

魏建民,韩晓明,张帆,等.2015 年阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震序列特征及发震破裂面讨论[J].地震工程学报,2017,39(5):919-924.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.919

WEI Jianmin, HAN Xiaoming, ZHUANG Fan, et al. Discussion of the Earthquake Sequence and Earthquake Rupture Surface of Alxa Zuoqi $M_s5.8$ in 2015[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 919-924. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.919

2015 年阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震序列特征 及发震破裂面讨论^①

魏建民, 韩晓明, 张帆, 陈立峰, 李娟, 杨红樱

(内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:以 2015 年阿拉善左旗 5.8 级地震为研究对象,基于地震活动背景和序列统计分析,利用 HypoDD 双差定位方法对地震序列进行重新定位,考察余震在空间上的展布特征,并结合震中区烈度、震源机制解和重新定位结果对 5.8 级地震的发震破裂面进行判定。结果表明,阿拉善左旗 5.8 级地震为主余型,重新定位后的震中位置为 $39.78^{\circ}\text{N}(\pm 0.72\text{ km})$ 、 $106.34^{\circ}\text{E}(\pm 0.76\text{ km})$,震源深度 $13.2\text{ km}(\pm 1.15\text{ km})$;序列优势分布方向分别为近 SN 向和 NEE 向,分别延伸 18 km 和 16 km;剖面的震源深度分布显示序列整体东倾,即震源深度由西向东逐步加深。综合区域应力场背景特征、历史地震破裂特征、主震震源机制解和序列重新定位等多方面资料判定认为,本次阿拉善左旗 5.8 级地震的破裂面应为近南北走向的断层面。

关键词:阿拉善左旗 5.8 地震; HypoDD 重新定位; 发震破裂面; 地震序列特征

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)05-0919-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.05.0919

Discussion of the Earthquake Sequence and Earthquake Rupture Surface of Alxa Zuoqi $M_s5.8$ in 2015

WEI Jianmin, HAN Xiaoming, ZHANG Fan, CHEN Lifeng, LI Juan, YANG Hongying

(Inner Mongolia Seismological Bureau, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract: This paper studies the $M_s5.8$ earthquake that occurred in Alxa Zuoqi 2015. Based on the background seismicity and statistical analysis of the sequence, the HypoDD method was used to reposition the earthquake sequence. We examined the aftershocks distribution characteristics in space, and determined the $M_s5.8$ earthquake fracture surface combined with epicentral intensity, focal mechanism solutions, and the results of the re-positioning. The results show the Alxa Zuoqi $M_s5.8$ earthquake is the main aftershock, after relocation, the epicenter is $39.78^{\circ}\text{N}(\pm 0.72\text{ km})$ 、 $106.34^{\circ}\text{E}(\pm 0.76\text{ km})$, focal depth is $13.2\text{ km}(\pm 1.15\text{ km})$. The distribution direction of the sequence dominance is near NS and NEE, and extends 18 km and 16 km respectively. The focal

① 收稿日期: 2016-08-11

基金项目: 内蒙古自治区 2016 年科技重大专项(2016ZF01); “重点地区地震预测预警技术研究开发与推广示范”

作者简介: 魏建民(1980—), 男, 工程师, 现主要研究方向是工程地震、地震安全性评价、地震应急。E-mail: 791987145@qq.com。

通信作者: 韩晓明(1980—)男, 助理研究员, 主要从事测震学分析预报方法研究。E-mail: hxmpower@126.com。

depth of the profiles display the overall east-dipping sequence; the focal depth gradually deepened from west to east. The regional stress field background characteristics, historical earthquake rupture characteristics, the main shock mechanism solutions, and serial repositioning information considered judgment, the fracture surface of Alxa Zuoqi $M_s 5.8$ earthquake should be near NS-direction surface.

Key words: Alxa Zuoqi 5.8 earthquake; hypoDD repositioning; earthquake rupture surface; characteristic of earthquake sequence

0 引言

据中国地震台网测定,北京时间 2015 年 4 月 15 日 15 时 39 分在内蒙古自治区阿拉善左旗(39.8°N , 106.3°E)发生 $M_s 5.8$ 地震,震源深度 10 km,宏观震中位于阿拉善左旗巴音木仁苏木。本次地震发生在乌兰布和沙漠区,人口居住密度较小,未造成显著的地表破坏和人员伤亡,极震区烈度为 VII 度,展布方向 NEE,长轴 17 km,短轴 9 km,面积 126 km^2 ; VI 度区长轴 90 km,短轴 62 km,面积 4 904 km^2 。

阿拉善左旗 5.8 级地震发生后,地震预报工作者多次在震情趋势会商会提出,鄂尔多斯东北缘和西北缘的中强地震具有“成组活动”和“东西迁移对跳”特征,可能的原因是鄂尔多斯块体作为一个稳定的构造单元,其东北缘和西北缘作为该稳定块体的两个东西触角,在受到外围动力学作用时是有可能发生区域应力相互传递,而历史中强地震的“东西对跳”似乎可以成为这种应力“相互传递或对跳”的一种表象,阿拉善左旗 $M_s 5.8$ 地震发生在鄂尔多斯西北缘,按照以往的地震活动规律,鄂尔多斯东北缘未来将成为发生中强地震的有利区域。

上述地震活动在时间上的“成组性”和空间上的“对跳特征”是否存在地球动力学或应力场等更深层次力学问题的科学依据有待做大量的工作进行考证,这里不做过多讨论。本文主要基于地震活动背景和序列统计分析,首先对阿拉善左旗 5.8 级地震的地震序列类型进行判定,然后利用 HypoDD 双差定位方法对地震序列进行重新定位,考察余震在空间上的展布特征,最终结合震中区烈度、震源机制解和重新定位结果对 5.8 级地震的发震破裂面进行判定。

1 地震地质背景

阿拉善块体位于中朝古板块西部,其南侧为正在隆起的青藏高原,北部为新生代活动的蒙古高原,东侧为鄂尔多斯高原,是一个由走滑断层围限的三角块体^[1];阿拉善左旗 $M_s 5.8$ 地震处于地质构造复

合交接部位。从南北分布来讲,该地震发生在银川—乌兰泰断陷带和河套断陷带的衔接部位^[2];从东西分布来讲,该地震属于阿拉善块体和鄂尔多斯块体之间的一次中强地震(图 1)。

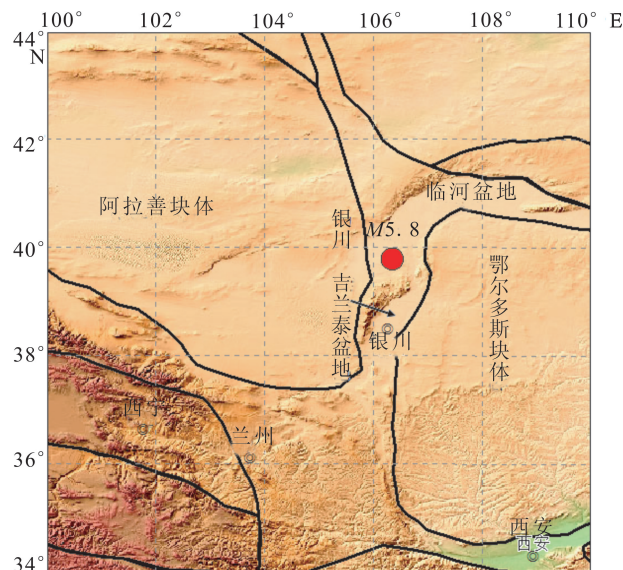


图 1 阿拉善左旗 5.8 级地震及所属构造单元

Fig.1 Alashan 5.8 earthquake and tectonic units

有正式地震记载以来,鄂尔多斯周缘地区共计发生 $M_s \geq 7.0$ 中强地震 19 次,其中 8.0~8.9 级 5 次、7.0~7.9 级 14 次。从空间分布看(图 2),鄂尔多斯北缘仅有一次 7 级以上地震,即公元 849 年包头西 7.0 级地震,地震活动水平明显低于西缘、东缘和南缘。而 1970 年以来,鄂尔多斯地块其他三缘持续平静,北缘地区则累计发生 5 次 $M_s 6.0$ 以上地震,时间最近的一次是 1998 年张北 6.2 级地震,使得鄂尔多斯块体北缘成为华北中强地震第四活动期(1815 年~至今)最新活跃幕的主体活动区域,2015 年 4 月 15 日阿拉善左旗 $M_s 5.8$ 地震应属该活跃幕最新发生的一次中强地震。

2 地震序列类型

根据内蒙古地震台网记录,截至 2015 年 7 月 15 日阿拉善左旗 $M_s 5.8$ ($M_L 6.1$) 地震共发生余震

187 次(含单台记录),其中 2 次 $M_L4.0\sim4.9$,3 次 $3.0\sim3.9$,25 次 $2.0\sim2.9$,125 次 $1.0\sim1.9$,31 次 $0.0\sim0.9$ 地震,最大余震为 4 月 15 日 15 时 44 分

的 $M_L4.5$,与主震的震级差为 $M_L1.6$;余震的震级主要分布在 $M_L1.0\sim2.0$ 间,时间上则主要集中在 4 月 15—27 日(图 3)。

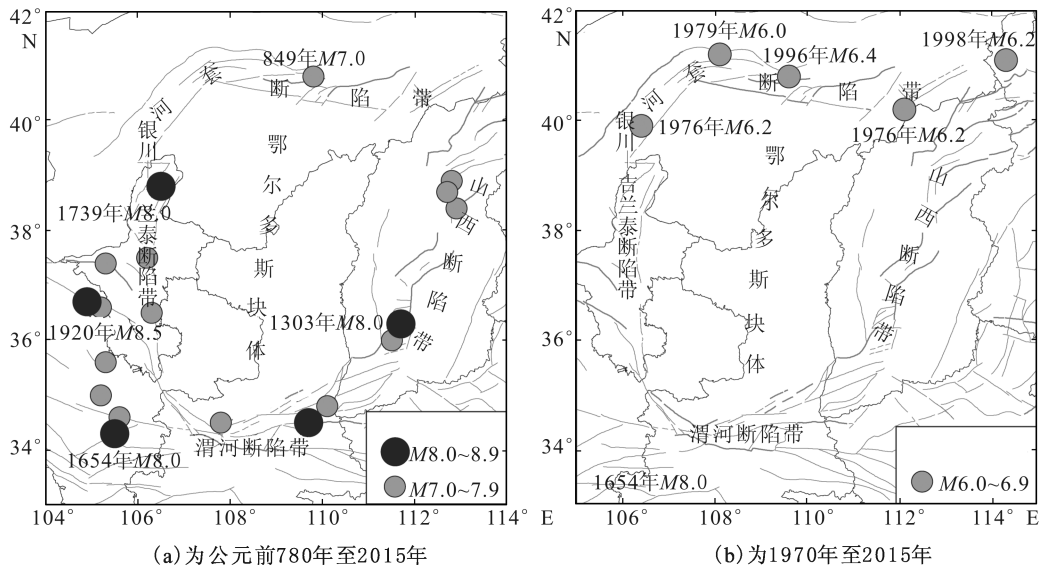


图 2 鄂尔多斯块体周缘 6 级以上中强地震
Fig.2 Moderate strong earthquakes($M>6.0$) in Erdos block

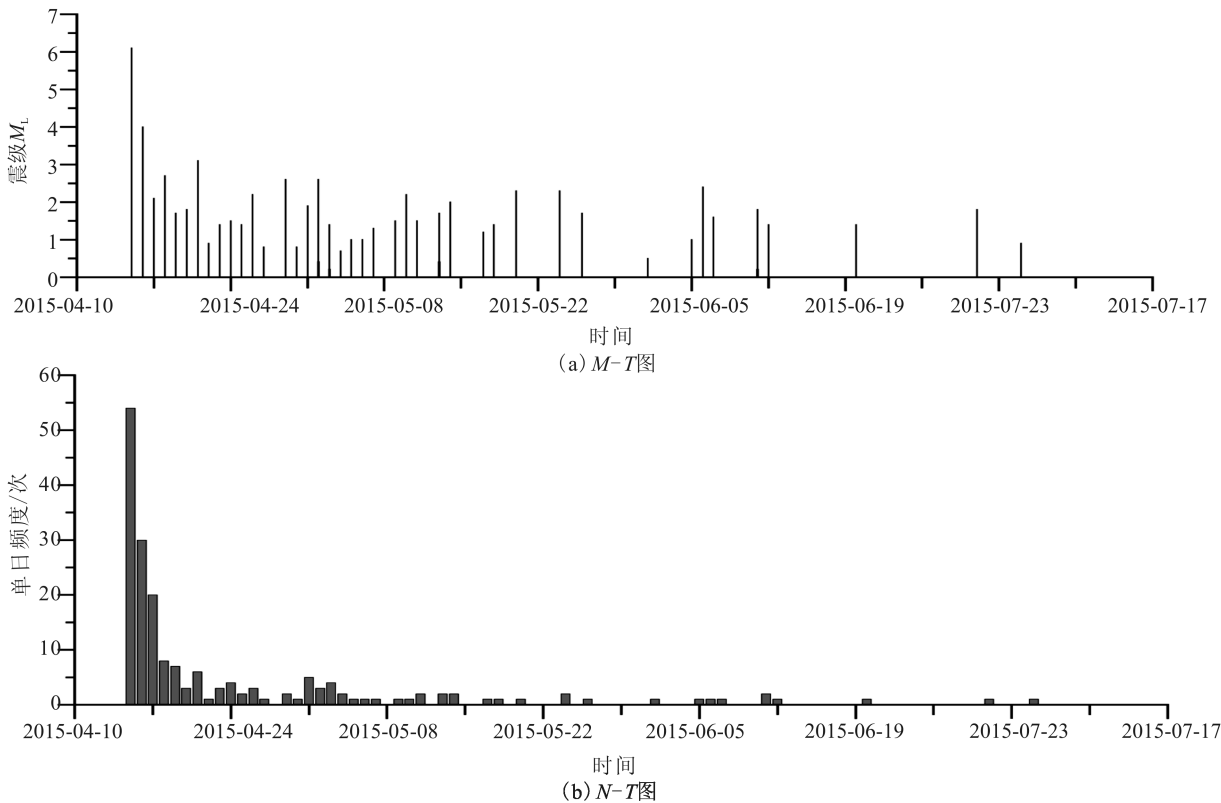


图 3 阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震序列(2015-04-15—2015-07-15)
Fig.3 Alashan $M_s5.8$ earthquake sequence (2015-04-15-2015-07-15)

随着时间流逝,序列发震强震和频度的衰减形态明显;取 $M_L1.0$ 为震级下限计算序列 h 值为 1.8,

配合主震与最大余震的震级差支持该序列为主余型。

3 震源机制解

德国波茨坦地震公告^[3]、美国地质调查局(USGS)^[4]、GlobalCMT(GCMT)^[5]、中国地震局地球物理研究所^[6]和内蒙古地震局^[7]均给出了 $M_s5.8$ 地震的震源机制解(表 1、图 4)。在应力轴方位分布方面上述结果基本一致,均表现出 $M_s5.8$ 地震受到北西向拉张应力和北东向挤压应力的作用特征(图 4),这种应力作用类型也是该地区固有的应力场性质^[8-11];但在断层错动类型和震源深度方面存在一定差异,其中波茨坦地震公告、USGS 和内蒙古地震局的矩张量反演结果显示出一定的正断层特征,中国地震局地球物理研究所和 GCMT 的结果则显示出一定的逆断层特征;德国波茨坦地震公告给出的震源深度为 22 km,中国地震局地球物理研究所给出的震源深度为 20 km,USGS 给出的震源深度为 12 km,GCMT 给出的震源深度为 24.6 km,内蒙古地震局测定的震源深度为 13 km(图 4)。从矩张量反演震源机制解的过程分析,上述震源机制解结果的差异与反演过程中所用的台站记录、设定的滤波频段、选取的速度模型和网格搜索步长等因素有一定关系^[12-13]。本文讨论所用震源机制解采用内蒙古地震局的矩张量波形拟合反演结果^[7]。

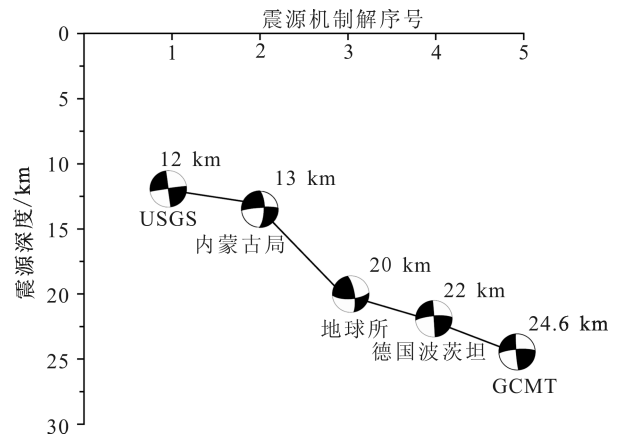


图 4 震源机制解对比

Fig.4 Contrast of focal mechanisms

表 1 阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震的震源机制解
Table 1 Focal mechanism solutions of Alashan $M_s5.8$ earthquake

序号	节面Ⅰ/(°)			节面Ⅱ/(°)			结果来源
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	
1	356	89	-167	266	78	0	德国波茨坦地震公告
2	352	90	-178	262	88	0	USGS
3	266	78	4	176	86	168	GCMT
4	350	74	158	86	69	17	中国地震局地球物理研究所
5	360	70	-171	267	82	-20	内蒙古地震局

4 地震重新定位

阿拉善左旗 5.8 级地震震中区地震台站布局良好(图 5),本文使用双差定位方法对地震序列进行重新定位。双差定位方法使用相对走时残差来修定地震位置,主要基于两个震源之间的距离小于事件到台站的距离,认为两个事件传播到台站的射线路径基本相同,从而可以有效降低速度模型不确定性对定位结果的影响^[14];该方法在研究断裂优势发震层和余震展布方向等方面具有一定的优势^[15]。

双差定位方法通过对一定空间范围内的地震事件两组对,根据组对事件之间震相到时的差别来获得事件对的相对空间分布,其基本方程为^[14]:

$$\Delta t_{jk} - \Delta t_{ik} = -S_{jk}\Delta X_j + S_{ik}\Delta X_i + \epsilon_{jk} - \epsilon_{ik} \quad (1)$$

其中: Δt_{ik} 和 Δt_{jk} 分别对应地震*i*和*j*到台站*k*的到时(走时)残差; X_i 和 X_j 分别是两个震源的位置矢量; S_{ik} 和 S_{jk} 是两个震源位置到台站*k*的地震射线的慢度矢量; ϵ_{ik} 和 ϵ_{jk} 分别为地震在台站的到时拾取误差。

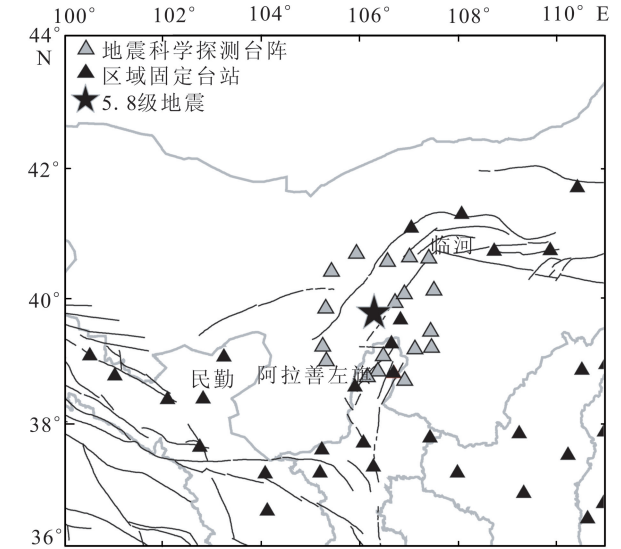


图 5 地震台站分布图

Fig.5 Stations map

有学者对阿拉善地块的速度结构进行过专门研究^[17](表 2),这里引用该速度结构模型并采用共轭梯度算法对地震序列进行 HypoDD 双差定位。

前已述及,阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震的余震序列不是特别发育,挑选能被 6 个以上台站记录的 $M_L \geq 1.0$ 地震 78 次参与 HypoDD 定位,重新定位后保留了 64 次地震事件[图 6(a)]。

重新定位结果显示,阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震的震中位置为 39.78°N、106.34°E,震源深度 13.2 km,

表 2 阿拉善地块地壳速度结构

Table 2 Crustal velocity structure of Alashan block		
层位	层参数	速度结构
沉积层	底面埋深 H/km	2~3
	纵波速度 $V_P/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	5.20
上地壳	底面埋深 H/km	13~15
	纵波速度 $V_P/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	5.92~6.33
中地壳	底面埋深 H/km	22~24
	纵波速度 $V_P/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	6.33
下地壳	底面埋深 H/km	43~48
	纵波速度 $V_P/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	6.5~6.8

对应的定位误差分别为 $\pm 0.72\text{ km}$ 、 $\pm 0.76\text{ km}$ 和 $\pm 1.15\text{ km}$;余震序列的优势分布方向有两个,即近 EW 向(A-A1)和 NNW 向(B-B1),延伸长度分别为 16 km 和 18 km ,余震分布于主震两侧,表现出双侧破裂特征[图 6(a)];震源深度分布范围由定位前的 $3\sim 38\text{ km}$ 缩小至重定位后的 $3.6\sim 19.4\text{ km}$ 。从 A-A1 和 B-B1 两个方向的深度剖面分布看,余震序列沿 A-A1 由西向东逐步加深,余震序列的空间分布形态整体东倾[图 6(b)、(c)]。

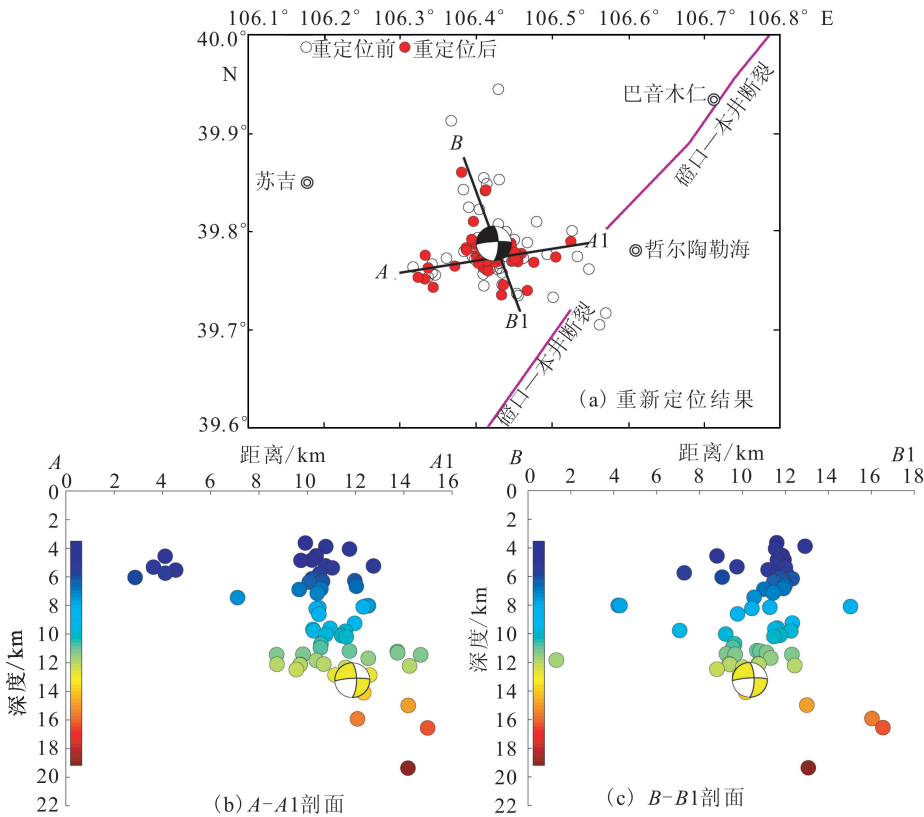


图 6 阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震序列重新定位结果
Fig.6 Relocation of Alashan 5.8 earthquake sequence

5 发震破裂面讨论

阿拉善左旗 5.8 级地震的震源机制基本为纯走滑型,断层节面正交于近 EW 和近 SN 向,压应力方位 NE,张应力方位 NW,仰角不大,基本都为近水平作用,不同深度反演得到的拟合残差结果显示震源深度为 13 km 时对应的残差最小^[7]。结合阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震的震源机制结果和序列定位结果分析认为,两个断层节面的方位和余震分布的两个方向都比较接近,仅从震源机制和精定位结果分析,近 EW 向和近 SN 向均有可能是主破裂面走向。烈度Ⅶ度区长轴走向 NEE,延伸 17 km ,与图 6 中

的 A-A1 余震分布方向和近 EW 向的断层节面走向接近,若以此节面作为主破裂面,则 $M_s5.8$ 地震为左旋走滑型。值得注意的是,震中区 1976 年曾发生巴音木仁 $M_s6.2$ 地震,其主破裂面被认为是近 SN 走向,主要依据是此走向与贺兰山构造带的走向接近,且震中区南侧东西走向的红果子沟长城曾被 NE35°展布的断层错移并产生右旋平移,表明分布于 SN 向附近的破裂面比较符合该区现今构造运动的实际状况^[2];根据该区所处的应力场环境分析,包括震中区在内的鄂尔多斯西缘至西北缘主要受控于北西向拉张运动而多发生右旋剪切破裂^[2],且 2001 年以来应力场的最新变化与背景特征协调,共同表

明近 SN 走向的破裂面比较符合应力场特征,并与 1976 年巴音木仁 $M_s 6.2$ 地震的断层破裂形式相似,即两次地震均可能是 SN 走向的断层面在 NW 向拉张应力作用下产生右旋走滑所致。

6 结论

2015 年 4 月 15 日阿拉善左旗 $M_s 5.8$ 地震的位置处于地质构造复合交接部位的巴彦浩特盆地,整体处于右旋剪切拉张作用的应力场环境中。根据 HypoDD 重新定位结果,阿拉善左旗 5.8 级地震的位置为 $39.78^\circ\text{N}(\pm 0.72\text{ km})$ 、 $106.34^\circ\text{E}(\pm 0.76\text{ km})$,震源深度 $13.2\text{ km}(\pm 1.15\text{ km})$,结合震源机制解反演得到的震源深度^[8],分析认为阿拉善左旗 $M_s 5.8$ 地震的震源深度在 $12\sim 14\text{ km}$;序列优势分布方向分别为近 SN 向和 NEE 向,分别延伸 18 km 和 16 km ;剖面的震源深度分布显示序列整体东倾,即震源深度由西向东逐步加深。

综合区域应力场背景特征、历史地震破裂特征、主震震源机制解和序列重新定位等多方面资料判定认为,本次阿拉善左旗 5.8 级地震的破裂面应为近 SN 走向的断层面。

参考文献(References)

- [1] 高洪雷,何建国,张松,等.阿拉善地区地壳稳定性研究[J].世界核地质科学,2013,30(4):237-244.
GAO Honglei, HE Jianguo, ZHANG Song, et al.. Study on Crustal Stability of Alashan Area[J]. World Nuclear Geoscience, 2013, 30(4): 237-244.
- [2] 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组.鄂尔多斯周缘活动断裂系[M].北京:地震出版社,1988:39-76.
The Research Group on "Active Fault System around Ordos Massif" Active Fault System Around Ordos Massif[M]. Beijing: Seismological Press, 1988: 39-76.
- [3] <http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/event.php?id=gfz2015hipm>
- [4] http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us200026mr#scientific_tensor
- [5] http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us200026mr#scientific_tensor:us_gcm20150415073927.
- [6] <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/272036.shtml>
- [7] 韩晓明,刘芳,张帆,等.2015 年阿拉善左旗 $M_s 5.8$ 地震的震源机制和重新定位[J].地震学报,2015,37(6):1059-1063.
HAN Xiaoming, LIU Fang, ZHANG Fan, et al. Source Mechanism of the 2015 Alxa Zuoqi $M_s 5.8$ Earthquake and Its Relocation[J]. Acta Seismologica Sinica, 2015, 37(6): 1059-1063.
- [8] 邓起东,尤惠川.鄂尔多斯周缘断陷盆地地带的构造活动特征及其形成机制[M]//现代地壳运动研究(1).北京:地震出版社,1985.
DENG Qidong, YOU Huichun. Mechanism and Structure Activity of Ordos Basin [M]//Study on the Modern Crustal Movement(1). Beijing: Seismological Press, 1985.
- [9] 范俊喜,马瑾,刁桂苓.由小震震源机制解得到的鄂尔多斯周边构造应力场[J].地震地质,2003,25(1):88-99.
FAN Junxi, MA Jin, DIAO Guiling. Contemporary Tectonic Stress Field around the Ordos Fault Block Inferred from Earthquake Focal Mechanism [J]. Seismology And Geology, 2003, 25(1): 88-99.
- [10] 韩晓明,刘芳,张文韬.基于震源机制资料分析河套地震带的应力场变化特征[J].地震地质,2015,37(4):1030-1042.
HAN Xiaoming, LIU Fang, ZHANG Wentao. Using Focal Mechanism Data to Analysis the Variation Characteristics of Stress Field in Hetao Sismic Belt [J]. Seismology And Geology, 2015, 37(4): 1030-1042.
- [11] 荣代渤.研究中强地震前中小地震震源机制变化的一种方法[J].地震工程学报,2014,36(2):286-291.
RONG Dailu. Analyzing Changes of Focal Mechanism of Small-moderate Earthquakes before a Moderate-strong Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 286-291.
- [12] ZHU L P, RIVERA L A. A Note on the Dynamic and Static Displacements from a Point Source in Multilayered Media [J]. Geophys J Int, 2002, 148(3): 619-627.
- [13] 赵凌云,张辉,陈俊华,等.基于 CAP 方法的 2013 湖北巴东 5.1 级地震震源机制与发震构造研究[J].地震工程学报,2014,36(4):1014-1018.
ZHAO Lingyun, ZHANG Hui, CHEN Junhua, et al. Focal Mechanism Solutions and Seismogenic Structure of the Badong $M_s 5.1$ Earthquake of 2013 using the CAP method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 1014-1018.
- [14] WALDHAUSER F, Ellsworth W L. A Double Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Noahem Hayward fault, California [J]. Bull Seism Soc Amer, 2000, 90(6): 1353-1368.
- [15] LEI J S, ZHANG G W, XIE F R, et al. Relocation of the 10 March 2011 Yingjiang, China, Earthquake Sequence and Its Tectonic Implications [J]. Earthquake Science, 2012, 25: 103-110.
- [16] 金春华,赵卫明,陈晓非,等.利用地震和爆破资料反演宁夏及邻区浅层三维速度结构[J].地震学报,2011,33(5):614-623.
JIN Chunhua, ZHAO Weiming, CHEN Xiaofei, et al. Inversion of Earthquake and Explosion Data for 3-D Velocity Structure in Ningxia and Adjacent Region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(5): 614-623.