

张斌, 苏道磊, 申金超, 等. 山东济南 4.1 级地震序列重定位及其发震构造分析 [J]. 华北地震科学, 2020, 38(2): 85-90. doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2020.02.015.

ZHANG Bin, SU DaoLei, SHEN Jinchao, et al. Relocation of Ji'nan 4.1 Earthquake Sequence and Seismogenic Structure Analysis[J]. North China Earthquake Sciences, 2020, 38(2): 85-90. doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2020.02.015.

山东济南 4.1 级地震序列重定位及其发震构造分析

张 斌¹, 苏道磊¹, 申金超¹, 董晓娜², 程海泽¹

(1. 济南市地震监测中心, 济南, 250001; 2. 山东省地震局, 济南, 250001)

摘要: 利用山东省地震台网和流动台网的观测数据, 采用双差定位方法对 2020 年 2 月 18 日山东济南 4.1 级地震序列进行了重定位, 并结合震源机制解对发震构造进行分析。结果表明, 重定位后的地震序列呈 NW 向分布, 地震由浅部到深部破裂, 破裂方式呈不对称的双侧破裂, 震源深度优势范围为 3~5 km。震源机制解显示地震序列的 P 轴方位角近 EW 向, T 轴优势方位近 SN 向, 与区域构造应力场一致。综合重定位后地震展布方向、深部构造形态、震源机制解特征, 推测地震活动可能为区域构造应力作用下长清断裂及次级派生断裂活动的结果。

关键词: 山东济南 4.1 级地震; 双差算法; 地震重定位; 震源机制解; 发震构造

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-1375 (2020) 02-0085-06

doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2020.02.015

0 引言

据中国地震台网中心测定, 2020 年 2 月 18 日 17 时 7 分山东省济南市长清区 (36.47°N; 116.64°E) 发生 $M_s 4.1$ 地震, 震源深度 10 km。截至 2020 年 3 月 2 日, 共监测到余震活动 36 次, 其中, $M_L 0.0 \sim 0.9$ 地震 18 次, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震 14 次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震 2 次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震 2 次, 最大余震为 2 月 20 日 $M_L 3.7$ 地震。地震活动发生在中国大陆东部省会城市, 又是“弱震”地区, 且有感范围较大, 有感余震次数较多, 引起了广泛关注。

山东济南 4.1 级地震发生后, 山东省地震局及济南市地震监测中心第一时间在震中附近布设了 4 个流动地震观测台站 (图 1), 并将数据实时传输至山东省地震台网中心及济南市地震台网中心。流动台对震区 $M_L 0.2$ 以上地震形成有效监测, 积累了丰富的地震序列观测资料, 对于开展地震重定位提供了震相资料。

精确的地震定位对于研究地震活动构造、地球内部结构、地震应急、震后减灾救灾等具有非常重

要的意义。Waldhauser 等^[1]提出的双差重定位是国内外广泛使用的相对定位方法, 被认为是提高小震震源位置精度的一种有效手段。众多地震学者利用该方法开展了大量研究, 在断层走向及孕震层深度等方面获得了丰富的研究成果^[2-7]。

本文依据区域台网和流动台记录的震相数据, 选取合理的地壳速度模型, 采用双差重定位方法对济南 4.1 级地震序列进行重新定位, 结合震源机制解对发震构造进行讨论。

1 区域地质构造

济南长清地区在大地构造上位于鲁西块体内部。鲁西块体位于齐河-广饶断裂以南, 聊兰断裂以东, 东以郯庐断裂带为界, 由鲁西隆起和济阳拗陷“一隆一拗”构造单元组成, 基底由泰山岩群、TTG 岩系和古元古代造山花岗岩组成, 盖层中以 NW 向脆性正断层为主^[8]。鲁西块体分为鲁西北沉降斜坡带、鲁中南较强烈断隆、鲁西南断陷 3 个次级新构造单元。济南处于 NE 向鲁西北沉降斜坡带与鲁中南部较强烈断隆的交界地带, 新构造运动

收稿日期: 2020-03-11

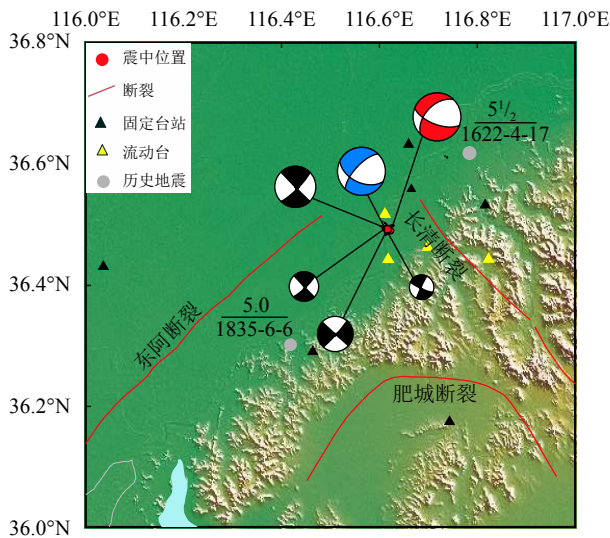
基金项目: “山东省地震局 2020 年度震情跟踪定向工作任务 (2020010119); 山东省地震局合同制项目 (18Y01)”

第一作者简介: 张斌 (1985—), 男, 山东潍坊人, 中国地质大学 (北京) 构造地质学专业, 理学硕士, 主要从事地震活动性分析、

地震定位方法研究. E-mail: 281432360@qq.com



以长时期、间歇性的断块差异升降运动为特征,上升山地与沉积盆地的格局在第三纪末形成,第四纪以来只是继承性活动,该区断裂较为发育,其中,NNW、NEE、NNE 向 3 组断裂规模较大。历史上曾记载 1835 年平阴 5 级和 1622 年长清 5½ 级地震 2 次。自 1970 年以来,震中周边 30 km 范围内仅记录到 M_L 3.0 以上地震 2 次,现代地震活动较弱。距离此次济南 4.1 级地震较近的区域断裂有长清断裂、东阿断裂、肥城断裂(图 1)。



注: 图中红色震源球为 4.1 级地震 (P 波初动法), 蓝色为 CAP 方法反演, 黑色为余震

图 1 定位台站、断裂分布图及主震震源机制解

长清断裂为第四纪早更新世活动断裂, 总体走向 NNW, 倾向 SW, 倾角 $55^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 全长约 60 km, 正断层性质, 卫星影像显示长清断裂具有左旋分量。断裂切割的地层主要为寒武系、奥陶系, 长清以北段发育在济阳凹陷南侧斜坡构造部位, 其北端截止于广齐隐伏断裂上。该断裂在长清以北隐伏于黄河洪冲积平原之下, 长清以南经胡同店、南河洼, 在马头一带湮灭在泰安群变质岩系中。东阿断裂处于鲁西隆起区的西北部边缘, 全长约 80 km, 走向 NE, 倾角较大, 倾向 NW, 正断层性质, 晚更新世以来断裂不活动。肥城断裂全长约 80 km, 为弧形断裂, 由 SW 向、近 EW 向和 SE 向 3 段组成。断裂向南倾, 倾角 $58^{\circ} \sim 73^{\circ}$, 性质为正断层。SW 向段西起上水河, 经孝直至石横止; 近 EW 向段位于肥城县老城区北, 构成肥城盆地的北边界, 多为隐伏状; SE 向段由寨山坡, 经孤山洼、朱家庄、鱼池村、北白楼至夏张以东止。

2 数据和方法

长清地区为弱震地区, 4.1 级地震震中 50 km 范围内有 4 个固定台站, 附近区域台网台站密度相对较小。2 月 19 日, 山东省地震局及济南市地震监测中心在震中附近架设了 4 个流动监测台, 台站间距在 5 km 左右, 与原区域地震台站组成观测台阵, 大大改善了该区观测条件。本文采用的原始数据主要来源于山东区域地震台网及流动台所记录到的 37 次地震震相, 震级分布范围为 M_L 0.2~4.6, 震相主要为直达波 Pg、Sg 的到时资料。

双差地震定位是一种相对定位方法, 利用地震波的走时差反演震源位置。该方法主要采用 2 次相近地震到同一台站的走时残差之差, 从而能够有效降低由于地壳速度结构的不确定性而引起的误差, 且能对地震震源深度进行有效约束。在重定位过程中, 因长清地震个数相对较少, 本文采用奇异值分解法确定解方程的算法。设置最小连接数和最小观测数均为 6, 震源间距小于 5 km, 地震对到台站的距离小于 300 km; P 波到时权重为 1.0, S 波权重为 0.75; 地震定位迭代分组 4 次, 5 次迭代, 参与计算的地震台站为 36 个, 最终得到 30 个震源结果参数。

双差定位法虽然能够有效地降低由于地壳速度结构的不确定性而引起的误差, 但是由于采用水平分层的速度模型, 震源处的速度结构对定位结果有一定影响, 因而应该选择尽可能接近实际的地层结构。鲁西块体的速度结构极不均匀, 本文收集了多个鲁西地区人工地震测深剖面获得的二维速度结构^[9-11], 以及层析成像得到的三维速度结构^[12], 最终采用的速度结构见表 1。

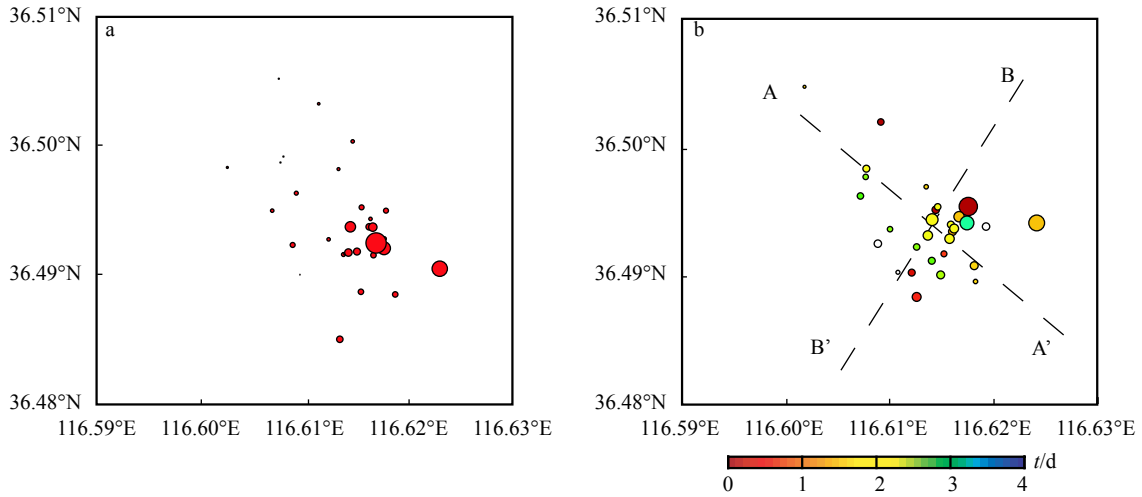
表 1 初始 P 波速度模型表

层序号	间断面深度/km	P波速度/(km/s)
1	0.5	6.00
2	5	6.15
3	10	6.28
4	15	6.32
5	20	6.36
6	25	6.39
7	30.5	6.42
8	35	7.20
9	40	8.10

3 定位结果及特征

基于上述双差定位方法及参数设置,获得了 30 次地震活动重定位结果(图 2)。重定位前后地震震中分布如图 2a、2b 所示。为显示序列分布的时空变化特征,利用不同的颜色代表不同时段的地震分布。图 2 色标显示余震活动集中发生于主震后

前 3 天,之后仅发生 3 次小震,地震活动明显减少。与重定位前相比,重定位后地震震中位置有所紧缩,线性条带特征更加清晰。重定位后地震序列破裂面长约 2.5 km,宽约 1 km,大致优势分布的走向为 320° 。主震两侧的破裂呈明显不对称分布,以西北侧破裂为主。

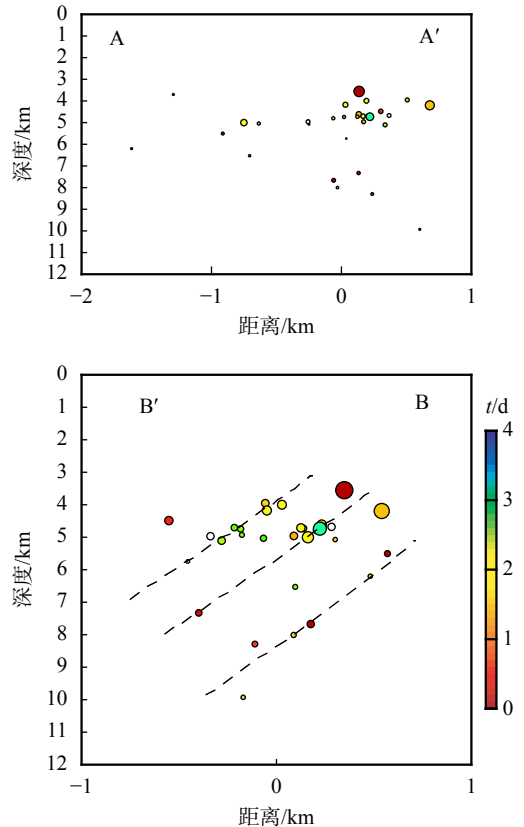


注: 图中虚线表示剖面位置, 图例色标表示发震天数

图 2 双差重定位前后济南 4.1 级地震序列震中分布图

地震重定位剖面能够清晰地反映断层深部结构形态。图 3 展现了地震序列在走向 AA' 剖面及垂直剖面 BB' 横截面上的分布特征。横截面在平面上的位置投影如图 2 所示, 投影的地震事件取自距离横截面 1.5 km 范围内。AA' 剖面表明地震分布具有分段性, 主要集中在 NW 向条带的东南端, 距离震中 ± 0.5 km 范围内。4.1 级主震及 2 次较大余震的震源深度较浅, 其余小震活动位于主震下侧, 反映了 4.1 级地震破裂始于浅部, 然后向深部扩展。同时 4.1 级主震及 $M_L 3.7$ 、 $M_L 3.1$ 余震明显有震感也验证了这 3 次地震的震源深度较浅。BB' 剖面显示断层面具有分层性(图 3 中虚线部分), 断层面倾向 SW, 发震断层倾角约 50° 。

震源深度是探讨地震孕育和发生的深部环境、地壳介质的流变性质以及圈层构造等诸多大陆动力学问题的重要参数^[13]。双差重定位能够对地震震源深度进行有效约束。济南 4.1 级地震序列双差重定位前后的震源深度如图 4 所示: 重定位前震源深度在 5~8 km 呈现较强的优势分布; 重定位后所有地震的深度小于 10 km, 并集中于 3~5 km, 形态更接近于正态分布。重定位震源深度表明破裂均发生在上地壳, 震源深度较浅, 与“地震序列虽然震级较小但多次有感”相吻合。



注: 图中圆圈表示地震序列, 色标表示发震天数, 横坐标表示与 AA'、BB' 交点的距离

图 3 重定位后地震序列沿 AA'、BB' 剖面的分布特征

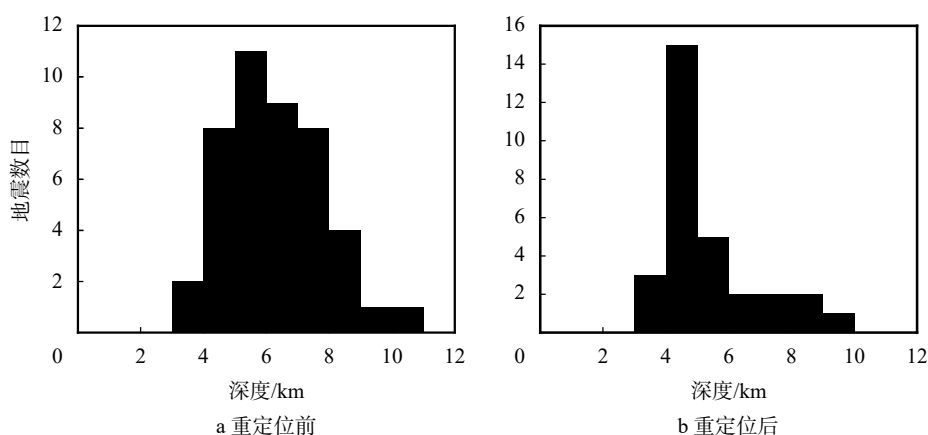


图4 重定位前后的地震震源深度分布统计图

图5为重定位前后残差分布图,残差大小能够反映地震定位的精度。台网定位的均方根残差(Rms)集中分布在0.1~0.2 s,重定位后绝大部分均

方根残差小于0.02 s。均方根残差的平均值由台网定位的0.174 s减少到重定位后的0.013 s,残差明显减小。

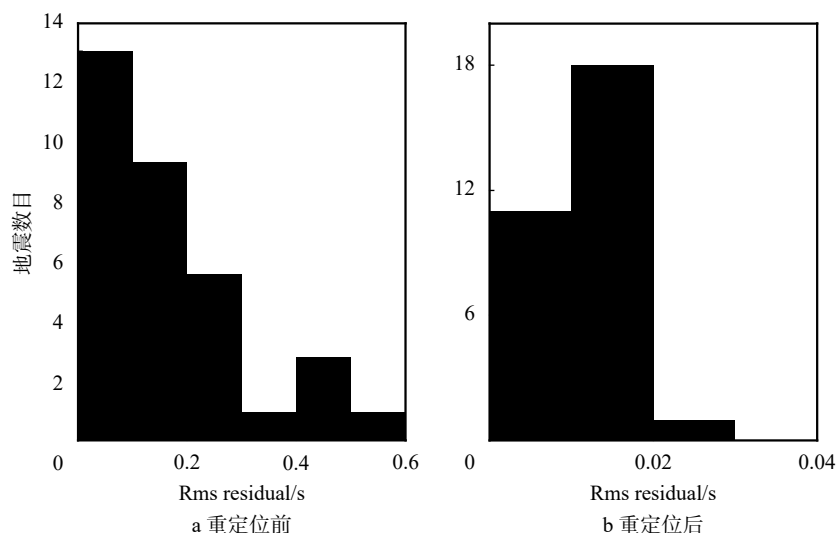


图5 重定位前后的均方根残差分布图

4 震源机制及发震构造初探

震源机制解直观地反映了地震破裂几何特征和运动学特征,是研究区域构造应力的基础。地震序列震源机制及重新定位后的余震时空分布对于确定发震构造、判定未来地震趋势具有重要意义。

济南4.1级地震周边150 km范围内区域地震台站能够较好地包围震中区,可以利用P波初动法取得比较理想的震源机制反演结果。本文采用P波初动法对5次 $M_L 2.0$ 以上地震进行了震源机制解反演,数据采用固定台站、流动台及华北科学台阵观测资料,每个震源机制均采用15个以上的台站初动。表2结果表明,济南4.1级主震震源机制解显示为正断性质兼走滑分量,P波初动符号在震源

机制解上的投影图见图6。并与其他研究者采用CAP波形反演的震源机制结果进行了对比,印证了反演结果相对可靠(图1)。4次余震震源机制显示为走滑性质。P轴方位 90° 或 270° 左右,T轴方位 350° 左右,4次余震的主压应力轴方向近于水平,断层错动面倾角较陡,错动方式以走滑型为主。这一结果与华北地区NEE-SWW方向的水平压应力和NNW-SSE方向的水平张应力的区域应力场基本一致。在区域应力场作用之下,NW向断裂发生左旋张扭性活动。

余震震源分布特征、震源机制解节面B表明发震断裂走向NW,倾角较大,具有左旋平移性质,与区域内长清断裂性质较为一致,推测济南4.1级地震与长清断裂有密切关系,地震活动可能为区域构

表 2 长清 4.1 级地震序列 $M_L2.0$ 级以上地震震源机制解

地震事件	震级	节面A			节面B			P轴		T轴		采用方法
		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	倾角	方位	倾角	
202002181707	4.6	223	69	-138	115	51	-27	86	44	345	11	CAP
202002181707	4.6	224	51	-146	111	64	-45	71	49	171	8	
202002200444	3.7	45	80	179	135	89	10	269	6	0	8	
202002200459	3.0	205	87	-171	114	81	-3	70	8	339	4	P波初动
202002201117	2.5	46	81	179	136	89	9	270	6	1	7	
202002212225	3.1	42	86	-1	312	89	-176	267	3	357	2	

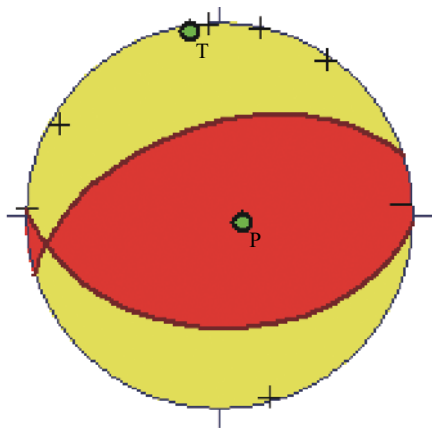


图 6 主震 P 波初动符号在震源机制解上的投影图

造应力作用下长清断裂及次级派生断裂活动的结果。

5 结论

本文利用区域台网固定台和流动台观测资料,采用双差定位法对山东长清 4.1 级地震序列活动进行了重定位研究,获得了 30 个震源位置参数,并对 5 次 $M_L2.0$ 以上地震的震源机制解进行了反演分

析,初步得到以下结论:

1)重定位后地震序列呈 NW 向分布,破裂方式呈不对称的双侧破裂,地震破裂始于深部,然后向浅部扩展。震源深度优势范围为 3~5 km。发震断层具有倾向 SW、倾角较大的深部构造特征。

2)震源机制解显示主震为正断兼走滑性质,余震性质为走滑型,节面优势方位具有 NW 向、发震断层高倾角的特点;地震活动的 P 轴方位角近 EW 向,T 轴优势方位近 SN 向,与区域构造应力场一致。

3)综合重定位后地震分布方向、深部构造形态、震源机制解特征,推测地震活动可能为区域构造应力作用下长清断裂及次级派生断裂活动的结果。

致谢

山东省地震台网预警中心提供了流动台观测数据,山东省地震预报中心崔华伟补充了华北科学台阵数据,山东省地震预报中心戴宗辉提供了 CAP 反演震源机制的结果,在此表示衷心感谢!

参考文献:

[1] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 2000, 90(6): 1353-1368.

[2] 朱艾澜,徐锡伟,周永胜,等. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义 [J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 629-636.

[3] 李乐,陈棋福,陈颢. 首都圈地震活动构造成因的小震精定位分析 [J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(1): 24-34.

[4] 黄耘,李清河,张元生,等. 江苏及邻区地震重新定位和构造特征分析 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(1): 175-184.

[5] 李霞,刘希强,李亚军,等. 山东及邻区地震的重定位及其与活动构造的关系 [J]. *中国地震*, 2012, 28(4): 381-392.

[6] 王未来,吴建平,房立华,等. 2010 年玉树 MS7.1 地震及其余震的双差定位研究 [J]. *中国科学*, 2012, 42(1): 1-10.

[7] 房立华,吴建平,王未来,等. 2014 年新疆于田 MS7.3 级地震序列重定位 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 802-808.

[8] 李理,钟大赉,杨长春,等. 伸展作用序列及其深部背景: 以晚中生代以来鲁西隆起和济阳拗陷为例 [J]. *地学前缘*, 2012, 16(3): 255-273.

[9] 嘉世旭,刘昌铨. 华北裂谷盆地南部菏泽-长治地震测深剖面解释 [J]. *华北地震科学*, 1991, 23(2): 12-20.

[10] 张成科,赵金仁,任青芳,等. 豫北及其外围地区地壳上地幔结构研究 [J]. *地震地质*, 1994, 16(3): 244-253.

[11] 张碧秀,汤永安,夏铁军,等. 聊城-荣成地壳二维速度结构 [J]. *中国地震*, 1996, 12(2): 141-146.

[12] 魏文博,叶高峰,金胜,等. 华北地区地壳 P 波三维速度结构 [J]. *地球科学*, 2007, 32(4): 441-452.

[13] 张国民,汪素云,李丽. 中国大陆地震震源深度及其构造含义 [J]. *科学通报*, 2002, 47(9): 663-668.

Relocation of Ji'nan 4.1 Earthquake Sequence and Seismogenic Structure Analysis

ZHANG Bin¹, SU Daolei¹, SHEN Jinchao¹, DONG Xiaona², CHENG Haize¹

(1. Ji'nan Earthquake Monitor Center, Ji'nan 250001, China;

2. Shandong Earthquake Agency, Ji'nan 250001, China)

Abstract: Based on the phase observation reports of Shandong regional digital seismic network and mobile observation instruments, we relocated the Ji'nan M4.1 earthquake sequences on 18 Feb. 2020 by double-difference location algorithm, and analyzed the seismogenic structure of the sequences by combining the focal mechanism. The results show that the advantage distribution direction is NW. The focal depth concentrated in the range of 3~5 km with an asymmetric bilateral fracture and occurred from shallow to deep. Its focal mechanism reveals that the azimuth of axes P is nearly EW direction and the azimuth of axes T is nearly SN direction which is consistent with the regional stress field. The focal mechanism solution and the relocated result show that the earthquake sequence may be induced by Changqing faults and its secondary faults under the effects of the regional stress field.

Key words: Ji'nan earthquake sequence; Double-difference location algorithm; relocation; focal mechanism; seismogenic structure

《华北地震科学》征稿简则

一、《华北地震科学》是河北省地震局主办的地震科学综合性学术季刊。每季末出版。主要刊登地震学具有创新性的研究成果,也登载与地震研究有关的地球物理、地震地质、地震工程等方面的学术论文及与地震科学有关的实验、观测、考察、问题讨论等方面的论文。

二、来稿要求及注意事项

1. 来稿要求选题新颖、论点明确、论据可靠、数据准确、文字简练。每篇论文(包括图、表、参考文献和300字以内的摘要)一般要求不超过8000字,其中插图以不超过6幅为宜;其他短文(含图、表和参考文献)一般不超过3000字,其中插图以不超过3幅为宜。字号为5号字。另附英文题目及英文摘要。

2. 来稿包括:摘要、关键词(3~8个)、引言、正文、结语和参考文献,以及基金项目、作者简介等内容。文中外文字母、符号必须分清大小写、正斜体;上下角的字母、数字和符号,其位置高低应区分明显。对易混淆的外文字母、符号及字母的大小写需标清。文中计量单位一律采用中华人民共和国国家标准《量和单位》中颁布的法定计量单位,非许用单位,务请换算成许用单位。

3. 文中插图需提供可编辑的矢量图件,线条均匀;照片层次、反差分明。图中内容、文字及符号须清晰,并与正文一致。插图如涉及国界,可尽量避开;如必须保留,则须把图中内容直接绘在地图出版社最新出版的带有国界的地理图上。

4. 表格一律采用“三线表”,即每个表基本由三条横线组成,去掉竖线(必要时可加少量辅助线)。

5. 参考文献应列全,而且应是已公开发表的文献;未公开发表的资料请勿列入,但可做脚注处理。文中所引文献必须与文末所列出文献一一对应。文末参考文献的著录格式,每条文献内各项的排序是:

专著-作者.书名[M].出版地:出版者,出版年.页码.

期刊-作者.文章名称[J].刊物名称,出版年,卷(期):页码.

论文集-作者.文章名称[C]//文集名.出版地:出版者,出版年.页码.

学位论文-作者.题名[D].学位授予地:学位授予单位,发表年.页码.

6. 文稿中引用他人研究成果时,务请按《著作权法》有关规定指明原作者姓名、文题及来源,并在参考文献中列出。否则由此引发的责任由投稿人自负。

7. 经本刊录用的文章,除本刊负责出版、发行外,将由本刊编辑部统一纳入万方数据-数字化期刊群,维普科技西部信息中心资源部,超星中文数据库,中国知网学术资源总库,并提供网络信息服务。如有异议,请另投他刊。

8. 投稿请注明第一作者或联系人的姓名、工作单位、详细通讯地址(含邮编)、联系电话以及E-mail。

三、编委会有权对来稿作适当修改或退请作者自行修改,来稿请勿一稿两投。收稿后3个月内如未得到采用通知(或修改稿件通知),作者可自行处理。

来稿请发至:E-mail:hbdzks2015@163.com 联系电话:(0311)85814313

联系地址:河北省石家庄市槐中路262号《华北地震科学》编辑部,邮政编码:050022