

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2015.04.002

# 乳山震群大小台网地震定位的对比研究

郑建常 曲 利 曲均浩 胡旭辉 李冬梅

(山东省地震局, 济南 250014)

**摘 要** 山东乳山地区自 2013 年 10 月起发生震群活动, 并且持续至今(2014 年 10 月); 截至 2014 年 9 月 30 日, 共记录到余震 7 000 多次, 其中可定位事件 2 000 多次,  $M_L \geq 3.0$  的 18 次, 其持续时间、活动频度为 1970 年以来华东地区罕见。2014 年 5 月 6 日起, 陆续在现场布设了 18 个流动台, 持续对序列活动进行观测。基于固定台网和流动台阵的资料, 使用双差方法对地震序列进行重新定位。结果显示, 流动台阵定位结果与固定台网结果存在较大差别, 由于数据本身的问题, 固定台网结果可能存在一定的偏差。流动台阵精定位结果显示, 乳山震群的余震呈 NWW 向展布, 倾向 SW, 与震源机制解结果一致; 余震震源深度较浅, 4.5~8km; 余震主要集中在  $3\text{km} \times 3\text{km} \times 1\text{km}$  很小的范围内密集活动, 并且具有阶段性、丛集性的特点, 余震活动符合裂纹扩展模式, 可能存在流体触发因素。最后结合有关地质资料对此次乳山震群的发震构造、性质以及震群的活动机理进行了探讨。

**关键词** 双差定位 大小地震台网 定位精度 乳山震群

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2015)04-0953-13

## 0 引言

2013 年 10 月 1 日 12 时 07 分在山东省乳山市 ( $36.83^\circ\text{N}$ ,  $121.70^\circ\text{E}$ ) 发生  $M_L 3.8$  地震, 随后形成序列活动, 并于 2014 年 1 月 7 日、4 月 4 日分别发生  $M 4.3$  和  $M 4.1$  地震。截至论文成稿时(2014 年 10 月), 乳山震群仍在持续, 山东台网共记录到余震 7 000 多次, 其中可定位地震 2 000 多次,  $M_L \geq 3.0$  地震 18 次, 序列持续时间、活动频度为 1970 年以来山东地区所罕见(图 1)。

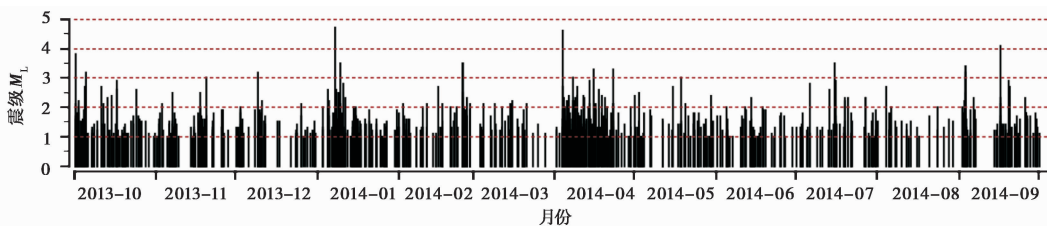


图 1 乳山震群  $M_L \geq 1.0$  地震  $M-t$  图

Fig. 1 Magnitude-time plot of  $M_L \geq 1.0$  events of the Rushan swarm.

[收稿日期] 2015-07-21 收稿, 2015-10-30 改回。

[基金项目] 中国地震局科技星火计划项目(XH15026)、山东省地震局乳山台阵项目(SD1250501)和中国地震局监测预报司震情跟踪定向工作任务(2015020105)共同资助。

Å ÷ ' - ' Ð v çâ T · > æ O < @ 4 î ãâæ N + š & ... ÷ ç } \* ... ãëâë N Å ÷ 0  
 ÷ " ç } \* ° ' ê ¾ ö 7 W ò Ð å @ D Æ ' ð ý ` [ „ å • ã ç â ¨ | v Ø ° Ê n  
 j Ä @ D " ° ¶ ý ` j ê ° ( Ç ú ĩ ' v | ° ' 0 å ý " @ ' « å \ \$ ö 7 '  
 - ¾ | @[ u ^ å ä ä æ N ç è ± å e Ä D Ç „ " ã ê ò A ĩ ü án ä ä ü Ä ¿ ' - Ê  
 œ 5 <sup>a</sup> å Ç w | 5 <sup>a</sup> • å ° ( Ç ú ĩ ¿ v Ø ° ' ° Ê ... 0 Í ã 5 Ø 2 | r ê

n ä, œ ë ÷ œ & è ü ... Å ÷ ' - D Ç A ĩ ü \ \$ ü<sub>0</sub>



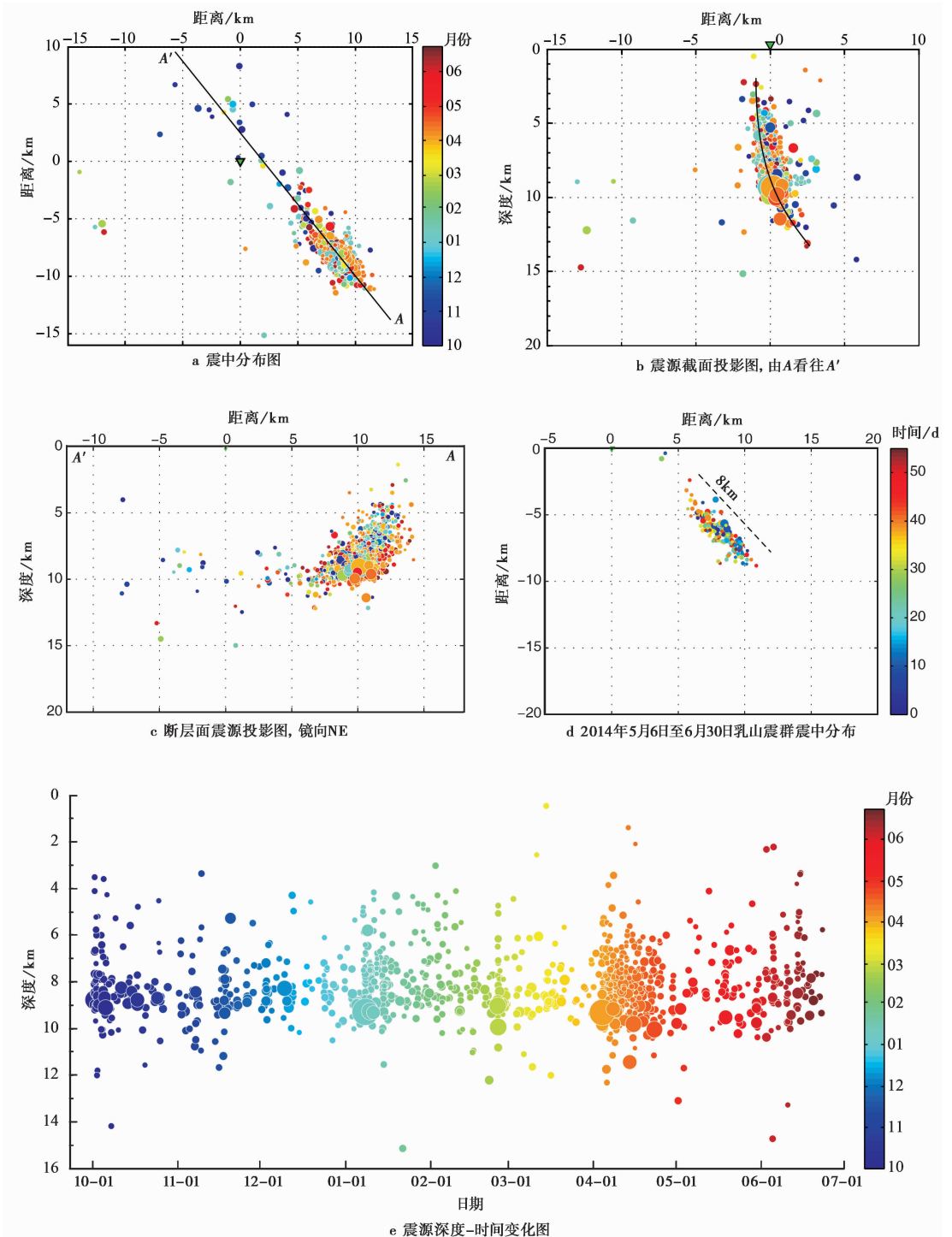


图 4 使用固定台网资料的双差定位结果

Fig. 4 Relocation results of the Rushan swarm by HypoDD method, using data from permanent network.

色标表示定位事件的发震时间; b 中黑色弯曲细实线为拟合的断层

点, 建立直角坐标系, 将重定位后的震源沿拟合断层走向  $AA'$  投影, 结果见图 4b。此前曾由截面图认为: 序列活动的震源分布大体上勾勒出了断层的形态, 断层面倾向 NE, 粗略拟合得到的倾角大约在  $80^\circ$  左右(郑建常等, 2014)。并且我们曾根据乳山震群余震深度随时间的变化认为(图 4e): 序列活动前期余震震源深度分布相对集中, 序列发展后期, 特别是 2014 年 1 月 7 日  $M4.3$  和 4 月 4 日  $M4.1$  地震后, 余震震源在深度上的分布范围有所扩散, 说明序列前期在区域应力场作用下, 震源区的破裂位置相对集中, 从而发生了 1 月 7 日  $M4.3$  主震; 同样地 4 月 4 日  $M4.1$  较大余震前, 微小余震的震源深度又有再次趋于集中的现象, 可能反映了较大事件前震源区介质的破裂过程(郑建常等, 2014)。

令人难以理解的是图 4c, 重定位后的余震震源在断层面上呈现由东南向西北斜插下去的“/”形状, 并且近似弧形分布, 这种规则的形状作为余震在断层面上的分布是违背物理常识的。考虑到乳山台的位置, 可以发现我们得到的余震震源的“弧形”分布似乎是以乳山台为圆心的(图 4c), 这很容易让人意识到出现这样的结果, 应该是数据本身的问题, 这样一来很可能我们前期得到的认识是错误的。另外, 双差结果最终给出的可定位事件所占比例(74.3%)也明显偏低, 对于双差方法的应用结果也是不理想的。因此, 在震中区密集流动台阵布设完成后, 有必要使用台阵的观测数据对乳山震群进行重新精定位。

### 3 台阵数据的精确定位

虽然前面双差定位中利用了山东台网所有可用的震相资料, 但由于地理位置和台网布局的制约(图 2), 大部分可定位事件仅有 RSH、HAY、WED 3 个台的记录, 这 3 个台的震相占所有可用震相的 62.7%; 并且这 3 个台均位于震群的一侧, 由于大部分余震震级偏小(1 163 次重定位的事件中, 震级  $M_L < 1.0$  的事件约占 51.6%), 其中 WED、HAY 2 个台的震相准确度不高。三维速度模型下的双差方法数值实验显示, 台网布局、震相识别误差以及所使用的一维速度模型等均对双差定位结果有一定的影响; 另外, 双差方法使用的台网给出的初始目录对最终结果也有很大的影响(闫俊岗等, 2013)。因此, 使用山东台网观测报告给出的双差定位结果也很难说有较高的可信度。

乳山地震现场密集流动台网的架设, 为深入研究该区域地震地质环境提供了重要条件, 也为乳山震群的精确定位提供了可能。由于数据量大, 人手有限, 使用的资料仅自 2014 年 5 月 6 日至 6 月 30 日; 选择信噪比高、震相清晰、方位覆盖较好的台站进行震相标注, 共读取 Pg 和 Sg 震相合计 19 978 条(图 5), 首先使用交切法进行初步定位, 给出的定位事件的最小震级为  $M_L - 0.8$ 。经过时距曲线的拟合以及视速度的简单估算, 删除明显错误的震相后, 共使用震相 19 621 条, 事件 1 254 次; 所使用台站的最大震中距不超过 45km。然后使用双差法进行再次定位, 最

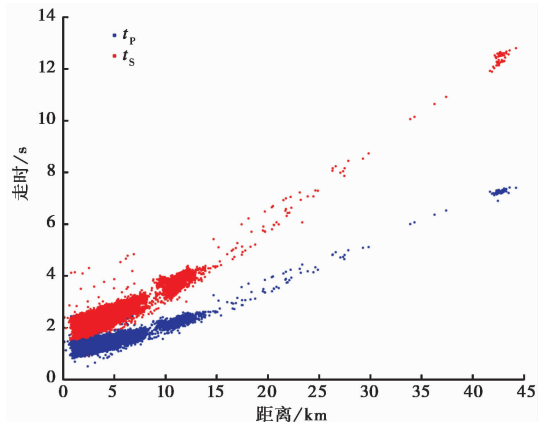


图 5 乳山流动台网记录的 Pg 和 Sg 震相的时距分布  
Fig. 5 Travel time and distance plot of Pg and Sg phases recorded by Rushan temporary array.

终经过双差定位后给出的定位事件 1 193 次 (超过 95.1%), 说明定位效果较好; 而同时段内固定台网数据仅得到 170 次定位事件 (图 4d)。

从精定位的结果来看, 除去余震集中区外围相对分散的事件外, 余震集中区的定位结果出现了一些与前述使用台网观测报告进行双差定位结果不尽一致的地方 (图 6)。

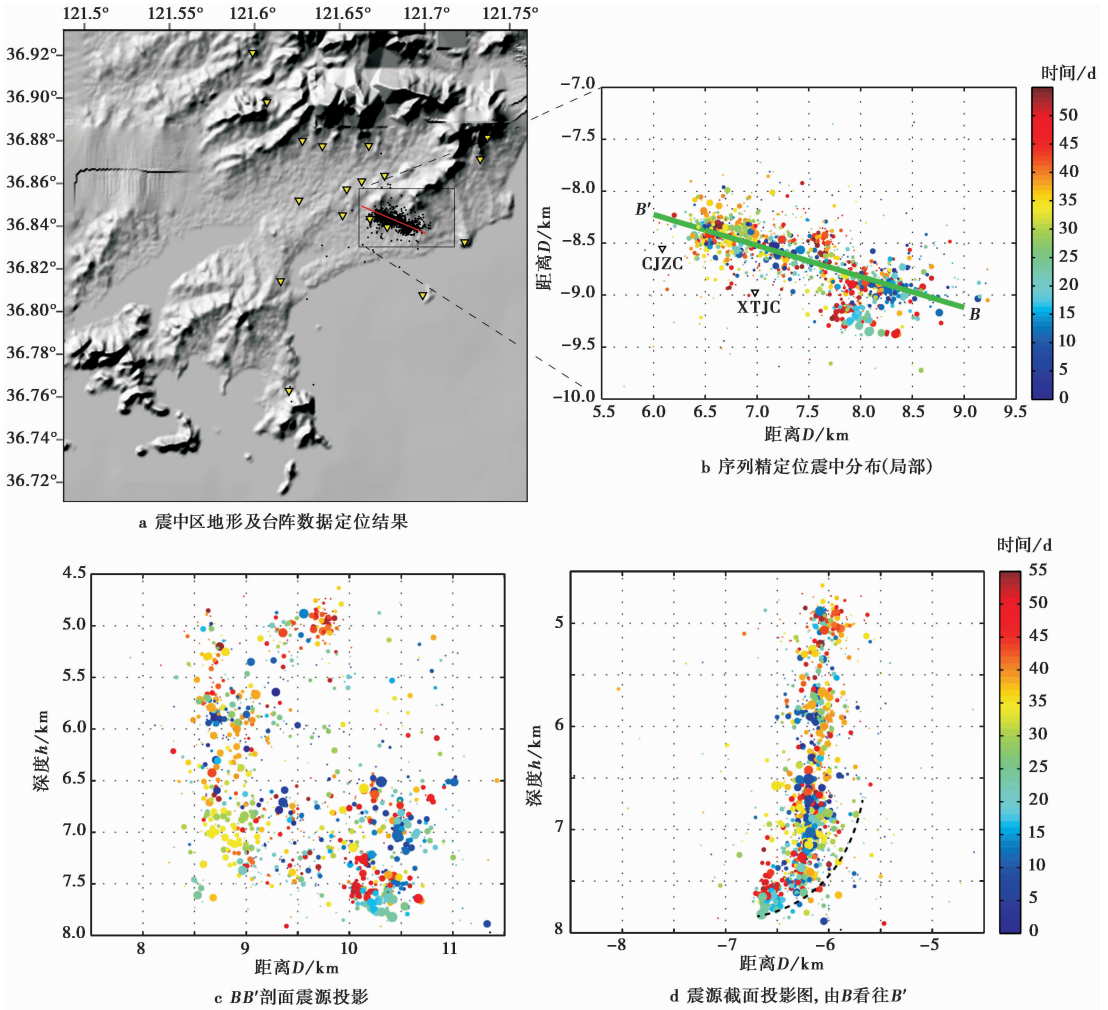


图 6 2014 年 5 月 6 日至 6 月 30 日乳山台阵精定位结果

Fig. 6 Relocated results of the swarm from May 6 to June 30, 2014, using data from Rushan temporary array.

色标表示定位事件的时间顺序(以 2014 年 5 月 6 日为起始的天数); b 中 BB' 绿色粗实线为拟合的断层

(1) 序列震中分布呈 NWW 向(走向约 290°, 图 6b), 与前面仅使用固定台网资料定位得到的 NW 向(走向约 315°, 图 4a)有较大变化。使用 CAP 方法反演了 2014 年 1 月 7 日乳山 M4.3 地震的震源机制, 并利用 Bootstrap 技术分析和讨论了解的可靠性和误差范围, 得到的此次地震的震源机制解为: 走向 298.5°, 倾角 64.3°, 滑动角 0.3°, 不确定性为 ±6.4° (郑建常等, 2015), 与本文使用流动台阵资料重定位的余震分布走向一致。

另外, 台阵数据定位结果显示, 余震主要集中在震中区长约 3km 的范围内(图 6b); 而台

网数据定位结果显示的余震展布长度则超过了 8km(图 4d)。根据我们现场考察的了解和认识,余震也主要集中在以小滩旧村、常家庄、白沙滩村为中心的较小范围内,与流动台阵定位的结果相吻合。

使用固定台网资料的定位结果很大程度上依赖于 HAY、WED、RSH 3 个台 Pg、Sg 震相到时的准确性,前面已经说过 HAY 和 WED 台的震相可靠性不高,即使是最近的 RSH 台,直达波震相的到时读取精度也受到很多主观和客观因素的影响。根据对乳山震群中重复地震(或相似地震)识别的研究,利用波形互相关对 WED 台走时误差的校正最大可达 0.5s。

(2)震源断层面投影显示,余震的震源深度更浅,集中在 4.5~8km(图 6c, d),与使用深度震相得到的结果基本一致,而使用固定台网资料得到的相同时期的余震深度为 6~10km(图 4c);精定位深度的变化也与此次震群活动特点更加吻合:在乳山震中原地,1 次低于  $M_L2$  的余震就会造成一定范围内的有感,说明震源深度相对较浅。

(3)震源截面投影显示,断层在地壳浅部近乎直立,略向 SW 倾斜,随着深度增加,断层倾角逐渐变缓(图 6d),接近  $60^\circ$ ,与反演得到的震源机制解结果(倾角  $64.3^\circ$ ;郑建常等, 2015)恰好吻合;而固定台网资料定位结果显示却是倾向 NE(图 4b)。从断层截面的余震分布宽度上对比,固定台网的结果显示为 3km,流动台阵数据的结果显示不到 1km,余震活动更加集中,也更加靠近断层。

从精定位的结果来看,震源在断层面上的活动更具有阶段丛集的特征。如图 6c 所示,自 5 月 6 日起 10d 内的余震相对集中在深 6.5~7.5km、距 RSH 台 10~11km 的范围内;15~25d 时间内的余震在 7.5km 以下的深度相对丛集,到了 30d 后至 40d 的时间内,余震又相对集中到图 6c 断层面的左侧分布;并且 50d 后的余震主要集中在破裂区的上下 2 个部位,似乎是破裂的尖端。这种余震活动的阶段丛集可能反映了断层面的不规则性,与余震的发生机理和断层的裂纹扩展模式相吻合。另外,断层面上余震活动的不规则枝杈状的分布和阶段丛集式的活动,以及乳山震群集中在  $3\text{km}\times 3\text{km}\times 1\text{km}$  范围内密集活动的现象,对比有关流体侵入造成震群活动的研究(Hainzl, 2004),似乎表明乳山震群存在流体侵入触发的可能。

## 4 乳山震群的构造意义

### 4.1 乳山震群发震位置的构造性质

将重新定位后的余震分布投影到威海地区岩体地质图上(图 7),可以发现乳山震群的发震位置大体上位于垛崮山侏罗纪花岗闪长岩体单元的边界上。威海地区属于大别-苏鲁超高压碰撞造山带,在超高压地体内部发育大量的中生代岩浆侵入体(郭敬辉等, 2005),如图 7 所示的垛崮山岩体和昆崮山岩体。

从更详细的岩石地质资料看,乳山地区可以划分为如图 8 所示的几个不同性质的岩体(张华锋等, 2004; 杨喜安等, 2011; 周起凤等, 2011),其中:1) 垛崮山花岗闪长岩出露在昆崮山岩体的东南部,与围岩片麻岩呈侵入接触关系,岩体西部被五爪山弱片麻状含榴二长花岗岩侵入接触,北部被三佛山二长花岗岩侵入,南部和东部均被第四系覆盖;2) 海阳所地区位于苏鲁超高压带的东北部,在高度变形的花岗质片麻岩和混合岩中含有大量变质基性岩块体(郭敬辉等, 2002),其岩性为中元古代侵入岩,主要为变辉长岩类。从乳山震群小台网得到的精定位结果看,乳山震群很有可能就发生在垛崮山岩体和海阳所超单元岩体的边界。地质研究资料

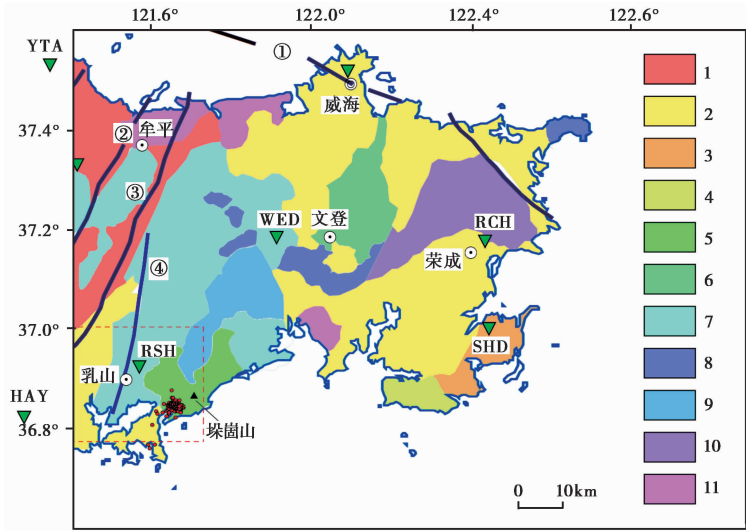


图7 威海地区岩体地质略图及地震台网和乳山震群位置分布图

Fig. 7 Tectonic sketch of the Sulu UHP collisional orogen in Weihai area.

深蓝色粗实线表示断裂, 其中: ①蓬莱-威海断裂, ②王格庄-崖子断裂, ③海阳-午极断裂, ④乳山断裂; 红色虚线矩形框对应图 4a 的范围; 绿色倒三角符号为该区分布的山东测震台网的台站, 红色点表示使用台阵数据重新定位后的乳山震群震中; 岩体性质: 1 胶东地体早前寒武纪片麻岩, 2 苏鲁超高压地体, 3 甲子山三叠纪正长岩体, 4 搓山三叠纪花岗岩体, 5 垛崮山侏罗纪花岗岩闪长岩体, 6 文登侏罗纪花岗岩体, 7 昆嵛山侏罗纪花岗岩体, 8 白垩纪闪长岩和斑状花岗岩小岩体, 9 三佛山白垩纪斑状花岗岩体, 10 伟德山白垩纪花岗岩体, 11 沉积盖层; 岩体地质据郭敬辉等(2005)图 2 改绘

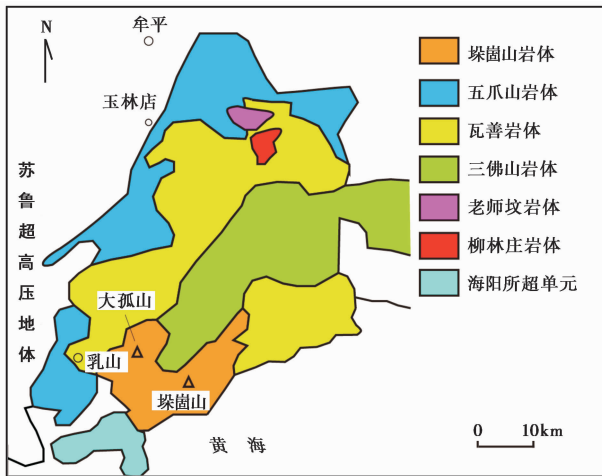


图8 乳山地区岩体划分示意图(据张华锋等,2004; 杨喜安等, 2011 改绘)

Fig. 8 Rock masses in and around Rushan area(after ZHANG Hua-feng et al., 2004; YANG Xi-an et al., 2011).

岩体性质: 垛崮山片麻状花岗岩闪长岩; 瓦善弱片麻状二长花岗岩; 将军石片麻状含榴二长花岗岩; 柳林庄角闪(辉石)二长岩; 三佛山二长花岗岩



显示, 2 组岩体的地球物理和地球化学性质存在一定的差别。乳山震群的观测资料, 为深入研究该单元的地质构造特性提供了宝贵的资料。

#### 4.2 乳山震群发震断层的判定

胶东半岛陆地地区主要发育 NE、NNE 向断裂, 历史和现代地震活动也主要与这些主干断裂有关, 但此次乳山震群距离这些主干断裂很远(图 7)。由于乳山地区是中国著名的金矿产地, 地矿黄金部门曾经对该区进行过细致的地质勘探(刘善宝, 2005)。根据有关地质资料, 乳山地区除了 NNE 向的海阳、乳山主干断裂外, 还发育次级的近 SN 向断裂, 以及更次一级的在地表出露不明显的 NE 向和 NW 向断裂; 整体断裂格局构成羽状形态。

根据本文使用双差方法和流动台阵数据的精定位结果分析, 此次乳山震群的发震断层走向为 NWW 或近 NW 向, 该区的主要活动断裂为近 SN、NNE 向, 虽存在 NW 或近 EW 向的次级断层, 但对于这些次级、更次级的小断层, 地震物探、构造地质以及遥感、航磁解译等不同方法识别的结果不尽相同, 因此很可能是该区 1 条隐伏的次级断裂活动的结果。从目前我们所搜集掌握的地质资料看, 乳山震中附近区仅见黑山乔-吉林村断裂(图 9), 震群集中区位于该断裂走向延长线上, 由于垛崮山单元的南部和东部均被第四系覆盖, 所以乳山震群的发震断

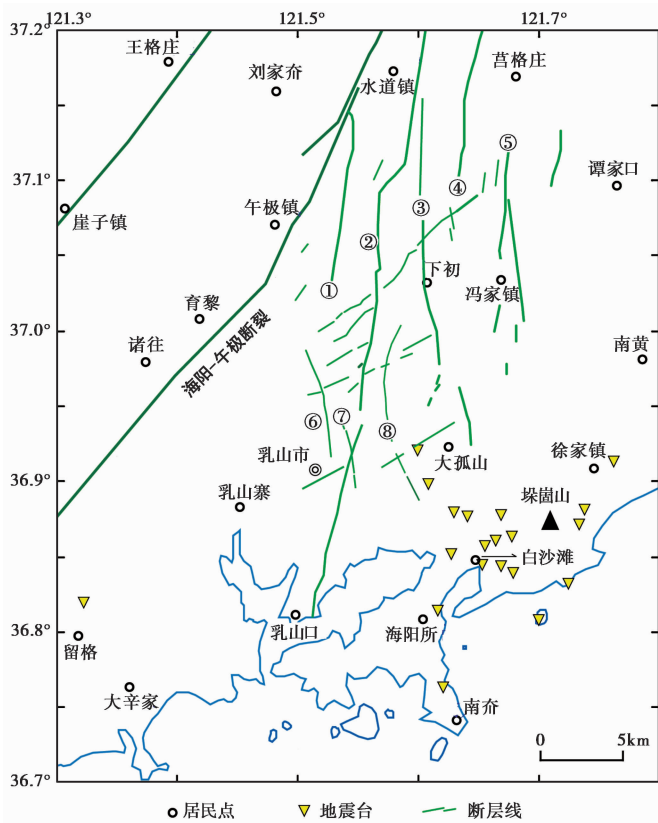


图 9 乳山地区断层分布图(据杨喜安等, 2011; 胡芳芳等, 2005 绘制)

Fig. 9 Faults distribution map in Rushan area(after YANG Xi-an *et al.*, 2011; HU Fang-fang *et al.*, 2005).

- ①青虎山-唐家沟断裂; ②石沟-巫山断裂; ③岔河-三甲断裂; ④将军石断裂;  
⑤葛口断裂; ⑥战家乔断裂; ⑦姜村-岚子断裂; ⑧黑山乔-吉林村断裂

裂可能是该断裂的隐伏部分。

另外,部分学者认为从青岛经乳山市海阳所至泽库再转至石岛存在 1 条断裂,断裂两侧的变质岩石存在重大差异(翟明国等,2000;徐扬等,2013),但目前除荣成地区石岛附近外,对该断裂其余部分的识别仅仅是推测,对该断裂是否存在仍普遍持有不同意见。我们的精确定位结果显示震群集中区的走向为 NWW 向,如果前面所说黑山乔-吉林村断裂没有延伸到震群集中区,乳山震群或许是这样 1 条断裂存在的证据。

## 5 结论与讨论

使用山东地震台网和密集现场流动台阵的资料,对乳山震群进行了重新定位。结果显示,由于台站布局的原因,前期使用固定台网资料得到的双差定位结果可靠性不高;使用 18 个现场流动台阵的数据对余震进行精定位,通过对比大小台网的定位结果显示:流动台阵定位结果与固定台网结果存在较大差别,由于流动台网的台站更密、布局相对合理,可以对震中有更好的覆盖,因此现场流动小台网的定位精度更高;由于数据本身的问题(台网偏在一侧、方位角覆盖太小等),固定台网结果可能存在较大偏差。

流动台阵精定位结果显示,乳山震群的余震呈 NWW 向展布,断层走向约  $300^{\circ}$  左右,倾向 SW,浅部略陡,随着深度的增加,倾角变缓,与震源机制解结果相吻合;余震震源深度较浅,约深 4.5~8km;余震主要集中在  $3\text{km}\times 3\text{km}\times 1\text{km}$  很小的范围内密集活动,并且具有阶段性、丛集性特点;余震活动符合裂纹扩展模式,说明震源区可能存在流体侵入。当然这一认识还需要结合其他方面的工作做更详细的论证。

乳山震群较大事件的震源机制解显示出 SWW-NEE 向的主压应力,与胶东半岛地区构造应力场方向一致(郑建常等,2015)。乳山震群的发震时间正是 2011 年日本宫城近海 9.0 级大地震后,中国大陆东北至华北东部中强地震活跃时段,连续发生了 2013 年 1 月 23 日辽宁灯塔  $M5.1$ 、2013 年 4 月 20 日南黄海  $M5.0$ 、2013 年 4 月 22 日内蒙古科尔沁左翼后旗  $M5.3$ 、2013 年 5 月 18 日北黄海  $M5.1$  以及 2013 年 10—11 月吉林前郭 5.8 级震群等一系列中强地震,尤其是几乎在前郭震群发生的同时,胶东半岛先后出现了乳山震群和莱州震群活动,这表明日本大地震后中国大陆东北部应力场的调整作用可能是乳山震群活动的主要诱因。

最后结合有关地质资料对此次乳山震群的发震构造、性质以及震群的活动机理进行了探讨,认为:1)乳山震群可能发生在垛崮山岩体和海阳所超单元岩体的边界,两侧的岩体性质存在差异;2)乳山震群的发震断裂可能是附近的黑山乔-吉林村断裂的延伸隐伏断裂,也可能是岩体边界的新生断裂;3)乳山震群或许是石岛断裂存在的证据,但这一推测需要更深入的工作。

**致谢** 山东省地震局林金狮、刘敏、王瀛,乳山市科技局李英宇等对本项工作给予了大力支持;山东省地震局穆娟、张志慧、李亚军、赵金花,潍坊市地震局魏秀才等整理了乳山流动台阵的大量资料;山东地震台网的值班人员为本研究提供了及时、高质量的观测报告;中国地震台网中心提供了统一编目后的震相数据;审稿专家提出了修改意见和建议,在此一并致谢!

## 参 考 文 献

- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞—碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学 [J]. 岩石学报, 21(4): 1281—1301.
- GUO Jing-hui, CHEN Fu-kun, ZHANG Xiao-man, *et al.* 2005. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: Zircon U-Pb geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1281—1301 (in Chinese).
- 郭敬辉, 翟明国, 叶凯, 等. 2002. 胶东海阳所高压变质基性岩的岩石化学和地球化学 [J]. 中国科学(D 辑), 32(5): 394—404.
- GUO Jing-hui, ZHAI Ming-guo, YE Kai, *et al.* 2002. Petrochemistry and geochemistry of Haiyangsuo high pressure metamorphic rock in Jiaodong Peninsula [J]. *Science in China(Ser D)*, 32(5): 394—404 (in Chinese).
- 胡芳芳, 范宏瑞, 沈昆, 等. 2005. 胶东乳山脉状金矿床成矿流体性质与演化 [J]. 岩石学报, 21(5): 1329—1338.
- HU Fang-fang, FAN Hong-rui, SHEN Kun, *et al.* 2005. Nature and evolution of ore-forming fluids in the Rushan lode gold deposit, Jiaodong Peninsula of eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1329—1338 (in Chinese).
- 刘善宝. 2005. 山东乳山金青顶金矿田成矿规律及其成矿远景研究 [D]: [学位论文]. 西安: 长安大学.
- LIU Shan-bao. 2005. The metailegenic regularity of the Jinqingding gold deposit field and ore prospecting in Rushan, Shandong Province [D]. Master degree thesis. Chang'an University, Xi'an (in Chinese).
- 王世进, 王来明, 万渝生, 等. 2009. 鲁东地区侵入岩形成时代和期次划分: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的证据 [J]. 山东国土资源, 25(12): 8—20, 25.
- WANG Shi-jin, WANG Lai-ming, WAN Yu-sheng, *et al.* 2009. Study on intrusive rocks forming period and stages division in Ludong area [J]. *Shandong Land and Resources*, 25(12): 8—20, 25 (in Chinese).
- 徐扬, 杨坤光, 李日辉, 等. 2013. 北苏鲁超高压变质带前寒武纪基底研究新进展 [J]. 现代地质, 27(2): 248—259.
- XU Yang, YANG Kun-guang, LI Ri-hui, *et al.* 2013. Main progresses in the study of Precambrian basement of the north Sulu ultra-high pressure metamorphic belt, eastern China [J]. *Geoscience*, 27(2): 248—259 (in Chinese).
- 闫俊岗, 王利兵, 谭青. 2013. 初始震源深度对双差地震定位深度的影响分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 33(增刊): 41—44.
- YAN Jun-gang, WANG Li-bing, TAN Qing. 2013. Initial focal depth impact on depth of double difference earthquake relocation [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 33(suppl): 41—44 (in Chinese).
- 杨喜安, 赵国春, 刘家军, 等. 2011. 胶东牟乳成矿带板块碰撞成矿作用及找矿方向 [J]. 黄金, 32(2): 11—18.
- YANG Xi-an, ZHAO Guo-chun, LIU Jia-jun, *et al.* 2011. Metallogenesis of plate collision and prospecting direction of the Muping-Rushan metallogenic belt, Jiaodong Peninsula [J]. *Gold*, 32(2): 11—18 (in Chinese).
- 翟明国, 郭敬辉, 王清晨, 等. 2000. 苏鲁变质带北部的岩石构造单元及结晶块体推覆构造 [J]. 地质科学, 35(1): 16—26.
- ZHAI Ming-guo, GUO Jing-hui, WANG Qing-chen, *et al.* 2000. Division of petrological-tectonic units in the northern Sulu ultra-high pressure zone: An example of thick-skin thrust of crystalline units [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(1): 16—26 (in Chinese).

- 张华锋, 翟明国, 何中甫, 等. 2004. 胶东昆嵛山杂岩中高锶花岗岩地球化学成因及其意义 [J]. 岩石学报, 20(3): 369—380.
- ZHANG Hua-feng, ZHAI Ming-guo, HE Zhong-fu, *et al.* 2004. Petrogenesis and implications of the sodium-rich granites from the Kunyushan complex, eastern Shandong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 369—380(in Chinese).
- 郑建常, 李冬梅, 曲利, 等. 2014. 2013 年乳山震群精定位研究 [A]. 见: 2014 年中国地球科学联合学术年会会刊. 北京.
- ZHENG Jian-chang, LI Dong-mei, QU Li, *et al.* 2014. Accurate relocation of 2013 Rushan earthquake swarm [A]. In: *Proceedings of 2014 Annual Meeting of Chinese Union of Geosciences*.
- 郑建常, 林眉, 王鹏, 等. 2015. CAP 方法反演震源机制的误差分析: 以胶东半岛 2 次显著中等地震为例 [J]. 地球物理学报, 58(2): 453—462.
- ZHENG Jian-chang, LIN Mei, WANG Peng, *et al.* 2015. Error analysis for focal mechanisms from CAP method inversion: An example of 2 moderate earthquakes in Jiaodong Peninsula [J]. *Chinese J Geophys*, 58(2): 453—462(in Chinese).
- 周起凤, 李胜荣, 陈海燕, 等. 2011. 胶东乳山英格庄金矿碲化物的发现及其意义 [J]. 岩石学报, 27(6): 1847—1856.
- ZHOU Qi-feng, LI Sheng-rong, CHEN Hai-yan, *et al.* 2011. Discovery and geological significance of telluride minerals in the Yinggezhuang gold deposit, Rushan, Jiaodong [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1847—1856(in Chinese).
- Hainzl S. 2004. Seismicity patterns of earthquake swarms due to fluid intrusion and stress triggering [J]. *Geophys J Int*, 159(3): 1090—1096. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02463.x.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California [J]. *Bull Seism Soc Amer*, 90(6): 1353—1368.

# COMPARISON OF LOCATIONS OF RUSHAN EARTHQUAKE SWARM FROM LARGE AND SMALL NETWORK

ZHENG Jian-chang QU Li QU Jun-hao HU Xu-hui LI Dong-mei

(*Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China*)

## Abstract

A notable swarm occurred in Rushan, Shandong Peninsula and its activities continue since Oct. 2013 till now. Up to Sept. 30, 2014, more than 7 000 events have been recorded, in which locatable shocks exceed 2000, and 18 events with  $M_L \geq 3.0$ . The swarm is rarely seen in East China for its extraordinary duration time and surprising high frequency of aftershocks. 18 temporary seismometers have been deployed around the swarm since May 6, 2014, and composed a seismic array for monitoring the swarm activities. Based on data from permanent networks and temporary array, we relocated the earthquake sequence by using hypoDD method. It has been shown that, there is obvious difference between permanent network results and temporary array results. The permanent network of Shandong has a relative large coverage gap (more than  $200^\circ$ ) for this swarm. Its location results therefore should not be reliable. There are maybe other errors in the permanent network result due to some problems in the raw data, such as too few stations for most locatable events (3 stations), and relative lower proportion of located events in final result (74.3%, while 95.1% in temporary array result). It can be found by comparing location results from permanent network and temporary array that, using temporary array's data can improve the location accuracy significantly. The results of temporary array are: aftershocks distribution of Rushan swarm is in NWW direction, the dip-direction of fitted fault plane is SW, and the strike and dip angle agree with focal mechanism of the mainshock. Focal depths of aftershocks are at 4.5~8km; the swarm is restricted in a small area about  $3\text{km} \times 3\text{km} \times 1\text{km}$ , and has some characteristics such as clustering, staged activities, and etc; the aftershock activities are in accord with crack growth behavior pattern, hence we deduced that there may be fluid intrusion in source area. Finally, we discussed the seismogenic structures and active mechanisms of this swarm combined with relative geologic knowledge. We draw some conclusions as follows: 1) Rushan swarm probably occurred at the boundary of rock bodies of Duogu Mountain and Haiyangsuo super-unit; 2) The seismogenic structure is a blind fault, which should be a part of adjacent Heishankuang-Jilincun Fault, or might be a new fault at rock body boundaries; 3) Rushan swarm might be an evidence for the existence of the disputed Shidao Fault.

**Key words** HypoDD, large and small seismic networks, location accuracy, Rushan swarm

[作者简介] 郑建常, 男, 1978年生, 2011年于中国地震局地球物理研究所获固体地球物理专业博士学位, 副研究员, 主要从事地震活动性及数字地震学研究, 电话: 0531-58622037; 15806612336, E-mail: zjcmal@yeah.net。