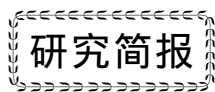


韩晓明, 刘芳, 张帆, 胡博, 陈立峰. 2015. 2015 年阿拉善左旗 $M_{\text{s}}5.8$ 地震的震源机制和重新定位. 地震学报, 37(6): 1059-1063. doi:10.11939/jass.2015.06.015.

Han X M, Liu F, Zhang F, Hu B, Chen L F. 2015. Source mechanism of the 2015 Alxa Zuoqi $M_{\text{s}}5.8$ earthquake and its relocation. Acta Seismologica Sinica, 37(6): 1059-1063. doi:10.11939/jass.2015.06.015.



研究简报

2015 年阿拉善左旗 $M_{\text{s}}5.8$ 地震的震源机制和重新定位^{*}

韩晓明 刘芳^{*} 张帆 胡博 陈立峰

(中国呼和浩特 010010 内蒙古自治区地震局)

关键词 阿拉善左旗 $M_{\text{s}}5.8$ 地震 重新定位 震源机制 应力场反演 主破裂面

doi:10.11939/jass.2015.06.015 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Source mechanism of the 2015 Alxa Zuoqi $M_{\text{s}}5.8$ earthquake and its relocation

Han Xiaoming Liu Fang^{*} Zhang Fan Hu Bo Chen Lifeng

(Earthquake Administration of Inner Mongolia, Hohhot 010010, China)

Key words: 2015 Alxa Zuoqi $M_{\text{s}}5.8$ earthquake; relocation; source mechanism; inversion of stress field; main rupture plane

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 $M_{\text{s}}5.8$ 地震,震源深度为 10 km,宏观震中位于巴音木仁苏木. 由于该地震发生在乌兰布和沙漠,人口居住密度小,未造成显著的地表破坏和人员伤亡;其极震区烈度达Ⅶ度,沿 NE 向展布,长轴为 17 km,短轴为 9 km,面积达 126 km²;Ⅵ度区长轴为 90 km,短轴为 62 km,面积为 4904 km²^①.

阿拉善左旗 $M_{\text{s}}5.8$ 地震发生在具有右旋剪切破裂特征的巴彦浩特盆地内部(邓起东,尤惠川,1985),属华北地区中强地震第四活动期(1815 年至今)最新活跃幕发生的一次中强地震. 其余震序列不太发育,截至 2015 年 5 月 4 日 0 时,共记录到余震 158 次(含单台记录),其中 $M_{\text{L}}0.0-0.9$ 余震 27 次, $M_{\text{L}}1.0-1.9$ 余震 106 次, $M_{\text{L}}2.0-2.9$ 余震 20 次, $M_{\text{L}}3.0-3.9$ 余震 3 次, $M_{\text{L}}4.0-4.9$ 余震 2 次,最大余震为 $M_{\text{L}}4.5$,为主余型地震. 这些余震集中发生在 4 月 15-17 日,共 105 次,占该序列地震总数的 67%.

本文采用 CAP (cut and paste)方法(Zhu, Helmberger, 1996)测定了阿拉善左旗 $M_{\text{s}}5.8$ 主震的最佳双力偶解. 结果显示,该地震为走滑型,最佳矩心深度为 13 km,如图 1 所示. 表 1 给出了部分研究机构所获得的震源机制解,可以看出,各机构获得的震源机制类型和震源深度均存在一定差异,本文结果与 USGS 的结果比较相近.

采用自助线性方法(Michael, 1991)反演 $M_{\text{s}}5.8$ 地震震中区(图 2 中虚线框)的应力场. 结果表明:震中区应力场的最大主压应力方位角为 52°,倾角为 20°,作用方向为 NE;其张应力方位角为 308°,倾角为 33°,作用方向为 NW;应力倾角近水平方向,这也是研究区应力场具有走滑特征的一个表现(图 2). 运用

^{*} 基金项目 中国地震局地震科技星火计划项目(XH15010Y)资助.

收稿日期 2015-05-11 收到初稿,2015-09-14 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: lfnm88@163.com

① 内蒙古地震局现场工作队. 2015. 内蒙古自治区阿拉善左旗 5.8 地震现场科学考察报告.

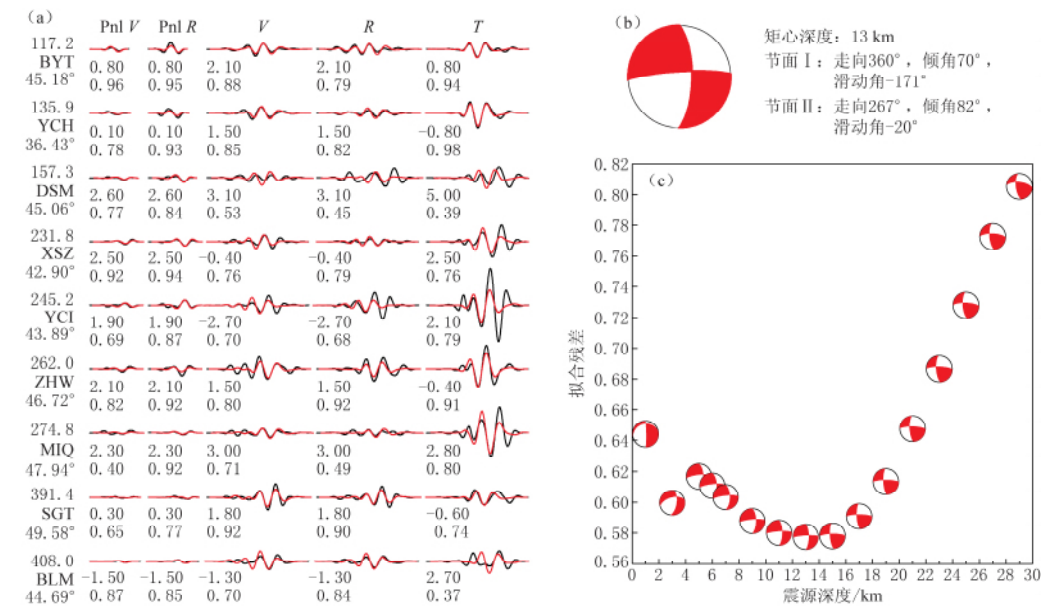


图1 采用CAP方法反演的2015年阿拉善左旗 $M_{\text{s}}5.8$ 地震震源机制解及相关结果
(a) 理论(红色)与观测地震图(黑色)的波形拟合, 波形左侧为台站代码, 其上下数字分别表示震中距(单位: km)和方位角, 波形下方第一行数字为理论地震图相对观测地震图的时移(单位: s), 第二行为二者的相关系数;
(b) 震源深度为13 km时的最佳双力偶解(下半球投影); (c) 震源机制解误差随震源深度的变化

Fig. 1 Focal mechanism solution of the 2015 Alxa Zuoqi $M_{\text{s}}5.8$ earthquake by CAP method and related results
(a) Waveform fitting of theoretical waveforms (red lines) with observational ones (black lines). Station codes are given on the left of waveforms with epicentral distances (in unit of km) at the top and azimuths at the bottom, and the numbers of the first line below the waveforms are the time shift (in unit of s), the numbers of the second line are their correlative coefficient. (b) The best double couple solution (lower hemisphere projection, focal depth is 13 km). (c) The misfit error distribution of focal mechanism solution as a function of focal depth

| 表1 2015年阿拉善左旗 $M_{\text{s}}5.8$ 地震的震源机制解参数 | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------------------|
| Table 1 Focal mechanism solution parameters of the 2015 Alxa Zuoqi $M_{\text{s}}5.8$ earthquake | | | | | | | | | | | | | | |
| 序号 | 节面 I | | | 节面 II | | | P 轴 | | T 轴 | | B 轴 | | 震源深度 /km | 结果来源 |
| | 走向 /° | 倾角 /° | 滑动角 /° | 走向 /° | 倾角 /° | 滑动角 /° | 方位 /° | 倾角 /° | 方位 /° | 倾角 /° | 方位 /° | 倾角 /° | | |
| 1 | 356 | 89 | -167 | 266 | 78 | 0 | 221 | 10 | 130 | 8 | 0 | 77 | 22 | GFZ(2015) |
| 2 | 352 | 90 | -178 | 262 | 88 | 0 | 217 | 1 | 127 | 1 | 352 | 88 | 12 | USGS(2015) |
| 3 | 176 | 86 | 168 | 266 | 78 | 4 | 222 | 6 | 130 | 11 | 337 | 77 | 25 | GCMT(2015) |
| 4 | 350 | 74 | 158 | 86 | 69 | 17 | 39 | 3 | 307 | 27 | 136 | 63 | 20 | 中国地震局地球物理研究所(2015) |
| 5 | 360 | 70 | -171 | 267 | 82 | -20 | 222 | 20 | 315 | 8 | 65 | 68 | 13 | 本文 |

振幅比方法(梁尚鸿等, 1984)求解 2001 年以来鄂尔多斯西北缘 226 次 $M_{\text{L}} \geq 2.5$ 地震(不含 $M_{\text{s}}5.8$ 地震序列)的震源机制解, 反演计算了鄂尔多斯西北缘的小震滑动角与断层滑动角的偏差分布(Michael, 1991), 其与震源机制一致性参数具有类似含义(陈颙, 1978), 如图 2 所示. 可以看出, 滑动角偏差值在(105°E—108°E, 39.5°N—40.0°N)范围内的磴口—本井断裂中段存在低值, $M_{\text{s}}5.8$ 地震则发生在低值区西缘.

为了分析余震的空间展布特征, 本文基于阿拉善地块的速度结构模型(杨明芝等, 2007)(表 2), 对阿拉善左旗地震运用共轭梯度算法进行 HypoDD 双差定位(Waldhauser, Ellsworth, 2000; 杨智娴等, 2003). 经筛选, 得到能被 6 个以上台站记录到的 $M_{\text{L}} \geq 1.0$ 地震共 78 次, 重新定位保留 64 次地震(图 3a).

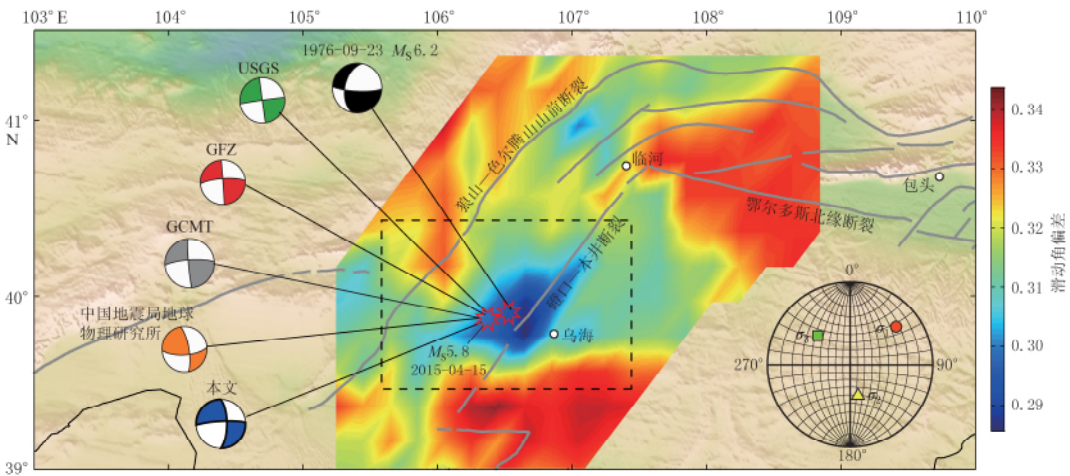


图 2 2015 年阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震的滑动角偏差分布和震中区(虚线框)的应力场反演结果

Fig.2 Distribution of slip angle deviation of the 2015 Alxa Zuoqi $M_s5.8$ earthquake and stress field inversion results of its epicentral area delineated by the dashed rectangle

图 3a 给出了阿拉善左旗地震的重定位结果. 可以看出: 该地震位于($39.78^{\circ}\text{N}(\pm 0.7\text{ km})$, $106.34^{\circ}\text{E}(\pm 0.7\text{ km})$), 震源深度为(13 ± 1) km, 余震优势分布方向为 ENE 和 NNW, 分别延伸约 16 和 18 km. 由图 3b 可以看出, 阿拉善左旗地震的震源深度由定位前的 3—38 km 缩小至重定位后的 3—19 km.

以正态分布曲线进行拟合考察定位误差, 结果如图 4 所示. 可以看出: E-W 向、N-S 向和 U-D 向的误差分别为 0.5—1.6, 0.5—1.8 和 0.5—1.9, 均数分别为 0.7, 0.8 和 1.0(图 4a); E-W 向和 N-S 向的定位误差在 0—1.2 km 区间的累积分布概率分别为 0.97 和 0.86, U-D 向定位误差在 0—1.5 km 区间的累积分布概率为 0.90(图 4b); 走时残差的正态分布均数为 0.17, 分布范围为 0.04—0.28 s(图 4a), 在 0—0.25 s 区间的累积分布概率为 0.93(图 4b).

表 2 阿拉善地块地壳速度结构(引自杨明芝等, 2007)

Table 2 Crustal velocity structure of Alxa block (after Yang *et al.*, 2007)

| 层位 | H/km | $v_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|-----|---------------|-------------------------------------|
| 沉积层 | 2—3 | 5.20 |
| 上地壳 | 13—15 | 5.92—6.33 |
| 中地壳 | 22—24 | 6.33 |
| 下地壳 | 43—48 | 6.5—6.8 |

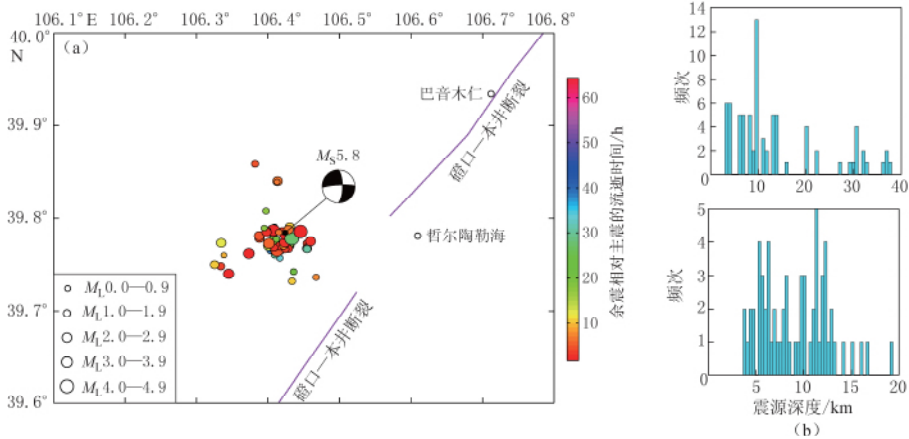


图 3 2015 年阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震序列重新定位结果(a)及重新定位前(上)、后(下)的震源深度分布(b)

Fig.3 Relocation of the 2015 Alxa Zuoqi $M_s5.8$ earthquake sequence (a) and distribution of focal depth before (upper) and after (lower) relocation (b)

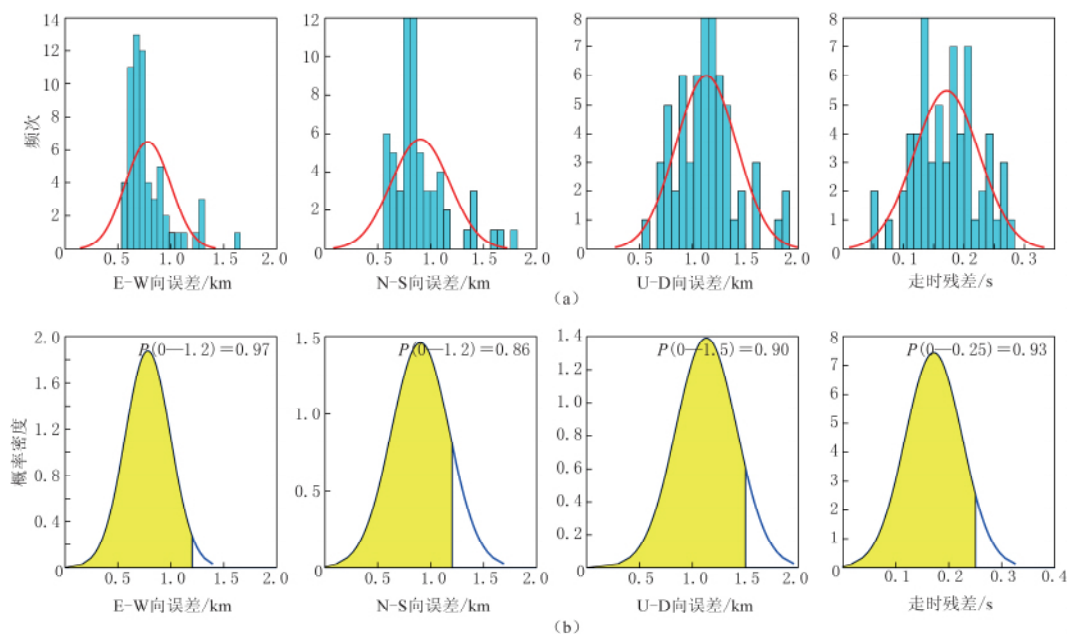


图4 2015年阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震序列重新定位结果的误差统计

(a) E-W向、N-S向、U-D向误差和走时残差的正态分布统计结果; (b) 对应的累积概率密度分布

Fig. 4 Statistic on error of relocation for the 2015 Alxa Zuoqi $M_s5.8$ earthquake sequence

(a) Normal distribution statistics of relocation error in E-W, N-S, U-D and travel time residual; (b) Their cumulative probability density distribution

阿拉善左旗 $M_s5.8$ 地震发生在鄂尔多斯西北缘的巴彦浩特盆地, 整体处于右旋剪切拉张作用的应力场环境中。2001年以来, 震中区的应力张量作用比较均匀, 且与应力场背景特征协调, 应力场的继承性作用特征使得 NW 向的拉张应力占主导作用, 其一致性的应力加载作用有利于 $M_s5.8$ 地震发生右旋剪切破裂, 应力场反演结果较为明确地支持 N-S 向节面为主破裂面, 并与 1976 年巴音木仁 $M_s6.2$ 地震的震发机制相似, 国家地震局《鄂尔多斯周缘断裂系》课题组(1988)对巴音木仁 $M_s6.2$ 地震破裂面的主要判据为, N-S 向的破裂面与贺兰山构造带走向接近, 且震中区南侧 E-W 走向的红果子沟长城曾被 $NE35^\circ$ 展布的断层错移产生右旋平移, 故 N-S 向的破裂面较符合该区构造运动实况。

地震重新定位使用了中国地震局地球物理研究所实时地震学与地震监测预报技术研究所提供的“中国地震科学探测台阵数据”, 文中图件由 GMT 和 Zmap 软件包绘制完成, 审稿专家提出了科学合理的修改建议, 作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 陈颢. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, 21(2): 146-159.
- Chen Y. 1978. Consistency of focal mechanism as a new parameter in describing seismic activity[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 21(2): 146-159 (in Chinese).
- 邓起东, 尤惠川. 1985. 鄂尔多斯周缘断陷盆地的构造活动特征及其形成机制[G]//现代地壳运动研究(1). 北京: 地震出版社: 58-78.
- Deng Q D, You H C. 1985. Mechanism and structure activity of Ordos basin[G]//*Study on the Modern Crustal Movement* (1). Beijing: Seismological Press: 58-78 (in Chinese).
- 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组. 1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社: 39-76.

- Research Group on *Active Fault System Around Ordos Massif*, State Seismological Bureau. 1988. *Active Fault System Around Ordos Massif*[M]. Beijing: Seismological Press: 39–76 (in Chinese).
- 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒, 朱碁定. 1984. 利用区域地震台网 P、S 波振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, **27**(3): 249–257.
- Liang S H, Li Y M, Shu P Y, Zhu B D. 1984. On the determination of source parameters of small earthquakes by using amplitude ratios of P, S waveform from regional network observation[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **27**(3): 249–257 (in Chinese).
- 杨明芝, 马禾青, 廖玉华. 2007. 宁夏地震活动与研究[M]. 北京: 地震出版社: 11–46.
- Yang M Z, Ma H Q, Liao Y H. 2007. *Ningxia Earthquake Activity and Research*[M]. Beijing: Seismological Press: 11–46 (in Chinese).
- 杨智娴, 陈运泰, 郑月军, 于湘伟. 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[J]. 中国科学: D 辑, **33**(S1): 129–134.
- Yang Z X, Chen Y T, Zheng Y J, Yu X W. 2003. Accurate relocation of earthquake in central-western China using the double difference earthquake location algorithm[J]. *Science in China: Series D*, **46**(S2): 181–188.
- 中国地震局地球物理研究所. 2015. 2015 年 4 月 15 日内蒙古阿拉善左旗 5.8 级地震[EB/OL]. [2015-04-20]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/272036.shtml>.
- Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. 2015. The $M_s5.8$ Alxa, Inner Mongolia, earthquake on April 15, 2015[EB/OL]. [2015-04-20]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/272036.shtml> (in Chinese).
- GCMT. 2015. $M5.4$: 36 km WNW of Wuhai, China[EB/OL]. [2015-04-20]. <http://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT4/form?type=y&y=2015&m=4&d=14&otype=y&o=2015&om=4&oday=15&jyr=1976&jday=1&ojyr=1976&ojday=1&nday=1&lmw=5&umw=10&lms=0&ums=10&lmb=0&umb=10&llat=35&ulat=41&llon=105&ulon=108&lhd=0&uhd=1000<s=-9999&uts=9999&lpe1=0&upe1=90&lpe2=0&upe2=90&list=0>.
- GFZ. 2015. Western Nei Mongol, China[EB/OL]. [2015-04-20]. <http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/event.php?id=gfz2015hipm>.
- Michael A J. 1991. Spatial variations in stress within the 1987 Whittier Narrows, California, aftershock sequence: New techniques and results[J]. *J Geophys Res*, **96**(B4): 6303–6319.
- USGS. 2015. $M5.4$: 36 km WNW of Wuhai, China[EB/OL]. [2015-04-20]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us200026mr#scientific_tensor.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(6): 1353–1368.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1634–1641.