 6.6 earthquake; Double difference relocation; Earthquake sequence; Focal mechanism; Kusongmuqike piedmont fault