文章编号：1001-1455(2014)06-0730-06 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)06-0730-06

基于爆炸地震波分析 3 次爆炸事件的主要特征*

郝春月，郑 重
（中国地震局地球物理研究所，北京 100081）

摘要：主要分析全球地震台网牡丹江和白家疃地震台记录的 2006 年 10 月 9 日、2009 年 5 月 25 日和 2013 年 2 月 12 日的 3 次爆炸事件。主要通过 3 次事件 P 震相振幅比和功率谱比值估计了 3 次事件的能量比，采用互相关方法计算了 3 次事件的相关系数，对比震相波形探讨 3 次事件发生的相对位置。2013 年的爆炸事件与 2009 年的爆炸事件相比，三分向最大单振幅比值和功率谱比值平均分别为 2.2 和 2.6；与 2006 年的爆炸事件相比，三分向 P 震相最大单振幅比值和功率谱比值平均分别为 11.1 和 13.9。该结果暗示了 2013 年爆炸事件释放的能量高于 2009 年爆炸事件的 2 倍，高于 2006 年爆炸事件的 10 倍。在 2～4 Hz 频段内，2013 年爆炸事件与 2006 年爆炸事件、2009 年爆炸事件三分向波形的最大相关系数平均分别为 0.90 和 0.99。相关性分析结果表示，3 次爆炸事件在能量的主要集中频段高度相关，这表明 3 次爆炸事件发生的位置相距很近。相对位置分析表明，2013 年爆炸事件发生的位置在 2009 年爆炸事件发生位置的东偏南方向。

关键词：爆炸力学；相对位置；能量比；爆炸事件；相关性
中图分类号：O381 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

2006 年 10 月 9 日 1 时 35 分（世界时，UTC），全球地震台网（GSN）记录到一次爆炸事件。根据美国地质调查局所属的国家地震信息中心提供的地震目录（PDE），此次爆炸事件发生的位置为北纬 41.294°、东经 129.094°，震级为 mb4.3，深度为 0 km[1]。该事件距离 GSN 的牡丹江地震台（MDJ）约 3.34°，方位角为 186.4°。2009 年 5 月 25 日 0 时 54 分（UTC），GSN 记录到一次爆炸事件，位置为北纬 41.303°、东经 129.037°，震级为 mb4.7，深度为 0 km[2]。该爆炸事件发生的位置距离牡丹江地震台约 3.34°，方位角为 187.1°。2013 年 2 月 12 日 2 时 57 分（UTC），GSN 记录到一次爆炸事件，位置为北纬 41.308°、东经 129.076°，震级为 mb5.1，深度为 0 km[3]。该爆炸事件发生的位置距离牡丹江地震台约 3.33°，方位角为 186.7°。这 3 次爆炸事件均位于朝鲜东北部咸镜北道吉州郡附近的丰溪里试验场。W. Y. Kim 等[4]曾对 2006 年爆炸事件和爆炸事件所在区域的地震事件进行过判据方面的研究，范娜等[5]对这 3 次爆炸事件的震级进行过分析。由于这 3 次爆炸事件发生的位置较近，震级逐渐递增，本文中主要对这 3 次爆炸事件的能量比、相关性和相对位置进行研究。本文中，对牡丹江地震台 3 个分向（垂直向 Z/北南向 N/东西向 E）记录的 3 次爆炸事件进行了 P 波振幅比、体波和面波功率谱比、初动震相相关系数的计算与分析。为了更好地研究这 3 次爆炸事件的相对位置，还引进了 GSN 白家疃地震台（BJT）记录的波形数据。牡丹江地震台位于中国黑龙江省东南部，白家疃地震台位于北京西北部，同属于 GSN。为方便起见，用 E06、E09 和 E13 分别表示 2006 年、2009 年和 2013 年发生的 3 次爆炸事件。

1 资 料

3 次爆炸事件均被牡丹江和白家疃地震台记录到，牡丹江地震台记录的 3 次爆炸事件都很清晰，信噪比较高，见图 1(a)。白家疃地震台由于距离较远（震中距约 1 000 km），只清晰地记录到了 E09 和 E13。对于 E06，经过 2～4 Hz 滤波也能清晰地看到 Sg 震相，但 Pg 震相被淹没在噪声里，见图 1(b)。

图 1(a)显示了 120 s 的波形数据。每幅图上显示的 4 个重要震相分别为 Pn（首波，即 Moho 面绕射纵波）、Pg（直达纵波）、Sg（直达横波）和瑞利波。3 次爆炸事件的体波清晰，Z 向体波最大振幅的比值如

* **收稿日期**：2013-04-12；**修回日期**：2013-10-17
作者简介：郝春月（1973— ），女，硕士，副教授。

表 1 所示。由于震级的计算也是利用最大振幅，所以最大振幅的比值在一定程度上描述了 3 次爆炸事件爆发能量的关系。表 1 给出了最大体波振幅比和最大面波振幅比。根据表 1，把最大体波振幅和最大面波振幅比进行平均，可得出 E13 最大振幅是 E09 最大振幅的 2.3 倍，而 E13 的最大振幅是 E06 最大振幅的 10.1 倍。

在白家疃地震台记录的 3 次爆炸事件中，面波不发育，E06 的 Pg 震相不清晰，所以没有进行能量比和相关系数的计算，引进白家疃地震台数据的主要目的是对这 3 次爆炸事件的相对位置进行分析。

表 1 牡丹江地震台 Z 向记录的 3 次爆炸事件的振幅比

Table 1 Amplitude ratios between three explosion events recorded by Mudanjiang seismic station in vertical direction (Z)

A_{13}/A_{09}		A_{13}/A_{06}	
Pg	瑞利波	Pg	瑞利波
2.2	2.4	11.1	9.1

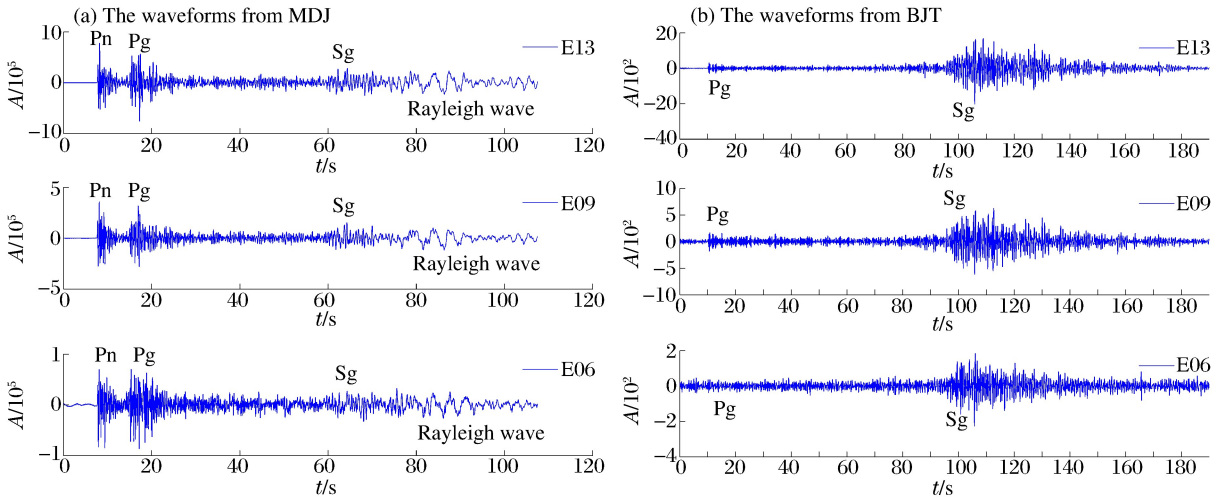

图 1　2 个地震台垂直向(Z)记录到的 3 次爆炸事件的波形

Fig. 1　Waveforms of three explosion events recorded by two seismic stations in vertical direction (Z)

2　功率谱比的计算

为了了解 3 次爆炸事件在频率域的能量分布情况，对 3 次爆炸事件进行了功率谱的计算与分析。功率谱分析采用 Welch 平均周期图法。Welch 平均周期图法是对直接法的改进，即把一长度为 N 的数据 $x_N(n)$ 分成 L 段(在分段时可允许每一段的数据有部分的重叠)，每一段的长度为 M，分别求每一段的功率谱，然后加以平均。第 i 段的功率谱可由下式表示[6]：

$$P_{\mathrm{per}}^{(i)}(w)=\frac{1}{MU}\left|\sum_{n=0}^{M-1}x_N^{(i)}(n)d(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}wn}\right|^2 \tag{1}$$

式中：w 为频率；$U=\frac{1}{M}\sum_{n=0}^{M-1}d^2(n)$ 为归一化因子，使用它是为了保证所得到的谱是渐近无偏估计；$d(n)$ 是 Hanning 窗。这样，几段的平均功率谱为：

$$P_{\mathrm{per}}(w)=\frac{1}{MUL}\sum_{i=1}^{L}\left|\sum_{n=0}^{M-1}x_N^{(i)}(n)d(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}wn}\right|^2 \tag{2}$$

在此，分别对 2 个时间窗进行了功率谱估计，一个为 P 波组的 15 s 时间窗，另一个为面波组的 15 s 时间窗。根据郝春月等[7]的研究结果可知，前 2 次事件体波主要能量集中在 2～4 Hz，所以首先对 3 次事件的体波时间窗进行 2～4 Hz 频段的带通滤波，又由于瑞利波的主要频段集中在 1 Hz 以下[8]，而后，对面波组时间窗进行了 1 Hz 以下的低通滤波。计算功率谱所用的 15 s P 波组和面波组数据均为 600 个采样点(采样率 40 s^{-1})，利用 Hanning 窗，窗长为 256 点，重叠 128 点。3 次事件的功率谱计算完毕后，可以得出 3 次事件中每对事件的功率谱点对点的比值。图 2 给出了 3 次爆炸事件垂直向记录中体波和面波的功率谱和功率谱比值。从图 2 可以看出 E06、E09、E13 爆发能量是递增的，谱比值见表 2。

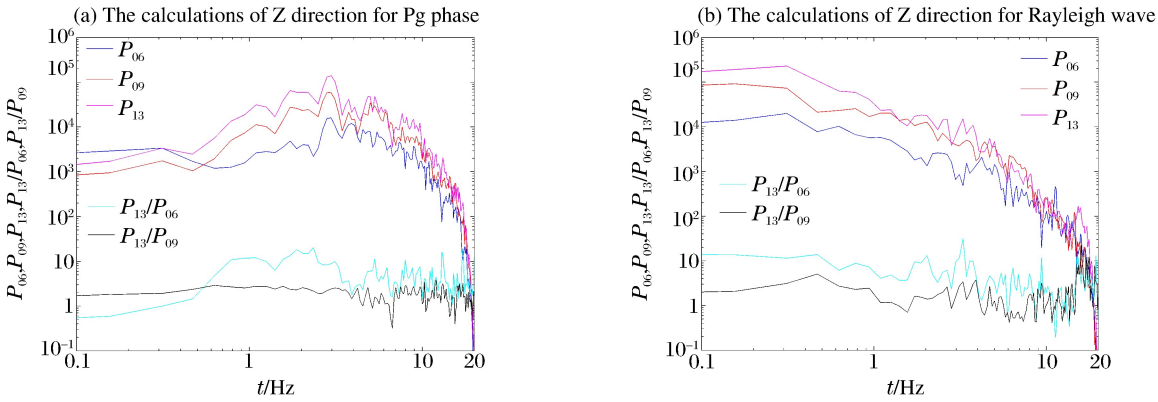

图 2 牡丹江地震台记录的 3 次爆炸事件 Pg 震相和瑞利波之间的功率谱与谱值比

Fig. 2 Power spectrum densities for the Pg and Rayleigh wave of the three explosion events and the ratios of them

计算功率谱是为了对 3 次爆炸事件释放的能量进行对比，并且牡丹江地震台的传递函数在 3 次事件之间没有变化，所以没有对波形进行去除仪器传递函数的计算。因为在计算 3 次事件的谱值比的过程中，会抵扣掉传递函数，所以省却了这个步骤。省掉这个步骤的结果是图 2 显示的 3 次事件功率谱的纵轴单位不是$(m/s)^2$，也不是表示能量衰减所用的 dB，而是量纲为一。

表 2 E13 与 E06、E09 P_g 和瑞利波的功率谱比

Table 2 Power spectrum ratios of E13 to E06 and E09

P_{13}/P_{09}		P_{13}/P_{06}	
Pg	瑞利波	Pg	瑞利波
2.6	2.7	13.9	13.0

表 2 中分频段给出了 3 次爆炸事件的功率谱比值。2～4 Hz 频段(Pg 震相的优势频段)，E13 与 E06 的 Pg 震相功率谱比值 $P_{13}/P_{06}=13.9$，而 E13 与 E09 的谱比值 $P_{13}/P_{09}=2.6$。瑞利波的主要频段为 1 Hz 以下，在此频段，$P_{13}/P_{06}=13$，$P_{13}/P_{09}=2.7$。功率谱代表了能量，把 Pg 与瑞利波震相的功率谱比平均，E13 释放的能量是 E06 的 13.5 倍，是 E09 的 2.7 倍。

3 3 次爆炸事件的相关性分析

为了探索 3 次事件的相似性，对牡丹江地震台记录的 3 次事件的垂直向、北南向和东西向数据进行了相关性分析。为了对相似性进行定量地描述，对 3 次事件的相关系数进行了计算。首先对波形进行 2～4 Hz 的带通滤波，然后，选用了 3 次爆炸头 2 s 的数据进行了相关系数的计算。选择相关系数计算的时间窗一般为 1～2 s[9-10]，在此选择 2 s，使波形窗能包含更多的震相信息。

2 个时间序列的互相关函数可以表示为[11]：

$$c=\frac{\sum_{i=1}^{N}[x(i)-\bar{x}]\,[y(i)-\bar{y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}[x(i)-\bar{x}]^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}[y(i)-\bar{y}]^2}} \tag{3}$$

式中：$x(i)$和 $y(i)$分别为 2 个事件 x 和 y 的时间序列，N 为数据样本点的个数，$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为 N 个样本点的平均值。

根据郝春月等[7]的计算结果，知道前 2 次事件的主要能量集中在 2～4 Hz，所以对这 3 次事件进行了该频段的滤波。再根据式(3)，计算得出牡丹江地震台三分向记录的 3 次爆炸事件波形相关系数的分析结果，由于篇幅限制，图片只给出垂直向结果，见图 3。根据计算，得出 E13 与 E06 垂直向、北南向、东西向波形的最大相关系数分别为 0.92、0.88 和 0.92；E13 与 E09 垂直向、北南向、东西向波形的最大相关系数为 0.99、0.99 和 0.98。可见 E13 与 E09 的相关系数较高，接近于 1。E13 与 E06 的相关系数较小，这也可能是由于 E06 的震级较小，波形信噪比较低造成的，因为低信噪比的波形计算会导致精度降低。3 次事件的相关性分析表示，3 次事件在它们的主要能量分布频段高度相关。这个结果表明 3 次爆炸事件发生的位置相距很近，根据经验[12]，应不超过 5 km。

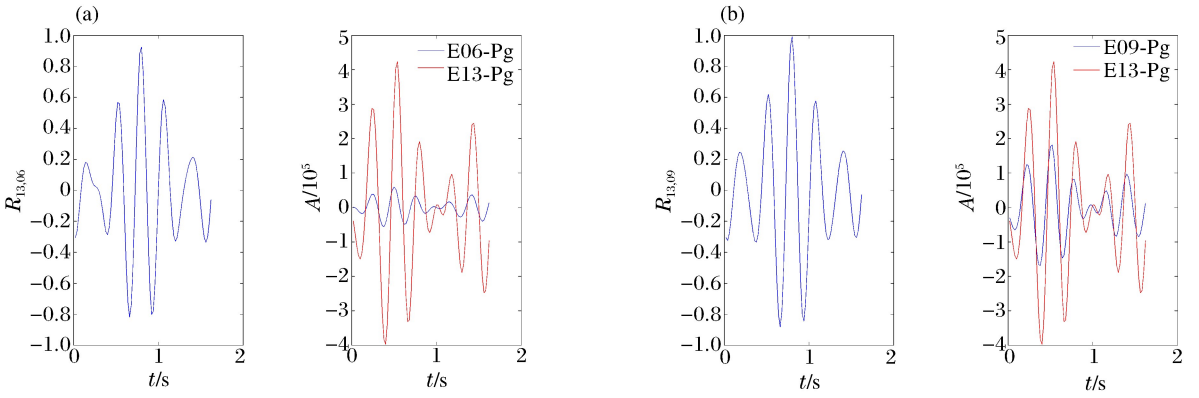

图 3　E13 与 E06、E09 垂直向记录的相关系数计算结果

Fig. 3　Calculated correlation coefficients between E13 and E06, E09 recorded in vertical direction

4　事件的相对位置

3 次事件具有特殊性，对它们进行精确定位具有重要意义。

为了精确定位地震位置，一般在地震活动区建立很多台站，形成一个区域地震台网。台网中台站的监测能力能够覆盖该地区[13]。根据区域地震台网管理规定，一个区域地震台网的定位误差小于 5 km 时，一般定义为Ⅰ类精度，也就是最好的定位结果。3 次爆炸事件发生位置的周围没有区域地震台网，而 GSN 的地震台站分布稀疏，其中距离 3 次爆炸事件位置最近的是牡丹江地震台，震中距为 300 多千米。在台站稀疏并且没有区域台网的情况下很难对 3 次爆炸事件进行精确定位，也就是利用常规方法很难达到Ⅰ类精度的定位。鉴于确定绝对位置存在困难，本文中准备研究其相对位置。弄清其相对位置，对判断该地区以后爆炸事件的发生位置、侦破该地区的地质构造都具有重要意义。

根据 3 次爆炸事件的相关性分析，判断 3 次爆炸事件组成的区域小于 5 km，而本文中要研究 3 次爆炸事件的相对位置，就是要求精度比Ⅰ类高。由于 E06 震级较小，初动不清晰，初动读数误差将使定位精度大大降低，从而不能达到超越Ⅰ类精度的要求，所以只针对 E09 和 E13，计算其相对位置。

众所周知，假设虚波速度不变，震中距越远，则 Sg 与 Pg 的到时差 $t_{Sg}-t_{Pg}$ 和 Pg 与 Pn 的到时差 $t_{Pg}-t_{Pn}$ 就越大[14]。牡丹江地震台记录的波形出现了 Pn 震相(图 1(a))，Pg 震相振幅最大。把牡丹江台记录的 2 次事件的 Pn 震相两两对齐，最大的 Pg 震相进行对比，见图 4(a)。白家疃地震台距离事件位置 1 000多千米，最明显的震相是 Pg 和 Sg(图 1(b))，把白家疃地震台记录的 2 次事件的 Pg 震相两两对齐，Sg 震相的最大振幅进行对比，见图 4(b)。

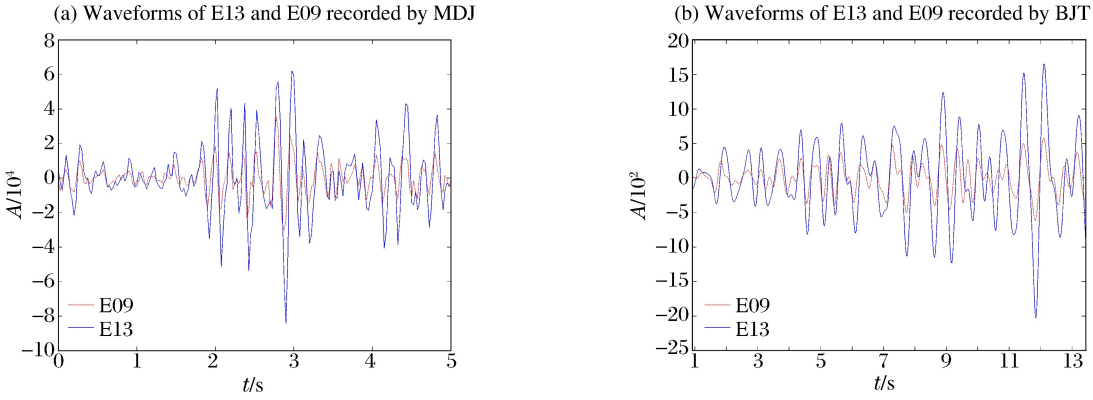

图 4　牡丹江与白家疃地震台记录的 E13、E09 的相对位置分析

Fig. 4　Analysis of the relative location between E13 and E09 recorded by MDJ and BJT

图4(a)给出了牡丹江台记录的E13与 E09 Pg震相的波形对比。可以看出,E13的Pg震相比E09的晚到,由于牡丹江地震台位于爆炸事件位置的北偏东方向(图5),可以得出 E13事件在 E09事件的南侧;图4(b)给出了白家疃台记录的E13与E09间Sg震相的波形对比。可以看出,E13的Sg震相比E09的晚到,由于白家疃地震台位于爆炸事件位置的西偏南方向(图 5),可以得出E13在E09的东侧。根据牡丹江、白家疃和 2次爆炸事件的地理方位,可以判断,E13位于E09的东南方向,见图6。图6只是示意图,并不表示事件的真实位置。

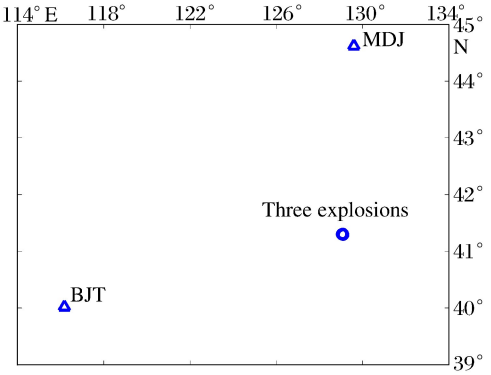

图 5 台站与事件的相对位置

Fig. 5 Distribution of stations and explosions

本文结果与美国NEIC给出的PDE结果(图6)不同,尤其是E13事件,牡丹江地震台的波形很清晰,在Pn对齐后,E13的Pg震相比E09的晚到,即E13的震中距比E09的震中距大,又由于牡丹江地震台位于爆炸事件的北偏东方向,所以E13位于E09的偏南方向。

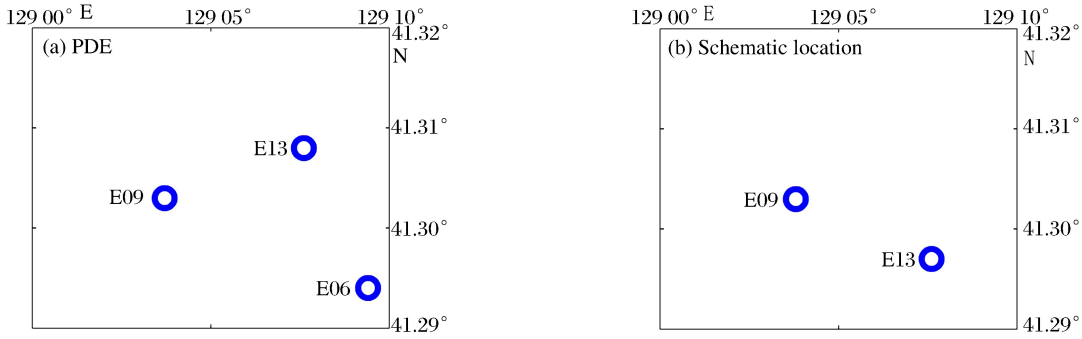

图 6 3 次爆炸事件的相对位置

Fig. 6 Relative location of three explosions

5 结 论

2013 年爆炸事件(E13)爆发能量是 2009 年爆炸事件(E09)爆发能量的 2 倍多,是 2006 年爆炸事件(E06)爆炸能量的 10 多倍。

在 2～4 Hz 频段内,E13 与 E06 和 E09 三分向波形的最大相关系数平均分别为 0.90 和 0.99。分析 3 次爆炸事件的相关性可知,在 2～4 Hz 频段,E13 与 E06 和 E09 高度相关。这表明这 3 次事件发生位置相距很近,根据经验,总孔径不超过 5 km。

E13 发生位置位于 E09 的东南方向,该结论与 2013 年 2 月 5 日郑州晚报的报道[15]相符,该报道暗示 2013 年爆炸事件发生在丰溪里试验场西侧坑道(2009 年爆炸事件发生地)东南向的南侧坑道。

参考文献:

[1] USGS. Earthquakes: Search EQ archives[EB/OL]. [2006-10-09]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/

[2] USGS. Earthquakes: Search EQ archives[EB/OL]. [2009-5-25]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/

[3] USGS. Earthquakes: Search EQ archives[EB/OL]. [2013-02-12]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/

[4] Kim W Y, Richards P G. North Korean nuclear test: Seismic discrimination at low yield[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2007, 88(13/14): 157-161.

[5] 范娜,赵连锋,谢小碧,等. 朝鲜核爆的 Rayleigh 波震级测量[J]. 地球物理学报,2013,56(3):906-915.
Fan Na, Zhao Lian-feng, Xie Xiao-bi, et al. Measurement of Rayleigh-wave magnitudes for North Korean nuclear

tests[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013,56(3):906-915.
[6] 胡广书.数字信号处理:理论、算法与实现[M].北京:清华大学出版社,2003:324-341.
[7] 郝春月,郑重.2 次爆炸事件的相关性与能量比研究[J].爆炸与冲击,2010,30(5):535-540.
Hao Chun-yue, Zheng Zhong. Relativity and energy ratio between two explosion events[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(5):535-540.
[8] 时振梁,张少泉,赵荣国,等.地震工作手册[M].北京:地震出版社,1992:41-47.
[9] Kværna T. On exploitation of small-aperture NORESS type arrays for enhanced P-wave detectability[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1989,79(3):888-900.
[10] Mykkeltveit S, Åstebøl K, Doornbos D J, et al. Seismic array configuration optimization[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983,73(1):173-186.
[11] Harjes H P. Design and siting of a new regional seismic array in Central Europe[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1990,80(6B):1801-1817.
[12] Ingate S F, Husebye E S, Christoffersson A. Regional arrays and optimum data processing schemes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985,75(4):1155-1177.
[13] 彼得·鲍曼.新地震观测实践手册[M].中国地震局监测预报司,译.北京:地震出版社,2006:321-367.
[14] 傅淑芳,刘宝诚,李文艺.地震学教程[M].北京:地震出版社,1980:137-153.
[15] 郑州晚报数字报:A12 版:国际新闻[N/OL].[2013-02-05]http://zzwb.zynews.com/html/2013-02/05/content_440861.htm

Main characteristics for three explosion events based on explosion waves*

Hao Chun-yue, Zheng Zhong
(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The three explosion events recorded by Mudanjiang and Baijitong sesimic stations on October 9, 2006, May 25, 2009 and Feburary 12, 2013 were analyzed, respectively. Both the stations belong to Global Sesimic Network. The energy ratios of the three events were estimated by comparing the maximum P-phase amplitudes and the power spectrum densities, and the correlation coefficients of the three explosion events were determined. The phases were compared to determine the relative location of these explosion events. Comparison between the 2013 event and the 2009 event displays that the mean ratios of the maximum amplitudes and the power spectrum densities are about 2.3 and 2.7, respectively. The results for the 2013 event and the 2006 event displays that the mean ratio of the maximum amplitudes is about 10.1 and the mean ratio of the power spectrum densities is about 13.5. It indicates that the energy released by the 2013 event is about 11.8 times as much as that released by the 2006 event and 2.5 times as much as that released by the 2009 event. The maximum cross correlations were 0.90 and 0.99 for the 2013, 2006 events and the 2013, 2009 events in 2—4 Hz, respectively. These results mean that the 2013 event is highly correlated to the 2006 and 2009 events in the frequency band which the main energy concentrated, and this shows that the relative distances of the three events are not long. The analysis on the relative locations of these three events can explain that the 2013 event lies to the southeast of the 2009 events.

Key words: mechanics of explosion; relative location; energy ratio; explosion event; correlation

* Received 12 April 2013; Revised 17 October 2013
Corresponding author: Hao Chun-yue, haovanilla@sina.com

(责任编辑　张凌云)