贾若、刘俊清、盘晓东等,2016,结合应力触发与双差重定位的前郭震群发震构造讨论,中国地震,32(4),663~673。

结合应力触发与双差重定位的 前郭震群发震构造讨论

贾若 刘俊清 盘晓东 康建红 盛俭

吉林省地震局,长春市净月大街 5788 号 130117

摘要 2013 年 10 月 31 日在吉林省松原市前郭尔罗斯自治县发生了 5 级强震群活动(以下 简称前郭震群),此次震群发生在 NE 向松原-肇东断裂和 NW 向查干泡-道字井断裂交汇处。由 于震区未见明显的地表破裂,难以直接判断哪条断裂为主要的发震构造。为此,采用双差定位 法对前郭余震序列 692 个地震事件进行重新定位,结果显示,3 级以上强余震优势展布方向不明 显,仅小震活动略呈 NW 向展布特征。由此,本文基于静态库仑应力触发理论,针对 10 月 31 日~11 月 23 日的 4 次 5 级主震,分别以 NW 向和 NE 向作为发震面,计算了 4 次 5 级主震的叠加 ΔCFS 最优解,力图通过对 ΔCFS 最优解分布与重新定位后的余震活动分布的空间相关性分析, 讨论前郭震群的发震构造。结果显示,沿 NW 向震源节面在研究区产生的库仑应力变化最优解 分布在主震破裂面上显示为应力加载,NE 向节面则显示为应力卸载,同时 NW 向的叠加 ΔCFS 最优解在震中区大部分位置达到经验触发阈值(0.01~0.10MPa),基本控制了全部的余震活动。 由此,判断此次前郭强震群的主发震构造为 NW 向查干泡-道子井断裂的可能性较大。

关键词: 前郭震群 发震构造 双差定位 ΔCFS 最优解 「文章编号]1001-4683(2016)04-0663-11 「中图分类号]P315 「文献标识码]A

0 引言

2013 年 10~11 月吉林省松原市前郭尔罗斯自治县发生的 5 级强震群活动(以下简称前 郭震群),是松辽盆地内部罕见的强震群型活动,1 个月内先后发生 5 次 5 级以上地震,分别 是 10 月 31 日 M_s5.5 和 M_s5.0、11 月 22 日 M_s5.3、以及 11 月 23 日 M_s5.8 和 M_s5.0 地震。

吉林地区总体上受近 EW 向挤压为主的构造应力场作用(谢富仁等,1989;高立新, 2008;王兆国等,2009;吴宝峰等,2014)。在此背景下,吉林地区共发育4条具有一定规模的 NE 向断裂,由西至东依次是嫩江断裂、松原-肇东断裂、依兰-伊通断裂及密山-敦化断裂(邓 起东等,2007)。历史上,吉林省中东部地震活动主要集中在依兰-伊通断裂带和密山-敦化断 裂带附近,西部地震活动较少,主要分布在松辽盆地断陷附近(傅维洲等,1999;王兆国等, 2009;李钟根,2013)。穿过此次前郭震群震中区主要有2条活动断裂,即 NE 向松原-肇东断

[[]收稿日期] 2016-05-17; [修定日期] 2016-09-01

[[]项目类别] 2016 年度震情跟踪定向工作任务(2016010125)资助

[[]作者简介] 贾若,男,1989年生,固体地球物理学硕士,主要从事测震学、数字地震学方法的研究工作。 E-mail:1910369173@qq.com

裂与 NW 向查干泡-道子井断裂,余震活动集中分布在 2 条断裂交汇处,但直至目前尚不清 楚哪条断裂为该震群的主要发震构造。对大地震而言,一般情况下可以直接通过地质分析 来判断发震构造(陈恩民等,1979、1985、1989;高祥林,1991;徐锡伟等,1991;马瑾,1992;王 志才等,1999;钱洪等,1999;李传友等,1999)。但前郭地震震级不高,对前郭震区的地质考 察也并未发现明显的地表破裂(李传友等,1999)。进一步研究显示,余震序列的空间分布通 常对于主震发震构造有一定指示意义,即余震活动通常沿着主震破裂面呈线性分布(傅维洲 等,1999),基于 Waldhauser 等(2000)提出双差定位方法,一些研究者通过重新定位后余震 活动的空间分布及历史地震活动特征,分析中强地震发震构造(杨智娴等,2003;万永革等, 2008;王兆国等,2009;赵博等,2011;徐锡伟等,2013;房立华等,2014;刘芳,2014;刘亢等, 2015;李海兵等,2015)。一般而言,重新定位后的余震空间分布形态能够更好地体现主震破 裂走向,指示出地下断层可能的分布状况。

本文基于双差定位法对前郭部分余震进行重新定位,重点讨论此次震群,尤其是11月 23 日 M_s5.8 地震的发震构造,主要目的是甄别 NE 向和 NW 向 2 条断裂中可能的发震断层。 重新定位结果显示,所选小震的分布整体上略有 NW 向展布特征,但进一步观察发现,参与 定位的序列中3级以上余震数量不多,定位后的优势方向亦不明显。换言之,对于此次前郭 震群,单纯由序列小震重定位结果判断主震发震构造,论据尚显不足。为此,本文尝试进一 步结合同震静态库仑应力变化结果,分析地下可能的破裂情况。岩石破裂力学的静态库仑 应力触发理论一直以来用于分析主震对余震的触发影响及空间分布的控制作用(万永革等, 2009)。早期,基于人工地震模拟,采用弹性位错模型计算库仑应力增量并检查后续地震相 对于库仑破裂应力增量的空间分布,发现大部分余震发生在同震库仑应力变化为正的区域 (Chinnery, 1963; Erickson, 1986; Okada, 1992)。King 等(1994)通过给定的构造应力场方向 及相关参数,提出一种计算同震库仑应力变化在最优接收节面上分布(Coulomb Failure Stress changes on opt-orientated faults)的方法,简称 ΔCFS 最优解。大量研究显示,主破裂面上的同 震 ΔCFS 最优解通常为正值,且其空间分布与余震活动相吻合(Okada,1992;King et al,1994; Hardebeck et al, 1998; Toda et al, 1998, 2003, 2005; Harris, 1998, 2004; Hainzl et al, 2010; 万永 革等,2002;华卫等,2009;宋金等,2011;蒋海昆等,2012)。由此,本文分别选择 USGS 给出的 $M_{s}5.8$ 地震震源机制解中的 2 条节面作为发震断层参数,计算 ΔCFS 最优解。2 条震源节面 走向分别是 NW 向和 NE 向,代表了震区 2 条可能的发震断裂。分析两组 ΔCFS 最优解与余 震序列重定位分布的空间相关性,认为 ΔCFS 结果与余震活动正相关程度更高的震源节面 方向为可能的发震构造走向。

1 前郭震群资料选取

根据吉林地震台网记录,自 2013 年 10 月 31 日 M_s5.5 首震以来,截至 2016 年 3 月 31 日 前郭震群共记录到 M_s0 以上地震 870 次,5.8 级主震发生于 2013 年 11 月 23 日。其中 0~0.9 级地震 714 次,1.0~1.9 级地震 104 次,2.0~2.9 级地震 20 次,3.0~3.9 级地震 17 次,4.0~4.9 级地震 10 次,5.0~5.9 级地震 5 次。考虑到此次震群的首震震中位置、震级强度、破裂尺度、 余震空间分布范围及震区内活动断层分布等情况,确定研究区为 123.2°~125.0°E,44.2°~ 45.2°N。并进一步将研究区划分为 0.1°(经度)×0.1°(纬度)的 180 个空间网格,用于计算 ΔCFS 最优解。目前基于地质勘察结果,穿过研究区的主要活动断裂有 NE 向的松原-肇东断裂、NW 向的查干泡-道子井断裂以及平行于松原-肇东断裂并位于其北部 30km 左右的 NE 向的克山-大安断裂(图 1)。



图 1 2013 年 10 月 31 日前郭 5 级震群序列的震中分布 吉林地震台网 2013 年 10 月 31 日~2016 年 3 月 31 日记录 ①松原-肇东断裂;②查干泡-道子井断裂;③克山-大安断裂

此次强震群中几次 5 级地震的震源参数存在多种结果,各结果间有一定偏差,另外对松 辽盆地地区应力作用性质及盆地内部地震机理等问题也有不同理解(谢富仁等,1989;傅维 洲等,1999;李传友等,1999;王兆国等,2009;余中元,2015)。本文用 2013 年 10 月 31 日 5.5 级首震到 11 月 23 日 5.8 级地震之间的 4 次 5 级强震的震源机制解计算 ΔCFS,其中综合了 美国地质调查局(USGS)及中国地震台网中心(CENC)发布的结果(表 1)。

表 1		前郭震群部分 5 级以上地震震源机制解*										
震级 M _s	矩震级 M _w	发震时刻 (北京时) (年-月-日 时:分)	震中坐标		震源	第一组节面解/(°)			第二组节面解/(°)			4 泥
			E/(°)	N/(°)	休度 /km	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	木你
5.1	5.2	2013-10-31 11:03	124.02	44.75	12	335	44	51	203	57	121	USGS
5.5	—	2013-10-31 11:03	124.20	44.60	8	330	60	50	209	48	138	CENC
4.7	4.9	2013-10-31 11:10	124.04	44.63	13	304	73	3	213	87	163	USGS
4.9	5.0	2013-11-22 16:22	124.05	44.73	12	323	47	42	202	61	129	USGS
5.3	5.3	2013-11-23 06:04	124.06	44.65	12	328	47	34	213	65	132	USGS
5.8		2013-11-23 06:04	124.10	44.60	12	210	80	150	306	61	12	CENC

注:*资料来源:美国地质调查局(USGS)http://www.globalcmt.org/;中国地震台网中心(CENC)

关于 ΔCFS 最优解的计算,还需确定研究区的构造应力场分布。基于板块构造运动的 分析,一些研究结果显示,中国东北地区主要为 NE 向主挤压的构造应力场环境(高立新, 2008;王兆国等,2009;吴宝峰等,2014)。本文根据谢富仁等(1989)和"中国大陆地壳应力环 境基础数据库"^①给出的结果,确定华北和东北地区区域现代最大水平主压应力优势方位为 NEE 方向,并根据 Wan(2010)给出的中国大陆构造应力场分布基本情况确定了具体参数。 需注意的是,近期有研究者认为,2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级地震对华北和东北地区构造 应力场产生了近 EW 向的拉张调整作用,要待一定时间后恢复(谭成轩等,2015)。对此可作 进一步讨论,目前本文暂未考虑。

2 计算结果及发震构造讨论

2.1 前郭震群余震重新定位

2.1.1 双差定位法简介

地震定位法经历了从几何作图定位到计算机定位,定位精度逐渐提高的过程。几何作 图法包括和达法、高桥法等,定位精度很低。1912 年德国地震学家 Geiger 提出了使用最小 二乘法解参数方程的经典定位方法,大大地提高了定位精度。在此基础上,地震学家提出了 一系列改进的方法,包括 HYPO71、HYPO81、HYPOINVERSE 等。20 世纪 70 年代在 Geiger 法的基础上发展起来一种相对定位方法——主事件定位法,用来研究较小范围内地震活动 的精确定位,如水库地震、震群等。Waldhauser 等(2000)在主事件定位法的基础上发展了另 一种相对定位方法,即双重残差定位法,又称双差地震定位法(DD)。该方法通过对两次地 震事件的观测到时差与理论到时差的残差计算,搜索最小残差,并限定重新定位后的各事件 平均位移 Σ Δx 为 0,最终确定更准确的震源位置参数(图 2)。目前该方法已经被国内外地 震学家广泛应用。



图 2 双差定位方法原理

2.1.2 余震重新定位结果分析

基于上述双差定位法,采用目前较为流行的 HypDD 软件(Waldhauser,2001)对前郭余震 序列进行重新定位,地震波形取自吉林台网地震记录。由于余震震级太小,故取 M_L为0级 以上地震 908 个,对一些初始定位残差大的地震进行震相重新拾取后形成观测报告,最后参 与定位的地震共计 692 个,震相数据 13922 条。结果显示,平面余震呈N43°W密集条带状分

① http://www.eq-icd.cn/webgis/picture.htm

布,密集条带 NW 向长约 9km,与其正交的 NE 向条带长约 5km(图 3(a))。序列中 80%的地 震分布在 8~10km 深度范围内。重定位结果 E-W、N-S 和 U-D 三个方向上大致的定位精度 分别为 0.9km、0.7km 和 1.2km。3 级以上余震大体呈近 EW 向分布,NE 向的松原-肇东断裂 虽穿过余震区,但与余震区的走向不一致。从互相垂直的 NW 向和 NE 向 2 个震源深度剖面 看,也反映出余震区 NW 向剖面(A-A')展布较长,NE 向剖面(B-B')展布较短(图 3(b)。但 目前从余震序列的时间演化上未见比较明显的分布规律,同时参与定位的 3 级以上余震活 动较少,且空间优势展布方向不明显,考虑这可能由样本量过少、选择的定位参数有误差等 因素所致。



图 3 前郭地震序列重定位结果 五角星为 2013 年 11 月 23 日 M_s5.8 主震;F-5-1:松原-肇东断裂;F-5-2,F-5-2':查干泡-道字井断裂

2.2 ΔCFS 最优解计算及发震构造讨论

2.2.1 ΔCFS 最优解计算方法简介

地震产生的应力变化可以通过静态库仑破裂应力变化(Static Coulomb Failure Stress Changes,简写为 ΔCFS)进行定量计算,通常将前期地震产生的应力张量投影到所关注的断层面和滑动方向上,通常称之为接收断层。考虑到正应力、孔隙流体压力和摩擦系数的影响,得到所关注接收断层在指定滑动方向上的库仑破裂应力变化(Okada,1992;Toda et al, 1998、2003、2005)。进一步研究发现,主震产生的库仑应力变化对后续余震活动有应力触发作用。所谓地震的"应力触发",是指前期发生的地震在研究区产生的应力加载或卸载变化(正值或负值),对研究区未来地震活动的促进或抑制作用(Harris,1998)。时至今日,描述物体趋近破裂程度的库仑破裂应力变化已发展为(Harris,1998)

$$\Delta CFS = \Delta \left| \vec{\tau} \right| + \mu' \Delta \sigma_n \tag{1}$$

其中, $\mu' = \mu(1 + \beta')$,称为视摩擦系数,包括了孔隙流体和断层面上的介质特性影响。假定 后续地震断层面的几何参数和滑动方向已知,则式(1)可推导为

$$\Delta \text{CFS} = \Delta \tau_{\text{rake}} + \mu' \Delta \sigma_{\text{n}} \tag{2}$$

式中, $\Delta \sigma_{rake}$ 和 $\Delta \sigma_{a}$ (拉张为正)分别为被触发地震断层面滑动方向上的静态剪切应力变化和静态正应力变化。通常将 μ' 取为常数,一般取 μ' 为 0.4~0.6(Okada,1992;Toda et al,1998、2003、2005、2008)。

King 等(1994)考虑区域构造应力场影响,可以计算 ΔCFS 沿着某一优势接收断层方向

上的解。假定在二维情况下,即只考虑构 造应力场的最大主应力和最小主应力对 区域断层滑动的影响,中间主应力沿断层 面垂直于滑动方向,对滑动无作用。假定 该地区构造应力与地震产生的2条最优 节面中与主震破裂滑动矢量夹角最小的 节面为余震破裂面(万永革等,2006),在 此破裂面上计算的ΔCFS即为ΔCFS最优 解,该破裂面也可称为最优接收断层节 面,其分布取决于主震断层滑动产生的应 力场及构造应力场的空间分布,以及二者 的相对空间位置关系的影响(图4,King



图 4 用 1 计算 ΔCF3 取优牌的坐标系统 示意图(King et al,1994)
以断层面上的压应力及右旋剪切应力方向为正方向

et al,1994)。统计结果显示, ΔCFS 最优解的正值变化分布情况通常可作为主震断层破裂情况的反映,同时也是余震发生的集中区域(King et al,1994; Toda et al,1998、2003、2005、2008; 万永革等,2002; 华卫等,2009; 宋金等,2011)。

根据 King 等(1994)的研究结果,最优接收断层节面上的绝对库仑应力值为

$$\sigma_f^{\text{opt}} = \tau_{13} - \mu' \sigma_{33} \tag{3}$$

式中, σ₃₃、τ₁₃分别为最优接收节面上的正应力与剪切应力。(3)式给出的解同时包括了 2 个可能的最优节面方向,2 个节面的不同之处体现在剪切分量的左旋性和右旋性。(3)式描述了应力的绝对值,基于前文所述式(2)的形式,将(3)式求差值变化,即可计算 ΔCFS 最优 解。

2.2.2 M_s5.8 地震的 ΔCFS 最优解计算及发震构造讨论

用上述方法,基于 USGS 给出的震源机制解计算 2013 年 11 月 23 日前郭 5.8 级地震 ΔCFS 最优解分布。

首先,由 Wells 等(1994)给出的表征震级与断层破裂关系的经验公式为

$$M_{\rm w} = a_1 + b_1 \lg(\rm{SRL}) \tag{4}$$

$$\lg(RW) = a_2 + b_2 M_W$$

其中,*SRL*(surface rupture length)为沿断层面水平走向的最短破裂长度,RW(downdip rupture width)为沿断层面深度方向的最短破裂宽度。应用该式模拟 5.8 级地震的同震破裂过程。Wells 等(1994)给出了参数 a_i 、 b_i 在不同断层类型下的统计值分布,由震源机制解可得本次 5.8 级地震以逆冲为主,逆冲断层的 a_1 、 b_1 统计值为 4.78~5.22、1.06~1.38, a_2 、 b_2 统计值约为 -1.41~-1.81、0.38~0.44。本文选择了多组 a_i 、 b_i 值进行测试计算,参考前郭震区实际余震的空间展布尺度,最终确定 a_1 =4.78、 b_1 =1.08; a_2 =-1.61、 b_2 =0.41;震级 M_w =5.8,计算得到 SRL≈9.17km,RW≈5.86km;进而,分别选择震源机制解的 NW 向和 NE 向 2 个节面方向作为发震断层面的走向,由前文表 1 中所列 USGS 的结果,2 条节面的走向分别为 NNE 向 213° 和 NWW 向 328°;同震破裂面模拟采用单侧破裂模式,即认为断层面从震源出发朝着某单一方向破裂,破裂方向分别为 SE→NW、NE→SW;断层面深度取 10km(参考余震重新定位后的优势分布深度)(图 5)。



图 5 2013 年 11 月 23 日 M_s 5.8 地震同震 Δ CFS 最优解分布 (a) NW 向节面、(b) NE 向节面,黑色圆圈为重定位后的余震分布; 绿色实线为穿过研究区的 3 条断裂; Δ CFS 计算深度为 8km; μ =0.4

基于上述同震破裂过程,应用 Coulomb3.3 软件计算 Δ CFS 最优解,参考 Wan(2010)给出的中国大陆构造应力场分布,确定所选研究区的构造应力场分布如下:最大主应力 S_1 的 $A_2 = 91^\circ$, $P_1 = 14^\circ$;中间主应力 S_2 的 $A_2 = 184^\circ$, $P_1 = 69^\circ$;最小主应力 S_3 的 $A_2 = 349^\circ$, $P_1 = 20^\circ$ (Wan, 2010)。接收断层走向由前文所述方法确定(图 4),滑动角每隔 10°搜索一次,确定最优接收断层面全部参数。计算结果显示,沿 NW 向的发震节面计算的 Δ CFS 最优解分布在主震源区及 2 条断裂交汇处应力加载,即图 5(a)中红色区域,根据上述余震重定位结果,余震分布也主要集中在此区域;而沿 NE 向节面计算的 Δ CFS 最优解在断层面北端显示为应力卸载(图 5(b)),与余震分布相关性较差。说明在上述构造应力场的条件下,NE 向滑动断层对区域余震活动的应力触发作用较差,而节面为 NW 向的震源对余震空间分布的控制作用更明显。

为了进一步验证 NW 向震源节面的 ΔCFS 最优解对余震活动的控制,我们同时讨论了 ΔCFS 结果随深度的变化。由前文所述,我们给定的震源深度为 10km,故选择计算库仑应力 变化的 4 个深度分别为(a)6km、(b)8km、(c)10km、(d)12km,即跨越断层面在上下两盘对称分布。图 6结果显示,在上盘区域,即据(a)、(b)计算的同震 ΔCFS 最优解分布与余震空 间分布正相关程度较高;而下盘区域,即(c)、(d)结果较差。也就是说 ΔCFS 计算结果在深 度变化跨越断层面时出现明显变化,这与余震定位结果相一致,即余震区深度范围(8~10km)也主要分布在主震断层面上盘区域。而在确定的余震区深度范围内(即图 6(a)、(b)),深度变化则对 ΔCFS 最优解的分布形态影响不大,只是量值上有所变化。

然而进一步观察发现,虽然图 6(a)、(b)的 NW 向发震面 ΔCFS 最优解正值分布与余震 分布对应较好,但应力变化量总体较低,0.1MPa 左右的 ΔCFS 主要分布在破裂面上,破裂面 周围区域降至 0.01MPa 以下,未达到库仑应力的经验触发阈值 0.01~0.10MPa(Reasenberg et al,1992;King et al,1994;Hardebeck et al,1998;Harris,1998;Stein,1999;万永革等,2000)。为 了解释这一现象,我们计算了 2013 年 10 月 31 日~11 月 23 日 4 次 5 级地震后叠加的 ΔCFS,

4 期



(a) 6km; (b) 8km; (c) 10km; (d) 12km

并观察其变化。对于这 4 次地震震源节面的选择,均采用震源机制解中的 NW 向节面,其中 破裂面参数,即走向、倾角、滑动角取自 USGS 的结果,震中位置、震源深度参考双差重定位 的结果,破裂尺度采用统一的经验公式给出,其他参数不变。计算结果显示,叠加后的 ΔCFS 整体空间展布上无明显变化,但量值有明显提高,余震分布所及之处基本全部达到 0.1MPa 以上,即经验阈值以上(图 7)。这或可说明多次 5 级强震使前郭震区的应力持续增强,并再 次证明了 NW 向断层的破裂滑动有利于该区域产生大量余震活动。

综上所述,前郭震群余震重新定位结果显示,序列中3级以下小震沿NW向优势分布,3 级以上余震较少,优势展布方向不明显;以M_s5.8 地震NW向震源节面计算的库仑应力变化 最优解与重新定位结果空间正相关程度更高;不同深度的ΔCFS结果显示,在断层面上盘区 域,ΔCFS空间分布形态变化不大,且与余震活动较为相符,但应力变化量值总体较低;4次5 级地震对震区产生的累加ΔCFS最优解在量值上有明显提升,大部分地区达到触发阈值,基 本控制了震区余震活动的空间分布形态。参考震区历史强震活动特征及地质考察结果,我 们认为2013年11月31日前郭M_s5.8 地震发生在NW向查干泡-道子井断裂上可能性更大, 破裂为逆冲兼左旋走滑形态,破裂面倾向NE,由SE向NW单侧破裂,破裂长约9km、宽约



图 7 2013 年 10 月 31 日~11 月 23 日 4 次 5 级地震 ΔCFS 叠加结果

5km,余震大部分位于主破裂面上盘区域。

3 小结与讨论

(1)对前郭震群部分余震重新定位结果显示,平面余震呈N43°W密集条带状分布,密集 条带 NW 向长约 9km, NE 向长约 5km。序列中 80%的地震分布在 8~10km 深度范围内。但 参与定位的 3 级以上余震数量较低,分布较为集中,优势展布方向不明显。

(2) M_s 5.8 地震 NW 向震源节面 Δ CFS 最优解分布与余震分布的空间相关性更好,并且 4次5级地震 NW 向震源节面的叠加 Δ CFS 结果也显示该区为应力加载区,并达到经验触发 阈值。综合分析认为,2013 年 11 月 23 日 M_s 5.8 地震发震构造可能为 NW 向查干泡-道子井 断裂,破裂形态为逆冲兼左旋走滑,破裂长约 9km、宽约 5km。

(3)关于此次地震发震构造的分析结果,目前还可能受到以下因素影响:①震中位置定 位不精确及震源参数的误差对于小区域内的 ΔCFS 最优解计算较为敏感;②若考虑实际地 下断层的形态在深度剖面上的变化,则用简单破裂模型计算的库仑应力变化结果可能存在 误差;③震区基础地质数据的不完善及误差也会对 ΔCFS 的计算结果及分析结果产生影响。 ④目前尚未考虑日本 M_w9.0 地震对东北地区构造应力场分布的影响。

致谢:中国地震台网中心蒋海昆研究员在文章撰写中提出了宝贵的指导意见,在此表示诚挚的感谢!

参考文献

陈恩民、黄咏茵,1979,1605年海南岛琼州大地震及其发震构造的初步探讨,地震地质,1(4),37~44,99~100。 陈恩民、黄詠茵、苏丹,1985,一九一八年广东南澳大地震及其发震构造背景的初步探讨,华南地震,5(1),1~16。 陈恩民、黄詠茵,1989,1605年海南岛琼州大地震的震害特征和发震构造研究,地震学报,11(3),319~331。 邓起东、冉勇康、杨晓平等,2007,中国活动构造图,北京;地震出版社。 房立华、吴建平、王未来等,2014,云南鲁甸 Ms6.5 余震重定位及发震构造,地震地质,36(4),1173~1185。

高祥林,1991,邢台地震的发震构造,华北地震科学,9(1),51~58。

高立新,2008,中国松辽盆地构造环境及东北地区地震活动特征分析,地震,28(4),59~67。

华卫、陈章立、李志雄等,2009,汶川 8.0级地震触发与余震活动空间分布研究,地震,29(1),33~39。

蔣海昆、吴琼、宋金等,2012,双层黏弹介质模型条件下地震应力扰动的时空特征,地球物理学报,55(4),1240~1248。

李传友、汪一鹏、张良怀等,1999,吉林省松原地区1119年6%级地震的发震构造条件,中国地震,15(3),41~50。

李钟根,2013,吉林省新构造运动发生机制探讨,中国技术新产品,(3),114。

李海兵、潘家伟、孙知明等,2015,2014年于田 M_s7.3 地震地表破裂特征及其发震构造,地质学报,89(1),180~194。

刘芳,2014,2013 年 4 月 22 日科尔沁左翼后旗 M5.3 地震的发震构造初探,地震地磁观测与研究,35(5),64~67。

刘亢、曲国胜、房立华等,2015,唐山古冶、滦县地区中小地震活动与构造关系研究,地震,35(2),111~120。

马瑾,1992,对大同-阳高地震发震构造的讨论,地震地质,14(1),10~11。

钱洪、周荣军、马声浩等,1999,岷江断裂南段与1933年叠溪地震研究,中国地震,15(4),41~46。

宋金、蒋海昆,2011,2010年4月14日玉树 Ms7.1地震对余震的触发研究,中国地震,27(4),296~402。

谭成轩、胡秋韵、张鹏等,2015,日本 M_w9.0 大地震前后华北和东北地区现今构造应力作用调整过程与研究意义探讨,地学前缘,22(1),345~359。

吴宝峰、徐建权,2014,黑龙江及邻区地壳应力场初步研究,地震地磁观测与研究,35(5),72~75。

王志才、晁洪太,1999,1995年山东苍山 5.2级地震的发震构造,地震地质,21(2),20~25。

王兆国、刘财等,2009,中国东北地区地震空间分布与主要断裂带、深部构造及应力场关系,世界地质,28(4),515~519。

万永革、吴忠良、周公威等,2000,几次复杂地震中不同破裂事件之间的"应力触发"问题,地震学报,22(6),568~576。

万永革、吴忠良、周公威等,2002,地震应力触发研究,地震学报,24(5),533~551。

万永革、沈正康、尚丹等,2006,2005年10月巴基斯坦 Mw7.6 地震对余震的触发研究,中国地震,22(3),277~286。

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面参数方法及其在唐山地震序列中的应用,地 球物理学报,51(3),793~804。

万永革、沈正康、盛书中等,2009,2008年汶川大地震对周围断层的影响,地震学报,31(2),128~139。

谢富仁、陈群策、崔效锋等,1989,中国大陆地壳应力环境研究,北京:地质出版社。

徐锡伟、车用太、杨主恩等,1991,大同-阳高地震群发震构造模式的讨论,中国地震,7(2),79~87。

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,科学通报,58(20),1887~1893。

余中元,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,地震地质,37(1),13~32。

杨智娴、陈运泰、郑月军等,2003,双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用,中国科学:D辑,S1,129~134、212~213。

赵博、石玉涛、高原,2011,汶川 M_s8.0 地震及余震序列重新定位,地震,31(2),1~10。

Chinnery M A, 1963, The stress changes that accompany strike-slip faulting, Bull Seism Soc Am, 53, 921~932.

- Erickson L L, 1986, A three-dimensional dislocation program with applications to faulting in the earth: Master's Thesis, Plao, Calif: Stanford Univ, 167, 1170~2546.
- Hainzl S, Brietzke G B, Zoller G, 2010, Quantitative earthquake forecasts resulting from static stress triggering, J Geophys Res, 115, B11311, doi:10.1029/2010JB007473.
- Hardebeck J L, Nazareth J J, Hauksson E, 1998, The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences, J Geophys Res, 103(24), 427~437.
- Harris R A, 1998, Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard, J Geophys Res, 103, 35~53.
- King G C P, Stein R S, Lin J, 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, Bull Seism Soc Am, 84, 935~953.

Okada Y, 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull Seism Soc Am, 82, 1018~1040.

Reasenberg P A, Simpson R W, 1992, Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake, Science, 255, 1687 ~ 1690.

Stein R S, 1999, The role of stress transfer in earthquake occurrence, Nature, 402, 605~609.

- Toda S, Stein R S, Reasenberg P A, et al, 1998, Stress transferred by the 1995, $M_W = 6.9$ Kobe, Japan, shock: Affection aftershocks and future earthquake probabilities, J Geophys Res, 103 (B10), 24543 ~ 24565.
- Toda S, Stein R S, Keith Richards-Dinger, et al, 2005, Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer, J Geophys Res, **110**, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.
- Toda S, Stein R S, 2003, Toggling of seismicity by the 1997 kagoshima earthquake couplet: A demonstration of time-dependent stress transfer, J Geophys Res, **108** (B12), 2567.
- Toda S, Jian Lin, Mustapha M, 2008, 12 May 2008 M = 7.9 Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems, Geophys Res Lett, **35**, L17305.

Wan, 2010, Contemporary tectonic stress field in China, Earth Sci, 23, 377~386.

- Wells D L, Coppersmith K J,1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bull Seism Soc Am, 84,974~1002.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, Bull Seism Soc Am, 90(6), 1353~1368.

Seismogenic structure research on the Qian Gorlos earthquake swarm by double-difference earthquake location algorithm with coulomb stress changes analysis

Jia Ruo Liu Junqing Pan Xiaodong Kang Jianhong Sheng Jian Earthquake Administration of Jilin Province, Changchun 130117, China

Abstract The $M_s5.8$ earthquake swarm occurred in Qian Gorlos Autonomous County, Jilin Province on October 31, 2013. The earthquake is a rare swarm type in Song-Liao Basin. It's located on the intersection of Songyuan-Zhaodong fracture along NE direction and Chaganpao-Daozijing fracture along NW direction. Considering the seismogenic structure of this earthquake swarm is not clear, we relocated the hypocenters of 692 aftershocks based on double-difference earthquake location algorithm, and concluded that moderate aftershocks with $M \ge 3.0$ have no opt-direction in space, while only small aftershocks have a NW opt-direction. We calculated, based on Coulomb Failure stress changes theory, the accumulated ΔCFS opt-solution of 4 M5.0 earthquakes both on NW focal plane and NE focal plane, and discussed the seismogenic structure by the analysis of spatial correlation between the pattern of ΔCFS opt-solution and relocated aftershocks. Our results show that ΔCFS opt-solution of the NW focal plane are positive on mainshock fracture, but opposite for the NE focal plane. And most ΔCFS values of NW focal plane on fracture reach the trigger threshold $(0.01 \sim 0.10 \text{MPa})$, which controls the spatial pattern of most aftershocks. It is therefore concluded that Chaganpao-Daozijing fracture on NW direction plays a more important role in the evolution of Qian Gorlos earthquake swarm.

Key words: Qian Gorlos earthquake swarm; Seismogenic structure; Double-difference earthquake location; ΔCFS