

薛艳、曾宪伟、刘桂萍等,2015,2013 年吉林前郭 M_s 5.8 震群序列研究,中国地震,31(3),481~491。

2013 年吉林前郭 M_s 5.8 震群序列研究

薛艳¹⁾ 曾宪伟²⁾ 刘桂萍¹⁾ 蔡宏雷³⁾

1) 中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

2) 宁夏回族自治区地震局,银川 750001

3) 吉林省地震局,长春 132000

摘要 对前郭 M_s 5.8 地震后 6 个月(2013 年 10 月 31 日~2014 年 4 月 30 日)内的地震事件进行了重新定位,并利用吉林区域地震台网提供的地震目录研究了序列活动特征。精定位结果显示,余震区呈 NW 走向分布,长轴约 11km,短轴约 6km。震源深度为 5~15km。结合区域构造特征认为,该序列可能与 NW 走向的通榆-长春隐伏断裂活动有关,序列具有 b 值较低、5 级地震频次高、发震时间集中的特点。序列主要起伏活动可以分为 3 个时段:主震后 10 天,余震强度衰减不明显;此后的 2 次起伏活动,地震活动分别表现出平静-增强(震级爬升)-发生强震和增强(震级爬升)-平静-再增强(震级爬升)-发生强震的特点;在序列早期阶段,震级-频度无法拟合成 1 条直线, G - R 关系在低震级段和高震级段呈现 2 个线性段;在 M_s 5.8 地震前 h 值有变小的趋势,且接近 1;而 M_s 5.8 地震后 h 值明显增大; M_s 5.5 地震后 15 天序列衰减比较慢, p 值为 0.76; M_s 5.8 地震后 15 天序列衰减较快, p 值为 1.17。

关键词: 前郭震群 地震定位 地震序列 震源深度 序列参数

[文章编号] 1001-4683(2015)03-0481-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网中心测定(<http://10.5.202.22/bianmu/validate.jsp>),2013 年 10 月 31 日 11:00 吉林前郭发生 M_s 5.5 地震(震中 44.6°N,124.2°E,震源深度 8km),近 7min 后再次发生 M_s 5.0 地震,11 月 22~23 日该序列又发生 3 次 5 级地震,震级最大的为 11 月 23 日 06:00 M_s 5.8 地震。根据地震序列类型的判定依据可知(蒋海昆等,2007),本次前郭地震为典型的震群型事件,又称多震型地震(蒋海昆等,2007)。统计 1970 年以来中国大陆发生的 5 级以上多震型地震后发现,事件开始后 2 小时内接连发生 2 次强震的有 24 次,其中 22 次事件没有发生后续强震(吴开统等,1990;蒋海昆等,2007),仅有 2 个特例,即 1997 年新疆伽师 6.4 级震群和本次前郭 M_s 5.8 震群。此外,对于 1 个 5 级多震群,前郭地震序列包含的 5 级地震数量之多、发震时间之集中在东部地区近百年来都非常少见。

在地震序列研究中,我国学者取得了丰硕的成果。焦远碧(1998)系统研究了中国大陆

[收稿日期] 2014-03-17; [修定日期] 2015-01-16

[项目类别] 国际科技合作计划资助项目(2010DFB20190)与华北强震强化跟踪项目“华北地区指标体系建设”(15405013231)资助

[作者简介] 薛艳,女,1969 年生,副研究员,主要从事地震活动性预测研究。E-mail: xueyan5619@seis.ac.cn

5级以上地震序列的 b 值,结果表明,地震序列的 b 值与主震震级和序列类型有关。在类型相同的情况下,主震震级越大,序列 b 值越高;在主震震级相近的序列中,孤立型序列 b 值最小,主余型和双震型 b 值居中且差别不大,多震型 b 值在 6、7 级地震序列中都是最大的。而蒋海昆等(2007)系统研究了 161 次序列,结果显示, b 值与主震震级有关,震级越大, b 值越大;不同序列类型间 b 值的差异不大。刘蒲雄(1992)研究认为,双震型序列(多震型的一种)是 2 组相关断层相继活动的结果,2 次主震有明显不同的断层面解,它们的较大余震断层面解分别相似于 2 次主震的断层面解。而震群型地震也可能涉及 2 组或多组断层的活动(张竹琪等,2008;张四昌等,1994)。

前郭震群发生后,韩立波反演了前郭地震序列中主要事件的震源机制解(<http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/267992.shtm>),结果显示既有逆冲型地震,又有走滑型地震。王未来^①给出的 2013 年 10 月 31 日~11 月 23 日地震序列的精定位结果显示,该序列发生在 NE 向的扶余-肇东断裂附近,余震密集区还显示出一定的 NWW 向分布的迹象,5 次 5 级地震的震源较浅,特别是 11 月 23 日 $M_s 5.8$ 地震震源深度小于 5km,其余几次 5 级地震震源深度为 5~8km。此外,刘莎等(2014)利用 2013 年 11 月 1~24 日前郭地区流动台记录的地震波形资料,探讨了震源区附近地震各向异性特征。

虽然关于前郭震群前人已经取得了一些研究成果,但仍有很多问题需要研究,如王未来^①仅对不足 1 个月的地震序列进行了重新定位,其后该序列又发生了多次地震,这些地震的精定位结果如何?该震群的发震构造怎样?此外,本次震群序列 5 级地震数量多,起伏活动显著,故有必要对序列特征,特别是早期序列特征进行深入研究,以期对地震序列的早期趋势判定积累震例。为此,本文首先使用 Hypoinverse-2000(以下简称 Hypo2000)绝对定位法对前郭 $M_s 5.8$ 地震序列(2013 年 10 月 31 日~2014 年 4 月 30 日)进行重新定位,再将绝对定位的结果作为初始值进行双差定位;然后结合震源机制解和区域构造背景探讨该地震的发生机制;最后使用吉林区域台网提供的地震目录(<http://10.5.202.22/bianmu/validate.jsp>)分析该序列的活动特征,为序列研究积累资料。

1 定位方法简介

1.1 Hypo2000 方法

地震定位包括绝对定位和相对定位等 2 种方法。其中绝对定位法是在给定的地下速度模型的基础上,计算假定地震位置的理论地震到时和观测地震到时的偏差,通过迭代等手段搜索理论值和观测值的最小偏差来确定地震的位置。Hypo2000 定位方法采用传统的 Geiger 方法(Geiger, 1912)的基本思路,即将走时 T 在初值 (x, y, z) 附近作泰勒展开,取 1 级近似,则为

$$T' = T + \frac{\partial T}{\partial x(x' - x)} + \frac{\partial T}{\partial y(y' - y)} + \frac{\partial T}{\partial z(z' - z)} \quad (1)$$

式(1)中, T 为实际走时,是相应于 (x, y, z) 附近一点 (x', y', z') 的走时。在此基础上建立观测方程组,然后求解该方程组。算法上,即先将观测方程组降维,不化成正规方程组,直接用

^① 王未来,2013,私人交流

奇异值分解最小二乘法方程组,在实际计算中采用多种数据加权(Klein,2007)。

1.2 双差定位方法

双差定位法(Waldhauser et al,2000、2002)是一种相对定位方法,可以给出地震的相对位置特征,以描述发震断层的特性。目前,该方法在国内已经得到广泛应用,并在几次重大地震序列重新定位工作中发挥了重要作用(黄媛等,2008;王未来等,2012、2014;房立华等,2013;易桂喜等,2015)。双差定位方法通过对一定空间范围内的地震事件两两组对,根据组对事件之间震相到时差来获得事件对的相对空间分布,其基本方程(Waldhauser et al,2000、2002)为

$$\Delta t_{jk} - \Delta t_{ik} = -S_{jk}\Delta X_j + S_{ik}\Delta X_i + \varepsilon_{jk} - \varepsilon_{ik} \quad (2)$$

式中, t_{ik} 和 Δt_{jk} 分别对应地震 i 、 j 到台站 k 的到时(走时)残差; X_i 和 X_j 分别为 2 个震源的位置矢量; S_{ik} 和 S_{jk} 为 2 个震源位置到台站 k 的地震射线的慢度矢量; ε_{ik} 和 ε_{jk} 分别为地震在台站的到时拾取误差。双差定位法不仅同主事件法一样能有效地减少由于地壳结构不够精细而引起的误差,而且适用于丛集地震的空间跨度较大的情况。

2 资料处理与结果分析

2.1 速度模型

前郭 $M_s5.8$ 震群发生在松辽盆地内部。松辽盆地位于郯庐断裂带的西部,地跨东北 3 省及部分内蒙古自治区。在地质上,松辽盆地西部及北部是大兴安岭-内蒙海西褶皱带,东北部和东部为黑龙江、吉林海西褶皱,南部以 EW 向断层与内蒙古地轴相隔,依兰-伊通断裂带从其东边界通过(王连君,2003;云金表等,2003)。松辽盆地地壳厚度 30~37km(刘殿秘等,2007)。张风雪等(2013)研究了中国东北地区远震 P 波走时层析成像,结果表明,松辽盆地呈现以高速异常为主、高低速异常混合分布的特性。参考刘殿秘等(2007)提供的满洲里-绥芬河二维速度剖面和刘洋等(2008)给出的松辽盆地南部人工地震测线速度剖面,可以确定本文定位使用的二维速度模型(表 1)。

2.2 台站及资料

本文资料来源于吉林地震台网固定台站和流动台站记录到的震相报告(<http://10.5.202.22/bianmu/validate.jsp>),台站分布及前郭 $M_s5.8$ 地震震中分布见图 1。

为保证结果的可靠性和精度,对可定位地震事件进行筛选,要求每个被选事件必须保证至少有 4 个台站记录的 8 个有效震相到时数据。因了解到极少数台站(如 SYZT 台)存在 GPS 时钟对时不准的问题,故在定位过程中不采用该台站的数据。此外,本文还对初至信噪比较低的地震逐一进行了 Pg、Sg 震相重新识别。

2.3 结果分析

通过对前郭 $M_s5.8$ 地震序列(2013 年 10 月 31 日~2014 年 4 月 30 日)进行重新定位,共得到 83 次地震事件。

表 1 P 波速度模型

| 层号 | 层厚/km | P 波速度/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|----|-------|--|
| 1 | 0 | 2.00 |
| 2 | 4 | 4.50 |
| 3 | 5 | 5.50 |
| 4 | 10 | 6.25 |
| 5 | 17 | 7.20 |
| 6 | 10 | 8.00 |

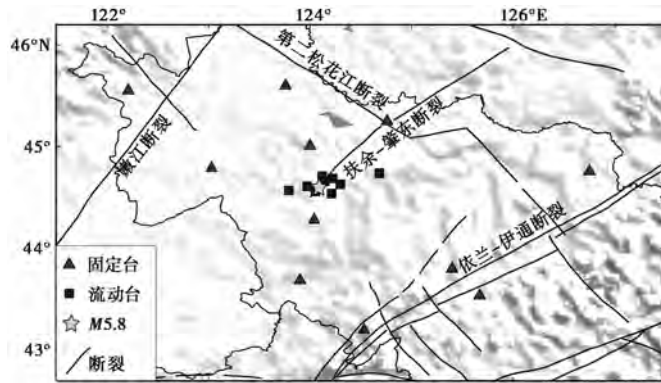


图1 测震台站(固定台与流动台)和前郭 $M_s5.8$ 地震震中分布
断层资料来源于邓起东等(2002)

双差定位结果显示,水平误差为 100~800m(图2)。定位前,序列的震源深度为 0~10km(图3(a));定位后,序列的震源深度为 0~20km,其中绝大部分地震为 0~15km(图3(b))。其中,5次5级地震的深度分别为 10、5、9、7和 10km;序列中所有4级地震和绝大多数3级地震震源深度为 5~13km,其中 66%的3级以上地震震源深度为 8~15km。

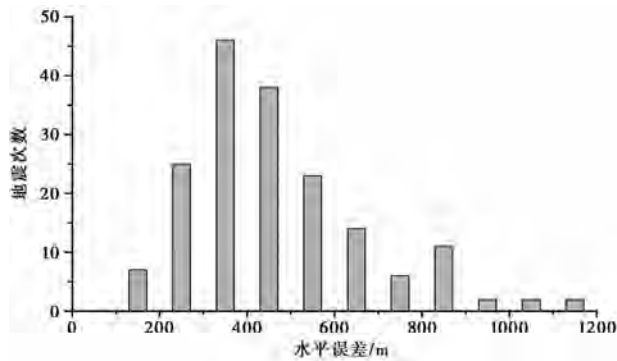


图2 重新定位的水平误差分布

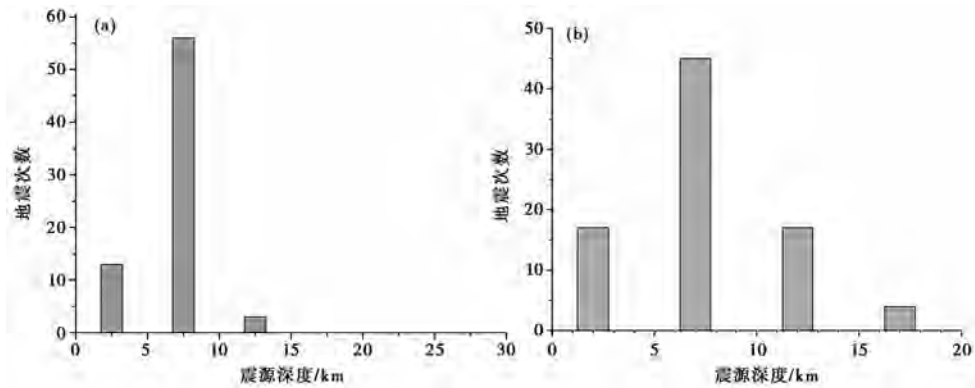


图3 前郭 $M_s5.8$ 地震序列重新定位前(a)、后(b)震源深度分布

重新定位后,1 级以上地震构成的余震区呈 NW 向分布,长轴约 11km,宽约 6km。余震区的西北端地震数量较少,震级也比较小。3 级以上余震大体呈近 EW 向分布。NE 走向的扶余-肇东断裂穿过余震区,但与余震区的走向不一致(图 4(a))。从震源深度剖面看(图 4(b)、4(c)),NW 走向的节面(即 AA'剖面)向西南倾,而 BB'剖面也反映出余震区南部的地震震源较深,而北部的较浅。分析认为,该序列的发震构造可能为 NW 走向的隐伏断裂。

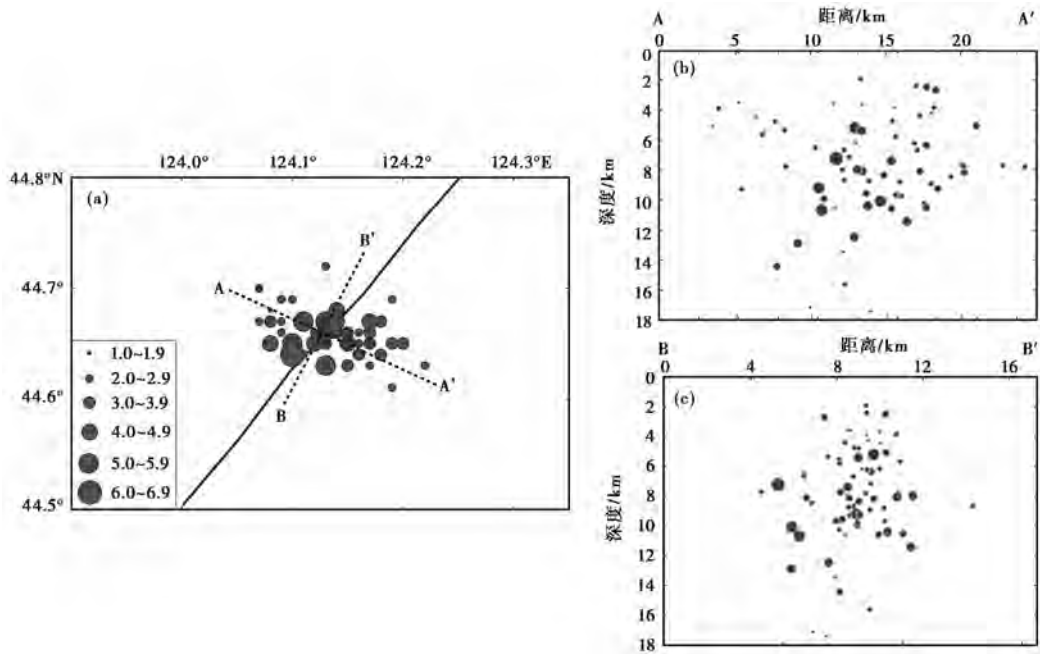


图 4 重新定位后的震中分布(a)与 AA'(b)、BB'(c)震源深度剖面

前郭地区位于松辽盆地中部。松辽盆地产生于燕山运动时期,从晚侏罗世到新生代,盆地经历了裂谷型断陷、大型拗陷和萎缩上升等阶段,是一个大型中生代陆相沉积盆地(胡望水等,2005)。全新世以来,盆地内的江河流向与湖沼分布都受到了 NW 向构造线性体的控制,这些线性体时隐时现地切过了大庆长垣表层第四系。在扶余卫星图像上,不仅可以看到乾安周缘大大小小星罗棋布的湖泡呈 NW 向串珠状排列,还可以看到靠近农安附近呈 NW 向展布的波罗泡群及其一带的全新统(Q_4)沉积,切割并覆盖了盆地东南隆起区中的 NE 向构造群,可见其形成时间最晚(祁林等,1992)。

在本次前郭 M_s 5.8 震群震中区附近,发育着 NW 走向的通榆-长春隐伏断裂,该断裂切过莫霍面,是控制中央凹陷带南部长岭凹陷的 2 个次级凹陷(即乾安次凹陷和黑帝庙次凹陷)的分界断裂。NNE 向大安-都德断裂从吉林省的大安一带向北到黑龙江省的都德一带,主要活动时期为中侏罗世到白垩纪及晚更新世末期,全新世以来也表现出较强的活动性。2005 年 7 月 25 日黑龙江林甸 5.1 级地震与该断裂的活动有关。2006 年 3 月 31 日乾安-前郭 5.0 级地震则发生在这 2 条断裂的交汇部位(盘晓东等,2007)。

结合精定位结果与区域构造,本文推测前郭 M_s 5.8 震群可能与 NW 走向的通榆-长春隐伏断裂活动有关。此外,中国地震局地球物理研究所韩立波利用波形拟合方法给出了震源

机制解(<http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/267992.shtm>),即序列首发5.5级地震的震源机制解为:节面Ⅰ(走向330°,倾角60°,滑动角50°),节面Ⅱ(走向209°,倾角48°,滑动角138°),如果以本文NW向的余震区分布作为参考,则主破裂面为节面Ⅰ,具有一定的逆冲分量,即西南盘向东北向走滑并兼仰冲。这与已有的该区域全新世NW向新构造处于隆起状态的结论相吻合(祁林等,1992)。

3 地震序列活动特征

3.1 序列时间分布

吉林区域地震台网提供的地震序列目录为 M_s 震级标度。图5为前郭地震序列震级-频度、 $M-t$ 图。由图5(a)可以看出,频度随震级的分布基本符合正态分布,峰值震级为 $M_s 0.4$,即该序列0.4级以上地震基本完整。由图5可见,该序列活动主要集中在主震后1.5个月内,大致可以分为3个起伏活动阶段:第1阶段为2013年10月31日~11月11日,第2阶段为11月17日~12月1日,第3阶段为12月2~13日。

在第1阶段,序列的第1个地震(10月31日11时03分35秒5.5级地震)发生后不足7min发生5.0级地震,其后又发生4次4级地震,6次3级地震,3次2级地震,最大震级4.5级。显然,3级以上地震,特别是4级地震明显偏多。此外,余震强度衰减不明显,维持在4.0~4.5级水平。

11月11日15时~17日08时序列1级以上地震平静近6天(图5(b)),同时1级以下地震也很少(图5(c)),之后序列活动开始增强。17日09时发生1.8级地震,开始进入第2阶段。19日发生3.4级地震,同时小震也开始增多,22日发生5.3级地震,23日发生5.8级序列最大地震,之后强度逐渐下降。

第3阶段,即12月2日开始序列再次出现增强活动,2日发生2次1.1级地震,3日发生1.4级地震,4日发生2.0级地震,之后1级以上地震平静3天多时间,7日15时后序列开始活动,发生1.5、3.1级地震,在此背景下发生了8日的4.3级地震。可见,在11月23日和12月8日2组起伏增强活动前,序列表现出平静-增强-发震与增强-平静-再增强-发震的特点。

3.2 震级-频度关系与序列衰减

Gutenberg等(1944)提出的G-R关系 $\lg N(M) = a - bM$ 是对于余震序列强度分布特征的最好描述。式中 N 是震级为 M 的地震次数; a 和 b 为统计系数,分别反映地震活动水平和强度分布特征。此外,修正的大森公式(Utsu,1957,1961) $n(t) = K(t+c)^{-p}$ 中的 p 值是对序列频次随时间衰减的定量描述。

作序列开始2013年10月31日~11月21日G-R关系图(图6(a)),取最低震级0.4级,利用最小二乘法计算 b 值。由图6(a)可见,与以往绝大多数序列不同,该序列可以分2个震级段分别拟合2条直线,其一震级为0.4~2.0级, b 值为0.56,相关系数为-0.996;其二震级为3.0~5.0级, b 值为0.40,相关系数为-0.991。拟合峰值震级右侧所有震级段, b 值为0.36,相关系数为-0.97。序列开始至12月7日(图6(b))的G-R关系图显示,与图6(a)相同,仍具有分段拟合特征。其中,低震级段(0.4~2.0级) b 值为0.65,相关系数-0.997;高震级段(3.0级以上) b 值为0.42,相关系数为-0.988。拟合峰值震级右侧所有震级段, b 值为0.37,相关系数为-0.97。序列开始至12月31日的G-R关系图显示(图6(c)),3级以上与3

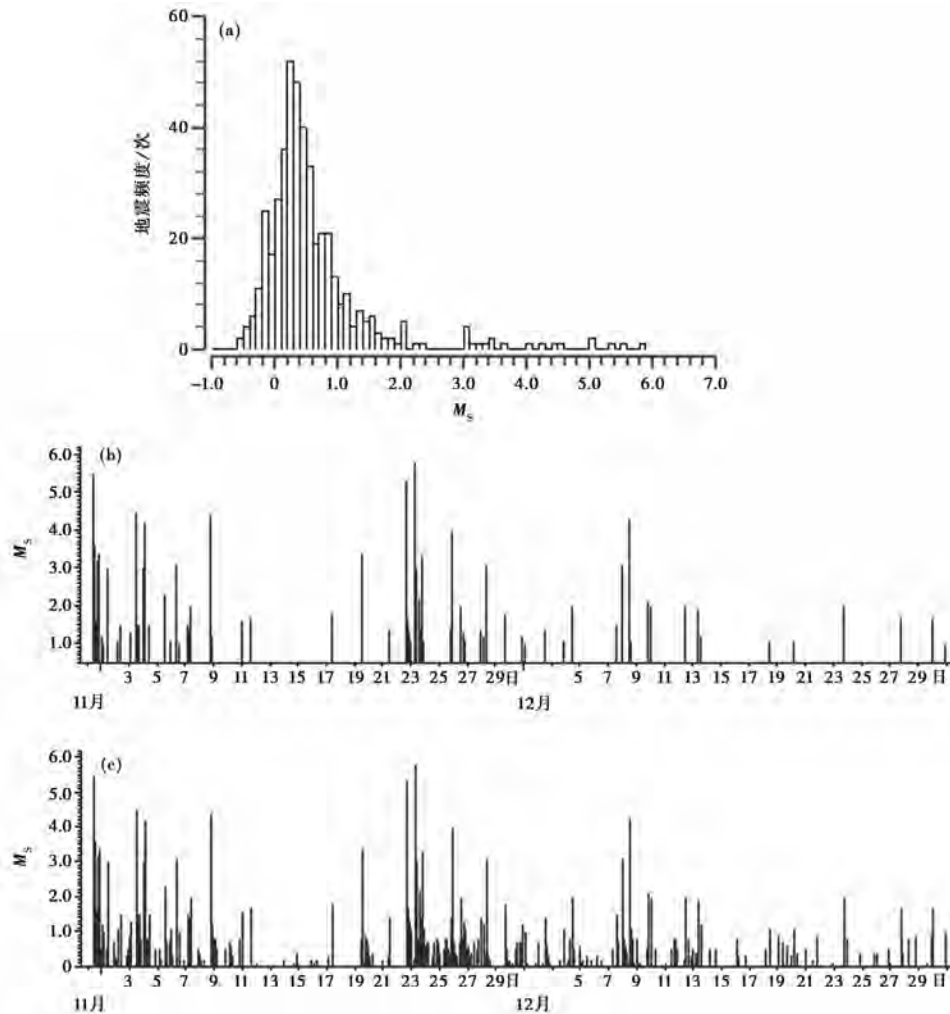


图5 前郭地震序列震级-频度(a)及2级以上(b)、1级以上(c)地震活动 $M-t$ 图

级以下地震依然不成比例,其中低震级段 b 值为 0.67,相关系数 -0.998 ;高震级段 b 值为 0.44,相关系数为 -0.992 。如果将整个序列拟合成 1 条直线,则 b 值为 0.38,相关系数为 -0.98 (图 6(d))。

吉林地震台网提供的序列目录显示,3 级以上与 3 级以下地震不成比例,G-R关系呈 2 个线性段的特点。值得注意的是,震级的测定会影响 G-R关系的拟合结果。为此,使用中国地震台网中心提供的月报目录(<http://10.5.202.22/bianmu/validate.jsp>)再作 G-R关系图,并用最小二乘法计算 b 值(图 7)。由图 7 可见,在 M_s 5.8 地震发生前(2013 年 10 月 31 日~11 月 21 日),G-R关系图也显示出高震级段与低震级段地震不成比例的特点,即呈 2 个线性段(图 7(a)); M_s 5.8 地震后,这种现象有所减弱(图 7(b)、7(c))。综合 2 套目录的结果认为,在序列早期(M_s 5.8 地震前)2 个线性关系段的存在是本次震群序列的主要特点。从较长时段看,与低震级段相比,序列 4 级以上地震明显偏多。此外,2 套目录结果均显示,在震后不

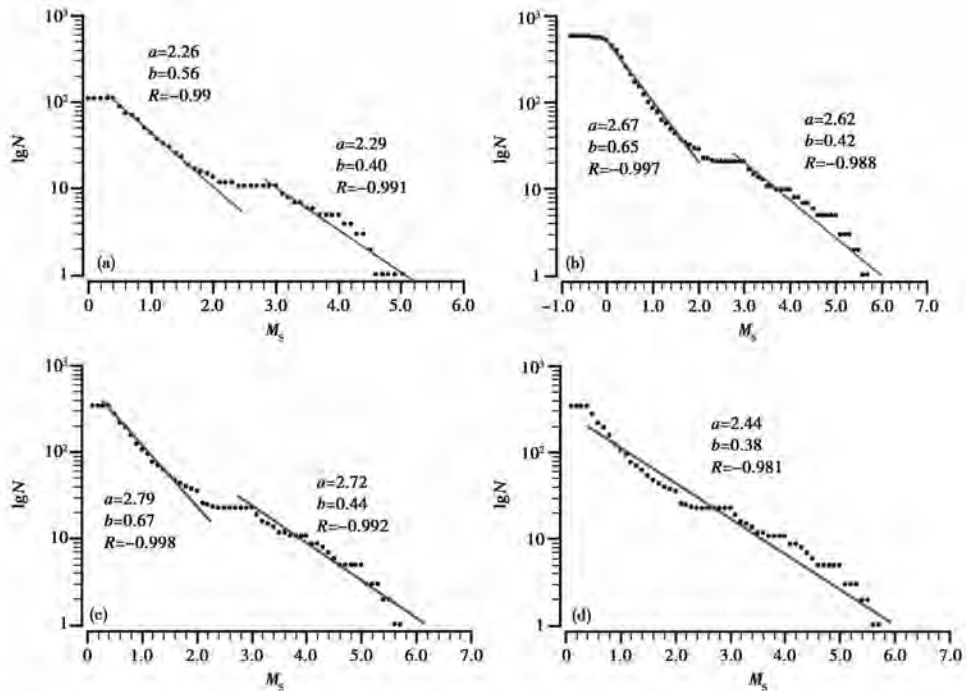


图6 使用吉林地震台网目录的序列不同阶段G-R关系

(a)2013年10月31~11月21日;(b)2013年10月31日~12月7日;

(c)2013年10月31日~12月31日;(d)时段同(c)

同时段序列 b 值都非常低,为 0.36~0.40。远低于中国大陆及各区中强地震序列 b 值的平均值(蒋海昆等,2007)。

在大森余震衰减定律(Omori,1894a、1894b)的基础上,刘正荣(1984)在研究有前震的地震的预测问题时,给出计算地震频度衰减系数 h 值的方法,并据此进行序列类型判定。当 $h \leq 1.0$ 时,地震序列为前震序列;当 $h > 1$ 时,地震序列一般为余震序列,可以预测强余震。使用吉林地震台网给定的地震目录,取最低震级 0.4 级,计算不同时段序列的 h 值。震后 7 天, h 值为 1.39,预测强余震为 4.3 级;震后 9 天, h 值为 1.21,预测强余震为 4.8 级;震后 23 天(2013 年 10 月 31 日~11 月 22 日,即 $M_s 5.8$ 地震前), h 值为 1.11,预测强余震为 5.0 级; $M_s 5.8$ 地震后(11 月 23 日~12 月 31 日) h 值为 1.43,预测强余震为 3.2 级。可见,在 $M_s 5.8$ 地震前, h 值预测的结果与实际偏差较大,但值得注意的是,在 $M_s 5.8$ 地震前 h 值有变小的趋势,且接近 1;而 $M_s 5.8$ 地震后 h 值明显增大。

取最低震级 0.5 级,分别计算 2013 年 10 月 31 日 5.5 级地震后 15 天(10 月 31 日~11 月 14 日)和 11 月 23 日 $M_s 5.8$ 地震后 15 天(11 月 23 日~12 月 7 日)的衰减系数 p ,结果分别为 0.76、1.17。可见,5.5 级地震后的早期阶段序列衰减比较慢, $M_s 5.8$ 地震后序列衰减相对较快。

4 小结

(1)精定位结果显示,余震区呈 NW 走向分布,长轴约 11km,短轴约 6km。震源深度为

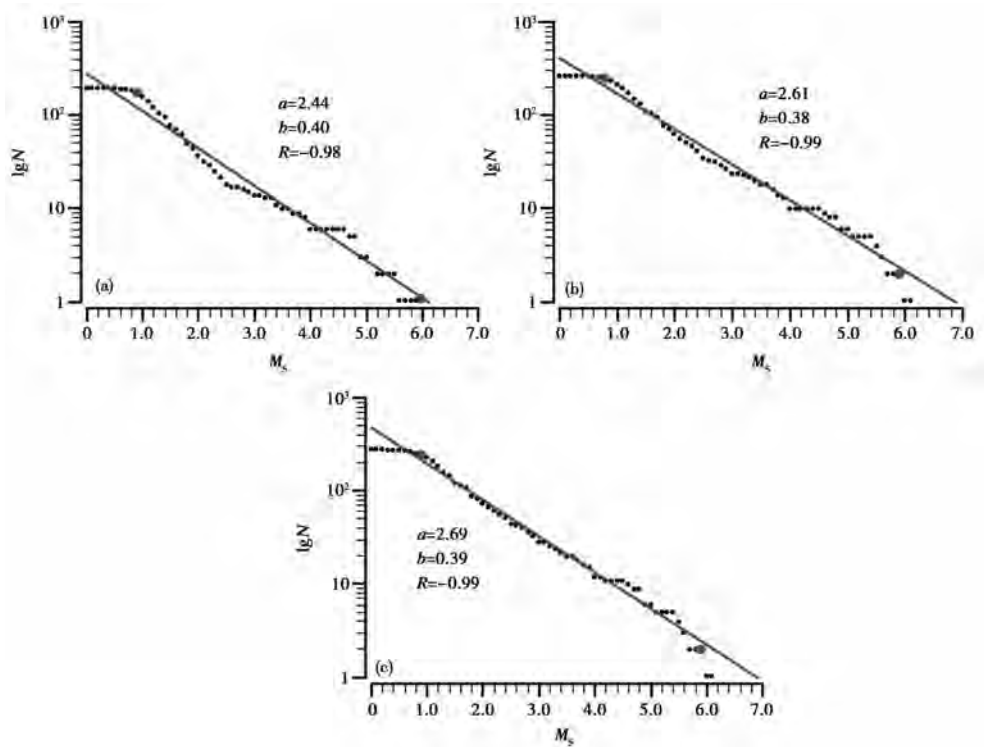


图7 使用中国地震台网中心月报的序列不同阶段 G-R 图
 (a) 2013 年 10 月 31 日~11 月 21 日; (b) 2013 年 10 月 31 日~12 月 7 日;
 (c) 2013 年 10 月 31 日~12 月 31 日

5~15km, 其中 66% 的 3 级以上地震震源深度为 8~15km。结合区域构造特征认为, 该震群可能与 NW 走向的通榆-长春隐伏断裂活动有关。

(2) 序列共包含 5 级以上地震 5 次, 均集中在主震后 1 个月内发生。具有 5 级地震频次高、发震时间集中的特点。序列主要起伏活动可以分为 3 个时段: 主震后 10 天, 余震强度衰减不明显; 此后的 2 次起伏活动, 地震活动分别表现为平静-增强(震级爬升)-发生强震和增强(震级爬升)-平静-再增强(震级爬升)-发生强震的特点。

(4) 在序列早期(M_s 5.8 地震前), 序列 3 级以上与 3 级以下地震频度不成比例, G-R 关系呈现 2 个线性段的特点。与低震级段相比, 序列 4 级以上地震明显偏多。序列 b 值低, 不同时段计算结果为 0.36~0.4, 远低于中国大陆及各构造区中强地震序列 b 值的平均值(蒋海昆等, 2007)。

(5) 在 M_s 5.8 地震前 h 值有变小的趋势, 且接近 1; 而 M_s 5.8 地震后 h 值明显增大。5.5 级地震后的早期阶段序列衰减比较慢, p 值为 0.76; M_s 5.8 地震后序列衰减较快, p 值为 1.17。

参考文献

- 邓起东、张培震、冉勇康等, 2002, 中国活动构造基本特征, 中国科学: D 辑, **32**(12), 1020~1032。
 房立华、吴建平、王未来等, 2013, 四川芦山 M_s 7.0 地震及其余震序列重新定位, 科学通报, **58**(20), 1901~1909。
 胡望水、吕炳全、张文军等, 2005, 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨, 地质科学, **40**(1), 16~31。

- 黄媛、吴建平、张天中等,2008,汶川 8.0 级大地震及其余震序列重新定位研究,中国科学:D 辑,**38**(10),1242~1249。
- 蒋海昆、傅征祥、刘杰等,2007,中国大陆地震序列,1~175,北京:地震出版社。
- 焦远碧,1998,地震序列类型、地震序列 b 值与地震大形势关系初探,地震,**18**(1),33~40。
- 刘殿秘、韩立国、翁爱华等,2007,松辽盆地西北边界带部分地球物理特征,地球物理进展,**22**(6),1722~1727。
- 刘蒲雄,1992,利用地震活动图像判断现场震情趋势,地震,**12**(3),1~10。
- 刘莎、吴鹏、杨建思等,2014,吉林省前郭地区地震各项异性初步探讨,地球物理学报,**57**(7),2088~2098,doi:10.6038/cjg20140706。
- 刘洋、刘财、杨宝俊等,2008,松辽盆地北部纵波速度区域特征分析及深层油气问题,地球物理进展,**23**(3),785~792。
- 刘正荣,1984,根据地震震度衰减预报地震的工作细则,地震,**4**(1),32~37。
- 盘晓东、王军亮、孙旭丽等,2007,乾安-前郭 5.0 级地震的构造背景分析,东北地震研究,**23**(1),8~15。
- 祁林、韩广林、张惠,1992,松辽盆地喜山运动期地应力场演化对油气运聚的影响,石油与天然气地质,**13**(4),398~407。
- 王连君,2003,松辽盆地北部的西部断陷营城组沉积特征,大庆石油学院学报,**27**(1),1~3。
- 王未来、吴建平、房立华等,2012,2010 年玉树 M_s 7.1 地震及其余震的双差定位研究,中国科学:D 辑,**42**(7),1037~1046。
- 王未来、吴建平、房立华等,2014,2014 年云南鲁甸 M_s 6.5 地震序列的双差定位,地球物理学报,**57**(9),3042~3051,doi:10.6038/cjg20140929。
- 吴开统、焦远碧、吕培苓等,1990,地震序列概论,97~118,北京:北京大学出版社。
- 易桂喜、龙锋、闻学泽等,2015,2014 年 11 月 22 日康定 M 6.3 地震序列发震构造分析,地球物理学报,**58**(4),1205~1209,doi:10.6038/cjg20150410。
- 云金表、殷进垠、金之钧,2003,松辽盆地深部地质特征及其盆地动力学演化,地震地质,**25**(4),595~608。
- 张风雪、吴庆举、李永华,2013,中国东北地区远震 P 波走时层析成像研究,地球物理学报,**56**(8),2690~2700,doi:10.6038/cjg20130818。
- 张四昌、刁桂苓、王绍晋等,1994,1976 年龙陵震群序列的破裂特征,中国地震,**10**(2),152~159。
- 张竹琪、陈永顺、林间,2008,1997 年伽师震群中相邻正断层和走滑断层之间相互应力作用,中国科学:D 辑,**38**(3),334~342。
- Geiger L,1912,Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only, Bull St Louis Univ,**8**,60~71.
- Gutenberg B,Richter C F,1944,Frequency of earthquakes in California, Bull Seism Soc Am,**34**,185~188.
- Klein F W,2007,User's guide to Hypoinverse - 2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes, U. S. Geological Survey Open-File Report.
- Omori F,1894a,On after-shocks, Rep Imp Earthquake Inv Com,(2),103~138.
- Omori F,1894b,On after-shocks of earthquakes, J Coll Sci Imp Univ,(7),111~200.
- Utsu T A,1957,Magnitudes of earthquakes and occurrence of their aftershocks, Zi Sin,**2**(10),35~45.
- Utsu T A,1961,Statistical study on the occurrence of aftershocks, Geophys Mag,**30**,521~605.
- Waldhauser F, Ellsworth W L,2000, A double difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California, Bull Seism Soc Am,**90**(6),1353~1368.
- Waldhauser F, Ellsworth W L,2002, Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations, J Geophys Res,**107**(B3), ESE 3-1~ESE 3-15.

Study on the 2013 Qianguo $M_s5.8$ earthquake swarm sequence, Jilin, China

Xue Yan¹⁾ Zeng Xianwei²⁾ Liu Guiping¹⁾ Cai Honglei³⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China

3) Earthquake Administration of Jilin Province, Changchun 132000, China

Abstract The Qianguo $M_s5.8$ earthquake sequence from October 31, 2013 to April 30, 2014 were relocated and the seismicity characteristics of the earthquake sequence offered by the Jilin Digital Seismic Network were studied. The results show that the aftershock area is about 11km long in NW strike and 6km width in NE direction. The focal depth is mainly in 5~15km. Taking into account the regional structure features, the seismogenic structure involves the blind fault——The Tongyu-Changchun fault in NW striking. The sequence is characterized by low b -value, high-frequency of shocks with $M_s \geq 5.0$ and a concentrated temporal distribution. The main activity of the sequence involves three periods. Ten days after the beginning, the attenuation of aftershock density was not obvious. For the two stages later, the seismicity shows characteristics of quiescence-enhancement-earthquake and enhancement quiescence-reenhancement-earthquake. The earthquake frequency with $M \geq 3.0$ and the frequency with $M < 3.0$ are disproportionate. The gram of G-R relationship shows two linear segments in the high and low magnitude phase respectively. Before the $M_s5.8$ earthquake, the h -value was getting smaller and closed to 1, while after the $M_s5.8$ shock, the h -value increased significantly. The p -value, a parameter of modified Omori formula, is small ($p = 0.76$) 15 days after the $M_s5.5$ earthquake, and this means that the sequence decays slowly. However after the $M_s5.8$ earthquake, the sequence decays faster, and p -value is 1.17.

Key words: Qianguo earthquake swarm Relocation Earthquake sequence Focal depth Parameters of seismic sequence