

2016 年青海门源 M_s 6.4 地震序列重定位^{*}

黄 浩, 王培玲, 沙成宁

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

摘要: 采用逆时成像技术, 重新定位 2016 年 1 月 21 日青海门源 M_s 6.4 地震。使用双差定位方法对余震序列中 878 次余震进行重定位, 获得了 701 次余震的重定位结果。统计定位误差 (两倍标准偏差) 在 EW、NS 和 UD 方向依次为 0.4、0.5 和 0.9 km, 平均定位误差为 0.2 s。余震在 NW-SE 向展布约 16 km, 在 NE-SW 向展布约 10 km。震源深度分布在 2~25 km, 可以分为 3 层, 优势分布在 6~10 km。据震源深度剖面推测, 发震断层为 NE 向倾斜的逆断层, 深度较深。主震位于发震断层顶部, 其下方存在 V 形凹凸体, 结合震源机制结果认为, 门源地震可能是发震断层在逆冲过程中受阻于 V 形凹凸体而产生的。

关键词: 门源 M_s 6.4 地震; 双差定位; 逆时成像; 余震序列; 震源参数

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)增刊 1-0043-06

0 引言

据中国地震台网中心测定, 2016 年 1 月 21 日 1 时 13 分, 青海省海北州门源县发生 M_s 6.4 地震, 震中位置 (37.7°N , 101.6°E), 震源深度 10 km (以下简称门源地震)。截至 5 月 11 日 8 时, 青海省数字地震台网共记录到 $M_L \geq 0$ 余震 1 424 次, 其中 M_L 4.0~4.9 共 1 次, M_L 3.0~3.9 共 15 次, M_L 2.0~2.9 共 120 次, M_L 1.0~1.9 共 626 次, M_L 0.0~0.9 共 662 次, 最大余震为 1 月 21 日 M_L 4.1 地震。

门源地震发生在祁连地震带的冷龙岭断裂中段附近, 该断裂地处青藏高原东北缘, 是祁连山断裂带的重要组成部分。冷龙岭断裂全长 127 km, 总体走向 $N60^\circ \sim 70^\circ\text{W}$, 倾向 NE, 倾角 50° 。该断裂东端与古浪断裂及毛毛山断裂相接, 西段与托莱山断裂相接, 是一条全新世活动断裂, 1986 年 8 月 26 日在该断裂中段曾发生了门源 M_s 6.5 地震 (何文贵等, 2000, 2010)。

本文利用双差定位方法对 2016 年门源地震序列进行了精定位, 获得了比台网定位更准确的震源参数, 为研究门源地震的发震构造、震源位置在水平方向、深度方向以及不同时间段的分布特征提供了基础数据。

1 数据资料选取

门源地震发生在青海和甘肃两省交界附近的青海一侧。青海省数字地震台网实时传输的地震台站包括了青海省数字地震台网的固定台站、甘肃省数字地震台网的共享台站、部分科学台阵探测项目的台站和震后紧急架设的 2 个流动观测台站。这些台站对震区形成了较好的方位覆盖, 距离也相对较近, 确保了青海省数字地震台网产出的定位结果具有较好的可靠性。

根据青海省地震台网中心提供的观测报告, 2016 年 1 月 21 日~5 月 11 日震区共记录到 1 424 次地震。为了确保参与精定位的震相数据具有较高的可靠性, 同时尽可能使用更多的震相数据, 我们对原始观测报告进行了筛选, 从中挑选出符合要求的地震事件和台站: 挑选至少由 4 个台站参与定位的 $M_L \geq 0$ 地震, 从中选择震中距小于 200 km 的台站的震相数据。筛选后, 符合要求的地震共有 878 次 (图 1)。

2 定位方法

图 1 展示了经过初步筛选的青海省数字地震台网定位的余震序列, 以及青海省数字地震台网、

^{*} 收稿日期: 2016-08-23.

基金项目: 青海省地震科学基金 (2016A01)、中国地震局星火计划 (XH16039) 及地震行业科研专项 (201308011) 联合资助。

甘肃省数字地震台网、中国地震台网中心和 USGS 测定的门源地震的震中位置。从图中可看出,上述 4 家单位给出的门源地震的震中位置并不完全相同、甚至存在较大偏差。中国地震台网中心是我国地震发布的官方机构,其测定的震源位置更具权威性。假定中国地震台网中心测定的震源位置就是门源地震实际发生的位置,那么青海省数字地震台网给出的门源地震序列的震源位置存在约 2 km 的整体性定位误差,显然这样的初始和绝对定位误差是被广泛使用的相对定位方法——双差定位方法所无法减小或消除的。即使中国地震台网中心测定的震源位置更具权威性,但由于使用了常规的盖戈定位方法,不可避免的在非线性定位问题线性化的过程中引入了误差,使用的区域速度模型相对于震区不够精细等因素,其定位结果也存在一定程度的误差。

考虑到门源地震及其余震的定位误差问题,本文选用了一种定位精度较高的非线性定位方法——逆时成像技术(许力生等, 2013a, b)对门源地震进行了重定位,并根据重定位后的主震位置对余震序列的震中位置进行了整体性校正,以

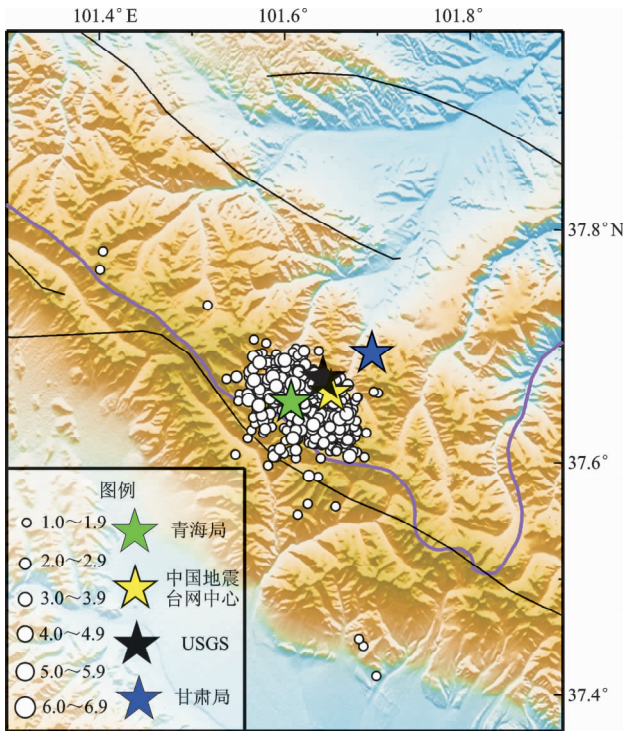


图 1 门源地震序列分布及不同机构给出的主震位置
Fig. 1 Distribution of Menyuan earthquake sequence and the location of mainshocks located by different research institutions

减小其绝对定位误差,最后采用双差定位方法对余震序列进行了重定位。

逆时成像技术(许力生等, 2013a, b, c)是一种非线性定位方法,由于没有采用任何近似而采用了互相关、聚束能量、非均匀网格搜索等多项技术,克服了常规的盖戈方法存在的定位误差和缺点,可以获得比常规定位方法更精确的定位结果。在数值实验中(许力生等, 2013a),逆时成像技术在不同的噪声水平、台网几何下,对网内和网际的地震事件均表现出相当高的定位精度。而逆时成像技术在已知震源位置的人工地震检验中同样表现出较高的定位精度(许力生等, 2013b), 10 次人工地震震中位置的偏差在 500 m 左右,震源深度的偏差在 200 m 左右,时间偏差在 0.4 s 左右。

双差定位方法(Waldhauser, Ellsworth, 2000)是一种相对定位方法,该方法能够在一定程度上减小由于速度模型不准确引起的误差,可以更好地显示丛集地震在三维空间的分布特征,因而在国内外的定位研究中取得了广泛应用。如果 2 个地震震源之间的距离足够小,那么它们到同一台站的射线路径近似相同,因此 2 个地震事件在同一台站的走时差就来自与它们的空间位置差异。对于地震 i 、 j 到达台站 k 的走时 t_k^i 、 t_k^j , 引入下式

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

式中, Δm^i 是第 i 个地震震源参数的改变量, dr_k^{ij} 即是所谓的双差,可分别表示为

$$\Delta m^i = (\Delta dx^i, \Delta dy^i, \Delta dz^i, \Delta d\tau^i), \quad (2)$$

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

其中, $(t_k^i - t_k^j)^{\text{obs}}$ 是实际观测走时差, $(t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}}$ 为理论计算走时差。

将所有地震($i, j = 1, 2, \dots, N$), 所有台站($k = 1, 2, \dots$) 都得到形如(1)式的方程,采用矩阵可表示为

$$\mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{W}\mathbf{d}. \quad (4)$$

式中, \mathbf{G} 是一个 $M \times 4N$ 阶的偏微商矩阵, M 是双差观测的数目, N 是地震数; \mathbf{d} 是双差资料矢量, \mathbf{m} 是由待定震源参数改变量构成的维数为 $4N$ 的矢量; \mathbf{W} 是用以对每个方程加权的对角线矩阵。

计算时利用下式约束所有地震重新定位后平均位移为零, 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。

$$\sum_{i=1}^N \Delta m^i = 0. \quad (5)$$

2.1 主震重定位

本文收集了震中 70 km 范围内的 10 个台站的观测资料, 其中包括 8 个科学台阵探测项目的台站、1 个青海固定台站和 1 个甘肃固定台站, 这些台站距离震中近, 方位分布较好, 有利于进行高精度的定位研究。选用逆时成像技术, 采用了 6 种与门源地区关系密切的速度模型 (胥颐等, 2000; 董治平, 张元生, 2007; 王椿镛等, 1995; 张先康等, 2008; 吴建平等, 1998; 张元生等, 2004), 并反复对比了不同速度模型和台站组合条件下定位结果的不确定性大小, 从而确定了最佳的速度模型 (张先康等, 2008) 和台站组合, 如图 2 所示。最终确定门源地震的发震时刻为 2016 年 1 月 21 日 1 时 13 分 (11.76 ± 0.06) s, 起始破裂点位于 (37.672 ± 0.001)°N, (101.615 ± 0.001)°E, 震源深度 (9.4 ± 1.0) km。

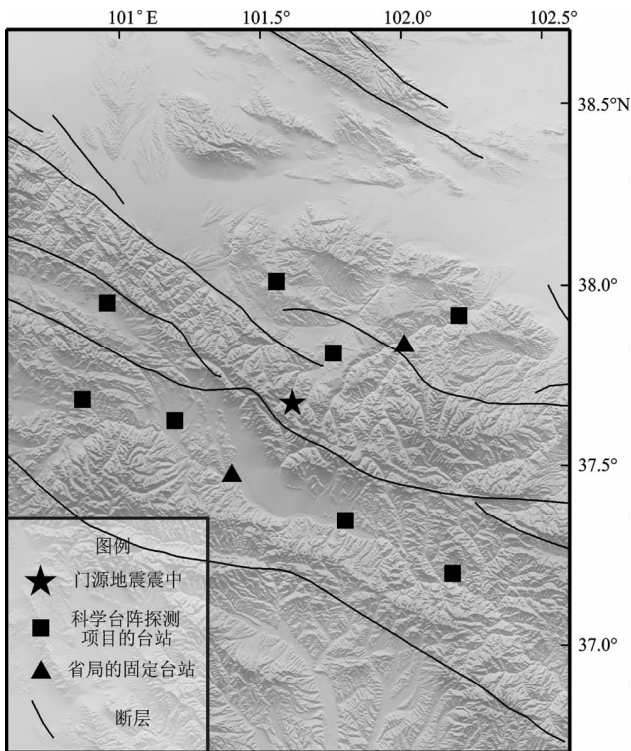


图 2 主震重定位时使用的台站

Fig. 2 Stations used by relocation of mainshock

2.2 余震序列重定位

余震序列定位前, 根据青海省数字地震台网与本文重定位的门源地震 2 次定位结果之间的偏差, 对所有余震的震中位置进行整体性校正以减小初始定位的绝对误差, 并将校正后的结果作为重定位的初始位置 (房立华等, 2011; 徐甫坤等, 2015)。

在地震对配对时, 选取震中距小于 200 km 的台站所记录的震相, 设定事件对之间的最大距离为 6 km, 事件对使用的最大邻居数目为 40, 定义一个邻居最小的连接数为 6, 每一个事件相邻的最小数目、最大数目分别为 6 和 40 个。挑选后, 获得 91 845 条 P 波初至震相, 80 033 条 S 波初至震相。考虑到序列中小震的数量比较多, 人工读取 S 波震相的精度比 P 波低, 所以在初始配对过程中给予 Pg 震相权重 1.0, Sg 震相权重 0.50。定位时使用共轭梯度法进行了两轮迭代, 每轮迭代重复 10 次以剔除不符合筛选条件的地震, 在第二轮迭代时将 Sg 震相的权重降为 0.25。

在主震重定位时, 我们选择了 6 种与门源震区关系密切的速度模型, 对比相同的观测资料在使用不同的速度模型时定位结果的不确定性大小, 最终选择了张先康等 (2008) 由近南北向的马尔康—碌曲—古浪深地震测深资料给出的沿该剖面的速度模型。由人工地震测深获得的该速度模型对地下结构的划分较为精细, 因此我们采用该模型对余震序列进行重定位。速度模型分为 9 层, 每层的上界面深度依次为 0、1.6、4.0、10.0、19.0、27.0、35.0、40.0 和 50.0 km, 对应的 P 波速度依次为 4.2、5.0、5.7、6.0、6.1、5.9、6.3、6.4 和 8.0 km/s, 波速比根据多台和达法拟合为 1.69。

3 重定位结果

重定位后得到了 701 次地震的震源参数, 统计定位误差 (两倍标准偏差) 在 EW 向为 0.4 km, NS 向为 0.5 km, UD 方向为 0.9 km, 平均定位误差为 0.2 s。

3.1 余震的空间分布特征

图 3 展示了重定位后的震源位置在水平面的分布图像。一般情况下, 台网给出的定位结果只精

确到 0.01° ，因此在较小的区域内台网给出的定位结果呈现出网格状的分布现象。重定位后的震中位置改善了这一现象，震中的分布更加集中。余震在水平方向的展布大致呈椭圆状，长轴在 NW - SE 向、约 16 km，短轴在 NE - SW 向、约 10 km。余震的展布并不均匀，呈现出在 NE 一侧密集而在 SW 一侧稀疏的特征。主震位于余震区的中央部位附近，余震在主震附近并不密集。

3.2 震源深度分布特征

我们沿余震展布的 2 个优势方向做了 AA' 和 BB' 共 2 条剖面，图 4 展示了震源深度沿 2 条剖面的分布。不难看出，震源深度的分布在 2 ~ 25 km 范围，具有明显的分层特征，特别是在 6 ~ 9 km 密集分布。为了进一步明确震源深度的分层特征，我们统计并对比了重定位前后震源深度的分布特征。由图 5 可以看出，初始定位的震源深度集中在 5 ~ 12 km，而重定位后的震源深度可以分为 3 层，第一层分布在 2 ~ 5 km，第二层分布在 6 ~ 10 km，第三层分布在 11 ~ 22 km。重定位后，震源深度在 11 ~ 22 km 展现出更多的细节信息。

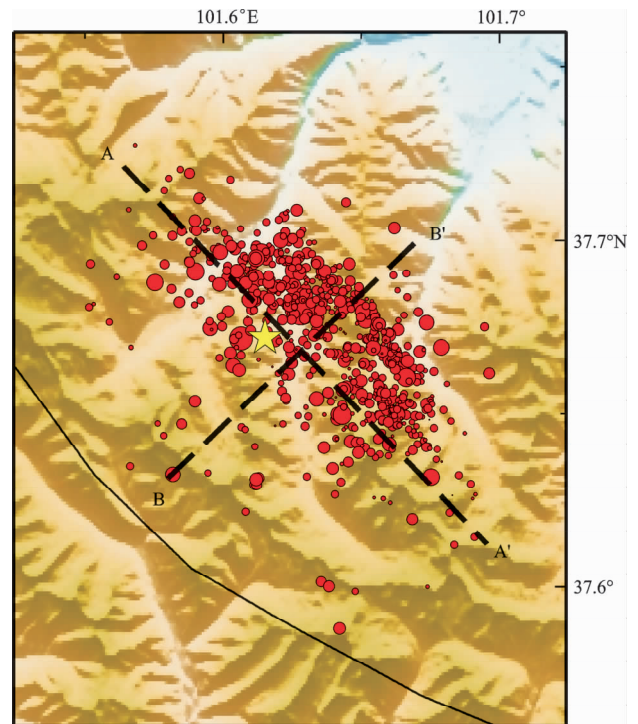


图 3 精定位后的震中分布

Fig. 3 Distribution of epicenters after relocation

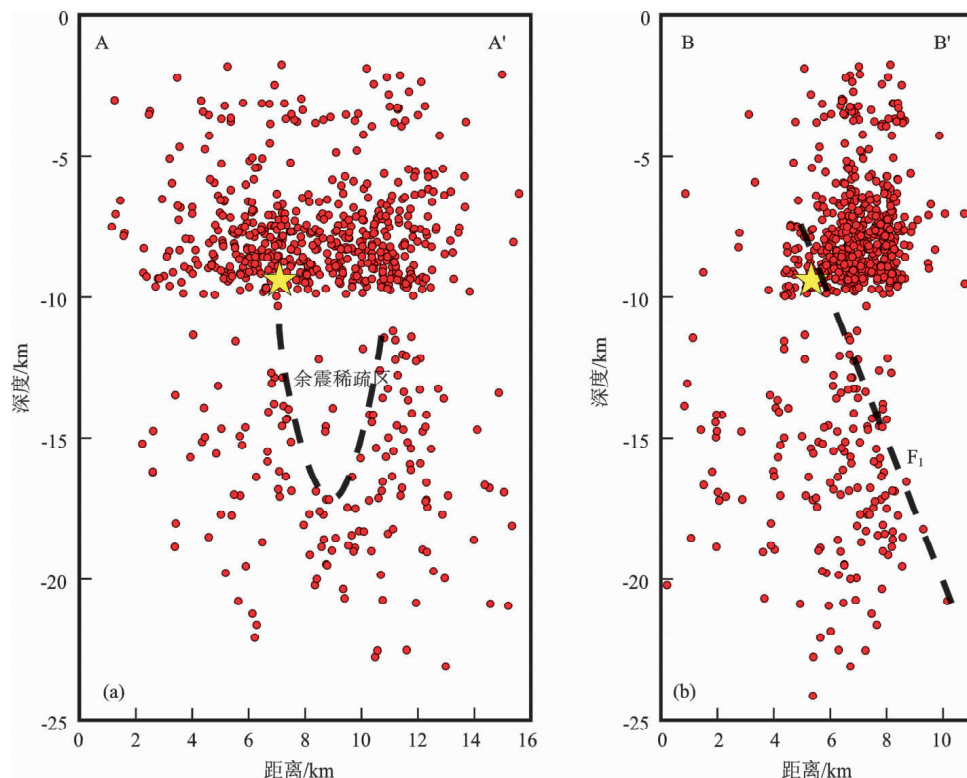


图 4 震源深度在 AA' (a) 和 BB' (b) 剖面的分布 (黄色五角星代表重新定位主震的震中位置; F_1 为推测的门源地震的发震断层)

Fig. 4 Distribution of focal depths along profiles AA' (a) and BB' (b) (Yellow star denotes the location of mianshok relocated, F_1 denotes conjectured seismogenic fault)

主震位于第二层的底部, 余震沿 AA' 剖面分布相对均匀, 但在主震下部的第三层具有一个 V 形的余震稀疏区域; 余震沿 BB' 剖面方向的展布具有不同的特征, 在第一层展布约 3 ~ 4 km, 分布相对稀疏, 在第二层展布约 4 km, 分布密集, 在第三层展布约 10 km, 分布较为松散, 但具有一定的形态。

余震沿 2 个优势展布方向的剖面显示, 震源深度在第三层分布相对独立, 且在主震下方具有 V 形的余震稀疏区, 并具有一定的形态特征, 表明余震活动较为复杂, 并不仅仅受控于单一的断裂构造, 图 4 中 F_1 为本文根据余震的分布形态推测的门源地震的发震构造。

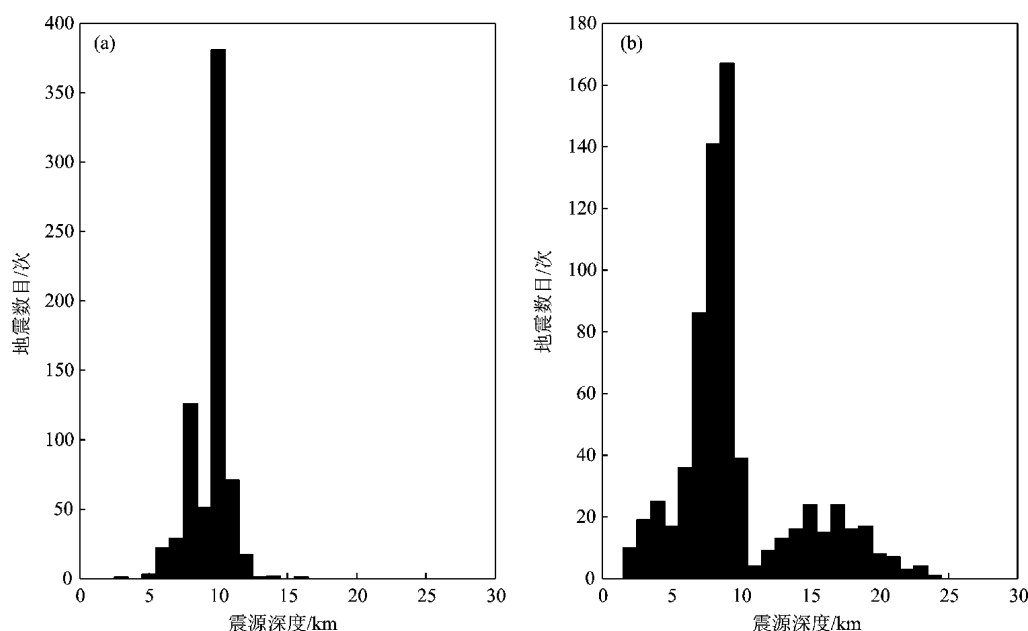


图 5 精定位前 (a)、后 (b) 震源深度的统计

Fig. 5 Statistic of focal depths before (a) and after (b) relocation

4 讨论与结论

本文根据一种高精度的非线性定位方法——逆时成像技术对门源地震重定位, 得到的结果对青海省数字地震台网给出的门源地震余震序列进行整体的位置校正, 然后采用双差定位方法对余震序列进行了精定位。重定位后, 获得了 701 次余震的震源参数, 统计定位误差 (两倍标准偏差) 在 EW 向为 0.4 km, NS 向为 0.5 km, UD 方向为 0.9 km, 平均定位误差为 0.2 s。

余震在水平方向的展布大致呈椭圆状, 长轴在 NW—SE 向、约 16 km, 短轴在 NE—SW 向、约 10 km。余震的展布并不均匀, 呈现出在 NE 一侧密集而在 SW 一侧稀疏的特征; 震源深度分布在 2 ~ 25 km 范围, 而门源地区的上地壳厚度为 23 km (王椿镛等, 1995), 表明震源深度基本分布在上地壳内部。震源深度可以分为 3 层, 第一层分布在 2 ~ 5 km, 第二层分布在 6 ~ 10 km, 第三层分布在 11 ~ 22 km。在定位过程中, 我们检查和测试了不

同的定位参数组合, 发现震源深度的分层现象并不是由定位过程不合理而引起的。重定位后的震源深度在 11 km 上下呈现差异性明显的分布特征, 而张先康等 (2008) 认为上地壳在 10 ~ 12 km 深度以上为正速度梯度层, 10 ~ 20 km 深度之间为低速度层。对比震源深度的分层和地壳速度的不均匀性特征, 我们认为重定位后出现的震源深度分层现象可能是由地壳结构本身的速度不均匀性产生的。与初始定位深度相比, 重定位后的震源深度存在较大变化。初始定位深度的分布范围为 6 ~ 12 km, 而重定位后的深度范围扩大到 2 ~ 25 km, 可以被划分为 3 层, 并具有构造形态的特征, 表明重定位后的震源深度展现了更全面、丰富的震源信息。

中国地震局给出的震源机制结果显示: 门源地震是一次逆冲性质的地震, 节面 I 走向 335°、节面 II 走向 143°。重定位结果显示, 余震在 NW—SE 向具有优势分布, 这与震源机制的走向一致。主震位于推测的发震断层的顶部, 而在主震下方存在 V 形的余震稀疏区域, 这个 V 形余震稀疏区域可能意味着存在一个凹凸体。根据余震震源深

度剖面推测,发震断层由一组 NE 向倾斜的断层组成,余震的震源深度略浅,并集中在发震构造的上部区域。震源深度在 0~2 km 没有分布,说明推测的发震断裂是隐伏的、在地表应该没有出露。余震分布长轴的走向(120°)与冷龙岭断裂的走向(125°)比较符合,假如推测的发震断裂延伸至地表,距冷龙岭断裂在地表的出露位置 3 km,因此发震断裂可能是冷龙岭断裂北侧的一条隐伏断裂。我们结合震源机制和余震的震源深度剖面推测,门源地震的发震断层是一条 NE 向倾斜的逆断层,其断层滑移受阻于 V 形凹凸体,因而在凹凸体周围积聚了大量能量,最终发生了门源地震。

许力生研究员提供了逆时成像软件并给予了悉心的指导,杜海林博士和严川博士在软件的使用过程中提供了大量的帮助和建议,在此一致表示衷心感谢!

参考文献:

- 董治平,张元生. 2007. 河西走廊中部地区三维速度结构研究[J]. 地球学报,28(3):270-276.
- 房立华,吴建平,张天中等. 2011. 2011 年云南盈江 $M_s5.8$ 地震及其余震序列重定位[J]. 地震学报,33(2):262-267.
- 何文贵,刘百簪,袁道阳等. 2000. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究[J]. 西北地震学报,22(1):90-97.
- 何文贵,袁道阳,葛伟鹏等. 2010. 祁连山活动断裂带中东段冷龙岭断裂滑动速率的精确厘定[J]. 地震,30(1):131-137.
- 王椿镛,林中洋,陈学波. 1995. 青海门源—福建宁德地学断面综合地球物理研究[J]. 地球物理学报,38(5):590-598.
- 吴建平,明跃红,叶太兰等. 1998. 体波波形反演对青藏高原上地幔速度结构的研究[J]. 地球物理学报,41(S1):15-25.
- 胥颐,刘福田,刘建华等. 2000. 中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地震层析成像[J]. 中国科学:地球科学,30(2):113-122.
- 徐甫坤,刘自凤,张竹琪等. 2015. 2014 年云南景谷 $M_s6.6$ 地震序列重定位与震源机制解特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报, (10):1741-1754.
- 许力生,杜海林,严川等. 2013a. 一种确定震源中心的方法:逆时成像技术(一)——原理与数值实验[J]. 地球物理学报,56(4):1190-1206.
- 许力生,严川,张旭等. 2013b. 一种确定震源中心的方法:逆时成像技术(二)——基于人工地震的检验[J]. 地球物理学报,56(12):4009-4027.
- 许力生,严川,张旭等. 2013c. 芦山 $M_s7.0$ 地震究竟发生在哪里?[J]. 地球物理学报,56(9):2982-2993.
- 张先康,嘉世旭,赵金仁等. 2008. 西秦岭—东昆仑及邻近地区地壳结构——深地震宽角反射/折射剖面结果[J]. 地球物理学报,51(2):439-450.
- 张元生,周民都,荣代路等. 2004. 祁连山中东段地区三维速度结构研究[J]. 地震学报,26(3):247-255.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A Double - Difference Earthquake Location Algorithm; Method and Application to the Northern Hayward fault, California[J]. BSSA, 90(6):1353-1368.

Double Difference Relocation of Qinghai Menyuan $M_s6.4$ Earthquake Sequences in 2016

HUANG Hao, WANG Peiling, SHA Chengning

(Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract

Based on TRIT (Time - Reversal Imaging Technique), we relocated the Qinghai Menyuan $M_s6.4$ earthquake on Jan. 21, 2016 and 878 aftershocks by double difference method, and obtained the source parameters of 701 earthquakes finally. The statistical location errors (two times of mean square deviation) was 0.4, 0.5 and 0.9 km in EW, NS and vertical directions respectively, the mean time error is 0.2 s. The length of aftershocks in NW - SE and NE - SW is 16 km and 10 km respectively. The focal depth distributes in the range of 2~25 km, which can be divided into three layers, it mainly distributes in the range of 6~10 km. Based on the focal depths profile, we conjectured that the seismogenic fault is a reverse fault tilt towards NE and its depth is deep. The main shock located on the top of the seismogenic fault, and there is a V-shaped asperity under it. Combined with focal mechanism result, we consider that Menyuan earthquake occurred in the thrusting process of seismogenic fault which is blocked by the V-shaped asperity.

Key words: Menyuan $M_s6.4$ earthquake; the double - difference relocation; Time - Reversal Imaging Technique; aftershock sequences; source parameter