

刘莎, 杨建思, 田宝峰, 郑钰, 姜旭东, 徐志强. 2012. 首都圈地区爆破、矿塌和天然地震的识别研究. 地震学报, 34(2): 202-214.

Liu Sha, Yang Jiansi, Tian Baofeng, Zheng Yu, Jiang Xudong, Xu Zhiqiang. 2012. Discrimination between explosions, mine collapses and earthquakes in capital region of China. *Acta Seismologica Sinica*, 34(2): 202-214.

# 首都圈地区爆破、矿塌和天然地震的识别研究<sup>\*</sup>

刘 莎 杨建思<sup>\*</sup> 田宝峰 郑 钰 姜旭东 徐志强

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 选取首都圈地区 2008 年 8 月—2009 年 9 月  $M_L$  在 2.0—2.2 范围内的爆破、矿塌和天然地震数据资料, 从时间域和频率域进行分析对比, 总结出识别爆破、矿塌和天然地震的依据。在时域方面, 爆破的初动方向向上, 矿塌向下, 天然地震的初动方向依赖于台站的分布情况; 爆破和矿塌的面波比较发育; 天然地震的 S 波与 P 波最大振幅比( $A_S/A_P$ )大于爆破和矿塌, 同时, 爆破和矿塌的能量衰减比天然地震快。在频域方面, 高频成分的能量衰减快于低频; 天然地震的拐角频率较高, 爆破次之, 矿塌的最小; 在震中距 200 km 范围内, 爆破的顶峰频率主要分布在 5—7 Hz, 矿塌分布在 2—4 Hz, 天然地震的顶峰频率较大, 在 10—18 Hz 范围内。另外, 天然地震的频率域较宽, 其次为爆破、矿塌。

**关键词** 爆破 矿塌 天然地震 时间域 频率域

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2012.02.007 中图分类号: P315.63 文献标志码: A

## Discrimination between explosions, mine collapses and earthquakes in capital region of China

Liu Sha Yang Jiansi<sup>\*</sup> Tian Baofeng Zheng Yu Jiang Xudong Xu Zhiqiang  
(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Choosing seismic data of explosions, collapses and earthquakes with  $M_L$  in the range of 2.0—2.2 during August 2008 to September 2009 in capital region, and analyzing and comparing the data in time and frequency domain, this paper studies how to identify the explosion, mine collapse and earthquake. In time domain, vertical component first motion of explosion seismic records is upward, and that of mine collapses is downward, while that of earthquakes depends on station distribution. The S to P wave amplitude ratio ( $A_S/A_P$ ) of earthquakes are larger than that of explosions and collapses. Moreover, energy attenuation of explosions and collapses is faster than that of earthquakes. In frequency domain the energy attenuation of high frequency wave is faster than that of low frequency one. For the events with similar magnitude, the corner frequencies of ampli-

\* 基金项目 地震行业专项基金(200708009)资助。

收稿日期 2011-03-24 收到初稿, 2011-11-18 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: yangjs@cea-igp.ac.cn

tude spectrum for earthquakes are the highest, and that for explosions are secondary high, while the corner frequencies for mine collapses are the lowest. When epicenter distance is smaller than 200 km, the peak frequencies of explosion amplitude spectrum are mainly 5—7 Hz, and that of collapses are 2—4 Hz, while the peak frequencies of earthquakes are high in the range of 10—18 Hz. The wave frequency range of earthquakes is the widest, and that of explosions and collapses are next-wide.

**Key words:** explosion; mine collapse; earthquake; time domain; frequency domain

## 引言

随着近 10 多年来我国数字地震观测系统和技术的高速发展, 地震监测能力和水平得到很大提高。地震台网记录到一些小地震事件的同时, 也记录到更多爆破和矿塌事件。由于新的观测系统的工作频带范围加宽, 数字记录波形的频率成分比以前模拟记录时代丰富, 因此记录到的事件波形特征相对于以前模拟系统记录也有所变化, 所以在目前的地震目录中, 会出现一些比较含糊的事件。特别是近年来工业组合爆破的出现, 使得记录的波形更加复杂化, 尤其是对于周边一些爆破事件的监测, 需要快速准确地鉴别事件的性质类型。因此, 如何区分天然地震与非天然地震事件成为监测工作中的重要问题之一。

自 20 世纪 60 年代以来, 国内外先后有不少学者对天然地震与爆破进行了广泛的研究和深入的讨论, 为识别天然地震与人工地震提供了有效的判据(傅淑芳等, 1980; 时振梁等, 1990; 杨成荣等, 2001; 张诚, 1988; 张萍等, 2005; Chael, 1998; Douglas, Kathleen, 1988; Dysart, Pulli, 1987; Kim *et al*, 1993; Plafcan *et al*, 1997; Walter *et al*, 1995)。在该领域中特别活跃的是天然地震与核爆的观测与识别研究(吴忠良等, 1994; 魏富胜, 黎明, 2003; Kim *et al*, 1997; Mark, 2006; Richard, John, 1971; Richards, Zavales, 1990; Walter *et al*, 2007; Yang *et al*, 2004; Zhao *et al*, 2008)。以上研究多是针对某个地区或某个台阵探讨对核爆事件的识别研究, 为识别天然地震与人工地震提供了各种可能适用的判据。归纳起来主要是从波形、波谱、P 波初动、P 波和 S 波振幅比、尾波衰减、倒谱以及 P/Lg 的谱值比等方面对爆破识别进行的研究。近年来, 为了提高事件识别的有效性, 一些振动分析的算法也应用于天然地震与爆破的识别研究。其中应用较为广泛的小波算法也被用于对人工地震与天然地震的区别研究中(黄汉明等, 2010; 卢世军, 黄汉明, 2010; Yang *et al*, 2004)。另外, 人工神经网络、遗传算法也用于识别天然地震与人工地震的研究中(Dowla *et al*, 1990; Mohammed *et al*, 2005; Niksa, Sven, 2010; Pulli, Dysart, 1990; 边银菊, 2002)。

以上研究为区分天然地震与爆破事件进行了很好的探索, 但是由于问题本身的复杂性, 特别是天然地震信号本身的复杂性, 以及目前组合爆破源和矿区塌陷的出现使得这一问题更为复杂化。而且对于不同的地区和地震台站记录, 有些天然地震与人工地震的识别判据的适用性不同, 因此对于特定的地区, 采用不同的方法对其进行深入研究也有一定的必要性。本文在参考前人研究成果的基础上, 根据数字地震观测系统资料, 针对首都圈地区在 2008—2009 年发生的爆破、矿塌和天然地震事件, 从时域、频域两方面进行综合分析研究, 力图归纳出一些简化实用的综合判据。

## 1 数据选取

北京遥测数字地震台网从数字化观测开始(1995年),便开展了对非天然地震事件的监测和目录编制的工作.对首都圈地区的爆破和矿塌事件发生的时间和地点有比较准确的判断,而且分析人员经过多年的观测实践,对区分天然地震、矿塌和爆破也有了很好的分析经验.

本文选取北京遥测数字地震台网的宽频带地震仪,三分向数字记录资料.事件选取首都圈地区( $36^{\circ}$ — $42^{\circ}$ N,  $111^{\circ}$ — $120^{\circ}$ E)2008年8月—2009年9月的部分爆破、矿塌和天然地震.为了便于分析比较,选取了波形数据清晰的垂直向记录进行计算.而且为了尽可能在同等条件下讨论,选取同样震级大小,同样的地震台网记录的数据.因此事件选取的原则是:①北京遥测地震台网记录的首都圈地区的天然地震和非天然地震事件;②爆破、矿塌和天然地震的震级( $M_L$ )在2.0—2.2范围内;③至少有5个地震台站记录到的天然和非天然地震事件.

选取的事件参数见表1、表2和表3.首都圈地区台站分布图以及震中位置分布见图1.

表1 爆破数据表

Table 1 Catalogue of the explosions with seismic data used

序号	发震时间(北京时)		地点	$M_L$	事件确认	序号	发震时间(北京时)		地点	$M_L$	事件确认
	年-月-日	时:分:秒					年-月-日	时:分:秒			
1	2008-08-20	03:10:56	山西左云	2.2	A, B	11	2008-12-12	09:47:58	北京门头沟	2.0	A, B
2	2008-08-22	12:03:29	山西朔州	2.0	B	12	2009-01-18	11:33:12	河北涞源	2.0	B
3	2008-09-03	12:30:08	山西朔州	2.1	A, B	13	2009-03-08	02:38:19	北京房山	2.1	A, B
4	2008-09-30	12:02:00	山西朔州	2.1	A, B	14	2009-03-12	17:34:16	河北丰润	2.0	A, B
5	2008-09-30	15:50:29	山西朔州	2.0	B	15	2009-04-06	00:51:42	北京门头沟	2.0	B
6	2008-10-07	06:52:36	河北易县	2.0	A, B	16	2009-06-04	22:50:28	河北行唐	2.0	A, B
7	2008-10-14	12:03:08	山西朔州	2.0	B	17	2009-06-05	17:42:30	河北唐山	2.0	A, B
8	2008-10-16	12:04:58	山西朔州	2.0	B	18	2009-06-06	12:00:35	河北滦县	2.1	A, B
9	2008-11-18	10:28:50	山西太原	2.1	A, B	19	2009-06-22	13:25:52	北京房山	2.0	A, B
10	2008-11-23	08:02:14	河北易县	2.0	A, B	20	2009-06-29	00:05:31	北京房山	2.1	B

注: A表示爆破事件数据是经过实地野外勘探结果确认; B表示爆破事件数据是经过北京遥测地震台网分析人员确认.

表2 矿塌数据表

Table 2 Catalogue of mine collapses

序号	发震时间(北京时)		地点	$M_L$	事件确认	序号	发震时间(北京时)		地点	$M_L$	事件确认
	年-月-日	时:分:秒					年-月-日	时:分:秒			
1	2008-08-07	20:23:55	山西大同	2.1	B	11	2009-01-29	05:20:16	山西大同	2.2	B
2	2008-08-14	14:52:51	山西大同	2.1	A, B	12	2009-03-16	10:55:05	山西大同	2.2	B
3	2008-09-06	07:12:20	山西大同	2.2	A, B	13	2009-05-11	04:05:52	山西大同	2.1	A, B
4	2008-09-11	05:47:27	山西大同	2.0	A, B	14	2009-05-11	20:43:15	山西大同	2.0	A, B
5	2008-11-26	23:39:55	山西大同	2.2	B	15	2009-06-07	19:44:20	山西大同	2.0	A, B
6	2008-12-03	00:14:39	山西大同	2.2	A, B	16	2009-06-24	07:00:44	山西大同	2.2	B
7	2008-12-27	20:54:43	山西大同	2.0	A, B	17	2009-07-26	01:31:08	北京房山	2.1	A, B
8	2008-12-28	05:53:56	山西大同	2.1	A, B	18	2009-08-14	05:02:24	山西大同	2.2	A, B
9	2009-01-06	10:44:07	山西大同	2.2	A, B	19	2009-08-21	08:42:12	山西左权	2.1	B
10	2009-01-07	14:34:55	山西大同	2.1	A, B	20	2009-08-22	07:54:15	山西大同	2.1	B

注: A表示矿塌事件数据是经过实地野外勘探结果确认; B表示矿塌事件数据是经过北京遥测地震台网分析人员确认.

表3 天然地震数据表  
Table 3 Catalogue of earthquakes

序号	发震时间(北京时)		地点	$M_L$	事件确认	序号	发震时间(北京时)		地点	$M_L$	事件确认
	年-月-日	时:分:秒					年-月-日	时:分:秒			
1	2008-08-11	03:30:13	河北宁晋	2.1	B	11	2009-06-03	00:01:30	山西古交	2.0	B
2	2008-08-22	13:15:08	河北武安	2.0	B	12	2009-06-11	02:09:05	河北唐山	2.0	B
3	2008-09-03	04:39:28	北京平谷	2.0	B	13	2009-06-15	19:05:27	河北宁晋	2.0	B
4	2008-09-28	22:32:44	河北滦县	2.0	B	14	2009-06-29	18:19:56	河北滦县	2.0	B
5	2008-10-01	15:50:01	河北玉田	2.0	B	15	2009-08-15	18:45:31	河北阜平	2.0	B
6	2008-11-05	04:01:23	山西文水	2.0	B	16	2009-08-21	08:42:25	河北邯郸	2.1	B
7	2008-11-14	17:13:13	河北围场	2.0	B	17	2009-08-31	16:48:25	河北唐山	2.0	B
8	2009-02-01	06:59:18	北京延庆	2.1	B	18	2009-09-04	14:32:24	河北唐山	2.0	B
9	2009-03-05	01:18:44	山西清徐	2.0	B	19	2009-09-05	01:32:04	河北宁晋	2.0	B
10	2009-03-28	19:15:35	山西原平	2.0	B	20	2009-09-08	02:29:58	山西神池	2.1	B

注: A 表示事件数据是经过实地野外勘探结果确认; B 表示事件数据是经过北京遥测地震台网分析人员确认。

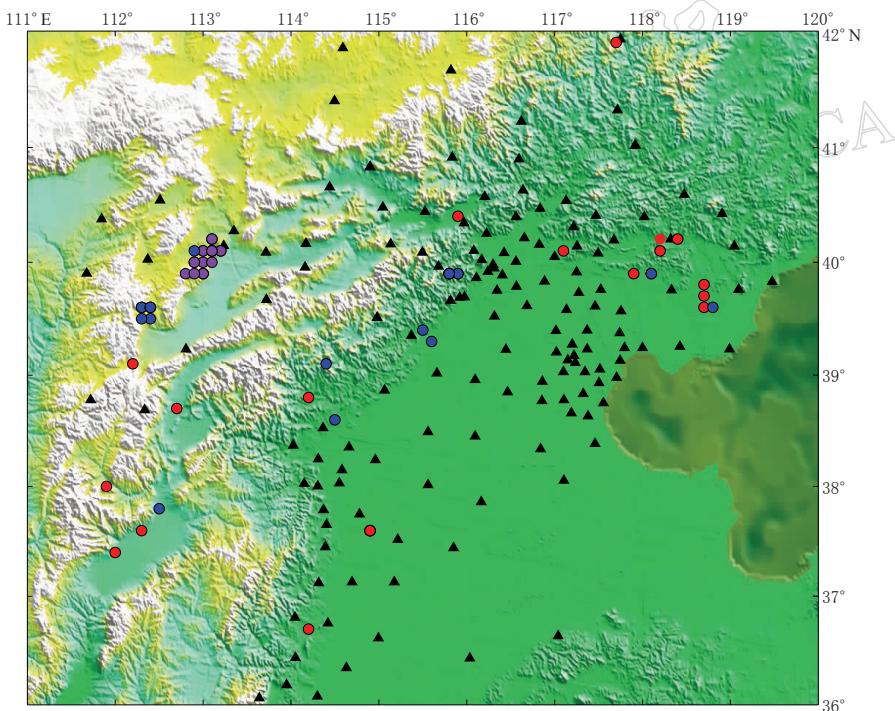


图1 首都圈地区台站和震中分布图

黑色三角表示台站位置; 红色圆表示天然地震震中位置; 蓝色圆表示爆破

震中位置; 紫色圆表示矿塌震中位置

Fig. 1 Seismic stations in capital region

Black triangles demote stations, red circles indicate earthquake epicenters, blue circles stand for explosions, and purple circles represent mine collapses

## 2 研究方法

### 2.1 时域分析的方法原理

爆破、矿塌和天然地震震源的物理机制是不同的, 相应它们产生的地震波会有不同的

特征, 这种出现在地震波时域中的特征是区分爆破、矿塌和天然地震的最直接方法。

在时间域采用波形对比法寻找首都圈地区爆破、矿塌和天然地震事件的识别判据。在对比分析过程中, 吸收总结北京遥测地震台网地震监测一线的人工识别经验, 通过对不同地震台站记录到的爆破、矿塌和天然地震波形的对比分析, 找出三者之间的规律性差异。具体从以下几个方面的时域特点进行分析对比: P 波的垂直向初动方向, 面波的发育状况, 纵、横波振幅比, 波列的振幅衰减信息, 以及事件发生的时间和空间特点。

## 2.2 频域分析的方法原理

地震波谱是地震震源所辐射的地震波在频率域中的一种描述, 它与震源的力学参数有着密切的关系。不同的震源模式所辐射的理论地震波谱是不同的。对地震波谱的分析也是一种识别爆破、矿塌和天然地震的有效方法。

本文采用传统的方法——快速傅里叶变化(FFT)对时域信号进行时频变换。快速傅里叶变换方法是传统而经典的振动信号分析方法, 能很好地表述信号的频率特征。其表达式如下:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (1)$$

式中,  $x(n)$  为有限长时间序列,  $N$  为有限长时间序列的采样点数,  $X(k)$  为  $x(n)$  的傅里叶变换(大崎顺彦, 1976; 陈玉东, 2005)。

## 3 爆破、矿塌和天然地震的特点分析

### 3.1 时域波形图的特点分析

从 P 波初动方向, 面波发育情况, P、S 波振幅比, 以及振幅衰减等时域特征, 分别对首都圈地区的爆破、矿塌和天然地震波形记录进行对比分析。

1) P 波垂直向初动。对比首都圈地区爆破、矿塌和天然地震的波形记录可以观察到, 爆破的 P 波垂直分量初动在所有记录台站都是向上的(“+”), 矿塌在所有的方位上 P 波垂直向初动均向下(“-”), 天然地震 P 波的垂直向初动有些向上、有些向下, 有一定的方向分布特征。所以 P 波垂直向初动分布特征可以作为区别这三个者的一个依据(表 4—6)。

表 4 爆破事件的初动和衰减时间表

Table 4 First motion and attenuation time of explosions

序号	发震日期 年-月-日	地点	台站	初动	t/s
1	2008-08-22	山西朔州	清水河	+	35
2	2008-09-03	山西朔州	清水河	+	32
3	2008-09-30	山西朔州	清水河	+	37
4	2008-09-30	山西朔州	清水河	+	38
5	2008-10-07	河北易县	完县	+	30
6	2008-10-14	山西朔州	宁武	+	31
7	2008-10-16	山西朔州	右玉	+	35
8	2009-06-04	河北行唐	井陉	+	29
9	2009-06-05	河北唐山	南山村	+	33
10	2009-06-06	河北滦县	遵化	+	31

表 5 矿塌事件的初动和衰减时间表

Table 5 First motion and attenuation time of collapses

序号	发震日期 年-月-日	地点	台站	初动	t/s
1	2008-09-11	山西大同	恒山	-	38
2	2008-11-26	山西大同	恒山	-	34
3	2008-12-03	山西大同	恒山	-	36
4	2009-01-06	山西大同	恒山	-	28
5	2009-01-07	山西大同	恒山	-	30
6	2009-01-29	山西大同	恒山	-	31
7	2009-06-07	山西大同	恒山	-	33
8	2009-06-24	山西大同	恒山	-	37
9	2009-08-14	山西大同	恒山	-	39
10	2009-08-22	山西大同	恒山	-	35

表 6 天然地震事件的初动和衰减时间表

Table 6 First motion and attenuation time of earthquakes

序号	发震日期 年-月-日	地点	台站	初动	t/s
1	2009-06-03	山西古交	宁武	+	61
2	2009-06-11	河北唐山	遵化	+	52
3	2009-06-15	河北宁晋	枣强	+	53
4	2009-06-29	河北滦县	青龙	-	58
5	2009-08-15	河北阜平	新乐	-	55
6	2009-08-21	河北邯郸	邢台	-	49
7	2009-08-31	河北唐山	糙甸	+	54
8	2009-09-04	河北唐山	兴隆东	+	60
9	2009-09-05	河北邢台	枣强	-	56
10	2009-09-08	山西神池	雁门关	+	56

记录中面波的振幅、周期变化都极为清楚, 振幅很强。但是面波发育不一定是爆破或者矿塌。对于地方震, 面波一般不显著, 当震源很浅时, 在震中距很小的地震记录中仍可观测到明显的面波。

2) 面波发育情况。天然地震在震中距 200 km 以内的基本震相有 Pg 和 Sg 两个直达纵波和横波, 面波一般不发育。而爆破和矿塌产生的波则不同。在爆破和矿塌的记录中, 可以观测到明显的面波。在地震记录图中, 震中距  $\Delta$  较小时面波分辨不出来。

在首都圈地区的爆破和矿塌记录中, 面波较为发育。图 2 给出了不同地震台记录到的不同震中距、不同地点的爆破和矿塌中的面波实例。

记录中面波的振幅、周期变化都极为

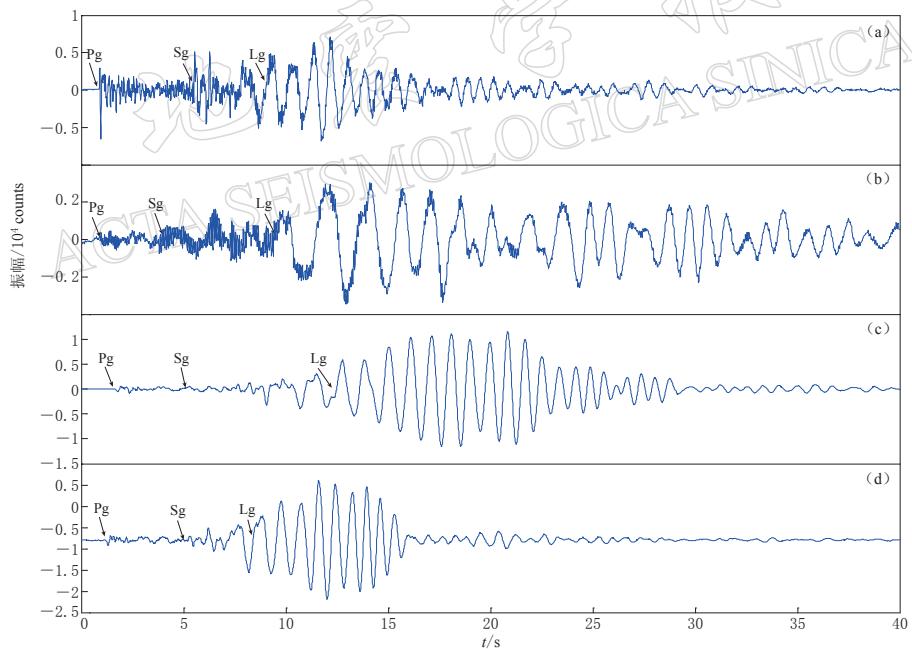


图 2 爆破和矿塌面波波形图

(a) 镇川台记录的山西左云爆破(2008-08-20 03:10:56,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=35.52$  km); (b) 右玉台记录的山西朔州爆破(2008-09-30 12:02:00,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=54.39$  km); (c) 镇川台记录的山西大同矿塌(2008-08-14 14:52:51,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=44.40$  km); (d) 镇川台记录的山西大同矿塌(2008-11-26 23:39:55,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=34.41$  km)

Fig. 2 Surface wave of explosions and mine collapses

- (a) Explosion in Zuoyun, Shanxi, recorded by ZCH station (2008-08-20 03:10:56,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=35.52$  km);
- (b) Explosion in Shuozhou, Shanxi, recorded by YUY station (2008-09-30 12:02:00,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=54.39$  km);
- (c) Mine collapse in Datong, Shanxi, recorded by ZCH station (2008-08-14 14:52:51,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=44.40$  km);
- (d) Mine collapse in Datong, Shanxi, recorded by ZCH station (2008-11-26 23:39:55,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=34.41$  km)

3) 振幅比  $A_s/A_p$ . 振幅比表征了地震的动力学特性, 它不取决于地震波振幅的绝对值, 基本上与震级无关. 选取记录到的爆破、矿塌和天然地震的波形, 可以看出三者  $A_s/A_p$  的区别. 本文选择台站记录的垂直向波形进行分析对比, 如图 3 所示.

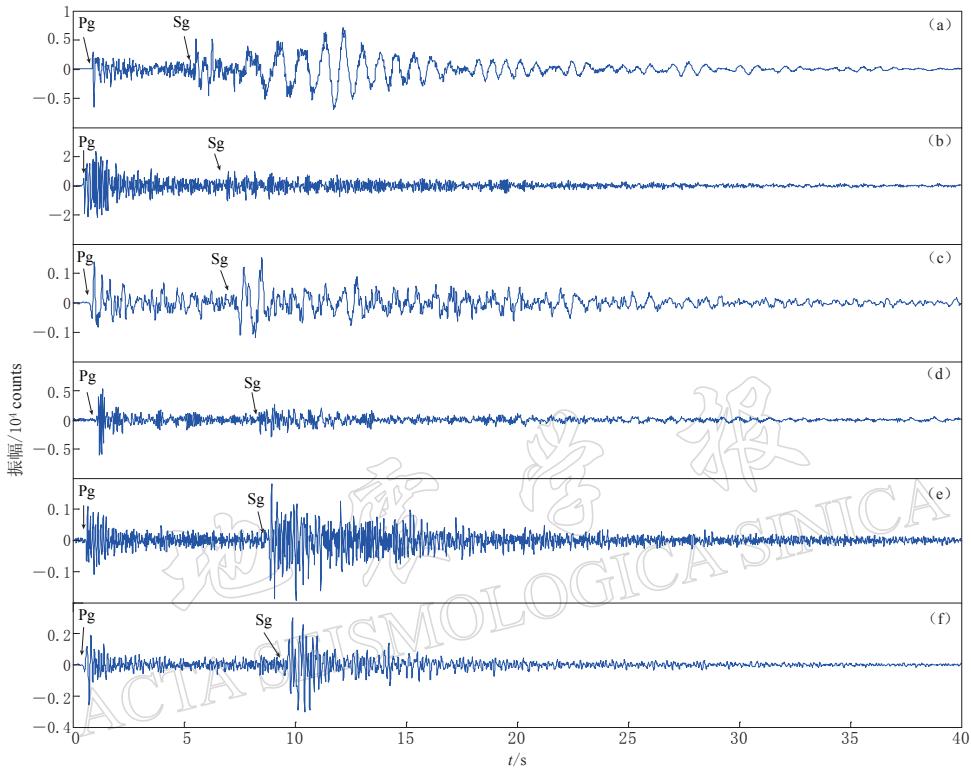


图 3 爆破、矿塌和天然地震波形图

(a) 镇川台记录的山西左云爆破(2008-08-20 03:10:56.7,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=35.52$  km); (b) 右玉台记录的山西左云爆破(2008-08-20 03:10:56.7,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=52.17$  km); (c) 山自皂台记录的山西大同矿塌(2008-09-06 07:12:20.5,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=49.95$  km); (d) 右玉台记录的山西大同矿塌(2008-09-06 07:12:20.5,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=61.05$  km); (e) 邢台台记录的山西左权地震(2009-08-21 08:42:12,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=73.26$  km); (f) 永年台记录的山西左权地震(2009-08-21 08:42:12,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=73.26$  km)

Fig. 3 Waveforms of explosion, mine collapse and earthquake

(a) Explosion in Zuoyun, Shanxi, recorded by ZCH station (2008-08-20 03:10:56.7,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=35.52$  km); (b) Explosion in Zuoyun recorded by YUY station (2008-08-20 03:10:56.7,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=52.17$  km); (c) Mine collapse in Datong, Shanxi, recorded by SZZ station (2008-09-06 07:12:20.5,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=49.95$  km); (d) Mine collapse in Datong recorded by YUY station (2008-09-06 07:12:20.5,  $M_L=2.2$ ,  $\Delta=61.05$  km); (e) Earthquake in Zuoquan, Shanxi, recorded by XTT station (2009-08-21 08:42:12,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=73.26$  km); (f) Earthquake in Zuoquan recorded by YON station (2009-08-21 08:42:12,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=73.26$  km)

可以看出, 爆破的波形初动强而尖锐, P 波振幅通常很大, 与 S 波振幅相当或者大于 S 波振幅. 矿塌波形的初动较强, 通常 P 波振幅相对 S 波振幅较大,  $A_s/A_p < 1$ . 而天然地震 P 波振幅比 S 波振幅小,  $A_s/A_p > 1$ .

4) 振幅衰减的比较. 爆破、矿塌与天然地震记录的振幅衰减特征可以直接用尾波持续时间  $t$  来度量,  $t$  值大表示衰减慢, 反之则表示衰减快(杨成荣等, 2001).

用尾波持续时间  $t$  来进行对比分析是在天然地震、爆破与矿塌震级相等的前提下进行

的。对  $t$  值的量取标准和  $t$  的计算作如下规定: 对某一台站的垂直向波形记录, 从 P 波到时开始到振动衰减结束为全波衰减时间, 单位为 s。实际量取时, 从 P 波到时开始, 直至干扰水平, 即双振幅约为 1 mm 为止。对比相同震级、相同震中距的爆破、矿塌和天然地震的衰减时间  $t$ 。在本次比较中, 选取震级为 2.0—2.1, 震中距  $\Delta=0.66$  左右的台站, 对衰减时间  $t$  进行比较。

从表 4—6 可以看出, 天然地震的衰减时间比爆破和矿塌的明显要长。可见, 天然地震的能量衰减相对要慢。

5) 发生时间和地点。一般来说, 爆破是为数有限的, 并在固定的几个地点重复进行。在时间上, 人为控制因素较多。矿塌发生的地点多在煤矿开发区, 地点较为固定(图 1)。而天然地震则多发生于板块活动剧烈的地带, 在时间上较为不定(张诚, 1988)。

### 3.2 频域特点分析

#### 3.2.1 计算结果

顶峰频率和拐角频率的确定以图 4 为例来说明。图 4 左侧图采用线性坐标, 右侧图采用对数坐标, 其中  $f_m$  为顶峰频率,  $f_c$  表示拐角频率。我们定义  $f_m$  为: 最大振幅谱值所对应的频率值, 区别于主频的概念; 拐角频率  $f_c$  的定义为: 振幅谱高频渐近趋势与低频趋势的交点(陈运泰等, 2000)。我们选择振幅有明显衰减变化时所对应的频率为拐角频率。为

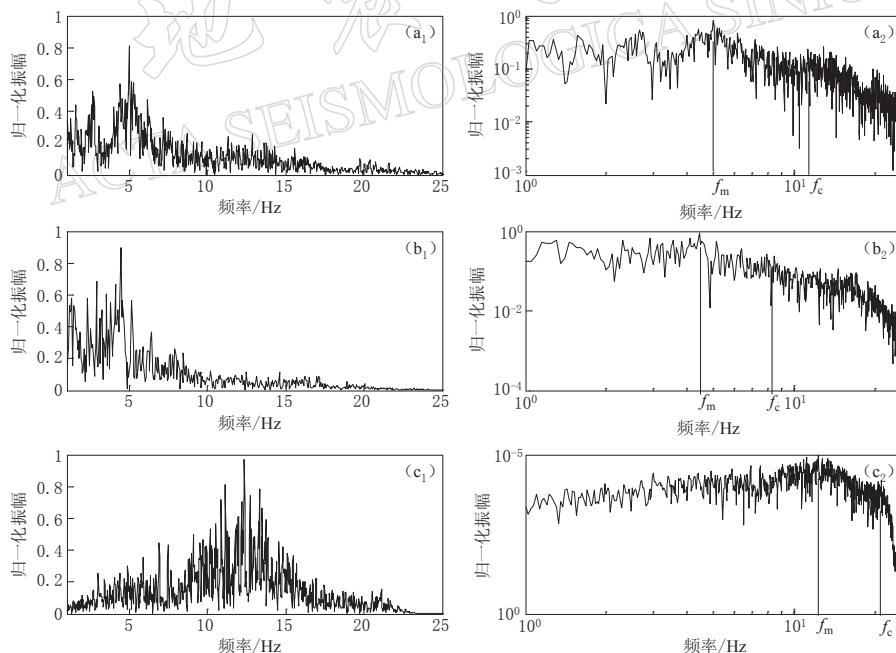


图 4 波形频谱图

(a<sub>1</sub>), (a<sub>2</sub>) 十三陵台记录的北京房山爆破(2009-03-08 02:38:19,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=52.17$  km);

(b<sub>1</sub>), (b<sub>2</sub>) 十三陵台记录的北京房山矿塌(2009-07-26 01:31:08,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=51.06$  km);

(c<sub>1</sub>), (c<sub>2</sub>) 喇堂台记录的北京延庆地震(2009-02-01 06:59:18,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=55.5$  km)

Fig. 4 Amplitude spectrum of waveforms

(a<sub>1</sub>), (a<sub>2</sub>) Explosion in Fangshan, Beijing, recorded by SSL station (2009-03-08 02:38:19,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=52.17$  km); (b<sub>1</sub>), (b<sub>2</sub>) Mine collapse in Fangshan recorded by SSL station (2009-07-26 01:31:08,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=51.06$  km); (c<sub>1</sub>), (c<sub>2</sub>) Earthquake in Yanqing, Beijing, recorded by ZHT station

(2009-02-01 06:59:18,  $M_L=2.1$ ,  $\Delta=55.5$  km)

了便于分析比较, 图中将振幅谱全部经过归一化处理。

### 3.2.2 频谱图的分析与比较

通过对对比分析发现, 在首都圈地区, 震级大致相同的爆破、矿塌和天然地震, 它们的振幅谱图存在比较明显的差异。

拐角频率是振幅谱高频渐近趋势与低频渐近趋势的交点, 是对远场位移谱宽度的一种估计, 实际上也反映了震源尺度大小的物理量(陈运泰等, 2000)。波谱的拐角频率与震源的各项参数有关, 它反映了地震波高低频能量的分布特征, 以及地震波的衰减变化特征。本文通过计算统计得到爆破、矿塌和天然地震的拐角频率和顶峰频率分布图(图 5、图 6),

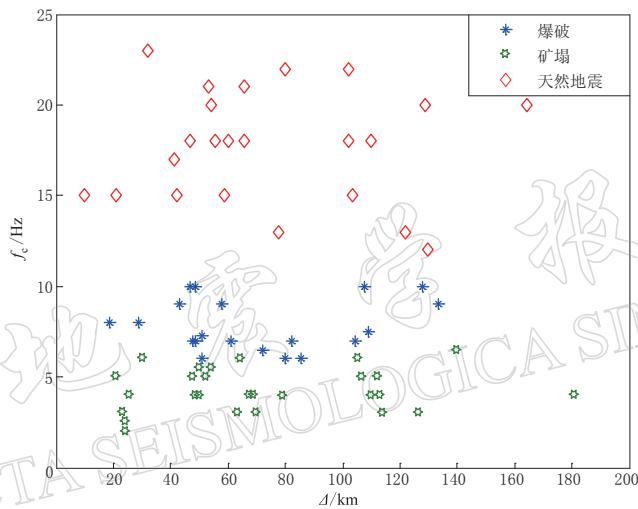


图 5 爆破、矿塌和天然地震拐角频率分布

Fig. 5 Corner frequency versus epicenter distance for explosions, collapses and earthquakes

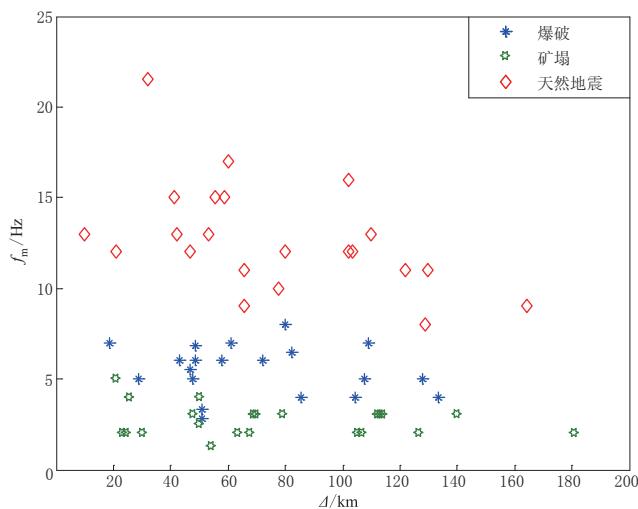


图 6 爆破、矿塌和天然地震顶峰频率分布图

Fig. 6 Peak frequency versus epicenter distance for explosions, collapses and earthquakes

图中采用的地震事件信息见文后附表。从图 5 可以看出, 天然地震的拐角频率明显较大, 其次是爆破, 矿塌的拐角频率最小。

分析爆破、矿塌与天然地震的顶峰频率分布图(图 6)可以看出, 在首都圈地区, 震中距在 200 km 范围内, 爆破的顶峰频率分布在 4—7 Hz 范围内, 矿塌的顶峰频率分布在 2—5 Hz, 天然地震相对较高, 分布比较零散, 大部分在 10—20 Hz 范围内。对各个频率段累加求和可以发现, 5—7 Hz 频率段爆破的振幅最大, 2—4 Hz 频率段矿塌的振幅最大, 天然地震的最大振幅主要集中在 10—18 Hz。

对照首都圈地区爆破、矿塌和天然地震频谱(图 4)可以得出地震波传播过程中频谱变化的特性: 地震波传播过程中会产生能量衰减, 然而不同频率的能量衰减不同。对于爆破, 矿塌和天然地震, 高频成分的能量衰减快于低频。图 4 左侧图可以清楚地显示出, 天然地震的频率较为丰富, 频率域较爆破和矿塌要宽。另外, 从高频能量衰减角度考虑, 天然地震高频能量衰减较慢, 高频成分丰富; 爆破次之, 矿塌相对较快。

## 4 讨论与结论

本文通过对 2008 年 8 月—2009 年 9 月首都圈地区震级在 2.0—2.2 范围内的爆破、矿塌和天然地震事件进行对比分析, 得到三者在时域和频域方面的明显差异。

在时域方面, 爆破的初动一般向上, 矿塌的初动一般向下, 而天然地震呈一定的方向分布; 从波形上看, 爆破和矿塌面波比较发育, 衰减较快; 地震的 S 波最大振幅与 P 波最大振幅比  $A_S/A_P$  大于爆破和矿塌的 S 波与 P 波最大振幅比  $A_s/A_p$ ; 同时爆破和矿塌的能量衰减比天然地震要快; 爆破和矿塌发生的时间、地点较天然地震有规律。

通过分析震中距在 200 km 范围内的波形记录的波谱, 得出以下结论: 天然地震的拐角频率较高, 爆破其次, 矿塌的拐角频率最小; 爆破的顶峰频率分布在 5—7 Hz 范围内, 矿塌的顶峰频率分布范围是 2—4 Hz, 而天然地震的顶峰频率相对较大, 在 10—18 Hz 范围内; 地震波传播过程中, 高频成分的能量衰减快于低频; 天然地震的频率较为丰富, 频率域较宽。而且天然地震高频能量衰减的较慢, 爆破次之, 矿塌相对较快。

爆破、矿塌和天然地震在时间域和频率域的这些特点和区别与震源机制、震源深浅有关(Kiszely, 2005)。首先, 地震的震源机制较为复杂, 地震的发生一般是地下断层某处应力的积累与集中, 超过临界值时就会产生岩石的破裂或错动, 从而使一定方位的介质受压, 形成压缩波, 另一方位的介质受拉伸, 形成膨胀波(张少泉, 1978)。地下断层的错动使得地震的发生要相对缓慢一些(Yang *et al*, 2004)。而爆破是膨胀源, 是能量的瞬时释放, 使周围介质开始时受到压缩作用, 所以在所有方位上 P 波初动向上; 矿塌使得周围介质开始时都受到拉伸作用, 在所有的方位上 P 波垂直向初动均向下。

另一方面从震源的深浅看, 爆破大多发生在地表石灰岩层, 其介质密度很低, 作用时间短, 体波为瞬时脉冲型, 在波形中表现为, 爆破的波形初动强而尖锐, P 波振幅通常很大, 与 S 波振幅相当或者大于 S 波振幅(马宝柱等, 1990)。矿塌一般发生在 1—5 km 的地表范围内, 波形的初动较强; 天然地震则发生在地下几千米到几十千米, 位于花岗岩或玄武岩层。地震波通过致密的岩层传播, 能量及高频成分损耗少, 因而振动持续时间较长, 振幅衰减较慢, 高频成分丰富。爆破产生的地震波经过松散地层, 岩石非均匀性比较突出, 波高频成分被吸收的多(李夕兵等, 2009)。所以相对而言, 爆破的高频成分的能量衰减比

天然地震要快. 爆破与矿塌相对比而言, 爆破源是个点源, 高频成分相对矿塌要高. 但是在震源深度上, 两者差异不大, 所以在经过同样的非均匀性地层时, 高频成分被吸收衰减, 使得频谱的观测记录中, 矿塌的高频成分相对衰减要快.

由于本文收集的数据资料有限, 对于区分爆破与矿塌的波谱做得还不够. 同时本文未考虑次级构造对地震波的传播路径和波形记录产生的影响, 需要在这一方面做进一步工作.

北京遥测地震台网提供了数据资料, 周来顺老师在震相识别方面给予了帮助, 审稿人对本文的修改提出了宝贵意见. 在此一并表示诚挚的谢意.

## 参 考 文 献

- 边银菊. 2002. 遗传 BP 网络在地震和爆破识别中的应用[J]. 地震学报, **24**(5): 516-524.
- 陈玉东. 2005. 数字信号处理[M]. 北京: 地质出版社: 150-158.
- 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 许力生, 李鸿吉, 牟其铎. 2000. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社: 145-150.
- 傅淑芳, 刘宝诚, 李文艺. 1980. 地震学教程(下册)[M]. 北京: 地震出版社: 127-130.
- 黄汉明, 边银菊, 卢世军, 蒋正峰, 李锐. 2010. 天然地震与人工爆破的波形小波特征研究[J]. 地震学报, **32**(3): 270-276.
- 李夕兵, 凌同华, 张义平. 2009. 爆破地震信号分析理论与技术[M]. 北京: 科学出版社: 26-27.
- 卢世军, 黄汉明. 2010. 基于能量比的天然地震与人工爆破自动识别算法研究[J]. 华南地震, **30**(1): 34-39.
- 马宝柱, 刘贤伦, 王元民. 1990. 苏联塞米巴拉金斯克地区和我国核爆信号的识别[J]. 内陆地震, **4**(1): 68-73.
- 时振梁, 张少泉, 赵荣国, 吴开统, 陆其鹤, 张敏政, 卓钰如. 1990. 地震工作手册[M]. 北京: 地震出版社: 27-30.
- 魏富胜, 黎明. 2003. 震源性质的倒谱分析[J]. 地震学报, **25**(1): 47-54.
- 吴忠良, 陈运泰, 牟其铎. 1994. 核爆炸地震学概要[M]. 北京: 地震出版社: 83-92.
- 杨成荣, 王桂玲, 敦雪明. 2001. 乌鲁木齐附近地区小爆破识别判据的研究[J]. 内陆地震, **15**(1): 30-38.
- 张诚. 1988. 地震分析基础[M]. 北京: 地震出版社: 98-107.
- 张萍, 蒋秀琴, 苗春兰, 邹向荣. 2005. 爆破、矿震与地震的波谱差异[J]. 地震地磁观测与研究, **26**(3): 24-34.
- 张少泉. 1978. 近震分析[M]. 北京: 地震出版社: 21-29.
- 大崎顺彦(著). 1976. 吕敏申, 谢礼立(译). 1980. 地震动的谱分析入门[M]. 北京: 地震出版社: 87-96.
- Chael E P. 1998. Spectral discrimination of NTS explosions and earthquakes in the southwestern United States using high-frequency regional data [J]. *Geophys Res Lett*, **15**(6): 625-628.
- Douglas R B, Kathleen A Z. 1988. Spectral evidence for source multiplicity in explosions: Application to regional discrimination of earthquakes and explosions[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **78**(5): 1733-1795.
- Dowla F U, Taylor S R, Anderson R W. 1990. Seismic discrimination with artificial neural networks: Preliminary results with regional spectral data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **80**(5): 1346-1373.
- Dysart P S, Pulli J J. 1987. Spectral study of regional earthquakes and chemical explosions recorded at the NORES array [R]//SAIC Technical Report, C87-03.
- Kim W Y, Lernerlam A L, Richards P G, Aharonian V. 1997. Discrimination of earthquakes and explosions in southern Russia using regional high-frequency three component data from the IRIS/JSP Caucasus network[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**(3): 569-588.
- Kim W Y, Simpson D W, Richards P G. 1993. Discrimination of earthquakes and explosions in the eastern United States using regional high frequency data[J]. *Geophys Res Lett*, **20**(14): 1507-1510.
- Kiszely M. 2005. Discrimination of quarry-blasts from earthquakes using spectral analysis and coda waves in Hungary [J]. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, **36**(4): 439-448.
- Mark D F. 2006. Source spectral modeling of regional P/S discriminants at nuclear test sites in China and the former Soviet Union[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **96**(6): 2348-2367.

- Mohammed B, Adil D, Khalid B, Aomar I. 2005. Discrimination of seismic signals using artificial neural networks[J]. *Engineering and Technology*, **4**(2): 4-7.
- Niksa O, Sven L. 2010. Earthquake-explosion discrimination using genetic algorithm-based boosting approach[J]. *Computer & Geosciences*, **36**(2): 179-185.
- Plafcan D, Seber D, Barazangi M, Ibenbrahim A, Cherkaoui T E, Sandvol E. 1997. Regional discrimination of chemical explosions and earthquakes: A case study in Morocco[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**(5): 1126-1139.
- Pulli J J, Dysart P S. 1990. An experiment in the use of trained neural networks for regional seismic event classification [J]. *Geophys Res Lett*, **17**(7): 977-980.
- Richard A M, John R M. 1971. Seismic characteristics of underground nuclear detonations[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **61**(6): 1675-1692.
- Richards P G, Zavales J. 1990. Seismic discrimination of nuclear explosions[J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, **18**: 257-286, doi:10.1146/annurev.ea.18.050190.001353.
- Walter W R, Kevin M M, Howard J P. 1995. Phase and spectral ratio discrimination between NTS earthquakes and explosions[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**(4): 1050-1067.
- Walter W R, Matzel E, Pasyno M E, Harris D B, Gok R, Ford S R. 2007. Empirical observations of earthquake-explosion discrimination using P/S ratios and implications for the sources of explosion S-waves [C]// *29<sup>th</sup> Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory: 684-693.
- Yang X H, Shen P, Liu X Q, Zheng Z Z. 2004. Application of the wavelet packet method in discrimination between nuclear explosion and earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, **18**(1): 88-96.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, Yao Z X. 2008. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **98**(6): 2571-2589.

附表 图5、图6中采用的地震事件信息列表  
Appended The seismic events list used in Fig. 5, 6

序号	事件类型	发震时间(北京时)		地点	台站	震中距/km	$f_c$ /Hz	$f_m$ /Hz
		年-月-日	时:分:秒					
1	爆破	2008-08-20	03:10:56	山西左云	右玉台	51	7.3	2.8
2	爆破	2008-12-12	09:47:58	北京门头沟	斋堂台	18.87	8	7
3	爆破	2008-12-12	09:47:58	北京门头沟	十三陵台	43.29	9	6
4	爆破	2008-08-22	12:03:29	山西朔州	雁门关台	48.84	10	6
5	爆破	2008-08-22	12:03:29	山西朔州	右玉台	51.06	6	3.3
6	爆破	2008-09-03	12:30:08	山西朔州	右玉台	57.72	9	6
7	爆破	2008-09-30	12:02:00	山西朔州	清水河台	61.05	7.3	7
8	爆破	2008-09-30	12:02:00	山西朔州	宁武台	82.14	7	6.5
9	爆破	2008-09-30	12:02:00	山西朔州	岢岚台	104.34	7	4
10	爆破	2008-11-18	10:28:50	山西太原	宁武台	107.67	10	5
11	爆破	2008-10-16	12:04:58	山西朔州	和林格尔台	108.78	7.5	7
12	爆破	2009-06-04	22:50:28	河北行唐	恒山台	133.2	9	4
13	爆破	2009-04-06	00:51:42	北京门头沟	十三陵台	47.73	7	5
14	爆破	2009-04-06	00:51:42	北京门头沟	刘斌堡台	72.15	6.5	6
15	爆破	2008-10-14	12:03:08	山西朔州	右玉台	85.47	6	4
16	爆破	2009-03-08	02:38:19	北京房山	大灰场台	28.86	8	5
17	爆破	2009-03-08	02:38:19	北京房山	八宝山台	48.84	7	6.8
18	爆破	2009-03-08	02:38:19	北京房山	刘斌堡台	79.92	6.2	6
19	爆破	2009-01-18	11:33:12	河北涞源	恒山台	127.65	10	5
20	爆破	2009-03-12	17:34:16	河北丰润	丰台镇台	46.62	10	5.5
21	矿塌	2008-08-07	20:23:55	山西大同	镇川台	54	5.5	1.3

续表

序号	事件类型	发震时间(北京时)		地点	台站	震中距/km	$f_c$ /Hz	$f_m$ /Hz
		年-月-日	时:分:秒					
22	矿塌	2008-09-06	07:12:20	山西大同	镇川台	21.09	5	4.5
23	矿塌	2008-08-14	14:52:51	山西大同	镇川台	47.73	5	3
24	矿塌	2008-08-14	14:52:51	山西大同	凉城台	67.71	4	2
25	矿塌	2008-09-11	05:47:27	山西大同	和林格尔台	106.56	5	2
26	矿塌	2008-09-11	05:47:27	山西大同	清水河台	113.22	4	3
27	矿塌	2009-05-11	20:43:15	山西大同	镇川台	25.53	4	3.7
28	矿塌	2009-01-29	05:20:16	山西大同	镇川台	29.97	6	2
29	矿塌	2008-12-28	05:53:56	山西大同	山自皂台	63.27	3	2
30	矿塌	2009-01-06	10:44:07	山西大同	恒山台	78.81	4	3
31	矿塌	2009-05-11	04:05:52	山西大同	和林格尔台	105.45	6	2
32	矿塌	2009-05-11	04:05:52	山西大同	清水河台	126.54	3	2
33	矿塌	2009-06-24	07:00:44	山西大同	镇川台	24.42	2.5	2
34	矿塌	2008-11-26	23:39:55	山西大同	山自皂台	49.95	4.2	4
35	矿塌	2008-11-26	23:39:55	山西大同	聊城台	68.82	4	3
36	矿塌	2009-06-24	07:00:44	山西大同	和林格尔台	112.11	5	3
37	矿塌	2009-06-24	07:00:44	山西大同	怀安台	139.86	6.5	3
38	矿塌	2009-03-16	10:55:05	山西大同	镇川台	23.31	3	2
39	矿塌	2009-03-16	10:55:05	山西大同	凉城台	69.93	3.2	3
40	矿塌	2009-06-07	19:44:20	山西大同	和林格尔台	113.92	3.2	3
41	矿塌	2009-06-07	19:44:20	山西大同	张北台	180.93	4	2
42	矿塌	2009-07-26	01:31:08	北京房山	八宝山台	49.95	4	2.5
43	天然地震	2008-08-11	03:30:13	河北宁晋	任县台	53	21	13
44	天然地震	2008-08-22	13:15:08	河北武安	涉县台	21.09	15	12
45	天然地震	2008-08-22	13:15:08	河北武安	磁县台	41.07	17	15
46	天然地震	2008-09-28	22:32:44	河北深县	昌黎台	46.62	18	12
47	天然地震	2008-09-28	22:32:44	河北深县	酒金坨台	65.49	18	11
48	天然地震	2008-11-14	17:13:13	河北围场	隆化台	65.50	21	9
49	天然地震	2009-03-05	01:18:44	山西清徐	宁武台	102.12	22	12
50	天然地震	2009-03-05	01:18:44	山西清徐	岢岚台	129.87	13	11
51	天然地震	2008-11-05	04:01:23	山西文水	岢岚台	164.28	20	9
52	天然地震	2009-03-28	19:15:35	山西原平	雁门关台	42.18	15	13
53	天然地震	2009-02-01	06:59:18	北京延庆	斋堂台	58.83	15	14
54	天然地震	2009-02-01	06:59:18	北京延庆	密云台	77.7	13	10
55	天然地震	2009-06-15	19:05:27	河北宁晋	武安台	102.12	18	16
56	天然地震	2009-06-15	19:05:27	河北宁晋	行唐台	128.76	20	8
57	天然地震	2009-09-05	01:32:04	河北宁晋	广宗台	32.19	23	21.5
58	天然地震	2009-09-05	01:32:04	河北宁晋	临城台	55.5	18	15
59	天然地震	2009-06-03	00:01:30	山西古交	宁武台	79.92	22	12
60	天然地震	2009-08-15	18:45:31	河北阜平	涞源台	103.23	15	12
61	天然地震	2008-10-01	15:50:01	河北玉田	丰台镇台	9.99	15	13
62	天然地震	2009-09-04	14:32:24	河北唐山	桃林口台	59.94	18	17
63	天然地震	2009-09-04	14:32:24	河北唐山	四座楼台	109.89	18	13
64	天然地震	2009-09-08	02:29:58	山西神池	和林格尔台	122.1	13	11