

张晖,谭毅培,马婷,等,2021. 2020 年和林格尔 M_L 4.5 地震微震匹配定位及发震构造探讨. 中国地震,37(2):430~441.

2020 年和林格尔 M_L 4.5 地震微震匹配定位 及发震构造探讨

张晖¹⁾ 谭毅培²⁾ 马婷²⁾ 翟浩¹⁾ 张珂¹⁾ 李娟¹⁾

1) 内蒙古自治区地震局,呼和浩特 010010

2) 天津市地震局(中国地震局地震工程综合模拟与韧性抗震重点实验室),天津 300201

摘要 内蒙古和林格尔地处鄂尔多斯块体北缘阴山地震带内,历史上 6 级以上强震频发。2020 年 3 月 30 日和林格尔发生 M_L 4.5 地震,打破了自 2005 年以来阴山地震带 M_L 4.0 以上地震的长期平静。研究此次地震序列的发震构造对区域应力状态和地震危险性分析有重要作用,然而内蒙古地震台网网站较为稀疏,相对于华北其他地区地震监测能力较低,对和林格尔地震序列的分析造成不利影响。本文采用匹配定位检测方法(M&L)检测区域台网目录遗漏的微震,并对检测到的地震事件进行精定位。匹配定位方法共检测到序列中可定位的地震事件 61 个,约为台网目录的 1.3 倍,可定位地震约为台网目录的 2.9 倍。地震序列重定位结果中余震整体呈现 NE 向的分布,与使用 CAP 方法得到主震震源机制 NE 向节面走向基本一致,破裂为正断走滑型,显示和林格尔 M_L 4.5 地震序列发震构造为 NE 走向、NW 倾向的拉张性断层。结合计算结果和区域地震地质构造特征,认为 M_L 4.5 地震序列发震构造为 NE 走向的岱海-黄旗海盆地南缘断裂。

关键词: 微震检测 匹配定位 发震构造 和林格尔

[文章编号] 1001-4683(2021)02-0430-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

和林格尔地处华北断块区阴山-燕山断褶带和鄂尔多斯断块拗陷、山西断块隆起的交汇处,位于近 EW 向展布的阴山-燕山山前构造带上。该构造带是华北地区一条重要的地壳构造脆弱带,喜马拉雅运动以来活动明显,发生多次强震,形成阴山地震带(徐杰等,1978)。自 1970 年以来,阴山地震带及周边强震活跃,共发生 6 级以上地震 6 次(图 1)。然而自 2005 年 2 月 27 日内蒙古五原 M_L 4.1 地震后,阴山地震带出现了 M_L 4.0 以上地震持续平静的现象。2020 年 3 月 30 日,内蒙古和林格尔发生 M_L 4.5 地震,打破了这一平静现象,显示出区域地震活动状态发生了变化。因而,研究此次和林格尔地震序列的发震构造,对区域应力状态

[收稿日期] 2020-12-08 [修定日期] 2021-03-09

[项目类别] 内蒙古自治区地震局局长基金(2020JP01)、地震科技星火计划项目(XH21002Y、XH210501、XH21006)共同资助

[作者简介] 张晖,男,1982 年生,硕士,高级工程师,主要从事地震监测工作。E-mail:zhanghui218@163.com

谭毅培,通讯作者,男,1982 年生,博士,高级工程师,主要从事地震预报与地震序列分析工作。

E-mail: oivertan921@sina.cn

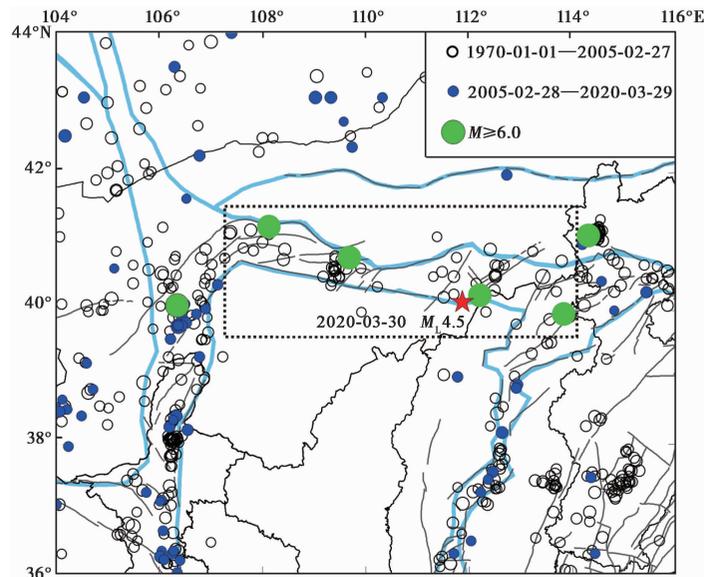


图 1 华北西北部及周边地震活动示意图

黑色圆圈表示 1970 年 1 月 1 日—2005 年 2 月 27 日 $M_L 4.0$ 以上地震震中位置;蓝色圆点表示 2005 年 2 月 28 日—2020 年 3 月 29 日 $M_L 4.0$ 以上地震震中位置;红色五角星为 2020 年 3 月 30 日和林格尔 $M_L 4.5$ 地震震中位置;绿色圆点表示 1970 年以来阴山地震带及周边 6 级以上地震的震中位置;黑色虚线框表示 $M_L 4.0$ 以上地震平静区

和地震危险性分析有重要作用。

地震目录及震相报告的完整性和准确性直接影响地震序列发震构分析结果的科学性和可信性 (Woessner et al, 2005; 冯建刚等, 2012; 谭毅培等, 2014)。和林格尔 $M_L 4.5$ 地震前后发生了多次前震和余震。短时间内同一地点发生大量地震, 不同地震事件的记录波形相互叠加影响, 同时和林格尔所在的内蒙古中部地区地震台站较为稀疏 (刘芳等, 2013a、2013b、2014), 仅依靠人工识别地震容易造成地震目录出现一定数量的遗漏。利用现有观测系统得到更加完整、精确的地震目录和震相资料, 需要地震自动识别算法的辅助。

目前已广泛应用于国家和省级地震台网的地震自动识别方法有两类。一是长短时窗比方法, 其利用长短时窗能量比 (STA/LTA) 识别地震事件初至到时 (Stevenson, 1976; Allen, 1978; Baer et al, 1987; Earle et al, 1994), 并在此基础上从时间域、频率域、偏振分析、高阶统计量、模式识别等方面综合分析判别地震事件 (武东坡, 2004)。之后一些学者引入震源扫描叠加地震定位方法 (SSA) (Kao et al, 2004), 提出了基于振幅判据的 P 波震相识别方法 (Zahradník et al, 2015)。另一类方法是匹配滤波技术 (Matched Filter Technique, MFT), 这种方法基于波形互相关计算检测与模板地震波形相似的地震事件, 已经成功应用于非火山地脉动与低频地震研究、中强地震余震序列完整性和分布特征分析等方面的研究 (Gibbons et al, 2006、2007; Shelly et al, 2007; Tang et al, 2010; Peng et al, 2007、2009; Schaff, 2010; Meng et al, 2012)。Zhang 等 (2015a) 基于 SSA 和 MFT 技术, 提出了匹配定位方法 (Match & Locate, M&L), 并对 2011 年东日本 $M_w 9.0$ 地震的前震、朝鲜一次低当量核爆和日本御岳火山喷发前的地震进行了检测 (Zhang et al, 2015a、2015b、2015c)。M&L 方法与上述两类方法

相比有 3 个特点:①可以检测到更小震级的地震和与模板地震距离较远的微震;②能够根据波形互相关时移,直接对检测到的微震和模板地震进行相对定位,从而给出微震的震源位置;③其无需对震相到时进行检测,因而可以适用于由于信噪比较低造成震相到时模糊不清的情况。鉴于内蒙古台网台站较为稀疏,对于小地震很难检测到足够用于精定位的震相到时,因而 M&L 方法适用于和林格尔 $M_L4.5$ 地震序列的分析。

本文对和林格尔地震序列进行微震检测,以给出相对完整的地震目录,并对此次地震的发震构造进行分析。所使用的计算方法包括地震双差定位方法(hypoDD)、匹配定位方法(M&L)和计算震源机制的CAP方法,计算方法流程如图2所示。首先,收集和和林格尔 $M_L4.5$ 地震震中 200km 以内台站的连续记录波形,以地震目录中 $M_L2.0$ 以上地震作为模板,使用双差定位方法对模板地震进行重定位,再以模板地震重定位结果为基准,利用 M&L 方法检测目录中遗漏的地震事件并给出震源位置,并计算 $M_L4.5$ 地震的震源机制解,最后基于震源机制、地震精定位和断层面拟合结果探讨和林格尔地震序列的发震构造。

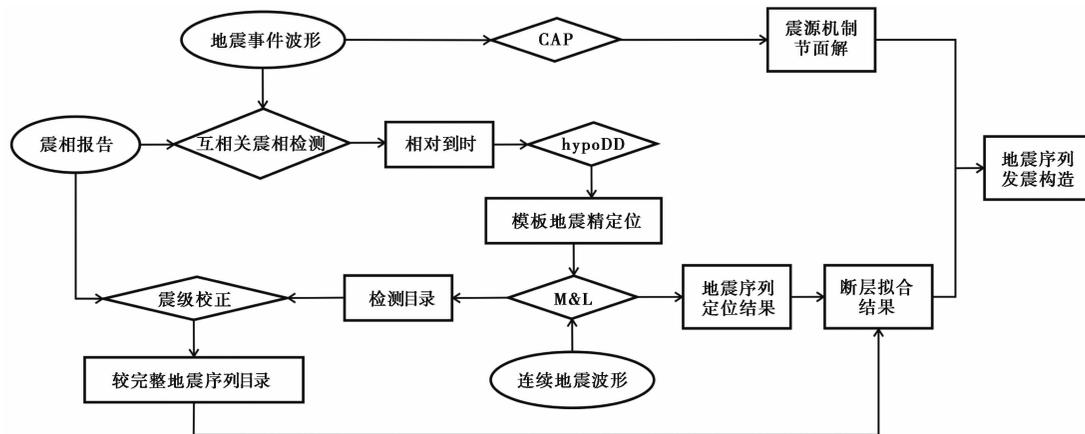


图 2 计算方法流程

圆形框表示输入数据;菱形框表示计算方法;矩形框表示计算和分析结果

1 微震检测

使用双差定位方法 hypoDD(Waldhauser et al,2000)对台网目录中给出的 10 个 $M_L2.0$ 以上地震进行重定位。定位使用震中距 200km 内 9 个台站的震相到时数据(图 3 中绿色和蓝色台站),震相到时经过波形互相关震相检测技术(谭毅培等,2014)校正,滤波频段为 2~8Hz,相对到时误差在 1 个采样点以内,共检测到震相 138 条。精定位计算的初始位置设为内蒙古地震台网给出的 $M_L4.5$ 主震震源位置。反演计算采用 SVD 方法,参考韩晓明等(2018)给出的 P 波速度精细结构,设定的 P 波速度结构如表 1 所示, v_p/v_s 波速比设为 1.73。

重定位获得了 10 个 $M_L2.0$ 以上地震的震源位置。hypoDD 程序给出的反演误差水平向约为 15m,垂直向约为 65m。鉴于经过波形互相关震相检测的相对到时误差在 0.01s 以内,其造成定位结果误差在 100m 以内。综合震相数据和反演计算造成的误差,相对定位结果中震中位置误差在 100m 以内,深度误差约为 150m 左右。

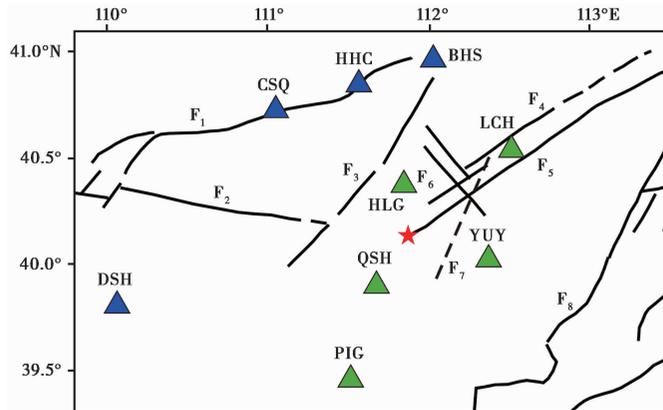


图 3 震中周边断裂及台站分布

图中黑色线条为活动断裂；红色五角星为 2020 年 3 月 30 日和林格尔 $M_L 4.5$ 地震的震中位置；三角形为本研究所使用的台站位置，其中绿色为参与匹配定位和双差定位计算的台站，蓝色为仅参与双差定位的台站； F_1 ：大青山山前断裂， F_2 ：鄂尔多斯北缘断裂， F_3 ：和林格尔断裂， F_4 ：蛮汉山山前断裂， F_5 ：岱海-黄旗海盆地南缘断裂， F_6 ：黑老夭-杀虎口断裂， F_7 ：韭菜庄-好来沟断裂， F_8 ：寇庄断裂

表 1 地震精定位和震源机制解计算所用速度结构模型

层数	1	2	3	4	5	6
深度范围/km	0~3	3~10	10~25	25~30	30~45	≥45
P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	6.2	6.3	6.4	6.6	7.1	8.0

以重定位后的 $M_L 2.0$ 以上地震作为模板，采用 M&L 方法 (Zhang et al, 2015a) 进行地震检测和定位。所使用台站为记录地震信噪比较高的震中距 100km 内的 5 个台站 (图 3 中绿色台站)。首先使用 Taup 软件 (Crotwell et al, 1999) 计算直达 S 波的理论到时和水平、垂直慢度，使用自相关方法重新拾取震相到时。截取模板地震 S 波到时前 1s 至后 3s 波形，在连续波形上进行滑动窗互相关计算。以模板事件震源位置为中心做格点搜索，对检测到的地震事件进行定位。震中搜索范围为 $\pm 0.1^\circ$ ，深度为 $\pm 3\text{km}$ ，搜索步长为 0.01° 和 1km。将每个台站各分量的滑动相关序列所对应的时间减去其模板所对应的 S 波走时，再减去该网格点位置与模板位置到每一个台站的到时差进行位置校正，最后将所有台站分量的滑动互相关系数进行叠加并计算平均值，得到该网格点的叠加滑动互相关系数；将三分量的互相关系数取平均，用计算得到的绝对偏差中值 (Median Absolute Deviation, MAD) 来搜索地震，利用互相关系数和 n 倍的 MAD 作为判别地震的阈值 (Peng et al, 2009; Shelly et al, 2007)。

基于多组参数组合，对 3 月 30 日的连续记录波形进行检测，从而测试不同参数设置的检测效果。测试结果显示，采用平均互相关系数大于 0.2、同时大于 11 倍 MAD 的阈值参数 (下文简称为 0.2/11) 检测效果较好。如表 2 所示，当设置更低阈值时 (0.2/10)，检测到的地震事件数量增加，且能够检测到台网目录给出的 3 月 30 日全部 25 个地震，但有一部分新检测到的事件在距离震中最近的 HLG 和 QSH 台无法人工确认，即其误检测的比例较高。另一方面，当阈值提高时 (0.3/11 和 0.2/12)，无法检测到台网目录给出的全部地震。因此选择 0.2/11 作为检测阈值的参数，可以得到相对较好的微震检测结果。

表 2 不同阈值组合结果与台网定位结果对比

设置参数	识别地震数	有效地震数	与台网结果匹配的地震数	新检测地震数	无显著记录事件数
台网结果	25	25			
0.2/10	86	67	25	42	19
0.2/11	61	61	25	36	0
0.3/11	23	23	20	3	0
0.2/12	59	59	22	37	0

经过匹配定位计算,在3月30日至4月30日时间段内,共检测定位地震事件61个。内蒙古测震台网人工识别和林格尔余震共46个,其中可定位地震21个,不可定位的单台地震事件25个。检测到的地震事件约为台网目录的1.3倍,可定位地震约为台网目录的2.9倍。对比46个地震台网目录给出的震级和微震检测计算所得震级,对新检测到的地震震级进行校正。当震级大于 $M_L 1.5$ 时,检测震级与目录震级基本一致,无需校正,而震级小于 $M_L 1.5$ 时,检测震级系统性偏离目录震级,如图4(a)所示。采用谭毅培等(2015)使用的方法对小于 $M_L 1.5$ 的地震进行震级校正,求得震级校正线性变换方程为 $y = 0.3634x + 0.8029$ 。经过震级校正后的震级对比如图4(b)所示,检测震级与目录震级的拟合直线方程为 $y = x$,表明微震检测所得震级在校正后与目录给出震级在统计上是一致的。

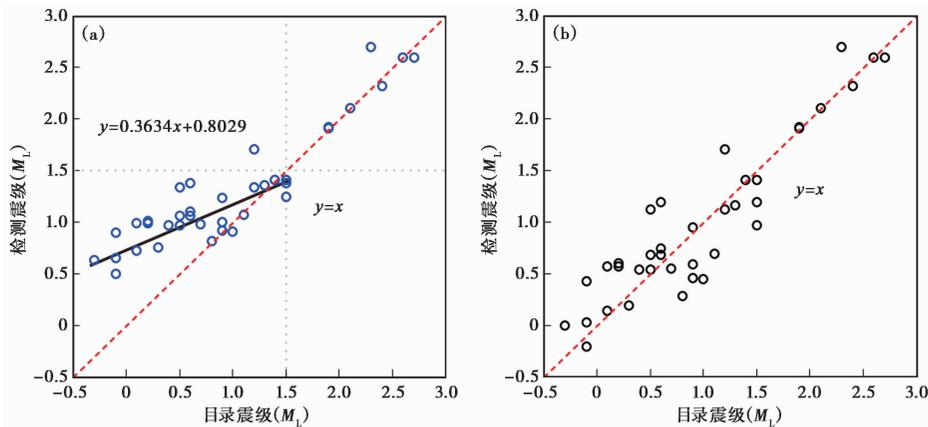


图 4 检测地震震级校正过程示意

(a) 未做震级校正时检测震级和目录震级的对比;(b) 校正后检测震级和目录震级的对比

图5给出了台网可定位地震、台网单台地震事件和匹配定位方法检测到的地震的累计频次对比。图中台网可定位地震在 $M_L 1.0$ 以下几乎不再增加,表明台网可对 $M_L 1.0$ 以上地震进行定位,而 $M_L 1.0$ 以下地震则无法识别多个台的震相,只能给出单台地震事件。匹配定位检测的地震在 $M_L 0 \sim 1.0$ 区间内线性增加,显示匹配定位方法可对较小的地震进行定位。经过匹配定位计算的地震目录,虽然检测到台网遗漏地震数量不多,但可以给出较多地震的震中位置,从而丰富了地震目录中的震源参数信息。

图6展示了检测到的1次目录遗漏的 $M_L 1.0$ 地震的记录波形。模板为3月30日 $M_L 2.3$ 地震,平均相关系数为0.2295,约为MAD的14.3倍。距离震中最近的HLG台和QSH台可人工观测到地震信号,但其他台站无法观测到清晰的震相,造成人工识别无法定位地震。

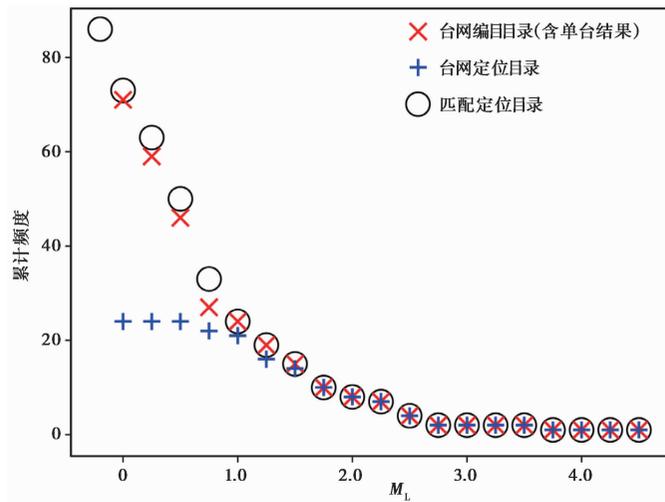


图 5 微震检测前后地震累积频度-震级分布

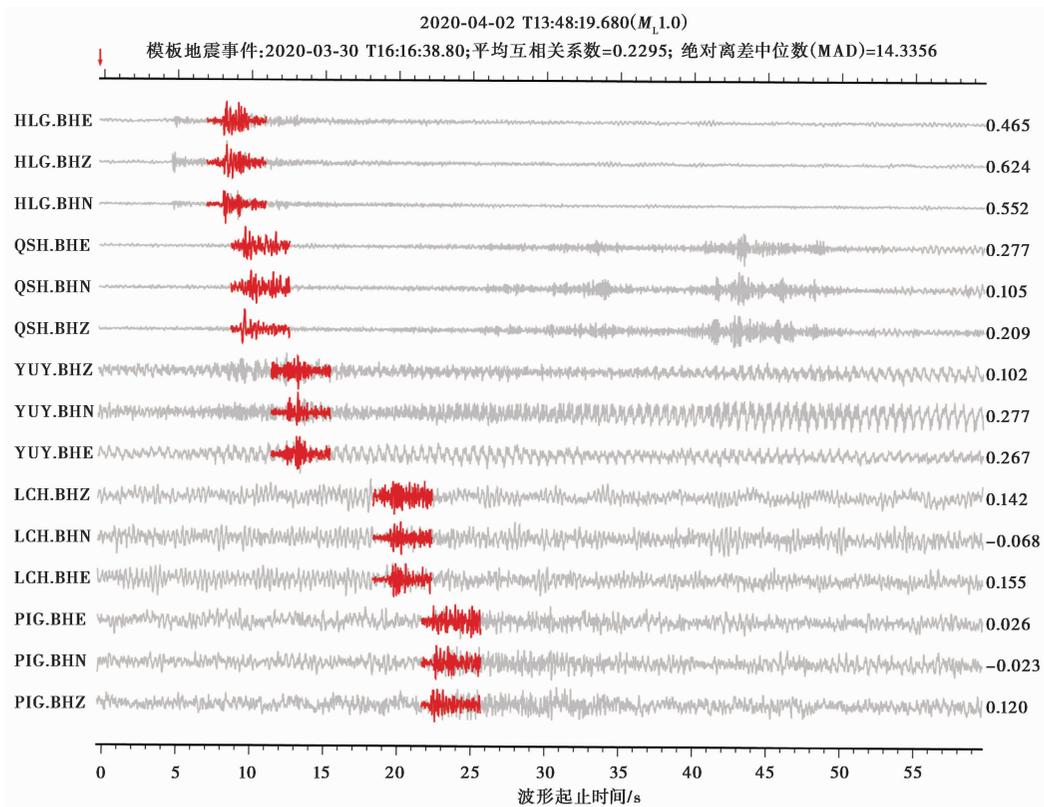


图 6 M&L 方法检测到的 M_L 1.0 地震

2 断层面拟合

根据主震震源机制计算结果和基于匹配定位计算得到的地震序列定位结果,采用断层面拟合方法定量估计断层面几何形态。

利用 CAP 方法(Zhao et al,1994;Zhu et al,1996)计算 M_L 4.5 地震的震源机制解。计算中使用了震中距在 400km 以内的 8 个台站的波形数据,体波滤波频段为 0.05~0.2Hz,面波滤波频段为 0.05~0.1Hz,所使用速度结构见表 1。计算结果为:震源机制解节面 I 走向 80° 、倾角 44° 、滑动角 -60° ,节面 II 走向 221° 、倾角 53° 、滑动角 -116° ,矩震级为 M_w 3.9,如图 7 所示。

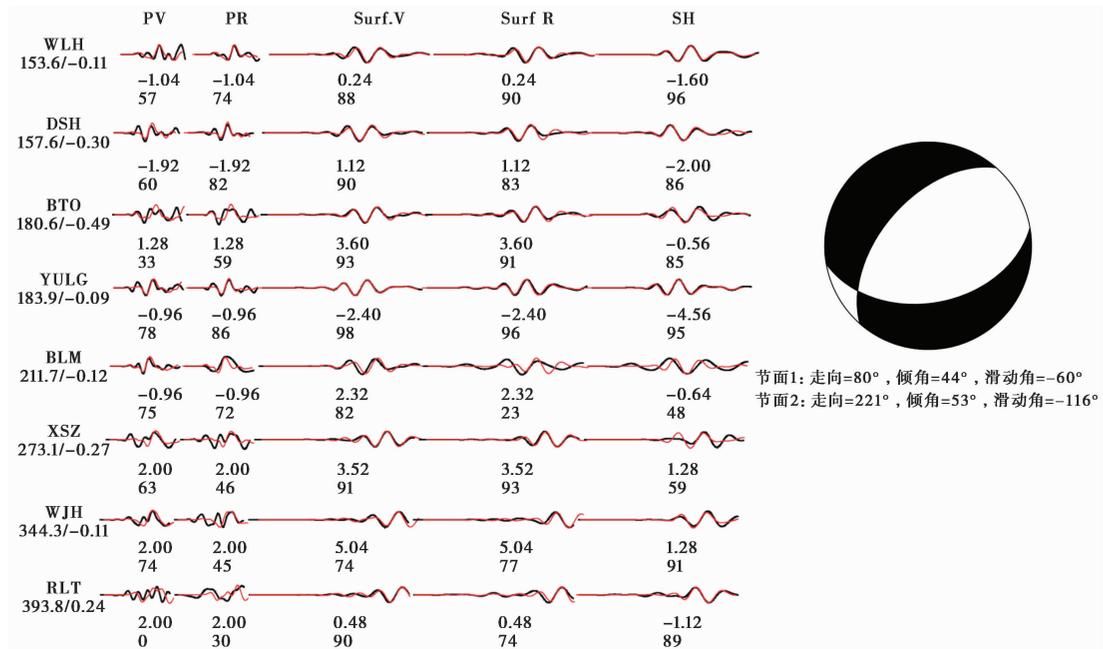


图 7 M_L 4.5 地震的震源机制解

匹配定位计算给出的地震序列定位结果如图 8 所示。结果显示地震震中呈现出 NE 向线性分布特征(图 8(a)),与 M_L 4.5 地震震源机制解 NE 向节面走向接近。将震源投影到 NE 走向 40° 和 NW 走向 130° 的 2 条剖面上,在 NE 向剖面 AA' 上地震分布散乱,而在 NW 向剖面 BB' 上地震分布较为集中,显示出发震断层为 NW 倾向。

为了进一步定量估计断层面的几何参数,利用匹配定位计算给出的地震序列定位结果,采用万永革等(2008)给出的稳健估计方法,对和林格尔 M_L 4.5 地震断层面参数进行了拟合。计算结果如图 9 所示,断层的走向为 230° ,标准差为 1.3° ;倾角为 81° ,标准差为 1.4° ,倾向为 NW 向。震源机制结果中节面 II 走向与断层面拟合结果相近,倾向均为 NW 向,而其倾角小于断层面拟合结果。综合断层面拟合结果和震源机制解,推测和林格尔 M_L 4.5 地震序列发震构造为 NE 走向、NW 倾向的断层。

3 发震构造讨论

根据上述计算结果对和林格尔 M_L 4.5 地震的发震构造进行分析。匹配定位和断层面拟合结果显示震中呈现 NE 向线性分布特征,其发震构造为 NE 走向、NW 倾向的断层。震源机制解中 NE 向节面为发震构造,滑动角为 -116° ,其错动性质以拉张为主,兼有少量走滑分量。综合本文计算结果,和林格尔 M_L 4.5 地震的发震构造为 NE 走向张性断裂。

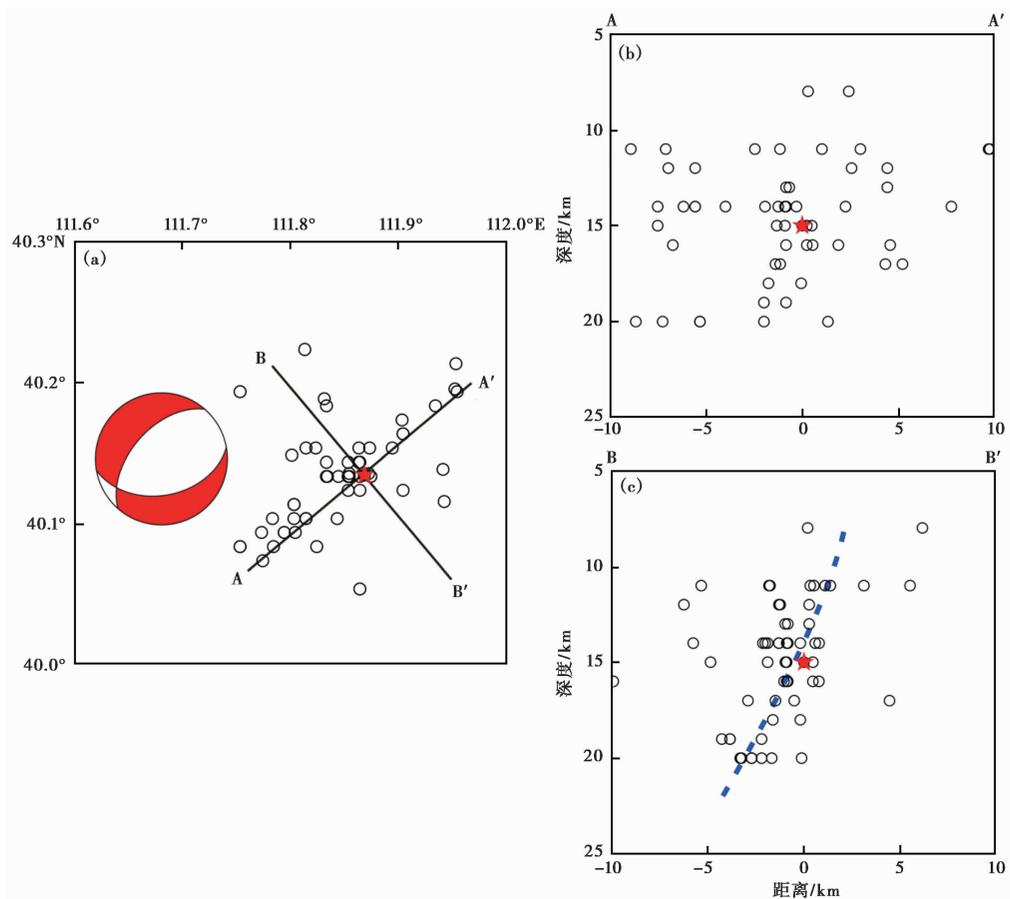


图 8 地震序列匹配定位结果示意

(a) 精定位后震中分布, 红色五角星表示 $M_L 4.5$ 地震的震中位置, 并给出 $M_L 4.5$ 地震震源机制解; (b)、(c) 分别为震源在 NE 向剖面 AA' 和 NW 向剖面 BB' 上的投影, 其中图 (c) 中蓝色虚线表示推测的发震断层位置

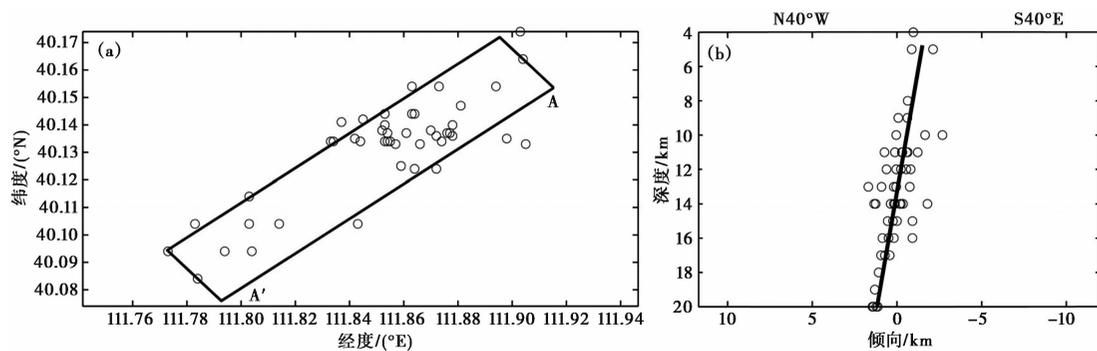


图 9 断层面拟合结果示意

(a) 参与拟合的地震震中分布, 黑色矩形框为拟合断层面在地表的投影; (b) 参与拟合的地震震源位置在垂直断层走向剖面上的投影, 黑色直线为拟合断层面, 拟合结果为 NW 倾向倾角较大的断层

徐杰等(1978)、孙加林等(1990)对和林格尔地区的地震地质特征做了详细总结(图10)。和林格尔地区 NE、NW 和 NNE 向 3 组断裂十分发育,NE 向断裂是区内的主要构造,被 NW 向断裂和 NNE 向断裂所切,是较古老的断裂带,其至少切割到地壳玄武岩层,是规模较大的地壳断裂或深大断裂;NW 向断裂规模不大,一般走向 $N30^{\circ}\sim 50^{\circ}W$,倾向不一,倾角为 $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$,多处见左旋错动的派生性构造;NNE 向断裂走向 $N20^{\circ}\sim 30^{\circ}E$,倾向 NW,倾角为 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$,其中出现右旋剪切错动的派生构造。从本文的和林格尔 $M_L4.5$ 地震序列计算结果看,其发震构造与区域内 NE 向断裂几何形态基本一致。 $M_L4.5$ 地震震中位置位于岱海-黄旗海盆地南缘断裂附近(图10),且地质调查显示岱海断陷带 NE 向断裂属于活断层(毕珉烽,2012),因而推测 $M_L4.5$ 地震序列发震构造为 NE 走向的岱海-黄旗海盆地南缘断裂。

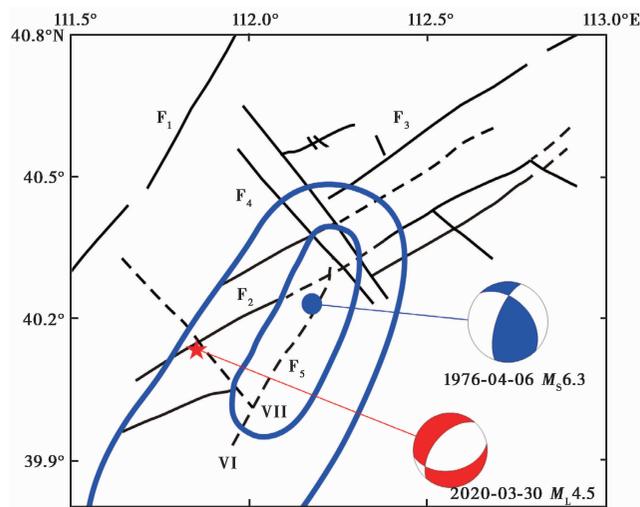


图10 和林格尔地区断裂分布以及和林格尔 $M_s6.3$ 地震烈度等震线分布

黑色直线为断层位置,蓝色曲线为烈度等震线,蓝色圆点表示1976年和和林格尔 $M_s6.3$ 地震的微观震中位置,红色五角星表示2020年和和林格尔 $M_L4.5$ 地震的震中位置; F_1 :和林格尔断裂, F_2 :岱海-黄旗海盆地南缘断裂, F_3 :蛮汉山山前断裂, F_4 :黑老夭-杀虎口断裂, F_5 :韭菜庄-好来沟断裂;断层信息据徐杰等(1978)绘制,烈度等震线据孙加林等(1990)绘制

2020年和和林格尔 $M_L4.5$ 地震与1976年和和林格尔 $M_s6.3$ 地震的发震构造有所不同。1976年和和林格尔 $M_s6.3$ 地震主震极震区烈度为VII度强(图10),VII度区等震线长轴为NNE向,宏观、微观震中均在该区北端(孙加林等,1990)。根据其烈度等震线分布、余震震源位置分布、主震震源机制等信息,徐杰等(1978)、孙加林等(1990)均认为1976年和和林格尔 $M_s6.3$ 地震发震构造为NNE走向的韭菜庄-好来沟断裂。对比和林格尔 $M_s6.3$ 地震与 $M_L4.5$ 地震的震源机制(图10),其节面的几何形态存在差异。虽然和林格尔 $M_s6.3$ 地震与 $M_L4.5$ 地震的震中位置接近,但2次地震并非发生在同一构造上。和林格尔 $M_L4.5$ 地震的震源机制计算结果与区域应力场特征相符。根据GPS观测和研究结果显示,鄂尔多斯东北缘盆地下方深部物质的上涌形成的拉张起主导作用,形成了岱海断陷带内沿NE向的张性或张扭性正断层(沈正康等,2003;张静华等,2004)。岱海断陷带综合震源机制解的节面大体上呈NEE向,与本区主要断裂在性质及走向上均一致,反映了岱海断陷带现今应力状态为拉张型(盛

书中等,2015)。剪切波偏振分析结果显示和林格尔台(HLG)快波偏振方向为接近 NE 的优势方向,可能反映了区域主要断裂与构造的影响(张晖等,2020)。根据本文结果,2020 年和林格尔 $M_L4.5$ 地震发震断裂为 NE 走向张性断裂,与区域主要断裂走向一致,也与区域应力场的拉张型状态一致。

徐杰等(1978)认为和林格尔地区不同方向的 3 组断裂构造中,在现代 NEE 向主压应力作用下,NE 向断裂本应最容易发生错动,利于应力的积累和释放,但 1976 年 $M_s6.3$ 地震发生在 NNE 向断裂,可能是由于 NW 向断层对区域地震地质特征的改造,加之岩浆侵入和喷发,使 NE 向断裂因岩浆焊接作用而形成闭锁。韩晓明等(2018)通过 P 波速度成像发现和和林格尔地区上地壳存在上宽下窄的高速区通道,认为可能是该区在新近纪和第四纪存在大规模火山喷发的地震学证据,从而进一步论证了岩浆作用对本区地震孕震环境的影响。NE 向岱海-黄旗海盆地南缘断裂带小震微震活动呈现自西向东活动性由强变弱的现象(毕珉烽,2012),可能意味着 NE 向断裂不同段由于岩浆作用造成的闭锁程度不同。地震层析成像结果(韩晓明等,2018)显示,岱海-黄旗海盆地南缘断裂带西南端为高低速过渡区,一般认为该区地壳介质比较脆弱且非均匀性和物性变化较大,易于吸收并储存应变能而成为地震活动相对强烈的区域(雷建设等,2009)。2020 年和林格尔 $M_L4.5$ 地震发生在 NE 向断裂带的西南端,显示出西侧较为活跃的地震活动特征仍然具有延续性。

4 结论

本文使用匹配定位方法(M&L)对 2020 年和林格尔 $M_L4.5$ 地震序列进行了微震检测和精定位,并计算了该地震的震源机制解。微震检测结果显示,共检测并定位地震事件 61 个,约为台网目录的 1.3 倍,可定位地震约为台网目录的 2.9 倍。地震重定位、断层面拟合和震源机制计算结果显示,和林格尔 $M_L4.5$ 地震序列发生在 NE 走向、NW 倾向的拉张性断层。结合区域地震地质构造,推测和林格尔 $M_L4.5$ 地震序列发震构造为 NE 走向的岱海-黄旗海盆地南缘断裂。

致谢: 中国科学技术大学张森博士提供了 M&L 方法计算程序,并对程序的调试运行给予的大力帮助,审稿专家提出宝贵的建设性意见,本文部分图件采用 GMT 软件包(Wessel et al,1995)绘制,在此一并表示感谢。

参考文献

- 毕珉烽,2012. 岱海断陷带活动性与地震危险性研究. 硕士学位论文. 北京:中国地质大学(北京).
- 冯建刚,蒋长胜,韩立波,等,2012. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析. 地震学报,34(5):646-658.
- 韩晓明,刘芳,张帆,等,2018. 鄂尔多斯块体东北缘的 P 波速度精细结构. 地震地质,40(1):215-231.
- 雷建设,赵大鹏,苏金蓉,等,2009. 龙门山断裂带地壳精细结构与汶川地震发震机理. 地球物理学报,52(2):339-345.
- 刘芳,蒋长胜,杨彦明,等,2013a. 内蒙古测震台网地震监测资料完整性分析. 地震地磁观测与研究,34(1-2):176-183.
- 刘芳,蒋长胜,张帆,等,2013b. 基于 EMR 方法的内蒙古测震台网监测能力. 地球科学-中国地质大学学报,38(6):1356-1362.
- 刘芳,蒋长胜,张帆,等,2014. 内蒙古区域地震台网监测能力研究. 地震学报,36(5):919-929.
- 沈正康,王敏,甘卫军,等,2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究. 地学前缘,10(特刊):93-100.
- 盛书中,万永革,黄骥超,等,2015. 应用综合震源机制解法推断鄂尔多斯块体周缘现今地壳应力场的初步结果. 地球物理

- 学报, **58**(2):436~452.
- 孙加林,曹刚,1990. 1976年4月6日内蒙古和林格尔6.3级地震. 见:张肇诚. 中国震例(1976—1980). 北京:地震出版社,1~28.
- 谭毅培,曹井泉,陈继锋,等,2015. 2013年甘肃岷县漳县 M_s 6.6地震余震序列时域衰减特征分析. 地球物理学报, **58**(9):3222~3231.
- 谭毅培,曹井泉,刘文兵,等,2014. 2013年3月涿鹿微震群遗漏地震事件检测和发震构造分析. 地球物理学报, **57**(6):1847~1856.
- 万永革,沈正康,刁桂苓,等,2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层参数方法及其在唐山地震序列中的应用. 地球物理学报, **51**(3):793~804.
- 武东坡,2004. 震相识别的实时方法研究. 硕士学位论文. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 徐杰,蒋溥,宋方敏,等,1978. 和林格尔地震地震地质特征的初步分析. 地质科学, (2):174~182.
- 张静华,李延兴,郭良迁,等,2004. 用GPS测量结果研究华北现今构造形变场. 大地测量与地球动力学, **24**(3):40~46.
- 张晖,高原,石玉涛,等,2020. 鄂尔多斯块体北缘与西缘地区地壳各向异性特征. 地球物理学报, **63**(6):2230~2247.
- Allen R V, 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bull Seismol Soc Am*, **68**(5):1521~1532.
- Baer M, Kradolfer U, 1987. An automatic phase picker for local and teleseismic events. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(4):1437~1445.
- Crotwell H P, Owens T J, Ritsema J, 1999. The Taup Toolkit; Flexible seismic travel-time and ray-path utilities. *Seismol Res Lett*, **70**(2):154~160.
- Earle P S, Sheare P M, 1994. Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(2):366~376.
- Gibson S J, Ringdal F, 2006. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophys J Int*, **165**(1):149~166.
- Gibson S J, Sørensen M B, Harris D B, et al, 2007. The detection and location of low magnitude earthquakes in northern Norway using multi-channel waveform correlation at regional distances. *Phys Earth Planet Inter*, **160**(3~4):285~309.
- Kao H, Shan S J, 2004. The source-scanning algorithm; Mapping the distribution of seismic sources in time and space. *Geophys J Int*, **157**(2):589~594.
- Meng X F, Yu X, Peng Z G, et al, 2012. Detecting earthquakes around Salton Sea following the 2010 M_w 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake using GPU parallel computing. *Procedia Comput Sci*, **9**:937~946.
- Peng Z G, Vidale J E, Ishii M, et al, 2007. Seismicity rate immediately before and after main shock rupture from high-frequency waveforms in Japan. *J Geophys Res*, **112**:B03306.
- Peng Z G, Zhao P, 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nat Geosci*, **2**(12):877~881.
- Schaff D, 2010. Improvements to detection capability by cross-correlating for similar events: A case study of the 1999 Xiuyan, China, sequence and synthetic sensitivity tests. *Geophys J Int*, **180**(2):829~846.
- Shelly D R, Beroza G G, Ide S, 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature*, **446**(7133):305~307.
- Stevenson P R, 1976. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: A study using automatic earthquake processing. *Bull Seismol Soc Am*, **66**(1):61~80.
- Tang C C, Peng Z G, Chao K, et al, 2010. Detecting low-frequency earthquakes within non-volcanic tremor in southern Taiwan triggered by the 2005 M_w 8.6 Nias earthquake. *Geophys Res Lett*, **37**:L16307.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000. A double-difference earthquake location algorithm; Method and application to the northern Hayward Fault, California. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(6):1353~1368.
- Wessel P, Smith W H F, 1995. New version of the generic mapping tools. *EOS Trans AGU*, **76**(33):329.
- Woessner J, Wiemer S, 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues; estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(2):684~698.
- Zahradník J, Janský J, Plicka V, 2015. Analysis of the source scanning algorithm with a new P-wave picker. *J Seismol*, **19**(2):423~441.
- Zhang M, Wen L X, 2015a. An effective method for small event detection; Match and locate (M&L). *Geophys J Int*, **200**(3):1523~

1537.

Zhang M, Wen L X, 2015b. Seismological evidence for a low-yield nuclear test on 12 May 2010 in North Korea. *Seismol Res Lett*, **86**(1): 138~145.

Zhang M, Wen L X, 2015c. Earthquake characteristics before eruptions of Japan's Ontake volcano in 2007 and 2014. *Geophys Res Lett*, **42**(17): 6982~6988.

Zhao L S, Helmberger D V, 1994. Source estimation from broadband regional seismograms. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(1): 91~104.

Zhu L P, Helmberger D V, 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1634~1641.

Microseismic Matching Location of the 2020 Horiger $M_L4.5$ Earthquake Sequence and the Seismogenic Structure Analysis

Zhang Hui¹⁾ Tan Yipei²⁾ Ma Ting²⁾ Zhai Hao¹⁾ Zhang Ke¹⁾ Li Juan¹⁾

1) Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China

2) Tianjin Earthquake Agency (Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience, CEA), Tianjin 300201, China

Abstract Horiger of Inner Mongolia is located in the Yinshan seismic zone on the northern margin of the Ordos block, and in which strong earthquakes of magnitude 6 or above are frequent in history. A $M_L4.5$ earthquake in Horiger on March 30, 2020 broke the long quiescence of earthquakes above $M_L4.0$ in the Yinshan seismic zone since 2005. The analysis of the seismogenic structure of the 2020 Horiger earthquake sequence is of great importance to the regional stress and seismic risk research. However, the stations around Horiger are sparse and earthquake monitoring capacity are relatively weak in comparison to other areas in North China, which has a negative impact on the analysis of the Horiger 2020 earthquake sequence. In this paper, we used Match and Locate method (M&L) to detect the micro-earthquakes missed in network catalog, relocated the earthquakes detected, and used Cut and Paste method (CAP) to calculate the mechanism of $M_L4.5$ earthquake. Using M&L we detected a total of 61 locatable earthquake events, which is about 1.3 times as much as that in the network catalog, and the number of locatable earthquakes is about 2.9 times as much as that in the network catalog. The relocation result shows that the epicenters of earthquake sequence are in NE direction distribution, which is basically consistent with the north-east plane of $M_L4.5$ earthquake mechanism obtained by CAP method. Considered the relocation result and source mechanism, the seismogenic structure of the 2020 Horiger earthquake sequence is a normal fault in NE strike direction and NW dip direction. Combined with regional seismic geological structure characteristics, we conclude that the seismogenic structure of the $M_L4.5$ earthquake sequence is the south margin fault of Daihai-Huangqihai Basin.

Keywords: Micro-earthquake detection; Match and locate; Seismogenic fault; Horiger