

2014年新疆于田 M_s 7.3 地震及余震序列定位研究*

冉慧敏, 魏 斌, 张志斌, 赵 庆

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 使用区域一维速度模型, 利用单纯形法, 结合和田台阵的方位角测定了2014年2月12日新疆于田 M_s 7.3 地震的主震位置。使用双差定位方法对于主震和465次余震序列进行了重新定位。结果表明: NS、EW 和 UD 3 个方向的平均相对误差分别为 0.13 km、0.14 km、0.15 km, 平均走时残差为 0.012 s。余震整体分布呈北东向展布, 并向主震的西南和北东两个方向延伸, 主震的西南方向长近 40 km、宽约 30 km, 北东方向长近 20 km、宽约 20 km, 震源深度集中在 5~15 km。余震序列的空间形态沿破裂显示了分段和非均匀特征: 主震的西南方向地震数量较多, 展布较宽, 且近南北向分布, 震源深度优势分布在 5~15 km 之间; 北东方向地震较少, 震源深度优势分布在 5~10 km 之间; 靠近山脉的地震震源要比远处的深。余震序列的时间特征为在震后的 3 天内, 震源深度集中在 5~15 km, 此后的震源深度集中在 5~10 km, 震源深度总体呈现变浅的趋势。

关键词: 于田 M_s 7.3 地震; 单纯形法; 方位角; 双差定位; 重定位

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0565-07

0 引言

2014年2月12日17时19分, 新疆维吾尔自治区和田地区于田县(36.1°N, 82.5°E)发生 M_s 7.3 强烈地震(简称于田地震)。于田地震属于前震—主震—余震型, 截至2014年2月26日10时, 已经发生了5492次余震, 其中最大的余震为 M_s 5.7。震中位于于田县城东南102 km, 距离民丰西南96 km, 震中海拔近5000 m, 处于阿尔金断裂带。震中周围历史地震活动水平较强, 公元1600年以来震区300 km范围内发生过32次5级地震, 6次6级地震和4次7级地震, 最大地震为1924年民丰7.3级双震和2008年于田7.3级地震。

2014年于田 M_s 7.3 地震震中周围的测震台站较少, 除了在震中距约60 km的于田台及110~120 km范围内的应急B台和民丰台3个近台外, 其他测震台站都离震中相对较远; 目前新疆地震局使用“3400走时表”分析地震目录, 本身也存在误差; 地震余震较密集, 存在多个地震事件波形叠加等情况, 震相的起始位置不太清楚, 多种

震相相互干扰, 使得震相到时读数存在误差, 定位结果受到很大影响, 导致地震定位精度较差。为了获得更可靠的地震定位结果, 本文利用双差定位法对此次 M_s 7.3 于田地震序列进行重新定位, 以得到较为准确的余震活动空间分布图像。

1 区域地质背景

由于田 M_s 7.3 地震的灾害损失评估报告^①可知, 此次地震发生在阿尔金断裂的西段末端, 等震线长轴呈北东走向分布(图1), 位于青藏高原北缘、昆仑山内部的高山区, 该地区新构造运动强烈, 活动断层发育, 破坏性地震频发, 地质构造较为复杂。阿尔金断裂西起藏北郭扎错南, 向东北经东昆仑、阿尔金山, 延伸至甘肃金塔附近, 阿尔金断裂的西南端是个向西撒开的帚状构造, 断面SE倾, 倾角60~80°, 震源深度以14~35 km为主, 古地震遗迹非常丰富(尹光华等, 2008)。印度板块相对于欧亚板块向北运动, 使得青藏高原内部产生南北向的缩短和东西向的拉张, 青藏高原的东西向扩张导致了相对于欧亚板块北部的

* 收稿日期: 2014-02-28.

基金项目: 地震科技星火计划青年项目(XH13028Y)和测震台网青年骨干培养专项(20120105)联合资助.

① 新疆维吾尔自治区地震局. 2014. 2014年2月12日新疆于田7.3级地震灾害损失评估报告.

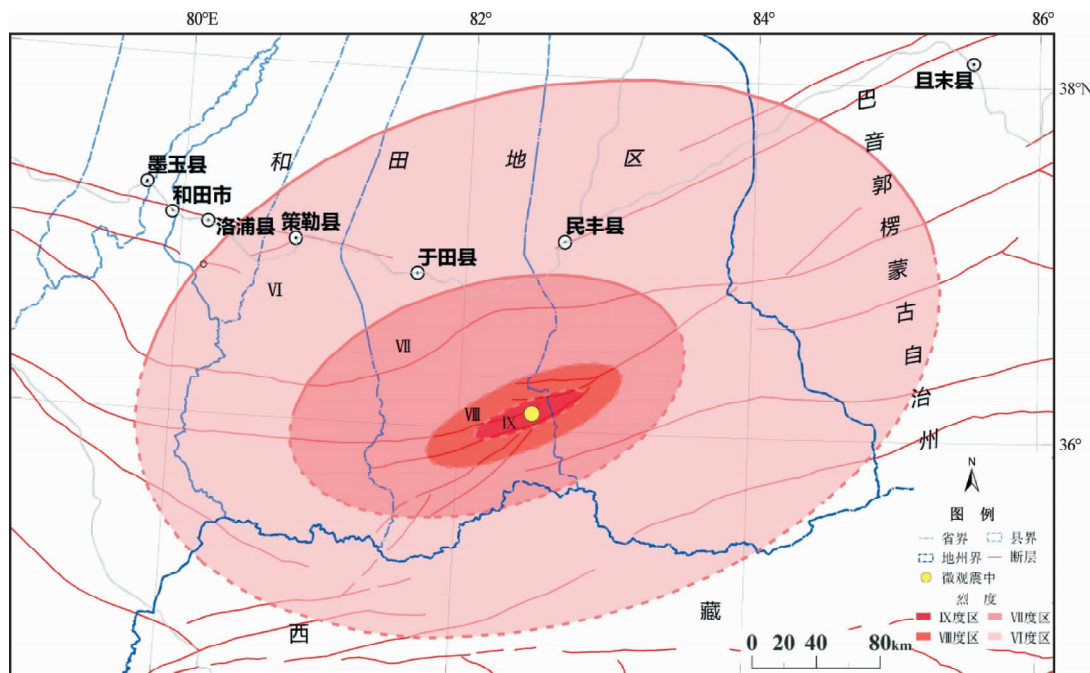


图1 2014年2月12日新疆于田 $M_s7.3$ 地震烈度图

Fig. 1 Seismic intensity graph of Xinjiang Yutian $M_s7.3$ earthquake on Feb. 12, 2014

青藏高原东向运动,造成了与高原内部大尺度阿尔金断裂和昆仑断裂左旋走滑相适用的构造运动(万永革等,2010)。

2 台站及资料选取

2.1 地震台站

2014年于田 $M_s7.3$ 地震发生在阿尔金断裂带上,震中附近地震台站分布稀疏,地震前500 km范围内共有1个和田台阵、10个正常运行的固定地震台站及1个临时台。和田台阵距震中约360 km,是具有9个子台的小孔径台阵,外环半径在1500 m左右,内环半径550~650 m之间,内外环分别布设了3个和5个子台(段天山,2009)(图2)。10个固定地震台站中包括西藏的狮泉河台(SQHE)、改则台(GZE),新疆“十五”网络项目时改造和新建的和田台(HTA)、于田台(YUT)、且末(QMO)、叶城(YCH)、阿拉尔(ALR),及背景场项目新建的民丰台(MIF)、塔中(TAZ)、三十里营房(SSL)。1个临时台为2008年于田 $M_s7.3$ 地震时临时架设的应急B台(YJB)。为了更好监测地震余震,新疆地震局在震后的第一天架设了2个流动台站(LD1, LD2),因为客观自然条件限制,位于震源区100 km左右。

上述台站均采用GPS授时,无钟差,尤其是于田台(YUT)、民丰台(MIF)、应急B台(YJB)及2个流动台站(LD1、LD2)在此次地震序列分析过程中发挥了重要作用,为双差定位研究提供了宝贵的资料。

2.2 震相数据

从2014年2月12日17时至2月26日10时,共发生了5492次余震,由于震源区监测能力相对较弱,台站间距较大,且集中分布在震中的北边,致使3个及以上台站记录到的 $M_L \geq 1.5$ 地震事件仅有466次,集中分布在(35.6°~36.5°N, 81.6°~83.1°E),震相数据中有2380个P波到时,1632个S波到时,平均每次地震事件约有9个震相数据。重新审核了地震事件中的每一个震相数据,并使用了仿真、滤波、S波转置水平分量等手段,使得Pg读取误差在0.1 s内,Sg读取误差在0.2 s内,以提高每个地震的定位精度,为双差定位提供可靠的震相数据,进而减小定位误差。

3 定位方法

3.1 结合地震台网和地震台阵数据确定震中

近年来,新疆地震台网一直结合“3400走时表”使用单纯形方法(张炳等,2012)进行地震

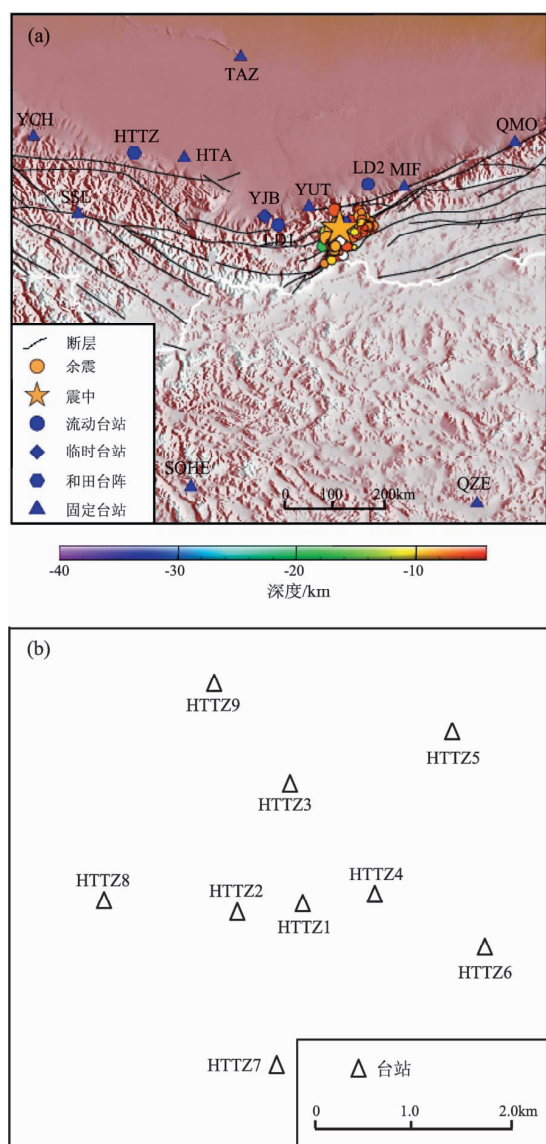


图2 于田主震、余震震中及其附近地震台站分布 (a) 及和田台阵的各子台分布 (b)

Fig. 2 Distribution of epicenter of Yutian main earthquake and aftershocks, seismic stations in surrounding area (a), and substations of Hetian array (b)

定位。数据处理软件由广东省地震局研发,已在多个省局广泛应用,定位结果比较可靠(段刚, 2009; 谢辉等, 2011; 梁向军等, 2012; 张炳等, 2012)。

在精确定位时,若震中周围的近台数目较少,也可以利用台阵与震中的精确方位角进行校正。使用地震台阵数据定位地震的方法不同于地震台网,地震台阵被视作一个整体进行数据处理,采用聚束(Beam)、频率—波数($F-K$)分析法对

台阵各子台记录的地震波形进行处理,得到低噪声背景下清晰的地震波形,用各子台的延时作为各子台的相对到时,采取波阵面法计算得到地震的视慢度和方位角,由此确定地震的震中位置(赵镇岭, 朱元清, 2002)。

3.2 双差定位方法

双差地震定位算法(双差法)由Waldhauser和Ellsworth(2000, 2002)提出,是一种相对定位法。该方法对一定空间范围内的地震进行组对,利用组对地震到台站的到时差确定地震的相对位置,这在很大程度上消除了介质横向不均匀造成的路径效应,减小了速度模型对定位的影响,可以对地震序列的精确定位。近年来,双差定位法在我国得到了广泛应用(黄媛等, 2008; 吕坚等, 2008; 朱艾澜等, 2008; 陈九辉等, 2009; 赵博等, 2011; Fang *et al.*, 2013, 2014),采用双差法对地震序列进行重新定位,可以获得较高精度的相对空间位置分布,研究强震发生的深部构造形态,分析地震的复杂构造成因。

4 于田 $M_s7.3$ 主震重新定位

参与于田地震定位的台站在距震中 300 km 范围内仅有 6 个,且大多数都集中在震中的北面,为了提高定位精度,将地震台网与地震台阵数据相结合进行定位是很有必要的。首先,利用 2009 年至今于田台(YUT)、应急 B 台(YJB)、民丰台(MIF)记录的大量地震事件,通过走时曲线,得到此区域初始一维速度模型。其次,使用新疆地震台网及西藏、青海的 18 个地震台站的波形数据,选择震相清楚、信噪比高的 24 个震相到时数据(包括 Pg、Sg、Pn、Sn),单纯形法对于田地震进行重新定位,台站的空隙角最大约为 64° ,定位结果为 $(36.102^\circ\text{N}, 82.505^\circ\text{E})$,深度为 12 km。重新定位时,台阵与震中的方位角为 290.87° ;利用和田台阵 9 个子台记录的到时数据,得到和田台阵中心与震中精确的方位角为 289.94° ;方位角差值为 0.93° ,和田台阵中心与震中的震中距为 330 km,由于方位角由大向小校正,而且参与重新定位的、位于震中南侧的台站仅有 3 个,因此,对震中向南进行校正,最终结果为 $(36.054^\circ\text{N}, 82.505^\circ\text{E})$,与单纯形法的结果相比较,定位误差约为 5 km。

5 余震序列重定位

由于对震源区的速度结构研究不足,根据 CRUST2.0 速度模型,采用双差方法中的共轭梯度组队法对余震序列重新定位,得到了主震和 465 次余震的震源位置参数,NS、EW 和 UD 共 3 个方向的平均相对误差分别为 0.13 km、0.14 km、0.15 km,走时残差为 0.012 s。

(1) 图 3 给出了重新定位前、后的震中分布图像。与原始定位结果相比,重新定位后的震中分布更加集中。重新定位后主震位置为 (36.081°N ,

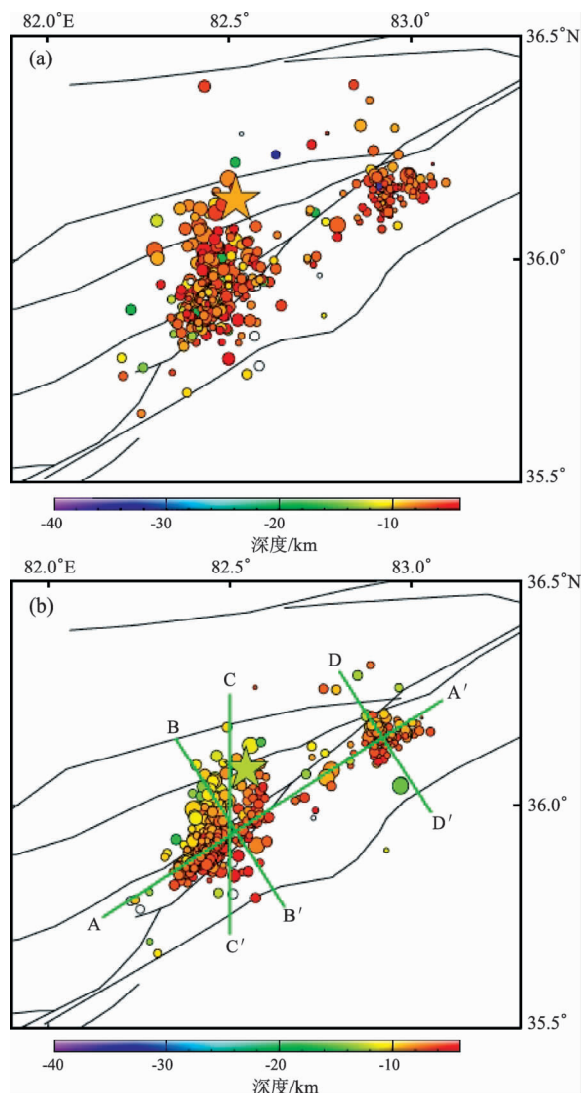


图 3 重定位前 (a)、后 (b) 的于田主震和余震分布

Fig. 3 Epicenter distribution of Yutian $M_s 7.3$ main shock and aftershocks before (a) and after (b) relocation

82.544°E); 震源深度 12.5 km。从平面图上看,余震整体分布呈北东方向展布,余震向主震的西南和东北两个方向延伸,西南方向地震数量较多,展布较宽,且余震近南北向分布;北东方向数量较少,展布较窄,且主震沿北东方向大约 20 km 范围内余震很少。

(2) 图 3 中给出了横穿余震分布的 4 个地震

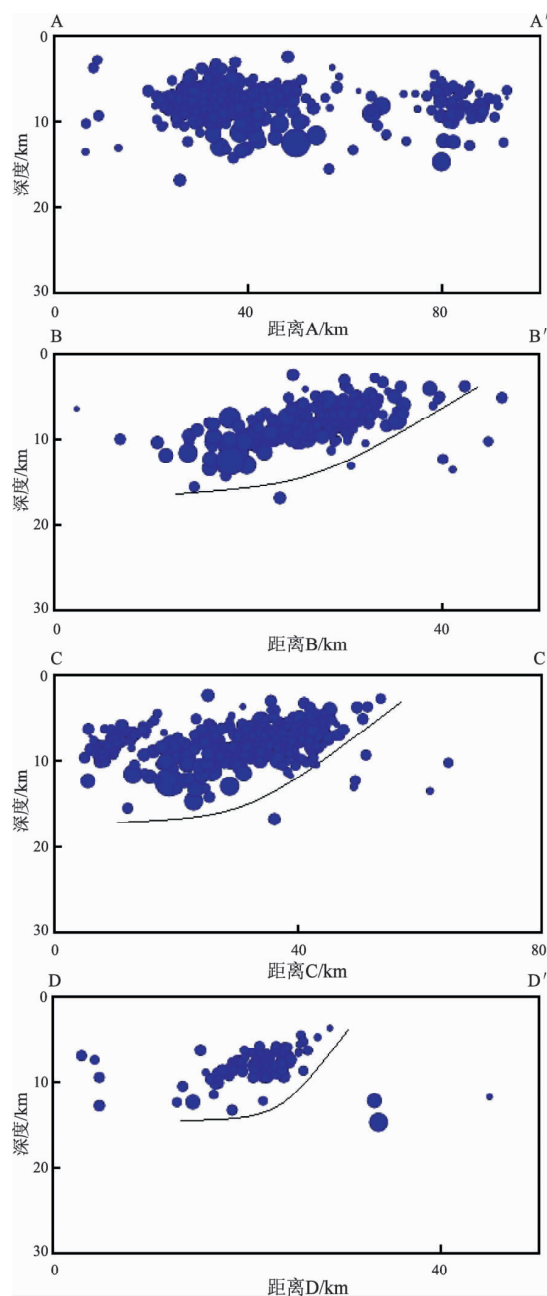


图 4 重定位后沿 AA' (a)、BB' (b)、CC' (c)、DD' (d) 剖面余震深度分布

Fig. 4 Focal depth distribution of aftershocks along the profiles of AA' (a), BB' (b), CC' (c) and DD' (d) after relocation

震源深度剖面。图 4 给出了重新定位后 4 个剖面的余震震源深度分布，震源深度剖面显示：西南方向长近 40 km，北东方向长近 20 km；主震的西南方向余震优势震源深度在 5 ~ 15 km 之间，展布宽约 30 km；主震的北东方向余震优势震源深度在 5 ~ 10 km 之间，展布宽近 20 km；震级较大的地震震源深度较大；靠近山脉的震源深度较深，从山

体由近及远的震源深度逐渐变浅。

(3) 图 5 给出了重新定位后不同时间段的震中分布图，呈现出明显的时空变化。震后 3 d 内的震源深度集中在 5 ~ 15 km，而 4 ~ 15 d 内的震源深度集中在 5 ~ 10 km，表明震后的半个月內，震源深度总体呈现变浅的趋势。另外，震后的第二周，主震的北东方向地震数目明显增多。

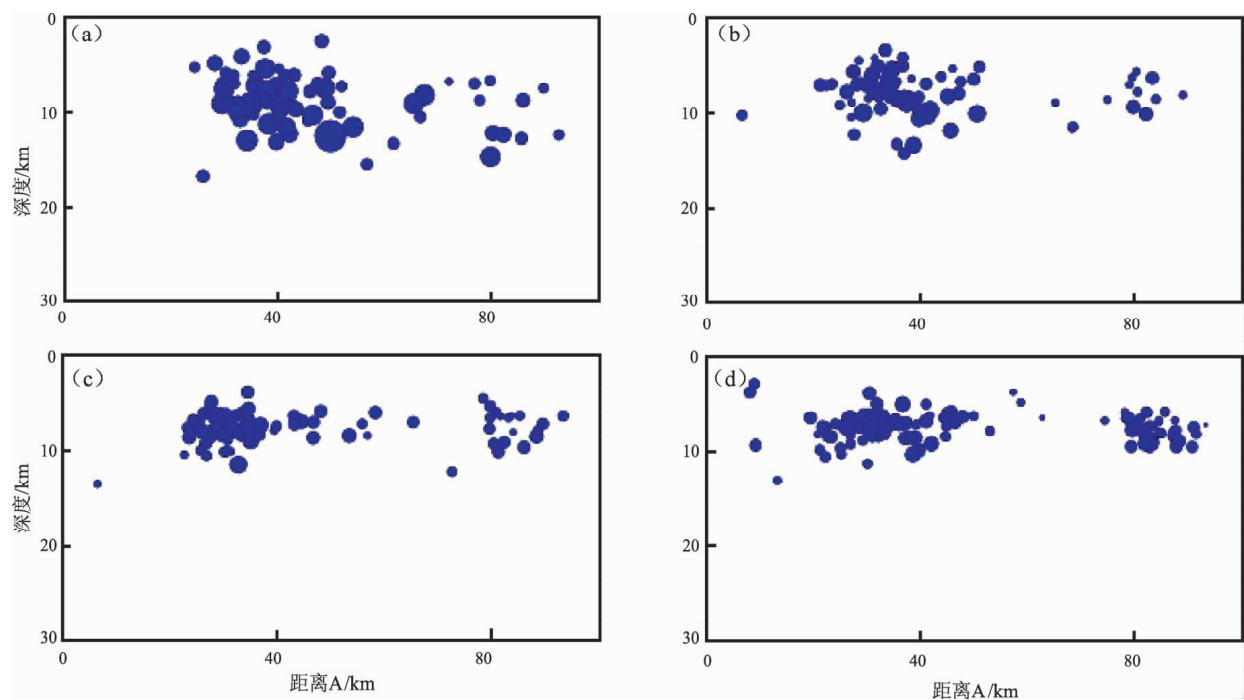


图 5 重定位后不同时间段的沿 AA'剖面余震深度分布
(a) 震后 24 h; (b) 震后 25 ~ 72 h; (c) 震后 4 ~ 7 d; (d) 震后 8 ~ 15 d

Fig. 5 Focal depth distribution of aftershocks in different periods along the AA' profile after relocation
(a) within 24 hours after main earthquake; (b) from 25 hours to 72 hours after main earthquake; (c) from 4 days to 7 days after main earthquake; (d) from 8 days to 15 days after main earthquake

6 结论与讨论

(1) 关于于田 $M_s7.3$ 地震的震源位置和深度，不同单位给出的结果略有差异，其中纬度差异较大（表 1）。中国地震台网中心及其他组织使用的定位数据来自国家数字地震台站及全球各地的监测台站，离震中较远，同时双差定位方法是一种相对定位方法，定位的结果可能出现整体性的位置偏移。本文使用的近台数据，且结合和田台阵得到的精确方位角进行了校正，笔者认为本文给出的主震震源位置（ 36.054°N ， 82.505°E ），震源深度为 12.5 km，相对而言更加接近实际震中。

表 1 2014 年 2 月 12 日于田 $M_s7.3$ 地震震源参数
Tab. 1 The hypocenter parameters of Yutian $M_s7.3$ earthquake on Feb. 12, 2014

序号	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	深度/km	结果来源
1	36.1	82.5	12.0	中国地震台网中心
2	35.9217	82.5581	12.4	美国国家地震信息中心 (NEIC)
3	36.27	82.59	13.5	全球矩心矩张量研究组 (GCMT)
4	36.081	82.544	12.5	本文双差定位
5	36.054	82.505	12.5	本文重新定位

(2) 重新定位后的结果显示余震整体分布呈北东方向展布，主震的西南方向长近 40 km，北东方向长近 20 km，震源深度为 5 ~ 15 km。余震整体分布与此次地震的等震线长轴走向（图 1）一致。

震后的半个月內,震源深度总体呈现变浅的趋势。

(3) 于田地震余震序列的空间形态沿破裂显示了分段和非均匀特征。余震向主震的西南和北东两个方向延伸。西南方向地震数量较多、余震展布区域的宽度较宽,北东方向数量较少、余震展布区域的宽度较窄,且震后的第二周,北东方向余震数目明显增多。这种明显的分段和非均匀特征,与中国地震局地球物理研究所给出的地震破裂过程相符(中国地震局地球物理研究所,2014。),也说明主震的西南方向性质较软弱,有利于余震的扩散。

(4) 主震的北东方向 20 km 范围内余震很少,可能是在此区域遇到了障碍体;从中国地震局地质研究所地震应急遥感技术协调组给出的第一版 2014 年 2 月 12 日新疆于田 $M_s7.3$ 地震 ETM 影像图中(中国地震局地质研究所,2014。),可以看到有过一次明显的破裂留下的痕迹,也可能是由于此区域发生过较大地震;还有可能类似于汶川地震(赵博等,2011),此区域没有完全破裂,存在发生较大余震的可能。

中国地震局监测预报司对本项工作给予了大力支持,甘肃、江苏、辽宁、上海、浙江等地震局及新疆地震局阿克苏中心台、喀什中心台的分析工作人员共同处理于田地震序列,为本文提供了高质量的震相报告,高国英研究员的耐心帮助,本文使用了 Waldhauserr 先生提供的 hypoDD 程序,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 陈九辉,刘启元,李顺成,等. 2009. 汶川 $M8.0$ 地震余震序列重新定位及其地震构造研究[J]. 地球物理学报,52(2):390-397.
- 段刚. 2009. JOPENS 系统单纯型定位法定位中国台湾地震精度分析[J]. 地震地磁观测与研究,30(3):127-131.
- 段天山. 2009. 新疆和田小孔径地震台阵的建设[J]. 内陆地震,23(2):166-173.
- 黄媛,吴建平,张天中,等. 2008. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重新定位研究[J]. 中国科学(D 辑),38(10):1-8.
- 梁向军,董春丽,张蕙. 2012. 基于“十五”测震分析处理软件 MSDP 的多种地震定位方法[J]. 地震地磁观测与研究,33(3):317-323.
- 吕坚,苏金蓉,靳玉科,等. 2008. 汶川 $M8.0$ 级地震序列重新定位及其发震构造初探[J]. 地震地质,30(4):917-925.
- 万永革,沈正康,盛书中,等. 2010. 2008 年新疆于田 7.3 级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释[J]. 地球物理学报,53(2):280-289.
- 谢辉,金春华,蔡新华,等. 2011. MSDP 单纯型和 HYP2000 定位方法对比分析[J]. 地震地磁观测与研究,32(5):15-19.
- 尹光华,蒋靖祥,吴国栋. 2008. 2008 年 3 月 21 日于田 7.4 级地震的构造背景[J]. 干旱区地理,31(4):543-549.
- 张炳,汪贵章,戚浩,等. 2012. HYP2000 与单纯形定位方法对比及作为速报算法的可行性分析[J]. 地震地磁观测与研究,33(5):13-17.
- 赵博,石玉涛,高原. 2011. 汶川 $M_s8.0$ 地震及余震序列重新定位[J]. 地震,31(2):1-10.
- 赵镇岭,朱元清. 2002. 上海地震台阵的地震定位方法[J]. 地震地磁观测与研究,23(2):85-96.
- 中国地震局地球物理研究所. 2014 年 2 月 12 日新疆维吾尔自治区和田地区于田县 7.3 级地震(II)[P/OL]. (2014-2-12)[2014-2-28]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/269361.shtml>.
- 中国地震局地质研究所. 新疆和田地区玉田县 7.3 级 ETM 影像图[P/OL]. (2014-2-12)[2014-2-28]. <http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/%E4%BA%8E%E7%94%B0%E5%9C%B0%E9%9C%87ETM%E5%8D%AB%E6%98%9F%E5%BD%B1%E5%83%8F%E5%9B%BE-%E5%9C%B0%E8%B4%A8%E6%89%80OK.jpg>.
- 朱艾斓,徐锡伟,刁桂苓,等. 2008. 汶川 $M8.0$ 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析[J]. 地震地质,30(3):759-767.
- Fang L. H., Wu J. P., Wang C. Z., et al. 2014. Relocation of the 2012 $M_s6.6$ Xinjiang Xinyuan Earthquake Sequence[J]. Science China: Earth. Sciences,57(2):216-220, doi: 10.1007/s11430-013-4755-6.
- Fang L. H., Wu J. P., Wang W. L., et al. 2013. Relocation of the Main-shock and Aftershock Sequences of $M_s7.0$ Sichuan Lushan Earthquake[J]. Chin. Sci. Bull., 58(28):3451-3459, doi: 10.1007/s11434-013-6000-2.
- Waldhauser F., Ellsworth W. L. 2000. A Double-difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Seism. Soc. Amer., 90(6):1353-1368.
- Waldhauser F., Ellsworth W. L. 2002. Fault Structure and Mechanics of the Hayward Fault, California, from Double-difference Earthquake locations[J]. J. Geophys. Res., 107(B3), doi: 10.1029/2000JB000084.

Research on Location of Yutian $M_s7.3$ Earthquake and Aftershocks Sequence in 2014

RAN Hui-min, WEI Bin, ZHANG Zhi-bin, ZHAO Qing

(*Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China*)

Abstract

Based on regional 1-D velocity model and combined with the azimuth of Hetian arrays, we determined the epicenter location of Yutian $M_s7.3$ main shock on Feb. 12, 2014 by using the simplex algorithm, and relocated the epicenter location of Yutian $M_s7.3$ main shock and 465 aftershocks by use of the double-difference location method. The result show that the average relative errors of location accuracy are 0.13 km, 0.14 km, 0.15 km in NS, EW and UD respectively, and the average travel time residual is 0.012 s. The overall spatial distribution of aftershocks is in NE direction, and extends to southwest and northeast of main shock. The aftershock distribution area in the southwest of main shock are about 40 km long and 30 km wide, those in the northeast are about 20 km long and 20 km wide, and the focal depths focus on 5 ~ 15 km. The spatial distribution characteristic of aftershock sequence shows segmental and inhomogeneous along the rupture. The earthquakes in the southwest of the main shock are more, and distribute wide in NS, the focal depths of them mainly distribute in 5 ~ 15 km. However, the earthquakes in the northeast of the main shock are less and the focal depth of them mainly distribute in 5 ~ 10 km. The focal depth of the aftershock near the mountain is deeper than that of the far. The temporal characteristic of aftershocks sequence are that the focal depth focus on 5 ~ 15 km within 3 days after the main shock, thereafter they are 5 ~ 10 km, and show the tendency of becoming shallower and shallower.

Key words: Yutian $M_s7.3$ earthquake; simplex algorithm; azimuth; double-difference location method; relocation