

张媛媛, 王婷婷, 苏丽娜, 杨宜海, 惠少兴. 2020. 陕北塌陷记录的区域特征研究. 地震学报, 42(6): 684–696. doi: 10.11939/jass.20200023.

Zhang Y Y, Wang T T, Su L N, Yang Y H, Hui S X. 2020. Study on the regional characteristics of the subsidence seismic records in the northern Shaanxi. *Acta Seismologica Sinica*, 42(6): 684–696. doi: 10.11939/jass.20200023.

陕北塌陷记录的区域特征研究^{*}

张媛媛^{1),†} 王婷婷²⁾ 苏丽娜¹⁾ 杨宜海¹⁾ 惠少兴¹⁾

1) 中国西安 710068 陕西省地震局

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

摘要 选取陕西省境内 2011—2018 年震级为 $M_L 2.7—3.1$ 的 18 个天然地震事件的 287 条记录和 2013—2018 年上述震级范围的 20 个陕北塌陷事件的 185 条记录, 从时间域、频率域及时频域进行分析对比, 总结出陕北塌陷记录区别于天然地震事件的特征: ① 在时间域, 就 P 波初动而言, 塌陷的 P 波初动弱而平缓, 只有极少数台的垂直向 P 波初动方向清晰, 而天然地震的 P 波初动强而尖锐, 垂直向 P 波初动方向清晰, 有象限分布的特征; 在体波特征方面, 塌陷的体波周期要比天然地震的大; 面波发育是塌陷区别于天然地震最显著的特征之一, 即使震中距很小, 塌陷记录依然有明显的短周期面波 R_g 波发育; 在震中距 < 50 km 时, 塌陷的振幅比 A_S/A_P 值要远远大于天然地震, 且随着震中距的增大, A_S/A_P 值变小并与相同震中距下天然地震的 A_S/A_P 值相近; 相同震级, 塌陷比天然地震尾波持续时间长, 能量衰减慢. ② 在频率域, 塌陷的频率域较窄, 主要为低频信号, 集中在 0—3 Hz 内; 天然地震的频率域较宽, 低频信号较少; 定义频带内频谱的方差与均值的比值为频谱变异系数 α , 塌陷的频谱变异系数 α 整体高于天然地震的. 在震中距 200 km 范围内, 塌陷的拐角频率 f_c 较天然地震小, 集中在 1—3 Hz, 天然地震的拐角频率 f_c 在 3—15 Hz 均有分布. ③ 从时频谱的对比可见, 塌陷的主要频率成份为低频面波, 而天然地震频率成份最丰富的为横波波段.

关键词 塌陷 天然地震 时间域 频率域 时频域

doi: 10.11939/jass.20200023

中图分类号: P315.63

文献标识码: A

Study on the regional characteristics of the subsidence seismic records in the northern Shaanxi

Zhang Yuanyuan^{1),†} Wang Tingting²⁾ Su Lina¹⁾ Yang Yihai¹⁾ Hui Shaoxing¹⁾

1) Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract: This paper selects 287 records of 18 natural earthquake events with magnitudes of $M_L 2.7—3.1$ in Shaanxi Province from 2011 to 2018 and 185 records of 20 subsidence seismic events in northern Shaanxi with the same magnitude range from 2013 to 2018. Through the analysis and comparison in time and frequency and time-frequency domain, the characteristics of

^{*} 基金项目 中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-201901003)和陕西省地震局启航与创新基金课题(QC201807)联合资助.

收稿日期 2020-02-20 收到初稿, 2020-05-20 决定采用修改稿.

[†] 通信作者 e-mail: geologzyy@126.com



subsidence seismic records in the northern Shaanxi different from natural earthquake events are summarized as follows: ① In the time domain, the P-wave initial motion of subsidence is weak and gentle, while that of natural earthquake is strong and sharp. To the subsidence, only a few vertical direction of P-wave initial motions are clear, while that of natural earthquake is clear, and it has the characteristics of quadrant distribution. The body wave period of the subsidence is larger than the natural earthquake. The development of surface wave is one of the most significant characteristics that could distinguish subsidence from natural earthquake. Even if the epicenter distance is very small, subsidence seismic records still have significant short-period surface wave R_g . When the epicenter distance is less than 50 km, the amplitude ratio value A_S/A_P of subsidence is larger than that of natural earthquake. With the increase of epicenter distance, the amplitude ratio value A_S/A_P of subsidence becomes smaller and similar to that of earthquake under the same epicenter distance. With the same magnitude, the subsidence has a longer coda duration and slower energy decay than that of the earthquake. ② In the frequency domain, the frequency domain of subsidence is narrower, mainly low frequency signal, concentrated in 0–3 Hz. The frequency domain of the natural earthquake is wider, but the low frequency signal is less. The ratio of spectral variance to the mean in the frequency band was defined as the spectral difference coefficient α , and the α of the subsidence is generally higher than that of the natural earthquake. In the range of epicenter distance 200 km, corner frequency f_c of the subsidence is smaller than that of the natural earthquake. Corner frequency f_c of the subsidence is concentrated in 1–3 Hz, while f_c of the natural earthquake is distributed in 3–15 Hz. ③ From the comparison of the time-frequency spectrum, it can be seen that the main frequency component of the subsidence is low-frequency surface waves, and the natural earthquake frequency component is most abundant in the shear wave band.

Key words: subsidence; natural earthquake; time domain; frequency domain; time-frequency domain

引言

众所周知,地震不仅包含构造地震、火山地震等天然地震,还包含由于人为活动引起的如爆破、塌陷等有着类似于天然地震波形记录的非天然地震。事实上,随着我国数字地震观测系统和技术的快速发展,台网地震监测能力大大提高,产出了大量的非天然地震波形记录。因此,通过实时波形记录快速识别天然地震和各类非天然地震已成为测震台网人员重要的日常工作之一。

陕北地区位于陕西省的最北部,东邻山西,北邻内蒙古,是国家级的能源化工基地,煤炭约占全国储量的五分之一。陕北地区地处鄂尔多斯地块内部,自 1970 年陕西、山西及内蒙古区域测震台网建立以来,未发生过一次可定震中的天然地震(邵辉成,罗词建,2009;狄秀玲等,2011;王平等,2014;惠少兴等,2018)。然而,随着经济的不断发展,陕北地区煤炭大量开采引发的采空区塌陷事故日趋频繁。陕西省最早记录的塌陷便是 2004 年 10 月 14 日发生在陕西神木的 $M_L 4.2$ 塌陷(狄秀玲等,2009)。统计数据表明,伴随着大规模的煤炭开采,塌陷灾害的震例显著上升,陕西省测震台网平均每年记录到的陕北 $M \geq 2.0$ 塌陷近 20 次之多。

人工爆破作为不同于塌陷的另一种非天然地震,自 20 世纪 50 年代以来,国内外的研究人员就对人工爆破的识别在时域进行了广泛和深入地研究,主要从发震时间、波形震相特征、P 波初动方向、振幅比、尾波衰减等不同特征进行判据识别研究(杨成荣等,2001;张萍

等, 2009; 王婷婷, 边银菊, 2011; 刘莎等, 2012; 王婷婷等, 2013; 杨芳等, 2016; 黄世源等, 2017; 王惠琳等, 2017). 随着波谱理论(Huang *et al.*, 1998)在测震学科中的应用与发展, 国内外已有很多学者陆续在频域及时频域对爆破与天然地震记录作了大量的对比研究(郑秀芬等, 2006; 唐兰兰, 王海涛, 2009; 张萍等, 2009; 黄汉明等, 2010; 曾宪伟等, 2010; 崔鑫等, 2016), 从而得到爆破在频域、时频域等不同角度下的区域特征和一些共有特征.

目前, 相对于大量爆破特征的识别研究成果, 塌陷的研究工作还较少. 早在模拟地震记录时期, 地震方面的研究人员对构造地震与塌陷从波形震相特征、震源体、地震波传播路径及速度、能量衰减等方面作了初步的对比研究, 取得了一些定性的认识(林怀存等, 1990; 曹肃朝, 1993; 赵永等, 1995). 数字地震台网建立后, 研究人员对首都圈、安徽等地区区域测震台网记录到的塌陷、爆破与天然地震进行对比分析, 得到了塌陷的一些区域特征(汪贵章等, 2010; 刘莎等, 2012); 陕西地震工作者(董星宏等, 2005; 狄秀玲等 2009; 邵辉成, 罗词建, 2009)对近年来陕北地区发生的显著塌陷在灾害调查、矿震序列时空分布、波形特征等方面开展了初步研究, 得到了陕北塌陷记录波形高频成份低、面波发育等结论. 张丽芬等(2013)研究认为三峡库区及附近地区绝大多数构造地震的拐角频率大于 5.0 Hz, 而塌陷的拐角频率分布在 2.5—4.5 Hz 之间; 同时, 一些研究人员(毕明霞等, 2011; 刘莎等, 2012)也开展了塌陷的频谱特征研究, 从他们的结果来看, 塌陷在频谱方面可能存在区域上的差异.

总体来看, 当前国内外对塌陷的研究深度相对较浅, 尤其对塌陷记录的频域特征、时频域特征、震级的测定等方面缺乏深入研究. 本文拟采用 2011—2018 年陕西测震台网记录到的天然地震和陕北塌陷的波形记录, 从时域、频域、时频域等方面进行分析总结, 建立陕北地区塌陷与天然地震识别特征体系, 为后续自动精确识别事件类型提供方法依据.

1 数据的选取与处理

目前, 经过“十五”期间陕西省数字地震观测网络项目、“十一五”期间汶川地震陕西灾后重建项目及陕西地震背景场探测项目的测震台站建设, 陕西测震台网测震台站数达到了 59 个, 特别是 2013 年陕北榆林区域台网 7 个台站的投入使用, 大大改善了陕北塌陷的定位精度. 本文选取了陕西测震台网记录到的 2013—2018 年 M_L 2.7—3.1 的 20 个陕北塌陷和 2011—2018 年相同震级范围的 18 个天然地震事件, 事件参数列于表 1 及表 2. 选用震中距在

表 1 塌陷参数表
Table 1 Parameter table of the collapses

序号	发震时间		震中		M_L	序号	发震时间		震中		M_L
	年-月-日	时:分:秒	北纬/°	东经/°			年-月-日	时:分:秒	北纬/°	东经/°	
1	2013-12-19	08:49:20.9	38.59	110.42	2.9	11	2016-01-06	14:38:41.7	38.48	110.26	2.8
2	2014-04-09	11:00:08.1	39.09	110.42	3.1	12	2016-01-14	07:17:20.3	38.59	110.34	2.8
3	2014-11-29	18:21:18.3	39.03	110.19	2.8	13	2016-08-16	02:19:39.8	39.02	110.17	2.7
4	2014-04-09	19:57:10.4	39.11	110.42	2.8	14	2016-09-16	16:44:19.5	38.59	110.16	3.1
5	2015-08-24	08:33:05.8	39.04	110.22	2.7	15	2016-01-13	21:42:18.6	38.58	110.35	3.0
6	2015-06-28	15:27:43.9	39.15	110.30	2.7	16	2017-02-01	07:53:20.1	39.01	110.22	2.7
7	2015-11-28	09:16:27.4	39.04	110.32	2.8	17	2017-08-31	07:25:00.5	38.23	109.53	3.0
8	2015-01-25	20:21:28.1	38.21	109.51	2.9	18	2017-07-04	10:07:07.8	38.52	110.38	3.0
9	2015-02-21	13:33:13.4	39.01	110.38	2.9	19	2017-10-22	14:18:06.7	39.01	110.26	3.0
10	2015-07-09	20:09:14.9	38.27	109.55	3.1	20	2017-04-17	01:33:31.0	39.04	110.20	3.1

表 2 天然地震参数表
Table 2 Parameter table of the earthquakes

序号	发震时间			震中		M_L	序号	发震时间			震中		M_L
	年-月-日	时:分:秒		北纬/ $^{\circ}$	东经/ $^{\circ}$			年-月-日	时:分:秒		北纬/ $^{\circ}$	东经/ $^{\circ}$	
1	2011-02-08	12:58:03.9		32.58	106.12	3.1	10	2014-02-16	10:21:18.4		34.38	109.00	2.9
2	2011-06-21	16:02:20.1		33.14	109.27	3.1	11	2014-07-16	03:54:13.6		35.02	110.12	2.8
3	2011-06-21	20:47:28.6		33.13	109.26	2.8	12	2015-02-11	20:32:58.9		34.07	108.46	2.7
4	2012-06-16	04:59:25.0		35.06	108.11	3.0	13	2015-12-13	07:55:49.2		34.30	108.56	3.1
5	2013-03-16	22:21:40.4		34.07	108.31	3.0	14	2015-05-29	18:48:54.8		32.57	106.19	2.7
6	2013-09-11	01:46:48.7		34.43	109.58	2.7	15	2016-10-03	06:59:12.2		33.22	108.05	3.0
7	2013-08-04	02:47:57.8		33.11	108.27	2.7	16	2017-11-19	15:11:22.0		34.37	108.14	2.9
8	2013-02-25	10:23:50.1		34.10	108.31	3.0	17	2017-11-25	23:08:56.8		35.55	109.38	2.8
9	2013-11-29	20:52:13.5		32.46	105.37	2.8	18	2018-02-05	05:57:13.4		35.06	110.18	2.9

200 km 内的记录并尽可能选用记录波形较好的台站,共选取天然地震记录 287 个,塌陷记录 185 个,图 1 给出了陕西地区测震台站和本文所选取的 20 个陕北塌陷及 18 次天然地震的震中分布.为了便于计算分析,本文均选取垂直向的波形数据.

2 研究方法

时间域的波形记录特征是最直观、量取最方便、识别最快速,本文主要分析总结 P 波初动、体波特征、振幅比 A_S/A_P 、面波发育情况、尾波持续时间 t 等方面的特征.

在频率域,本文采用波谱分析法得到震源谱参数,并计算 P 波拐角频率 f_c .地震震源谱是地震震源所辐射的地震波在频率域的一种描述,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震源谱是不同的(张丽芬等, 2013).本文采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, 缩写为 FFT)得到地震震源谱,其计算公式为

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\exp\left(-j\frac{2\pi}{N}nk\right),\tag{1}$$

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.

对于中小地震,震源谱符合 Brune 圆盘模型(Brune, 1970),在忽略非弹性衰减的情况下,震源位移谱 $\Omega(f)$ 可表示为

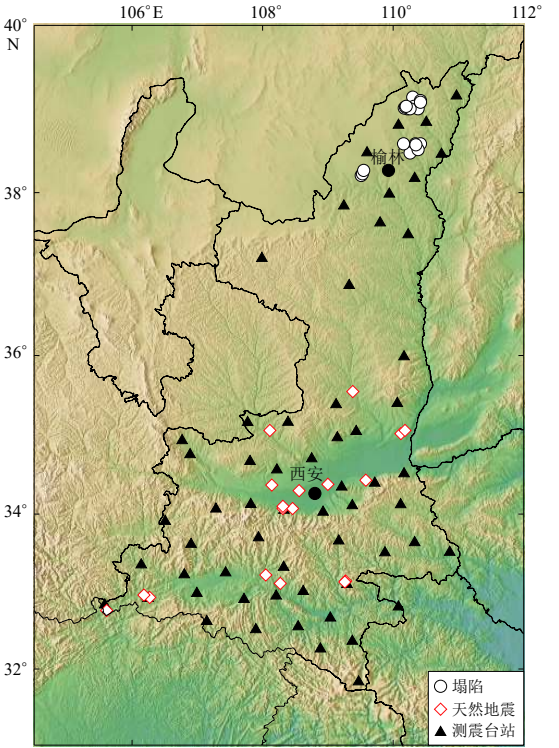


图 1 陕西地区测震台站及震中分布
Fig. 1 Distribution of seismic stations and epicenters in Shaanxi region

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}, \quad (2)$$

式中, Ω_0 为位移谱零频极限值, f 为频率, f_c 为拐角频率. 当 Ω_0 和 f_c 确定时, 即可得到震源位移谱. Ω_0 和 f_c 根据如下方法确定.

数字波形的记录为速度型记录, 位移谱 $\Omega(f)$ 与速度谱 $V(f)$ 的关系为

$$\Omega(f) = \frac{V(f)}{2\pi f}, \quad (3)$$

在震源位移谱的水平低频段选取 f_1 和 f_2 , 在高频衰减段选取 f_3 , 根据式(2), 在水平低频段 f_1-f_2 , $\Omega(f) \approx \Omega_0$, 则位移谱平方的积分为

$$SD = \int_{f_1}^{f_2} \Omega(f)^2 df = \Omega_0^2 (f_2 - f_1), \quad (4)$$

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{SD}{f_2 - f_1}}. \quad (5)$$

对位移谱的低频水平段, 利用上式求得位移谱零频极限值 Ω_0 . 在 f_1-f_3 频段范围内, 将 Ω_0 值代入式(2)可得这个频段内的理论谱值 Ω_i , 同频段内的实际观测谱为 Ω_i , 二者之间的偏差为

$$R_\Omega = \sum_{i=1}^N (\Omega_i - \Omega_0)^2. \quad (6)$$

R_Ω 随频率变化, 当 R_Ω 为最小值时, 即说明理论值与实际值之间的偏差最小, 因此将 R_Ω 为最小值时的 f 值作为拐角频率 f_c (陈丽娟等, 2015).

对于地震信号, 虽然频谱能够确定有哪些频率存在, 但若要了解频率成分随时间的变化, 则需计算其时频特性. 时频分析的方法有很多, 例如短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, 缩写为 STFT)、小波变换、Wigner-Ville 分布及广义 S 变换等. 本文采用 STFT 方法, 此方法为 Dennis Gabor 于 1946 年引入, 其基本思想是用窗函数来截取信号. 假定信号在窗内是平稳的, 采用傅里叶变换分析窗内的信号, 以确定窗内存在的频率成分, 沿着信号时间方向移动窗函数, 得到频率随时间的变化关系, 即时频分布. 此方法也是时频分析方法中最简单最常用的一种方法(董建华等, 2007; 刘海燕等, 2015), 其变换表示为

$$\text{STFT}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g(t-\tau)\exp(-j2\pi ft)dt, \quad (7)$$

式中, τ 为时间域变量, $x(t)$ 为输入信号, $g(t)$ 为时窗函数.

3 特征分析

3.1 时间域波形特征

对选取的 18 个天然地震事件的 287 条波形记录和 20 个塌陷事件的 185 条波形记录, 分别从初动、体波特征、面波发育情况、 A_S/A_P 振幅比、尾波持续时间 t 等方面分析总结其时间域特征. 图 2 为两组塌陷与天然地震的波形对比, 图(a)和(b)为相同震级、相近震中距下两个台站分别记录到的塌陷和天然地震的波形记录; 图(c)和(d)为同一个台站在不同震中距和震级下记录到的塌陷和天然地震波形记录. 通过不同条件下塌陷波形与地震波形的对比得

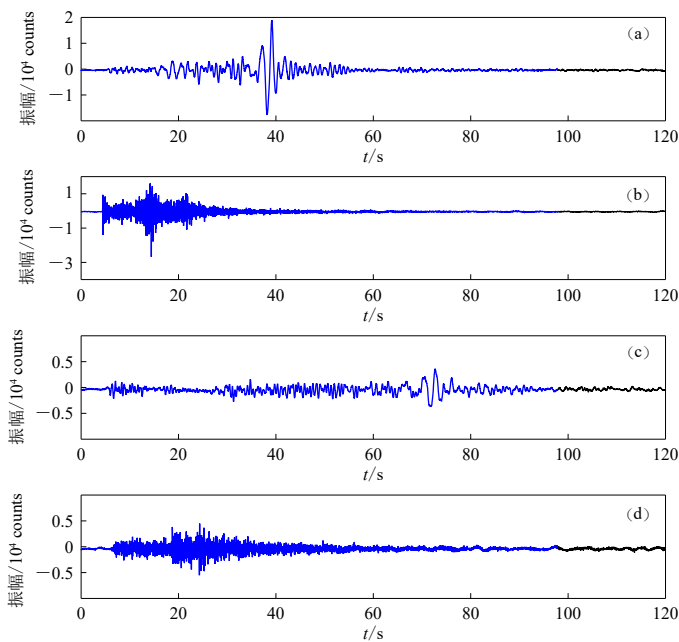


图 2 塌陷和天然地震波形图

- (a) YULG 台记录的陕西榆阳塌陷 (2015-01-25 20:21:28.1, M_L 2.8, Δ =79.79 km);
- (b) ZOZT 台记录的陕西宁陕天然地震 (2016-10-03 06:59:12.2, M_L 2.8, Δ =78.34 km);
- (c) YAAN 台记录的陕西榆阳塌陷 (2015-01-25 20:21:28.1, M_L 3.0, Δ =171.86 km);
- (d) YAAN 台记录的陕西洛川天然地震 (2017-11-25 23:08:56.8, M_L 2.7, Δ =109.12 km)

Fig. 2 Surface wave of collapses and earthquakes

- (a) Collapse in Yuyang, Shaanxi, recorded by YULG station (2015-01-25 20:21:28.1, M_L 2.8, Δ =79.79 km);
- (b) Earthquake in Ningshan, Shaanxi, recorded by ZOZT station (2016-10-03 06:59:12.2, M_L 2.8, Δ =78.34 km);
- (c) Collapse in Yuyang, Shaanxi, recorded by YAAN station (2015-01-25 20:21:28.1, M_L 3.0, Δ =171.86 km);
- (d) Earthquake in Luochuan, Shaanxi, recorded by YAAN station (2017-11-25 23:08:56.8, M_L 2.7, Δ =109.12 km)

到如下结论:

- 1) 初动. 相较而言, 天然地震的 P 波初动强而尖锐, 垂直向 P 波初动方向清晰, 有象限分布之特征; 塌陷的 P 波初动弱而平缓, 只有少数台的垂直向 P 波初动方向清晰. 在 185 条塌陷记录中, 21 条记录的垂直向 P 波初动向上, 12 条记录的垂直向 P 波初动向下, 这与理论上塌陷垂直向 P 波初动向下不符, 但样本数量少, 不足以统计其规律.
- 2) 体波特征. 塌陷多发生于近地表的煤炭开采面附近, 在地震波的传播过程中通过的介质比较疏松, 高频成份往往被吸收, 因此, 塌陷的体波周期要比天然地震的大.
- 3) 面波发育情况. 在震中距 200 km 范围内, 天然地震的 Pg, Sg, Pn, Sn 等近震震相发育, 一般无面波. 塌陷则不同, 即使在震中距较小时, 地震波中都有明显的短周期面波 Rg 波. 同一次地震, 随着震中距的增大, 面波发育趋于明显, 且具有正频散特性(图 2). 面波发育是塌陷区别于天然地震最显著的特征之一.
- 4) A_S/A_P 振幅比. 振幅比是表征地震动力学的一个参数, 与震级无关. 本文对选取的所有塌陷记录(185 条)和天然地震记录(287 条), 求取 S 波最大振幅与 P 波最大振幅的比值 A_S/A_P .

图 3 为 A_S/A_P 值随震中距的分布,天然地震 A_S/A_P 值与震中距的变化无关,主要集中在 4 以内,塌陷在震中距 < 50 km 时, A_S/A_P 值要远远大于天然地震的,随着震中距的增大, A_S/A_P 值变小且与相同震中距下天然地震的 A_S/A_P 值相近.

5) 尾波持续时间 t . 一般,事件的震级越大,尾波持续时间越长(王婷婷,边银菊,2011;王婷婷等,2013). 对于相同震级,尾波持续时间越长,表示地震波衰减越慢. 本文定义尾波衰减时间 t 为 P 波到时开始至震动衰减为干扰水平. 理论上,塌陷波形在近地表传播,能量损失较大,应较同震级的天然地震衰减快,但事实上,由于塌陷均为较低频的震动信号,衰减较慢,尾波持续时间较相同震级天然地震的长. 图 4 为 $M_L2.8$ 时,塌陷与天然地震在不同震中距下的尾波持续时间 t 的统计分布,其中塌陷记录 30 条,天然地震记录 27 条. 从图中可以看出,同一震级,相同震中距时,塌陷的尾波持续时间要比天然地震的长.

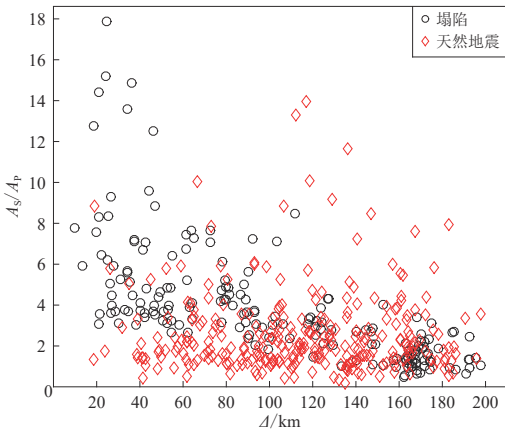


图 3 塌陷与天然地震的振幅比 A_S/A_P 随震中距 Δ 的变化

Fig. 3 Variation of amplitude ratio A_S/A_P of the collapses and earthquakes with epicenter distance Δ

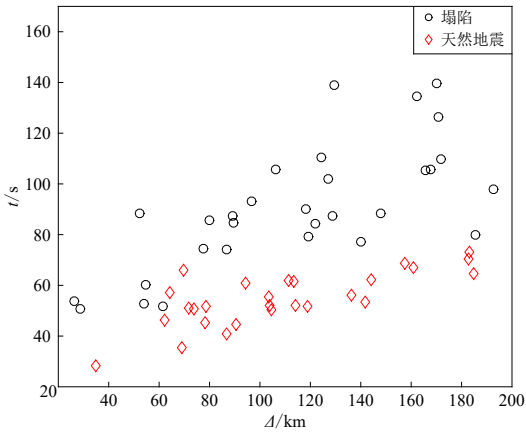


图 4 尾波衰减时间 t 在 $M_L2.8$ 的情况下随震中距 Δ 的变化

Fig. 4 Variation of coda attenuation time t with epicenter distance Δ for $M_L2.8$

3.2 频率域特征对比

1) 频谱分布. 对所选波形数据进行去倾斜处理并采用 FFT 方法,得到塌陷与天然地震记录全波段的频谱分布图(图 5). 天然地震的频率域较宽,频率成份复杂,0—2 Hz 的低频信

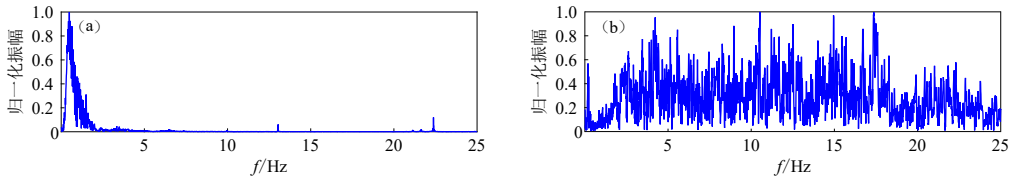


图 5 塌陷与天然地震的频谱分布图

(a) YULG 台记录的陕西榆阳塌陷 (2015-01-25 20:21:28.1, $M_L2.8$, $\Delta=79.79$ km); (b) ZOZT 台记录的陕西安宁天然地震 (2016-10-03 06:59:12.2, $M_L2.8$, $\Delta=78.34$ km)

Fig. 5 The spectrum distribution of collapse and earthquake

(a) Collapse in Yuyang, Shaanxi, recorded by YULG station (2015-01-25 20:21:28.1, $M_L2.8$, $\Delta=79.79$ km); (b) Earthquake in Ningshan, Shaanxi, recorded by ZOZT station (2016-10-03 06:59:12.2, $M_L2.8$, $\Delta=78.34$ km)

号较少; 塌陷的频率域较窄, 主要为低频信号, 集中在 0—3 Hz 内。

2) 变异系数 α . 为进一步了解塌陷与天然地震的频谱分布特征, 定义频谱变异系数 α 为塌陷或天然地震频带内频谱的方差与均值的比值, 即

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}{n\bar{f}}. \quad (8)$$

除去信噪比不高的波形记录, 得到了 149 条塌陷记录和 274 条天然地震记录的频谱变异系数 α , 从其分布图可见(图 6), 塌陷的频谱变异系数 α 主要分布在 4—8 之间, 天然地震的频谱变异系数 α 主要集中在 1—4 之间, 塌陷的频谱变异系数 α 整体上高于天然地震的。

3) 拐角频率 f_c . 拐角频率 f_c 是振幅谱的高频渐进趋势与低频渐进趋势的交点, 是对远场位移谱宽度的一种估计, 实际上也是反映震源尺度大小的物理量(狄莉莎, 陈俊华, 2007). 采用上文所述计算方法求取塌陷和天然地震 P 波段的频谱图和拐角频率 f_c , 结果如图 7 所示. 为统计拐角频率 f_c 的分布规律, 求取所

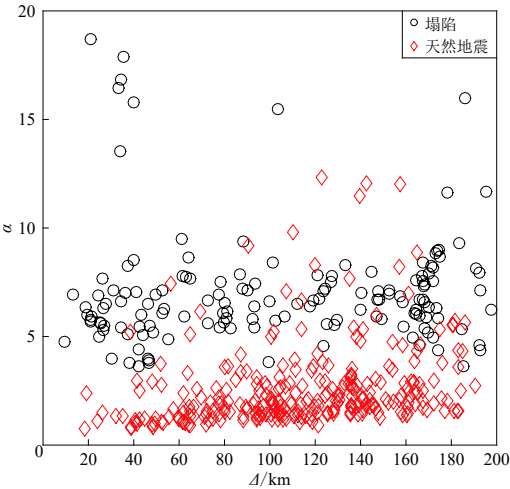


图 6 塌陷与天然地震频谱变异系数 α 随震中距的分布

Fig. 6 Spectrum variation coefficient α versus epicenter distance for collapses and earthquakes

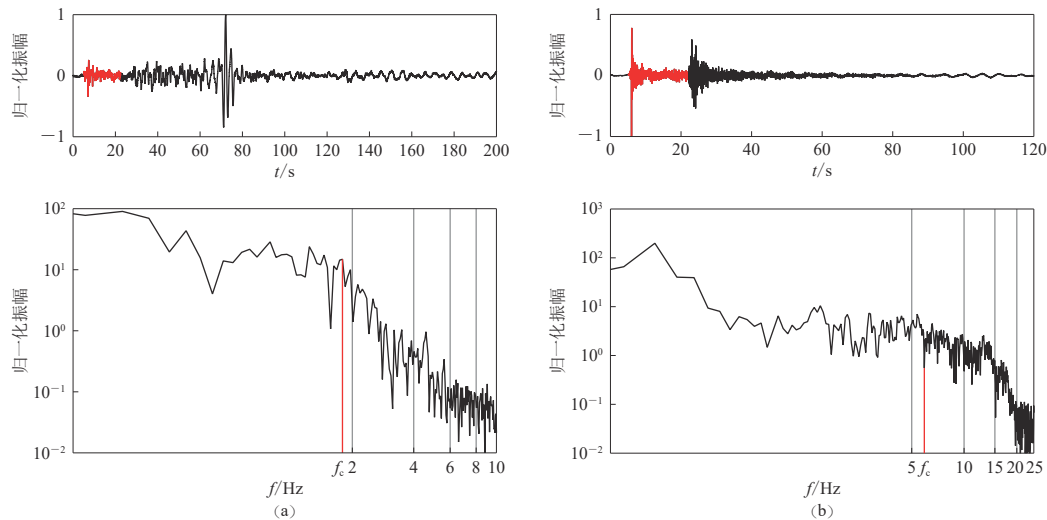


图 7 塌陷与天然地震的 P 波段(红色波段)的频谱图及拐角频率 f_c

(a) ZZH 台记录的陕西神木塌陷 (2015-08-24 08:33:05.8, M_L 2.8, Δ =165.82 km); (b) NSHT 台记录的陕西乾县天然地震 (2017-11-19 15:11:22.0, M_L 2.7, Δ =142.7 km)

Fig. 7 P-band (red band) spectrum and corner frequency f_c of the collapse and earthquake

(a) Collapse in Shenmu, Shaanxi, recorded by ZZH station (2015-08-24 08:33:05.8, M_L 2.8, Δ =165.82 km); (b) Earthquake in Qianxian, Shaanxi, recorded by NSHT station (2017-11-19 15:11:22.0, M_L 2.7, Δ =142.7 km)

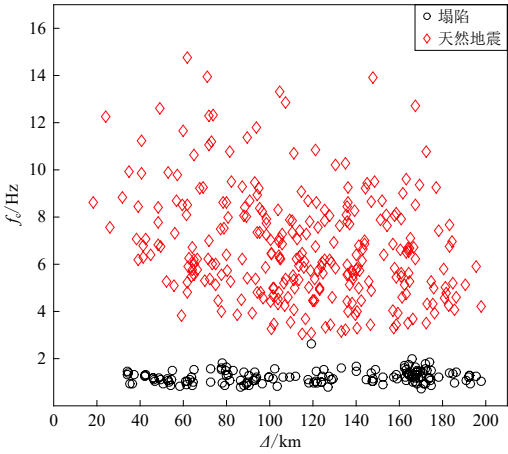


图 8 塌陷与天然地震的拐角频率 f_c 随震中距的分布
Fig. 8 Corner frequency f_c versus epicenter distance for collapses and earthquakes

有塌陷和天然地震记录 P 波段的拐角频率, 由于震中距较小时, P 波段较短以致于无法准确求取拐角频率, 最终得到了 280 条天然地震记录和 146 条塌陷记录的 f_c , 其随震中距的分布规律见图 8. 塌陷的拐角频率明显较小, 集中在 1—3 Hz; 天然地震的拐角频率比较分散, 3—15 Hz 均有分布.

3.3 时频域特征对比

本文基于 STFT 方法对塌陷和天然地震信号进行时频谱分析. 图 9 为 YULG 台记录的陕西榆阳塌陷 (2015-01-25 20:21:28.1, M_L 2.8, $\Delta=79.79$ km) 的时频谱分布图, 主要为 0—3 Hz 的低频成份, 且集中在 30—45 s, 此处多发育面波. 图 10 为相同震级、震中距相近的一次天然地震, 即 ZOZT 台记录的

陕西北天然地震 (2016-10-03 06:59:12.2, M_L 2.8, $\Delta=78.34$ km) 的时频谱分布图, 其频率域较宽, 频率成份复杂, 主要集中在 15—25 s, 该处横波发育. 为统计塌陷和天然地震的时频谱分布特征, 求取塌陷和天然地震记录时频谱能量最强点的时间 t_p 和频率 f_p , 除去信噪比不高的波形记录, 得到了 171 条塌陷记录和 276 条天然地震记录的时频谱能量最强点的时间 t_p 和频率 f_p . 相同震中距下, 塌陷记录的 t_p 大于天然地震记录的 t_p , 塌陷记录的时频谱能量最强点位于面波段, 天然地震记录的时频谱能量最强点位于横波段 (图 11). 图 12 为时频谱能量最强点的频率 f_p 随震中距的分布, 塌陷记录的 f_p 主要集中在 0—2 Hz, 天然地震记录的 f_p 分布广泛. 对比可见, 塌陷的主要频率成份为低频面波, 而天然地震频率成份最丰富的为横波波段.

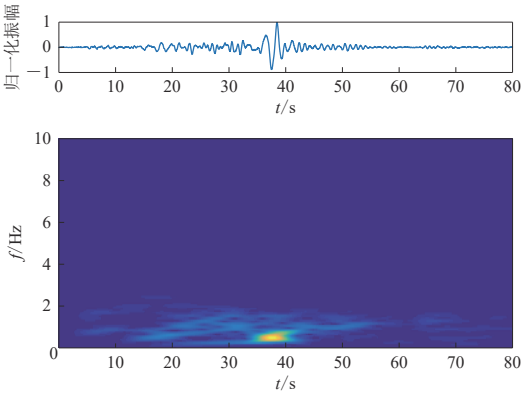


图 9 塌陷的时频谱分布图
Fig. 9 Time-frequency spectrum of the collapse

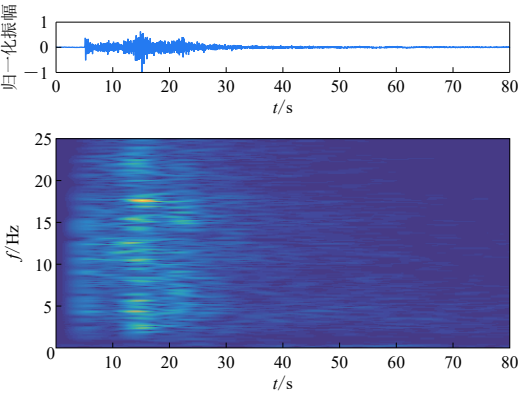


图 10 天然地震的时频谱分布图
Fig. 10 Time-frequency spectrum of the earthquake

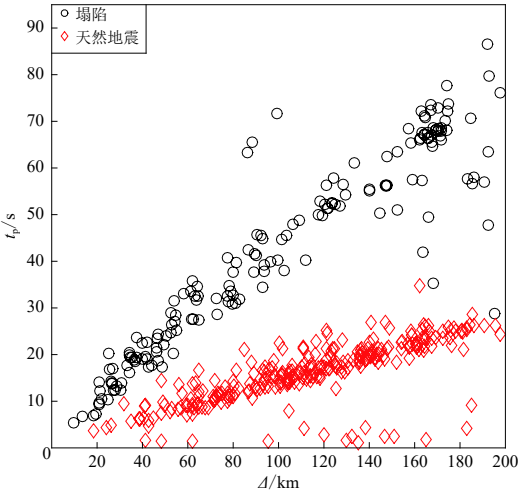


图 11 塌陷与天然地震时频谱能量最强点的时间 t_p 分布图

Fig. 11 The time t_p of the strongest point in the time-frequency spectrum for collapses and earthquakes

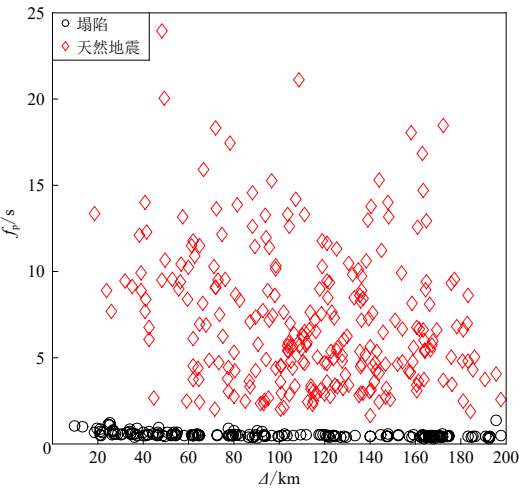


图 12 塌陷与天然地震时频谱能量最强点的频率 f_p 分布图

Fig. 12 The frequency f_p of the strongest point in the time-frequency spectrum for collapses and earthquakes

4 讨论与结论

本文通过分析对比陕北塌陷与陕西省内天然地震记录在时间域、频率域及时频域的特征，提取出陕北塌陷记录的以下区域特征：

- 1) 天然地震的 P 波初动强而尖锐，垂直向 P 波初动方向清晰，有象限分布之特征；塌陷的 P 波初动弱而平缓，只有少数台的垂直向 P 波初动方向清晰，垂直向 P 波初动方向有上有下，这与理论上塌陷垂直向 P 波初动向下不符，但样本数量少不足以统计其规律；
- 2) 塌陷的体波周期比天然地震的大；
- 3) 塌陷面波发育；
- 4) 相同震级下，塌陷尾波持续时间 t 较长；
- 5) 当震中距 < 50 km 时，塌陷的振幅比 A_S/A_P 值要远远大于天然地震的，随着震中距的增大， A_S/A_P 值变小且与相同震中距下天然地震的 A_S/A_P 值相近；
- 6) 天然地震的频率域较宽，但低频信号较少，塌陷的频率域较窄，主要为低频信号，集中在 0—3 Hz；
- 7) 定义频带内频谱的方差与均值的比值为频谱差异系数 α ，塌陷的频谱变异系数 α 整体上高于天然地震的；
- 8) 当震中距在 200 km 范围内，塌陷的拐角频率 f_c 较天然地震小， f_c 集中在 1—3 Hz，天然地震的拐角频率 f_c 在 3—15 Hz 均有分布；
- 9) 在震中距 200 km 的范围内，从时频谱可见，塌陷的主要频率成份为低频面波，而天然地震的频率成份最丰富的为横波波段。

本文计算得到的陕北塌陷的拐角频率 f_c 较天然地震小，这与前人对不同区域塌陷拐角频率的研究的结果一致(刘莎等, 2012; 张丽芬等, 2013)，因此，此结论具有一定的普适性，可作为区分塌陷与天然地震的依据之一。

理论上, 塌陷的震源体对源外介质施加的主要是拉力, 使得 P 波垂直向初动向下, 但事实上, 越来越多的研究表明, 不同区域、不同矿井、不同深度的塌陷地震都是有区别的(汪贵章等, 2010). 塌陷的成因机制可能比较复杂. 因此, 对塌陷的成因机制, 还需作进一步的研究. 本文得到了陕北塌陷记录的区域特征, 但由于此地区位于鄂尔多斯地块内部, 周边可定震中的天然地震较少, 该区域内天然地震与塌陷更详细的特征对比还需进一步积累资料.

参 考 文 献

- 毕明霞, 黄汉明, 边银菊, 李锐, 陈银燕, 赵静. 2011. 天然地震与人工爆破波形信号 HHT 特征提取和 SVM 识别研究[J]. *地球物理学进展*, **26**(4): 1157–1164.
- Bi M X, Huang H M, Bian Y J, Li R, Chen Y Y, Zhao J. 2011. A study on seismic signal HHT features extraction and SVM recognition of earthquake and explosion[J]. *Progress in Geophysics*, **26**(4): 1157–1164 (in Chinese).
- 曹肃朝. 1993. 构造地震和塌陷地震的特征分析[J]. *华北地震科学*, **11**(1): 52–61.
- Cao S C. 1993. Analysis of the characteristics of tectonic earthquakes and collapse earthquakes[J]. *North China Earthquake Sciences*, **11**(1): 52–61 (in Chinese).
- 陈丽娟, 陈学忠, 李艳娥, 王生文, 郭祥云. 2015. 利用纵、横波的拐角频率比值和位移谱零频极限比值计算波速比: 以芦山 $M_s 7.0$ 地震序列为例[J]. *地震*, **35**(2): 11–25.
- Chen L J, Chen X Z, Li Y E, Wang S W, Guo X Y. 2015. Calculating wave velocity ratio v_p/v_s of the 2013 Lushan earthquake sequence from source spectrum parameters[J]. *Earthquake*, **35**(2): 11–25 (in Chinese).
- 崔鑫, 许力生, 许忠淮, 李铂, 王峰. 2016. 小地震与人工爆破记录的时频分析[J]. *地震工程学报*, **38**(1): 71–78.
- Cui X, Xu L S, Xu Z H, Li B, Wang F. 2016. Time-frequency analysis of records of small earthquakes and explosions[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **38**(1): 71–78 (in Chinese).
- 狄莉莎, 陈俊华. 2007. 长江三峡地区巴东野三关地震成因探讨[J]. *大地测量与地球动力学*, **27**(专刊): 62–66.
- Di L S, Chen J H. 2007. On genesis of Yesanguan micro-earthquakes in Three Gorges area on Yangtze River[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **27**(S): 62–66.
- 狄秀玲, 王平, 金昭娣, 王建昌. 2009. 陕西榆林地区北部塌陷地震初步分析[J]. *灾害学*, **24**(4): 81–83.
- Di X L, Wang P, Jin Z D, Wang J C. 2009. Preliminary analysis on collapse earthquakes in northern Yulin, Shaanxi Province[J]. *Journal of Catastrophology*, **24**(4): 81–83 (in Chinese).
- 狄秀玲, 王平, 刘伟. 2011. 通过地震编目分析陕西省地震分布[J]. *通过地震编目分析陕西省地震分布*, **32**(5): 140–142.
- Di X L, Wang P, Liu W. 2011. Analysis on distribution of earthquakes in Shaanxi Province through catalog earthquake[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **32**(5): 140–142 (in Chinese).
- 董建华, 顾汉明, 张星. 2007. 几种时频分析方法的比较及应用[J]. *工程地球物理学报*, **4**(4): 312–316.
- Dong J H, Gu H M, Zhang X. 2007. A comparison of time-frequency analysis methods and their applications[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, **4**(4): 312–316 (in Chinese).
- 董星宏, 韩恒悦, 邵辉成, 王新, 李永辉. 2005. 对陕西榆林地区三次矿震灾害的认识[J]. *灾害学*, **20**(2): 96–98.
- Dong X H, Han H Y, Shao H C, Wang X, Li Y H. 2005. Cognition of three mine quake disasters in Yulin, Shaanxi[J]. *Journal of Catastrophology*, **20**(2): 96–98 (in Chinese).
- 黄汉明, 边银菊, 卢正军, 蒋正锋, 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.
- Huang H M, Bian Y J, Lu Z J, Jiang Z F, Li R. 2010. A wavelet feature research on seismic waveforms of earthquakes and explosions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(3): 270–276 (in Chinese).
- 黄世源, 魏红梅, 高见, 刘云. 2017. 重庆数字地震记录人工爆破波形特征[J]. *华北地震科学*, **35**(2): 30–33.
- Huang S Y, Wei H M, Gao J, Liu Y. 2017. Wave characteristics of blasting events recorded by the Chongqing digital seismic network[J]. *North China Earthquake Sciences*, **35**(2): 30–33 (in Chinese).
- 惠少兴, 严川, 王平, 金昭娣. 2018. 陕西地区小微震震源机制研究[J]. *地震工程学报*, **40**(2): 288–293.
- Hui S X, Yan C, Wang P, Jin Z D. 2018. Research on focal mechanisms of the small and micro earthquakes in Shaanxi area[J].

- China Earthquake Engineering Journal*, **40**(2): 288–293 (in Chinese).
- 林怀存, 王保平, 刘洪瑞, 姜久坤. 1990. 构造地震与塌陷地震对比分析[J]. *地震学报*, **12**(4): 448–455.
- Lin H C, Wang B P, Liu H R, Jiang J K. 1990. Comparative study of tectonic and collapse earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **12**(4): 448–455 (in Chinese).
- 刘海燕, 田刚, 石战结. 2015. 几种时频分析方法的比较和实际应用[J]. *CT理论与应用研究*, **24**(2): 199–208.
- Liu H Y, Tian G, Shi Z J. 2015. The comparison of time-frequency analysis methods and their applications[J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, **24**(2): 199–208 (in Chinese).
- 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[J]. *地震学报*, **34**(2): 202–214.
- Liu S, Yang J S, Tian B F, Zheng Y, Jiang X D, Xu Z Q. 2012. Discrimination between explosions, mine collapses and earthquakes in capital region of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(2): 202–214 (in Chinese).
- 邵辉成, 罗词建. 2009. 陕北煤矿塌陷及灾害简介[J]. *华北地震科学*, **27**(2): 1–4.
- Shao H C, Luo C J. 2009. A brief introduction to coal mine collapse and disaster in northern Shaanxi[J]. *North China Earthquake Sciences*, **27**(2): 1–4 (in Chinese).
- 唐兰兰, 王海涛. 2009. 爆破与地震的波谱特征分析[J]. *内陆地震*, **23**(3): 377–385.
- Tang L L, Wang H T. 2009. Spectrum characteristics analysis of explosions and earthquakes[J]. *Inland Earthquake*, **23**(3): 377–385 (in Chinese).
- 汪贵章, 凌学书, 张佑龙, 戚浩, 夏仕安, 吴辉. 2010. 安徽及周边爆破塌陷特殊地震动特征识别[J]. *防灾科技学院学报*, **12**(2): 26–31.
- Wang G Z, Ling X S, Zhang Y L, Qi H, Xia S A, Wu H. 2010. Characteristic recognition of non-natural earthquakes such as explosions in Anhui and the periphery[J]. *Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology*, **12**(2): 26–31 (in Chinese).
- 王惠琳, 李志雄, 徐晓枫, 孙佩雯. 2017. 琼北确定性人工爆破与天然地震识别判据[J]. *地震地磁观测与研究*, **38**(4): 74–80.
- Wang H L, Li Z X, Xu X F, Sun P W. 2017. Discrimination criterions of doubtless explosions and earthquakes in northern Hainan area[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **38**(4): 74–80 (in Chinese).
- 王平, 惠少兴, 狄秀玲, 赵韬. 2014. 陕西区域地震目录最小完整性震级研究[J]. *震灾防御技术*, **9**(增刊): 702–708.
- Wang P, Hui S X, Di X L, Zhao T. 2014. The analysis of minimum magnitude of completeness of Shaanxi earthquake catalogues[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **9**(S): 702–708 (in Chinese).
- 王婷婷, 边银菊. 2011. 识别天然地震和人工爆破的判据选择[J]. *地震地磁观测与研究*, **32**(6): 62–67.
- Wang T T, Bian Y J. 2011. Criterion selection of earthquake and explosion recognition[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **32**(6): 62–67 (in Chinese).
- 王婷婷, 边银菊, 张博. 2013. 地震和爆破的综合识别方法研究[J]. *地球物理学进展*, **28**(5): 2433–2443.
- Wang T T, Bian Y J, Zhang B. 2013. The comprehensive identification methods between earthquakes and explosions[J]. *Progress in Geophysics*, **28**(5): 2433–2443 (in Chinese).
- 杨成荣, 王桂岭, 敖雪明. 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.
- Yang C R, Wang G L, Ao X M. 2001. Study on identification criterion of small explosion in Urumqi's neighbouring area[J]. *Inland Earthquake*, **15**(1): 30–38 (in Chinese).
- 杨芳, 朱嘉健, 刘智, 吴彬. 2016. 广东地区地震与爆破事件识别方法研究[J]. *华南地震*, **36**(3): 110–115.
- Yang F, Zhu J J, Liu Z, Wu B. 2016. Study on identification methods between earthquakes and explosions occurred in Guangdong region[J]. *South China Journal of Seismology*, **36**(3): 110–115 (in Chinese).
- 曾宪伟, 赵卫明, 李鸿庭, 师海阔, 姚琳. 2010. 利用小波包变换时频谱识别宁夏及邻区的地震和爆破[J]. *地震研究*, **33**(3): 300–307.
- Zeng X W, Zhao W M, Li H T, Shi H K, Yao L. 2010. Discrimination between earthquakes and explosions in Ningxia and its neighboring region using time-frequency spectrum wavelet packet transform[J]. *Journal of Seismological Research*, **33**(3): 300–307 (in Chinese).

- 张丽芬, 姚运生, 李井冈, 吴海波. 2013. 三峡库区构造和塌陷地震的拐角频率特征[J]. 大地测量与地球动力学, **33**(2): 27–30.
- Zhang L F, Yao Y S, Li J G, Wu H B. 2013. Corner frequency characteristic of tectonic earthquakes and collapsed ones in Three Gorges region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **33**(2): 27–30 (in Chinese).
- 张萍, 魏富胜, 潘科, 边银菊, 蒋秀琴. 2009. 爆破与地震的拐角频率比较[J]. 地震地磁观测与研究, **30**(5): 20–25.
- Zhang P, Wei F S, Pan K, Bian Y J, Jiang X Q. 2009. Comparison of corner frequency between explosion and earthquake[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **30**(5): 20–25 (in Chinese).
- 赵永, 刘卫红, 高艳玲. 1995. 北京地区地震、爆破和矿震的记录图识别[J]. 地震地磁观测与研究, **16**(4): 48–54.
- Zhao Y, Liu W H, Gao Y L. 1995. Distinguish in earthquake, explosion and mine earthquake in Beijing area[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **16**(4): 48–54 (in Chinese).
- 郑秀芬, 傅瑀, 许绍燮. 2006. 地震记录中小爆破的识别与判据研究[J]. 地震地磁观测与研究, **27**(5): 29–33.
- Zheng X F, Fu Y, Xu S X. 2006. The discrimination and criteria study between blasts and small earthquakes[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **27**(5): 29–33 (in Chinese).
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **75**(136): 4997–5009.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shih H H, Zheng Q A, Yen N C, Tung C C, Liu H H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proc Roy Soc London Math Phys Eng Sci*, **454**(1971): 903–995.