

张博、钱蕊,2019,盖州青石岭震群的震源参数特征,中国地震,35(2),269~276.

盖州青石岭震群的震源参数特征

张博 钱蕊

辽宁省地震局,沈阳 110034

摘要 使用辽宁地区中小地震的数字波形资料,基于 Brune 圆盘模型计算了 2012 年 2 月~2016 年 12 月盖州青石岭震群 $M_L \geq 2.5$ 地震的震源动力学参数。结果表明,震群的视应力为 0~12bar,视应力随时间整体表现为突升突降中逐渐衰减的变化形态;应力降随震级的增大而增加,这与 Nuttli 的板内地震增加应力降 (ISD) 模型较吻合;通过对比 1999 年岫岩 5.4 级地震序列中 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源参数定标率发现,同震级的青石岭地震其应力降要小 10 倍左右,综合震源区地质构造、震源机制等因素认为,流体可能在青石岭震群的孕育和发生过程中起了重要作用。

关键词: 盖州青石岭震群 震源参数 定标率 流体

[文章编号] 1001-4683(2019)02-0269-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

在弹性力学的前提下,由地震资料无法精确获得地下介质所受到的绝对应力,但在一些合理的假设后,可以由地震资料得到关于应力大小的有意义的估计,视应力就是其中之一 (Aki,1966;Wyss et al,1968)。视应力是地震效率和平均应力的乘积,地震效率总是小于 1,因此,视应力为平均应力的下限,可作为评估地壳应力水平的重要参数 (吴忠良,2002)。地震的发生通常是由于断层两盘受到的应力超过了最大静摩擦应力,因此,震前震源区常出现视应力相对较高的现象 (陈学忠等,2007;易桂喜等,2011、2016;李艳娥等,2012;康建红等,2016),国内研究者已关注地震危险性较高的地区或断裂带附近的视应力水平 (乔慧珍等,2006;秦嘉政等,2006;刘红桂等,2007;李发等,2012;陈丽娟等,2017;戴苗等,2017;张丽晓等,2018),并且研究发现,视应力越高,地壳中积累的能量越大,发生破坏性中强震的危险性也越高,因此,利用视应力跟踪研判未来可能的发震地点或震后震源区的地震危险性 (陈学忠等,2003) 可作为震情跟踪的重要手段。然而,在一定的非构造因素影响下,视应力水平相对较低的地区也可能出现地震活动,如水库地震。华卫等 (2012) 对比水库诱发地震与构造地震震源参数的差异时发现,水库地震应力降明显小于构造地震,若以 Brune 圆盘模型计算中小地震的震源参数时,在一些合理的假设条件下,地震应力降约为视应力的 4.3 倍 (李艳娥等,2007),因此,水库地震的视应力也明显小于构造地震;杨志高等 (2010) 发现紫坪铺水库地震的视应力比其他地区的小 3 个数量级;一些有利于流体侵入诱发地震的地区,其震群

[收稿日期] 2019-04-15; [修定日期] 2019-05-13

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划项目 (XH18013Y) 资助

[作者简介] 张博,男,1987 年生,工程师,主要从事数字地震学及地震预报研究。E-mail:zhh_inea@126.com

活动的视应力也明显小于同震级的构造地震(李丽等,2015;郑建常等,2016),其原因可能是流体侵入等非构造因素影响了原来位置处的应力水平,进而导致诱发地震发生在比构造地震视应力水平更低的地区(华卫等,2012)。

2012年起,辽宁省盖州青石岭地区发生大规模震群活动,据辽宁地震台网提供的地震目录,截至2016年底,该地震序列共记录到 M_L 1.0~1.9地震612次, M_L 2.0~2.9地震130次, M_L 3.0~3.9地震20次, M_L 4.0~4.9地震6次,最大震级地震为2015年8月4日 M_L 4.8地震。该震群持续时间长,强度高,历史罕见。本文拟对该震群的视应力变化进行分析,讨论该地区发震危险性,并综合震源区地质构造、震源机制等因素对震群的发震机理进行初步探讨。

1 地震地质和构造应力场

辽东半岛地区是中国东北地震活动水平较高的地区,历史上曾多次发生5级以上地震,最大震级地震为1975年海城7.3级地震。20世纪80年代,内蒙古东乌珠穆沁旗-辽宁东沟地学断面的综合地球物理探测工作揭示了辽东半岛附近存在NE-NEE向和NW向走滑为主的共轭剪切断裂面并相互交错(高常波等,1998;钟以章等,1999;Zhong et al,2000)。已有的研究表明(马杏垣,1989),在共轭剪切断裂面的交汇处地震应力容易积累和释放,从实际观测的资料来看,这些地区也是中强地震和微震多发的地区。

万波等(2013)认为,辽东半岛广泛发育的NE-NNE向辽东断裂系控制了辽东半岛的构造形态。金州断裂是辽东半岛规模最大、切割最深、延伸稳定、活动性强、构造形迹最清楚的NE向断裂构造,它控制着辽东半岛新构造运动的格局,对其他小构造体系的演化和活动性产生重要影响。金州断裂附近钻孔的应力状态表明现在地壳浅层最大主应力方向为NEE向($N65^\circ E \sim N85^\circ E$),这揭示了金州断裂具有右旋走滑的特征(张鹏等,2014)。金州断裂由南向北可划分为金州-普兰店、普兰店-九寨、九寨-盖州北和盖州北-鞍山南等4个不同的段落,段落间或段落接合部位有NW向构造带发育(万波等,2013)。NW向构造多属于新生破裂,具有发育历史短、断续展布、地表形迹不明显、新生性和地震危险性高等特点(钟以章等,1999)。笔者曾分析青石岭震群的构造应力场及主要地震的震源机制解,综合认为青石岭震群是由金州断裂九寨-盖州北段在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(张博等,2017)。拉张的应力条件、较破碎的构造条件及近海域的地理条件为流体侵入诱发地震创造了条件。

2 青石岭震群的视应力

2.1 视应力原理

地震视应力定义为(Wyss,1970)

$$\sigma_{\text{app}} = \eta \bar{\sigma} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (1)$$

式中, μ 为剪切模量(通常取 $3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$); η 为地震效率; $\bar{\sigma}$ 为平均应力; E_s 为地震释放的能量; M_0 为地震矩。

利用波形进行视应力计算时,首先要去倾斜,然后进行傅里叶变换得到振幅谱,在近震源条件下,忽略非弹性衰减的影响经过仪器相应校正和几何扩散校正后得到震源谱,可表示

为(Jiménez et al,2005;陈学忠等,2007)

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^4}} \quad (2)$$

式中, Ω_0 为震源谱的零频极限; f_c 为拐角频率。用数字化波形资料求得各分量速度谱,积分得到位移谱,合成各分量的位移谱形成实际震源谱。将理论震源谱与实际震源谱进行拟合,从而求得零频极限 Ω_0 和拐角频率 f_c 。

根据 Brune 模型,可测定地震释放能量 E_s 和地震矩 M_0 , 方法参见陈学忠等(2007)。得到地震矩 M_0 和地震能量 E_s 后, 求取平均值,求平均值时采用 Archuleta 等(1982)提出的方法

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i\right) \\ \Delta x &= \exp\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln x_i - \ln \bar{x})^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, x_i 为第 i 个台站的地震矩 M_0 或地震释放能量 E_s ; N 为台站数; Δx 为误差因子,意义为当 x 以对数坐标作图时的标准差。得到地震矩 M_0 和地震能量 E_s 的平均值后, 根据式(1)即可求得某次地震的视应力。

2.2 视应力结果及分析

2.2.1 资料选取及计算结果

据辽宁地震台网中心提供的波形记录, 2012~2016年盖州青石岭地区共发生77次 $M_L \geq 2.5$ 地震,除去波形耦合严重和信噪比小于2的事件波形,共计算了68次地震的视应力。 $M_L 2.5 \sim 3.0$ 的地震事件选用距震中150km范围内的台站记录, $M_L \geq 3.0$ 的地震事件选用250km范围内的台站记录(深井台不参与计算),为保证结果的稳定性,每个事件波形不少于5个台站参与计算。篇幅所限,表1仅给出了 $M_L \geq 4.0$ 地震的视应力。

表1 盖州青石岭震群 $M_L \geq 4.0$ 地震视应力

序号	发震时刻		震级 M_L	视应力 /bar
	年-月-日	时:分		
1	2012-02-02	05:16	4.7	11.336
2	2012-02-02	05:43	4.3	5.340
3	2012-07-12	20:21	4.2	4.592
4	2012-11-01	19:25	4.0	2.172
5	2013-03-30	14:05	4.0	1.238
6	2015-08-04	17:08	4.8	5.846

2.2.2 视应力随时间的变化

视应力变化反映了震源区应力积累和释放的水平(王琼等,2005),并可用于强震震后趋势预测(陈学忠等,2003)和主要断裂带的地震危险性预测(易桂喜等,2011;李发等,2012;王鹏等,2015)。视应力与震级之间存在相关关系,视应力随地震的增大而增加,这表明大地震比小地震具有更高效的地震能量辐射体(华卫等,2010)。将视应力取对数与震级进行拟合,发现视应力的对数与震级间呈线性关系,拟合的关系式为

$$\lg \sigma_{app} = 0.55M_L - 1.82, r = 0.81 \quad (4)$$

为了消除震级对视应力的影响,引入视应力差值(李艳娥等,2012) $\Delta \sigma_{app}$

$$\Delta \sigma_{app} = \sigma_{app} - \sigma_{app}^{th} \quad (5)$$

式中, σ_{app} 为实际测定的视应力; σ_{app}^{th} 为根据式(4)由震级换算得到的视应力,差视应力随

时间的变化也反映了应力状态的趋势性变化(王鹏等,2014)。

图1为青石岭震群视应力和差视应力随时间的变化。由图1(a)可见,盖州青石岭震群 $M_L \geq 2.5$ 地震的视应力为 0~12bar,某些地震的视应力明显偏高,整体表现为突升突降的变化形态;2012年2月2日,震群发生第1个 $M_L \geq 4.0$ 地震,视应力高达 11.3bar;2012年7月、11月及2013年3月、2015年8月分别出现了5次视应力高值现象,分别对应着4次 $M_L \geq 4.0$ 地震起伏活动,其余时间段内视应力基本处于背景水平;2012~2013年视应力高值点有逐渐减弱的趋势。由图2(b)可见,2012~2013年差视应力和视应力均表现为相同的减弱趋势;2014~2016年视应力处于背景水平;2015年8月4日 $M_L 4.8$ 地震视应力为 5.8bar,与之前2012年2月2日 $M_L 4.7$ 地震相比,视应力较低。

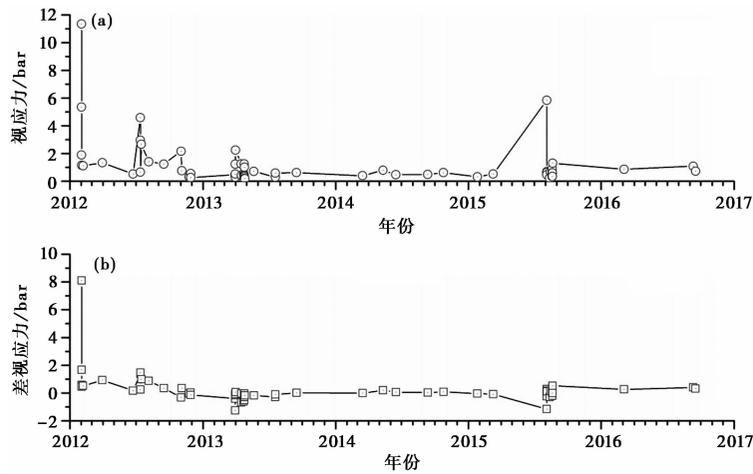


图1 盖州青石岭震群 $M_L \geq 2.5$ 地震的视应力(a)和差视应力(b)随时间的变化

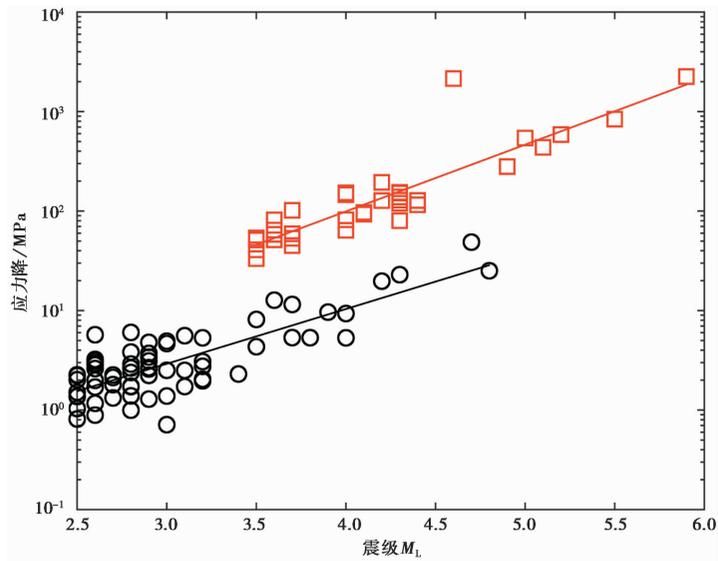


图2 岫岩5.4级地震序列和盖州青石岭震群应力降随震级的变化

圆圈为青石岭震群序列,黑色直线为其拟合曲线;正方形为岫岩地震序列,红色直线为其拟合曲线

青石岭震群首个地震的差视应力较高,这表明震群开始时青石岭地区处于较高的应力积累状态。随着震群中地震活动的不断增多,积累的应力逐渐释放,表现为差视应力逐渐减弱至背景水平。从震群开始发震至 2013 年 3 月,震群中 4 级地震活动表现为 4~5 个月的准周期性,2013 年 3 月~2015 年 7 月震群中无 $M_L \geq 4.0$ 地震,准周期被打破,地震活动水平较之前明显减弱,地震能量释放速率明显放缓。2015 年 8 月 4 日发生震群中最大震级地震 ($M_L 4.8$),但震前视应力和差视应力均处于背景水平,且 $M_L 4.8$ 地震的视应力明显小于 2012 年 $M_L 4.7$ 地震,这表明 2015 年 8 月这一丛 4 级地震起伏活动是在较低的应力状态下发生的, $M_L 4.8$ 地震后,视应力恢复至背景水平。

2.2.3 震源参数的定标关系

视应力和应力降与震级间的关系分别反映了地震的动力学参数和动力学参数的定标关系 (Kanamori et al, 2004), 本文采用 Brune 模型计算视应力, 在一定的合理假设下, Brune 应力降为视应力的 4.3 倍 (李艳娥等, 2007)。近年来, 关于视应力或应力降与震级间的定标关系一直是震源参数研究的热点, 越来越多的研究证实, 有流体参与的地震其视应力与同震级构造地震的视应力相比较低 (钟羽云等, 2004; 龙政强等, 2014)。华卫等 (2012) 在研究水库地震的震源参数的标度关系时认为, 这是由于区域介质空隙压力增大或流体的润滑作用; 也有人认为地震处于介质较破碎的断层弱化带 (de Lorenzo et al, 2004), 无法积累较大的应力 (郑建常等, 2016), 又或许两者共同起作用。

视应力或应力降的计算常受到地震波衰减模型、台站场地响应的影响; 此外, 视应力与震源机制解、震源深度等存在相关关系 (Wu, 2001; Abe, 1982; Choy et al, 2004; 钱晓东等, 2007), 而利用震源机制相似、震中较近的地震计算视应力, 可在一定程度上减弱辐射因子、传输路径、台站响应等的影响 (Izutani et al, 2001)。青石岭震群震源深度为 7~10km, 主要地震的震源机制解较一致 (张博等, 2017), 因此, 采用青石岭震群的计算结果能更客观地反映震源参数的定标关系。

构造地震与流体诱发地震的震源参数定标关系间存在差异, 笔者拟对比典型构造地震序列与青石岭震群的震源参数的定标率。但已有的研究表明, 视应力存在地域性差异 (吴忠良等, 2002; 秦嘉政等, 2006; 李艳娥等, 2012, 2015; 岳晓媛等, 2015)。为了进一步减少地域性差异对定标率的影响, 本文引用距青石岭震群约 50km 的 1999 年岫岩 5.4 级地震序列中 $M_L \geq 3.5$ 地震的应力降计算结果 (李艳娥等, 2007), 即应力降取对数后与震级间的线性关系为

$$\lg \Delta \sigma = 0.67 M_L - 0.69 \quad (6)$$

式中, 相关系数 $r=0.89$ 。青石岭震群 $M_L \geq 2.5$ 地震的应力降与震级间的关系式为

$$\lg \Delta \sigma = 0.55 M_L - 1.19 \quad (7)$$

式中, 相关系数 $r=0.81$ 。图 2 为岫岩 5.4 级地震序列中 $M_L \geq 3.5$ 地震应力降随震级的变化和青石岭震群应力降随震级的变化。由图 2 可见, 无论岫岩地震序列还是青石岭震群, 应力降均表现出随震级增大而增大的特征, 符合板内地震增加应力降 (ISD) 模型 (Nuttli, 1983); 与岫岩地震序列相比, 在可比较的震级范围内, 同震级的青石岭地震的应力降要小约 1 个数量级, 青石岭震群震源参数的定标率表现出类似流体诱发地震的特点; 王亮等 (2014) 研究了青石岭震群震中附近的速度结构, 认为青石岭震群发生在 2 个高速体相夹的低速体内, 有可能

是流体侵入引起岩体含水饱和度升高,进而造成P波低值异常的;青石岭震群地处拉张的应力环境中,周边较破碎的构造背景和近海域的地理环境为流体侵入创造了条件。综合以上因素,初步认为流体在青石岭震群孕育过程中起了重要作用。

3 结论和讨论

本文首先讨论了青石岭震群所在地区的地震地质和区域应力场;然后,利用近震源的Brune圆盘模型测定了震群 $M_L \geq 2.5$ 地震的震源参数,并通过视应力随时间的变化讨论了青石岭地区的发震趋势;最后,对比分析了岫岩5.4级地震序列和青石岭震群的应力降随震级的变化关系,并探讨了震群活动的可能原因。主要得到以下结论:

(1)青石岭震群震中地处辽东半岛共轭剪切断裂面交汇带,此处地震应力容易积累和释放,震群震中附近小震活动频繁。青石岭震群是金州断裂九寨-盖州北段在NEE向近水平主压应力场作用下出现的横向次级NW向铲式正断层不断地发生左旋走滑-拉张错动形成的。局部地区拉张的应力条件、较破碎的构造条件及近海域的地理条件为流体侵入诱发地震创造了条件。

(2)采用Brune模型计算了盖州青石岭震群68次 $M_L \geq 2.5$ 地震的视应力,视应力为0~12bar,伴随着震群多次4级地震起伏活动,视应力随时间整体表现为突升突降中逐渐衰减的变化形态;震群首个地震的差视应力较高,表明震群开始时青石岭地区处于较高的应力积累状态。随着震群中地震活动的不断增多,积累的应力逐渐释放,表现为差视应力逐渐减弱至背景水平。2015年8月4日发生震群中最大的 $M_L 4.8$ 地震,但震前视应力和差视应力均处于背景水平,且 $M_L 4.8$ 地震的视应力明显低于2012年 $M_L 4.7$ 地震,表明2015年8月这一丛4级地震起伏活动是在较低的应力状态下发生的; $M_L 4.8$ 地震后,视应力恢复至背景水平。

(3)青石岭震群应力降表现出随震级增大而增大的特征,符合板内地震增加应力降模型;与1999年岫岩5.4级地震序列中 $M_L \geq 3.5$ 地震震源参数定标率对比,在可比较的震级范围内,同震级的青石岭地震的应力降要小约1个数量级,青石岭震群震源参数的定标率表现出类似流体诱发地震的特点,说明在震群孕育过程中流体的参与可能起了重要作用。

参考文献

- 陈丽娟、陈继锋、龚丽文等,2017,2017年8月8日四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前甘肃南部地区视应力变化,中国地震,33(4), 521~531.
- 陈学忠、李艳娥,2007,2006年7月4日河北文安 $M_s 5.1$ 地震前震中周围地区小震视应力随时间的变化,中国地震,23(4), 327~336.
- 陈学忠、王小平、王林瑛等,2003,地震视应力用于震后趋势快速判定的可能性,国际地震动态,(7),1~4.
- 戴苗、吴桂桔、刘坚等,2017,三峡库区巴东地震前后视应力变化特征,地震地质,39(4),837~852.
- 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,132~133,北京:地震出版社.
- 华卫、陈章立、郑斯华等,2010,三峡水库地区震源参数特征研究,地震地质,32(4),533~542.
- 华卫、陈章立、郑斯华等,2012,水库诱发地震与构造地震震源参数特征差异性研究——以龙滩水库为例,地球物理学进展,27(3),924~935.
- 康建红、张洪艳、张宇等,2016,2013年吉林前郭强震群序列地震视应力变化特征,地震地磁观测与研究,37(1),1~7.
- 李发、戈宁、王行舟等,2012,郟庐断裂带南段及邻区中小地震视应力的时空特征研究,地震,32(4),53~61.
- 李丽、刘剑、吴昊昱等,2015,2015年1月山西介休 $M_L 3.3$ 震群发震原因初步研究,中国地震,31(4),647~655.

- 李艳娥、陈丽娟、王生文等, 2015, 山东地区地震视应力时空变化特征研究, *地震*, **35**(2), 80~90.
- 李艳娥、陈学忠, 2007, 1999年11月29日岫岩5.4级地震序列震源参数测定及标度关系分析, *地震*, **27**(4), 59~67.
- 李艳娥、陈学忠、王恒信, 2012, 汶川8.0级地震前四川地区地震视应力时空变化特征, *地震*, **32**(4), 113~122.
- 刘红桂、王培玲、杨彩霞等, 2007, 地震视应力在地震预测中的应用, *地震学报*, **29**(4), 437~445.
- 龙政强、孙学军、姚宏等, 2014, 有流体参与作用下的震源参数特征——以广西凌云凤山震群、龙滩库区地震为例, *华北地震科学*, **32**(4), 10~16.
- 马杏垣, 1989, 中国岩石圈动力学地图集, 32~33, 北京: 中国地图出版社.
- 钱晓东、李琼、秦嘉政, 2007, 2007年宁洱6.4级地震序列视应力研究, *地震研究*, **30**(4), 311~317.
- 乔慧珍、程方正、陈学忠, 2006, 安宁河-则木河断裂带地震视应力研究, *地震研究*, **29**(2), 125~130.
- 秦嘉政、钱晓东, 2006, 云南地区地震视应力的时间和空间分布研究, *地震学报*, **28**(3), 221~229.
- 万波、贾丽华、戴盈磊等, 2013, 辽东半岛中强地震活动及其与构造相关性, *地震地质*, **35**(2), 300~314.
- 王亮、周龙泉、焦明若等, 2014, 海城盖州地区速度结构和震源位置的联合反演研究, *地震*, **34**(3), 13~26.
- 王鹏、郑建常, 2014, 鲁东地区视应力时空变化特征分析, *地震*, **34**(4), 70~77.
- 王鹏、郑建常、刘希强等, 2015, 郯庐断裂带山东段震源参数及应力状态, *地震地质*, **37**(4), 966~981.
- 王琼、陈学忠、王林璞, 2005, 岫岩地震序列视应力变化及其预测意义, *地震*, **25**(2), 91~97.
- 吴忠良、黄静、林碧苍, 2002, 中国西部地震视应力的空间分布, *地震学报*, **24**(3), 293~301.
- 杨志高、张晓东, 2010, 紫坪铺水库地区蓄水前后视应力标度率变化研究, *地球物理学报*, **53**(12), 2861~2868.
- 易桂喜、龙锋、赵敏等, 2016, 2014年10月1日越西 $M_{5.0}$ 地震震源机制与发震构造分析, *地震地质*, **38**(4), 1124~1136.
- 易桂喜、闻学泽、辛华等, 2011, 2008年汶川 $M_{8.0}$ 地震前龙门山-岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布, *地球物理学报*, **54**(6), 1490~1500.
- 岳晓媛、武安绪、冯刚等, 2015, 2012年河北唐山 $M_{6.3}$ 地震前首都圈东部视应力时空变化特征, *地震*, **35**(2), 91~100.
- 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.
- 张丽晓、闫俊岗、李艳娥等, 2018, 晋冀鲁豫交界地区中小地震视应力特征研究, *地震*, **38**(1), 117~127.
- 张鹏、丰成君、孙炜峰等, 2014, 金州断裂带北段深孔地应力测量及其活动性, *地球科学(中国地质大学学报)*, **39**(10), 1295~1306.
- 郑建常、王鹏、徐长朋等, 2016, 乳山震群震源谱参数的稳健反演, *地球物理学报*, **59**(11), 4100~4112.
- 钟羽云、张帆、张震峰等, 2004, 应用强震应力降和视应力进行震后趋势快速判定的可能性, *防灾减灾工程学报*, **24**(1), 8~14.
- 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, *华北地震科学*, **17**(2), 59~65.
- Abe K, 1982, Magnitude, Seismic Moment and Apparent Stress for major deep earthquakes, *J Phys Earth*, **30**(4), 321~330.
- Aki K, 1966, Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from G-wave spectrum, *Bull Earthquake Res Inst Tokyo Univ*, **44**, 73~88.
- Archuleta R J, Cranswick E, Mueller C, et al, 1982, Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, earthquake sequence, *J Geophys Res*, **87**(B6), 4595~4607.
- Choy G L, Kirby S H, 2004, Apparent stress, fault maturity and seismic hazard for normal-fault earthquakes at subduction zones, *Geophys J Int*, **159**(3), 991~1012, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02449.x.
- de Lorenzo S, Di Grazia G, Giampiccolo E, et al, 2004, Source and Q_p parameters from pulse width inversion of microearthquake data in southeastern Sicily, Italy, *J Geophys Res*, **109**(B7), B07308, doi: 10.1029/2003JB002577.
- Izutani Y, Kanamori H, 2001, Scale-dependence of seismic energy-to-moment ratio for strike-slip earthquakes in Japan, *Geophys Res Lett*, **28**(20), 4007~4010.
- Jime'nez A, Garcia J M, Romacho M D, 2005, Simultaneous inversion of source parameters and attenuation factor using genetic algorithms, *Bull Seismol Soc Am*, **95**(4), 1401~1411.
- Kanamori H, Rivera L, 2004, Static and dynamic scaling relations for earthquakes and their implications for rupture speed and stress drop, *Bull Seismol Soc Am*, **94**(1), 314~319.
- Nuttl O W, 1983, Average seismic source-parameter relations for mid-plate earthquakes, *Bull Seismol Soc Am*, **73**(2), 519~535.

- Wu Z L, 2001, Scaling of apparent stress from broadband radiated energy catalogue and seismic moment catalogue and its focal mechanism dependence, *Earth Planets Space*, **53**(10), 943~948.
- Wyss M, Brune J N, 1968, Seismic moment, Stress, and Source dimensions for earthquakes in the California-Nevada Region, *J Geophys Res*, **73**(14), 4681~4694.
- Wyss M, 1970, Stress estimates for South American shallow and deep earthquakes, *J Geophys Res*, **75**(8), 1529~1544.
- Zhong Y Z, Gao C B, 2000, Seismic tectonics in the northeast of China, *Bull Seis Asso Far East*, **14**(1), 70~85.

A Study on Characteristics of Source Parameters of the Gaizhou Qingshiling Earthquake Swarm

Zhang Bo Qian Rui

Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110031, China

Abstract In this paper, by using the waveform data of medium and small earthquakes in Liaoning Province, we calculated the dynamic source parameters of 68 $M_L \geq 2.5$ earthquakes from February 2012 to 2016, based on the Brune model. The results demonstrated that the range of apparent stresses of the Qingshiling earthquake swarm is 0-12bar. Apparent stress decreases gradually with the characteristics of rising and dropping rapidly. The stress drop increases with magnitude, which is consistent with the result gained by Nuttli that intraplate earthquake follows the ISD model. Compared with the scaling relationship between stress drop and magnitude of $M_L \geq 2.5$ earthquakes in the 1999 Xiuyan $M_s 5.4$ earthquake sequence, the stress drop of medium and small earthquakes in the Qingshiling earthquake swarm are smaller with the same magnitude apparently, about 10 times, that indicates fluid intrusion may play an important role in development and occurring of earthquakes.

Key words: Gaizhou Qingshiling earthquake swarm; Dynamic source parameters; Scaling relationship; Fluid intrusion