

曲均浩, 刘方斌, 郑建常, 薄辉, 张龙, 范晓易, 2018. 乳山地震序列区域台网及台阵定位结果对比. 震灾防御技术, 13(1): 149—157. doi: 10.11899/zzyf20180113

乳山地震序列区域台网及 台阵定位结果对比¹

曲均浩¹⁾ 刘方斌¹⁾ 郑建常¹⁾ 薄辉²⁾ 张龙³⁾ 范晓易⁴⁾

1) 山东省地震局, 济南 250014

2) 山东科技大学, 山东青岛 266510

3) 中地地矿建设有限公司, 北京 100107

4) 山东省地震局泰安基准台, 山东泰安 271000

摘要 精确定位的活动图像为了解断层产状和深部构造提供了重要基础信息。本文采用2014年5月7日至2015年12月31日期间山东地震台网及乳山台阵记录的乳山地震序列 $M_L \geq 1.5$ 级地震进行双差定位对比研究。定位结果显示: 山东地震台网记录的地震经精定位后, 震源位置呈现北西向(约 315°)展布, 剖面上地震分布较为均匀, 震源深度3—11km。乳山台阵记录的地震经精定位后, 震源位置呈现北西西向(约 290°)展布, 在空间上多处相对集中, 体现了序列空间分布的丛集特征; 剖面中心位置地震明显较少, 此处似乎存在一凹凸体, 序列地震基本发生在凹凸体的周围, 震源深度集中分布在4—8km。从已有震源机制解、台站布局、精定位残差、现场调查等多方面综合分析认为, 乳山台阵精定位结果更加准确。

关键词: 地震序列 双差定位 地震台网 乳山台阵

引言

地震定位是根据台站记录的地震波形震相到时数据来确定地震的发震时刻、震源位置、震级等基本参数。地震定位方法主要分为两类: 绝对定位和相对定位。其中绝对定位方法包括盖格法(Geiger, 1912), Hypo71、Hypo78-81系列(Lee等, 1975), Hypocenter(Lienert等, 1986), QUAKE3D(Nelson等, 1990), Hypo2000(Klein, 2007), Hyposat(Schweitzer, 2001)等; 相对定位方法主要有主事件定位法(周仕勇等, 1999)和Hypodd(Waldhauser等, 2000)等。地震定位经历了从几何作图到计算机定位的过程, 随着地震观测技术的发展、台站密度的增加, 地震定位精度得以不断的提高。定位精度主要受台站布局、参与定位的震相、地震波到时读取的精度以及地壳速度模型等因素的影响(Gomberg等, 1990)。Waldhauser和Ellsworth在2000年提出一种定位精度相对较高的定位方法——双差定位法(Double Difference

1 基金项目 中国地震局星火计划项目(XH16025), 山东省地震局青年科研基金(JJ1504Y), 山东省自然科学基金(ZR2014DQ019)

[收稿日期] 2017-04-11

[作者简介] 曲均浩, 男, 生于1981年。博士。主要从事数字地震学应用研究及余震活动机理研究。E-mail: gisqjh@126.com

Algorithm), 该方法对空间范围内的丛集地震进行组对, 反演每个地震相对于该丛集矩心的相对位置。双差定位法通过一定半径范围内每个地震与其相邻地震配对、连接而进行相对定位, 两个事件至同一台站的走时差由其相对位置以及它们之间小范围内的波速所决定, 与震源区以外地震波传播路径上的波速无关。因而, 双差定位法可有效地减小由于对地壳结构了解不够精细而引起的误差, 通过引入事件对到时差得到较高精度的相对空间位置分布, 从而在国内外得到了极为广泛的应用(杨智娴等, 2003; Rietbrock 等, 2004; Schaff 等, 2005; 黄媛等, 2008; 房立华等, 2011; 曲均浩等, 2015)。

1 序列基本概况

据山东地震台网中心测定, 2013 年 10 月 1 日在山东省威海市乳山 (36.83°N , 121.70°E) 发生 M_L 3.8 级地震, 之后小地震持续发生, 地震活动起伏不断。2014 年 1 月 7 日、4 月 4 日、9 月 16 日、2015 年 5 月 22 日分别发生了 M 4.2 级 (M_L 4.7)、 M 4.0 级 (M_L 4.5)、 M 3.6 级 (M_L 4.1)、 M 4.6 级 (M_L 5.0) 等显著性地震事件。截至 2017 年 2 月 28 日, 山东地震台网已记录地震 13080 余次。其中可定位地震 3394 次, 在可定位地震序列中 M_L 4.0 级以上地震 4 次, M_L 3.0—3.9 级地震 27 次, M_L 2.0—2.9 级地震 236 次, M_L 1.0—1.9 级地震 1339 次, 其余为 M_L 1.0 级以下地震。

为进一步精确捕捉乳山地震序列的微震活动, 山东省地震局于 2014 年 4 月底加密了乳山台网, 在震中附近架设 18 个临时台站 (5 月 7 日开始正式记录), 将小震密集区域四象限全面包围, 获取了大量的中小地震及微震的记录资料, 为本文得到乳山地震序列更加准确的空间位置及序列活动特征提供了良好的条件保障。

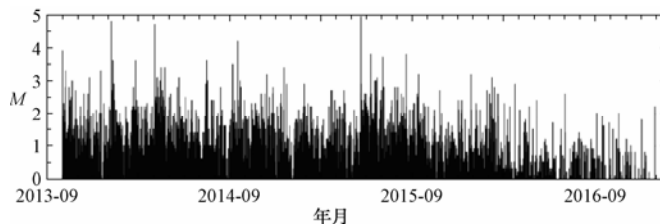


图 1 乳山地震序列 $M-t$ 图

Fig. 1 $M-t$ plot of the Rushan earthquake sequence

2 双差定位研究

2.1 资料选取

乳山地震序列震中距 150km 范围内有山东地震台网固定台站约 12 个, 平均台间距 50km 左右, 受地理环境的制约, 这些台站均位于乳山震群的西北方向, 而东南方向为黄海海域, 没有定位台站。乳山台阵由南马家村、白沙滩镇、南泓南村、小滩旧村、海阳所镇、财税中心、小候家村、大单家、堡上村、桃村王家、多福山、洼于家村、徐家镇、宫家岛、万户村、吉林村、常家庄、董格庄村等周围 18 个相邻位置的台站组成, 其中吉林村、常家庄、董格庄村这 3 个村庄的数据在当地存储, 其余 15 个台站通过 3G 信号实时传入山东地震台网中心。为了从空间上更好地包围序列震中位置, 将乳山周围北煌城、长岛、龙口、烟台、乳山、招远、青岛、莱阳、威海、文登、荣成、石岛等 12 个固定台站的信号实时传入数据汇集系统,

共同形成乳山台阵的整体布局，如图 2 所示。

根据郑建常等（2015a）利用山东地震台网目录对乳山震群的最小完整性震级 R-S 检验，结果表明 $M_L \geq 1.5$ 级的地震目录可以视为是完整的，这充分体现了台网记录优势地震的能力。本文选取两个台网相同的记录时间和起始震级（ $M_L 1.5$ ）进行定位研究。采用山东地震台网和乳山台阵自 2014 年 5 月 7 日至 2015 年 12 月 31 日期间记录的地震波形及目录研究乳山序列定位。在此期间，乳山台阵共记录地震 13783 次，远大于同期山东地震台网记录地震 6975 次，可定位地震 1864 次。其中 $M_L 1.5$ 级以上地震乳山台阵记录 431 次，山东地震台网记录 388 次，二者较为接近。

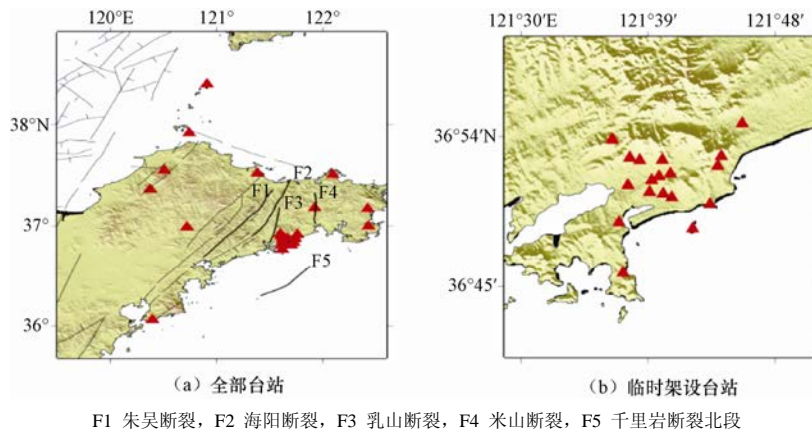


图 2 乳山台阵整体布局

Fig. 2 Epicenters of the Rushan sequence and fault distribution

2.2 重定位参数设置及过程分析

双差定位程序由两部分组成：预处理程序 Ph2dt 和双差定位子程序 Hypodd。Ph2dt 主要使用地震目录中的震相到时或者波形互相关技术得到高精度的震相到时差，将各事件震相做预处理，建立事件间的连接，从中挑选出符合条件的地震事件组成事件对。Hypodd 则是利用震相的走时或互相关数据对地震进行重定位。

以乳山台阵数据的精定位过程为例，考虑到除了临时架设的台阵距离震中位置较近以外，台阵整体布局中青岛、烟台等固定台站距离震中稍远，设置事件对与台站之间最大距离为 150km；乳山台阵台站密集，较小的地震事件也有 4 个以上台站记录到，定位过程易于形成“强连接”的地震事件，设置事件对使用最小震相对数目为 8，邻居所需最小震相对数目亦为 8，事件对之间最大距离 8km。应用数据预处理程序 Ph2dt，将每个地震事件在搜索半径内与同一台站的地震事件按照从近到远的顺序组成地震对，同时将所有的事件-台站对相连，计算每个地震对下面各个连接的观测到时差，形成“强连接”事件对 2801 个。选取的 P 波震相对有 21336 个，占 P 波总震相对(26795)的 79%；S 波震相对 20560 个，占 S 波总震相对(25819)的 79%；弱连接事件 8 对，占全部事件的 1%；强连接事件对间的平均距离为 5.9km，最大距离为 6.7km。临时架设的台站比固定台站距离震中更近，记录震相清晰，但 S 波到时的拾取精度相对于 P 波始终略低，因而，定位过程中仍将 P 波权重赋予 1.0，S 波权重赋予 0.75。双差定位采用水平分层速度模型，震源所在层的速度值对定位结果会产生影响，因而选用较为

精细的速度模型。参考利用层析成像技术得到的胶东半岛地壳速度模型（张岭等，2005；王帅军等，2013）确定本文的速度模型（见表 1）。计算过程采用共轭梯度法解方程求出震源位置和发震时刻，由台阵绝对定位算法计算所得的震中位置作为初始位置，经过 2 组共 6 次反复迭代后获得阻尼最小二乘解。

表 1 地壳速度模型
Table 1 Crustal velocity model

深度/km	$V_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	V_p/V_s
0	4.00	
5	6.10	
10	6.20	1.73
20	6.40	
30	6.78	
40	8.20	

2.3 结果分析

388 次山东地震台网记录的 M_L 1.5 级以上地震经双差定位后，得到 323 次地震基本参数（约 83%）；431 次乳山台阵记录的地震经双差定位后，得到 421 次地震基本参数（约 97%）。从台网与台阵精定位结果空间分布来看，图 3（a）为山东地震台网绝对定位与精定位结果对比图，二者展布趋势基本相同，精定位结果相比于绝对定位结果沿北西向呈现更好的线性展布趋势，形成长约 8km，宽约 3km 的余震分布带。绝对定位结果因经纬度保留两位小数，有更多震中位置相互重合。图 3（b）为乳山台阵绝对定位与精定位结果对比，乳山台阵绝对定位结果显示南侧地震分布相对稀少，整体呈现圆形分布趋势。经精定位后，分布在南北两侧的地震位置调整幅度较大，地震分布明显呈现近北西西向展布形态，长约 4km，宽约 2km；对比山东地震台网精定位结果与乳山台阵精定位结果（图 3（c）），A1A2 为山东地震台网精确定位优势展布方向，呈北西向（走向约 315° ）；B1B2 为乳山台阵精确定位优势展布方向，呈北西西向（走向约 290° ），二者之间存在明显的夹角。

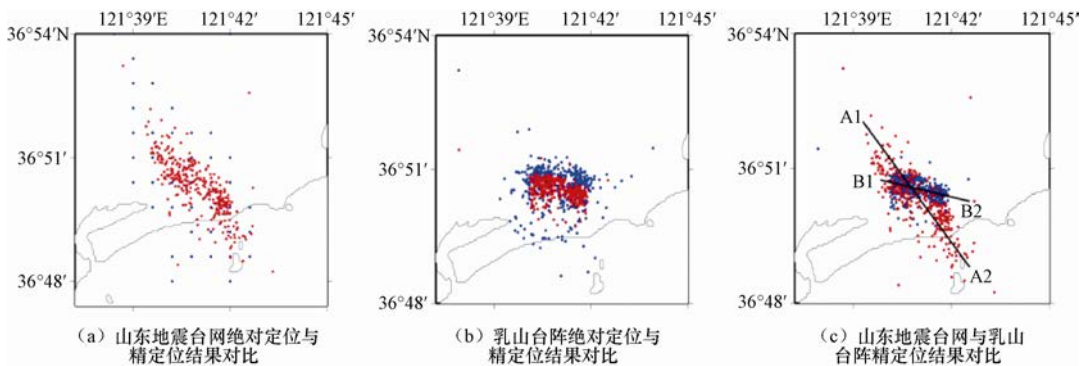


图 (a)、(b) 中蓝色为绝对定位结果，红色为相对定位结果；图 (c) 中红色为台网精定位结果，蓝色为台阵精定位结果

图 3 精定位结果

Fig. 3 The relocation results

对台网精定位结果剖面进行分析, 图 4 (a) 为 A1A2 剖面震源投影, 从 A2 到 A1 地震展布长度约 8km, 震源深度为 3—11km, 地震位置基本均匀分散。图 4 (b) 为震源截面投影, 从 A2 看向 A1 方向, 余震在垂直方向上分布比较陡立, 宽度约为 3km, 地震在深度上的分布较为均匀, 没有明显的集中。

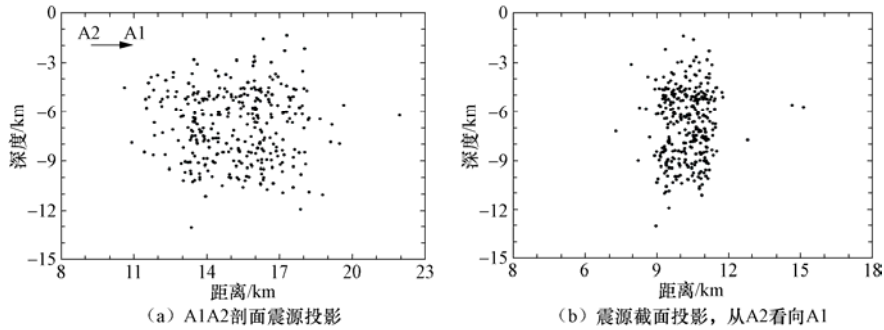


图 4 台网精定位结果剖面

Fig. 4 Precise relocation section of network

对台阵精定位结果剖面进行分析, 图 5 (a) 为 B1B2 剖面震源投影, 从 B2 到 B1 地震展布长度约 4km, 深度主要集中在 4—8km, 地震在空间位置上存在多处的相对集中, 如在东南端 (靠近 B2 位置) 深度约 7km 处, 西北段 (靠近 B1 位置) 深度约 5km 处等, 体现了序列空间分布的丛集特征, 亦反映了断层面上介质的不均匀性。另外, 从空间结构分析, 剖面中心位置地震较少, 这一特征相比于山东台网精定位结果更加明显, 此处似乎存在一凹凸体, 序列地震基本发生在凹凸体的周围, 而中心位置的凹凸体暂时没有破裂, 持续积累能量。图 5 (b) 为震源截面投影, 从 B2 看向 B1 方向, 整个断层截面上余震呈现宽约 2km 近似直立的分布, 这一结果与曲均浩等 (2014)、郑建常等 (2015b) 基于 CAP 方法计算乳山较大余震的震源机制解倾角 (84° 、 90° 、 64° 等) 较大相吻合。如果不考虑左侧零星分散的地震, 上部、中部断层截面宽度约 1km, 下部 7—8km 处破裂范围相对较大。

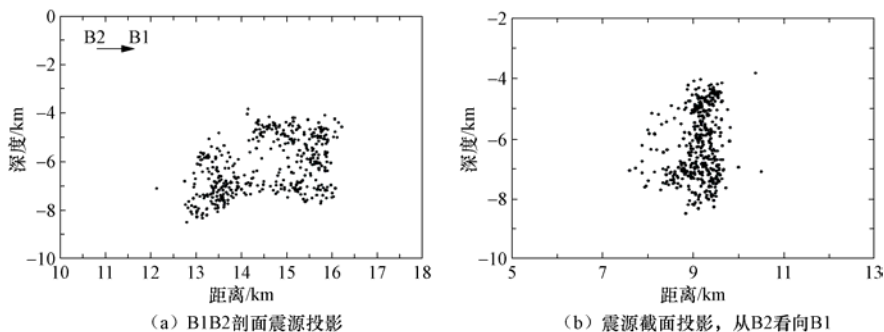


图 5 台阵精定位结果剖面

Fig. 5 Precise relocation section of array

上述山东台网精确定位结果与乳山台阵精确定位结果 (图 3) 相对于其绝对定位结果均呈现明显的线性展布趋势, 位置更加集中, 但是在余震展布方向上仍然存在一定的角度差别。

距离乳山地震序列最近的有 3 条断层 (图 2 (a)), 分别为: 乳山断裂 (F3), 位于震中西侧, 走向 10° , 倾角 $75^\circ\text{—}85^\circ$; 米山断裂 (F4), 位于震中东北侧, 走向近南北, 倾角 $53^\circ\text{—}60^\circ$; 千里岩断裂北段 (F5), 位于震中南侧, 走向北东, 倾角 $60^\circ\text{—}80^\circ$ 。乳山 M_L 4.7、4.5、4.1、5.0 级地震并无地表破裂, 乳山断裂、米山断裂和千里岩断裂产状与上述乳山地震序列展布方向、基于 CAP 方法较大地震震源机制解节面方向 (曲均浩等, 2014; 郑建常等, 2015b) 均不吻合, 因而, 上述 3 条断裂均不可能为该次乳山地震序列的发震断层, 亦无法用于判断两次精定位余震展布方向的准确性。究竟哪一个精定位结果更加准确, 更加贴近实际, 对比研究如下:

(1) 根据郑建常等 (2015b)、曲均浩等 (2015)、李铂等 (2016) 基于 CAP 方法对乳山序列较大地震震源机制解的研究, 所得到的 17 个震源机制解中, 其中 16 个节面优势走向为 290° 左右, 与本文乳山台阵精定位结果地震展布呈现北西西向趋势 (走向约 290°) 更加吻合。

(2) 山东地震台网距离乳山序列震中最近的 3 个台站分别是乳山台、海阳台和文登台, 震中距分别约为 13km、33km 和 42km, 其余台站的震中距均超过 75km; 而乳山台阵临时架设的 18 个台站距震中位置最远不超过 10km, 一般而言, 根据地震波走时关系, 台站离震中 (震源) 越近, 往往得到更为精确的地震定位。

(3) 从震源位置的估算误差 (2 倍标准偏差) 来看, 台网精定位在竖直方向上平均为 0.12km, NS 方向上平均为 0.096km, EW 方向上平均为 0.066km; 台阵精定位在竖直方向上平均为 0.024km, NS 方向上平均为 0.027km, EW 方向上平均为 0.026km, 其 3 个方向上的震源位置估算误差均远小于台网精定位结果。另外, 从定位残差的角度来看 (图 6), 台网数据精定位的均方根残差中值约为 0.0175, 而台阵数据精定位的均方根残差中值约为 0.0085。由此可见, 台阵数据重定位精度更准确, 可信度更高。

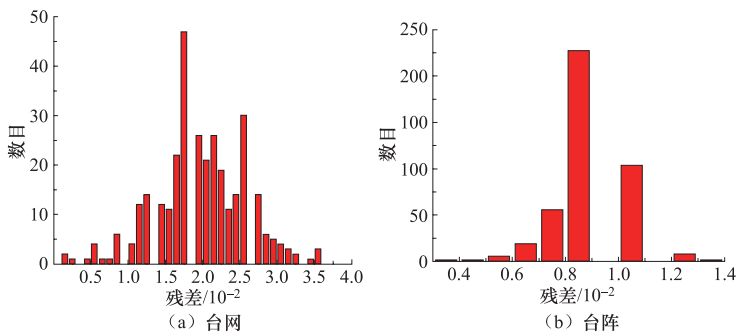


图 6 双差定位均方根残差

Fig. 6 Root mean square residual of double difference algorithm

(4) 根据现场调查, 乳山地震序列主要集中在以小滩旧村、常家庄、洼于家村、白沙滩村为中心的较小范围, 与乳山台阵定位结果可较好地吻合。

由此, 从已有震源机制解、台站布局、精定位残差、现场调查等多方面综合分析认为, 乳山台阵精定位结果更加准确, 进一步体现了台站震中距及台站布局对定位结果的影响 (Gomberg 等, 1990)。

3 结论

利用胶东半岛地壳速度模型作为本文速度模型, 采用双差定位方法对山东地震台网和乳山台阵记录的地震资料进行精定位分析。388 次山东地震台网记录的 M_L 1.5 级以上地震经双差定位后, 得到 323 次地震的基本参数 (约 83%); 431 次乳山台阵记录的地震经双差定位后, 得到 421 次地震的基本参数 (约 97%)。两种不同资料来源的定位结果显示: 两次精定位结果相比于绝对定位结果, 地震展布的线性趋势均更加清晰; 剖面上中心部位的地震分布均相对偏少, 这一现象在台阵精定位结果中更加明显; 截面上断层倾角均近乎直立。另外, 台网、台阵的精定位结果也存在一定的差别。在震源位置展布方面: 台网精定位地震分布呈北西向 (走向约 315°), 乳山台阵精定位呈北西西向 (走向约 290°)。剖面解析方面: 台网精定位结果显示地震整体上分布较为均匀, 震源深度为 3—11km; 而台阵精定位结果显示地震具有明显的空间丛集特征, 在深度上集中分布在 4—8km。由于已有的较大地震震源机制解节面方向与台阵精定位展布方向相近, 现场调查震感范围与台阵定位结果更加吻合, 近台可更好地确定震源位置, 且台阵精定位比台网精定位误差更小, 综合上述原因可推测, 乳山台阵精定位结果更加准确, 可信度更高。

致谢: 山东省地震局乳山台阵项目组在台站架设、数据汇集、资料处理等方面付出辛勤的劳动; 山东省地震台网值班员为本文研究贡献了高质量的观测报告; 王长在博士在双差定位软件使用方面提供了帮助, 匿名审稿专家提出宝贵的建议, 在此一并感谢!

参考文献

- 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.
- 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定位研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, **38** (10): 1242—1249.
- 李铂, 崔鑫, 苗庆杰等, 2016. CAP 方法反演乳山震群 3.0 级以上地震震源机制解. 华北地震科学, **34** (3): 14—19.
- 曲均浩, 刘瑞峰, 李金等, 2014. CAP 方法反演 2014 年山东乳山 M 4.2、 M 4.0 地震震源机制解. 地震工程学报, **36** (4): 1076—1080.
- 曲均浩, 蒋海昆, 李金等, 2015. 2013—2014 年山东乳山地震序列发震构造初探. 地球物理学报, **58** (6): 1954—1962.
- 王帅军, 王夫运, 张建狮等, 2013. 渤海湾西南缘及其邻近地区地壳结构特征. 地震地质, **35** (2): 278—289.
- 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** (S1): 129—134.
- 张岭, 刘劲松, 郝天珧, 2005. 利用 Ground-Truth 资料和 Messy GA 方法反演渤海湾盆地及其邻区地壳 P 波速度模型. 地球物理学进展, **20** (1): 186—197.
- 郑建常, 曲利, 曲均浩等, 2015a. 乳山震群综合分析. 见: 山东省 2015 年度地震趋势研究报告. 139—141.
- 郑建常, 林眉, 王鹏等, 2015b. CAP 方法反演震源机制的误差分析: 以胶东半岛两次显著中等地震为例. 地球物理学报, **58** (2): 453—462.
- 周仕勇, 许忠淮, 韩京等, 1999. 主地震定位法分析以及 1997 年新疆伽师强震群高精度定位. 地震学报,

21 (3): 258—265.

- Geiger L., 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bulletin of Saint Louis University*, **8**(1): 60—71.
- Gomberg J. S., Shedlock K. M., Roecker S. W., 1990. The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80**(6A): 1605—1628.
- Klein F. W., 2007. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes. U.S. Geological Survey Open-File Report, 1—125.
- Lee W. H. K., Lahr J. C., 1975. HYPO71: a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey Open-File Report, 75—86.
- Lienert B. R., Berg E., Frazer L. N., 1986. HYPOCENTER: an earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **76**(3): 771—783.
- Nelson G. D., Vidale J. E., 1990. Earthquake locations by 3-D finite-difference travel times. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80**(2): 395—410.
- Rietbrock A., Waldhauser F., 2004. A narrowly spaced double-seismic zone in the subducting Nazca plate. *Geophysical Research Letters*, **31**(10): L10608.
- Schaff D. P., Waldhauser F., 2005. Waveform cross-correlation-based differential travel-time measurements at the Northern California seismic network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**(6): 2446—2461.
- Schweitzer J., 2001. HYPOSAT-an enhanced routine to locate seismic events. *Pure and Applied Geophysics*, **158**(1—2): 277—289.
- Waldhauser F., Ellsworth W L., 2000. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**(6): 1353—1368.

Comparison of Location of Rushan Seismic Sequence between Region Network and Array Network

Qu Junhao¹⁾, Liu Fangbin¹⁾, Zheng Jianchang¹⁾, Bo Hui²⁾, Zhang Long³⁾ and Fan Xiaoyi⁴⁾

1) Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China

2) Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong, China

3) CGC Geological and Mineral Construction Co., Ltd, Beijing 100107, China

4) Tai'an Magnetic Observatory, Shandong Earthquake Agency, Tai'an 271000, Shandong, China

Abstract Double difference algorithm is used for Rushan swarm, selecting the $M_L \geq 1.5$ earthquake catalogue recorded by Shandong Seismic Network and Rushan Array from May 7, 2014 to December 31, 2015. The results show that the hypocenter location is in NW (about 315°) direction according to the accurate location of network records. The distribution of earthquakes in the section is basically uniform and the focal depth is in the range of 3—11km. Moreover, based on the accurate location of array records, the hypocenter location is in NWW (about 290°) direction. In the section, the earthquake has obvious spatial cluster characteristics, which reflects the heterogeneity of the fault plane, and the focal depth is concentrated in 4—8km. Based on the comprehensive analysis of the focal mechanism solution, the station layout, the location error and the field investigation, it is found that the accuracy of the positioning from the Rushan Array is relative higher.

Key words: Seismic sequence; Double difference algorithm; Seismic network; Rushan array