

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2017.05.008

2013 年吉林前郭 M_s 5.5 震群的双差法重新定位及震源机制

刘俊清^{1,2)} 甘卫军³⁾ 刘 财¹⁾* 张晨侠²⁾ 高金哲²⁾ 梁诗明³⁾

1) 吉林大学, 地球探测科学与技术学院, 长春 130026

2) 吉林省地震局, 长春 130117

3) 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 基于区域数字地震台网的震相资料、松辽盆地中部地壳速度结构, 使用双差定位方法对 2013 年 10 月 31 日开始的吉林省前郭爆发性震群序列进行重新定位。根据重新定位后的地震群空间分布图像结合震中区附近的物探资料探讨发震构造的特征。重定位后 EW、NS 和 UD 3 个方向大致的定位精度分别为 0.9km、0.7km 和 1.2km, 地震序列震呈 NW 向密集条带状分布, 长度约 12km, 正交 NE 向, 宽约 6km。震群序列中地震震源深度较浅, 80% 的地震分布在 6~8km 深度范围内, 在深度剖面上震群序列表现为明显的密集现象。根据重新定位后震群序列的空间分布特征、序列中等震连发特征以及较大级别地震的震源机制解, 推断发震构造为克山-大安断裂带内的推覆逆冲构造。冲断面向 E 倾斜, 近地表倾角较陡, 深部几乎平直, 表现为典型的铲形逆冲断层的特征, 断层面向破裂长度大于横向破裂长度。根据发震构造的特征可以推断 3 个 5 级地震发生在下层冲断面上, 余震主要在冲断面上部触发。

关键词 前郭震群 双差定位方法 松辽盆地 推覆构造

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2017)05-0981-13

0 引言

2013 年吉林省前郭县 M_s 5.5 震群, 在约 20d 的时间内发生 $M_s \geq 5.0$ 地震 5 次, 最大为 11 月 23 日发生的 M_s 5.8 地震。这次震群活动导致大量建筑物倒塌和破坏, 极震区烈度达 VII 度, 引起了吉林省政府部门乃至东北地区社会公众的广泛关注。

前郭震群是中国有台网记录以来在东北黑龙江块体上首次出现的强度大、频率高、分布范围集中、爆发性强的震群活动, 也是 2011 年日本 9.0 级地震后, 中国东北地区首次出现的显著性构造事件。1997 年新疆伽师强震群的研究发现(周仕勇等, 2001; 单新建等, 2002; 杨成荣等, 2002), 这种爆发性震群的发生对未来区域地震危险性判定具有特殊的意义, 需对其发震构造深入研究。

双差相对定位方法通常用来研究地震与构造的关系, 特别适用于地震在空间上丛集的情

[收稿日期] 2016-07-25 收稿, 2017-06-07 改回。

[基金项目] 中国地震局地震行业科研专项(201508009)资助。

* 通讯作者: 刘财, 教授, E-mail: liucan@jlu.edu.cn。

况,该方法自 2000 年(Waldhauser *et al.*, 2000)提出后,在研究地震和断裂的空间关系方面得到广泛的应用。万永革等(2008)将双差相对定位方法用于 1976 年唐山地震研究中,获得了滦县地震、唐山地震和宁河-卢龙断裂带的断层具体分布位置及产状参数。采用双差定位方法对汶川 8.0 级地震及其余震序列重新定位后(陈九辉等, 2009; 赵博等, 2011),发现余震明显地分段活动及发震断裂呈叠瓦状破裂的空间分布特征,这一结果和地质探测结果完全一致。在芦山 7.0 级地震的构造机理研究中,徐锡伟等(2013)利用地震序列双差定位的结果在震中区地表下方推断有盲逆断层的存在。大量的研究成果显示,利用双差定位方法对地震序列重新定位后研究发震构造已经取得了很好的效果。

本文对 2013 年前郭 $M_s5.5$ 震群序列中的 $M_L \geq 1.5$ 地震进行重新定位,获取更加准确的余震空间分布图像,结合序列中较大地震的断层面解、松辽盆地中部中上地壳的构造特点,探讨震群的构造机理及发震构造,并试图解释序列中中强震连发、微小地震占优势的特征。

1 震中区地震地质背景及震群序列特征

地震序列特征与震中区地质构造背景及主震地震类型有关(蒋海昆等, 2006, 2007),前郭震群震中区位于松辽盆地内部、吉林省西部(图 1a),地貌上为广阔的平原区,附近未见任何断错地貌,地壳平均厚度约 35km(傅维洲等, 1998; 李传友等, 1999)。震中区附近发育 NE 向和 NW 向多条隐伏断层(Shen *et al.*, 2016)(图 1a),在卫星影像上断裂迹象不明显,前郭 $M_s5.5$ 震群发生在克山-大安断裂带和扶余-肇东断裂之间,克山-大安断裂带是松辽盆地内部规模最大的断裂带,是典型的正反转构造(余中元等, 2015),断裂带内部有很多分支断裂,个别断裂深切基底,总体走向 NE,断层面均倾向 SE,倾角较陡。扶余-肇东断裂总体走向 NE,倾向 NW,逆断兼左旋走滑性质,属于前第四纪地壳断裂。

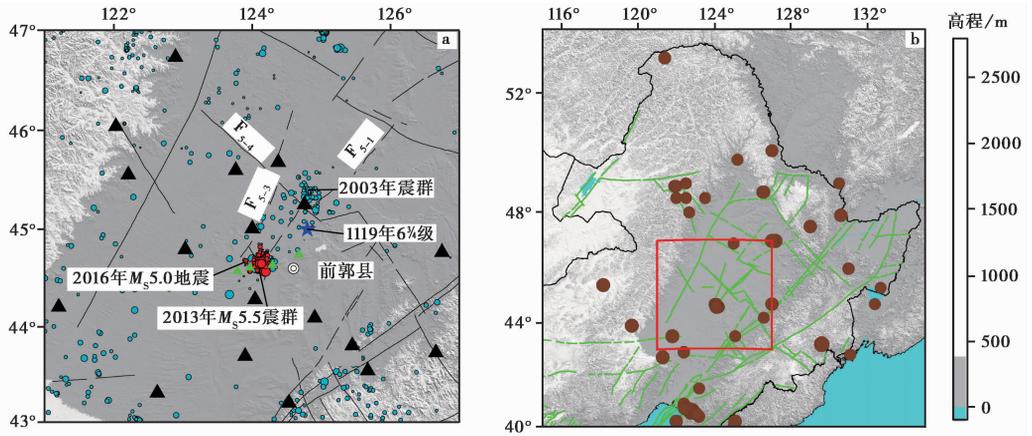


图 1 2013 年前郭 $M_s5.5$ 震群宏观位置

Fig. 1 Macro position of the 2013 $M_s5.5$ Qianguo earthquake swarm.

a 松辽盆地中部区域,是 b 图红色框区域的放大图,蓝色圆圈为历史地震,红色圆圈为 2013 年前郭 $M_s5.5$ 震群,2016 年乾安 $M_s5.0$ 地震与之属于同一构造部位,蓝色五角星表示 1119 年前郭 6%地震,黑色三角表示固定地震台站,绿色三角表示 $M_s5.5$ 震群后架设的流动观测点; b 中国东北地形及主要构造,图中最大面积的深色区域为松辽盆地,褐色圆圈表示 5 级以上地震; F_{5-1} 扶余-肇东断裂, F_{5-3} 克山-大安断裂, F_{5-4} 第二松花江断裂

吉林省西部地区历史记载 1119 年曾发生 $6\frac{3}{4}$ 地震(唐雅芝, 1988, 1990; 吴戈等, 1988; Shen *et al.*, 2016), 曾经造成“地震陷, 死数千人”的地震灾害, 发生在第二松花江断裂和扶余-肇东断裂的交会部位, 西南距前郭 $M_s5.5$ 震群位置约 91km(图 1)。自 1972 年吉林省地震台网建立以来, 该区域地震活动水平较低(图 1a, 2), 1998 年沿嫩江断裂白城段发生 $M_L3.9$ 地震及多次 $M_L2.0$ 以上地震, 之后该区域地震活动有所增强。2003 年在松原发生小震群活动(图 1a), 持续约 1 个月时间, 0 级以上地震发生 80 余次, 其中 $M_L3.0$ 以上地震发生 5 次, 最大地震为 $M_L3.5$ 。2006 年在乾安查干花镇发生 $M_s5.0$ 地震序列(图 1a), 该地震序列属于主余型地震。2009 年 12 月 21 日在通榆县发生 $M_s5.0$ 地震, 属于孤立型地震, 12 月 22 日在松原发生 $M_L4.0$ 地震, 随后发生小规模震群活动(图 2)。该地区 2013 年会商前, 前郭震群发生之前共有 6 次地震活动, 其中 $M_L>2.0$ 地震 2 次, 最大为前郭 $M_L2.8$ 地震, 地震活动比较平静。

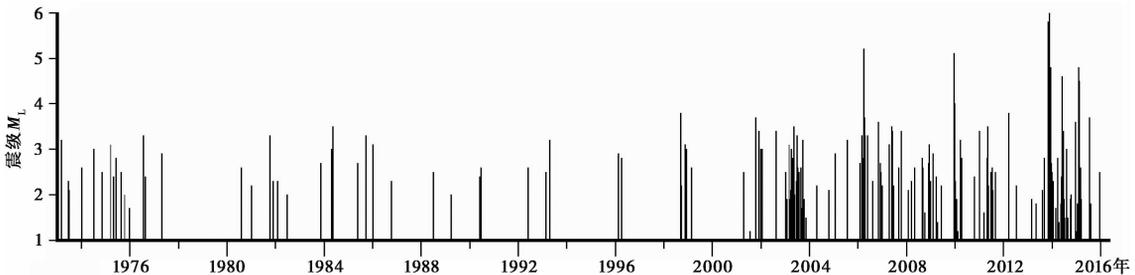


图 2 吉林省西部地震 $M-T$ 图

Fig. 2 The $M-T$ map of earthquakes in the west of Jilin Province.

2013 年前郭 $M_s5.5$ 震群, 截至 2016 年 4 月 30 日余震仍然没有结束, 地震发生后参与定位的地震台站共计 52 个, 包括吉林省、黑龙江省、内蒙古自治区、辽宁省台网 45 个固定台站, 地震现场流动台 7 个, 所有台站对震中区形成很好的包围, 记录到完整的地震序列(图 3), 余震记录下限为 $M_L-0.3$ 。地震序列中 5 级以上地震发生 5 次, 由于震级差 $\Delta M \leq 0.5$ 级, 根据《地震现场工作大纲和技术指南》(中国地震局监测预报司, 1998), 前郭地震序列属于震群型, 首发地震 $M_s5.5$ 为主震(吴开统, 1990)。序列中 4.0 级以上地震呈连发特征(表 1, 图 3a), 2~3 级地震较少, 大多分布在 0~1 级区间内。

2 震群序列重新定位

双差定位法是典型的相对定位方法, 适合于地震在空间上丛集的情况, 所有地震的重新定位结果相对于地震丛的质心位置。本文利用 HypoDD 相对定位法(Waldhauser *et al.*, 2000), 定位过程中需要对地震事件进行两两组“对儿”, 由于组成“地震对儿”的 2 个地震到台站之间的路径几乎是一致的, 路径异常(实际走时相对于理论走时的偏差)便可以从计算中

表 1 序列中连发地震信息

Table 1 The information of events in the seismic sequence

序号	日期	时间	震级 M_s
1	10 月 31 日	11 时 3 分	5.5
2	10 月 31 日	11 时 10 分	5.0
3	11 月 3 日	12 时 26 分	4.5
4	11 月 4 日	3 时 17 分	4.2
5	11 月 22 日	16 时 18 分	5.3
6	11 月 23 日	6 时 4 分	5.8
7	11 月 23 日	6 时 32 分	5.0

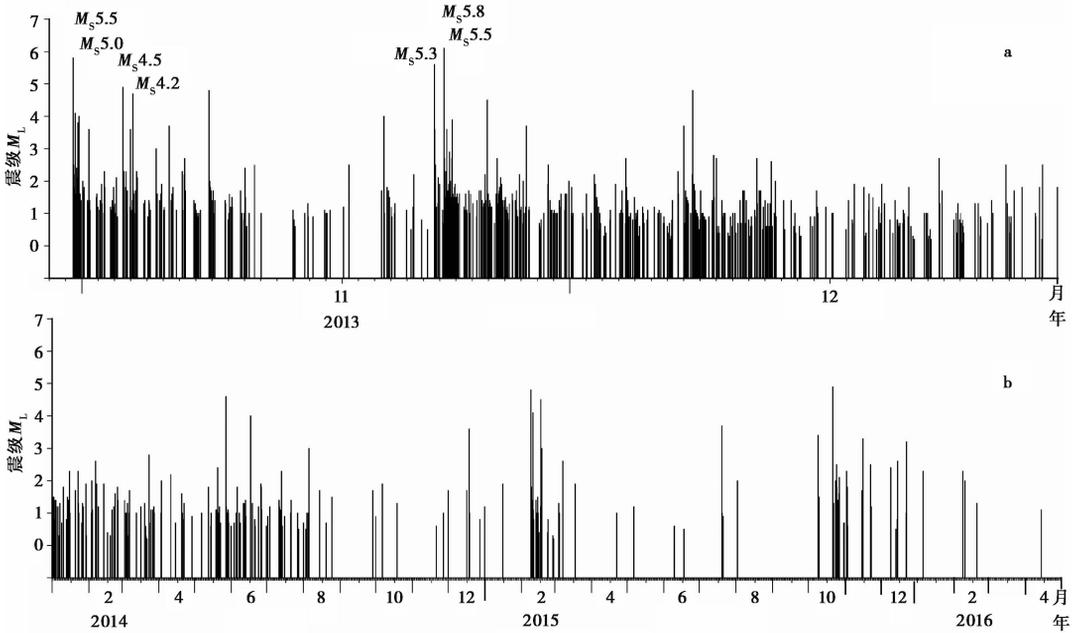


图 3 2013 年前郭震群序列

Fig. 3 Qianguo earthquake swarm sequence.

a 2013 年 10 月 31 日至 12 月 31 日地震序列; b 2014 年 1 月 1 日至 2016 年 4 月 30 日地震序列

消除,这样就消除了地壳速度结构的横向不均匀性产生的定位误差,从而显著地提高了定位精度,有利于研究区域重复地震与断裂的关系,以及发现隐伏断裂。

前郭 $M_s 5.5$ 震群初始定位的台站(包括震后架设的流动台)共计 52 个,由于震中距小的台站分布在松辽盆地内部,台基条件很差,而台基条件好的台站均分布在震中距较大的东部山区,所以地震波形信噪比较低,序列中较小地震的震相到时读取精度受到一定限制。选取序列中到时较清晰的 $M_L \geq 1.5$ 地震 628 个,对一些初始定位残差较大的地震进行震相重新拾取后(图 4)形成观测报告,震相数据有 8 922 条。在重定位过程中采用阻尼最小二乘(LSQR)求解双差走时方程,设置最小连接数(MINLINK)和最小观测数(MINOBS)均为 8,震源间距 $< 10\text{km}$,震中距 $< 400\text{km}$,P、S 波到时权重分别为 1.0 和 0.7,去掉一部分由于线性定位法产生的空震(Airquake)后,最后有 41 个台站记录的 408 个地震符合成“对儿”条件。重新定位的地壳速度模型采用中朝地台东北缘地区地震层析成像结果(卢造勋等,2002)(表 2),根据吉林省西部波速比研究结果(张洪艳等,2010),波速比设定为 1.73。

重新定位精度显著提高,EW、SN 和 UD 3 个方向的定位精度分别为 0.9km、0.7km 和 1.2km,定位前后走时均方根残差为 12ms。图 5 是吉林省台网定位结果与本文重定位后的结果对比,可以看出:台网定位结果,地震序列的震中分布范围比较大,震源深度大部分在地下 5~10km 的范围内(图 5a, c),没有显示出明显的优势分布方向和深度范围。而序

表 2 地壳速度模型

Table 2 The crustal velocity model

层序	深度/km	P 波速度 $V_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
1	0.0	4.6
2	3.0	5.6
3	14.0	6.1
4	25.0	6.4
5	35.0	6.8

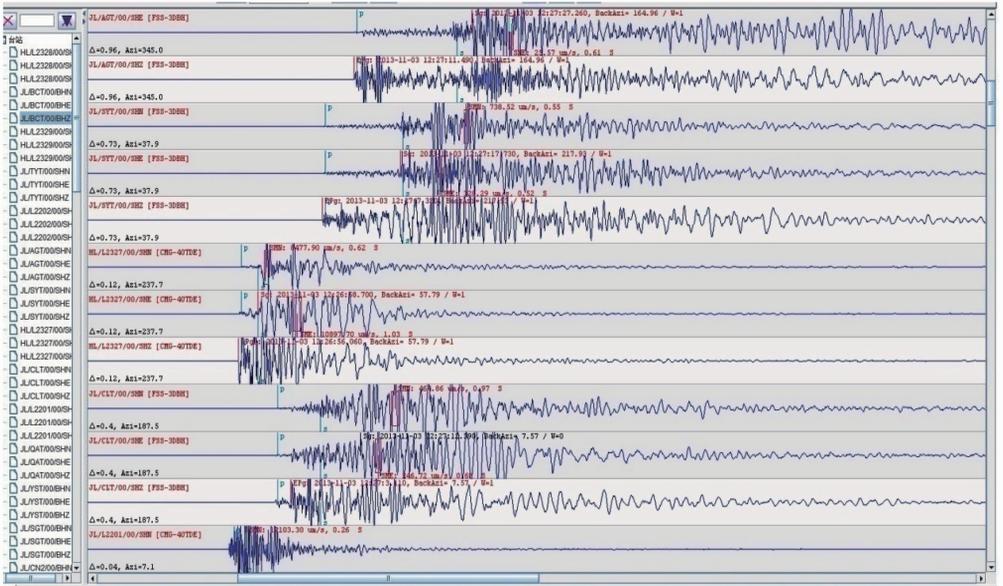


图 4 震相获取例子

Fig. 4 The example of picking seismic phase.

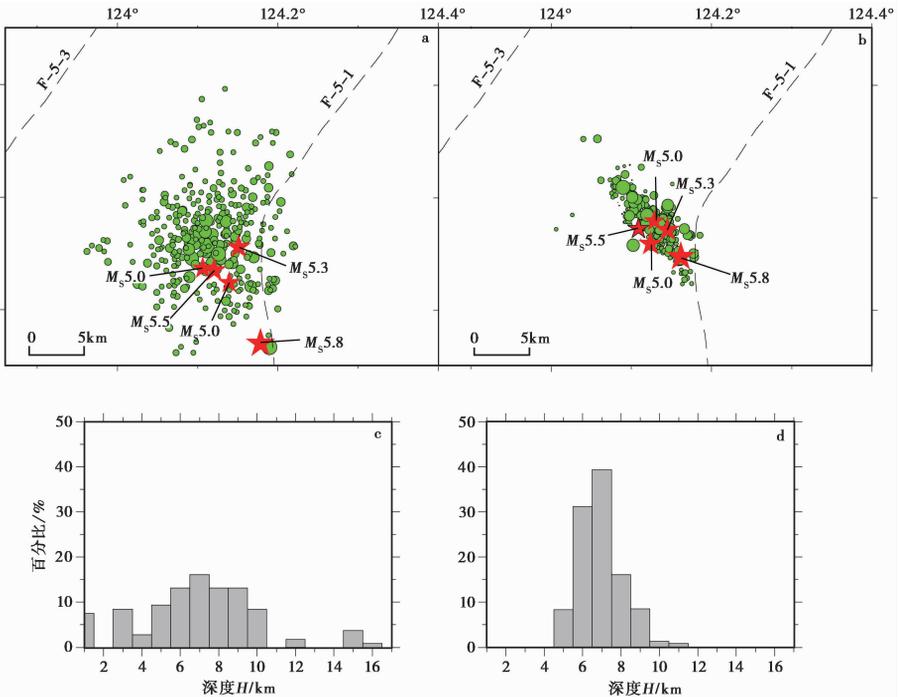


图 5 地震序列重新定位前后震中分布和震源深度直方图

Fig. 5 The epicenter distribution and focal depth histograms before (a, c) and after (b, d) the relocation of the seismic swarm sequence.

a, c 重新定位前序列震中、震源深度分布；b, d 重新定位后序列震中、震源深度分布；

F_{5-1} 扶余-肇东断裂, F_{5-3} 克山-大安断裂

列重定位后,震中明显地集中在长约 12km、宽约 6km 的 NW 向条带状区域内,80% 的地震震源深度在地下 6~8km 范围内(图 5c, d)。

3 讨论

3.1 震源机制类型分析

通常利用地震的矩张量解来研究地震的发震机制;在本研究中,使用了 gCAP 方法(Zhu *et al.*, 2013)进行地震的矩张量反演。图 6 和图 7 是以序列中最大地震($M_s 5.8$)为例,分别展示了反演过程中观测波形和理论波形的相关系数随深度变化及波形对比情况。采用 Vavryčuk (2001)提出的矩张量分解方法对 5 个 $M_s \geq 5.0$ 地震的矩张量矩进行分解,结果显示,DC 分量(双力偶)均 $>80\%$ (表 2),表明是典型的构造地震。为检验反演结果的可靠性,将本文震源机制结果与 GCMT、中国地震局地球物理研究所(简称地球所)结果的震源球的旋转角 K -angle (Kagan, 1991)进行了比较(表 3)。 K -angle 表示空间 2 个震源球之间最小的夹角, $<20^\circ$ 表示 2 个地震具有相似的震源机制。表 3 中 K -angle 一系列的值均 $<20^\circ$,表明我们反演获得的断层面解与 GCMT、地球所结果具有很好的一致性,结果较为可靠。矩心深度一系列显示,5 个地震介于 6.4~8.7km 之间,根据地震破裂起始位置通常低于矩心位置的事实,可以推断有 4 个 $M_s \geq 5.0$ 地震的震源深度应该 >8 km,与双差法重新定位的结果相一致。

为了直观、定量划分地震的震源机制类型,将 P, T, B 轴投影到 Frohlich 震源类型三角形图(Frohlich, 1992)上(图 8a)。Frohlich 利用方位球心投影将球面坐标系中的地震主应力轴转换到平面三角形坐标系中,在三角图中将构造地震的类型划分为 4 种(Frohlich, 1992):正断层型(Normal)、逆断层型(Thrust)、走滑型(Strike-slip)及剩余型(Odd)。其中,剩余型是介于前 3 种典型类型之间的所有地震。结果显示有 4 个地震位于逆断层型地震区域,属于典型的逆冲型地

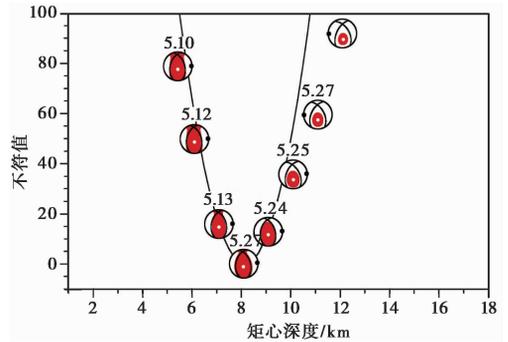


图 6 $M_s 5.8$ 地震不同地震矩心深度与矩张量相关系数
Fig. 6 The correlation vs. centroid depth of $M_s 5.8$ event.

表 3 5 个 $M_s \geq 5.0$ 地震的断层面解反演结果

Table 3 The inversion results of fault plane solution from five $M_s \geq 5.0$ events

序号	震级 M_s	深度/km	N_1		N_2		GCMT
			走向/倾向/倾角/ $(^\circ)$		走向/倾向/倾角/ $(^\circ)$		K -angle/ $(^\circ)$
1	5.5	8.1	339/57/68		196/39/120		19
2	5.0	6.4	305/64/14		209/78/154		12
3	5.3	8.7	318/41/39		197/65/124		6
4	5.8	8.1	341/50/68		211/46/138		19
5	5.0	8.0	345/34/94		160/56/87		16 $^\circ$

注 * 中国地震局地球物理研究所结果; GCMT 只发布了前 4 个地震的震源机制解。

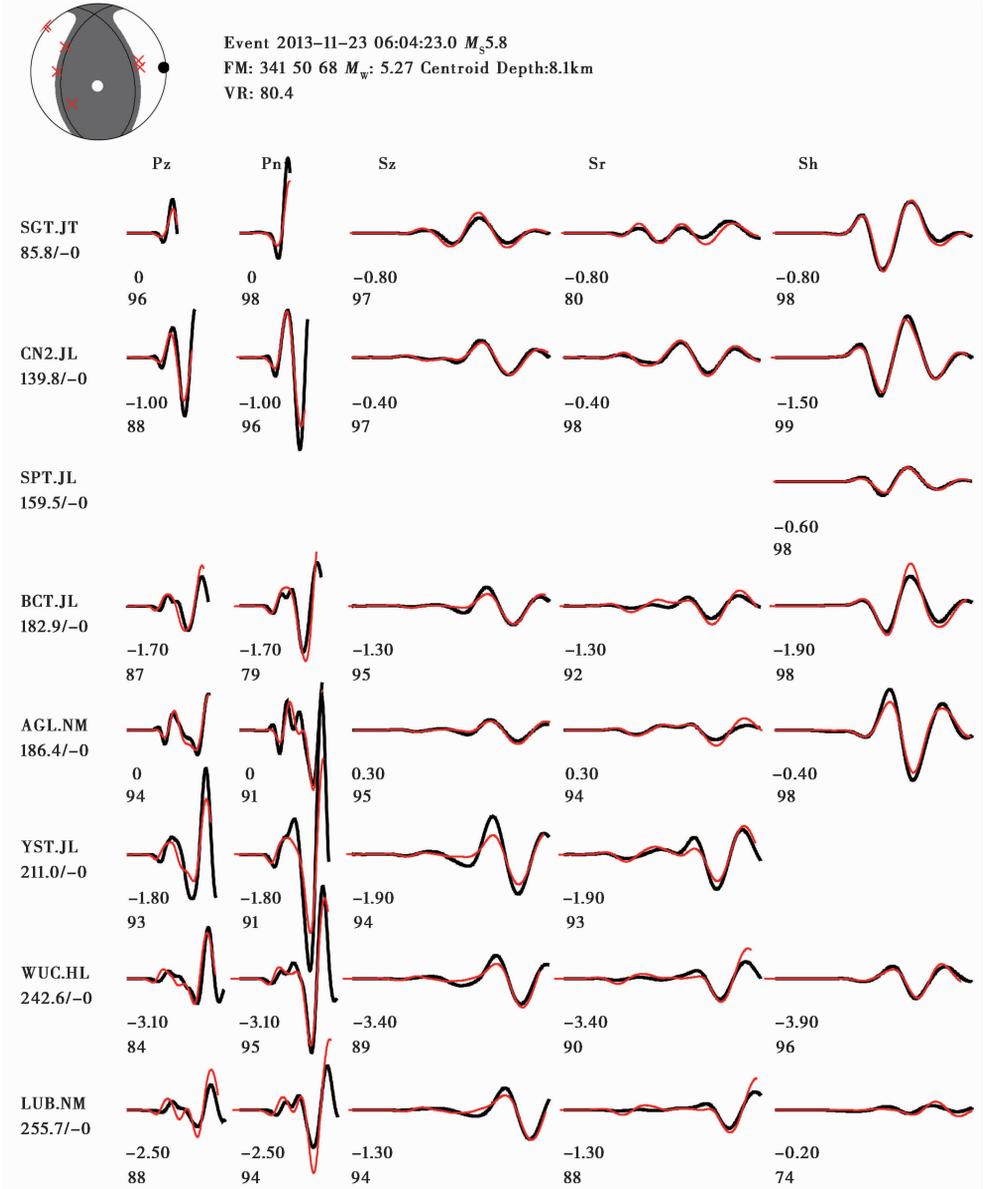


图 7 $M_s 5.8$ 地震震源机制解及观测波形(黑色)和格林函数合成波形(红色)对比图

Fig. 7 Focal mechanism solution and comparison between observations (black) and synthetic (red) waveform from Green functions.

每行左侧大写字母表示台站. 台网名称, 下方的数字表示震中距和台站波形的相对平均偏移秒数;
 每段波形下方的数字分别表示偏移秒数与约化方差 VR 值

震. 第 2 个地震 $M_s 5.0$, 位于剩余型地震的边界位置, 接近走滑型地震类型. 将断层面解的 3 个主应力轴投影到 Wulff 网上(图 8b), 结果显示 5 个地震的主压应力轴方位角相对集中均为近 EW 向, 倾角很小.

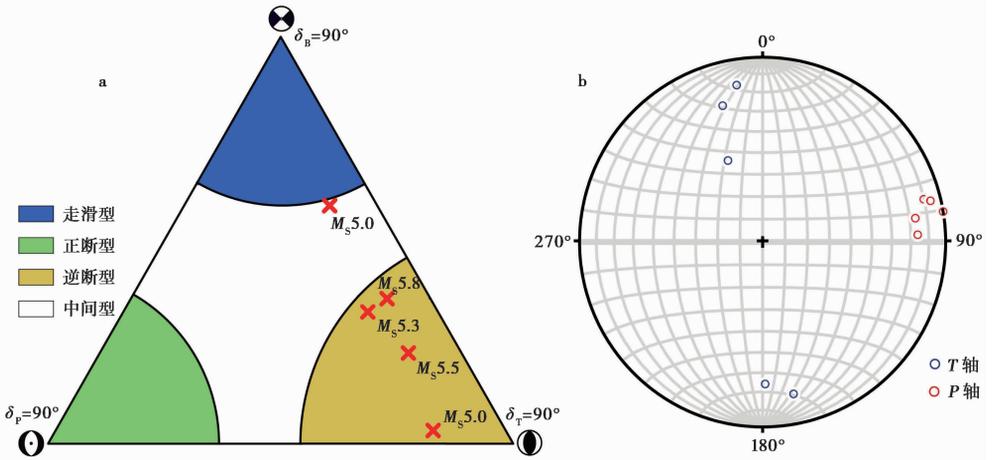


图 8 地震类型 Frohlich 三角图投影及地震 P , T 轴分布

Fig. 8 The Frohlich triangle plot of events and the distribution of P and T axis.

a 震源机制类型的 Frohlich 三角图, δ 表示主应力轴倾角, 红色十字符号表示地震; b 地震的 P , T 轴在 Wulff 网的下半球投影

2006 年乾安 $M_s 5.0$ 地震震中与本次震群属于同一构造部位, 根据其震源机制解研究结果 (高金哲等, 2013), 属于逆冲型地震, 主压应力 P 轴方位角近 EW 向, 可以推断 2013 年前郭 $M_s 5.5$ 震群与乾安地震属于同样的构造类型。

3.2 发震构造探讨

前郭震群的震中区分布有多条隐伏断裂, 除了规模较大的几条外, 其他断裂没有明确的位置与产状资料, 给发震机制研究带来了困难。为推测前郭震群的发震构造, 根据双差定位结果, 我们制作剖面 $A-A'$ 和 $B-B'$ (图 9a), 剖面方位角分别平行于震群长轴和短轴方向。将定位后的所有地震投影到剖面上 (图 9c, d), 结果显示震源深度分布存在分区丛集现象: 浅部小地震密集, 深部 3 个 5 级地震呈曲线排列。深度 8~10km 左右的地震连线可以构成 1 个倾向 SE、近地表发生转折后倾角较陡的断层面, 向上 2km 左右, 地震分布较稀疏, 推断可能为地震的空缺区域, 为上、下地震丛集的分界面。该面以上是中小地震密集的区域, 如果沿下层密集地震带勾画 1 个断层面, 可见该断层面形态是底部面平直、近地表几乎直立。图 9d 显示地震横向分布在约 6km 宽的 1 个很窄的区域内, 图 8c 显示纵向破裂的直线距离约 12km 长。由此可见前郭震群是 1 次较特殊的纵向破裂长度大于横向破裂长度的地震事件。可以推断在较深断层发生错动后, 在滑动方向遇到很大的阻挡, 错位移移很小。在下层大级别地震发生后的很短时间内, 在上层断层面触发了大量较小级别的余震。深部 3 个地震均为连发地震的首震 (图 3), 连发地震的第 2 个地震均分布在上层余震密集区域内, 这或许就是强震连发的机理。同时, 小余震主要分布在上层断面的应力增强区域, 符合库伦破裂应力向铲形断层面内部集中的规律。

据中国满洲里-绥芬河地学断面研究结果, 由于太平洋板块向 W 的俯冲作用, 在远距离的松辽盆地上部地壳产生了逆冲推覆作用 (Yang *et al.*, 1997; 刘财等, 2012), 地下 15km 左右存在滑脱面 (单玄龙等, 2009; 单伟等, 2009), 松辽盆地中部和北部可见中上地壳中存在推覆滑脱构造 (杨宝俊等, 1996)。我们收集到震中区附近的物探资料, 图 9a 中的 $C-C'$ 剖面是单伟

等(2009)物探剖面的大概位置, 该剖面垂直盆地内 NE 向背斜轴线, 切过扶余-肇东断裂与部分克山-大安断裂带。图 9b 中①、②和③表示克山-大安断裂带内 3 条隐伏断裂的剖面(单伟等, 2009), ④为扶余-肇东断裂。前郭震群的震中区恰好位于推覆构造存在的区域, 也就是松辽盆地中部的肇源以南地区, 根据重新定位后的震群剖面分析, 前郭震群由滑脱面上的推覆构造的冲断层小规模错动引发, 有可能发生在滑脱面上克山-大安断裂带内的②或③分支断裂上。

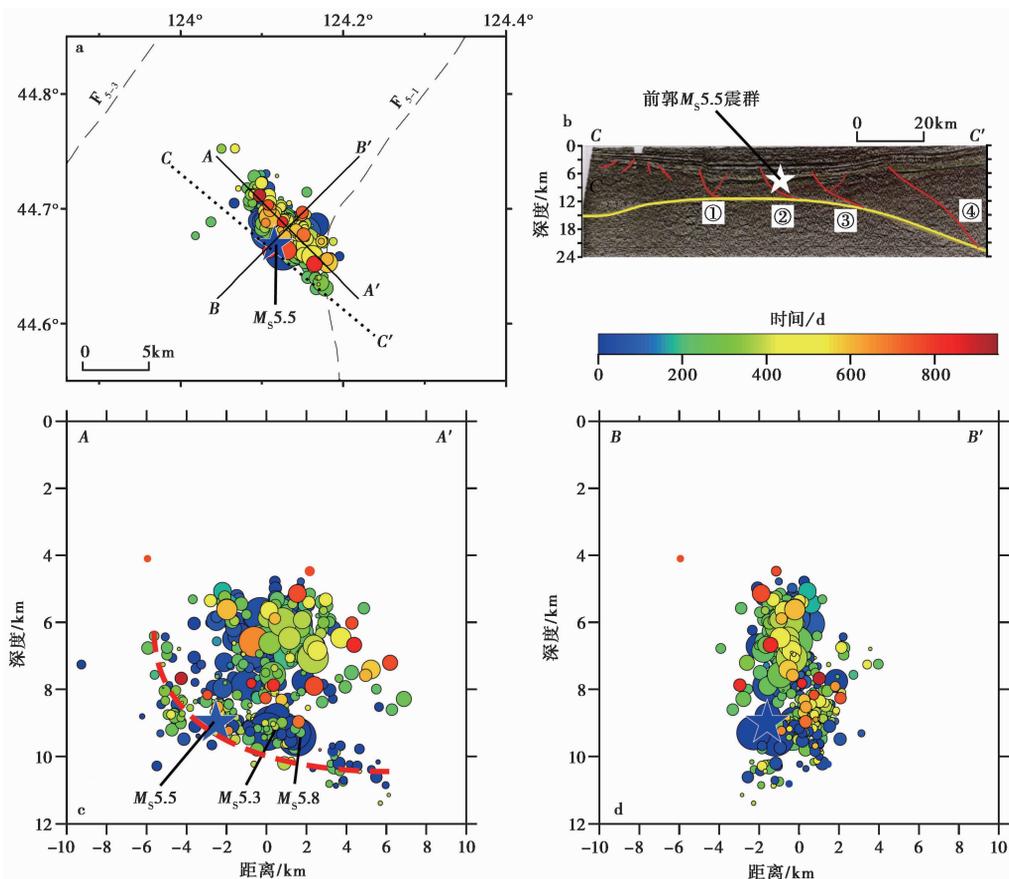


图 9 地震序列深度剖面图与推测断层

Fig. 9 The earthquake sequence depth profiles and the forecast fault.

a 2 条剖面线条在重新定位后平面图上的位置; b 震中区附近的 C—C' 物探剖面(单伟等, 2009); c A—A' 剖面地震震源深度分布图; d B—B' 剖面地震震源深度分布图。蓝色五角星表示首发 $M_s 5.5$ 地震; F_{5-1} 扶余-肇东断裂, F_{5-3} 克山-大安断裂

4 结论

采用双差定位方法对 2013 年松辽盆地前郭震群序列重新定位, 获得了更为准确的地震空间分布图像, 进而结合较大地震的震源机制解及震群序列特征分析了震群的发震断层与构造机理。推测松辽盆地中上地壳存在的逆冲推覆构造是本次震群的发震构造, 较大地震发生在下部滑脱面附近, 余震序列集中发生在铲形面内。2006 年 $M_s 5.0$ 地震与本次震群位置相同,

震源机制相同,可见均是松辽盆地中部中上地壳推覆逆冲构造作用导致的。同一构造部位相隔 8a 出现同样级别的地震,而且以爆发性震群的形式释放能量,表明该区域地壳应力在持续增强,未来该区域及附近地震危险性将进一步升级。震中区 100km 范围内曾发生 1119 年前郭 6 $\frac{3}{4}$ 地震,这次爆发性震群的活动对历史地震的重复发生是否具有前兆指示意义,今后需密切关注西太平洋、日本及周边环境大的构造事件对松辽盆地内部地震的触发作用。

致谢 吉林省地震局台网中心工作人员提供了本次震群的波形和震相资料,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并感谢!

参 考 文 献

- 陈九辉,刘启元,李顺成,等. 2009. 汶川 M_s 8.0 地震余震序列重新定位及其地震构造研究 [J]. 地球物理学报, 52(2): 390—397.
- CHEN Jiu-hui, LIU Qi-yuan, LI Sun-cheng, *et al.* 2009. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan M_s 8.0 earthquake sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(2): 390—397(in Chinese).
- 傅维洲,杨宝俊,刘财,等. 1998. 中国满洲里-绥芬河地学断面地震学研究 [J]. 长春科技大学学报, 28(2): 206—212.
- FU Wei-zhou, YANG Bao-jun, LIU Cai, *et al.* 1998. Study on the seismology in Manzhouli-Suifenhe geoscience transect of China [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 28(2): 206—212 (in Chinese).
- 高金哲,包丰,崇加军,等. 2013. 2006 年吉林乾安-前郭 5.0 级地震深度及其成因探讨 [J]. 地球物理学进展, 28(5): 2328—2335.
- GAO Jin-zhe, BAO Feng, CHONG Jia-jun, *et al.* 2013. Resolving focal depth of the 31 March 2006 Jilin Qian'an-Qianguo earthquake with multiple datasets and its implication for seismogenesis [J]. Progress in Geophysics, 28(5): 2328—2335(in Chinese).
- 蒋海昆,曲延军,李永莉,等. 2006. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征 [J]. 地球物理学报, 49(4): 1110—1117.
- JIANG Hai-kun, QU Yan-jun, LI Yong-li, *et al.* 2006. Some statistic features of aftershock sequences in Chinese mainland [J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(4): 1110—1117(in Chinese).
- 蒋海昆,郑建常,吴琼,等. 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 Hai-kun, ZHENG Jian-chang, WU Qiong, *et al.* 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).
- 李传友,汪一鹏,张良怀,等. 1999. 吉林省松原地区 1119 年 6 $\frac{3}{4}$ 级地震的发震构造条件 [J]. 中国地震, 15(3): 237—246.
- LI Chuan-you, WANG Yi-peng, ZHANG Liang-huai, *et al.* 1999. Causative tectonic conditions of the historic earthquake($M = 6\frac{3}{4}$) in 1119 in Songyuan area [J]. Earthquake Research in China, 15(3): 237—246 (in Chinese).
- 刘财,杨宝俊,鹿琪,等. 2012. 黑龙江板块构造地球物理研究基本进展 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1497—1505.
- LIU Cai, YANG Bao-jun, LU Qi, *et al.* 2012. Fundamental geophysical progress on Heilongjiang plate tectonics [J].

- Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(5): 1497—1505 (in Chinese).
- 卢造勋, 刘建华. 2002. 中朝地台北缘地区的地震层析成像 [J]. 地球物理学报, 45(3): 338—351.
- LU Zao-xun, LIU Jian-hua. 2002. Seismic tomography in the northeast margin area of Sino-Korean platform [J]. Chinese Journal of Geophysics, 45(3): 338—351 (in Chinese).
- 单伟, 刘少峰, 吴键. 2009. 松辽盆地南缘长岭凹陷断陷层的构造特征与应变模式 [J]. 地质通报, 28(4): 431—438.
- SHAN Wei, LIU Shao-feng, WU Jian. 2009. Tectonic feature and strain pattern of Changling sag on the southern edge of Songliao Basin, China [J]. Geological Bulletin of China, 28(4): 431—438 (in Chinese).
- 单新建, 何玉梅, 朱燕, 等. 2002. 伽师强震群震源破裂特征的初步分析 [J]. 地球物理学报, 45(3): 416—425.
- SHAN Xin-jian, HE Yu-mei, ZHU Yan, *et al.* 2002. A preliminary analysis on rupture characteristics of Jiashi strong earthquake swarm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 45(3): 416—425 (in Chinese).
- 单玄龙, 秦树洪, 张艳, 等. 2009. 松辽盆地北部浅部基底推覆伸展作用的地震学证据与地质意义 [J]. 地球物理学报, 52(8): 2044—2049.
- SHAN Xuan-long, QIN Shu-hong, ZHANG Yan, *et al.* 2009. Seismic evidence and geological significance of thrust-extension structure in upper basement of north Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(8): 2044—2049 (in Chinese).
- 唐雅芝. 1988. 1119 年吉林省地震震中的确定 [J]. 遥感信息, (1): 27—29, 12.
- TANG Ya-zhi. 1988. Determination of location of epicenter of the 1119 earthquake in Jilin Province [J]. Remote Sensing Information, (1): 27—29, 12 (in Chinese).
- 唐雅芝. 1990. 公元 1119 年 2 月吉林省前郭强震三要素的确定 [J]. 东北师大学报自然科学版, (3): 151—159.
- TANG Ya-zhi. 1990. Three essential factors of a severe earthquake in Qianguo of Jilin Province in February, 1119 [J]. Journal of Northeast Normal University, (3): 151—159 (in Chinese).
- 万永革, 沈正康, 刁桂苓, 等. 2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层参数方法及其在唐山地震序列中的应用 [J]. 地球物理学报, 51(3): 793—804.
- WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, DIAO Gui-ling, *et al.* 2008. An algorithm of fault parameter determination using distribution of small earthquakes and parameters of regional stress field and its application to Tangshan earthquake sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(3): 793—804 (in Chinese).
- 吴戈, 房贺岩, 李志田, 等. 1988. 1119 年前郭地震考察与研究 [J]. 东北地震研究, 4(1): 67—76.
- WU Ge, FANG He-yan, LI Zhi-tian, *et al.* 1988. The investigation and study of Qianguo earthquake, 1119 [J]. Northeastern Seismological Research, 4(1): 67—76 (in Chinese).
- 吴开统. 1990. 地震序列概论 [M]. 北京: 北京大学出版社: 85.
- WU Kai-tong. 1990. Introduction to Earthquake Sequences [M]. Beijing: Beijing University Press: 85 (in Chinese).
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 等. 2013. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震 [J]. 科学通报, 58(20): 1887—1893.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, HAN Zhu-jun, *et al.* 2013. Lushan $M_s 7.0$ earthquake: A blind reverse-fault event [J]. Chinese Science Bulletin, 58(20): 1887—1893 (in Chinese).
- 杨石俊, 穆石敏, 金旭, 等. 1996. 中国满洲里—绥芬河地学断面地球物理综合研究 [J]. 地球物理学报, 39(6): 772—782.
- YANG Bao-jun, MU Shi-min, JIN Xu, *et al.* 1996. Synthesized study on the geophysics of Manzhouli-Suifenhe geoscience transect, China [J]. Acta Geophysica Sinica, 39(6): 772—782 (in Chinese).

- 杨成荣, 单新建, 何玉梅, 等. 2002. 伽师强震群震源机制与区域应力场特征 [J]. 地震, 22(3): 89—94.
- YANG Cheng-rong, SHAN Xin-jian, HE Yu-mei, *et al.* 2002. Focal mechanism of Jiashi strong earthquake swarm and characteristics of the regional stress field [J]. Earthquake, 22(3): 89—94 (in Chinese).
- 余中元, 闵伟, 韦庆海, 等. 2015. 松辽盆地北部反转构造的几何特征、变形机制及其地震地质意义: 以大安—德都断裂为例 [J]. 地震地质, 37(1): 13—32. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2015.01.002.
- YU Zhong-yuan, MIN Wei, WEI Qing-hai, *et al.* 2015. The geometric characteristics and tectonic deformation mechanism of inversion structures in northern Songliao Basin and their seismogeological significance: A case from Da'an-Dedu Fault [J]. Seismology and Geology, 37(1): 13—32 (in Chinese).
- 张洪艳, 高金哲, 卢燕红, 等. 2010. 吉林地区平均波速比的测定及研究 [J]. 防灾减灾学报, 26(4): 30—34.
- ZHANG Hong-yan, GAO Jin-zhe, LU Yan-hong, *et al.* 2010. The measurement and research of average wave velocity ratio in Jilin Province [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 26(4): 30—34 (in Chinese).
- 赵博, 石玉涛, 高原. 2011. 汶川 M_s 8.0 地震及余震序列重新定位 [J]. 地震, 31(2): 1—10.
- ZHAO Bo, SHI Yu-tao, GAO Yuan. 2011. Relocation of the Wenchuan M_s 8.0 earthquake sequence [J]. Earthquake, 31(2): 1—10 (in Chinese).
- 中国地震局监测预报司编. 1998. 地震现场工作大纲和技术指南 [M]. 北京: 地震出版社: 25.
- Department of Earthquake Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration. 1998. Outline and Technical Guide for Earthquake Field Work [M]. Beijing: Seismological Press: 25 (in Chinese).
- 周仕勇, 许忠淮, 陈晓非. 2001. 伽师强震群震源特征及震源机制力学成因分析 [J]. 地球物理学报, 44(5): 654—662.
- ZHOU Shi-yong, XU Zhong-huai, CHEN Xiao-fei. 2001. Analysis on the source characteristics of the 1997 Jiashi swarm, western China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 44(5): 654—662 (in Chinese).
- Frohlich C. 1992. Triangle diagrams: Ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 75(1-3): 193—198.
- Kagan Y Y. 1991. 3-D rotation of double-couple earthquake sources [J]. Geophysical Journal International, 106(3): 709—716.
- Shen J, Shao B, Yu X H, *et al.* 2016. Seismogenic tectonics of the Qian-Gorlos earthquake in Jilin Province, China [J]. Earthquake Science, 29(2): 93—103.
- Vavryčuk V. 2001. Inversion for parameters of tensile earthquakes [J]. Journal of Geophysical Research, 106(B8): 16339—16355.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 90(6): 1353—1368.
- Yang B J, Liu C, Han L G, *et al.* 1997. A study of detachment faults of the upper crust in Manzhouli-Suifenhe GGT by the method of vertical seismic reflection [C] // Proceedings of the 30th International Geological Congress. Utrecht, the Netherlands: VSP: 51—61.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(1): 91—104.
- Zhu L P, Ben-Zion Y. 2013. Parametrization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform data [J]. Geophysical Journal International, 194(2): 839—843.

RELOCATIONS AND FOCAL MECHANISM SOLUTIONS OF $M_s 5.5$ QIANGUO EARTHQUAKE SWARM IN JILIN PROVINCE IN 2013

LIU Jun-qing^{1,2)} GAN Wei-jun³⁾ LIU Cai¹⁾ ZHANG Chen-xia²⁾
GAO Jin-zhe²⁾ LIANG Shi-ming³⁾

1) *College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China*

2) *Earthquake Administration of Jilin Province, Changchun 130117, China*

3) *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

Abstract

We relocated a seismic swarm, which started in a mass from 31 October, 2013 in Qianguo County of Jilin Province, by using double difference location method, based on the phase data of regional digital seismic network and the crustal velocity model of Sunliao Basin. The characteristics of seismogenic fault have been investigated based on the spatial distribution image of the seismic swarm and the geophysical data near the epicenter area. The relocated epicenters of the swarm earthquakes have a precision of 0.9km in E-W, 0.7km in N-S and 1.2km in U-D direction, and show an apparent concentrated seismic belt trending N-W, with a length and width of 12km and 6km, respectively. The source depths of all events are shallow, with 80% in a range of 6~8km, and the events are apparently crowded together on the depth cross section. According to the relocated spatial distribution characteristics of the seismic swarm, the features that the medium size events happened successively, and the focal mechanism of the large size events in the swarm, we infer that the seismogenic tectonics of Qianguo seismic swarm is the thrust nappe structure inside the Keshan-Da'an fault zone. The fault plane inclines to the East direction, and is steep when close to the ground surface, which shows the typical characteristics of a listric thrust fault. The longitudinal length of the rupture plane is greater than the transverse length. According to the features of seismogenic tectonics, we infer that the three $M_s \geq 5.0$ earthquakes occurred at the lower layer of the thrust rupture surface of the fault, while the aftershocks were triggered by the three events and occurred mainly at the upper layer of the rupture surface.

Key words Qianguo seismic swarm, double difference relocation, Songliao Basin, nappe structure

[作者简介] 刘俊清, 男, 1977 年生, 2010 年于吉林大学获地球物理学硕士学位, 高级工程师, 主要从事地震火山监测预报研究工作, E-mail: liujq9@gmail.com。