

郑建常、王鹏、许崇涛等, 2015, 2014 年于田  $M_s 7.3$  地震序列的频谱特征分析及其前震识别, 31 (2), 253 ~ 261。

# 2014 年于田 $M_s 7.3$ 地震序列的 频谱特征分析及其前震识别

郑建常<sup>1)</sup> 王鹏<sup>1)</sup> 许崇涛<sup>2)</sup> 徐芳芳<sup>3)</sup>

1) 山东省地震局, 济南市历城区港西路 2066 号 250102

2) 山东省五莲地震台, 山东五莲 262300

3) 山东省荣成地震台, 山东荣成 264300

**摘要** 利用新疆区域数字地震台网的波形资料, 对 2014 年 2 月 12 日于田  $M_s 7.3$  地震前震和余震序列的频谱特征进行了分析。基于 Brune 模型, 对观测记录进行仪器响应、传播路径和场地响应的校正, 使用遗传算法对于于田地震序列 103 次  $M_L \geq 3.0$  地震的震源谱进行了反演计算。结果表明: ①前震序列的拐角频率相对偏低, 扣除地震矩影响后, 余震的拐角频率有明显增高的趋势; ②距离震中最近的 YUT 台资料分析显示, 于田地震几次前震活动的台站观测谱相对较为独立, 与主震以及彼此之间的相关系数均不高; ③序列事件和主震的台站观测谱相关系数的变化反映了序列发展的动态破裂过程, 相关系数较低的事件基本上偏离了主震破裂区而发生在分支断裂上; ④前震的震源谱中存在异常的高频成份。

**关键词:** 拐角频率 地震矩 震源谱 频谱分析 前震序列

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0253-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

有关前震活动特征及其判别的研究, 多年来一直是国内外地震学者关注的热点, 同时也是科学难点之一。有关前震的历史震例在文献中早有记载, 但直到今天, 我们对前震发生机理的认识仍不清楚, 甚至对于前震从物理意义上仍然没有确定的、得到普遍认可的定义(林邦慧等, 1994)。因此, 有效地识别前震, 无疑是极具挑战性的科学问题。深入研究前震与一般地震事件的震源机制和发生机理的差异, 将极大推动地震预测的实用化进程, 同时在加深对于大地震发生物理过程规律性的认识方面有着重要意义。

前震或前震序列的发生机理与普通震群存在差异, 因此有可能通过对地震波形的分析识别发现二者的不同特征。蔡静观等(1994)研究发现, 前震序列地震波的振幅比相对稳定; 冯德益等(1994)研究认为, 前震 S 波频谱的峰值频率  $f_M$  及拐角频率  $f_c$  都明显偏小, 可以

[收稿日期] 2014-11-30; [修定日期] 2015-03-10

[项目类别] 中国地震局“地震科技星火计划”(XH15026)、山东省科技发展计划项目(2014GSF120007)及中国地震局年度震情跟踪定向工作任务(2015020105)联合资助

[作者简介] 郑建常, 男, 1978 年生, 副研究员, 主要从事地震活动性及数字地震学研究。E-mail: zjcmail@yeah.net

作为识别前震的指标;Cheng 等(2003)通过对 2001 年四川雅江 6.0 级地震及其 5.0 级前震的研究认为,主震前的前震序列的应力降升高;倪四道等(2010)对 2010 年  $M_s$ 7.1 玉树地震的前震分析表明,几次前震活动的波形相似程度非常高。

对于前震的波形或频谱特征,自开展数字地震学研究以来已经积累了大量的认识。Ishida 等(1980)发现前震的峰值频率要大于普通地震;Zuniga 等(1987)研究表明,前震的视应力、应力降以及振幅比等都与余震活动存在差异;Pechmann 等(1990)通过波形互相关发现,前震存在密集丛集;Webb(1994)同样通过波形互相关和格林函数反褶积发现,前震具有空间丛集、高应力降以及单侧破裂等现象。Chepkunas 等(2001)研究发现,前震的振幅谱中存在异常的高频成份;Umino 等(2002)使用交叉谱分析发现,前震序列存在由深到浅的破裂过程,并认为这与主震的成核过程有关;Mori(1996)、Reymond 等(2003)研究发现,主震破裂起始点位于前震破裂区的边缘;Hahm 等(2009)对比了韩国 3 次地震的前震、余震的不同特征。

2014 年 2 月 12 日 17 时 19 分新疆于田发生  $M_s$ 7.3 地震,震前约 31h,震中曾发生  $M_s$ 5.4 前震,形成了完整的前震-主震-余震序列活动。这次地震序列为我们研究前震活动的物理性质和特征提供了很好的条件。本研究利用新疆区域数字地震台网记录到的于田地震前震和余震序列的波形资料,基于 Brune 圆盘破裂模型,利用遗传算法反演了于田地震序列的震源谱,对该序列进行频谱特征分析,并对比了前震和余震序列观测谱与震源谱之间的差异。

## 1 数据与方法

本研究选取新疆区域数字地震台网 2014 年 2 月 11 ~ 17 日记录到的 279 次地震的波形资料,为保证观测资料的可靠性和一定的信噪比水平,选择了其中的 103 次  $M_L \geq 3.0$  地震进行分析,对其中大多数事件选用了距震中最近的 3 个台站(YUT、YJB、MIF)的资料。图 1 (a)给出了本研究中的台站及于田地震序列的震中分布;图 1 (b)给出了于田地震序列中用于本文计算的 103 次事件(含主震)的  $M-t$  图。

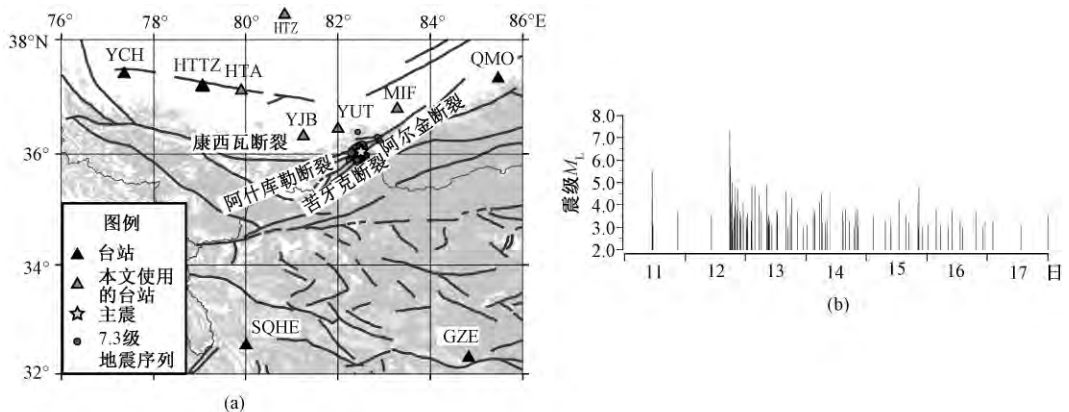


图 1 2014 年于田地震序列震中和台站分布图(a)及 2 月 11 ~ 17 日序列  $M-t$  图(b)

## 2 理论与方法

台站记录的地震谱  $S_{ob}(f)$  可以表示为

$$S_{ob}(f) = O_{ob}(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot I(f) \quad (1)$$

式中,  $O_{ob}(f)$  为地震震源观测谱;  $P(f)$  为路径效应;  $G(f)$  表示场地响应;  $I(f)$  为仪器响应;  $f$  为频率。

在近震源条件下,当观测台站的震中距较小时,可忽略非弹性衰减的影响,通过仪器响应和几何扩散校正后即可得到震源谱。本文选用的 3 个台(YUT、YJB、MIF)的震中距最大不超过 120km,因此采用该方法是合适的。

本研究中,几何衰减采用单段衰减模型,衰减系数取为 1;非弹性衰减  $Q$  值采用徐彦等(2005)的研究结果,选择 S 波段时使用了到时关系法,手动读取 Pg、Sg 到时,根据到时关系截取 S 波窗,求取傅里叶谱。图 2 给出了 3 个台站的 2014 年 2 月 12 日 18 时 04 分  $M_L 3.7$  余震的观测震源谱以及拟合的理论谱。

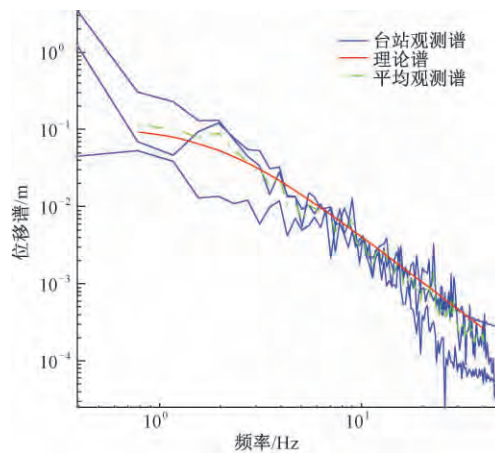


图 2 2014 年 2 月 12 日 18 时 04 分  $M_L 3.7$  余震观测谱及理论谱

根据中小地震的 Brune 圆盘模型,理论震源谱可以表示为

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

式中,  $\Omega_0$  为震源谱零频极限;  $f_c$  为拐角频率。将  $\Omega_0$ 、 $f_c$  作为独立变量,根据式(2)利用遗传算法使观测谱和理论谱具有最小残差,可以确定震源谱参数  $\Omega_0$  和  $f_c$ ,并由下式计算地震矩  $M_0$

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v_s^3 \Omega_0}{2R_{\theta\varphi}} \quad (3)$$

式中,  $R_{\theta\varphi}$  为辐射花样系数;  $\rho$  表示地壳介质密度;  $v_s$  为 S 波速度。

## 3 结果与分析

已有的研究大多显示,震源参数如地震矩、拐角频率、破裂半径等存在明显相关性。根

据自相似的原理,地震发生过程中在拐角周期上辐射的能量最大,拐角频率与  $\sqrt[3]{M_0}$  成比例关系 (Lyskova, 1998)。张天中等 (2000) 研究认为,在一定的震级范围内,地震矩  $M_0$ 、拐角频率  $f_c$  和震级  $M_L$  之间存在半对数线性关系; Drouet 等 (2005) 利用线性回归给出了拐角频率对数  $\lg f_c$  与震级  $M_L$  之间的关系式; Izutani (2008) 研究认为地震矩与拐角频率存在如下关系

$$M_0 \propto f_c^{-3.3 \pm 0.2} \quad (4)$$

本文计算得到了于田地震序列的 103 次  $M_L \geq 3$  级地震的震源参数。结果显示,地震矩、拐角频率和震级之间有很好的相关关系 (图 3) (王鹏等, 2015), 经过线性拟合, 得到

$$\frac{1}{3} \lg M_0 = (-1.241 \pm 0.172) \lg f_c + (5.183 \pm 0.076) \quad (5)$$

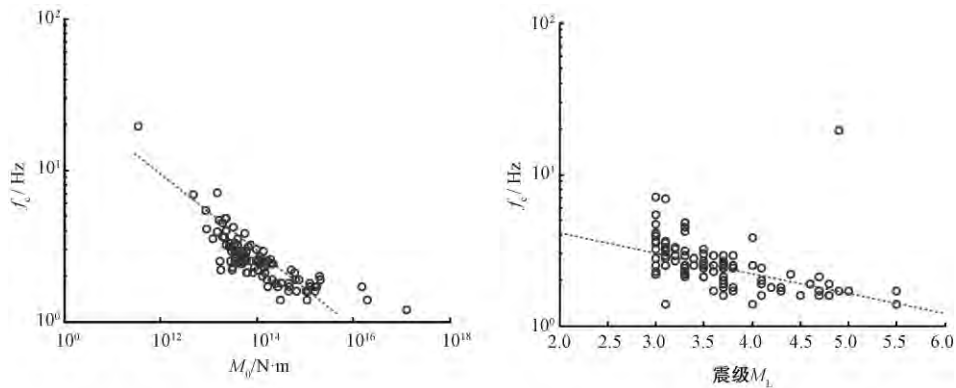


图 3 震源参数之间线性拟合

### 3.1 拐角频率

利用于田地震序列的拐角频率值,分析了主震前后其变化特征,结果见图 4。从图 4 可见,主震之前的前震序列的拐角频率值明显偏小;而余震序列的拐角频率值较大,明显大于前震序列 (图 4(a))。由于拐角频率  $f_c$  和地震矩  $M_0$  有很好的相关性 (图 3), 因此根据拟合得到的式 (5) 扣除地震矩对拐角频率的影响,定义  $f'_c = f_c^{\text{obs}} - f_c^{M_0}$ , 其中  $f_c^{\text{obs}}$  为由观测谱拟合得到的拐角频率,  $f_c^{M_0}$  为按照式 (5) 由地震矩  $M_0$  计算得到经验拐角频率。结果见图 4(b), 同样可以看出余震序列的拐角频率升高的趋势。前震序列中有 3 次事件的  $f'_c$  值较高,或许从这一角度可以认为这 3 次事件是 2 月 12 日 17 时 24 分  $M_s 5.4$  前震的余震。

### 3.2 台站观测谱

YUT (于田) 台是距离于田 7.3 级地震序列最近的台站,该台除了个别事件记录中断外,对序列中绝大部分事件都有很好记录。由于于田地震序列的余震分布相对较为集中 (图 1、6), 相对 YUT 台的方位角变化不大,故一定程度上可以忽略震源的方向性效应;因此,可以对计算得到的 YUT 台观测谱进行交叉互相关分析,结果见图 5。图 5 中纵、横坐标均为 102 次前震、余震事件的序号,其中第 22~25、33、61、97 号事件无数据。

由图 5 可以看出,于田地震序列的观测谱整体相关系数较高,尤其是  $M_s 7.3$  主震后较短时间内发生的几次余震,其振幅谱相关系数均大于 0.9; 但前震序列的振幅谱相关系数变

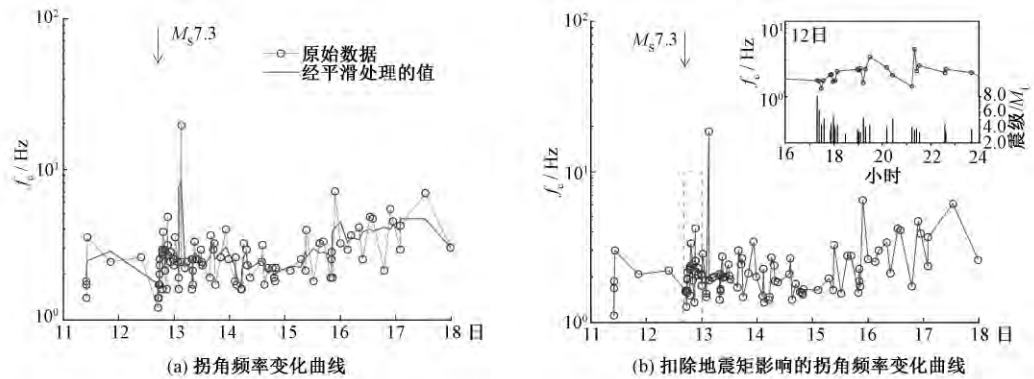


图 4 2014 年 2 月 11 ~ 17 日于田地震序列 (去除主震) 的拐角频率随时间的变化  
图 (b) 右上方小图对应虚线框的范围

化差异较大,除 2014 年 2 月 11 日  $M_s5.4$  前震及随后的 2 次小震的相关系数较高外,其余 3 次前震活动的观测谱均显得较为独立,不论与其他事件还是彼此之间的相关系数都不高 (小于 0.7),与前面计算的  $f_c$  值较高相一致。

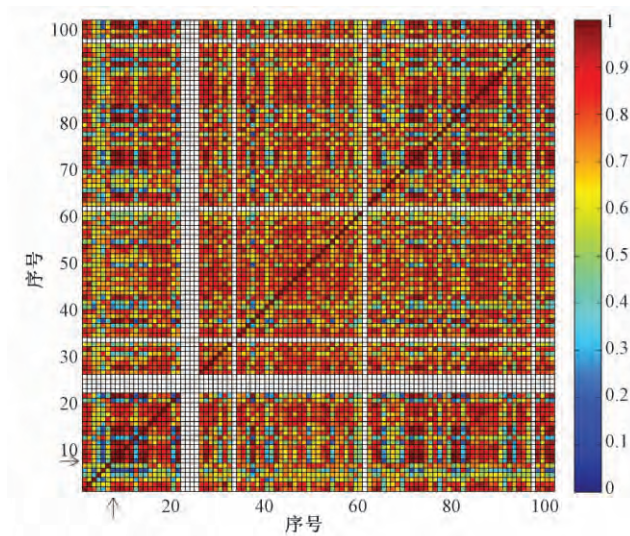


图 5 YUT 台记录于田地震序列观测谱的互相关分析  
图中箭头为于田  $M_s7.3$  主震

将于田地震序列观测谱与  $M_s7.3$  主震的相关性表示到震中分布图上,得到图 6,由图 6 可以看出,相关性不高的小震发生在与主震不同的断裂上,并且序列发展后期余震震中主要向 SW 方向扩展,这一时期的相关系数也相对偏低;同时还可以发现前震序列中 3 次相关系数偏低的小震均分布在主干断层的东侧,由于受实际观测资料的限制,无法求解这些小震的震源机制,但推测其震源机制和断层破裂性质可能与  $M_s5.4$  前震及  $M_s7.3$  主震都有较大的不同。

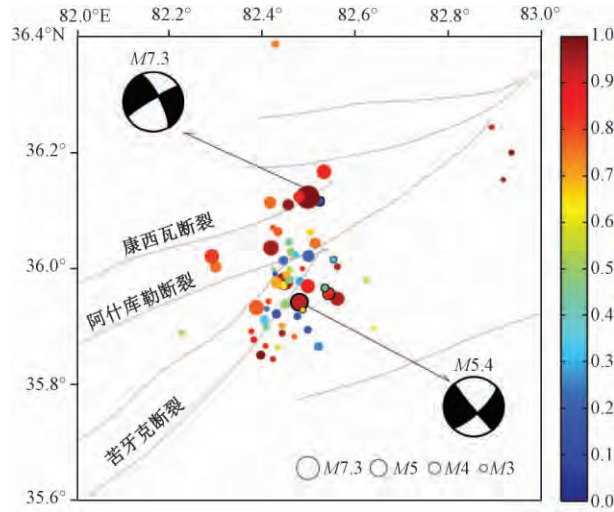


图6 于田地震序列事件与主震谱相关系数的空间分布  
色标表示其观测谱与  $M_s 7.3$  主震的相关系数;黑色实心圆表示6次前震

### 3.3 震源谱

由式(2)、(3),震源谱可以写为

$$|O_{th}(f)| = \frac{bM_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (6)$$

式中,  $b$  为涉及到地壳介质密度、S波速度及辐射花样的系数。因此,对计算得到的震源谱可以除以地震矩  $M_0$ , 将其定义为归一化震源谱  $|O_{nm}(f)|$ 。

对计算得到的102次前震、余震的震源谱除以事件的地震矩,扣除事件大小的影响,得到归一化的震源谱,结果见图7。对比可见,在10Hz以下的低频部分,3次事件的归一化振幅相差不大;在超过10Hz的高频部分,  $M_L 5.0$  余震的谱振幅(蓝色)大于  $M_s 5.7$  余震的(绿

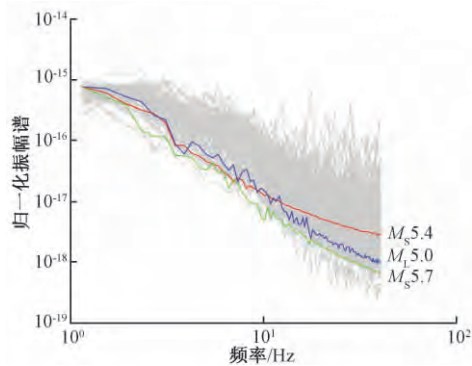


图7 于田地震序列归一化震源谱

红色代表2014年2月11日10时14分  $M_s 5.4$  前震;绿色代表主震后5min发生的  $M_s 5.7$  最大强余震;蓝色代表2014年2月12日18时00分  $M_L 5.0$  较强余震

色) 振幅,符合小地震明显高频衰减较慢的规律;而  $M_s 5.4$  前震的振幅明显大于 2 次余震事件(虽然  $M_s 5.4$  前震震级大于  $M_L 5.0$  余震),这一现象与 Chepkunas 等(2001)得到的前震振幅谱中存在异常的高频成份的认识相一致。

## 4 结论与讨论

利用新疆区域数字地震台网记录到的波形资料,对 2014 年 2 月 12 日于田  $M_s 7.3$  地震前震和余震序列的频谱特征进行了分析。基于 Brune 模型,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,使用遗传算法对于田地震序列 103 次  $M_L \geq 3.0$  地震的理论震源谱进行了反演,得到了以下结论:

(1) 前震序列的拐角频率相对偏低,扣除地震矩影响后余震的拐角频率有明显增高趋势;前震序列中有 3 次事件拐角频率较高且与其他事件的相关系数偏低。

(2) 距离震中最近的 YUT 台资料分析显示,于田地震 6 次  $M_L \geq 3.0$  前震中, $M_s 5.4$  前震与主震的观测谱较为一致;而前震序列中后面 3 次事件则相对较为独立,与主震以及彼此之间的相关系数不高,且震中位置偏离余震集中区,可能表明了前震发生后主震破裂孕育过程中在外围发生的小的破裂。

(3) 序列事件和主震的台站观测谱相关系数的变化反映了序列发展的动态破裂过程,相关系数较低的事件基本上偏离了主震破裂区,发生在分支断裂上。

(4) 与震级大小基本相同的余震事件相比, $M_s 5.4$  前震的震源谱中存在异常的高频成份。由于前震是震源区存在障碍物未能完全破裂所致,因此这一显著高频现象的成因可能与震源区介质性质有关。

这些特征或许在一定程度上可以用于前震的识别,但由于受台站布局、观测数据质量等因素的影响,拐角频率及其他震源参数测定的准确性相对不高,因此本文得到的上述认识仍需要有更多的震例进行检验和确认。

**致谢:**感谢两位匿名审稿专家的意见和建议。本项工作得到中国地震台网中心周龙泉研究员和薛艳副研究员的大力帮助,也得益于测震分析预报技术管理组和中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室各位专家的讨论,在此一并表示感谢!

## 参考文献

- 蔡静观、王兴辉、雷素华等,1994,云南地区各类前震序列时-空-强特征和地震波特征,地震学报,16(增刊),39~46。
- 冯德益、陈化然、丁伟国,1994,大震前地震波频谱异常特征的研究,地震研究,17(4),319~329。
- 林邦慧、李大鹏、刘杰等,1994,前震和前震序列的研究,地震学报,16(增刊),24~38。
- 倪四道、王伟涛、李丽,2010,2010年4月14日玉树地震:一个有前震的破坏性地震,中国科学:D辑,40(5),535~537。
- 王鹏、郑建常,2015,2014年2月12日新疆于田7.3级地震的震源参数研究,中国地震,31(2),276~284。
- 徐彦、毛燕、胡家富,2005,新疆及周边地区 Lg 尾波的 Q 值分布,地震学报,27(2),155~162。
- 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。
- Cheng W Z, Chen T C, Wei Y L, et al, 2003, Changes in source parameters of foreshocks of the 2001  $M_s = 6.0$  Yajiang, Sichuan earthquake, Acta Seismologica Sinica, 16(4), 371~381。
- Chepkunas L S, Rogozhin E A, Benikova V I, 2001, Spectral characteristics of foreshocks preceding major earthquakes of the Kurile-Kamchatka Arc and their application to the prediction of the main shock time, Russian Journal of Earth Sciences, 3(3),

235 ~ 245.

- Drouet S, Souriau A, Cotton F, 2005, Attenuation, seismic moments, and site effects for weak-motion events: Application to the Pyrenees, *Bull Seism Soc Am*, **95** (5), 1731 ~ 1748.
- Hahm I, Park S, 2009, Different features of fore- and after-shocks of three small earthquakes in South Korea, American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #S51B - 1414.
- Ishida M, Kanamori H, 1980, Temporal variation of seismicity and spectrum of small earthquakes preceding the 1952 Kern County, California, earthquake, *Bull Seism Soc Am*, **70** (2), 509 ~ 527.
- Izutani Y, 2008, Radiated energy from the Noto Hanto, Japan, earthquake of March 25, 2007, and its aftershock, *Earth Planets Space*, **60**, 145 ~ 150.
- Lyskova E L, Yanovskaya T B, Duda S J, 1998, Spectral characteristics of earthquakes along plate boundaries, *Geofizika*, **15**, 69 ~ 81.
- Mori J, 1996, Rupture directivity and slip distribution of the  $M4.3$  foreshock to the 1992 Joshua Tree earthquake, Southern California, *Bull Seism Soc Am*, **86** (3), 805 ~ 810.
- Pechmann J C, Thorbjarnardottir B S, 1990, Waveform analysis of preshock-mainshock-aftershock sequence in Utah, *Bull Seism Soc Am*, **80** (3), 519 ~ 550.
- Reymond D, Okal E A, Yagi Y, et al, 2003, The Miyagi-ken-hokubu, Japan, earthquake, 2003 July 26 and its the largest fore-shock and largest after-shock, American Geophysical Union fall meeting 2003, abstract #S52K ~ 07.
- Umino N, Okada T, Hasegawa A, 2002, Foreshock and aftershock sequence of the 1998  $M5.0$  Sendai, northeastern Japan, earthquake and its implications for earthquake nucleation, *Bull Seism Soc Am*, **92** (6), 2465 ~ 2477.
- Webb T H, 1994, Spatial clustering and stress drops of foreshocks of the February 1990 Tennyson and Weber, New Zealand, earthquakes, *Bull Seism Soc Am*, **84** (6), 1739 ~ 1753.
- Zuniga F R, Wyss M, Wilson M E, 1987, Apparent stresses, stress drops, and amplitude ratios of earthquakes preceding and following the 1975 Hawaii  $M_s = 7.2$  main shock, *Bull Seism Soc Am*, **77** (1), 69 ~ 96.



## Spectral characteristics of 2014 Yutian $M_s 7.3$ earthquake sequence and its application in foreshock discrimination

Zheng Jianchang<sup>1)</sup> Wang Peng<sup>1)</sup> Xu Chongtao<sup>2)</sup> Xu Fangfang<sup>3)</sup>

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

2) Wulian Seismic Station, Wulian 262300, Shandong, China

3) Rongcheng Seismic Station, Rongcheng 264300, Shandong, China

**Abstract** Based on waveform records from the Xinjiang Regional Seismic Network, the paper analyses the spectral characteristics of foreshocks and aftershocks of February 12, 2014 Yutian  $M_s 7.3$  earthquake sequence. We use genetic algorithm to invert source spectrum of 103  $M_L \geq 3.0$  events of the sequence. The results show that: (1) corner frequency of foreshocks is relatively lower than that of aftershocks; (2) using the nearest station's (YUT) data, we find that the observed spectrums of foreshocks are relatively independent of each other, the correlation coefficients of foreshocks and that of foreshocks to mainshock are on the low side; (3) the variation of correlation coefficients of observed spectrums implies dynamic rupture process of the earthquake sequence and most of the events with low correlation coefficients occurred on branch faults, which deviate from the main rupture area; (4) anomalously high frequencies of seismic radiation from foreshock sources are detected, which are probably due to an anomalous rigidity of the seismogenic medium. These features may be usable in foreshock discrimination.

**Key words:** Corner frequency    Seismic moment    Source spectrum    Spectral analysis  
Foreshock sequence