

赣南台网天然地震与人工爆破的信号特征研究

赖智华¹, 邓月圆², 罗叶美²

¹江西省赣州地震台, 江西 赣州

²赣州地震监测中心站, 江西 赣州

收稿日期: 2023年6月1日; 录用日期: 2023年7月19日; 发布日期: 2023年7月27日

摘 要

本研究旨在解决区分工业爆破与天然地震地震波波形的问題,以提高地震监测台站人员的快速识别能力。通过对赣南数字地震台网记录到的同一地区工业爆破和天然地震的进行时域特征的分析 and 频谱分析的比较,我们发现人工爆破和天然地震的地震波波形在很大程度上相似。然而,在震中距较近的记录台站(30 km以内),两者的频谱差异较明显。天然地震的速度谱与位移谱的优势频率和振幅峰值主要集中在低频区,而人工爆破没有明显的优势频率,频率的分布更为均匀。随着震中距的增加,地震与爆破速度谱与位移谱的优势频率和振幅峰值的分布主要在中频与中低频区域,直到最后优势频率与振幅峰值均集中在低频区域。然而,地震与爆破地震的速度谱与位移谱在震中距较大时,差异不再明显。研究结果表明,这种现象可作为地震台站人员快速识别人工爆破和天然地震的一项有效指标,对提高地震监测准确性和地震应急响应具有重要意义。

关键词

地震, 爆破, 频谱分析, 地震和爆破特征

Analysis of the Recording Characteristics of Earthquakes and Artificial Blasting in Gannan Seismic Network

Zhihua Lai¹, Yueyuan Deng², Yemei Luo²

¹Ganzhou Seismic Station of Jiangxi Province, Ganzhou Jiangxi

²Ganzhou Seismic Monitoring Center Station, Ganzhou Jiangxi

Received: Jun. 1st, 2023; accepted: Jul. 19th, 2023; published: Jul. 27th, 2023

文章引用: 赖智华, 邓月圆, 罗叶美. 赣南台网天然地震与人工爆破的信号特征研究[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(7): 747-757. DOI: 10.12677/ag.2023.137071

Abstract

This study aims to address the issue of distinguishing industrial explosions from natural earthquakes, to enhance the rapid recognition ability of seismic monitoring station personnel. We conducted a spectral analysis and comparison of industrial explosions and natural earthquakes recorded in the same region by the Gannan Digital Seismic Network. The waveform morphology of industrial explosions and natural earthquakes was found to be significantly similar. However, at recording stations closer to the epicenter (within 30 km), the spectral differences between the two became more apparent. The dominant frequency and amplitude peak of the velocity and displacement spectra of natural earthquakes are primarily concentrated in the low-frequency region, while industrial explosions do not display a clear dominant frequency, and the frequency distribution is more uniform. As the epicentral distance increases, the distribution of the dominant frequency and amplitude peak of the earthquake and explosion velocity and displacement spectra are mainly in the mid-frequency and mid-to-low frequency regions, until ultimately, both are concentrated in the low-frequency region. However, the differences between the velocity and displacement spectra of the earthquakes and explosions are not significantly noticeable at larger epicentral distances. The results of this study suggest that this phenomenon can serve as an effective indicator for seismic station personnel to rapidly distinguish between industrial explosions and natural earthquakes. This has significant implications for improving the accuracy of earthquake monitoring and emergency response capabilities.

Keywords

Earthquake, Blast, Spectrum Analysis, Characteristics of Earthquake and Blast

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对于地震台站记录的爆破和天然地震事件, 台站人员一般依靠个人长期积累的经验, 结合前人普遍性的理论总结再作判别。这种定性的判别方法在实践中简单快捷, 但因人而异、因地而异, 在实践中对经验的依赖和把握显得至关重要。爆破和天然地震事件一样, 能量巨大而且都是瞬间释放, 震源向外传播的部分能量以弹性波的形式发出。在赣南台网每年的地震事件记录中, 包括人工爆破记录在内的非天然地震事件要占到全部事件的很大比例, 为数众多的人工地震混杂于大量的天然地震之中, 如何将人工爆破和天然地震快速准确区分出来, 这是摆在从事台站观测一线工作人员的现实问题。

目前, 国内外已有许多研究者针对人工爆破与天然地震事件的区分进行了深入研究。例如, 庞聪等通过结合灰狼优化算法和支持向量机提出一种地震事件性质辨识新方法[1] [2] [3], 蔡杏辉等人采用了基于小波特征的方法, 取得了较好的区分效果[4] [5], 而田霄、段刚等人[1] [2] [3]则通过卷积神经网络, 进一步优化了识别效果[6] [7]。然而, 这些方法在某些情况下仍然存在一定的局限性, 例如对于低信噪比的地震事件和某些特定地区的爆破事件, 准确率仍有待提高。

本文在对前人工作进行深入分析的基础上, 致力于解决这些存在的问题, 提出了一种新的区分方法, 其主要特点是结合了时域特征和频谱分析, 这一设计有助于改善对于低信噪比的地震事件和特定地区的

爆破事件的识别准确性。此前已有学者采取直观快速识别的时域多指标对比分析方法对天然地震和人工爆破事件进行识别和对比分析[8] [9]。同时,也有通过傅里叶变化,研究频率随时间的变化规律,进而揭示天然地震与人工爆破事件的特性[10] [11] [12]。然而,在赣南地区尚无集中于天然地震与人工爆破信号的综合时域特征和频谱分析。因此本文研究实质性地填补了该研究空缺。本文通过分析大量实际观测数据,对所提出的方法进行评估与优化,以实现人工爆破和天然地震事件的有效区分。

2. 波形形态特征

日常震相分析中,区分天然地震和人工爆破的波形特征主要从以下几方面分析[13] [14] [15]:

- 1) 由于爆破源作用时间短且体积小,因此其优势振动周期比天然地震小。地震波的频谱分析可以证明,爆破和地震在频谱分析中主要能量的分布存在差异。
- 2) 天然地震事件地震波在空间中的传播方向受到震源机制象限和介质各向异性影响,其向下或向上的情况均有发生。而对于爆破事件,由于其震源是各向膨胀象限机制,所以其初至波的初动方向表现为向上的趋势。
- 3) 通过对比信丰小江地震和爆破实时数字波形,可以观察到由于爆破信号频率高,爆破的波型衰减速度比地震更快。
- 4) 相比于地震,爆破所产生的波形往往较为简单、清晰,呈现出较少的毛刺。而地震所产生的波形则常常比较复杂,毛刺较为明显。
- 5) 时间和地域特征。爆破是人们有目的的生产活动,一般多发生在白天。而厂矿企业的爆破更有时间规律并且一般分布在特定的区域范围内,爆破频度和当量都有各自的特征。且常发生于一定的地质区域范围内。另外,爆破次数与当量都有着相应的特点。

针对本地区内不同类型爆破活动的持续时间、位置、频率、当量和波形等记录的特点,对数据进行分析,就能够为爆破事件的确定带来很重要的帮助。而对于赣南范围内的爆破事件,由于用药量一般都不是特别大,所以通常只有离爆破源比较近的几个台才进行清晰记载。如图 1、图 2 是 2003 年 6 月 27 日信丰小江 2.4 级地震安远台记录($\Delta = 44.6 \text{ km}$)及 2003 年 6 月 25 日信丰小江 2.0 级爆破(药量 1 吨)安远台记录($\Delta = 44.6 \text{ km}$)的波形特征。

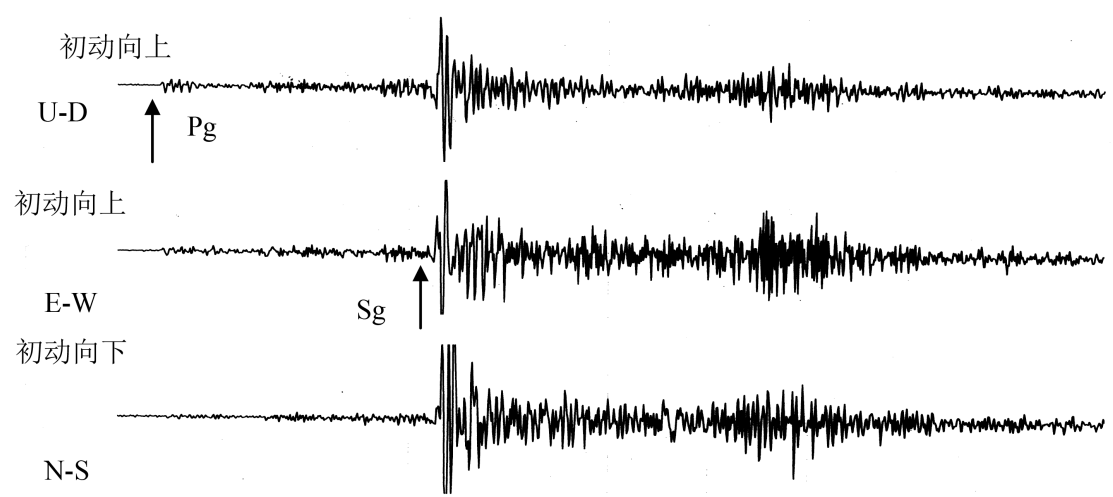


Figure 1. Records from Anyuan Station of the Xinfeng Xiaojiang earthquake with a magnitude of 2.4 on June 27, 2003 ($\Delta = 44.6 \text{ km}$)

图 1. 2003 年 6 月 27 日信丰小江 2.4 级地震安远台记录($\Delta = 44.6 \text{ km}$)

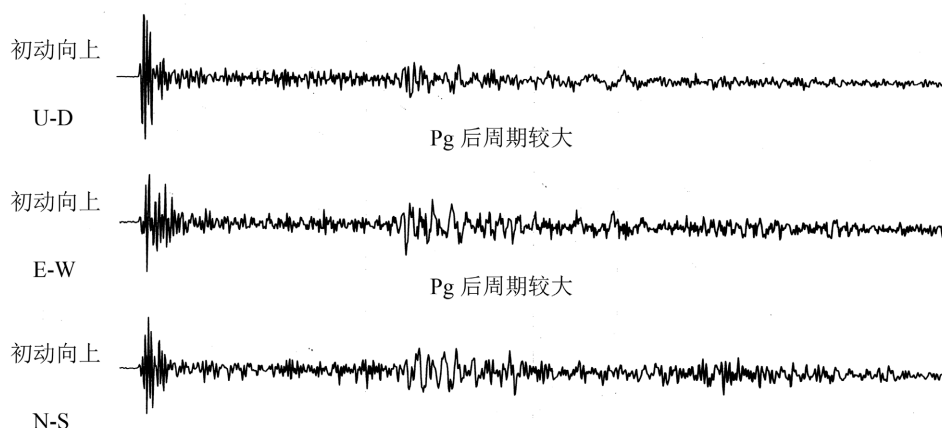


Figure 2. Records of Xinfeng Xiaojiang level 2.0 blasting at Anyuan Station on June 25, 2003 ($\Delta = 44.6$ km)

图 2. 2003 年 6 月 25 日信丰小江 2.0 级爆破安远台记录($\Delta = 44.6$ km)

工作人员在日常工作中需要综合考虑多种因素来准确区分地震和爆破。可以通过对多个台站记录的综合分析或实地考察来进行判断。此外,还可以采用定量计算方法,以便更准确地判断。随着数字地震学的快速发展,波谱分析技术作为一种定量判别手段,在地震学领域已经得到了广泛而成熟的应用。

3. 位移及速度频谱特征

3.1. 理论依据

对于爆破源,针对爆破源的研究,需要考虑到其参数的多个方面。其中包括空间参数,如源体积、深度、地表以上的高度等;源时间参数,如持续时间、爆炸发生的时间等;当量参数,如震级、能量等;以及周围介质的物理及化学参数,如大气层、水下、地下、地质结构、耦合等。这些参数综合作用,影响着爆破波的传播和特征,因此需要对其进行系统的研究和分析。

巴特(1978)给出了作为源时间位移函数振幅谱公式[4]:

$$|F(\omega)| = \omega^{-1} \left(1 + \frac{\omega^2}{a} \right)^{-1/2}$$

不同类型的震源具有不同的时间常数 $1/a$ 。对于爆破,由于其时间常数 $1/a$ 较小,其波谱中包含相对较高的频率成分;而对于地震,由于其时间常数 $1/a$ 较大,其波谱中相对较低频的波成分较多[1]。在上式中 a 为实数, ω 为频率。已有观测事实表明:当周期较长时(超过 3 s),爆炸波谱下降,而地震波谱则上升。通过研究波谱差异,我们可以尝试从这个角度来区分天然地震和人工爆破。

3.2. 资料处理与选取

起始于 2003 年 6 月 22 日,信丰小江及临近地区的东坑两均出现了 M_L 2.0 左右小震群,同时也记录到疑似爆破的事件。由于这些地震发生地点相近且时间重叠,事件判别面临重大困扰,为此赣州市局专门组织现场调查队伍,逐件走访调查落实,对每次记录事件都进行了严格核查,从而保证数据的真实性。

在本研究中,选取的主要数据包括 2003 年 6 月 26 日的信丰小江 M_L 2.3 地震以及 2003 年 6 月 25 日的信丰东坑 M_L 2.0 爆破地震。同时,考虑到震中距离因素,选择了龙南台、安远台、大余台、赣州台、石城台作为研究对象。对这些数据的速度及位移波形进行了频谱分析,相关的 UD 相地震波形记录,以及其对应的速度谱和位移谱已在图 3~7 的(a)和(b)部分,以及图 8~12 的(a)和(b)部分进行了展示。

数据处理过程如下：首先，使用 EDSP-IAS 对波形文件进行预处理，包括数据段选取、格式转换及数值积分；然后，借助 MATLAB 软件对数据进行频谱分析和图件绘制。在此过程中，重点是提取频谱中的关键特征，以此进行天然地震与人工爆破事件的区分。理论上，天然地震与人工爆破在频谱上存在显著差异，由于二者的生成机制及过程有着本质区别。然而，在实际处理中，一些因素如信噪比底、记录设备的差异等可能对结果产生影响，为了消除这些潜在的干扰因素，我们在数据处理过程中进行了一系列质量控制，以确保结果的可靠性。

3.3. 速度谱

初步分析表明，龙南台接收到的信丰小江 $M_L 2.3$ 地震速度谱中，低频部分相对集中，且振幅较大(见图 3)。这可能是由于天然地震通常由地壳内的应力积累到一定程度后突然释放产生的波，而这种释放过程的尺度相对较长，所以产出的地震波主要为低频波，其在传播过程中能量衰减较小，因此其振幅相对较大。相对地，龙南台接收到的信丰东坑 $M_L 2.0$ 爆破地震的速度谱中，频率分布较为均匀，且振幅基本一致(见图 3)。这可能是由于爆破地震波的震源较为集中，能量释放时间更短，因此其在时间域的波形更接近脉冲信号，而在频率域上的分布更为均匀。

随着震中距离的增长，自然灾害与爆破地震的速度谱主要集中在中频范围，其振幅峰值也相应出现在中频区域(见图 4~6)。这是因为地震波在传播过程中，会在地壳进行多次反射和折射，从而使得传播路径变长。因此，在震源较远处，可能看到更多中频或高频部分。此外，随着传播距离的增大，地震波能量将会衰减，其中高频成分的衰减最为明显。因此，随着震中距的增加，中频的比例增多，而低频的成分能量则会相应地减少。然而，当震中距离继续增加，地壳中地震波传播的能量将持续衰减，其中高频和低频的衰减尤为明显。相反，由于低频地震波在传播过程中的能量损失相对较小，因此，它们在整个频谱中稳定性相对较高。这也就导致了长距离地震波传播中，低频成分的振幅相对较大(见图 7)。

根据以上分析，我们可以总结如下：爆破地震通常是人为活动，如矿山爆破，能量释放的时间相对较短，震源更集中。而天然地震通常是由地壳内的应力积累到一定程度后突然释放的能量，震源可能更分散，能量的释放时间可能更长，这也解释了为什么当震中距较短(30 km 以内)时，时间域上两者可能看起来相似，但爆破地震和天然地震在频率内容上可能存在明显的差异，速度谱也能看出来明显区别。随着震中距的增加，天然地震与爆破地震的在时间域以及速度谱的差异变得不明显，随着地震波的传播路径变长，频率逐渐向中频集中，振幅的峰值也出现在中频，而高频很快被衰减，低频则相对较为稳定。

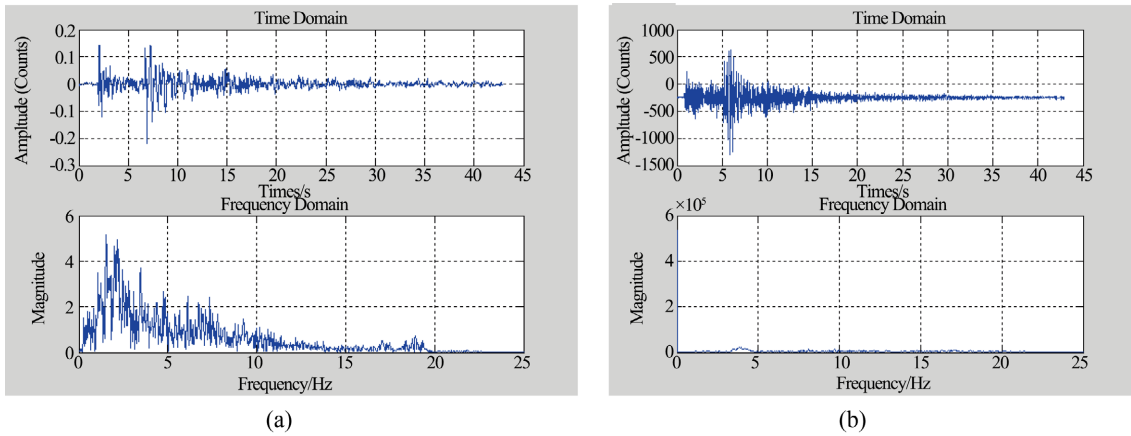


Figure 3. Longnan Station: (a) Seismic waveform recording and velocity spectrum ($\Delta = 35$ km); (b) Blasting waveform recording and velocity spectrum ($\Delta = 26$ km)
图 3. 龙南台：(a) 地震波形记录及速度谱($\Delta = 35$ km); (b) 爆破波形记录及速度谱($\Delta = 26$ km)

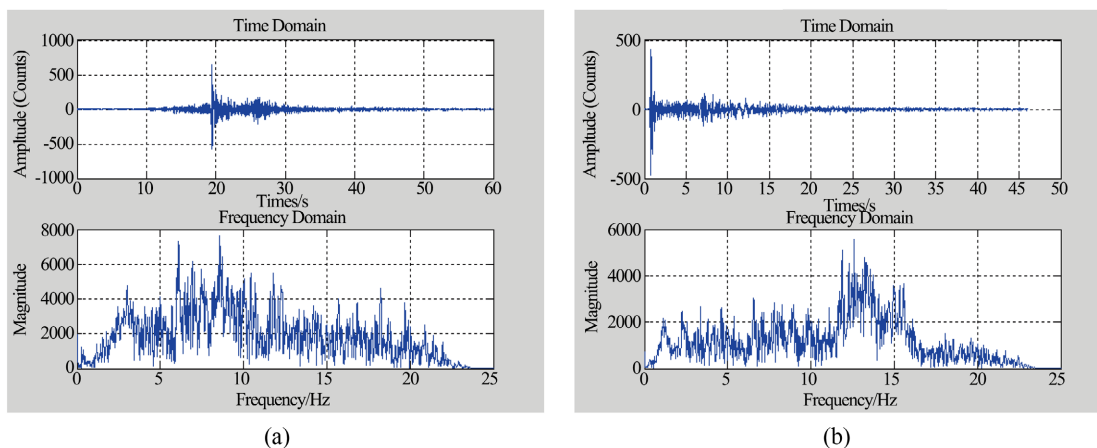


Figure 4. Anyuan Station: (a) Seismic waveform recording and velocity spectrum ($\Delta = 46$ km); (b) Blasting waveform recording and velocity spectrum ($\Delta = 54$ km)

图 4. 安远台: (a) 地震波形记录及速度谱($\Delta = 46$ km); (b) 爆破波形记录及速度谱($\Delta = 54$ km)

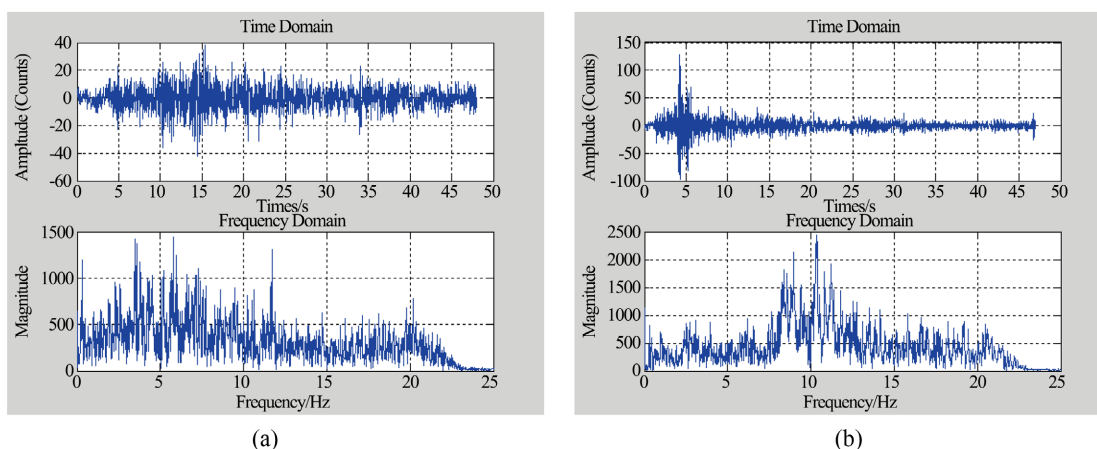


Figure 5. Dayu Station: (a) Seismic waveform recording and velocity spectrum ($\Delta = 69$ km); (b) Blasting waveform recording and velocity spectrum ($\Delta = 71$ km)

图 5. 大余台: (a) 地震波形记录及速度谱($\Delta = 69$ km); (b) 爆破波形记录及速度谱($\Delta = 71$ km)

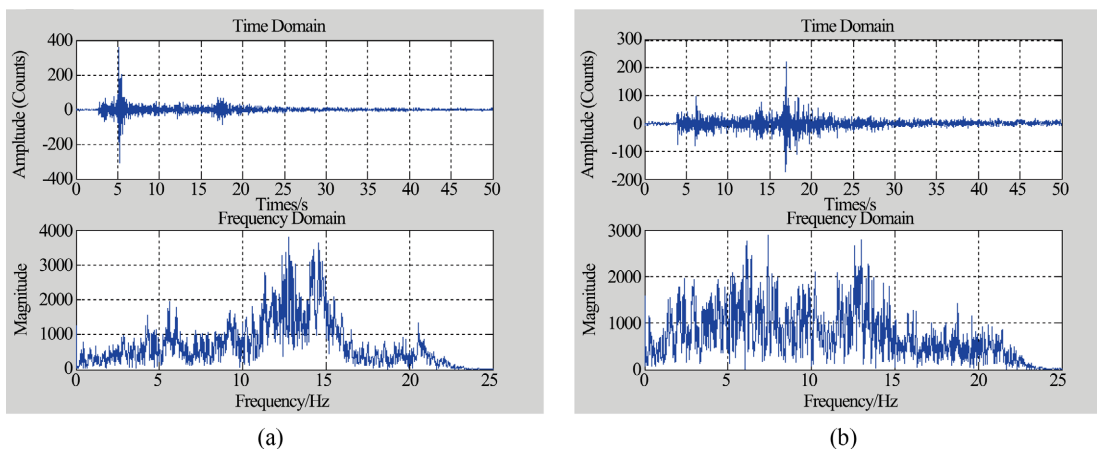


Figure 6. Ganzhou Station: (a) Seismic waveform record and velocity spectrum ($\Delta = 85$ km); (b) Blasting waveform recording and velocity spectrum ($\Delta = 88$ km)

图 6. 赣州台: (a) 地震波形记录及速度谱($\Delta = 85$ km); (b) 爆破波形记录及速度谱($\Delta = 88$ km)

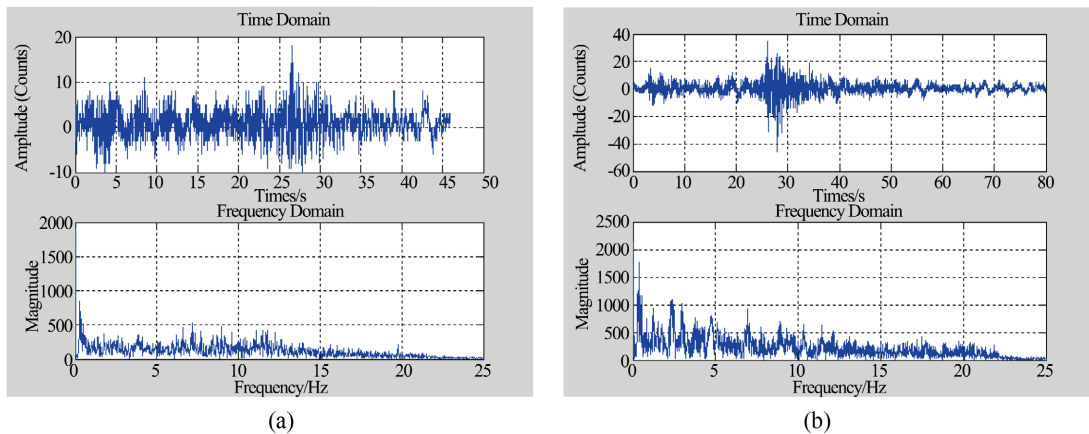


Figure 7. Shicheng Station; (a) Seismic waveform recording and velocity spectrum ($\Delta = 197\text{ km}$); (b) Blasting waveform recording and velocity spectrum ($\Delta = 209\text{ km}$)

图 7. 石城台: (a) 地震波形记录及速度谱($\Delta = 197\text{ km}$); (b) 爆破波形记录及速度谱($\Delta = 209\text{ km}$)

3.4. 位移谱

通过分析资料,我们可以发现,当震中距较短(30 km 以内)时,信丰小江 $M_L 2.3$ 地震的位移谱始终集中在低频,其振幅最大值也在低频区域,与之相反信丰东坑 $M_L 2.0$ 爆破地震的频率分布更为均匀,振幅也相对一致。这是因为天然地震的震源地壳内部的断裂面,其能量的释放过程可能持续较长时间,并且能量的释放并不均匀。因此,天然地震的震源频率内容可能偏向低频,这也就导致了接收到的天然地震位移谱在低频部分相对集中。相反爆破地震通常是人为活动产生的,其震源较为集中,能量释放的时间较短,因此其他地震波的频率内容可能更为均匀。

随着震中距离的增长,天然地震和爆破地震的位移谱主要集中在低频与中频部分,且振幅峰值主要在低频区域。这可能是由于在地震波的传播过程中,高频成分通常会因为波长较短,更容易受到地壳中的各种不规则性(如裂缝、孔洞等)的影响,从而在传播过程中能量损失更大,从而比低频成分衰减得更快。因此随着震中距离的增长,高频成分的能量会明显减小,所以位移谱中的能量主要集中在低频和中频部分。此外,位移谱是通过速度谱进行一次积分得到的。在这个过程中,低频成分的能量会被放大,所以位移谱的振幅峰值主要出现在低频区域。

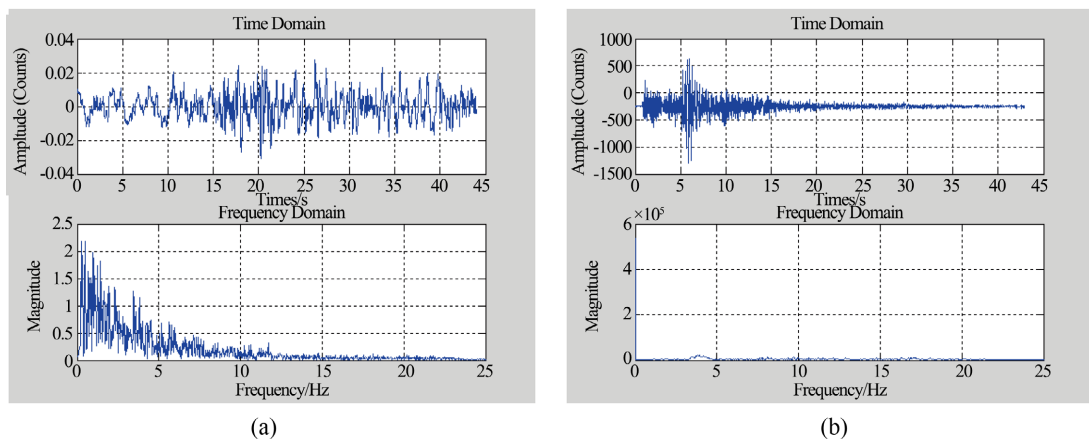


Figure 8. Longnan Station: (a) Seismic waveform record and displacement spectrum ($\Delta = 35\text{ km}$); (b) Blasting waveform recording and displacement spectrum at Longnan Station ($\Delta = 26\text{ km}$)

图 8. 龙南台: (a) 地震波形记录及位移谱($\Delta = 35\text{ km}$); (b) 龙南台爆破波形记录及位移谱($\Delta = 26\text{ km}$)

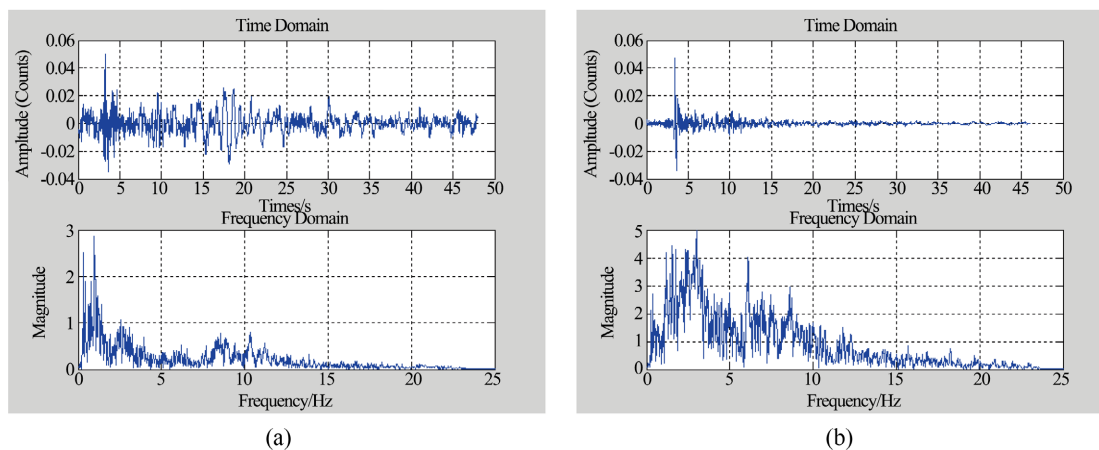


Figure 9. Anyuan Station: (a) Seismic waveform record and displacement spectrum ($\Delta = 46$ km); (b) Blasting waveform recording and displacement spectrum at Anyuan Station ($\Delta = 54$ km)

图 9. 安远台: (a) 地震波形记录及其位移谱($\Delta = 46$ km); (b) 安远台爆破波形记录及位移谱($\Delta = 54$ km)

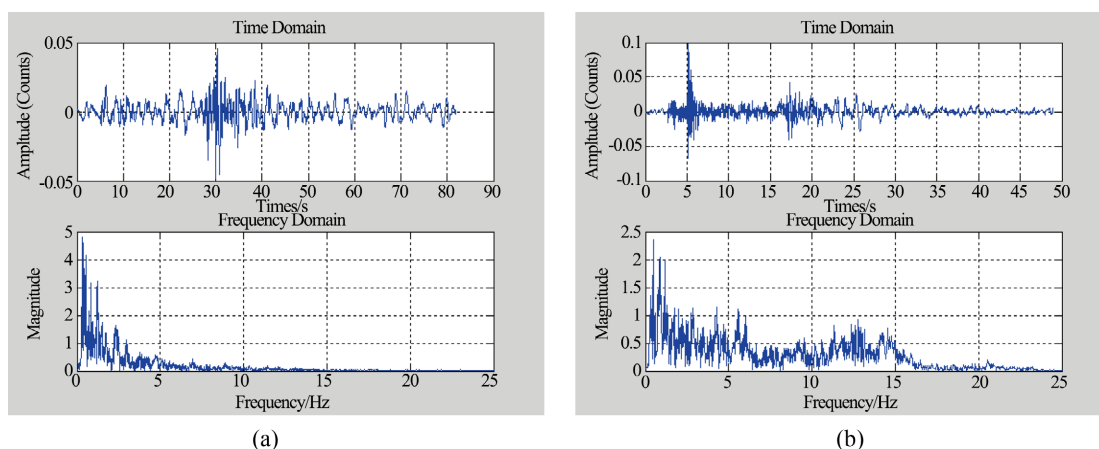


Figure 10. Dayu Station: (a) Seismic waveform record and displacement spectrum ($\Delta = 68$ km); (b) Blasting waveform recording and displacement spectrum ($\Delta = 71$ km)

图 10. 大余台: (a) 地震波形记录及位移谱($\Delta = 68$ km); (b) 爆破波形记录及位移谱($\Delta = 71$ km)

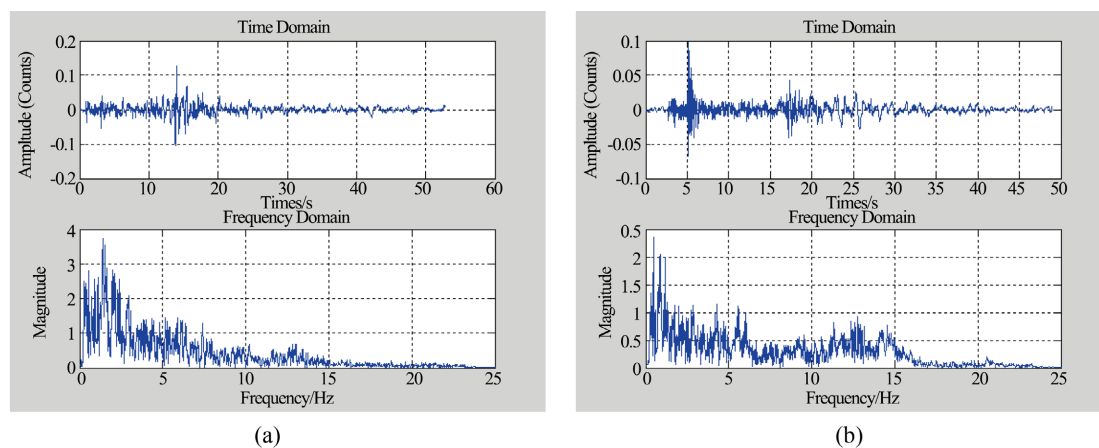


Figure 11. Ganzhou Station: (a) Seismic waveform record and displacement spectrum ($\Delta = 85$ km); (b) Blasting waveform recording and displacement spectrum ($\Delta = 88$ km)

图 11. 赣州台: (a) 地震波形记录及其位移谱($\Delta = 85$ km); (b) 爆破波形记录及位移谱($\Delta = 88$ km)

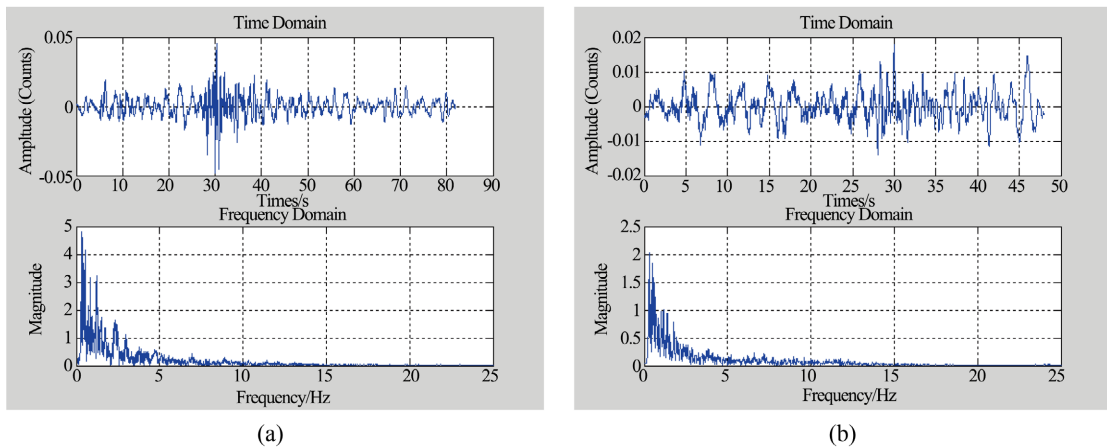


Figure 12. Shicheng Station: (a) Seismic waveform record and displacement spectrum ($\Delta = 197$ km); (b) Blasting waveform recording and displacement spectrum ($\Delta = 209$ km)

图 12. 石城台: (a) 地震波形记录及其位移谱($\Delta = 197$ km); (b) 爆破波形记录及位移谱($\Delta = 209$ km)

通过对资料的深入观察和分析,发现当震中距较短时(30 km 以内),天然地震的位移谱主要集中在低频部分,其峰值也位于低频区域,这是由于其震源能量释放过程不均匀的特性。相比之下,爆破地震的位移谱频率分布较均匀。随着震中距离的增长,天然地震和爆破地震的位移谱主要集中在低频与中频,其振幅峰值也主要在低频区。这可能是因为在地震波的传播过程中能量损失大,导致能量主要集中在低频和中频。此外,由于位移谱是通过速度谱进行一次积分得到,低频成分的能量在此过程中会被放大,这也解释了位移谱振幅峰值主要出现在低频区域的现象。

4. 结果分析

通常认为由于人工爆破源大都发生在地表,在地震波传播过程中,高频成分经过松散的地表浅层时被强烈吸收,能量损失较大,衰减较快,在波形记录上表现为爆破源产生的波周期比地震大,整个波形看起来应该比较单调,衰减也快,高频成份较少。但从赣南台网记录的波形上看,上述特征只有在震中距最近的个别台站表现稍明显,对于震级接近的微小震一般很难分辨。

频谱对比图上发现,同一台站记录的两类事件,优势频率的分布虽存在差异但大都表现并不直观;而不同台站记录的优势频率分布则存在明显差异,这显然与震源射线经过不同传播路径后,介质对频率选择性吸收造成有关,由此见震中距的选择或可成为最优先考虑的因素。对于震中距最小的龙南台记录,两类事件的频谱差异最大。对地震事件,无论速度谱还是位移谱,优势频率分布清晰,一般在 5 Hz 以内;而爆破事件的频谱曲线显得光滑,没有明显优势频率。从二者频谱曲线的直观上,地震谱幅值和“频率”均较高,而爆破谱图形则相反;随着震中距增大,地震和爆破图谱的直观差异已不清晰,如最远的石城台记录,二者已几乎没有差异。

用频谱分析技术可以进一步求得反映地震波高、低频能量的分布特征波谱的如拐角频率 f_c 等更加量化的指标,只是计算过程繁复,如需快速判别则不易做到。上述频谱图中反映的优势频率与震中距有关的现象,可以在地震速报中斟酌使用。

图 13、图 14 是发生于 2005 年 12 月 9 日 10 时 03 分和 10 时 23 分在赣州经济技术开发区内的一次地震和相近震级爆破事件,选择了震中距最小的赣州台对 UD 相记录所作的频谱对比图。图件成图可以在五分钟内完成。

图 13、图 14 可以看到,如果震中距不大(30 km 以内),仪器记录的波形“失真”更小。对于地震事件,频谱图“毛刺”较多,相比而言,爆破事件则显得光滑而干净。

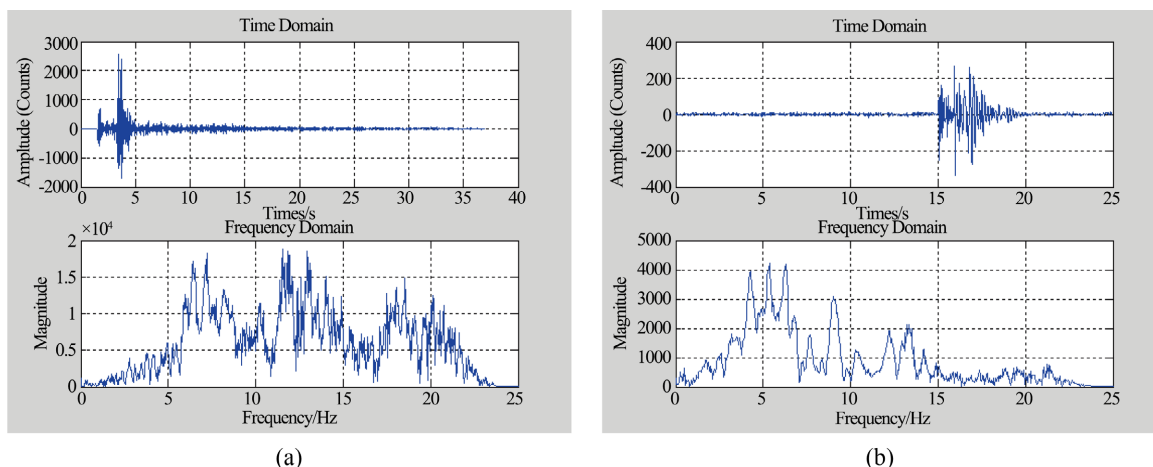


Figure 13. Ganzhou economic and technological development zone: (a) 200512091003 ML2.2 UD phase seismic records and velocity spectrum; (b) 200512091023 ML1.8 UD phase burst record and velocity spectrum

图 13. 赣州经济技术开发区: (a) 200512091003 ML2.2 UD 相地震记录及速度谱; (b) 200512091023 ML1.8 UD 相爆破记录及速度谱

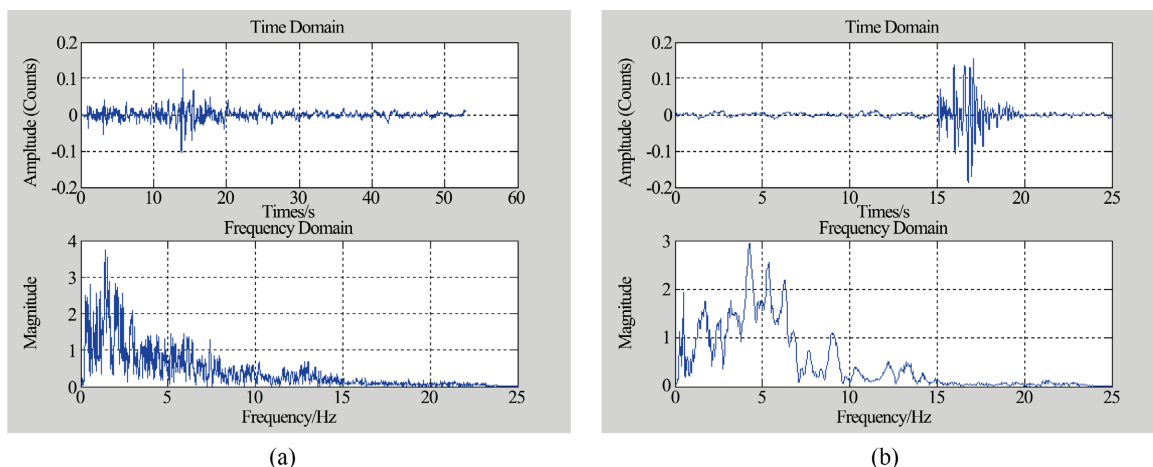


Figure 14. Ganzhou economic and technological development zone: (a) 200512091003 ML2.2 UD phase seismic record and displacement spectrum; (b) 200512091023 ML1.8 UD phase blasting record and displacement spectrum

图 14. 赣州经济技术开发区: (a) 200512091003 ML2.2 UD 相地震记录及位移谱; (b) 200512091023 ML1.8 UD 相爆破记录及位移谱

5. 结论

本研究旨在深入理解和分析天然地震和人工爆破的时域和频谱特征, 主要通过对震级约为 2.0 的微震资料进行对比研究, 为了减少震源与接收台站之间的射线路径介质的非均匀性以及记录仪器的频率特性对地震和爆破波形特征的影响, 选择使用同一台站、同一记录仪器的条件下进行对比研究。研究发现本地区内不同类型地震活动在持续时间、位置、频率、当量和波形等记录上有不同的特点。此外, 震中距的变化会显著影响地震和爆破的速度谱与位移谱的频率分布和振幅峰值。

这些发现进一步加深了我们对天然地震和人工爆破波形特征的理解。尤其是在震中距较近(30 km 以内)时, 天然地震的速度谱与位移谱的优势频率和振幅峰值主要集中在低频区, 而人工爆破没有明显的优势频率, 频率的分布更为均匀。这可能源自天然地震的震源能量释放过程的不均匀性。随着震中距的增加, 地震与爆破速度谱与位移谱的优势频率和振幅峰值的分布主要在中频与中低频区域, 直到最后优势

频率与振幅峰值均集中在低频区域。地震与爆破地震的速度谱与位移谱在震中距较大时, 差异不再明显, 这可能与地震波传播过程中, 高频成分衰减快且位移谱通过积分将低频成分放大有关。这些差异为我们提供了一个基于频谱分析的快速鉴别地震和爆破事件的可能手段。

总之, 我们已经找到一些初步的判别标准, 但是由于缺乏震级较大的爆破资料, 我们无法得到更为准确的识别判据。为了完善并提高识别准确性, 未来的研究应该着重收集更多的爆破资料, 以便在统计意义上对这些差异进行更深入的分析 and 理解。

参考文献

- [1] 王禄军, 尹战军, 翟浩, 等. 基于支持向量机的内蒙古地区台网天然地震与人工爆破的自动识别与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(3): 326-330.
- [2] 庞聪. 基于 MFCC 样本熵和灰狼算法优化支持向量机的天然地震与人工爆破自动识别[J]. 地震工程学报, 2022, 44(5): 1169-1175.
- [3] Amendola, A., Gabbriellini, G., Dell'aversana, P. and Marini, A.J. (2017) Seismic Facies Analysis through Musical Attributes. *Geophysical Prospecting*, 65, 49-58. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12504>
- [4] 蔡杏辉, 张燕明, 陈惠芳, 等. 基于小波特征和神经网络的天然地震与人工爆破自动识别[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(6): 634-639.
- [5] 王婷婷, 边银菊, 张博. 地震与爆破的小波包识别判据研究[J]. 地震学报, 2014, 36(2): 220-232.
- [6] 田宵, 汪明军, 张雄, 等. 基于多输入卷积神经网络的天然地震和爆破事件识别[J]. 地球物理学报, 2022, 65(5): 1802-1812.
- [7] 段刚. 基于卷积神经网络的天然地震与人工爆破识别研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(4): 1379-1385.
- [8] 杨芳, 朱嘉健, 刘智, 等. 广东地区地震与爆破事件识别方法研究[J]. 华南地震, 2016, 36(3): 110-115.
- [9] 蔡杏辉, 邵平荣, 段刚, 等. 福建地区人工爆破与天然地震的判定[J]. 地震地磁观测与研究, 2013, 34(1): 87-91.
- [10] 荣伟健, 赵建明, 董玮玮, 等. 曹妃甸地震台网天然地震与人工爆破时频分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(5): 39-43.
- [11] 高家乙, 刘晓锋, 闫睿. 河南平顶山平煤矿区天然地震、爆破、塌陷时频特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(3): 67-74.
- [12] 安镇文, 魏富胜. 震源性质的时频分析与事件识别[J]. 地震地磁观测与研究, 2011, 32(1): 1-9.
- [13] 赖智华. 赣南数字地震台网近震分析与震情速报[J]. 防灾科技学院学报, 2007, 9(1): 69-72.
- [14] 王惠琳, 李志雄, 徐晓枫, 等. 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, 2017, 38(4): 74-80.
- [15] 陈梦, 杨龙翔, 高家乙, 等. 河南平顶山平煤矿区天然地震和人工爆破的波形特征及识别判据[J]. 地震地磁观测与研究, 2021, 42(5): 90-96.