

张博, 钱蕊, 夏彩韵. 2017. 盖州青石岭地震序列发震构造初探. 地震学报, 39(6): 848-859. doi:10.11939/jass.2017.06.003.
Zhang B, Qian R, Xia C Y. 2017. Seismogenic structure of the Qingshiling, Gaizhou, earthquake swarm. *Acta Seismologica Sinica*, 39(6): 848-859. doi:10.11939/jass.2017.06.003.

盖州青石岭地震序列发震构造初探^{*}

张 博^{*} 钱 蕊 夏彩韵

(中国沈阳 110031 辽宁省地震局)

摘要 利用双差定位方法对盖州青石岭震群 2012 年 2 月至 2015 年 8 月的地震活动进行了重新定位, 并使用 CAP 方法和 P 波初动法计算了 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解, 之后结合盖州地区的地震地质资料, 分析了青石岭震群的发震构造。结果表明: 青石岭震群在平面上呈 NW 向分布, 地震活动主要分布在 $6 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 的矩形范围内, 震源深度为 7—10 km; 较大地震的震源机制解的走向与精定位后地震的优势分布方向一致; 综合分析双差定位结果、震源机制解和发震区的地震地质等资料, 初步认为九寨—盖县北段西北侧存在 NW 向次级铲式正断层, 青石岭震群即为该断层在区域应力场作用下不断地左旋走滑-拉张错动造成的。

关键词 盖州青石岭震群 双差定位 震源机制解 发震构造

doi:10.11939/jass.2017.06.003 中图分类号: P315.2 文献标志码: A

Seismogenic structure of the Qingshiling, Gaizhou, earthquake swarm

Zhang Bo^{*} Qian Rui Xia Caiyun

(Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110031, China)

Abstract: Using double difference earthquake location algorithm, we relocated the Qingshiling earthquake swarm which lasted from February 2012 to August 2015. We also obtained the earthquake focal mechanism solutions of the swarm by cut and paste (CAP) method and the P-wave first motion method, and then according to the seismo-geological conditions, we discussed the seismogenic structure of the sequence. The results demonstrated that the distribution direction of the relocated earthquakes is NW, and the earthquakes of the swarm mainly distributed in a scope of $6 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ with the focal depths varied from 7 km to 10 km. The strike of some large earthquakes coincided with the predominant distribution direction of the relocated swarm. Based on double difference results, focal mechanisms and local geological conditions, we preliminarily surmised that there lies a listric secondary normal fault of NW trending to the northwest side of the Jiuzhai-Gaixianbei fault, and Qingshiling earthquake swarm may be caused by that listric normal fault which is controlled by continu-

* 基金项目 中国地震局震情跟踪青年课题项目(2015010110)资助。

收稿日期 2017-01-09 收到初稿, 2017-07-31 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: zhb_lnea@sina.com



ous left-lateral strike slip motion under regional stress field.

Key words: Qingshiling earthquake swarm in Gaizhou; double difference earthquake location algorithm; focal mechanism solution; seismogenic structure

引言

自 2012 年 2 月 2 日开始, 盖州青石岭地区($40.56^{\circ}\text{N}, 122.36^{\circ}\text{E}$)发生了一系列中小地震, 据辽宁地震台网提供的地震目录, 截至 2015 年 8 月 25 日, 该序列共记录到 $M_{\text{L}} 1.0$ — 1.9 地震 411 次, $M_{\text{L}} 2.0$ — 2.9 地震 130 次, $M_{\text{L}} 3.0$ — 3.9 地震 20 次, $M_{\text{L}} 4.0$ — 4.9 地震 6 次, 地震序列位置如图 1 所示。

图 2 给出了青石岭地震序列的 $M-t$ 图, 从图中可以看出, 该序列中存在多次地震活动的起伏现象, 并伴随着 $M_{\text{L}} \geq 4.0$ 地震的发生。历史上, 该震群附近曾发生 1975 年海城 $M_{\text{S}} 7.3$ 地震和 1999 年岫岩 $M_{\text{S}} 5.4$ 及 $M_{\text{S}} 5.1$ 地震。2015 年 8 月 4 日 $M_{\text{L}} 4.8$ 地震为该序列的最大地震, 周边各市县均有震感, 造成了较大的社会影响。

利用地震精定位、震源机制、区域应力场特征及地震地质构造来研究地震发震构造的方法在国内已得到广泛应用(吕坚等, 2008; 李志海等, 2014; 李金, 王琼, 2015)。本文拟通过研究青石岭地震序列的精定位结果和主要地震的震源机制解, 并结合地震地质情况和区域应力场, 综合研判该序列的发震构造。

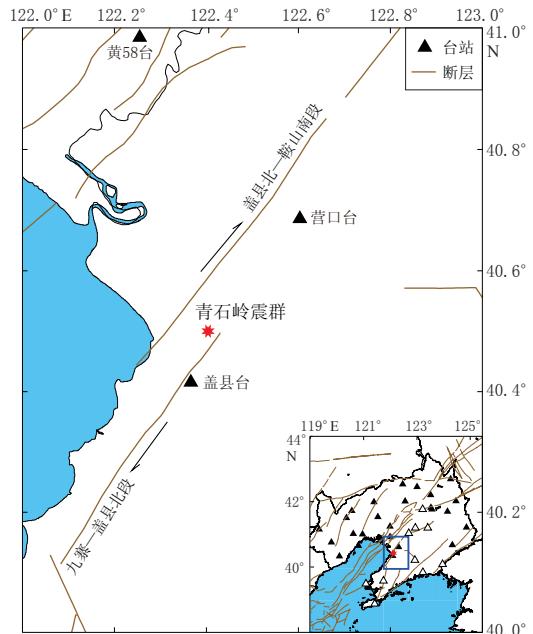


图 1 盖州青石岭震群及台站位置

Fig. 1 Location of the Qingshiling, Gaizhou, earthquake swarm and stations in Liaoning Province

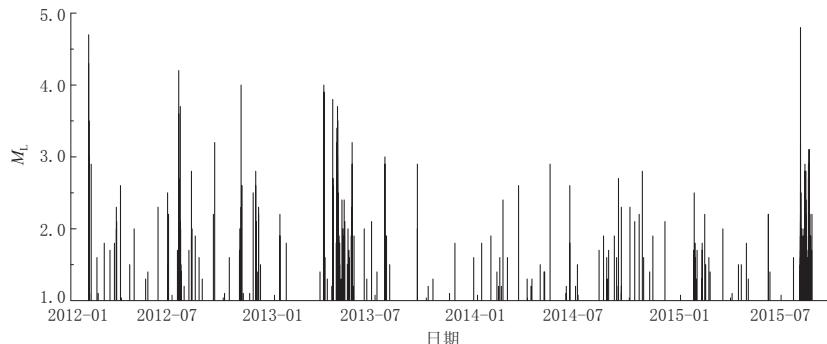


图 2 青石岭地震序列 $M-t$ 图

Fig. 2 $M-t$ diagram of Qingshiling earthquake swarm

1 地震地质和构造应力场

盖州 $M_L 4.8$ 地震的宏观震中位于被金州断裂所分割的下辽河—渤海沉降区与辽东上升隆起区(万波, 钟以章, 1997)的交界地带, 金州断裂以西为下辽河—渤海海域, 以东为辽东山地。从地壳厚度的分布来看, 辽东半岛上地幔凹陷区地壳厚度为 35 km 左右, 两侧的辽东湾(渤海)和北黄海沿岸地壳厚度分别为 29—32 km 和 31—32 km, 地壳等厚线整体呈 NE-NNE 向(辽宁省地质矿产勘查局, 1989), 金州断裂充当了辽东半岛西侧的幔隆与幔坳的过渡带(万波等, 2013)。

通过分析辽东半岛地区的震源机制解、小震综合断层面解、原地应力测量和有限元模拟等资料认为整个辽东半岛处在 NEE 向近水平的主压应力场的作用下(高常波, 钟以章, 1998)。基于相对均匀的地壳介质以及新近纪以来比较稳定的构造应力, 辽东半岛作为传播地震弹性波的散射体, 在区域内形成 NE-NNE 向和 NW 向两组以走滑为主的共轭剪切破裂面并相互交错(钟以章, 白云, 1999; Zhong, Gao, 2000), 构成具有共轭破裂特征的棋盘格式构造(李四光, 1969), 海城 $M_s 7.3$ 地震中 NW 向和 NE-NNE 向界面即为这一作用的结果(李荣安, 于军, 1985)。

金州断裂可划分为金州—普兰店、普兰店—九寨、九寨—盖县北和盖县北—鞍山南等 4 段(万波等, 2013)。整个金州断裂为正断兼右旋走滑性质, 与 NEE 向近水平的正应力方向相吻合(万波等, 2013; 张鹏等, 2014), 盖县北—鞍山南和九寨—盖县北两段的剪切错动方向与雁列断层的排列方向相反, 为挤压型雁列断层(马文涛等, 1995), 盖州青石岭震群位于阶区内靠近九寨—盖县北的西北侧, 具体位置如图 1 所示。

2 序列的重新定位与震源机制解反演

2.1 双差定位

地震精定位在地震序列研究中占据重要地位, 它不仅可以呈现断层在地壳内部的展布形态, 对推断破裂的扩展方向乃至确定震源的破裂面也具有重要作用。区域台网一般采用绝对定位(Geiger, 1912)来确定地震三要素, 但该方法的定位精度受到速度模型的精度和人工识别误差的制约。近年来, 双差定位方法在国内外被广泛应用(黄媛等, 2008; 房立华等, 2011; 王长在等, 2011), 该方法具有不依赖震源到记录台站整条路径上的地震波速度结构(杨智娴等, 2002), 且定位精度与地震事件从集区域大小密切相关的特点, 地震从集性越强, 定位精度越高(秦双龙, 2009), 因此, 双差定位法能够更好地适用于盖州青石岭地震序列的精定位研究。

本文地震的震相数据来自全国地震编目系统。重定位时要求每个地震有震相记录的台站数目不少于 3 个, 定位前先对震相进行筛选, 根据 P 波、S 波的时距曲线, 剔除错误或明显偏离理论走时的震相数据。图 3 给出了本文所用震相数据的时距曲线。所用数据为筛选得到的 3788 条 Pg 波和 4135 条 Sg 波的到时数据。由于 Pg 波的到时读取精度一般比 Sg 波高, 因此在计算中对 Pg 波赋予 1.0 的权重, Sg 波赋予 0.5 的权重。所有地震事件均相对于震群的中心点进行定位。

双差定位虽然对速度模型的依赖性相对较小, 但所采用的速度模型依然是层状结构, 事件簇分布的图像尺度不可避免地受震源所在层的 Pg 和 Sg 波传播速度的影响, 因此应尽

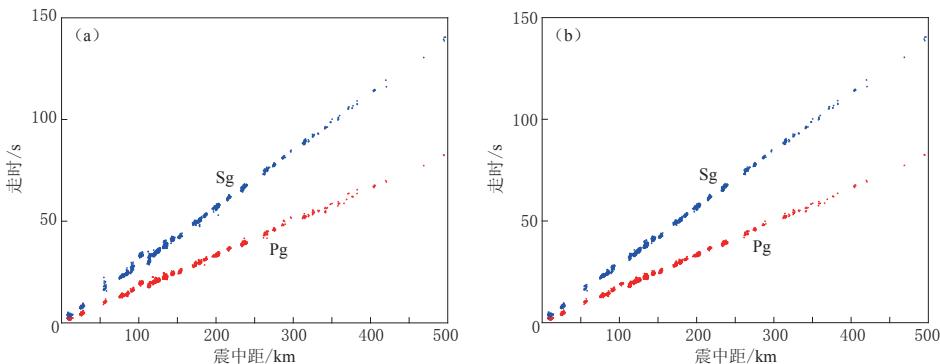


图3 Pg和Sg震相数据筛选前(a)后(b)的走时曲线

Fig. 3 Travel time curves of Pg phase waves and Sg phase waves before (a) and after (b) filtering

可能地采用接近真实的地壳速度模型(曲均浩等, 2015)。20世纪80年代开展的内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟地学断面探测工作(高常波, 钟以章, 1998)为本研究提供了基础的区域一维速度模型, 卢造勋等(2002)根据这一模型利用正交投影方法重建了辽东半岛的地壳和上地幔的三维速度结构。本文根据其研究成果, 参考全球地壳速度模型 Crust1.0(Laske *et al.*, 2013), 构建了辽东半岛地区的一维地壳速度模型(表1)。

2.2 震源机制解反演

震源机制解反映了地震破裂的几何学和运动学特征, 对解释青石岭震群的发震构造具有重要意义。青石岭震群周边台站分布不均匀, 尤其是靠近渤海湾的海域, 这使得利用P波初动及初动与幅值比联合反演震源机制解的方法受到限制。近年来, CAP(cut and paste)反演方法(Zhao, Helmberger, 1994)在国内得到广泛地应用(韩立波等, 2012; 李金, 王琼, 2015), 该方法利用体波(Pnl波)和面波联合反演矩张量解, 分别拟合体波和面波, 其结果对速度结构及地壳的横向差异不敏感, 而且在震源矩心深度的确定上也具有优势(韦生吉等, 2009; 郑勇等, 2009)。

根据波形记录的质量, 选择距青石岭地震序列200 km内的台站的记录参与反演。由于锦州台、南票台、首山台和绥中台等与地震序列之间间隔了渤海湾, 面波震相与理论地震图的面波拟合效果较差, 黄58台为深井台, 盖县台地震计的北方向与真北方向在一段时间内存在夹角, 因此, 本文仅选择岫岩台、鞍山台、瓦房店台、孤山台、本溪台、丹东台、大连台、横山台、辽阳台和沈阳台(图1右下角小图中空心三角形)的波形参与反演。速度模型选择表1所列的一维层状模型。Pnl波和面波的反演波段分别为0.05—0.15 Hz和0.033—0.067 Hz, 同时赋予体波更高的权重以避免反演过程中面波信息的影响, Pnl波和面波的相对权重比为2:1。

3 结果分析

3.1 青石岭震群精定位结果

筛除台站记录不足3个的地震, 经双差定位后, 得到青石岭震群311次地震的定位结

表1 辽东半岛地区地壳速度模型

Table 1 Crustal velocity model of Liaodong Peninsula

深度/km	$v_P/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	v_P/v_S
0	4.5	1.73
4	5.8	1.73
13	6.1	1.73
24	6.4	1.73
33	6.8	1.73
35	7.8	1.73

果。图 4a, b 分别为青石岭震群辽宁省台网定位的结果和本次精定位后的结果, 对比两图可以看出, 精定位后地震分布更加集中。地震序列中震级最大的地震, 即 2015 年 8 月 4 日 $M_{L}4.8$ 地震, 台网定位的震中为(122.432°E, 40.480°N), 震源深度为 10 km; 重定位后, 震中为(122.426°E, 40.485°N), 震源深度为 8.5 km, 重新定位后震中向西偏移 0.7 km, 更加靠近金州断裂的九寨—盖县北段。地震序列中两次最大的地震, 即 2012 年 2 月 2 日 $M_{L}4.7$ 和 2015 年 8 月 4 日 $M_{L}4.8$ 地震, 均发生在该序列的东南端。重定位后的震群活动展布呈现较为清晰的 NW 向, 主要的地震活动沿长轴 AA' 线性分布, 延展长度约 6.5 km, 垂直于 AA' 方向的短轴 BB' 宽约 3 km, 震群中主要的地震活动集中在约 6 km × 3 km 的矩形框内。由于青石岭震群持续时间较长, 因此本文从 2012 年 2 月开始, 以两个月为间隔填充地震颜色, 蓝色代表地震序列中 2015 年 8 月 4 日 $M_{L}4.8$ 地震及后续小震。从图 4b 中可以看出, 地震序列的震中分布随时间的迁移并不明显。图 4c 给出了辽宁省台网定位和重新定位后不同深度地震次数的统计情况。从图中可以看出, 重新定位后, 震群中主要地震的震源深度变深, 集中分布在 7—10 km 范围内, 与 CAP 方法获得的 $M_{L}4.7$ 和 $M_{L}4.8$ 地震的矩心深度较一致。

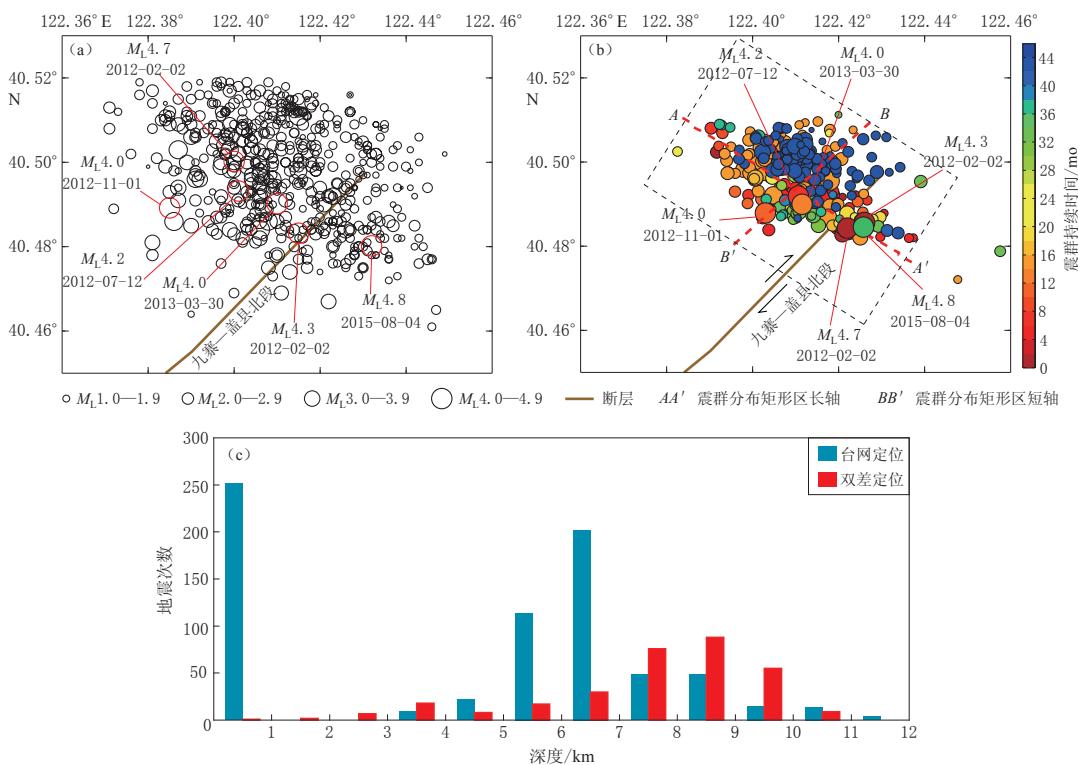


图 4 青石岭震群初始定位结果和重定位结果对比

(a) 初始定位结果; (b) 双差定位结果; (c) 初始定位(蓝)和双差定位(红)的震源深度分布

Fig. 4 Initial location and relocation of Qingshiling earthquake swarm

(a) Initial location of Qingshiling earthquake swarm; (b) Relocation of Qingshiling earthquake swarm by double difference earthquake location algorithm; (c) The focal depth distribution of the earthquake swarm calculated by initial location (blue) and double difference earthquake location algorithm (red)

3.2 震源机制解结果

采用 CAP 方法计算青石岭震群中两次 $M_L \geq 4.5$ 地震的震源机制解, 而其余 $M_L \geq 4.0$ 地震则采用 P 波初动方法计算其震源机制解。图 5a, b 分别给出了 2012 年 2 月 2 日 $M_L 4.7$ 地震和 2015 年 8 月 4 日 $M_L 4.8$ 地震的震源机制解随深度的变化。

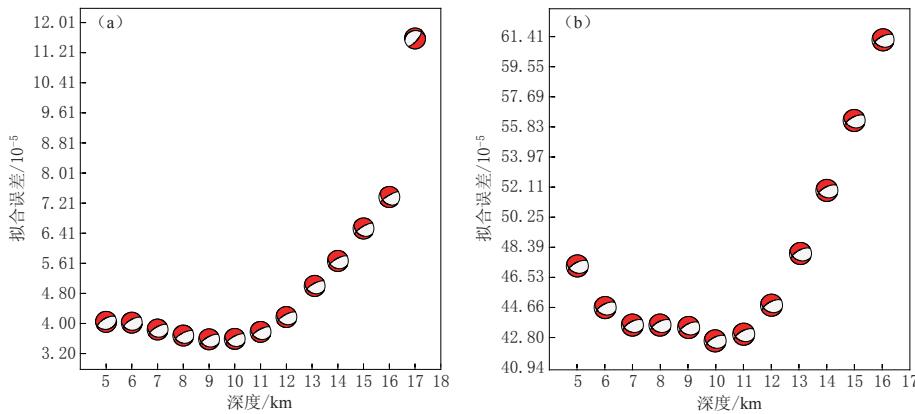


图 5 2012 年 2 月 2 日 $M_L 4.7$ (a) 和 2015 年 8 月 4 日 $M_L 4.8$ (b)

地震矩张量反演中波形拟合误差随深度的变化

Fig. 5 Waveform fit errors versus depth of February 2, 2012 $M_L 4.7$ event (a)
and August 4, 2015 $M_L 4.8$ event (b) in moment-tensor inversion

从图 5 可以看出, 两次地震的震源机制解在 5—15 km 的深度范围内基本均无变化, 反演结果随深度的变化相对稳定, 2012 年 2 月 2 日 $M_L 4.7$ 地震的最佳矩心深度为 9 km, 2015 年 8 月 4 日 $M_L 4.8$ 地震的最佳矩心深度为 10 km。图 6 给出了两次地震的理论地震图与实际地震图的对比。从图中可以看出, 两次地震的理论波形图与绝大多数台站所记录到的实际波形拟合较好, 反演结果可信。2012 年 2 月 2 日 $M_L 4.7$ 地震在最佳矩心深度处的节面参数为: 节面 I 的走向为 241° , 倾角为 70° , 滑动角为 -113° , 节面 II 的走向为 112° , 倾角为 30° , 滑动角为 -43° ; 2015 年 8 月 4 日 $M_L 4.8$ 地震在最佳矩心深度处的节面参数为: 节面 I 的走向为 244° , 倾角为 62° , 滑动角为 -112° , 节面 II 的走向为 104° , 倾角为 35° , 滑动角为 -55° 。

表 2 为 2012 年以来盖州青石岭 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解。从表中可以看出, 震群中 $M_L \geq 4.0$ 地震节面 II 的走向与精定位后震群的优势分布方向一致, 除 2012 年 2 月 2 日 $M_L 4.3$ 地震为近似走滑性质外, 其余地震均显示出正断层的性质。

表 2 盖州青石岭地震序列 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解

Table 2 Focal mechanism solutions of $M_L \geq 4.0$ earthquakes in the Qingshiling, Gaizhou, earthquake swarm

发震日期 年-月-日	东经 /°	北纬 /°	M_L	节面 I			节面 II			计算方法 (矛盾比)
				走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	倾角/°	滑动角/°	
2012-02-02	122.42	40.48	4.7	241	70	-113	112	30	-43	CAP
2012-02-02	122.43	40.49	4.3	226	89	-174	136	84	-1	P 波初动(0.06)
2012-07-12	122.41	40.49	4.2	229	59	-132	109	51	-42	P 波初动(0.12)
2012-11-01	122.40	40.49	4.0	238	45	-111	88	49	-70	P 波初动(0.15)
2013-03-30	122.41	40.49	4.0	230	34	-155	119	76	-58	P 波初动(0.26)
2015-08-04	122.43	40.48	4.8	244	62	-112	104	35	-55	CAP

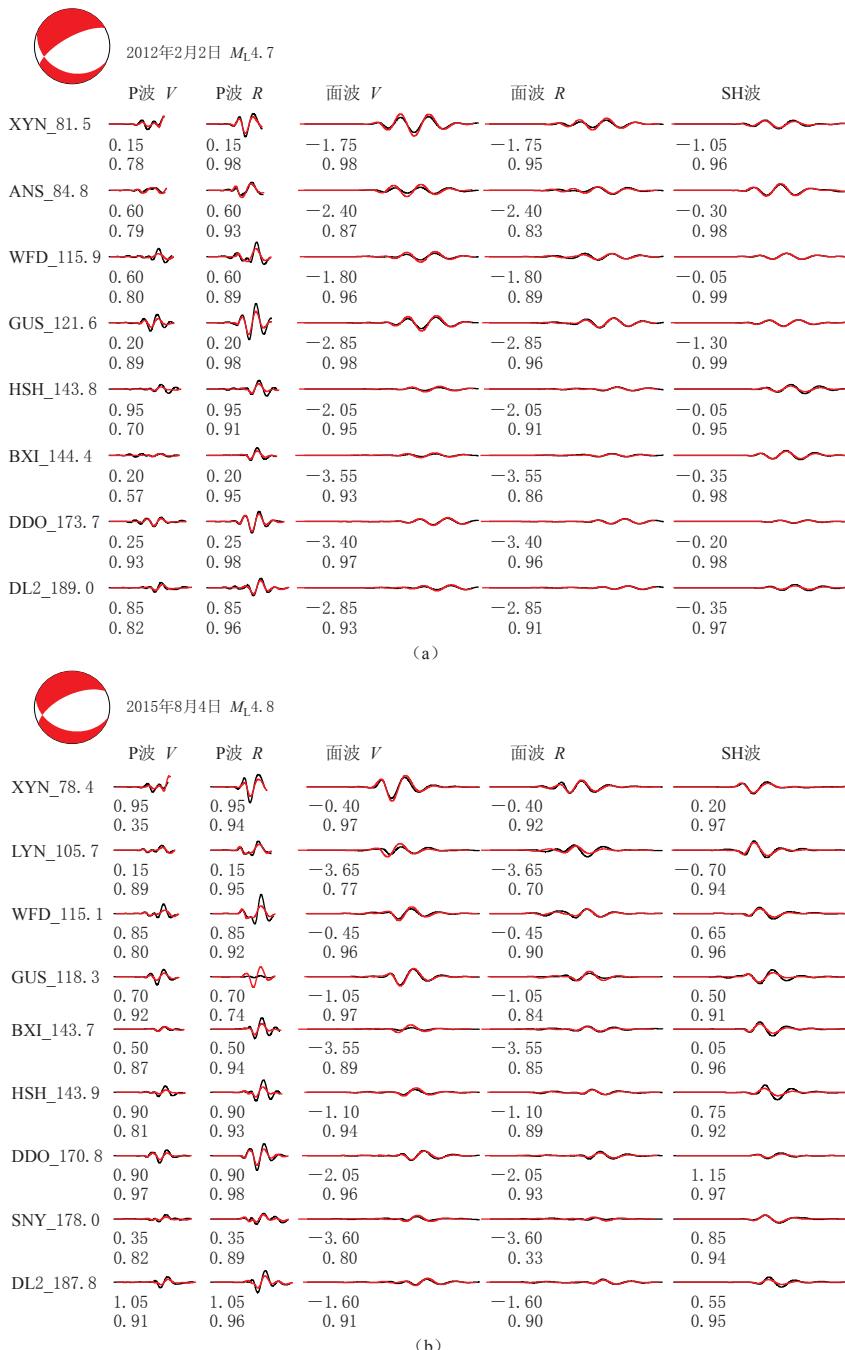


图 6 青石岭地震序列中 $M_L 4.7$ 地震(a)和 $M_L 4.8$ 地震(b)的理论地震图(红色)和观测地震图(黑色)的对比
波形左侧为台站名称和震中距(单位: km), 波形下方第一行数字为理论地震图相对于观测地震图的
时移(单位: s), 第二行数字为两者的相关系数

Fig. 6 Comparison of synthetic (red) and observed (black) seismograms for the $M_L 4.7$ event (a)
and the $M_L 4.8$ event (b) in the Qingshiling earthquake swarm

The data on the left of waveforms are station names and epicentral distances (in km), and the numbers in the first line beneath the waveforms are the time shifts of the synthetic waveforms relative to the observed ones (in seconds), and the second line is cross-correlation coefficient of the two

4 发震构造

余震分布尺度与主震破裂尺度大致相当, 根据震级与破裂尺度的经验公式(Wells, Coppersmith, 1994; 蒋海昆等, 2007), 震群中最大地震($M_L 4.8$)的破裂尺度远小于震群主要活动区域的尺度, 因此, 青石岭震群可能是小尺度发震构造的整体性活动引起的。青石岭震群活动自2012年2月2日至2015年8月25日, 持续了1300天。从图2中可以看出, 在青石岭震群活动的整个期间内, 分别于2012年7月和11月、2013年3月和2015年8月出现了4次地震活动的起伏活跃现象, 并伴随发生了4次 $M_L \geq 4.0$ 地震; 从双差定位的结果(图7)来看, 这4次地震的起伏活动所伴随的地震活动并未出现明显的震群迁移现象, 可见, 青石岭震群的起伏活跃是同一断裂在同一位置多次破裂产生的。

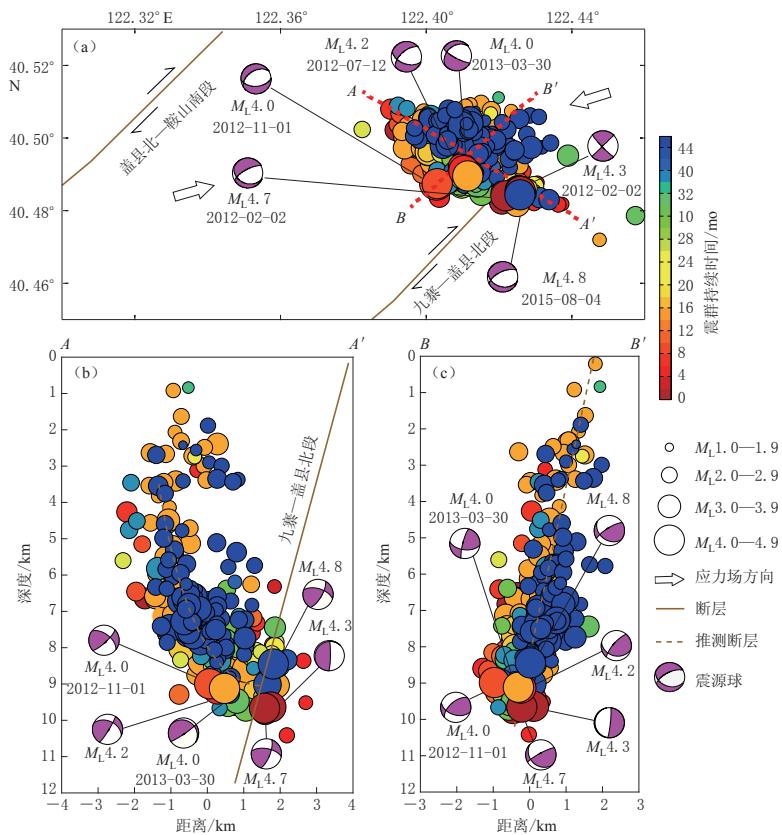


图7 青石岭震群重定位结果、 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制及由此推测的发震构造

(a)为青石岭震群的重定位结果; (b), (c)分别为沿剖面AA'和BB'的震源深度分布

Fig. 7 Relocation of the Qingshiling earthquake swarm, the focal mechanism solutions of $M_L \geq 4.0$ events and the speculative seismogenic structure

(a) is relocation of the Qingshiling earthquake swarm; (b) and (c) are focal depth distribution along profile AA' and BB', respectively

图7b中的AA'剖面图给出了青石岭震群可能的发震构造(棕色虚线)。本文推论, 在九寨—盖县北段的西北侧存在NW向次级铲式正断层, 在剖面内表现为由浅至深、从A端至A'端的陡倾角—缓倾角—倾角变平—断层消失的产状特征, 该推论与桂焜长(1993)的

研究结果相一致。铲式正断层往往是陆壳伸展区构造运动的标志, 这与震群中 $M_L \geq 4.0$ 地震的发震断层所表现出的拉张性质一致。此外, $M_L \geq 4.0$ 地震的震源深度集中在 8—10 km 范围内, 且投影在 AA' 剖面内的震源球表现出低倾角的特点, 也与铲式正断层的产状特征相一致。

从图 7c 中 BB' 剖面的震源分布来看, 青石岭震群序列发震构造的倾向为 SW, 倾角约为 70°, 序列中较大地震集中分布在 7—10 km 深度范围内。将震群中 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解投影至 BB' 剖面上, 可以推断, 发震断层的上盘向 SE 方向错动, 下盘向 NW 一侧错动, 错动性质与区域应力场的方向一致。图 7a 的精定位结果显示, 震群中绝大多数地震活动主要沿 AA' 剖面线性分布, 结合 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解方位角, 可以推断青石岭震群发震断层的走向为 NW 向。综上, 表 2 中的节面 II 为地震断层面解, 又因本地区区域构造应力场的主压应力方向为 NE 向, 故可推断发震断层具有左旋走滑兼正断的性质。

重新定位后, 青石岭震群中两次最大地震更接近于金州断裂的九寨—盖县北段, 张鹏等(2014)分析了金州断裂附近钻孔的应力状态后指出, 地壳浅表层现今最大主应力方向为 NEE 向($N65^{\circ}E$ — $N85^{\circ}E$), 揭示出金州断裂现今活动具有右旋走滑的特征。结合金州断裂的分段性, 可以判断青石岭震群位于盖县北—鞍山南段与九寨—盖县北段之间形成的右旋左阶挤压型阶列内。万波等(2010)在研究辽东半岛发震构造和控震构造时曾指出, 金州断裂的 4 个 NE 向断裂构造的结合部位或者端部, 均存在 NW 向构造带发育, 而这些 NW 向的构造是辽东半岛的主要发震构造。综合青石岭震群的双差定位结果和主要地震的震源机制解, 可以推断, 青石岭震群是金州断裂九寨—盖县北段在 NEE 向近水平主压应力场作用下出现的横向次级 NW 向铲式正断层发生左旋走滑-拉张错动形成的。此外, 金州断裂在海城、熊岳、普兰店、金州等地也具有若干 NW 向排列的小条带(万波等, 2010), 钟以章和白云(1999)认为, 这些小规模的 NW 向构造带具有发育历史短、断续展布、地表行迹不十分明显、新生性和地震危险性高的特点。

5 讨论与结论

本文利用双差定位方法对盖州青石岭震群进行了重新定位, 使用 CAP 方法和 P 波初动法计算了主要地震的震源机制解, 并结合盖州地区的地震地质资料, 分析了青石岭震群的发震构造, 主要获得以下结论:

1) 采用双差定位方法对盖州青石岭震群的 311 次地震进行重新定位, 重定位后的震群活动呈现较为清晰的 NW 向展布, 延伸长度约为 6.5 km。震群的主要地震活动集中在 $6 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 的 NW 向框形内, 深度主要集中在 7—10 km 的上地壳。震群中 $M_L \geq 4.0$ 地震发生在 8—10 km 深度范围内, 是震群活动深度较深的位置。在沿地震展布方向的剖面内, 密集分布的地震活动表现出越往西震源深度越浅、越往东侧震源深度越深的特点, 发震断层倾角约为 70°, 倾向为 SW。

2) 利用 CAP 方法计算了盖州青石岭震群中两次最大地震($M_L 4.7$ 和 $M_L 4.8$ 地震)的震源机制解, 所得结果一致性很高。两次地震的最佳矩心深度分别为 9 km 和 10 km, 与精定位的结果接近。利用 P 波初动方法计算了地震序列中其余 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解, 除 2012 年 2 月 2 日 $M_L 4.3$ 地震为近走滑性质外, 其余均显示出正断层的性质, 走向呈现一致性, 并与精定位后地震优势分布方向相吻合。

3) 综合精定位的结果、主要地震震源机制解的结果和区域地震地质资料, 推测盖州青石岭震群在金州断裂的九寨—盖县北段西北侧附近存在 NW 向次级铲式正断层, 震群中的主要地震活动即为该断层在区域应力场的作用下不断地左旋走滑-拉张错动造成的。

4) 从地质资料来看, 金州断裂具有右旋走滑兼正断的性质, 因此, 由九寨—盖县北段和盖县北—鞍山南段形成了右旋左阶的限制性阶列, 而震群中主要地震的震源机制解均具有正断性质, 与阶区内的应力状态相矛盾, 因此, 尚需利用更精细的定位结果分析震群的三维构造模型, 探讨其发震性质。

参 考 文 献

- 房立华, 吴建平, 张天中, 黄静, 王长在, 杨婷. 2011. 2011 年云南盈江 $M_{S}5.8$ 地震及其余震序列重定位[J]. 地震学报, 33(2): 262–267.
- Fang L H, Wu J P, Zhang T Z, Huang J, Wang C Z, Yang T. 2011. Relocation of mainshock and aftershock of the 2011 Yingjiang $M_{S}5.8$ earthquake in Yunnan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 33(2): 262–267 (in Chinese).
- 高常波, 钟以章. 1998. 东北输油管道场地断层活动性与地震危险性研究[M]. 北京: 地震出版社: 132–133.
- Gao C B, Zhong Y Z. 1998. *Study on Fault Activity and Seismic Risk of Northeast Oil Pipeline*[M]. Beijing: Seismological Press: 132–133 (in Chinese).
- 桂焜长. 1993. 伸展地区铲式正断层作用及其大地测量观测[J]. 地质论评, 39(3): 196–204.
- Gui K C. 1993. Listric normal faulting and its geodetic surveying in the extensional region[J]. *Geological Review*, 39(3): 196–204 (in Chinese).
- 韩立波, 蒋长胜, 包丰. 2012. 2010 年河南太康 $M_{S}4.6$ 地震序列震源参数的精确确定[J]. 地球物理学报, 55(9): 2973–2981.
- Han L B, Jiang C S, Bao F. 2012. Source parameter determination of 2010 Taikang $M_{S}4.6$ earthquake sequences[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(9): 2973–2981 (in Chinese).
- 黄媛, 吴建平, 张天中, 张东宁. 2008. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 38(10): 1242–1249.
- Huang Y, Wu J P, Zhang T Z, Zhang D N. 2008. Relocation of the M8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence[J]. *Science China Earth Sciences*, 51(12): 1703–1712.
- 蒋海昆, 郑建常, 吴琼, 曲延军, 李永莉, 代磊. 2007. 中国大陆中强以上地震余震分布尺度的统计特征[J]. 地震学报, 29(2): 151–164.
- Jiang H K, Zhen J C, Wu Q, Qu Y J, Li Y L, Dai L. 2007. Statistical features of aftershock distribution size for moderate and large earthquakes in Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 29(2): 151–164 (in Chinese).
- 李金, 王琼. 2015. 2014 年 2 月 12 日于田 7.3 级地震序列震源机制特征分析[J]. 中国地震, 31(1): 110–120.
- Li J, Wang Q. 2015. The analysis on the characteristics of the focal mechanisms for the $M_{S}7.3$ earthquake sequence on February 12, 2014 in Yutian[J]. *Earthquake Research in China*, 31(1): 110–120 (in Chinese).
- 李四光. 1969. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社: 74–81.
- Li S G. 1969. *Introduction to Geological Mechanics*[M]. Beijing: Science Press: 74–81 (in Chinese).
- 李荣安, 于军. 1985. 海城地震双向构造活动的研究[J]. 地震学报, 7(4): 385–397.
- Li R A, Yu J. 1985. A study on the bidirectional tectonic activity of the Haicheng earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 7(4): 385–397 (in Chinese).
- 李志海, 郑勇, 谢祖军, 刘建明, 上官文明, 单斌. 2014. 2012 年 6 月 30 日新疆新源—和静 $M_{S}6.6$ 地震发震构造初步研究[J]. 地球物理学报, 57(2): 449–458.
- Li Z H, Zheng Y, Xie Z J, Liu J M, Shangguan W M, Shan B. 2014. A preliminary study of seismogenic structure for the Xin Yuan-He Jing, Xinjiang $M_{S}6.6$ earthquake of June 30, 2012[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(2): 449–458 (in Chinese).
- 辽宁省地质矿产勘察局. 1989. 辽宁省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 166–167.

- Liaoning Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration. 1989. *Regional Geology of Liaoning Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House: 166–167 (in Chinese).
- 吕坚, 郑勇, 倪四道, 高斯华. 2008. 2005年11月26日九江—瑞昌 $M_S 5.7$ 、 $M_S 4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究 [J]. 地球物理学报, **51**(1): 158–164.
- Lü J, Zheng Y, Ni S D, Gao S H. 2008. Focal mechanisms and seismogenic structures of the $M_S 5.7$ and $M_S 4.8$ Jiujiang-Ruichang earthquakes of Nov. 26, 2005[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(1): 158–164 (in Chinese).
- 卢造勋, 蒋秀琴, 潘科, 白云, 姜德录, 肖立萍, 刘建华, 刘福田, 陈辉, 何建坤. 2002. 中朝地台东北缘地区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, **45**(3): 338–351.
- Lu Z X, Jiang X Q, Pan K, Bai Y, Jiang D L, Xiao L P, Liu J H, Liu F T, Chen H, He J K. 2002. Seismic tomography in the northeast margin area of Sino-Korean platform[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **45**(3): 338–351 (in Chinese).
- 马文涛, 马瑾, 刘力强, 马胜利, 刘天昌, 邓志辉. 1995. 雁列断层变形过程中的声发射特征[J]. 地震地质, **17**(4): 342–348.
- Ma W T, Ma J, Liu L Q, Ma S L, Liu T C, Deng Z H. 1995. The characteristics of acoustic emission in en echelon structure[J]. *Seismology and Geology*, **17**(4): 342–348 (in Chinese).
- 秦双龙. 2009. 双差定位方法的研究[J]. 新疆石油教育学院学报, **10**(6): 201–202.
- Qin S L. 2009. A study of double-difference algorithm[J]. *Journal of Petroleum Educational Institute of Xinjiang*, **10**(6): 201–202 (in Chinese).
- 曲均浩, 蒋海昆, 李金, 张志慧, 郑建常, 张芹. 2015. 2013—2014年山东乳山地震序列发震构造初探[J]. 地球物理学报, **58**(6): 1954–1962.
- Qu J H, Jiang H K, Li J, Zhang Z H, Zheng J C, Zhang Q. 2015. Preliminary study for seismogenic structure of the Rushan earthquake sequence in 2013–2014[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(6): 1954–1962 (in Chinese).
- 万波, 钟以章. 1997. 东北地区的新构造运动特征分析及新构造运动分区[J]. 东北地震研究, **13**(4): 64–75.
- Wan B, Zhong Y Z. 1997. Features analysis and divisions of new tectonic movement in Northeast China[J]. *Seismological Research of Northeast China*, **13**(4): 64–75 (in Chinese).
- 万波, 李宇彤, 郑双成. 2010. 1861年普兰店东6级地震发震构造判定[J]. 中国地震, **26**(3): 304–313.
- Wan B, Li Y T, Zheng S C. 2010. Determination of seismogenic structure for the east of Pulandian $M_6.0$ earthquake in 1861[J]. *Earthquake Research in China*, **26**(3): 304–313 (in Chinese).
- 万波, 贾丽华, 戴盈磊, 索锐. 2013. 辽东半岛中强地震活动及其与构造相关性[J]. 地震地质, **35**(2): 300–314.
- Wan B, Jia L H, Dai Y L, Suo R. 2013. Moderate-strong earthquakes and their tectonic correlation in the Liaodong Peninsula[J]. *Seismology and Geology*, **35**(2): 300–314 (in Chinese).
- 王长在, 吴建平, 房立华, 王未来. 2011. 2009年姚安地震序列定位及震源区三维P波速度结构研究[J]. 地震学报, **33**(2): 123–133.
- Wang C Z, Wu J P, Fang L H, Wang W L. 2011. Relocation of aftershocks of the 2009 Yao'an $M_S 6.0$ earthquake and 3-D P-wave velocity structure around its source region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(2): 123–133 (in Chinese).
- 韦生吉, 倪四道, 崇加军, 郑勇, 陈颙. 2009. 2003年8月16日赤峰地震:一个可能发生在下地壳的地震? [J]. 地球物理学报, **52**(1): 111–119.
- Wei S J, Ni S D, Chong J J, Zheng Y, Chen Y. 2009. The 16 August 2003 Chifeng earthquake: Is it a lower crust earthquake? [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(1): 111–119 (in Chinese).
- 杨智娴, 陈运泰, 张宏志. 2002. 张北—尚义地震序列的重新定位和发震构造[J]. 地震学报, **24**(4): 366–377.
- Yang Z X, Chen Y T, Zhang H Z. 2002. Relocation and seismogenic structure of the 1998 Zhangbei-Shangyi earthquake sequence[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **24**(4): 366–377 (in Chinese).
- 张鹏, 丰成君, 孙炜峰, 杨海雨, 谭成轩. 2014. 金州断裂带北段深孔地应力测量及其活动性[J]. 地球科学: 中国地质大学报, **39**(10): 1295–1306.
- Zhang P, Feng C J, Sun W F, Yang H Y, Tan C X. 2014. In-situ stress measurement of deep borehole in north segment of Jinzhou fracture belt and analysis on its activity[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*,

- 39(10): 1295–1306 (in Chinese).
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 倪四道, 李迎春, 韦生吉. 2009. 汶川地震强余震($M_S \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 39(4): 413–426.
- Zheng Y, Ma H S, Lü J, Ni S D, Li Y C, Wei S J. 2009. Source mechanism of strong aftershocks ($M_S \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(6): 739–753.
- 钟以章, 白云. 1999. 辽东半岛及两侧海域深部构造、活动构造与地震关系研究[J]. 华北地震科学, 17(2): 59–65.
- Zhong Y Z, Bai Y. 1999. Study on deep tectonics, active tectonics and their relation with earthquakes in Liaodong Peninsula and its surrounding sea area[J]. *North China Earthquake Sciences*, 17(2): 59–65 (in Chinese).
- Geiger L. 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only[J]. *Bull St Louis Univ*, 8(1): 60–71.
- Laske G, Masters G, Ma Z, Pasyanos M. 2013. Update on CRUST1.0: A 1-degree global model of Earth's crust[C]// *EGU General Assembly Conference*. Vienna: Geophysical Research Abstract; 2658.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 84(4): 974–1002.
- Zhong Y, Gao C. 2000. Seismic tectonics in the northeast of China[J]. *Bull Seis Asso Far East*, 14(1): 70–85.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 84(1): 91–104.