

张建中,张珂,郝美仙,等,2021. 敖汉旗地区震群精定位及其空间分布特征. 中国地震,37(3):671~680.

敖汉旗地区震群精定位及其空间分布特征

张建中 张珂 郝美仙 张晖 王鑫 翟浩

内蒙古地震局,呼和浩特 010010

摘要 以敖汉旗地区震群作为研究对象,选取内蒙古测震台网 2018—2019 年的震相观测报告,分别利用单纯型定位法、Hypo2000 定位法和双差定位法对其进行重定位和对比分析。结果显示,双差方法的定位精度最高。根据双差方法定位结果,敖汉旗的震群在赤峰-开源断裂的南北两侧均有 1 个集中分布区,2 个区域的震源深度范围均为 4~12km;其中,73% 的地震位于断裂北侧,震中位置沿 NW-SE 向呈条带状展布,延伸长度约 6.8km,震源深度由西向东逐渐变深、由南向北逐渐变深再变浅;而断裂南侧的地震其震中位置聚集呈簇状,SN 向最大扩展长度约 0.98km,震源深度无明显沿 EW 或 SN 方向的变化特点。敖汉旗震群的精定位结果与对该序列地震空间分布特点的认识,可为该地区发震构造的研究与三维精细速度结构的建立提供更为精确的震源参数与参考依据。

关键词: 敖汉旗地区 地震重新定位 空间分布特征

[文章编号] 1001-4683(2021)03-0671-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震定位的目的在于给出已发地震的发震时刻与震源位置(经度、纬度、深度),这些地震参数的确定不仅是进行地震预报、研究地震活动构造与地球内部结构等地震学问题的基础,也是开展地震应急、震后减灾与救灾、震后地震趋势预测等工作的关键(田玥等,2002;杨文东等,2005),为获取更加精确的地震定位结果,开展地震定位研究工作必不可少。获取地震定位结果后,一般通过 2 种方法来判断定位结果的质量:①F 统计法,利用残差分布置信椭圆计算定位误差;②V2 统计法,通过由震相读取和观测走时得到的先验误差而绘制的分布椭圆计算定位误差(Bondár et al,2006)。若要进一步提高地震定位结果的精度,还需了解地震台站布局、地震定位方法以及地壳速度模型等因素如何影响地震的定位精度。

通常,一个地区建成的测震台站数量越多、台站分布越均匀,那么对该区地震的定位结果也会越精确。对于台站个数与台站布局已经固定的区域来说,在开展定位工作时,所选取的地震定位方法与速度结构模型则是影响该区地震定位精度的重要因素。当前,地震定位方法可归纳为基于波形偏移与基于震相到时两类方法。我国各省级区域测震台网普遍采用

[收稿日期] 2020-05-28 [修定日期] 2020-09-22

[项目类别] 内蒙古自治区地震局局长基金课题(2020JC07)资助

[作者简介] 张建中,男,1963 年生,博士,高级工程师,主要从事地震监测预警及地震各向异性研究。

E-mail: zjz_nm@163.com

张珂,通讯作者,女,1993 年生,助理工程师,主要从事地震监测预警等研究。E-mail: zkee0928@163.com

的地震分析软件 MSDP,其地震定位方法主要是基于波形偏移原理的绝对定位法,包括单纯型定位法、Hypo2000、Hyposat、Locsat 与自适应演化算法等方法。单纯型方法是台网进行近震、地方震定位的常用方法,具有较好的定位效果(韩炜等,2001;张炳等,2012;王桂丹,2016;谢石文等,2018),而 Hypo2000 方法由于其可对特定研究区配置相应的水平速度模型,也被广为使用(傅莺等,2010;谢辉等,2011;张炳等,2012;金春华等,2015;王承伟等,2016;管勇等,2017;杨选等,2018)。但由于 Hypo2000 方法对速度模型具有较强的依赖性,只有当速度模型的精度较高时,其定位结果才更加可靠。为了减少地球内部结构对定位的影响,有学者提出了基于相对定位原理的双差方法(Waldhauser et al,2000),该方法通过地震事件的走时差来反演震源位置,消除了震源到台站间的路径效应,能够得到精度较高的震源相对位置,对速度模型的敏感度不高,具有较高的应用频率与较好的发展前景(杨智娴等,2003;王平等,2006;华卫等,2006;黄媛等,2006、2008;刘劲松等,2007;陈翰林等,2009;房立华等,2011;李红光等,2015;曾宪伟等,2017;姜金钟等,2019)。

赤峰-通辽地区是内蒙古自治区中强地震活动集中区域之一,曾发生 3 次 6.0 级以上地震事件,该地区地质构造复杂,发育有赤峰-开源、八里罕等多条深部断裂,中强以上地震发震机理尚不明确。位于赤峰市东南部的敖汉旗,频繁发生小震丛集活动,2018—2019 年期间记录到 105 次地震,占该时段内蒙古地区地震数量的 57%。精确的地震定位信息是研究发震构造的基础,因此,开展敖汉旗震群的定位研究工作具有重要的应用价值(孙继忠,1985;韩晓明等,2009;李冬梅等,2011;薛艳等,2017)。

为更加客观真实地呈现小震序列的空间分布特征,本文拟分别采用单纯型定位方法、Hypo2000 定位方法与双差定位方法对敖汉旗 2018—2019 年的震群进行重新定位和对比分析,以期能够在提高震群定位精度的基础上,挖掘出敖汉旗震群在三维空间的定位信息,最终结合区域地质构造和地震活动背景,分析敖汉旗震群的孕育发生机理。

1 研究区地震地质概况

赤峰市地处内蒙古自治区东南部,北、西方向与内蒙古锡林郭勒盟毗邻,南接河北省承德市与辽宁省朝阳市,东邻内蒙古通辽市(图 1(a))。从地质构造单元划分,赤峰地区属于大兴安岭隆起带与燕山隆起带的交汇区域,主要发育 2 个一级大地构造单元(中朝准地台和天山-蒙古-兴安地槽褶皱系)和 1 个次级构造单元(内蒙地轴)(韩晓明等,2009),该区分布的主要断裂有赤峰-开源断裂、八里罕断裂等,这些断裂交错分布,地壳介质相对破碎,易发生小震丛集活动。

敖汉旗位于赤峰市东南部,是赤峰地区地震丛集活动最为频繁的区域。根据内蒙古测震台网记录,2018—2019 年敖汉旗共发生 105 次地震(不包括单台记录事件)(图 1(b)),其中震级最大为 $M_L 4.0$,有 3 次小震群丛集活动(图 1(c)),分别为:①2018 年 2 月 7 日—3 月 7 日,共 35 次地震,最大震级为 $M_L 3.7$;②2018 年 12 月 1—11 日,共 18 次地震,最大震级为 $M_L 3.5$;③2019 年 2 月 1—26 日,共 22 次地震,最大震级为 $M_L 3.3$ 。选取这 3 次震群($42.1^\circ\text{N}\sim 42.4^\circ\text{N}$, $119.5^\circ\text{E}\sim 120.6^\circ\text{E}$),对震群内 75 条地震的波形数据进行复查,确保每条事件被至少 3 个台站记录到,且震相记录清晰。基于此,完成所有地震事件的震相分析与重定位工作。参与重定位的台站共 29 个(14 个区内台,15 个区外台),台站分布均匀,能够较好地包围敖汉旗震群(图 1(a))。

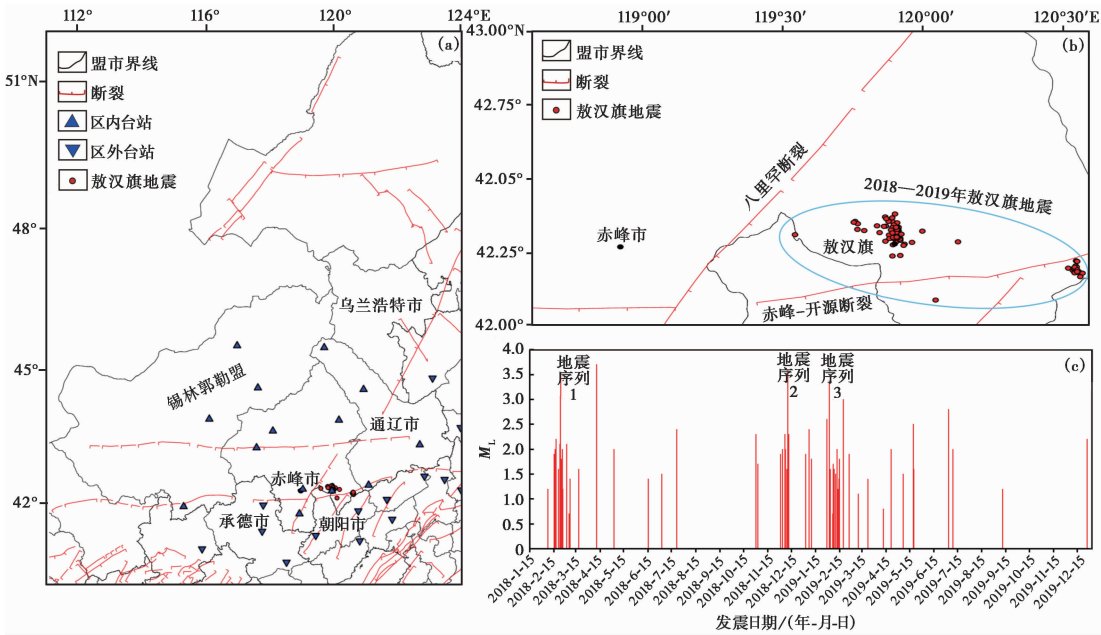


图 1 赤峰市敖汉旗 2018—2019 年期间地震分布情况
(a) 赤峰市地理位置; (b) 敖汉旗地震震中分布; (c) 敖汉旗地震震级分布情况

2 定位方法与地壳速度模型

2.1 单纯型定位方法

单纯型方法(Nelder et al, 1965)的定位过程是在 n 维空间内不断寻求目标函数最小值, 获取最优解的过程。该方法主要计算过程为:首先在空间内构建一个由 $n+1$ 个顶点组成的多面体,然后求取各顶点的函数值,并互相对比,以优质顶点代替较差顶点,再计算下一顶点函数值,并与上一优质点对比,选出更为优质的顶点,以此重复计算、对比、取优去劣,最终寻出最优顶点,以获取最佳定位结果(张炳等,2012)。单纯型方法的定位关键在于采用反射(P_{IR})、扩展(P_{IE})、收缩(P_{IS})与压缩(P_{IC})的计算方法来改变顶点(图 2),通过不断求取扩展点、改进扩展点以及与极大点函数值对比,从而避免振动现象,提高寻优速度,迅速找到准确解。

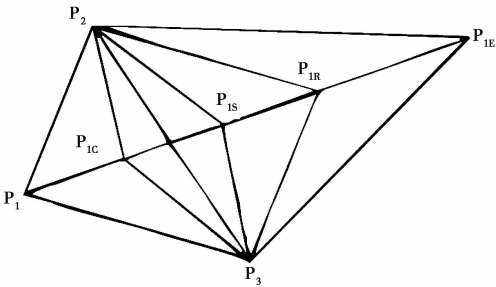


图 2 单纯型方法定位原理示意图(二维空间)

2.2 Hypo2000 定位方法

Hypo2000 方法 (Klein, 2002) 继承 Geiger 定位思想, 基于假定的地震位置, 求取观测到时与理论到时的时间差, 不断迭代, 搜寻时间差的最小值, 从而确定发震位置。具体实现过程为: 在假定的发震位置 (x, y, z) 附近求取走时 T 的一级泰勒展开式

$$T' = T + \partial T / \partial x (x' - x) + \partial T / \partial y (y' - y) + \partial T / \partial z (z' - z) \quad (1)$$

其中, T 为相对于 (x, y, z) 附近一点 (x', y', z') 的实际走时。根据地震台站的观测数据, 建立并求解观测方程组。在求解过程中, 直接将方程组降维, 通过奇异值使其分解, 无需简化为正规形式。该方法在计算过程中能够根据不同区域选用不同的水平分层速度模型。

2.3 双差定位方法

双差方法 (Waldhauser et al, 2000) 的定位原理是利用 2 个地震事件到同一台站的走时差的残差来进行定位。当 2 个事件间的距离远小于其到台站的距离时, 一般认为这 2 个事件到台站的传播路径是相同的, 那么其被同一台站记录的走时差实际就是这 2 个事件空间位置不同的体现, 因此, 双差定位方法其实是一种相对定位法 (Got et al, 1994; 刘劲松等, 2007)。

双差方法的基本算法表达式为

$$drk^{ij} = (tk^i - tk^j)^{\text{obs}} - (tk^i - tk^j)^{\text{cal}} \quad (2)$$

其中, i, j 代表 2 个地震事件, k 为地震台站, t 为地震波走时, obs、cal 分别表示观测值与理论值。若事件 i, j 间的距离远小于其到地震台站 k 的距离时, 式 (2) 可写为

$$\frac{\partial t^i k}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t^i k}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t^i k}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t^j k}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t^j k}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t^j k}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j = dr \quad (3)$$

式中, $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau)$ 为震源参数的扰动量。在此基础上, 联立所有事件对与每一个台站间的双差方程, 得到线性方程组, 对其求解, 从而获取各地震相对位置。

双差定位程序主要分为震相预处理程序 ph2dt 与定位主程序 hypoDD (赵云峰, 2011)。具体定位过程为: 首先通过预处理程序 ph2dt 将绝对定位方法得到的 P 和 S 波震相 (到时) 转换成双差主程序 hypoDD 的输入 (事件对的走时), 该过程通过设置最小权值、最大距离、搜索半径、邻居上限、最小连接、最少震相与最多震相 7 个参数, 控制地震事件对的建立; 然后将 ph2dt 生成的满足要求的事件对目录 (event.sel 文件) 与事件的走时差数据 (ct.dat 文件) 加载到 hypoDD 程序内, 并运行该主程序, 即可得到双差的地震定位结果 (hypoDD.reloc 文件)。

2.4 地壳速度模型

内蒙古自治区地域分布较广, 东西狭长, 地质构造很不均匀, 地下结构较为复杂, 因此, 对内蒙古局部地区地震进行精确定位时, 需选择符合该区域地下结构的速度模型。本文研究区位于内蒙古东部, 为燕山山地向辽河平原的过渡地带, 地形整体呈 ES 向 WN 逐渐倾斜的特点。赵艳红等 (2018) 提出了内蒙古东部地区一维地壳速度结构模型 (表 1), 该模型经过东部地区地震事件与爆破事件的多次检验, 与该地区地下构造较为吻合, 因此本文基于该速度模型对敖汉旗地区震群进行重定位工作。

表 1 内蒙古东部地区一维地壳速度结构模型

层号	厚度/km	$v_p/(km \cdot s^{-1})$
1	0	5.64
2	23.00	6.10
3	39.00	6.72
4	77.60	8.05

3 定位结果分析

3.1 绝对定位结果对比

基于相同台站与相同震相数据,分别利用单纯型方法与 Hypo2000 方法对敖汉旗 3 次震群内的 75 条地震事件进行重定位。根据走时残差均方根值(RMS)的分布情况(图 3),单纯型定位法的 RMS 主要分布于 0.2~0.5s 之间,平均为 0.34s,最大可达 0.85s,而 Hypo2000 定位法的 RMS 集中于 0.1~0.4s,平均为 0.21s,最大 0.65s,说明 Hypo2000 方法的定位结果比单纯型方法的结果更为合理。从震中分布情况(图 4(a))可以看出,2 种方法的震中分布范围相对一致,Hypo2000 的地震分布比单纯型结果更为收敛,震群内 73%的地震相对密集地分布于赤峰-开源断裂的北侧,沿近 NW-SE 方向展布,27%的地震呈簇状分布于赤峰-开源断裂南侧。根据 2 种方法对同一地震事件定位结果的偏差统计(图 4(b)),震中偏移值主要集中在 4km 内,平均约 2.88km,偏差达 10km 以上的地震仅有 1 个,说明 2 种方法得到的敖汉旗震群定位结果相对吻合,也进一步表明得到的重定位结果较为可靠。

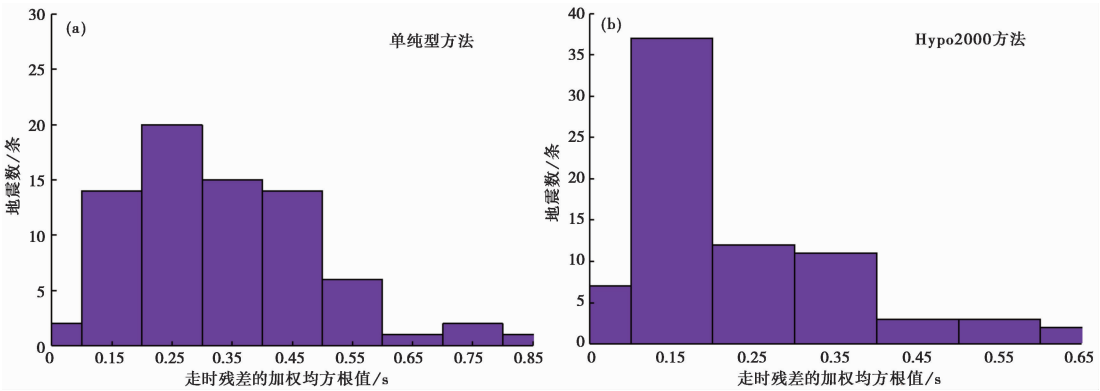


图 3 单纯型方法(a)与 Hypo2000 方法(b)定位敖汉旗震群的走时残差均方根值分布情况

图 5 给出了根据单纯型方法与 Hypo2000 方法得到的震源深度结果,2 种方法的震源深度结果比较分散,但优势分布明显,均有 92%的地震事件分布在 1~13km,其中最大深度均在 20km 内。相比单纯型方法,Hypo2000 方法的震源深度结果更为稳定与集中。单纯型方法和 Hypo2000 方法的定位结果共同表明此次敖汉旗地区的小震活动多发生在上地壳。

通过对比 2 种方法的震群震中位置与残差的分布情况,可以看出 Hypo2000 方法的定位精度相对较高,震中定位结果分布更为集中,序列内 73%的地震沿近 NW-SE 方向密集展布

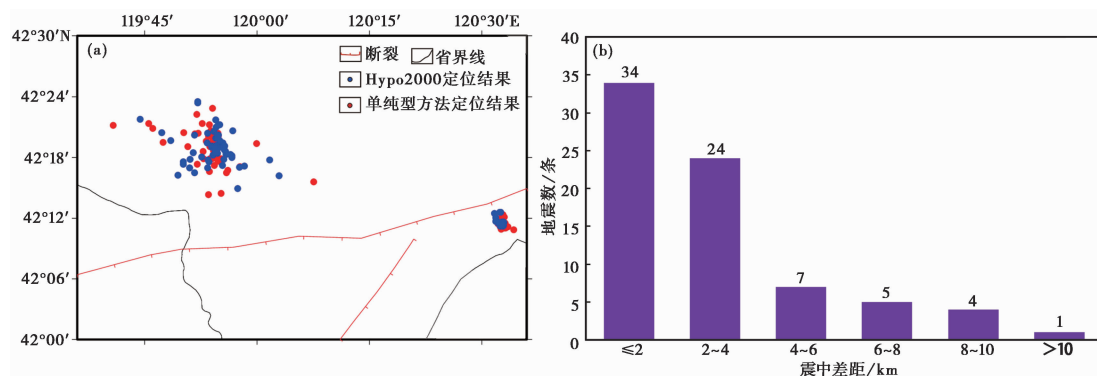


图4 单纯型方法与 Hypo2000 方法计算的敖汉旗震群分布(a)与其震中差距分布情况(b)

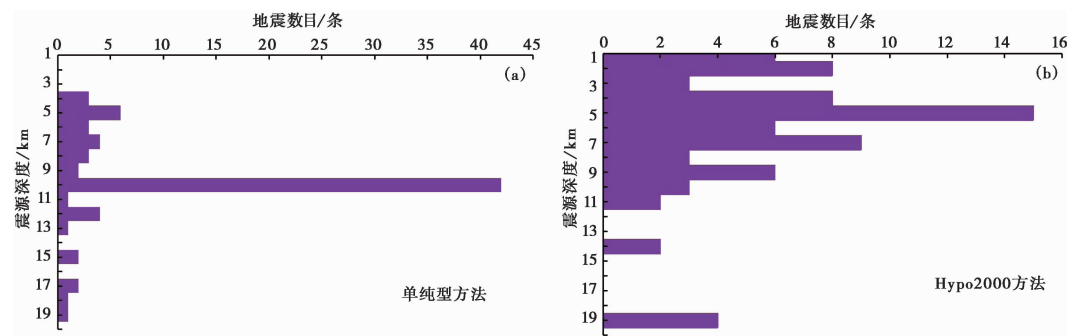


图5 单纯型方法(a)与 Hypo2000 方法(b)计算的敖汉旗震群震源深度结果对比

于赤峰-开源断裂的北侧,其余地震呈簇状分布于赤峰-开源断裂南侧;根据2种方法计算的震源深度结果显示,序列内92%的地震的震源深度分布在1~13km,说明敖汉旗地区的孕震层在上地壳内。

3.2 双差定位结果

由于Hypo2000方法的定位结果相较于单纯型方法精度更高,因此,将其计算结果(75条地震)作为双差定位方法的初始输入值,进一步对敖汉旗震群的相对位置进行定位。在计算过程中,有21条地震因不满足双差定位方法计算条件而丢失,最终给出54条地震的双差定位结果。

根据双差方法的三分向(EW, SN, UD)定位误差与到时残差RMS分布情况(图6)可见,该方法的重定位精度高于Hypo2000方法。从三分向定位误差分布情况可以看出,水平方向的定位误差范围均小于垂直向的定位误差范围;从到时残差RMS分布情况可以看出,RMS的集中分布区间缩短为0~0.25s,平均为0.2s,最大0.55s,其中,90%的地震其RMS集中在0.4s内。

从双差方法重定位后的地震经度、纬度分布情况(图7)可以看出,位于赤峰-开源断裂北侧的地震,其纬度差距在0.057°内,经度差距在0.049°内,不同地震间的震中偏差范围由0.22~24.27km降为0.04~6.80km;位于赤峰-开源断裂南侧的地震其纬度差距在0.008°内,经度差距在0.007°内,不同地震间的震中偏差范围由0.33~2.80km降为0.32~0.98km,反映

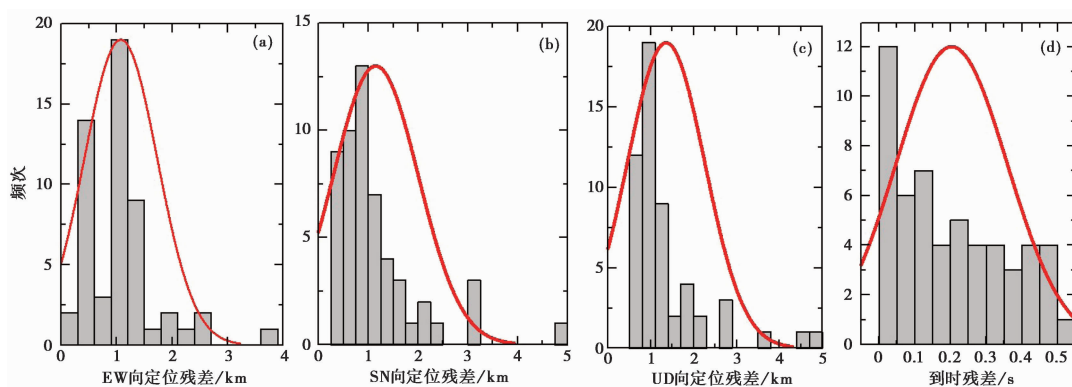


图 6 双差方法的定位残差与走时残差分布情况

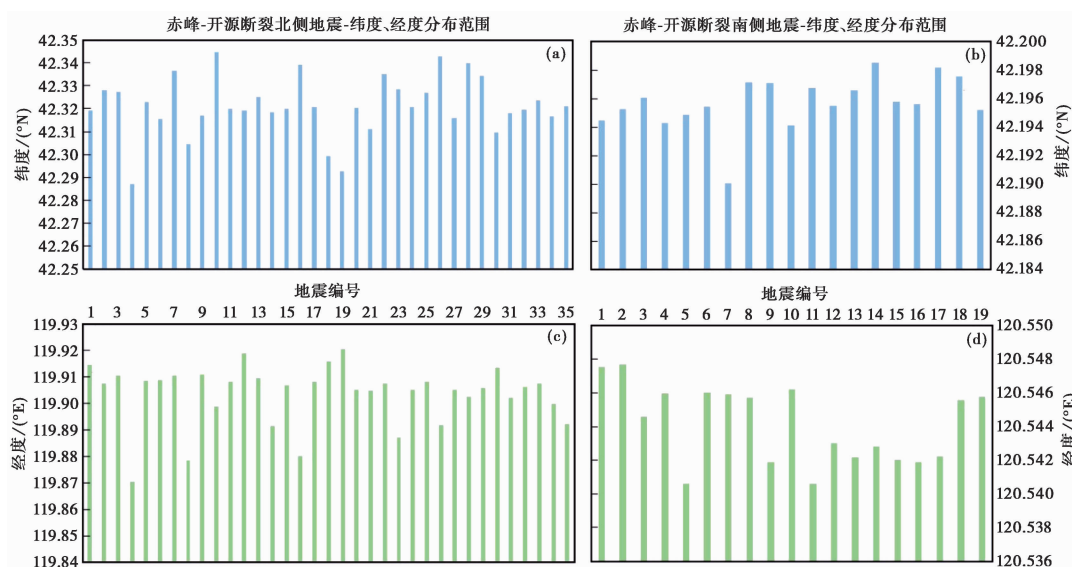


图 7 双差定位方法计算的地震经度、纬度分布情况

出双差方法的震中定位结果更加稳定与收敛。

根据双差重定位后的震中分布情况(图 8(a)),能够看出经过重定位后地震分布更为集中,位于赤峰-开源断裂南侧的地震呈簇状分布,南北最大扩展长度约 0.98km;位于赤峰-开源断裂北侧的地震具有更加明显的 NW 向优势长轴展布特征,延伸长度约 6.80km。相比初始 Hypo2000 方法的震源深度分布,重定位后敖汉旗震群的深度分布范围缩小为 4~12km,约 97%的地震位于 11km 内(图 8(d))。

沿经度与纬度剖面观察敖汉旗震群的深度分布情况(图 8(b)、8(c)),发现断裂北侧地震的深度由西向东逐渐变深、由南向北呈由浅变深再变浅的趋势,断裂南侧地震深度分布无明显变化特征,这可能与其在地面展布范围过小有关;通过对比沿震群分布方向与垂直震群分布方向震群的震源深度变化情况(图 8(e)、8(f)),发现敖汉旗震群的震源深度沿震群分布方向由 WN 向 ES 方向逐渐变深,这可能是由于东南部地震距离赤峰-开源断裂较近,导

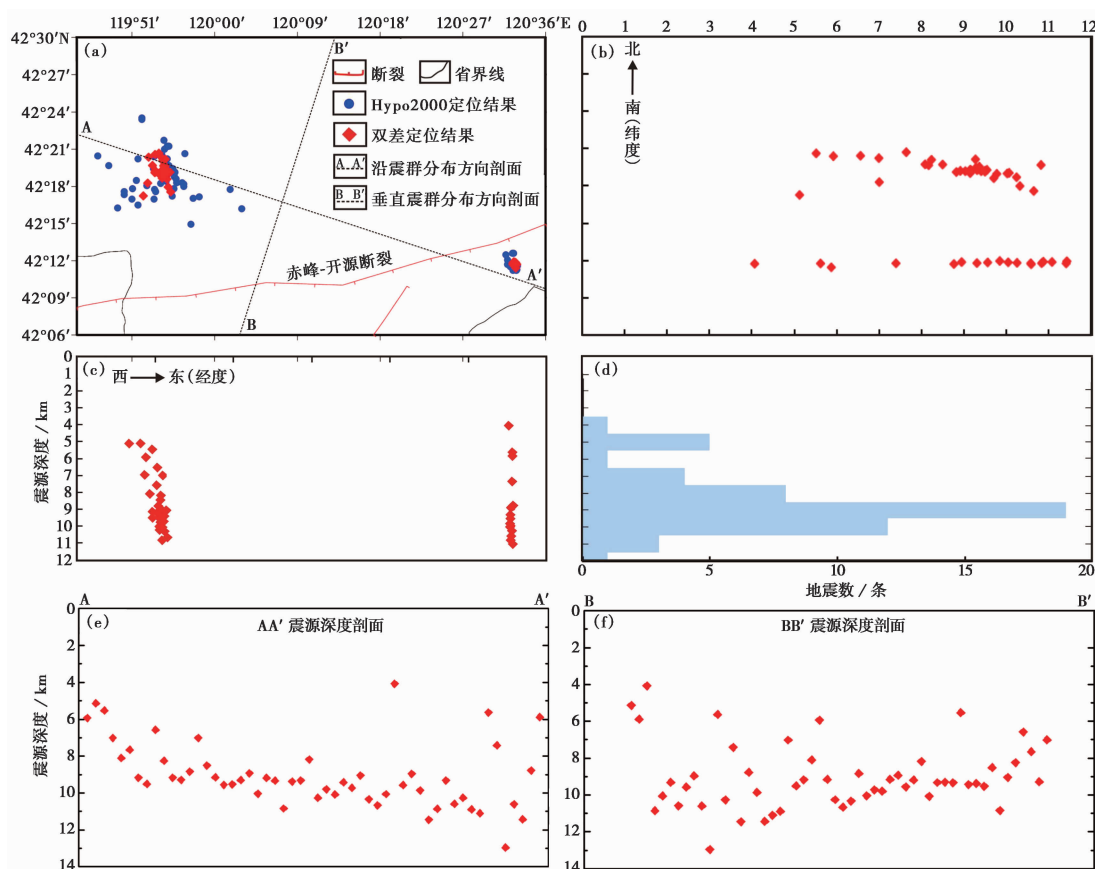


图 8 双差方法重定位的敖汉旗震群分布

(a) 震中分布; (b)、(c) 分别为震源深度沿纬度、经度方向的变化特征; (d) 震源深度分布; (e)、(f) 分别为沿震群分布方向与垂直于震群方向的震源深度剖面图

致附近地震震源深度较深的缘故, 亦或是震群附近存在由 ES 向 WN 展布的隐伏断裂, 控制着该区的地震分布。

4 结果与讨论

分别利用单纯型方法、Hypo2000 方法与双差方法对 2018—2019 年敖汉旗地区 3 次震群内的 75 条地震进行重定位, 通过对比分析不同方法的定位残差、震中差、震源深度等结果, 得到以下结论:

(1) 通过对比分析由单纯型方法、Hypo2000 方法得出的震中位置及残差结果, 发现 2 种方法的震中分布范围相对一致, 但 Hypo2000 方法的定位结果震中分布更为收敛。

(2) 根据单纯型方法、Hypo2000 方法得出的震源深度结果, 发现其震源深度结果均相对分散, 但优势分布明显, 均有 92% 的地震事件分布在 1~13 km, 其中最大深度均在 20 km 内, 说明敖汉旗地区的孕震层在上地壳内。

(3) 相比 Hypo2000 方法, 双差方法的到时残差 RMS 值普遍降低, 集中分布在 0~0.25 s; 震中定位结果更加稳定与收敛, 不同地震间震中位置的最大偏移量均有所降低; 位于赤峰-

开源断裂北侧的地震由 24.27km 降为 6.80km, 位于赤峰-开源断裂南侧的地震由 2.80km 降至 0.98km; 震源深度分布范围缩小至 4~12km, 约 97% 的地震深度位于 11km 内。

(4) 综合分析重定位结果, 认为 2018—2019 年期间敖汉旗震群主要有 2 个震中集中分布区域, 分别位于赤峰-开源断裂的南、北两侧, 73% 的地震其震中在断裂北侧沿 NW-SE 向条带状展布, 延伸长度约 6.8km, 震源深度由西向东逐渐变深、由南向北呈由浅变深再变浅; 27% 的地震在断裂南侧聚集成簇状, SN 向最大扩展长度约 0.98km, 震源深度无明显沿东西或 SN 向的变化特征。

(5) 根据敖汉旗震群的重定位结果, 发现该地区震群在赤峰-开源断裂南北两侧均有分布, 未呈现出与赤峰-开源断裂走向一致的活动特征, 震中附近亦未发现有出露断层, 认为敖汉旗震群附近可能存在未知的隐伏断层, 控制着该地区的地震丛集活动。基于本文精定位结果, 下一步将利用模板匹配方法对敖汉旗地区开展微震检测工作, 在扩充地震目录的基础上, 构建该区较为精细的速度结构, 并深入探讨敖汉旗地区的发震构造。

参考文献

- 陈翰林, 赵翠萍, 修济刚, 等, 2009. 龙滩水库地震精定位及活动特征研究. 地球物理学报, **52**(8): 2035~2043.
- 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.
- 傅莺, 范军, 2010. Hypocenter 和 Hypo2000 地震定位方法在攀枝花-会理地震序列中的应用. 四川地震, (1): 8~12.
- 管勇, 吴朋, 马付红, 2017. 地震台站空腔角对地震定位精度的影响. 地震地磁观测与研究, **38**(3): 53~59.
- 韩炜, 廖振鹏, 2001. 一种全局优化算法: 遗传算法-单纯形法. 地震工程与工程振动, **21**(2): 6~12.
- 韩晓明, 王鑫, 郝美仙, 2009. 赤峰-辽蒙交界地区地震活动性及平均波速比分析. 高原地震, **21**(3): 11~16.
- 华卫, 刘杰, 郑斯华, 等, 2006. 2003 年云南大姚 6.2、6.1 级地震序列特征分析及地震触发研究. 中国地震, **22**(1): 10~23.
- 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), **38**(10): 1242~1249.
- 黄媛, 杨建思, 张天中, 2006. 2003 年新疆巴楚-伽师地震序列的双差法重新定位研究. 地球物理学报, **49**(1): 162~169.
- 姜金钟, 陈棋福, 李姣, 2019. 中国东北的深源地震波形匹配检测及定位. 地球物理学报, **62**(8): 2930~2945.
- 金春华, 何秋菊, 蔡新华, 等, 2015. 宁夏地区地壳新速度模型在地震定位中的应用. 地震, **35**(2): 51~60.
- 李冬梅, 周翠英, 董翔, 等, 2011. 山东地区震群活动与周围地区中强地震的关系. 华北地震科学, **29**(4): 21~26.
- 李红光, 王利亚, 孙刚, 等, 2015. 华北地区中小地震重新定位和地震活动特征研究. 地震, **35**(1): 28~37.
- 刘劲松, Chun K Y, Henderson G A, 等, 2007. 双差定位法在地震丛集精确定位中的应用. 地球物理学进展, **22**(1): 137~141.
- 孙继忠, 1985. 赤峰南部地区弱震活动是唐滦强震孕育和发生的窗口. 华北地震科学, **3**(4): 93~98.
- 田玥, 陈晓非, 2002. 地震定位研究综述. 地球物理学进展, **17**(1): 147~155.
- 王承伟, 李恩来, 王帅, 等, 2016. 地震定位方法适用性分析. 防灾减灾学报, **32**(1): 69~74.
- 王桂丹, 2016. 基于 JOPENS/MSDP 地震定位方法的定位结果分析. 内陆地震, **30**(1): 74~80.
- 王平, 狄秀玲, 李少睿, 等, 2006. 用爆破事件检验区域数字地震台网常规地震定位方法的定位精度. 地震地磁观测与研究, **27**(3): 25~28.
- 谢辉, 金春华, 蔡新华, 等, 2011. MSDP 单纯型和 HYP2000 定位方法对比分析. 地震地磁观测与研究, **32**(5): 15~19.
- 谢石文, 黄显良, 杨波, 等, 2018. 基于不同方法、地壳速度模型的地震定位研究及其在安徽地区的应用. 华南地震, **38**(1): 95~100.
- 薛艳, 陈琳荣, 黎明晓, 等, 2017. 华北地区震群活动与强震. 华北地震科学, **35**(2): 1~9.
- 杨文东, 金星, 李山有, 等, 2005. 地震定位研究及应用综述. 地震工程与工程振动, **25**(1): 14~20.
- 杨选, 康英, 沈玉松, 等, 2018. 用爆破事件测试 JOPENS—MSDP 中 4 种定位算法的稳定性. 地震地磁观测与研究, **39**(4): 78~87.
- 杨智炯, 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 I):129~134.
- 曾宪伟,姚华建,莘海亮,2017. 宁夏石嘴山震群的微震匹配定位及其发震构造. 地震地质,39(4):735~753.
- 张炳,汪贵章,戚浩,等,2012. HYPO2000 与单纯形定位方法对比及作为速报算法的可行性分析. 地震地磁观测与研究,33(5):13~17.
- 赵艳红,张帆,娜热,2018. 内蒙古东部地区一维地壳速度结构分析. 地震地磁观测与研究,39(1):41~48.
- 赵云峰,2011. 双差地震定位法及其应用研究. 硕士学位论文. 西安:长安大学.
- Bondár I, Myers S C, Engdahl E R, et al, 2006. 地震台网的震中定位精度判据. 世界地震译丛, (4):38~55.
- Got J L, Fréchet J, Klein F W, 1994. Deep Fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea. J Geophys Res Solid Earth, 99(B8):15375~15386.
- Klein F W, 2002. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes. Virginia: U.S. Geological Survey, 1~123.
- Nelder J A, Mead R, 1965. A Simplex method for function minimization. Comput J, 7(4):308~313.
- 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.

Relocation and Spatial Distribution Characteristics of the Aohanqi Earthquake Sequences in Inner Mongolia Autonomous Region

Zhang Jianzhong Zhang Ke Hao Meixian Zhang Hui Wang Xin Zhai Hao
Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China

Abstract Taking the Aohanqi earthquake sequences as a case study, the seismic phase observation report of Inner Mongolia between 2018 and 2019 are used to relocate and analyze Aohanqi earthquake sequences by applying Hypo2000 location method as well as double difference location method respectively. It was concluded that the double difference location method has relatively higher locating accuracy among others. According to the results of double difference location method, the Aohanqi earthquake sequences has two concentrated distribution area which is located separately on the north and south sides of the Chifeng-Kaiyuan fault. About 73% of the earthquake is on the north side of the fault, and the epicenter is distributed in a strip along the NW-SE direction with an extension length of about 6.8km. The focal depth gradually became deep from west to east, and gradually became deep to shallow from south to north. However, the epicenter of the earthquakes on the south of the fault is clustered, with a maximum extension length of about 0.98km from south to north, and the focal depth showed no obvious variation along the east-west or north-south direction. The precise location results and the better understandings of the spatial distribution characteristics of the Aohanqi earthquake sequences can provide more accurate source parameters and references for the study of the seismogenic structure and the establishment of three-dimensional fine velocity structure in the region.

Keywords: Aohanqi region; Relocation of earthquake; Spatial distribution characteristics