

孟令媛、史海霞、高金哲, 2015, 2013 年前郭震群 5 次 $M_s \geq 5.0$ 地震远场地震波辐射能特征研究, 31 (2), 198 ~ 208。

2013 年前郭震群 5 次 $M_s \geq 5.0$ 地震 远场地震波辐射能特征研究

孟令媛¹⁾ 史海霞¹⁾ 高金哲²⁾

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) 吉林省地震局, 长春 132000

摘要 2013 年吉林松原前郭震群是一次典型的爆发式强震群活动, 前郭震群 $M_s \geq 5.0$ 的 5 次主要地震事件呈现出了较为特殊的起伏特征。本文基于震源谱理论及震群型地震的特点, 研究了该震群 5 次主要地震事件的远场地震波辐射能的特征。选取国家级台站长春台, 针对前郭震群的地震动观测记录, 分析观测记录的时间域、频率域特征, 结合考虑震群型地震的地震动谱与震源谱参数的关系, 计算 5 次地震事件的远场地震波辐射能, 并进一步量化地描述其在震源谱及地震波辐射能等方面的差异。研究表明, 前郭震群中 5 次主要地震事件的第 2 次地震事件 (No. 2) 为整个震群的转折点, 其震级上表现出来的衰减特征与其地震波能量释放特征呈现出了明显的非一致性。实际上, No. 2 事件是前郭震群中最重要的一次事件, 主要表现为相对低的震级和相对高的远场地震波辐射能。

关键词: 前郭震群 震源谱 地震动谱 远场地震波辐射能 单台视应力

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0198-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2013 年 10 月 31 日 11 时 03 分吉林省松原市前郭县 (44.6°N, 124.2°E) 发生 $M_s 5.5$ 地震, 震源深度 8km, 当天 11 时 10 分再次发生 $M_s 5.0$ 地震。同年 11 月 22 日 16 时 18 分又发生 $M_s 5.3$ 地震, 次日 06 时 04 分及 06 时 32 分再次发生 $M_s 5.8$ 、 $M_s 5.0$ 地震。11 月 22、23 日发生的地震 3 次 $M_s \geq 5.0$ 地震均位于 10 月 31 日 $M_s 5.5$ 、 $M_s 5.0$ 地震的震源区, 这一系列地震属于震群活动。截至 2014 年 5 月 31 日前郭震群共记录到 $M_s \geq 0.0$ 地震 872 次, 其中 $M_s \geq 3.0$ 的 25 次, 包含 $M_s 3.0 \sim 3.9$ 地震 13 次, $M_s 4.0 \sim 4.9$ 地震 7 次, $M_s 5.0 \sim 5.9$ 地震 5 次, 最大地震为 2013 年 11 月 23 日 $M_s 5.8$ 地震 (图 1; 表 1、2)。

[收稿日期] 2014-12-22; [修定日期] 2015-04-24

[项目类别] 国家自然科学基金 (41404045) 及中国地震局监测预报司震情跟踪合同制定向工作任务 (2014020412) 联合资助

[作者简介] 孟令媛, 女, 1983 年生, 副研究员, 主要从事震源物理和地震活动性研究。E-mail: menglingyuan@seis.ac.cn

史海霞, 通讯作者, 女, 1980 年生, 助理研究员, 主要从事地震活动性研究。E-mail: shihaixia08@seis.ac.cn

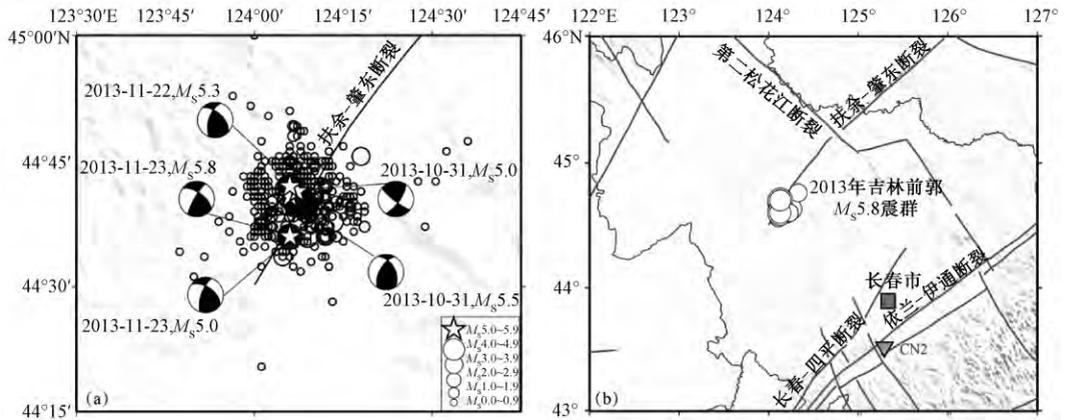


图 1 截至 2014 年 5 月 31 日前郭震群 $M_s \geq 5.0$ 地震序列及此序列中 $M_s \geq 0.0$ 的余震分布 (a)、前郭震群和 CN2 台的位置示意图 (b)

图 (a) 中的震源机制解参数详见表 1

表 1 2013 年前郭 $M_s 5.8$ 震群震源机制参数

编号	发震日期 (年-月-日)	震级* M_s	震中*		深度# / km	节面 I #			节面 II #		
			东经 / (°)	北纬 / (°)		走向 / (°)	倾向 / (°)	滑动角 / (°)	走向 / (°)	倾向 / (°)	滑动角 / (°)
1	2013-10-31	5.5	124.2	44.6	8	330	60	50	209	48	138
2	2013-10-31	5.0	124.2	44.6	12	128	80	118	35	72	170
3	2013-11-22	5.3	124.1	44.7	5	200	60	140	313	56	37
4	2013-11-23	5.8	124.1	44.6	12	210	80	150	306	61	12
5	2013-11-23	5.0	124.1	44.6	10	200	70	140	306	53	25

注: * 中国地震台网中心 (CENC) http://10.5.160.59/netoffice/module/info/portal/custom/dzj/dzj_news_display.jsp?GeneralID=12738; http://10.5.160.59/netoffice/module/info/portal/custom/dzj/dzj_news_display.jsp?GeneralID=12818

#中国地震局地球物理研究所 (IGCEA) <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/267882.shtml>; <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/267987.shtml>; <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/267992.shtml>

表 2 2013 年前郭震群 $M_s \geq 4.0$ 地震目录*

序号	发震日期 (年-月-日)	发震时刻	北纬 / (°)	东经 / (°)	深度 / km	震级 M_s	震中地点
1	2013-10-31	11:03:35	44.68	124.10	5	5.5	吉林省松原市前郭县
2	2013-10-31	11:10:06	44.69	124.12	7	5.0	同上
3	2013-11-03	12:26:54	44.63	124.22	8	4.5	同上
4	2013-11-04	03:17:24	44.60	124.15	6	4.2	同上
5	2013-11-08	19:37:18	44.70	124.10	10	4.3	同上
6	2013-11-08	19:38:53	44.70	124.10	11	4.0	同上
7	2013-11-22	16:18:51	44.70	124.10	8	5.3	同上
8	2013-11-23	06:04:23	44.60	124.10	9	5.8	同上
9	2013-11-23	06:32:29	44.60	124.10	8	5.0	同上
10	2013-11-25	22:09:39	44.70	124.10	6	4.0	同上
11	2013-12-08	13:01:10	44.60	124.10	8	4.3	同上
12	2014-05-27	15:52:22	44.70	124.10	7	4.1	同上

注: * 中国地震台网中心 (CENC) http://data.earthquake.cn/datashare/datashare_network_national_basic.jsp

2013年前郭 $M_s5.8$ 震群的震中距离长春市平均约120km,距哈尔滨市约230km,前郭震群5次 $M_s \geq 5.0$ 地震事件发生时,长春市和哈尔滨市均有强烈震感。前郭地区在24天内连续发生5次 $M_s \geq 5.0$ 地震,已构成典型的爆发式强震群活动。前郭 $M_s5.8$ 震群是2006年乾安-前郭 $M_s5.0$ 地震后吉林松原地区发生的又一次强震群活动。历史上公元1119年吉林省松原地区发生过一次 $6\frac{3}{4}$ 级地震,震中(44.9°N,124.8°E)位于前郭县套浩太附近,距2013年前郭震群约60km,1119年松原 $6\frac{3}{4}$ 级地震是东北地区迄今为止有记载的震级最大的浅源地震,极震区烈度达IX度,现有研究成果显示其发震构造位于前郭-扶余一带(李传友等,1999)。

2013年前郭震群临近NE向的扶余-肇东断裂附近的深部高速体边界带,扶余-肇东断裂控制了松辽盆地内部的次级块体并被多条NW向的次级断裂切割,构造相对较为破碎。2006年3月31日,距本次前郭震群以西约10km处曾发生乾安-前郭 $M_s5.0$ 地震(44.7°N,124.0°E),该地震也曾经造成震区部分房屋的倒塌损毁和较大的经济损失,其余震在空间上呈现NW、NNW或近NS向分布,主要受NE向的大安-德都断裂和NW向的通榆-长春断裂的控制及影响(盘晓东等,2007)。

本文针对2013年前郭 $M_s5.8$ 震群的震源参数特征展开相关研究,选取震群中5次 $M_s \geq 5.0$ 主要地震事件,基于国家级台站长春台(简称CN2)的地震动观测记录,计算5次主要地震事件的单台地震动谱;进一步结合震群型地震震源谱的特点,对比前郭震群中5次主要地震事件的远场地震波辐射能的大小并分析CN2单台视应力的特征;最后,针对前郭震群的起伏特征、地震波能量释放等给出基于震源谱特征的相关解释。

1 震群的震源谱参数特征

在地震学中,地震记录在时间域的一般表达式为

$$U(t) = \Omega(t) * P(t) * F(t) * R(t) * I(t) \quad (1)$$

式中, Ω 为震源过程的函数; P 是几何扩散函数; F 是非弹性衰减函数; R 是由台站下方的浅层结构所决定的场地放大函数; I 是地震仪的响应函数。式(1)中地震动观测记录在时间域可表达为震源过程、地震波传播路径及台站影响等褶积的结果。进一步,将式(1)转换为频率域,则有

$$U(f) = \Omega(f) \cdot P(f) \cdot F(f) \cdot R(f) \cdot I(f) \quad (2)$$

式(2)实现了由式(1)的时间域褶积计算到频率域的点乘计算,简化了计算过程。尽管如此,对于单一地震事件,由已知地震动谱求解震源谱的过程仍然十分复杂,需要消除地震波传播路径及台站的影响才能直接得到震源谱参数(陈运泰等,2003)。对于震群型地震事件,可将式(2)转换为

$$U_i(f) = \Omega_i(f) \cdot P_i(f) \cdot F_i(f) \cdot R_i(f) \cdot I_i(f) \quad (3)$$

式中, $i=1,2,\dots,n$, i 为震群事件中第 i 个主要地震事件; n 为震群中主要地震事件的总数。将式(3)展开并简化则有

$$\begin{cases} U_1 = \Omega_1 \cdot P_1 \cdot F_1 \cdot R_1 \cdot I_1 \\ U_2 = \Omega_2 \cdot P_2 \cdot F_2 \cdot R_2 \cdot I_2 \\ \dots \\ U_i = \Omega_i \cdot P_i \cdot F_i \cdot R_i \cdot I_i \\ U_{i+1} = \Omega_{i+1} \cdot P_{i+1} \cdot F_{i+1} \cdot R_{i+1} \cdot I_{i+1} \\ \dots \\ U_n = \Omega_n \cdot P_n \cdot F_n \cdot R_n \cdot I_n \end{cases} \quad (4)$$

对于单一地震台站,若其距离震群型地震的源震区相对较远,则可忽略震群中主要地震事件震中位置的相对距离,即可将较远的单一地震台站相对于震群近似地认为是同一点,由式(2)~(4)可得

$$\Omega_1/\Omega_2/\dots/\Omega_i/\Omega_{i+1}/\dots/\Omega_n \approx U_1/U_2/\dots/U_i/U_{i+1}/\dots/U_n \quad (5)$$

对于距离震群相对较远的台站,震群中地震的几何扩散函数(P)、非弹性衰减函数(F)、场地放大函数(R)和地震仪的响应函数(I)近似相同(式(4))。即消除了地震波传播路径和台站的影响因素之后,震群中主要地震事件的震源谱特征的研究可以通过分析台站记录到的地震动谱参数特征来实现。

2 单台地震动谱参数

2013 年前郭 $M_s 5.8$ 震群发生后,CN2 台记录到了该震群的地震动观测数据。CN2 台(125.26°E,43.48°N)为国家基准台、大震速报台和国际资料交换台,其观测手段主要以测震综合观测为主,该台地处吉林省中部丘陵与平原区的结合部位(图 1(b))^①。CN2 台距离前郭震群震源区约 160km,用式(5)研究前郭震群中 5 次主要地震事件的震源谱,则有

$$\Omega_1/\Omega_2/\Omega_3/\Omega_4/\Omega_5 \approx U_1/U_2/U_3/U_4/U_5 \quad (6)$$

式中第 1~5 个地震事件依次表示前郭震群依据发震时间顺序排列的 5 个主要地震事件(表 1)。

图 2 给出了 CN2 台记录到的前郭震群 5 次主要地震事件垂向(UD)、东西向(EW)和南北向(NS)三分量在时间域的地震波形。参照表 1、2 可以初步将前郭震群的 5 次主要地震事件分为 3 组:第 1 组为 2013 年 10 月 31 日先后发生的 $M_s 5.5$ 、 $M_s 5.0$ 地震,后文中分别简称 No. 1、No. 2 地震事件;第 2 组为 2013 年 11 月 22 日发生的 $M_s 5.3$ 地震,简称 No. 3 地震事件;第 3 组为 2013 年 11 月 23 日先后发生的 $M_s 5.8$ 、 $M_s 5.0$ 地震,分别简称 No. 4、No. 5 地震事件,这里分组后给出的震群中主要地震事件编号与表 1、式(6)中的一致。

对比 CN2 台记录到的前郭震群 5 次主要地震事件时间域的速度波形可以发现如下特点:①时间域内速度波形幅值最大的是 No. 4 事件,这与其震级具有一定的一致性;②第 1 组中的 No. 2 事件相对于 No. 1 事件的衰减特征并不明显,其中 NS 向分量相对偏大,这一点与二者的震级具有明显的非一致性;③第 2 组中的 No. 3 事件相对于第 1 组中的 No. 1、No. 2 事件的衰减特征也不明显,且 No. 3、No. 1 事件的波形相似程度较高;④第 3 组中的 No. 5 事

① http://data.earthquake.cn/datashare/datashare_network_national_basic.jsp

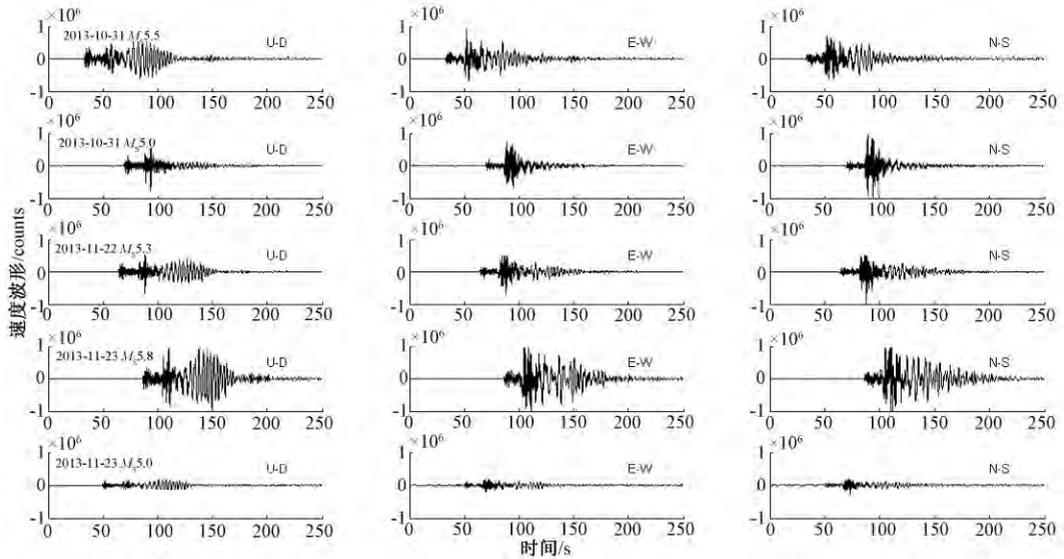


图2 前郭震群5次 $M_s \geq 5.0$ 地震事件速度波形三分量(垂向、东西、南北)实测记录

件相对于 No. 4 事件的衰减特征十分明显,这一点明显有别于第 1 组中的 2 次地震事件;⑤第 1 组中的 No. 2、第 3 组中的 No. 5 两次地震事件震级相当,但 No. 5 事件的波形、幅值相对于 No. 2 事件明显偏小。

前文通过对比图 2 中给出的 CN2 台记录到的前郭震群 5 次主要地震事件的地震波形,明确指出了该震群中 5 次主要地震事件速度三分量与其震级存在较为明显的非一致性特征,这种非一致性的特征表现在时间域中是由速度波形的形态、幅值、持续时间等呈现出来的。本研究进一步对比了 CN2 台观测数据在频率域的特征(图 3)。图 3 中给出了 CN2 台记录到的前郭震群 5 次主要地震事件三分量实测记录的傅里叶频谱特征。第 1 组中 No. 2 事件相较于 No. 1 事件在大于 1.0 Hz 的相对高频范围内衰减特征不明显,水平向 2 个分量(EW 和 NS)的高频成份相对偏少,垂向(UD)分量与 No. 1 事件相当;第 2 组中 No. 3 事件的 UD 向分量与第 1 组中 No. 1 事件的一致性程度较高,EW 和 NS 向在小于 1 Hz 的低频范围内与 No. 1 事件一致性程度较高,但在大于 1 Hz 的相对高频范围内则更接近于 No. 2 事件的特征,尤其在 0.5 ~ 1.0 Hz 的范围内,No. 3、No. 2 事件均出现了 1 个相对平缓的区域,这一点与前郭震群中其它地震事件均有所不同;第 3 组中 No. 5 事件相较于 No. 4 事件的衰减特征在频率域仍较为显著,且相较于震级相当的 No. 2 事件也明显幅值偏低,这一点与二者在时间域的特征是趋于一致的。

前郭震群的 5 次主要地震事件随时间在发震过程中的起伏与其震级存在的非一致性特征,能够从图 2、3 中的时间域和频率域特征方面给出一定的描述。但前文中的描述多为定性描述而并未定量的展开,针对震群型地震事件,进一步分析这种非一致性特征产生的原因,我们认为可能是由 5 次主要地震事件各自的震源特征所致。本研究在式(1)~(6)的推导过程中已指出,对于距离震群相对较远的单台,在消除了地震波传播路径(P 和 F)和台站(R 和 I)的影响因素之后,可以通过研究单台记录到的地震动谱参数来对比分析震群中主

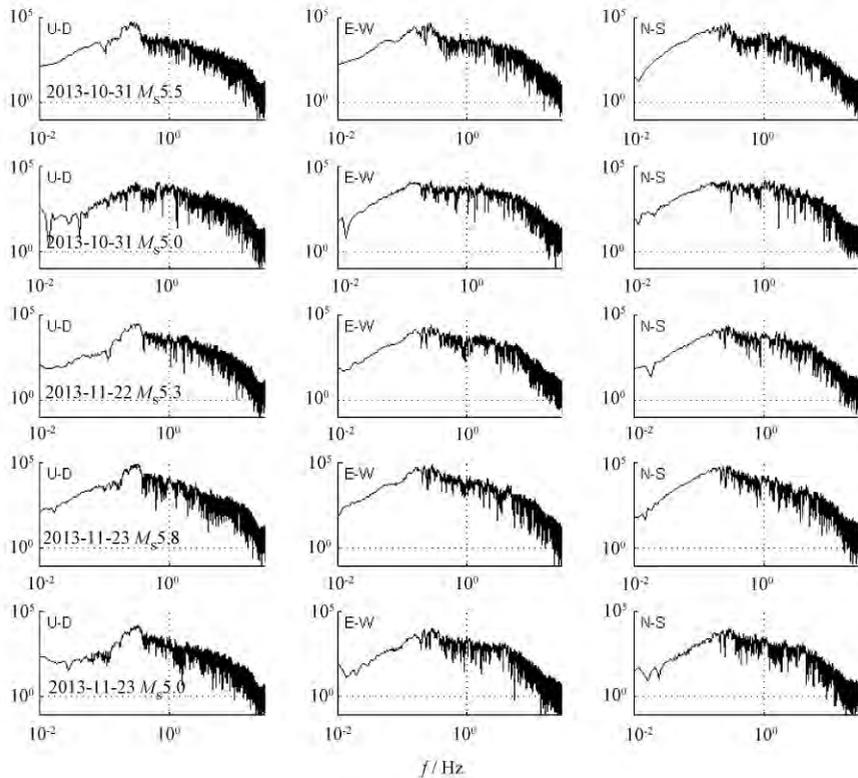


图3 前郭震群 5 次 $M_s \geq 5.0$ 地震事件速度波形三分量实测记录的傅里叶频谱特征

要地震事件的震源谱特征。以 2013 年前郭震群为例,进一步可以基于 CN2 台的地震动观测记录对比其震源谱参数特征,进而针对该震群中 5 次主要地震事件相对于震级的非一致性起伏特征给出基于震源特征的相关解释。

3 基于单台地震动谱的震源谱及远场地震波辐射能比较

对于单一地震事件而言,地震矩率函数在时间域中表示为标量地震矩乘以震源时间函数,在频率域中则表示为震源谱 (Brune, 1970、1971; 陈运泰, 2003)

$$\Omega(f) = \frac{M_0}{1 + (f/f_0)^\gamma} \quad (7)$$

式中, f 为频率; f_0 为拐角频率; γ 为高频衰减常数。通常把振幅谱高频渐近趋势(包络线)和低频趋势(零频水平)的交点称作拐角,与拐角相对应的频率称作拐角频率 f_0 。通常情况下, f_0 很难在频谱图上直接准确测得,这里我们采用 Brune 模型 (1970、1971), 即令 $\gamma = 2$ 。

当震源距 r 很小、非弹性衰减的影响也很小且可以忽略时, Andrews (1986) 提出可以通过积分的方式求解速度平方谱及位移平方谱等震源谱参数,即对于近震观测的情况,强地面运动位移的频谱可以表示为

$$S_{D2} = 2 \int_0^{\infty} D^2(f) df \quad (8)$$

式中, $D(f)$ 为位移的频谱; $D^2(f)$ 为位移的平方谱 ($D^2(f) = V^2(f) \cdot (2\pi f)^{-2}$, $V^2(f)$ 为速度的平方谱); f 为频率, 则 S_{D2} 为位移平方谱的积分。同理有

$$S_{V2} = 2 \int_0^{\infty} V^2(f) df \quad (9)$$

且有拐角频率 f_0 可通过式(8)、(9)的积分求得, 即

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{S_{V2}/S_{D2}} \quad (10)$$

式中, f_0 的计算方式可以应用于任何频谱, 因此可将其作为拐角频率的定义式。Andrews (1986) 同时提出, 对于点源或圆盘断层模型, 其地震波辐射能 E_{rad} 、震源谱平方 Ω_0^2 及地震矩 M_0 可以由式(11)~(13)近似求得

$$E_{\text{rad}} = 4\pi\rho\beta S_{V2} \quad (11)$$

$$\Omega_0^2 = 4S_{D2}^{3/2} S_{V2}^{-1/2} \quad (12)$$

$$M_0 = 4\pi\rho\beta^3 \Omega_0 / \sqrt{2/5} \quad (13)$$

式中, ρ 为密度; β 为 S 波的波速。值得注意的是, Andrews (1986) 提出的基于地震动谱求解震源谱参数方法的前提条件是震源距 r 相对较小, 这一点与震源谱求解的归一化条件也是一致的。

本研究基于单台地震动谱, 在比较分析震群地震事件震源谱参数特征的过程中, 进行如下设定: 假设单台 S 观测到的相对较远的某一震群 O 的 n 次地震事件来自于震源距 r 相对较小的某一震群 O_{app} 的 n_{app} 次地震事件 ($n_{\text{app}} = n$)。如此, 一方面可以通过式(5)基于 S 台的地震动观测谱实现震群 O 的 n 次地震的比较研究; 另一方面, 基于前文中式(8)~(13), 可以计算得到的震群 O_{app} “近源区”的近场地震波辐射能 E_{rad}^S 及地震矩 M_0^S 等震源参数。其中相对于震群 O_{app} 得到的 E_{rad}^S , 可以近似地认为是由相对较远的震群 O 传播至 S 台的远场地震波辐射能 $E_{\text{far-field}}$, 则有

$$E_{\text{far-field}} \propto E_{\text{rad}}^S \quad (14)$$

进一步结合视应力 σ_{app} 的概念 (Wyss et al, 1968), 定义单台视应力 σ_{app}^S

$$\sigma_{\text{app}}^S = \mu \frac{E_{\text{rad}}^S}{M_0^S} \quad (15)$$

式中, M_0^S 、 E_{rad}^S 分别为“近源区”震群 O_{app} 基于 S 台接收到的相对较远震群 O 的地震动观测谱通过转换计算求得的地震矩和地震波辐射能; μ 为介质的剪切模量。

以前郭震群为例, 针对该震群中 5 次主要地震事件 No. 1 ~ No. 5, 结合式(6)、(11)和(14), 则有

$$E_{\text{far-field}}^1/E_{\text{far-field}}^2/E_{\text{far-field}}^3/E_{\text{far-field}}^4/E_{\text{far-field}}^5 \approx S_{V2}^1/S_{V2}^2/S_{V2}^3/S_{V2}^4/S_{V2}^5 \quad (16)$$

式(16)实现了基于单台速度的平方谱对比震群中不同地震事件远场地震波辐射能相对大小的研究目的。进一步对于普遍的震群型地震事件, 可将式(16)转换为

$$E_{\text{far-field}}^1/E_{\text{far-field}}^2/\cdots/E_{\text{far-field}}^i/E_{\text{far-field}}^{i+1}/\cdots/E_{\text{far-field}}^n \approx S_{V2}^1/S_{V2}^2/\cdots/S_{V2}^i/S_{V2}^{i+1}/\cdots/S_{V2}^n \quad (17)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$, i 为震群中第 i 个主要地震事件; n 为震群中主要地震事件的总数。

4 计算结果

图 4 是基于式 (11) ~ (15) 的远场地震波辐射能及单台视应力计算结果的对比图,其参照了前郭震群 5 次主要地震事件震级的相对变化。其中,图 4(a)、4(b) 分别为前郭震群传播至 CN2 台的远场地震波辐射能和单台视应力随着 5 次主要事件的变化曲线,因比较研究的需要,进行了归一化处理;图 4(c) 为 CN2 台接收到的前郭震群 5 次主要地震事件的远场地震波辐射能 $E_{\text{far-field}}$ (式 (15)), 单位为 J; 图 4(d) 为 CN2 台的单台视应力 σ_{app}^S (式 (16)), 单位为 MPa。

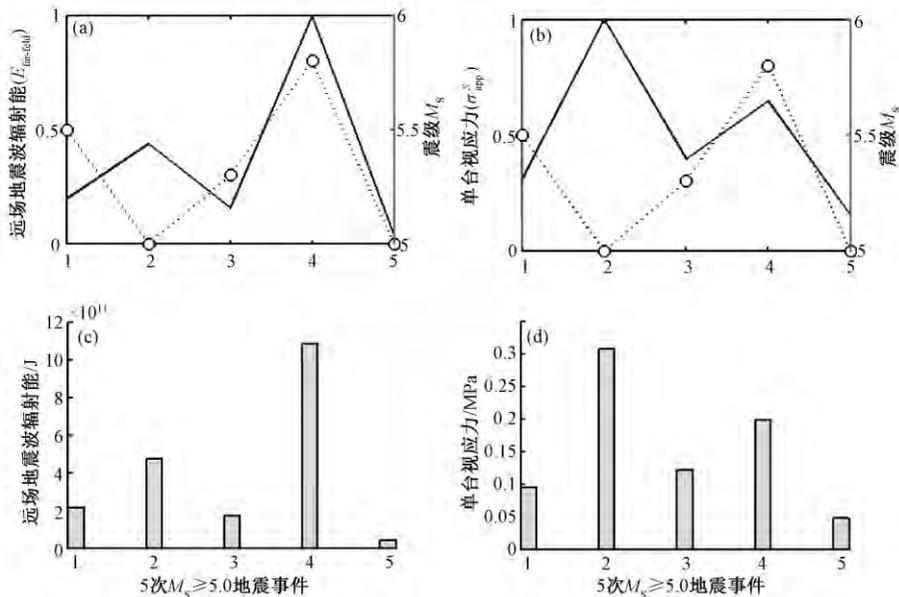


图 4 CN2 台前郭震群 5 次 $M_s \geq 5.0$ 地震事件远场地震波辐射能 (a)、(c) 及单台视应力的对比 (b)、(d)

(a) 中实线为远场地震波辐射能的变化曲线(归一化数据), 虚线为震级的变化曲线;

(b) 实线为单台视应力的变化曲线(归一化数据), 虚线同(a)

图 4(a) 中前郭震群 5 次主要地震事件归一化的远场地震波辐射能 $E_{\text{far-field}}$ 与其震级的非一致性特征十分明显,且相较于图 2、3 中更为直观。首先, No. 4 事件释放的地震波辐射能为 5 次事件中最高,这一点与其为前郭震群中震级最大的事件相一致;其次, No. 5 事件所释放的地震波辐射能相对最低,这一点与其在时间顺序上为整个震群中最后 1 个主要事件并不矛盾;最后, No. 2、No. 5 事件的震级均为震群中最小,但 No. 2 事件的远场地震波辐射能 $E_{\text{far-field}}$ 为 5 次主要事件中第 2 高值,这一点为前郭震群发展过程中在时间域和频率域表现出来的与震级非一致性特征的关键,即 No. 2 事件虽然在震级上表现出了相对于 No. 1 事件的衰减,但地震波辐射能量并未衰减,反而有所增加,某种程度上加强了前郭震群序列整体能量的释放进程;同时 No. 1 事件所释放的能量与 No. 3 事件的相当,略高于 No. 5 事件,且 No. 1、No. 3 和 No. 5 事件各自释放的能量大体相当于 No. 2 事件的 50%。

图 4(b) 中前郭震群 5 次主要地震事件归一化的单台视应力 σ_{app}^S 同样呈现了明显的与

震级的非一致性特征,序列中关键的 No. 2 事件在 CN2 台的单台视应力为震群中最大,其次是 No. 4 事件的, No. 3 事件则为整个震群中的过渡事件; No. 1 事件的 σ_{app}^S 仅大于 σ_{app}^S 最小的 No. 5 事件。图 4(b) 中 σ_{app}^S 相对于震级的非一致性较图 4(a) 更为明显,结合图 4(a) 不难发现,前郭震群 5 次地震事件中的 No. 2 为整个震群序列的转折点。No. 2 事件的 $E_{\text{far-field}}$ 为震群中的第 2 高值,仅次于 No. 4 事件, σ_{app}^S 则为震群中最大的,参照图 4(a)、4(b) 中虚线给出的震级变化, No. 2 事件在震级上表现出来的衰减特征与该事件的 $E_{\text{far-field}}$ 和 σ_{app}^S 在整个序列中的非衰减特征存在不一致性。这与图 2、3 中在时间域及频率域所简单呈现的非一致性明显不同,图 4(a)、4(b) 中的非一致性更为直观且能够实现定量化的描述。

进一步,图 4(c)、4(d) 分别给出了前郭震群 5 次地震事件的远场地震波辐射能及单台视应力的量化特征。图 4(c) 中 5 次地震事件的远场地震波辐射能 $E_{\text{far-field}}$ 为 $0.4 \times 10^{11} \sim 11 \times 10^{11} \text{J}$,图 4(d) 中单台视应力 σ_{app}^S 为 $0.03 \sim 0.31 \text{MPa}$ 。参照地震波能量与震级的经验关系 $\lg E_s = 1.5M_s + 4.8$,可以计算出前郭震群的地震波辐射能为 $0.2 \times 10^{13} \sim 3.2 \times 10^{13} \text{J}$ (Choy et al, 1995; 陈运泰等, 2003)。因此,本文基于 CN2 台计算得到的远场地震波辐射能 $E_{\text{far-field}}$ 相当于整体地震波能量 E_s 的约 1.9% ~ 3.4%,即前郭震群 5 次地震事件所释放的地震波能量经过约 160km 的传播至 CN2 台时绝大部分已经衰减, CN2 台记录到的地震波观测记录,仅仅反映了该震群对应地震事件地震波辐射能的很小一部分。

5 结论和讨论

震群型地震的主要特点之一即为其序列能量是通过多次震级相近的地震释放出来的,没有突出的主震。最大地震在全序列中所占能量比例一般均小于 80%,能量的释放有明显的起伏,衰减速度慢,活动的持续时间长,且震源通常较浅。由图 4(a)、4(c) 可见,前郭震群 5 次主要地震事件的地震能量释放的起伏特征明显,且震级最大的 No. 4 事件的地震波辐射能大致相当于其他 4 次主要地震事件释放能量之和,满足震群型地震的主要特征。

2013 年吉林松原前郭震群的特点在于 5 次 $M_s \geq 5.0$ 主要地震事件短时间内爆发式活动,且前 2 次地震事件 (No. 1、No. 2) 又具有“主-余型”地震的假象特征,从震级发展水平来看(表 2),震群中震级最大的 No. 4 地震事件发生前, No. 3 事件的发生为整个序列升级过程的转折点,基于图 2、3 的定性分析,似乎也可以支持 No. 3 事件为转折事件的推测。然而,通过前文进一步计算 5 次主要地震事件的远场地震波辐射能和单台视应力发现, No. 2 事件才是前郭震群真正的转折点。实际上,前郭震群中 No. 1 为震群的起点事件, No. 2 为转折事件, No. 3 为过渡事件, No. 4 是整个震群震级最大、地震波能量释放最多的事件,而 No. 5 则为前郭震群爆发式活动趋于结束的事件。

此外,本研究主要是基于震群地震活动震源区相对集中、单一接收单台路径一致的特点,再结合地震动谱与震源谱在频率域的对应关系,推导出了式(6),从而消除了地震波传播路径和台站的影响,实现了基于单台记录到的地震动谱参数特征对比分析震群型地震事件震源谱特征的研究目的。在该转换过程中,始于震源谱计算的基本公式,针对震群型地震的特殊性,选择单一台站的地震动观测数据,通过时-频域的转换、“近源区”震群的设定、远场地震波辐射能的近似计算及单台视应力的求取,实现了针对震群型地震震源谱参数进行比较研究的目的,并对震群的起伏特征给出了基于震源特征的解释。

由于本文主要是针对前郭震群展开的研究,观测台站数据也仅取自 CN2 台,因此尚未实现针对多台观测数据计算结果的比较和对比分析。实际上,本文的研究结果主要是初步验证了式(6)、(17)的合理性和有效性,初步实现了基于地震动谱比较震群中主要地震事件震源谱参数特征的研究目的。在未来的研究工作中,如何选取合理的单台震源距、单台个数及如何设定震群型地震主要地震事件的震级下限等都是值得进一步深入的研究方向。

致谢: 本文在成稿过程中,刘桂萍研究员、刘杰研究员、蒋海昆研究员、张永仙研究员和周龙泉研究员给予了有益的指导与帮助,作者谨表谢意;感谢吉林省地震局提供的 2013 年前郭震群的实测数据。

参考文献

- 陈运泰,2003,地震参数——数字地震在地震预测中的应用,73~81,北京:地震出版社。
- 李传友、汪一鹏、张良怀等,1999,吉林省松原地区 1119 年 $6\frac{3}{4}$ 级地震的发震构造条件,中国地震, **15**(3), 237~246。
- 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。
- Andrews D J, 1986, Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size. In: Das S, Boatwright J, Choz C H, Earthquake source mechanics, Washington D C: AGU, 259~267.
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, J Geophys Res, **75**(26), 4997~5009.
- Brune J N, 1971, Correction of "tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes", J Geophys Res, **76**(20), 5002.
- Choy Y T, Boatwright J L, 1995, Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress, J Geophys Res, **100**(B6), 18205~18228.
- 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.

Characteristics of the far-field seismic radiated energy from the 5 major earthquakes with $M_s \geq 5.0$ in the earthquake swarm sequence: 2013, $M_s 5.8$, Qianguo, Jilin Province, China

Meng Lingyuan¹⁾ Shi Haixia^{1)*} Gao Jinzhe²⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

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

Abstract The Qianguo $M_s 5.8$ earthquake swarm of 2013 occurred in Qianguo, Jilin Province, China. There were 5 major earthquakes with $M_s \geq 5.0$ in the Qianguo earthquake swarm, the magnitude were $M_s 5.5$, $M_s 5.0$, $M_s 5.3$, $M_s 5.8$ and $M_s 5.0$, respectively. In this study, we compared the characteristics of far-field seismic radiated energy of the major earthquakes based on the source spectrum and the ground motion spectrum of the earthquake swarm. We first research the ground motion spectrum of the 5 major earthquakes at the Changchun seismic station (CN2), a National station, with the recorded ground motions. Then we calculate the far-field seismic radiated energy referred to the relationships of the source spectrum in order to describe the variable characteristics of the Qianguo earthquake swarm. Research results indicate that the second earthquake (No. 2) of $M_s 5.0$ on October 31 was the key event of the earthquake swarm, which followed the first $M_s 5.5$ earthquake (No. 1) on the same day. In fact, the magnitude decreased of the No. 2 comparing with the No. 1 is not agreed with the larger far-field seismic radiated energy. It needs to point out that, the No. 2 is the turning point event of the Qianguo earthquake swarm, which is the significant transition before the largest $M_s 5.8$ earthquake occurrence.

Key words: Qianguo earthquake swarm Source spectrum Ground motion spectrum
Far-field seismic radiated energy Signal-station apparent stress