

刘建明、高荣、王琼等, 2017, 2017 年 8 月 9 日精河 6.6 级地震序列重定位与发震构造初步研究, 中国地震, 33(4), 663~670。

2017 年 8 月 9 日精河 6.6 级地震序列 重定位与发震构造初步研究

刘建明 高荣 王琼 聂晓红

新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐市新市区科学二街 338 号 830011

摘要 基于新疆区域数字地震台网震相观测报告, 采用 HypoDD 方法精确定位了精河 M_s 6.6 地震序列 $M_L \geq 1.0$ 地震的震源位置, 综合分析了此次地震序列的空间分布特征和可能的发震构造。结果显示, 主震震中为 44.2639°N 、 82.8294°E , 震源初始破裂深度为 17.6km; 地震序列总体沿近 EW (273°) 向单侧扩展, 展布长度约 20km; 震源深度优势分布范围为 7~17km; 沿余震走向的深度剖面显示, 主震向西 10km 范围内, 余震震源有逐渐变浅的趋势, 余震序列中尾端向 SW 方向偏转的地震震源较深; 垂直于地震序列的深度剖面显示, 地震序列自北向南呈现逐渐加深的变化特征, 表明发震断层面倾向为 S 倾。综合考虑中国地震局地球物理研究所给定的震源机制解以及震源区地质构造情况推测, 精河 M_s 6.6 地震发震构造可能为库松木契克山前断裂东段。

关键词: 精河 M_s 6.6 地震 HypoDD 定位 发震构造 库松木契克山前断裂

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0663-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网中心测定, 2017 年 8 月 9 日 7 时 27 分 (北京时间), 新疆维吾尔自治区博尔塔拉州精河县发生 M_s 6.6 地震 (简称精河 6.6 级地震), 震中位于 44.27°N 、 82.89°E , 震源深度 11km, 乌鲁木齐、博州、昌吉、伊犁、克拉玛依等地地震感强烈。据新疆区域数字地震台网测定, 截至 2017 年 9 月 30 日, 精河 6.6 级地震震源区共记录余震 396 次, 其中, M_s 3.0~3.9 余震 18 次, M_s 4.0~4.9 余震 6 次, 余震最大震级为 M_s 4.7。1900 年以来, 距震中 200km 范围内发生 11 次 6 级以上地震, 其中, 7 级地震 1 次, 为 1944 年新源 M_s 7.2 地震, 其震中距此次地震震中 94km。距离上最近的地震为 1955 年乌苏 M_s 6.5 地震, 距此次地震震中 59km; 时间上最近的地震为 2012 年新源、和静 M_s 6.6 地震, 距此次地震震中 179km。基于现场考察和强震记录, 新疆地震局给出了此次精河 6.6 级地震的等震线分布, 即等震线呈近椭圆形, 长轴走向近 NW, 极震区烈度达 VIII 度, 长约 44km^①。

[收稿日期] 2017-10-20; [修定日期] 2017-12-21

[项目类别] 中国地震局地震预测研究所新疆精河 6.6 级地震深入科学研究项目“精河 6.6 级地震解剖及北天山地区强震趋势跟踪与预测研究” (1747074512)、国家自然科学基金 (41672208) 和中国地震局地震科技星火计划 (XH17043Y) 共同资助

[作者简介] 刘建明, 女, 1984 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地震预测和地震学相关研究。E-mail: 287928467@qq.com

① <http://www.eq-xj.gov.cn/dzpd/dszd/2017/betl/yjxd/yjxy/25117.html>

中国地震局地质研究所网站公布的精河 6.6 级地震区域地震构造图显示^②,此次地震发生在库松木契克山前断裂附近。该断裂是位于北天山西段北缘的一条边界断层,同时也是一条区域性的活动断层,按其活动性特征由西向东可划分为东、中、西 3 段。其中,东段东起基普克一带,向西经乌拉斯泰、乌兰特干、扫子木图至龙口以西的阿沙勒河西岸,总体走向 300°~310°,全长约 50km,由 4 条走向 280°~290°的断层斜列组合而成,单条断层的长度 9~13km,断层面向 S,主要表现为逆断层性质(陈建波等,2007)。

精河 6.6 级地震发生后,国内外多家研究机构迅速在该地震的重定位和震源机制解等方面开展了一系列研究,为满足抗震救灾需求和开展后续科学研究提供了重要参考依据。美国地质调查局网站(USGS)给出精河 6.6 级地震震源深度约 20km,断错类型为逆冲型^③。中国地震局地球物理研究所给出的早期地震序列精定位结果显示^④,此次地震序列呈近 EW 向分布,深部余震分布为 S 倾,震源深度约 15km;CAP 方法反演震源机制解为逆冲型地震,震源矩心深度为 20km。中国地震台网中心重定位结果显示^⑤,此次地震序列近 EW 向分布,深部余震显示发震断面近乎垂直;CAP 方法反演震源机制解为逆冲型地震,震源矩心深度为 23km。不同研究机构给出的结果显示,震源深度存在一定的差异,同时,深部余震倾向的不同也给理解此次地震的发震构造带来了一定的难度。

已有研究表明(Waldhauser et al,2000;易桂喜等,2015、2017),精确定位后的主震及其余震序列空间展布和震源机制解,对震后快速确定发震构造、判定未来发展趋势及灾后恢复重建规划等均具有重要意义。精河 6.6 级地震震中附近台站相对较少,距震中 100km 半径范围内仅有 2 个固定测震台。地震发生后,新疆地震局迅速启动 II 级应急响应,第一时间前往震区架设了 2 个流动台站,第 1 个流动台于 8 月 9 日 18 时正式运行,并将数据实时传输至新疆地震局台网中心,积累了较为丰富的序列观测资料,为后续的震情跟踪和研究工作提供了重要依据。

本文基于研究区域的固定台和流动台所记录的震相数据,采用 HypoDD 方法对精河 6.6 级地震序列进行重新定位,获得了较为准确的空间分布图像。在此基础上,结合此次地震其它相关研究成果以及震区的地质构造研究,讨论精河 6.6 级地震序列的空间分布特征和可能的发震构造。

1 方法与资料

1.1 双差定位方法

目前,双差定位(HypoDD)方法(Waldhauser et al,2000)被国内研究人员广泛运用,并取得了诸多有意义的研究成果(吕坚等,2008a、2008b;房立华等,2011、2013、2014;王未来等,2014;Long et al,2015)。该方法是一种相对地震定位法,是在主事件地震定位法基础之上发展起来的,其不但能减小速度结构模型的不准确性对定位结果的影响,还可用于大空间范围

② <http://www.eq-igl.ac.cn/upload/images/2017/8/99175928.jpg>

③ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000a65e#moment-tensor>

④ <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/275885.html>

⑤ http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/05_LargeEQ/201708090727M6.6/zonghe.html

的地震精确定位(杨智娴等,2003)。双差定位算法使用的前提条件是:2 个地震间的距离相对于地震到台站的距离以及介质速度变化的尺度足够小,从而 2 条射线的路径可以近似看成是相同的,这样在同一台站记录到的 2 个事件的走时之差就可归结为 2 个事件的空间位置的差异。

把 2 个地震 i 和 j 到台站 k 的观测走时差与理论计算走时差之差定义为双重残差,表示为 dr_k^{ij}

$$dr_k^{ij} = r_k^i - r_k^j = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (1)$$

式中, $(t_k^i - t_k^j)^{obs}$ 为实际观测走时差; $(t_k^i - t_k^j)^{cal}$ 为理论计算走时差。将由所有地震 ($i, j=1, 2, \dots, N$)、所有台站 ($k=1, 2, \dots$) 得到的如式 (1) 的方程采用矩阵表示为

$$\mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{W}\mathbf{d} \quad (2)$$

式中, \mathbf{G} 为包含偏导数 $M \times 4N$ 阶 (M 为双差的观测数; N 为地震数) 的矩阵; \mathbf{d} 为包含双差式 (1) 的数据矢量; \mathbf{m} 为长度 $4N$ 的矢量, 含有待定震源参数的变化; \mathbf{W} 为对每个方程加权的对角矩阵。计算时利用下式约束所有地震重新定位后平均位移为 0, 即其质心不动。通过进一步迭代, 使定位残差逐步减小, 从而得到最终的定位结果

$$\sum_{i=1}^N \Delta \mathbf{m}_i = 0 \quad (3)$$

1.2 资料

本研究采用距精河 6.6 级地震震中 400km 范围内的 27 个固定台和 2 个流动台对此次地震序列进行重定位(图 1)。重新定位所使用的资料主要来源于新疆区域数字地震台网提供的震相观测报告。选取 2017 年 8 月 9 日~9 月 30 日, 具有 3 个以上台站记录 and 6 个以上震相数的 370 次 $M_L \geq 1.0$ 地震进行重新定位。其中, P 波到时资料 3678 个, S 波到时资料 2945 个, 平均每次地震有 18 个震相数据。为检查观测报告中震相数据的可靠性, 绘制了 P 波和 S 波的震相走时曲线(图 2), 由图 2 可见, $P_g(P_n)$ 、 $S_g(S_n)$ 震相的走时曲线区分明显, 且离散度较小, 因此认为, 这 4 种震相的到时数据可靠性较高。

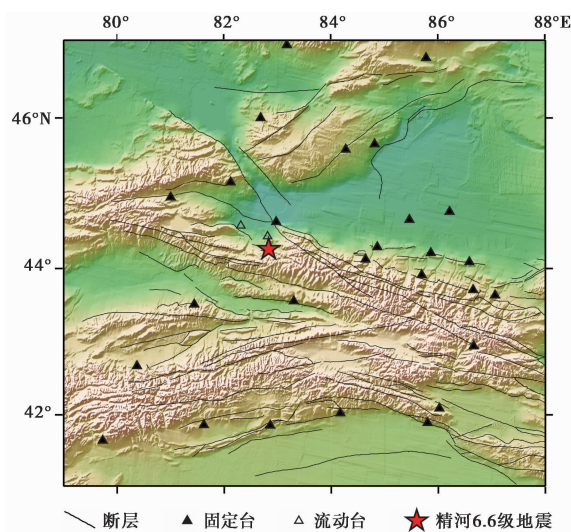


图 1 重定位台站分布

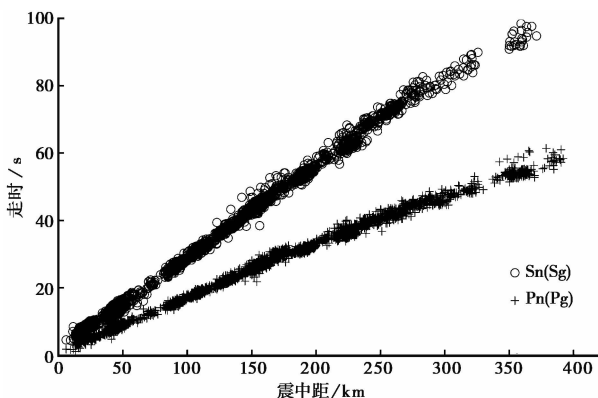


图 2 Sn(Sg)、Pn(Pg)震相的走时曲线

本文采用 HypoDD 方法对精河 6.6 级地震序列进行重新定位, 获取了 212 次地震序列的重定位结果。在重定位过程中, 设置最小连接数和最小观测数均为 8, 事件对的最大距离设为 10km; P 波、S 波到时的权重分别设为 1.0、0.5; 地震定位时分 3 组, 15 次反复迭代。由于震中周围人工地震测深的研究结果甚少, 本文在重定位过程中尝试了该研究区附近多个分层速度结构模型, 最终选用 CRUST1.0 分层速度模型结果(表 1)。

表 1 重定位中的速度结构模型

| 深度/km | P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|-------|-------------------------------------------|
| 0.00 | 2.50 |
| 0.10 | 6.10 |
| 21.18 | 6.30 |
| 39.86 | 7.00 |
| 48.00 | 8.15 |

2 地震序列重新定位结果

2.1 重定位平面分布特征

基于上节所述的 HypoDD 方法及参数设置, 获得了精河 6.6 级地震序列的重定位结果。精河 6.6 级地震被重定为发震时刻 2017 年 8 月 9 日 7 时 27 分 51 秒, 震中 44.2639°N 、 82.8294°E , 震源初始破裂深度为 17.6km。地震序列东西、南北及垂直向定位平均相对误差分别为 0.5、0.4、0.9km, 平均走时残差为 0.08s。

图 3(a)、3(b)分别为精河 6.6 级地震序列重定位前、后的结果。由图 3 可见, 重定位前地震序列分布分散, 无明显优势分布方向; 重定位后地震分布更加集中, 震中位置明显向内紧缩。重定位后平面分布图(图 3(b))显示, 精河 6.6 级地震余震密集区主要集中分布在库松木契克山前断裂东段, 展布长度约 20km, 总体沿近 EW 向(273°)单向扩展, 与震后应急科考给出的烈度分布特征^⑥相符, 同时与库松木契克山前断裂东段 4 条走向 $280^{\circ} \sim 290^{\circ}$ 的断层大致吻合。另外, 精河 6.6 级地震的余震主要集中发生在主震后 20 天内, 其后, 余震的分布在近 EW 向尾端有向 SW 方向偏转的迹象。

⑥ 新疆维吾尔自治区地震局, 2017, 2017 年 8 月 9 日新疆精河 6.6 级地震灾害调查评估结果的报告

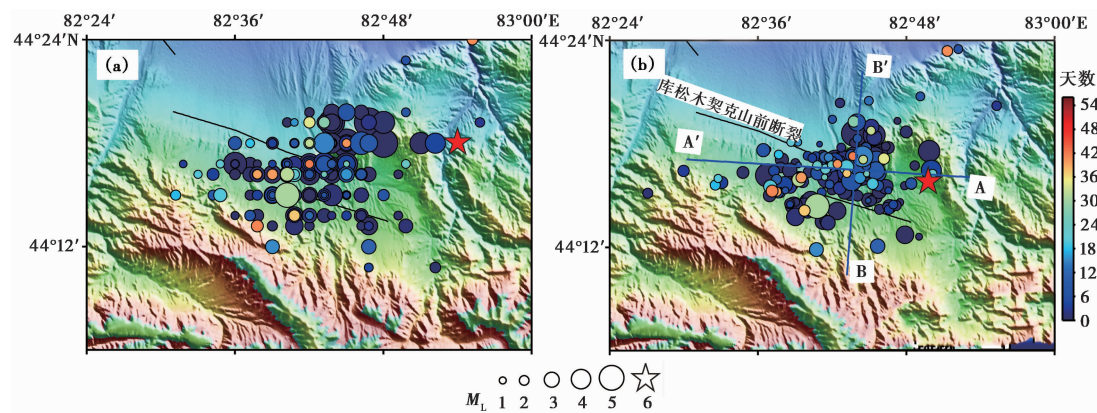


图 3 精河 $M_{6.6}$ 地震序列重定位前(a)、后(b)地震震中分布

2.2 重定位剖面分布特征

震源深度剖面显示,重定位之后的地震震源深度优势分布为 7~18km (图 4),且发生在地壳浅部的余震非常少。这与震后应急科考在震中附近没有发现明显的地表破裂带的结果一致。同时,与张勇等^④得到的此次地震震源破裂过程显示的地壳浅部静态滑动量较小(小于 0.3m)的结果具有较好的一致性。

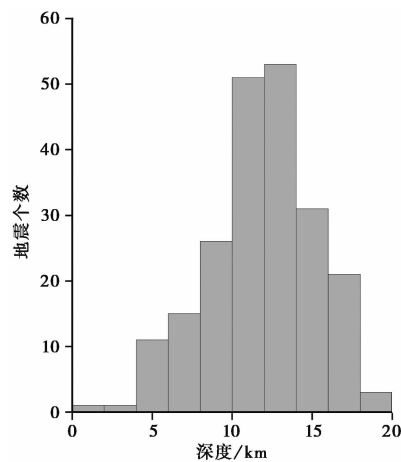


图 4 深度分布柱状图

为详细展示此次地震发震断层面的结构特征,给出了 2 条震源深度的剖面图(图 5),其中,一条为沿震中分布的优势长轴走向 A-A'剖面,另外一条为近垂直于震中分布的优势长轴走向 B-B'剖面。A-A'剖面(图 5(a))显示,精河 6.6 级地震余震沿近 EW 向单侧扩展,展布长度约 15km;主震及余震序列向西 10km 范围内,余震震源有逐渐变浅的趋势,且余震数量较多;余震序列的尾端向 SW 向偏转的地震震源较深,且余震数量较少(图 5(a))。B-B'剖面反映了沿断层倾向的震源深度分布特征,清晰地展示出地震序列震源自北向南呈现逐渐加深的变化特征。另外,B-B'剖面揭示出此次地震可能的发震断面倾向为 S 倾,与库松木契克山前断裂东段倾向(陈建波等,2007)一致。

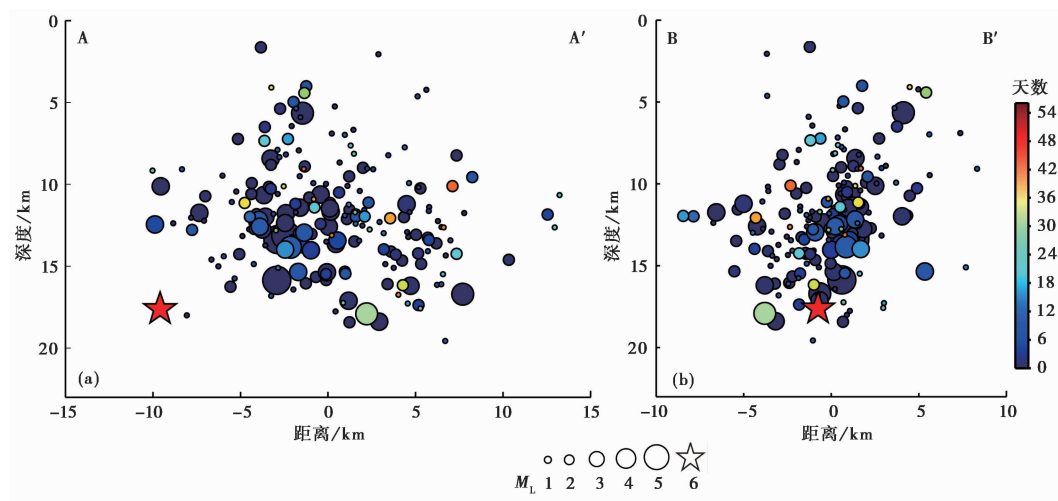


图5 沿 A-A'、B-B'剖面的地震震源深度分布
地震到剖面轴线的距离小于 10km

中国地震局地球物理研究所利用 CAP 方法反演得到了精河 6.6 级地震的最佳双力偶节面解^④,结果显示,此次地震断错类型为逆冲型,与震中附近的库松木契克山前断裂东段运动性质相符。其中,节面 I 走向 262°、倾角 45°、滑动角 80°,节面 II 走向 96°、倾角 46°、滑动角 100°,断层节面 I 和节面 II 均近 EW 向。结合精定位空间分布特征分析认为,S 倾节面 II 为此次地震的真实发震断层面,这与库松木契克山前断裂东段 S 倾相符。因此,综合主震震源机制、地震序列空间分布特征以及震区构造地质情况等推断,此次精河 6.6 级地震发震构造为库松木契克山前断裂东段。

3 结论

本文基于新疆区域数字地震台网观测报告,采用 HypoDD 方法对精河 6.6 级地震序列进行了重定位,获得了地震序列的重定位结果,并结合中国地震局地球物理研究所利用 CAP 方法反演所得的震源机制解,分析了该地震序列的空间分布和不同剖面震源深度的变化特征以及其可能的发震构造,得到以下结论。

(1) 精河 6.6 级地震发震时刻为 2017 年 8 月 9 日 7 时 27 分 51 秒,震中 44.2639°N、82.8294°E,震源初始破裂深度为 17.6 ± 0.9 km,较中国地震局地球物理研究所采用 CAP 方法获得的最佳拟合震源矩心深度 20 km 要浅。

(2) 双差定位结果显示,此次地震序列总体沿近 EW 向(273°)单侧扩展,展布长度约 20 km,与库松木契克山前断裂东段 4 条走向 280°~290°的断层大致吻合;震源深度优势分布为 7~17 km;沿余震走向的深度剖面显示,精河 6.6 级地震序列破裂始于深部,然后向浅部扩展,且主震向西 10 km 范围内,余震震源有逐渐变浅的趋势,余震序列分布中尾端向 SW 向偏转的地震震源较深;垂直于地震序列的深度剖面显示,地震序列震源自北向南呈逐渐加深的变化特征,表明发震断层面倾向为 S 倾,与库松木契克山前断裂东段倾向一致。

(3) 中国地震局地球物理研究所给出的震源机制解结果显示,精河 6.6 级地震断错类型

为逆冲型,南倾节面 II 为此次地震的真实发震断层面,与库松木契克山前断裂东段断错类型以及断层倾向相符。

(4) 由于地表所见的断层与深部发震构造之间的关系比较复杂,通过所见的地表断层推测深部的发震构造或震源的位置,具有一定的不确定性。但是,前人针对库松木契克山前断裂剖面的研究甚少,故无法将地震投影至构造剖面上。本文综合精河 6.6 级地震序列的空间分布和震源机制解推测,此次精河 6.6 级地震的发震构造为库松木契克山前断裂东段。

致谢: 中国地震局地球物理研究所房立华研究员对 HypoDD 软件的使用给予了悉心的指导,新疆地震局监测中心为本研究提供了波形资料和观测报告,审稿专家对本文细致审阅并提出了富有建设性的修改意见。本研究部分图件采用 GMT 软件绘制。在此一并表示感谢。

参考文献

- 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。
- 房立华、吴建平、王未来等,2013,四川庐山 M_s 7.0 地震及其余震序列重定位,科学通报,58(20),1901~1909。
- 房立华、吴建平、王未来等,2014,2014 年新疆于田 M_s 7.3 地震序列重定位,地球物理学报,58(3),802~808。
- 房立华、吴建平、张天中等,2011,2011 年云南盈江 M_s 5.8 地震及其余震序列重定位,地震学报,33(2),262~267。
- 吕坚、苏金蓉、靳玉科等,2008a,汶川 8.0 级地震序列重新定位及其发震构造初探,地震地质,30(4),917~925。
- 吕坚、郑勇、倪四道等,2008b,2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌 M_s 5.7、 M_s 4.8 地震的震源机制解与发震构造研究,地球物理学报,51(1),158~164。
- 王未来、吴建平、房立华等,2014,2014 年云南鲁甸 M_s 6.5 地震序列的双差定位,地球物理学报,57(9),3042~3051。
- 杨智娴、陈运泰、郑月军等,2003,双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用,中国科学: D 辑,33(增刊),129~134。
- 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。
- 易桂喜、龙锋、闻学泽等,2015,2014 年 11 月 22 日康定 $M6.3$ 地震序列发震构造分析,地球物理学报,58(4),1205~1219。
- Long F, Wen X Z, Ruan X, et al, 2015, A more accurate relocation of the 2013 M_s 7.0 Lushan, Sichuan, China, earthquake sequence and the seismogenic structure analysis, J Seism, 19(3), 653~665.
- 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(6), 1353~1368.

Relocation of the Jinghe $M_s6.6$ earthquake sequence on August 9, 2017 and analysis of the seismogenic structure

Liu Jianming Gao Rong Wang Qiong Nie Xiaohong

Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

Abstract Based on the waveforms of Xinjiang Digital Seismic Network, the Jinghe $M_s6.6$ earthquake sequence ($M_L \geq 1.0$) were relocated by HypoDD. The characteristics of the spatial distribution and the seismogenic structure of this earthquake sequences were analyzed. The results show that the main shock was relocated at 44.2639°N , 82.8294°E , the initial rupture depth was 17.6km. The earthquake sequence clearly demonstrated a unilateral extension about 20km nearly in the EW direction, and were mainly located in the depth of 7~17km. The depth profile of the aftershocks shows that the focal depth of the aftershocks tended to be shallower within 10km to the west of the main shock, and the depth of the seismic source in the tail direction of the aftershock sequence to SW direction was deeper. The depth profile perpendicular to the earthquake sequence shows that the seismic sequence was gradually deepened from north to south, which indicates that the fault plane was dipping south. According to the focal mechanism solution provided by the Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, and the geological structure in the source region, it is inferred that the seismogenic structure of the Jinghe earthquake with $M_s6.6$ may be the eastern segment of the Kusongmuxieke fault.

Key words: Jinghe $M_s6.6$ earthquake; HypoDD location; Seismogenic structure; Kusongmuxieke fault