

陈晓龙,陈继锋,蒲举,等.兰州市红古区非天然地震记录特征分析[J].地震工程学报,2021,43(3):545-550.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.545

CHEN Xiaolong, CHEN Jifeng, PU Ju, et al. Characteristics of Non-natural Earthquake Records in Honggu District, Lanzhou [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 545-550. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.545

兰州市红古区非天然地震记录特征分析

陈晓龙¹, 陈继锋², 蒲 举¹, 王祖东¹

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州岩土地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 选取 2010 年 1 月至 2020 年 8 月期间甘肃区域测震台网记录的兰州市周边地区三分向宽频带数字波形资料, 采用震中位置空间分布、波形特征及傅里叶频谱特征对比等多种方法相结合, 分析兰州市红古区非天然地震活动的特性。结果显示: 该区临近测震台记录的大量地震事件波形特征和傅里叶频谱特征与其他区域地震存在显著差异, 符合非天然地震的典型震相特征, 且空间分布密集、震级较大, 初步分析与该区矿产资源开发活动密切相关。对红古区非天然地震特征的研究有助于台网工作人员快速、准确的判别兰州周边地震类型, 同时对兰州市地震灾害风险评估与防治也具有积极的参考价值。

关键词: 非天然地震; 震相特征; 傅里叶频谱

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)03-0545-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.545

Characteristics of Non-natural Earthquake Records in Honggu District, Lanzhou

CHEN Xiaolong¹, CHEN Jifeng², PU Ju¹, WANG Zudong¹

(1. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Lanzhou Institute of Geotechnical Earthquake, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In this paper, based on the three-component broadband digital waveform data recorded by Gansu seismic network from January 2010 to August 2020, the characteristics of non-natural seismicity in Honggu District of Lanzhou City were analyzed by adopting the spatial distribution of epicenter location, waveform characteristics, and Fourier spectrum characteristics. The results showed the waveform characteristics and Fourier spectrum characteristics of a large number of seismic events in Honggu District are significantly different from those in other areas. Through preliminary analysis, it was found that the typical seismic phase characteristics of non-natural earthquakes in Honggu District are closely related to the exploitation of mineral resources in the area. The study on the characteristics of non-natural earthquakes in Honggu District can be helpful to quickly and accurately identify the earthquake types around Lanzhou, and also has positive scientific significance for the risk assessment and prevention of earthquake disasters in Lanzhou

收稿日期: 2020-09-13

基金项目: 甘肃省地震局地震科技发展基金面上项目(2021M6); 地震科技星火计划项目(XH19043)

第一作者简介: 陈晓龙(1987-), 男, 甘肃漳县人, 硕士, 工程师, 主要从事地震学等研究工作。E-mail: chenxiaolonglz@163.com

通信作者: 陈继锋(1978-), 男, 甘肃清水人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震学等研究工作。E-mail: chenjf163@163.com

area.

Keywords: non-natural earthquake; seismic phase characteristics; Fourier spectrum

0 引言

测震台网日常工作中,震级($M \geq 2.0$)需要在极短时间内进行速报,但对地震类型的识别需要消耗大量时间且难以保证准确性;编目工作需要排除非天然地震的干扰,但小型非天然地震又与天然构造地震存在许多相似之处,导致编目人员混淆的情况时有发生。所以非天然地震的识别不仅是学术界研究的热点问题,同时也是测震台网工作的重点与难点。虽然前人研究已经总结了大量非天然地震的一些特征,但由于不同地域、不同类型的非天然地震常存在差异,故不同地点的非天然地震应分别研究其特性。兰州市作为甘肃省省会城市,对城市周边地区的地震类型、分布的研究在大震速报、地震编目、地震灾害防治与风险评估等方面具有重要意义。位于市区近郊的红古区近年来非天然地震事件频发,但目前尚未有研究涉及,对该区域非天然地震目前仍依靠工作人员的经验进行判断。

非天然地震主要包括爆破、塌陷和矿震等,这些非天然地震常常对台网观测和速报、编目工作造成干扰。近年来,随着甘肃省数字化测震台网的优化改造,省内小震监测能力得到大幅度的提升^[1]。尤其是“十·五”规划后中国地震观测网络项目升级改造以来,甘肃台网积累了海量的宽频带地震观测数据。这些地震记录很好地记录了许多地表反射波、反射转换波、核面反射转换波等数据,且各类震相的动力学和运动学特征明显。丰富的震相记录资料为区分不同类型的地震事件研究提供了研究基础与保障^[2]。本文利用甘肃台网近年来记录的兰州周边大量宽频带地震资料,通过空间分布、波形特征总结和频谱特征分析方法分析解释兰州红古区非天然地震记录特征,为区域测震台网工作人员在速报过程中快速、准确识别该区域的地震类型提供必要的参考。

1 资料选取

选用2010年1月—2020年8月期间甘肃省区域测震台网记录的兰州周边地区 $M_L \geq 2.0$ 的地震事件386例,其中 $2.0 \leq M_L < 3.0$ 地震366例、 $3.0 \leq M_L < 4.0$ 地震18例、 $4.0 \leq M_L < 5.0$ 地震2例。对于上述地震记录,以甘肃省测震台网观测报告为依据,增加了青海台网的共享台站原始记录数据,进行

了分析处理。地震定位使用 Hyposat 方法对所有震例进行了重新校正,并复核了每次事件的类型。在测定震源参数时采用甘肃区域双层地壳模型^[3]。

为突出震源信息,最大限度减少介质传播的影响,选取了红古区矿震多发地震中距小于120 km范围内的MIH、LED、YDT、HUL、XUH、LZH、BYT、LXA等8个宽频带数字地震台资料,其中包括周边MIH、LED、HUL、XUH等4个青海台网台站的记录(图1)。

2 分析方法

不同类型地震事件波形的辨别需要研究地震波的振幅、频率、相位特性、偏振状态及衰减规律等要素。同时也需要更多的利用地震波传播时间和空间距离之间的关系,确定地下地质构造等信息,即地震波的动力学和运动学特征^[5]。本文从甘肃省非天然地震活动的空间分布、波形特征和频谱特征三个方面进行分析讨论。

塌陷、爆破、矿震等非天然地震波形特征除体波周期大、波形不规则、尾波长衰减慢^[6-7]、P波垂直向初动方向各异和短周期面波发育外,与天然地震波形相比具有随震中距增加波列的振幅衰减快,纵、横波振幅比衰减迅速^[8-10]的突出特征。

前人研究显示天然地震的频谱与非天然地震的频谱存在显著差异^[11]。因此,对地震波进行频谱分析能更加充分提取地震波所含信息,更深入地研究波动现象及其物理内涵^[12]。傅里叶变换法在提取地震波中的频谱信息方面被广泛应用,具有可靠、便捷等诸多优势^[13]。天然地震因其震源深度较深、破裂面广和主要依靠刚性地层传播等特性,傅里叶频谱表现为高频成分较多、衰减慢、地震波震动有明显的优势频率分布。而非天然地震震源深度较浅、破裂面较小、震动传播多在地表松散沉积物,所以傅里叶频谱呈现能量分布较为集中、低频成分较多、振动频率分布分散的特征。

3 分析与讨论

3.1 红古区构造环境及地震分布

红古区东接兰州市主城区,西临大通河,南濒湟水河与青海民和回族土族自治县相望,北部黄土山岭与永登县毗邻,地理位置恰好位于兰州、西宁两大

省会城市的几何中心。地质构造上该区地处民和中新世盆地周家台隆起。民和盆地内褶皱、断裂发育,主要划分为皋兰隆起、永登坳陷、周家台隆起及巴

州坳陷四个次级构造单元。研究区内断裂构造发育,断裂一般多为正断层,其中以北北东向断裂为主,其次北北西向及北西向断裂也较为发育^[14](图 1)。

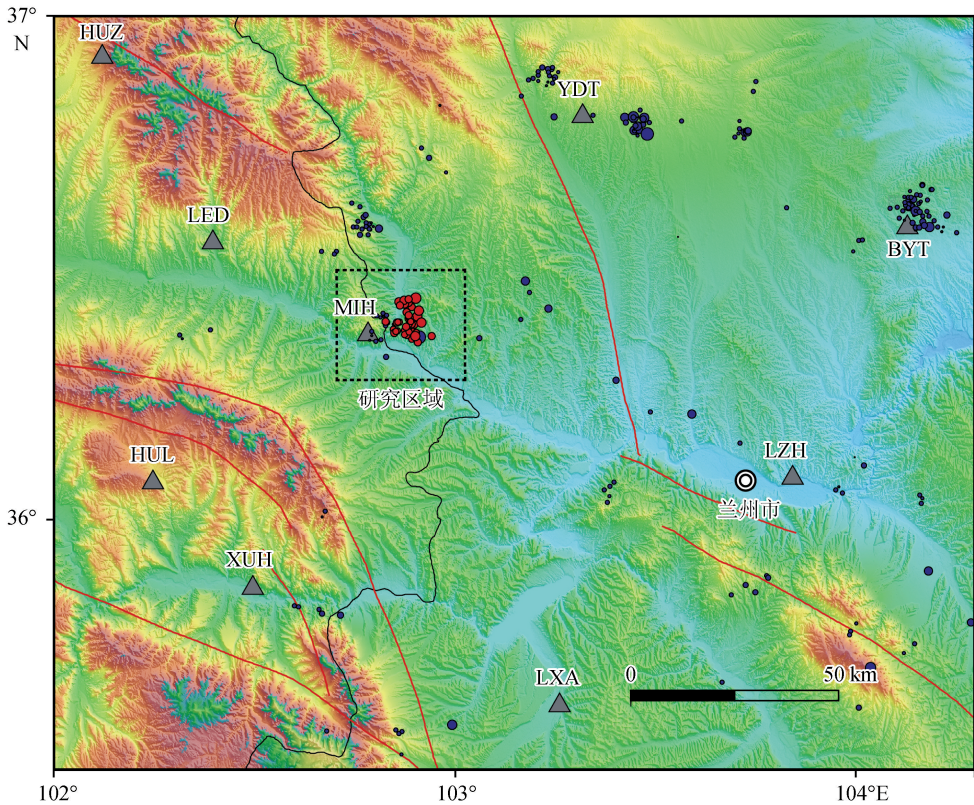


图 1 研究区内近 10 年所有地震震中位置(红色实心圆圈代表非天然地震事件、蓝色实心圆圈代表天然地震事件)与台站(灰色三角形)和断层(红色实线,据邓起东等,2002^[4])分布图

Fig.1 Epicenter location of all earthquakes in the study area in recent 10 years

通过分析近 10 年兰州周边地区 $M_L > 2.0$ 的地震空间分布发现,位于兰州市西北郊区的红古区近十年间地震活动呈现震中位置集中、震级大和发震频率高的特征。兰州城区南、西南和东南三个方向,地震活动的分布与该区域较大断裂带的空间分布较为一致,呈现条带状分散分布特征。

3.2 红古区地震波形特征分析

本研究对发生在红古区的全部 52 例非天然地震及部分天然地震进行了波形对比,结果显示该区地震事件的波形特征呈现很好的一致性,因篇幅所限在此仅选取 2016 年 12 月 19 日发生在甘肃兰州(36°31'01"N, 102°51'01"E),震源深度 8 km 的一次 $M_L 2.2$ 地震为例。非天然地震事件选取 2020 年 8 月 9 号发生在甘肃兰州红古区(36°23'12"N, 102°49'06"E),震源深度为 0 km 的一次 $M_L 2.5$ 地震为例。两例地震震中位置相差仅 9 km,距 LED 台的震中距分别为 51 km、54 km。以 LED 台记录到的事件波形为例,对比分析二者间的波形差异。

距震中 51 km 的 LED 台记录到的震中位置位于甘肃兰州的天然地震波形特征分析显示,其波形特征清晰、界限明确,三分向宽频带数字波形垂直向 Pg 波初动方向向下,与天然地震的典型波形特征具有很好的 consistency(图 2)。

采用距离震中 54 km 的 LED 台记录到的波形资料分析显示:震中位置在红古区的地震波形记录与天然地震有明显的差异。特别是三分向宽频带地震数字波形记录出现了 Pg 波和 Sg 波界限不清、垂直向 Pg 波向下、全波段波形不规则、高频成分缺失、周期较大和 Sg 波后大周期面波发育等特点^[15-18](图 3)。

利用两次地震的波形数据,分别对其 S/P 最大振幅比、Sg 波最大振幅随震中距增加的衰减曲线进行分析(图 4)。两次地震的波形均使用 Jopens-ms-dp 软件分析,选取适用于体波仿真的伍德-安德森(W.A)仿真法,将 BBVS-60S 甚宽频带地震计、EDAS-GN 数据采集器的速度记录转换为位移记录

进行最大振幅量取,其中Pg波仿真后在其最大振幅处量取一个完整周期的PME,Sg波仿真后在其最大振幅处量取一个完整周期的SME或SMN值,单位统一为 μm 。

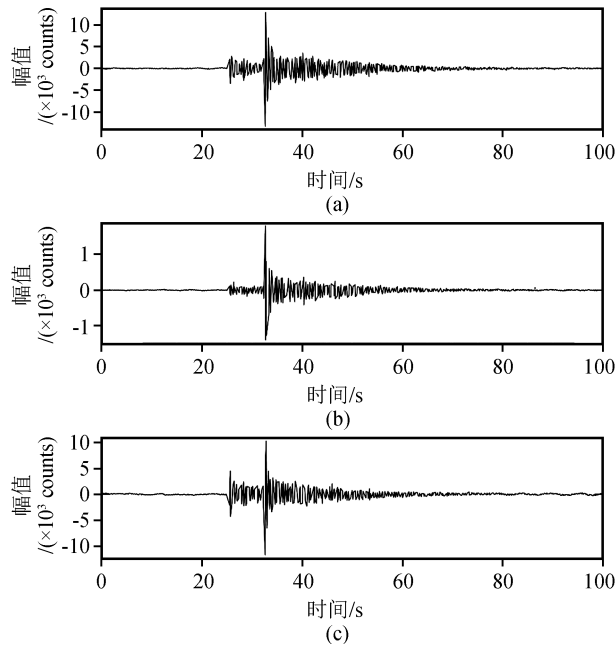


图2 LED台($\Delta=51\text{ km}$)记录的兰州地震波形特征图

Fig.2 Waveform characteristics of Lanzhou $M_{1.2.2}$ earthquake recorded by LED station ($\Delta=51\text{ km}$)

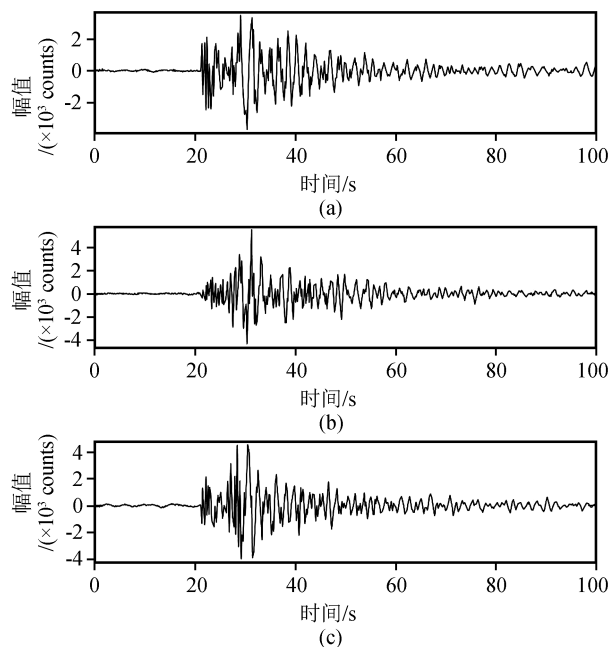
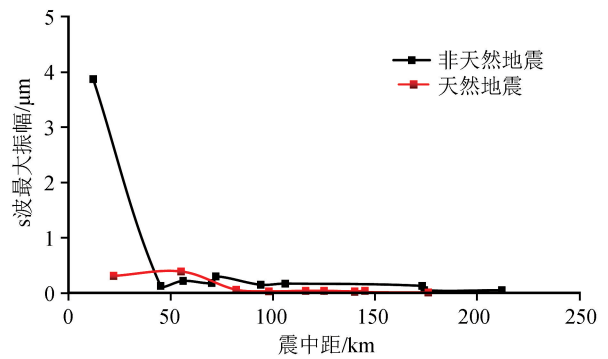
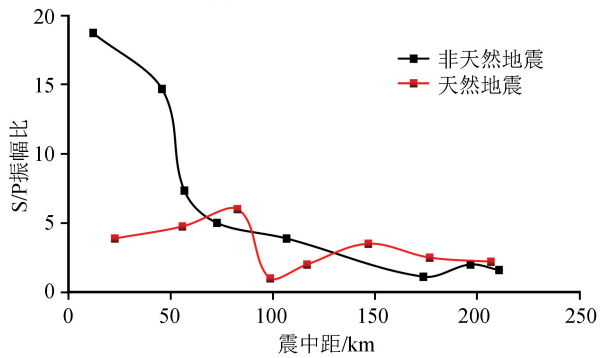


图3 LED台($\Delta=54\text{ km}$)记录的兰州红古区 $M_{1.2.5}$ 地震塌陷波形特征图

Fig.3 Waveform characteristics of Honggu $M_{1.2.5}$ earthquake recorded by LED station ($\Delta=54\text{ km}$)



(a) S波最大振幅对比曲线



(b) S/P振幅比变化曲线

图4 非天然、天然地震S波最大振幅(a)、S/P震幅比(b)在不同震中距的变化

Fig.4 Variation of maximum amplitude of S-wave and S/P amplitude ratio of non-natural and natural earthquakes at different epicentral distance

从两次事件的衰减曲线可以看出,非天然地震的S/P震幅比和S波最大振幅在近台均明显大于天然地震,但随着震中距的增大都表现为快速衰减。S/P振幅比在震中距大于50 km后逐渐与天然地震趋于一致,S波最大振幅也在相近距离衰减至接近天然地震振幅,说明对地震类别进行判断时近台的波形记录最为重要。

3.3 红古区地震的频谱特征分析

本文以LED台为例,将该台记录到的两次地震事件的时间域记录进行傅里叶变换,将其转换为频率域进行谱分析。其公式可表述为: $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$,振幅谱^[19]表述为:

$$|F(\omega)| = \omega^{-1} \left[1 + \frac{\omega^2}{\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $F(\omega)$ 为 $f(t)$ 的像函数; $f(t)$ 为 $F(\omega)$ 的像原函数; α 为实数; ω 为频率;不同类型的震源取不同的时间常数 $1/\alpha$ 。

振幅谱计算过程中,利用SAC软件将事件按照

台站记录较好的垂直向速度记录进行格式转换,存储为数据文件,然后用 SAC 软件将整体波列速度记录做积分处理,对位移记录的纵横波进行波谱分析,得到两次事件的归一化振幅谱如图 5 所示。

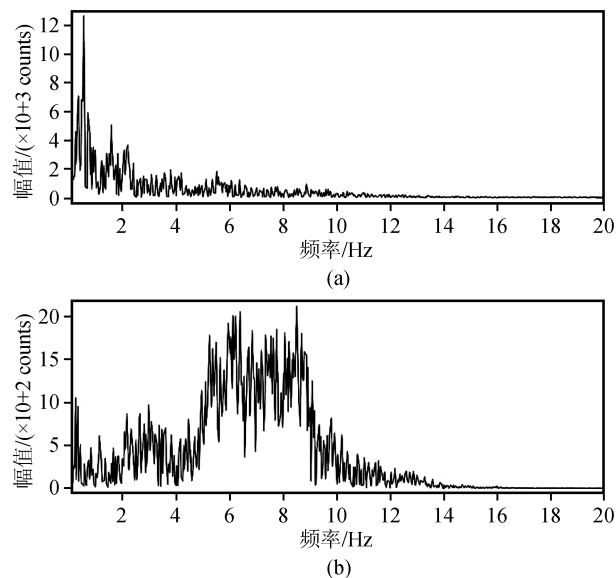


图 5 红古区 $M_L 2.5$ 非天然地震与兰州周边 $M_L 2.2$ 地震的归一化震幅谱

Fig.5 Normalized amplitude spectrum of Honggu $M_L 2.5$ non-natural earthquake and $M_L 2.2$ earthquake near Lanzhou

图 5(a)显示 LED 台记录的红古区 $M_L 2.5$ 非天然地震事件傅里叶频谱表现为低频成分较多,且振动频率分布分散。其少数高频成分主要分布在 0~2 Hz,能量分布十分集中,之后能量快速衰减,在 12 Hz 以后能量接近于 0。这一结果与非天然地震发生在地表、近地表,传播介质密度较低,因此其波形具有较多低频成分的特征相符。反观图 5(b)显示的 LED 台记录到的甘肃兰州 $M_L 2.2$ 天然地震事件傅里叶频谱,因天然地震发震于深度较大的刚性岩层中,所以其地震波明显表现为高频成分较多,优势频率位于 5~9 Hz 范围内,地震波震动有明显的优势频率分布。对发生在兰州市周边的大量地震事件的频谱分析显示,该区域天然、非天然地震事件的频谱特征与上例高度相似,文中不再一一赘述。

4 讨论

通过对甘肃兰州地区近 10 年的地震事件统计分析,发现兰州市红古区存在明显的团块状地震发生地带,且震中位置非常集中。除此之外其他区域

的地震活动大多随主要断裂带呈条带状分布。特别需要注意的是,近 10 年以来发生在兰州市周边地区的非天然地震,除 2 例发生在白银市靖远县和兰州市永登县外,其余 52 例非天然地震事件均发生于红古区及其与青海省民和县、甘肃省永登县交界处。

通过红古区与兰州市周边其他区域地震事件波形特征对比发现,震中位置位于红古区的 $M_L 2.5$ 地震事件在距震中 54 km 的 LED 台记录到的地震波形特征表现出 Pg 波和 Sg 波界限不清、Pg 波振幅较大、Sg 波后大周期面波发育、周期较大和持续时间较长、全波段波形较为简单等特点。因其垂直向 Pg 波向下,体波周期明显偏大、高频成分缺失,通过分析其 S/P 振幅比和 S 波最大振幅随震中距的衰减曲线,判断应为煤矿开采等生产活动引发的塌陷地震。台网工作人员在速报、编目时应注意红古区非天然地震的典型波形特征。

频谱分析显示,LED 台($\Delta = 51$ km)记录到的甘肃兰州 $M_L 2.2$ 天然地震事件波形的傅里叶频谱表现为高频成分较多,优势频率位于 5~9 Hz 范围内,地震波震动有明显的优势频率分布。而 LED 台($\Delta = 54$ km)记录到的兰州红古区 $M_L 2.5$ 非天然地震事件波形傅里叶频谱表现为低频成分较多,振动频率分布分散,能量分布十分集中,少数高频成分主要分布在 0~2 Hz。上述两例地震事件波形的频谱特征都与各自地震类型的理论频谱特征具有很好的一致性。对于少数难以通过波形特征进行确认的非天然地震,速报、编目时可以参考本文傅里叶频谱分析方法进行对比判断。

5 结论

通过波形对比与傅里叶频谱分析,可知:(1)发生在红古区的非天然地震普遍存在 S/P 振幅比和 S 波最大振幅随震中距衰减极快、体波周期较大、Pg 和 Sg 震相界限模糊及大周期面波发育等特征;(2)该区发生的地震多呈现能量分布集中、振动频率分布分散和低频成分多等特点。结合当地煤矿、石灰石矿场分布,初步判断该区域地震活动与矿产开发活动关系密切。

红古区近 10 年发生了大量 $M_L \geq 2.0$ 的非天然地震,对区域测震台网日常工作中的地震速报、编目等工作造成了一定的干扰,所以对责任区内不同地域非天然地震特性的研究总结不仅有利于非天然地

震的识别,同时也具有重要的实际意义。

参考文献(References)

- [1] 邴绍丹,潘一山.矿山微震定位方法及应用研究[J].煤矿开采, 2007,12(5):1-4.
BINGShaodan,PAN Yishan.Micro-seismic orientation method for mine and its application[J].Coal Mining Technology,2007, 12(5):1-4.
- [2] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.
PANYishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (11):1844-1851.
- [3] 赵凌云.平凉地区地震活动特征及其发震机理研究[D].中国地震局兰州地震研究所,2008:79-86.
ZHAO Lingyun.Study on seismicity characteristics and mechanism in Pingliang area [D].China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology,2008:79-86.
- [4] 陈继锋.甘肃华亭地区矿震记录特征分析[J].西北地震学报, 2010,32(1):92-94.
CHENJifeng.Analysis on phase characteristics of mining-induced earthquakes in Huating mine aera in Gansu province[J].Northwestern Seismological Journal,2010,32(1):92-94.
- [5] 尹欣欣,杨立明,陈继锋,等.甘肃地区一维速度模型计算研究[J].地震工程学报,2017,39(1):154-159.
YIN Xinxin,YANG Liming, CHEN Jifeng, et al.Study on the one dimensional velocity model in Gansu area[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(1):154-159.
- [6] 孙成禹,李振春,杜世通.地震波动力学基础[M].石油工业出版社,2011:45-58.
SUN Chengyu, LI Zhenchun, DU Shitong. Fundamentals of seismic wave dynamics [M]. Petroleum industry press, 2011: 45-58.
- [7] 王凤,吕震,刘兵,等.邹城地区矿震、爆破和(天然)地震事件的特征分析[J].地震地磁观测与研究,2013,34(增刊1):82-86.
WANG Feng, LV Zhen, LIUBing, et al.Characteristic analysis of the mine earthquakes, explosions and natural earthquakes occurred in Zoucheng Region[J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2013,34(suppl):82-86.
- [8] 唐兰兰,王海涛.爆破与地震的波谱特征分析[J].内陆地震, 2009,23(3):377-385.
TANG Lanlan,WANG Haitao.Spectrum characteristics analysis of explosions and earthquakes[J].Inland Earthquake,2009, 23(3):377-385.
- [9] 汪贵章,凌学书,张佑龙,等.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,2010,12(2):26-31.
WANG Guizhang, LING Xueshu, ZHANG Youlong, et al. Characteristic recognition of non-natural earthquakes such as explosions in Anhui and the periphery[J].Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology,2010,12(2): 26-31.
- [10] 闫俊岗,宋书克,李守勇,等.地震波形记录特征分析[J].地震地磁观测与研究,2011,32(1):48-53.
YAN Jungang, SONG Shuke, LI Shouyong, et al.Characteristic analysis of seismic waveform recorded in xiaolangdi reservoir digital seismic network [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2011,32(1):48-53.
- [11] 林大超,白春华.爆炸地震效应[M].北京:地质出版社,2007: 99-109.
LING Dachao, BAI Chunhua. Seismic effect of explosion [M]. Beijing: Geological Publishing House,2007:99-109.
- [12] 赵鸿儒,孙进忠,唐文榜,等.全波震相分析[M].北京:地震出版社,1991:111-125.
ZHAO Hongru, SUN Jinzhong, TANG Wenbang, et al. Full wave phase analysis [M]. Beijing: Seismological Press, 1991: 111-125.
- [13] 张萍,蒋秀琴,苗春兰,等.爆破、矿震与地震的波谱差异[J].地震地磁观测与研究,2005,26(3):24-34.
ZHANG Ping, JIANG Xiuqin, MIAO Chunlan, et al. The Differences of wave spectrum among explosion, mine tremor and earthquake [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2005,26(3):24-34.
- [14] 许康生.二种地震频谱分析方法的比较[J].西北地震学报, 2000,22(3):346-348.
XU Kangsheng.A comparison between two methods for seismic spectral analysis [J].Northwestern Seismological Journal, 2000,22(3):346-348.
- [15] 梁永焯.BBVS-120型甚宽频带数字地震计典型地震波形记录特征[J].地震地磁观测与研究,2018,39(4):109-115.
LIANG Yongye. Characteristics Analysis on Typical seismic waveform: using very-wide-band-digital-seismograph BBVS-120 [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2018,39(4):109-115.
- [16] 梁向军,刘林飞,翁剑强.山西数字地震台网记录波形特征分析[J].山西地震,2015(4):1-4,29.
LIANG Xiangjun, LIU Linfei, WENG Zhaoqiang. Characteristics of waveform recorded in Shanxi digital seismic network [J].Earthquake Research in Shanxi,2015(4):1-4,29.
- [17] 苏莉华,魏玉霞.河南省非天然地震的波形特征及识别方法[J].高原地震,2011,23(2):30-34.
SU Lihua, WEI Yuxia. Characteristics and identification of the waves of non-earthquakes in Henan province [J]. Plateau Earthquake Research,2011,23(2):30-34.
- [18] 赵凌云,张辉,刘小凤.甘肃平凉地区地震活动特征及其发震机理研究[J].西北地震学报,2009,31(2):186-190.
ZHAO Lingyun, ZHANG Hui, LIU Xiaofeng. Study on seismicity characteristics and mechanism in Pingliang area, Gansu province [J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31 (2):186-190.
- [19] MARKUS Bath.Spectral analysis in geophysics[M].Beijing: Seismological Press,1978:47-49.