

王鹏、郑建常, 2015, 2014 年 2 月 12 日新疆于田 7.3 级地震的震源参数, 中国地震, 31 (2), 262 ~ 270。

2014 年 2 月 12 日新疆于田 7.3 级地震的震源参数

王鹏 郑建常

山东省地震局, 济南市历城区港西路 2066 号 250102

摘要 2014 年 2 月 12 日新疆于田发生 M_s 7.3 地震, 本文利用新疆区域数字地震台网记录到的前震和余震序列的波形资料, 对 S 波记录谱进行仪器响应、传播路径和场地响应的校正后, 基于 Brune 模型, 利用遗传算法反演了于田地震序列 102 次 $M_L \geq 3.0$ 级地震的地震矩、视应力、拐角频率等震源参数。结果表明, 该地震序列震级为 3.0 ~ 5.0 级; 地震矩为 $3.46 \times 10^{11} \sim 2.08 \times 10^{15} \text{ N}\cdot\text{m}$; 视应力为 $1.48 \times 10^5 \sim 1.16 \times 10^6 \text{ Pa}$, 均值 $1.71 \times 10^5 \text{ Pa}$; 拐角频率为 1.4 ~ 7.1 Hz。通过分析视应力及拐角频率随时间的变化特征可知, 于田 7.3 级地震前震序列的视应力明显高于余震序列, 而前震序列的拐角频率明显低于余震序列。主震前视应力出现高值, 表明在主震区积聚了较多的应力, 随后在应力值降低后的缓慢升高过程中发震, 由于释放了大量的应力, 震后视应力值又逐渐降低, 表现为低应力的余震破裂。

关键词: 视应力 2014 年于田 7.3 级地震 拐角频率 震源参数

[文章编号] 1001-4683(2015)02-0262-09

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

随着数字观测技术及数字地震学的迅速发展, 数字地震观测技术已具有观测动态范围大、精度及分辨率高等特点。利用数字地震波形资料提取有关的波谱信息, 一直是获得中强震前后震源区应力状态与孕震状态变化的重要方法, 国内外许多学者已对此作了大量的研究, 并取得了初步的研究成果 (Moya et al, 2000; Bindi et al, 2001; Giampiccolo et al, 2007), 其中对视应力的研究则更为深入。视应力的概念由 Wyss 等 (1968) 提出, 它是一个与震源动力学过程相关的量, 为震源的动力学参数。对一个地区中引起地震滑动的视应力水平进行的区域平均, 可作为当地绝对应力水平的间接估计 (吴忠良等, 2002)。Choy 等 (1995) 讨论了全球地震视应力的分布和不同构造环境中不同类型地震视应力的大小。吴忠良等 (2002) 计算了 1987 ~ 1998 年中国西部地震视应力, 认为视应力分布与累积地震能量分布具有一定的相关性。陈学忠等 (2003)、王琼等 (2005)、钟羽云等 (2004) 探讨了在震后趋势

[收稿日期] 2014-11-30; [修定日期] 2014-12-19

[项目类别] 国家科技支撑计划 (2012BAK19B04-01-05) 和中国地震局震情跟踪青年课题项目 (2015010106) 共同资助

[作者简介] 王鹏, 男, 1983 年生, 工程师, 主要从事地震活动性和数字地震学方面研究。

E-mail: wangpeng831013@163.com

快速判定中应用地震视应力的可能性。易志刚等(2007)探讨了地震视应力在中国大陆西部强震趋势预测中的应用,并对地震视应力异常区与强震发生地区的关系进行了研究。李艳娥等(2012)和张致伟等(2009)分析了汶川8.0级地震之前四川地区视应力的时空变化特征。李芳等(2006)讨论了视应力在震群性质判定中的应用。郑建常等(2006)计算了山东崂山地震序列中视应力的变化。谢蓉华等(2013)、周昕等(2012)分别研究了水库蓄水前后视应力的变化特征。张彬等(2007)研究了中国大陆地震视应力空间分布特征。黄显良等(2005)、秦嘉政等(2006)、阮祥等(2011)、刘芳等(2009)、王鹏等(2014)、李发等(2012)、杨志高等(2009)分别研究了华东、云南、四川、内蒙、山东、安徽以及首都圈等地区地震视应力的时空分布,这对于各个地区的地震危险性判定具有很好的指导意义。

2014年2月12日新疆于田发生 $M_s7.3$ 地震,主震发生在阿尔金断裂带上。该地震序列主震前后具有较丰富的前震和余震序列,新疆区域数字地震台网较好地监测到了该序列的发展过程,并提供了丰富的波形资料。本文采用地震波谱分析技术(朱新运等,2008),利用遗传算法计算了该序列地震矩、视应力、拐角频率等震源参数,这对于了解序列发展的物理过程和主震前区域介质性质的变化以及探索区域强震前的前兆信息有一定的参考价值。

1 观测资料

新疆区域数字地震台网分布如图1所示。由图1可见,距于田 $M_s7.3$ 地震序列主震震中最近的台站为于田台,距其100km范围以内的还有民丰县和洛浦县的2个地震台,2014年2月11~17日共记录到 $M_L \geq 3$ 级地震103次(图2)。本研究中,利用距地震序列震中较近的上述3个台站的资料进行震源参数研究,对波形取直达P波的前2s的均方根的幅值作为背景噪声进行去噪声处理,选取满足信噪比较高且1个地震至少有3个台站记录等条件的102个地震计算震源参数。

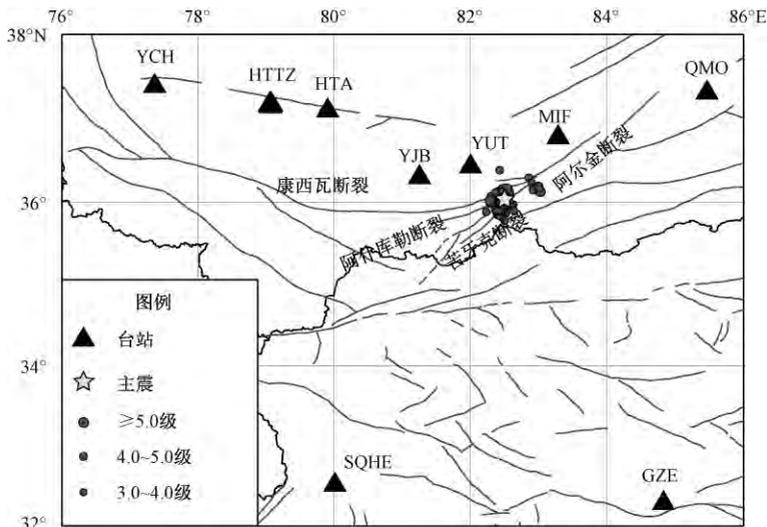


图1 2014年于田7.3级地震序列震中和台站分布图

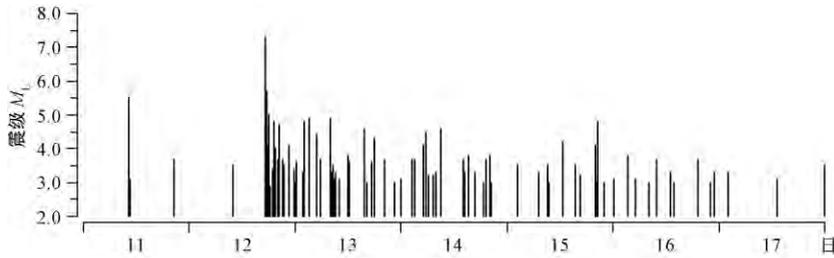


图2 2014年2月12日于田7.3级地震序列 $M-t$ 图

2 震源参数计算方法

地面运动的位移谱可以表示为

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f) \cdot G(R_{ij}) \cdot S_j(f) \cdot e^{-k(f)R_{ij}} \quad (1)$$

式中, $A_{ij}(f)$ 为第 i 个地震在第 j 个台站的观测谱; $A_{i0}(f)$ 为第 i 个地震的震源谱; R_{ij} 为第 i 个地震到第 j 个台站的震源距; $G(R_{ij})$ 为几何扩散函数; $S_j(f)$ 为第 j 个台站的场地响应; $k(f)$ 为非弹性衰减系数。

对于某次地震的某个台站记录,首先从振幅谱中扣除仪器响应,根据仪器的传递函数进行仪器响应校正,本文中只进行了简单的放大倍数校正;其次按照式(1)进行场地响应扣除、几何衰减校正和非弹性衰减校正等处理,以提取该台站记录的震源位移谱 $A_{0j}(f)$ 。对于场地响应,新疆南部地区台站大多都是基岩台站,没有明显的放大效应,因此只进行自由表面影响校正。对于几何衰减校正,本文计算中采用单段衰减模型,衰减系数取为1。对于非弹性衰减校正,其 Q 值大小与区域构造活动及地震活动性密切相关,根据徐彦等(2005)的研究结果,新疆南部地区 Q 值可以通过下式进行校正

$$Q = 256 \cdot f^{0.673} \quad (2)$$

由此,对于某次地震的每个台站记录都求出震源位移谱 $A_{0j}(f)$

$$\bar{A}_0(f) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_{0j}(f) \quad (3)$$

本文再通过下式求平均震源谱来作为该地震的观测震源谱。根据 Brune (1970) 的 ω^2 模型,理论震源位移谱可以表示为

$$|O_{th}(f)| = \Omega_0 * [1 + (f/f_c)^2]^{-1} \quad (4)$$

式中, $O_{th}(f)$ 表示理论震源谱; Ω_0 表示震源谱低频极限值; f_c 表示拐角频率。把 Ω_0 和 f_c 作为独立变量,根据式(4)利用遗传算法使观测谱和理论谱具有最小残差以确定 Ω_0 和 f_c , 并利用得到的 Ω_0 和 f_c 求地震矩、震源半径、视应力等。

地震矩的计算公式为

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v_s^3 \Omega_0}{R_{\theta\varphi}} \quad (5)$$

式中, ρ 是介质密度,本研究取为 2.8 g/cm^3 ; v_s 是 S 波速度,本研究取为 3.5 km/s ; $R_{\theta\varphi}$ 是辐射花样系数,理论上与震源机制相关,但单个小震的震源机制难以确定,也存在误差较大的

影响。因而在实际工作中一般 $R_{\theta e}$ 取 $\sqrt{2/5}$ 。

对于震源尺度,采用圆盘型震源模型计算震源半径

$$r = \frac{2.34v_s}{2\pi f_c} \quad (6)$$

则视应力为

$$P = \frac{2\mu R_{\theta e} \Omega_0 (\pi f_c^3)}{v_s^2} \quad (7)$$

式中, μ 是震源区介质剪切模量,本研究取为 3.0×10^4 MPa。

3 震源参数与震级的关系

震源参数的标度关系,一定程度上可以反映该地区地震的发生规律,利用于田地震的波形资料计算得到该地震序列的 102 次 $M_L \geq 3$ 地震的震源参数,并统计得到了地震矩、拐角频率和视应力等与震级的关系。

3.1 地震矩与震级的关系

地震矩与震级的线性关系式与震源区介质的应力水平、非均匀程度等有关,不同地区的介质应力水平和介质非均匀程度不同,线性关系表达式也会有所不同。经计算得到于田地震序列的地震矩为 $3.46 \times 10^{11} \sim 2.08 \times 10^{15}$ N·m。利用稳健回归函数线性拟合去除偏移较大的 1 个点,得到于田地震序列的地震矩与震级的关系

$$\lg M_0 = 0.99M_L + 10.42 \quad (8)$$

相关系数为 0.98,误差的标准差为 0.27(图 3)。

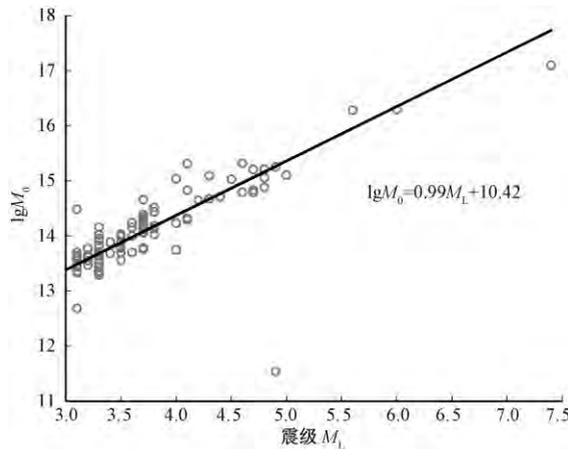


图 3 于田地震序列的地震矩与震级的关系

3.2 拐角频率与震级的关系

在震源参数的研究中,拐角频率是个基本参数。根据经验统计,拐角频率与震级一般呈负相关关系(张天中等,2000)。经计算得到于田地震序列的拐角频率为 1.4 ~ 7.1 Hz。图 4 给出了该序列的拐角频率与震级的关系,由图 4 明显可见,震级较小的地震对应着较大的拐角频率,而较大地震对应着较小的拐角频率。利用稳健回归函数线性拟合去除偏差较大的

1 个点,得到该序列的拐角频率与震级的关系

$$\lg f_c = -0.13M_L + 0.86 \quad (9)$$

相关系数为 0.98,误差的标准差为 0.10。

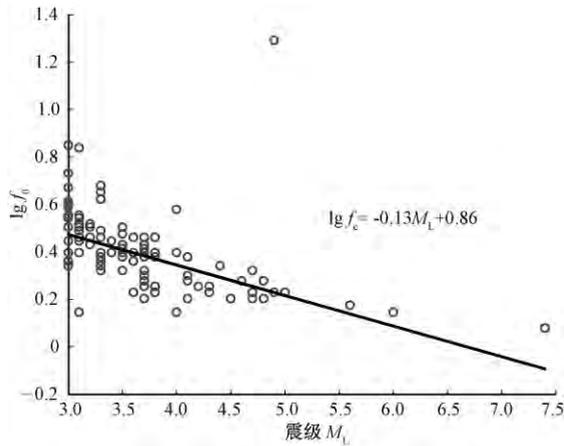


图4 于田地震序列的拐角频率与震级的关系

3.3 视应力与震级的关系

通过计算得知,于田地区的视应力为 $1.48 \times 10^5 \sim 1.16 \times 10^6$ Pa,均值为 1.71×10^5 Pa,可作为该区域的平均应力。图5为于田地震序列的视应力与震级的关系。由图5可见,视应力也随着震级的增加而增大。用稳健回归函数线性拟合,得到于田地震序列的视应力与震级的关系

$$\lg P = 0.54M_L + 3.11 \quad (10)$$

相关系数为 0.98,误差的标准差为 0.23。

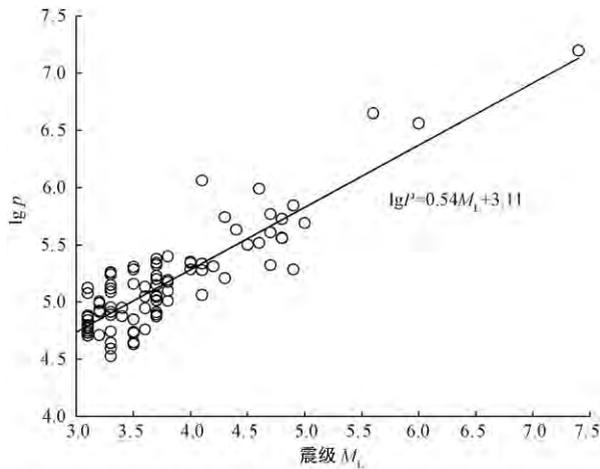


图5 于田地震序列的视应力与震级的关系

4 视应力和拐角频率随时间的变化特征

强地震发生之前孕震区及其附近地区震源和介质参数必然要发生变化,通过关注震源参数的变化可望捕捉到地震孕育的部分前兆特征(张天中等,2000;王林瑛等,2011)。于田地震序列主震前记录到4次显著的前震,而且主震后还有较完整的余震序列。通过分析地震序列中主震前后震源参数的变化,更有利于获取一些具有前兆意义的特征,本文重点对视应力 and 拐角频率等参数随时间的变化进行深入分析。

4.1 视应力随时间的变化

由于视应力与震级相关,因此分析过程中要尽量避免这种相关性的影响;为此引入差视应力的概念,即实际计算得到的视应力与经验估计值的差值,而经验估计值是根据视应力与震级的关系式(式(10))计算得到的。差视应力随时间的变化也反映了区域应力状态的趋势性变化。图6给出了于田地震序列扣除主震后的差视应力的变化曲线,零值基线代表了本区域的平均应力水平。由图6可见,主震发生前的前震序列的视应力差值明显高于零值,而主震发生后的余震序列又重新回到零值附近。定量分析计算得到的视应力值后发现,主震之前的前震序列视应力均值为 $2.2 \times 10^5 \text{ Pa}$,而余震序列的均值为 $1.68 \times 10^5 \text{ Pa}$,前震序列明显高于余震序列,如果去除主震后短时间内部分余震高应力释放的影响,差距将会更大。此外,主震前2014年2月11日发生的 $M_L 5.6$ 地震的视应力出现高值,明显高于背景应力水平,视应力值随后有所降低,接着又出现缓慢上升的过程,在上升过程中发生了于田7.3级地震。而主震后余震序列的视应力值快速下降,随后逐渐恢复到正常背景水平。

通过于田地震序列视应力值在主震前、后的变化,可以得到如下认识:主震前出现视应力高值,随后在视应力下降后的缓慢上升过程中发震。张天中等(2000)、肖蔚文(1990)和秦嘉政等(2005)对地震应力降的研究结果也表明主震前在主震周围地区会发生多次高应力释放地震,主震后应力降相对减小。

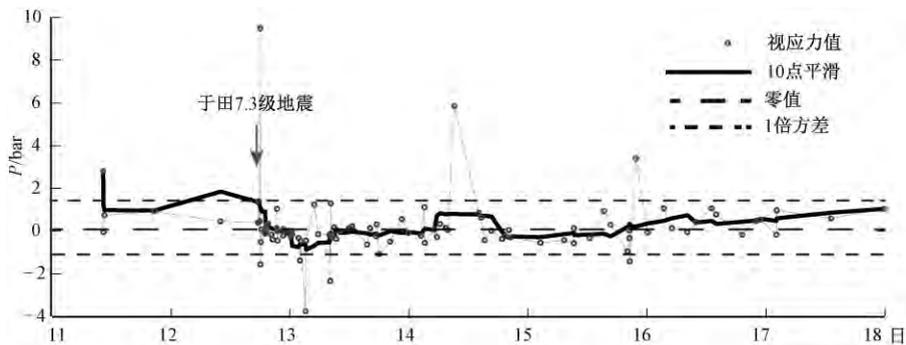


图6 2014年2月12日于田7.3级地震序列(去除主震)的视应力随时间的变化

4.2 拐角频率随时间的变化

利用于田地震序列的拐角频率值,分析了主震前、后拐角频率的变化特征,结果如图7所示。由图7可见,主震之前的前震序列的拐角频率值明显偏低,而余震序列的拐角频率值较高,明显高于前震序列。定量分析后发现,前震序列的拐角频率均值为 2.34 Hz ,而余震序

列的均值为 2.88Hz, 高于前震序列。在于田 7.3 级地震发生前出现了拐角频率低值, 主震发生前出现拐角频率略微上升的过程。这可能是在主震发生前, 由于断层发生微破裂预滑产生的前震所具有的低拐角频率的明显特征(秦嘉政等, 2006)。

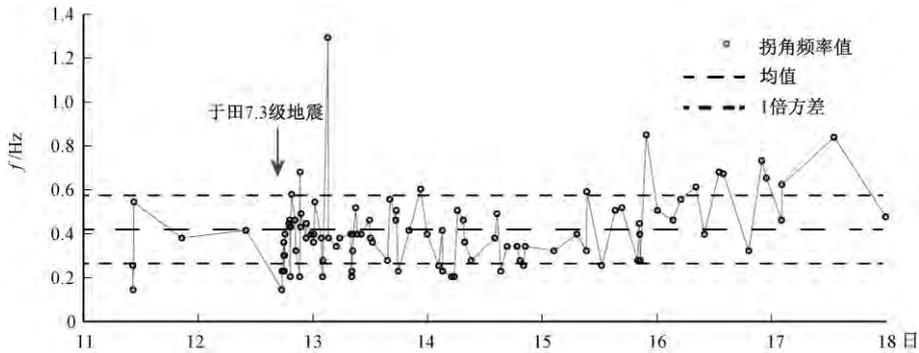


图7 2014年2月12日于田7.3级地震序列(去除主震)的拐角频率随时间的变化

5 结论和讨论

本文利用新疆数字地震台网记录的2014年于田 M_s 7.3 地震序列的波形资料, 使用波谱分析方法计算了 M_s 7.3 主震前、后 102 次前震和余震的震源参数。结果表明, 前震和余震的震级为 3.0 ~ 5.0 级; 地震矩为 $3.46 \times 10^{11} \sim 2.08 \times 10^{15} \text{ N}\cdot\text{m}$; 视应力为 $1.48 \times 10^5 \sim 1.16 \times 10^6 \text{ Pa}$, 均值为 $1.71 \times 10^5 \text{ Pa}$; 拐角频率为 1.4 ~ 7.1Hz。对震源参数与震级的关系进行统计分析后发现, 地震矩和视应力随着震级的增大而增大, 而拐角频率与震级呈负相关, 随震级的增大而减小。

对视应力和拐角频率随时间的变化特征的研究结果显示, M_s 7.3 主震发生之前的前震序列的视应力均值明显大于余震序列, 且出现了视应力的高值, 在视应力值下降后的缓慢上升过程中发震; 同时前震序列的拐角频率小于余震的拐角频率, 且在主震发生之前出现了拐角频率的低值。上述特征对研究强震前震源参数的变化有一定的参考意义。

强地震发生之前孕震区及其附近地区的震源参数必然要发生一定程度上的变化, 从而显示出一定的前兆信息, 但如何正确识别前兆信息是很复杂的, 而要得到定量指标则更困难。本文通过对于田地震序列震源参数的研究, 试图捕捉到部分变化特征, 以为认识强震前的震源参数特征提供有意义的震例分析。由于没有进行新疆地区大范围的、长期的视应力的计算和分析, 因此本文没有针对大区域的视应力水平进行对比研究。

参考文献

- 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。
 黄显良、刘东旺, 2005, 华东地区视应力场的研究, 地震地磁观测与研究, 26(6), 29~32。
 李发、戈宁、王行舟, 2012, 郯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。
 李芳、李宇彤、刘友富, 2006, 视应力方法在震群性质判定中的应用研究, 地震, 26(4), 45~51。
 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。
 刘芳、孙豪, 2009, 内蒙古中西部地区视应力背景水平研究, 华北地震科学, 27(1), 12~16。

- 秦嘉政、钱晓东、叶建庆,2005,2001 年施甸 M_s 5.9 地震序列的震源参数研究,地震学报,27(3),250~259。
- 秦嘉政、钱晓东,2006,云南地区视应力的时间和空间分布研究,地震学报,28(3),221~229。
- 阮祥、程万正、乔惠珍,2011,安宁河-则木河地震带震源参数及应力状态的研究,西北地震学报,33(1),46~51。
- 王林瑛、李艳娥、李芳等,2011,汶川地震前后地震波速比和视速度变化特征的研究,地震学报,33(1),1~14。
- 王琼、陈学忠、王林瑛,2005,岫岩地震序列视应力变化及其预测意义,地震,25(2),91~97。
- 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。
- 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。
- 肖蔚文,1990,1982 年卢龙地震前后的小震震源参数,地震学报,12(1),1~11。
- 谢蓉华、阮祥、张致伟,2013,瀑布沟水库蓄水前中小地震震源参数研究,地震地磁观测与研究,34(1/2),1~9。
- 徐彦、毛燕、胡家富,2005,新疆及周边地区 L_g 尾波的 Q 值分布,地震学报,27(2),155~162。
- 杨志高、张晓东,2009,首都圈地区地震视应力的计算及空间分布,29(4),32~47。
- 易志刚、宋莱、杨选辉,2007,地震视应力在中国大陆西部强震趋势预测中的应用,地震,27(4),110~120。
- 张彬、杨选辉,2007,中国大陆地震视应力空间分布研究,大地测量与地球动力学,27(5),26~30。
- 张天中、马云生、黄蓉良等,2000,1995 年陡河地震前后小震震源参数及其相互关系,地震学报,22(3),233~240。
- 张致伟、程万正、张永久,2009,汶川 8.0 级地震前紫坪铺水库小震活动及震源参数研究,中国地震,25(4),367~376。
- 郑建常、张永仙、潘元生,2006,青岛崂山地区环境应力与视应力变化分析,地震,26(3),123~131。
- 钟羽云、张帆、张震峰,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),8~15。
- 周昕、杨福平、钟羽云,2012,浙江地区水库地震与构造地震应力参数特征研究,华南地震,32(增刊),52~63。
- 朱新运、于俊谊,2008,基于 MATLAB 的小震震源参数计算软件研制,西北地震学报,30(4),380~384。
- Choy G L, Boatwright J, 1995, Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress, *J Geophys Res*, 100, 18205~18228.
- Bindi D, Spallarossa D, Augliera P, et al, 2001, Source parameters estimated from the aftershocks of the 1997 Umbria-Marche (Italy) seismic sequence, *Bull Seism Soc Am*, 91, 448~455.
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J Geophys Res*, 75, 4997~5009.
- Giampiccolo E D, Amico S, Patane D, et al, 2007, Attenuation and source parameters of shallow microearthquakes at Mt. Etna Volcano, Italy, *Bull Seism Soc Am*, 97, 184~197.
- Moya C A, Aguirre J, Irikura K, 2000, Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms, *Bull Seism Soc Am*, 90(4), 977~992.
- 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.

Research of source parameter of Yutian $M_s7.3$ earthquake in Xinjiang on February 12, 2014

Wang Peng Zheng Jianchang

Earthquake Administration of Shandong Province, Ji'nan 250102, China

Abstract The $M_s7.3$ earthquake occurred in Yutian, Xinjiang on February 12, 2014. Based on seismic waveform data before the earthquake and aftershocks of the earthquake sequence, which were recorded by the Xinjiang Regional Digital Seismic Network, the paper corrected instrument response, propagation path and site response of the S-wave recording spectra. We then calculated with genetic algorithms, on the basis of the Brune model, the source parameters of 102 $M_L \geq 3.0$ Yutian earthquake sequence, seismic moment, apparent stress and corner frequency. The results show that, seismic moment of the earthquake sequence is between $3.46 \times 10^{11} \sim 2.08 \times 10^{15}$, apparent stress is between $1.48 \times 10^5 \sim 1.16 \times 10^6$, and mean stress level is 0.31MPa, and corner frequency is between 1.4 ~ 7.1Hz in the range of 3.0 ~ 5.0. By analyzing the apparent stress and corner frequency variation with time, we obtain that apparent stress of earthquakes before the Yutian $M_s7.3$ earthquake was significantly higher than the aftershock sequence, but the corner frequency was significantly lower than aftershock sequence. Apparent stress was high level before the mainshock, which shows the mainshock zone accumulated higher stress, and then the apparent stress reduced. The mainshock occurred in the process of slow increase. Because of the release of a large amount of stress, after the $M_s7.3$ earthquake, the apparent stress gradually reduced. That was the performance of low stress fracture of aftershocks.

Key words: Apparent stress Yutian $M_s7.3$ earthquake Corner frequency
Source parameter