

梁沙沙,高立新,薛丁,等.阿拉善左旗5.8级地震前地脉动信号特征分析[J].地震工程学报,2018,40(4):808-814.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.808

LIANG Shasha,GAO Lixin,XUE Ding,et al.Characteristics of Ground Pulse Signals before the 2015 Alxa Left Banner M5.8 Earthquake [J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(4):808-814.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.808

阿拉善左旗5.8级地震前地脉动信号特征分析

梁沙沙,高立新,薛丁,戴勇,格根

(内蒙古自治区地震局,内蒙古呼和浩特010010)

摘要: 本文针对2015年4月15日发生在南北地震带北端的阿拉善左旗5.8级地震,利用乌海台、东升庙台、石嘴山台的连续数字地震波形资料,采用快速傅里叶变换对三个台站的2015年4月1日00时—4月15日23时波形数据进行分析,并持续跟踪0~0.25 Hz包络幅值极大值的变化形态。结果显示:(1)在5.8级地震前,震中附近的乌海地震台、东升庙地震台、石嘴山地震台记录的地震波形均出现频谱向低频偏移的现象;(2)三个台站出现低频异常的包络幅值极大值跟踪形态不一致,其中只有乌海台在震前出现明显的持续不稳定异常,异常持续时间约120 h;(3)三个台站距离震中由近及远包络幅值极大值的跟踪形态差异明显。

关键词: 低频信号;傅里叶变换;频谱偏移;包络幅值极大值

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)04-0808-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.808

Characteristics of Ground Pulse Signals before the 2015 Alxa Left Banner M5.8 Earthquake

LIANG Shasha, GAO Lixin, XUE Ding, DAI Yong, GE gen

(Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Considering the Alxa Left Banner M5.8 earthquake that occurred on April 15, 2015, the continuous digital seismic waveform data recorded by Wuhai, Dongshengmiao, and Shizuishan seismic stations from 00:00 April 1 to 23:00 April 15, 2015 were analyzed using Fourier transform, and the variation of maximum envelop amplitude within 0~0.25 Hz was tracked. The results reveal the following. (1) Before the M5.8 earthquake, the seismic waveform recorded by Wuhai, Dongshengmiao, and Shizuishan stations near the epicenter all show that the frequency spectrum shifts to low frequency. (2) The tracking forms of maximum envelop amplitude with low frequency anomaly in the three stations are different. Before the earthquake, only the tracking form in Wuhai station shows obvious continuous unsteady anomaly, which continues for about 120 hours. (3) The tracking forms of maximum envelop amplitude in the three stations are quite different with their distance from epicenter.

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 2018年内蒙古自治区地震局局长基金课题(2018ZD07);内蒙古自治区科技厅重大专项(强震短临跟踪及空地立体观测技术集成创新)

第一作者简介: 梁沙沙(1987—),女,硕士,工程师,从事数字地震学方法与研究。E-mail:liangshasha200611012@126.com。

通信作者: 格根(1989—),女(蒙古族),硕士,助工,主要从事热红外相关研究工作。E-mail:834670291@qq.com。

Keywords: low frequency signal; Fourier transform; frequency offset; maximum envelope amplitude

0 引言

随着国家宽频数字台网的建立与完善, BBVS-120、CTS-1、BBAS-2 甚宽带地震计, JCZ-1 等超宽带地震计为前震信息的识别提供了有力的物质基础, 而分析震前特殊信息, 频域分析要比时域分析更有优势^[1], 周围环境影响因素(如: 塌方、爆破、雷电等)均有其固有的频率特征, 而就地震波本身而言, P 波、S 波、面波、体波等也均有其不同的优势频段, 特别是地震波中的低频信号, 由于其频率低、波长长、不易被吸收而绕过障碍物, 使得其有传播距离远等特点, 故研究地震波的低频成分更能反映大地内部的变化。为加强防震减灾实效作用, 利用快速傅里叶变换对地震计记录的波形数据进行数据挖掘, 以求发现强震前频率域的低频异常信号, 在 2008 年汶川 8.0 级地震前曾出现地脉动低频波动现象, 并且该现象有重现性, 对之后该地区出现的中强地震也具有适用性。为检验此异常信号出现是否具有普遍性, 甘肃台网根据此特征信号的重现现象进行了震前内部预报试验, 发现低频波动信号出现在距发震前 20~160 个小时内, 持续时间约为 60~160 h, 有重现性、持续性、过程性等特征^[1]。其实早在多年前就有学者^[2-3]研究认为, 大震前短周期面波的频谱可能会在震前显示出一定的前兆异常特征, 但是当时的地震数据记录并不乐观, 研究效果也不理想, 随着数字化地震台网的建立, 高精度、高稳定性地震计仪器的产出, 为该方法的应用提供了有力的物质基础。频谱偏移现象得到了许多地震研究专家的广泛关注, 有学者^[4-5]认为其物理本质是断层的预滑或慢破裂, 而之后又提出的破裂成核理论^[6]中具有前兆意义的推论也说明在震前会出现低频波, 那么表现出来的频谱特征就是频带变窄并向低频偏移。同时也有学者提出距震中距不同的台站所记录的同一普通地震(非前震)的频谱特征会发生变化^[7]。

本文针对 2015 年 4 月 15 日发生在南北地震带北端、鄂尔多斯块体西北缘的阿拉善左旗 5.8 级地震, 利用傅里叶变换对其震前 15 d 内的地震波形数据进行频谱分析, 意在寻找震前突出异常特征。

1 方法原理

本文利用距离 2015 年阿左旗 5.8 级地震震中 42 km 的乌海地震台、距离震中 60 km 的石嘴山地

震台、距离震中 158 km 的东升庙地震台的连续数字波形资料, 以小时数据波形为研究对象进行快速傅里叶变换, 跟踪 0~0.25 Hz 的包络幅值极大值变化形态, 观察低频异常信号在震前是否有特殊形态变化, 来判断此种变化是否与震中距有关。

1.1 资料处理

本文选取距离 2015 年阿左旗 5.8 级地震震中分别为 42 km 的乌海地震台(wuh)、60 km 的石嘴山地震台(szs)、158 km 的东升庙地震台(dsm)的地震波形数据为研究资料; 将地震计所记录的小时 seed 格式数据转为 ASCII 格式, 并仅提取垂直向分量(BHZ)的数据。在本文研究中不做速度或加速度转换, 直接用 counts 值, 但事实上该项研究工作的初始数据最好是地震波速度数据。

1.2 快速傅里叶变换

利用频谱分析能准确提取周期信息, 这对于动态数据的进一步处理有着重要意义, 由于一个序列是由偶然误差、周期波动和趋势项叠合而成, 因此难以一眼看出趋势变化。但周期波动较小的趋势对频谱分析的影响较小。在本文中采用傅里叶频谱变换对数据进行分析。

$$x_i = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m \left(a_k \cos \frac{2\pi k i}{N} + b_k \sin \frac{2\pi k i}{N} \right) \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i, a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cos \frac{2\pi k i}{N} \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \sin \frac{2\pi k i}{N}, k = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

由式(1)可进一步化简为:

$$x_i = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}} \left(c_k \cos \left(\frac{2\pi k i}{N} + \varphi_k \right) \right) \quad (4)$$

其中

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \varphi_k = \arctan \left(-\frac{b_k}{a_k} \right) \quad (5)$$

将 c_k, φ_k 按频率画出, 即可得到 Fourier 的振幅谱和相位谱。

在数字信号处理中, 一般用最大频率 Nquist 频率, Nquist 频率由取样间隔 Δt 来决定, 为取样间隔 2 倍的倒数^[8], 现在数字化地震台网取样间隔基本为 0.01 s, 所以能得到地震波的最大频率(Nquist 频率)为 50 Hz。但是本文关注的是 0~0.25 Hz 的低频频率, 对高频成分不关注, 故在取频谱图时只将可视频率范围调节至 0~2 Hz。

1.3 幅值包络线

幅值包络线也称频谱包络线,即频谱是许多频率的集合,形成一个很宽的频率范围,不同频率其振幅可能不同,将不同频率的振幅最高点连接起来形成的曲线叫频谱包络线。确定该包络线在 0~0.25 Hz 的极大值,并持续跟踪三个台站(乌海台、石嘴山台、东升庙台)在该频率范围的幅值极大值(如图 1、图 2 所示)。

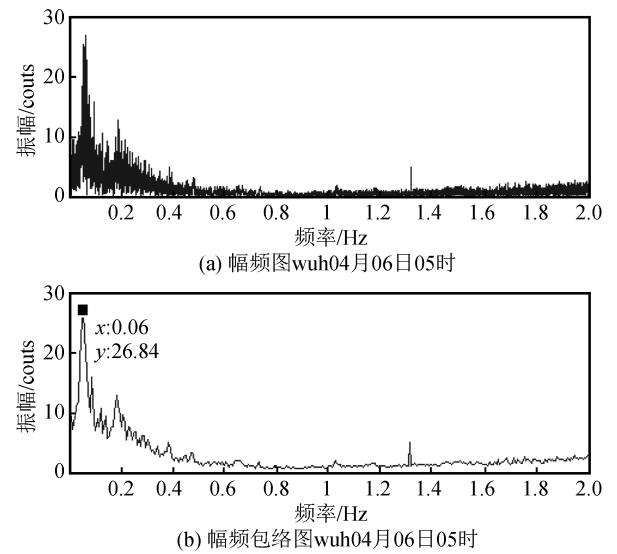


图 1 乌海台 2015 年 4 月 6 日 5 时频谱包络图
Fig.1 Spectrum envelope of Wuhai station at 5 o'clock on April 6, 2015

2 主要结果

2.1 频谱偏移

乌海地震台距离阿左旗 5.8 级地震震中 42 km, 石嘴山地震台距离其 60 km, 东升庙地震台距离震中 158 km, 三个台站虽与震中距离不同,但在震前均有不同程度的频谱偏移现象,即频谱向低频偏移,表现在图上即向左偏移。一般频谱图表现为优势频段在 0.2 Hz 处(图 3),幅值小于 30;当发生频谱偏

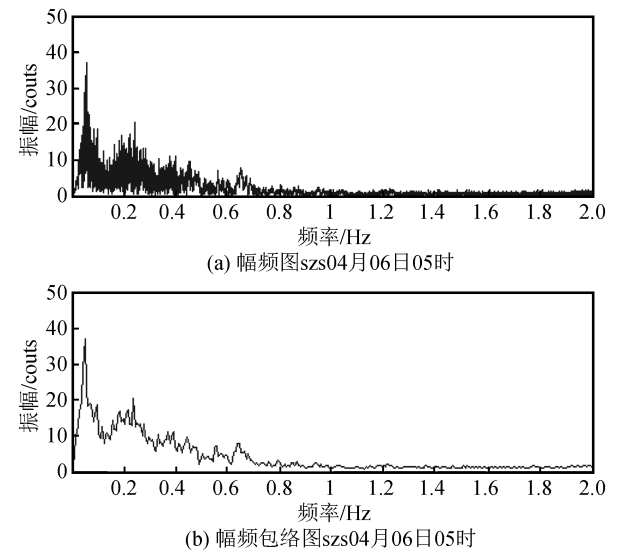


图 2 石嘴山台 2015 年 4 月 6 日 5 时频谱包络图
Fig.2 Spectrum envelope of Shizuishan station at 5 o'clock on April 6, 2015

移现象后,优势频段会向低频倾斜,并且小于 0.1 Hz (图 4),同时幅值一般也会随之增大,有时幅值甚至可达 100 以上,当然也会出现不同形态的频谱偏移现象(图 5)。

本文中频谱偏移现象并不是连续出现的,而是间断连续出现至发震前,且在同一小时段,石嘴山台的振幅大一些,频谱左移现象在乌海台、东升庙台、石嘴山台均出现,且频谱左移后的频谱特征有不同类型,在 2015 年 4 月 7 日 10 时 3 个台站记录的频谱图与 2015 年 4 月 4 日 9 时、4 月 7 日 9 时的频谱左移形式有差别,这可能和地下介质破裂形式有关。

2.2 幅值包络线的极大值跟踪结果

持续跟踪三个台站的幅值包络线极大值(0~0.25 Hz),最终结果显示出三个台站的包络极大值跟踪形态差异明显(图 6~图 8),这种差异与震中距有关,通过此现象能较好的判定未来地震的震中位

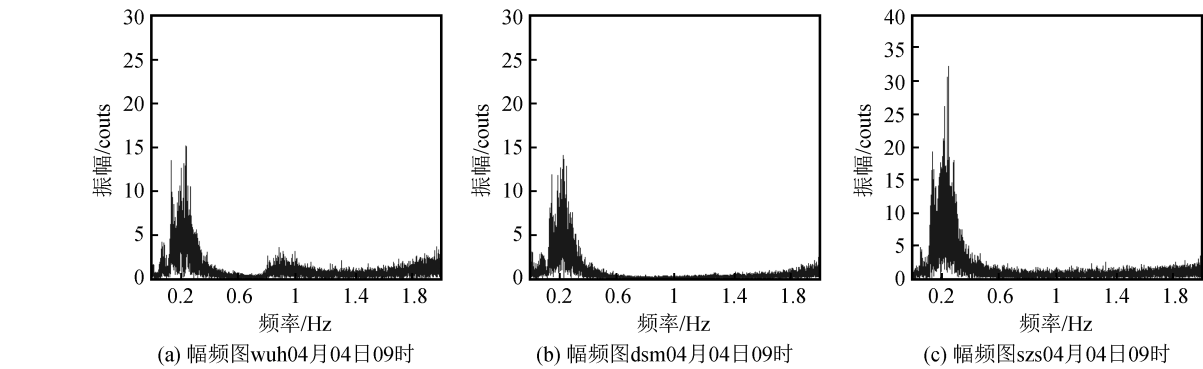


图 3 乌海台、东升庙台、石嘴山台 2015 年 4 月 4 日 9 时频谱图
Fig.3 Frequency spectra of Wuhai, Dongshengmiao, and Shizuishan stations at 9 o'clock on April 4, 2015

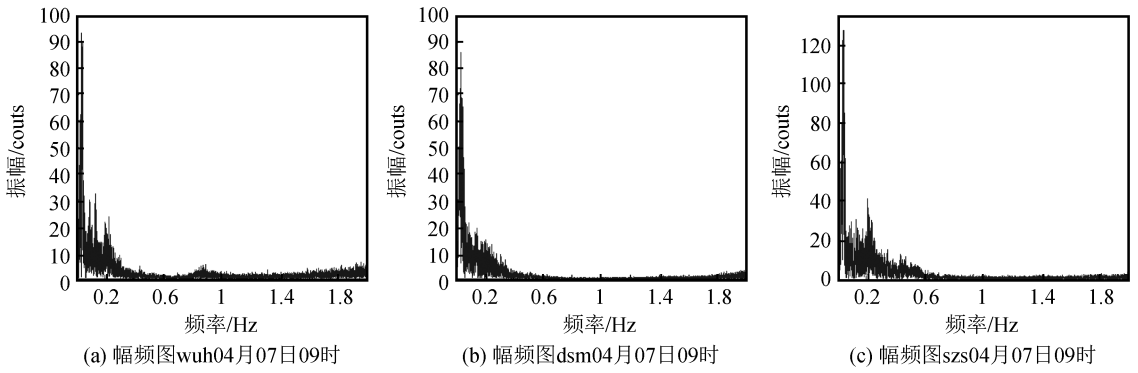


图 4 乌海台、东升庙台、石嘴山台 2015 年 4 月 7 日 9 时频谱图

Fig.4 Frequency spectra of Wuhai, Dongshengmiao, and Shizuishan stations at 9 o'clock on April 7, 2015

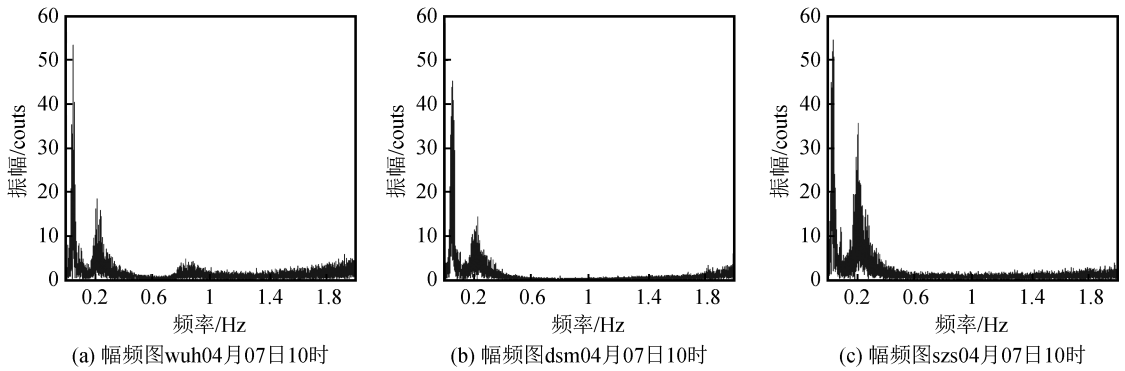


图 5 乌海台、东升庙台、石嘴山台 2015 年 4 月 7 日 10 时频谱图

Fig.5 Frequency spectra of Wuhai, Dongshengmiao, and Shizuishan stations at 10 o'clock on April 7, 2015

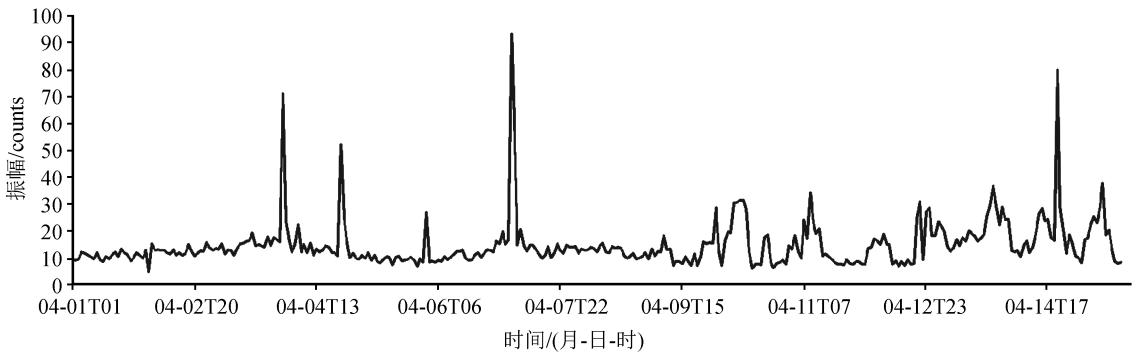


图 6 东升庙台 2015 年 4 月 1 日 0 时—4 月 16 日 0 时低频信号频谱包络幅值极大值跟踪曲线

Fig.6 Maximum value tracking curve of spectrum envelope amplitude of low-frequency signals

at Dongshengmiao station from 0:00 on April 1 to 0:00 on April 16, 2015

置,而这种特殊形态能较好的显示出阿拉善左旗 5.8 级地震前的异常形态,特别是乌海地震台在 4 月 1 日以来在相对平缓的基础上从 4 月 10 日 6 时开始表现出曲线波动形态,该形态与汶川的幅值持续上升形态不完全一致^[9],但是认为乌海台出现的这种形态与破裂成核理论相对应,可能是一种亚失稳状态的表现;而东升庙台相对比较平滑,平滑的曲线形态可能是破裂终止区或破裂未到达区的表现;石嘴山台虽然突跳波动明显,但这种形态反而不利于能

量的存储,可能是能量的传输过程。

2.3 部分干扰因素分析

低频信号的提取是从连续地震波数据中挖掘的,而连续地震波数据中掺杂着诸多信息的成份,包括爆破、小地震、远震、台风、暴风雨等影响因素,下面依次做分析。

2.3.1 爆破

2015 年 4 月 15 日阿拉善左旗 5.8 级地震震中周围爆破比较常见,一般在距离震中 150 km 的宁

蒙边界处发生,爆破发生在地表,均是高频成分,而在对三个台站的地震波数据进行频谱分析时,只关注 0~0.25 Hz 的低频成分,故将频谱显示区间控制在 2 Hz 以内,图 9 显示出小地震频率成分主要集中在 1 Hz 以上,用 Butter-worth 滤波器进行滤波,其中通

带边界频率为 1.0 Hz,阻带边界频率为 2.2 Hz,通带波纹为 1 db,阻带衰减为 30 db,最终不论滤波前还是滤波后均不影响数据在 0~0.25 Hz 间的成分,且爆破最显著的特征是不具有持续性,故爆破对震前低频异常信号的干扰可以排除。

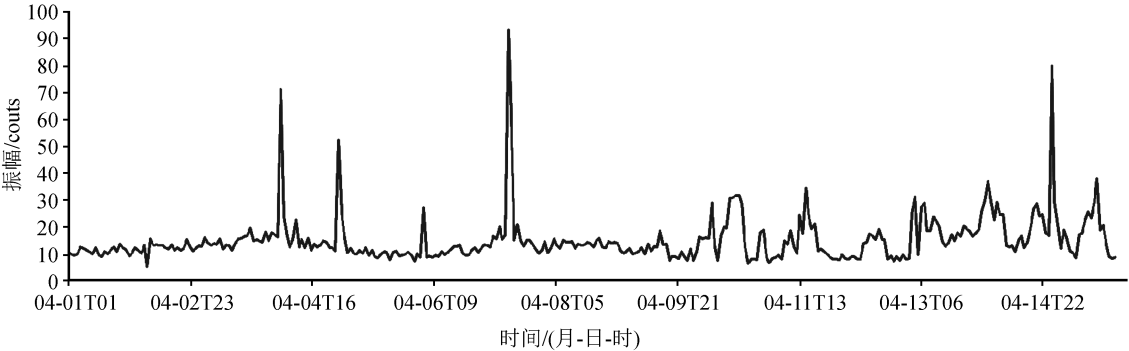


图 7 乌海台 2015 年 4 月 1 日 0 时—4 月 16 日 0 时低频信号频谱包络幅值极大值跟踪曲线
Fig.7 Maximum value tracking curve of spectrum envelope amplitude of low-frequency signals at Wuhai station from 0:00 on April 1 to 0:00 on April 16, 2015

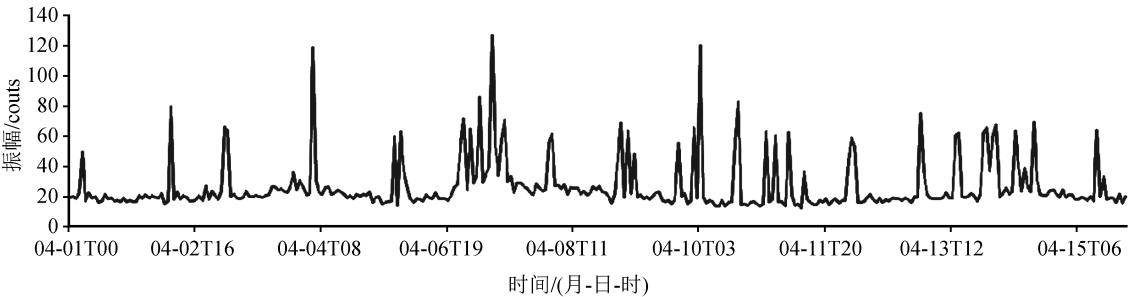


图 8 石嘴山台 2015 年 4 月 1 日 0 时—4 月 16 日 0 时低频信号频谱包络幅值极大值跟踪曲线
Fig.8 Maximum value tracking curve of spectrum envelope amplitude of low-frequency signals at Shizuishan station from 0:00 on April 1 to 0:00 on April 16, 2015

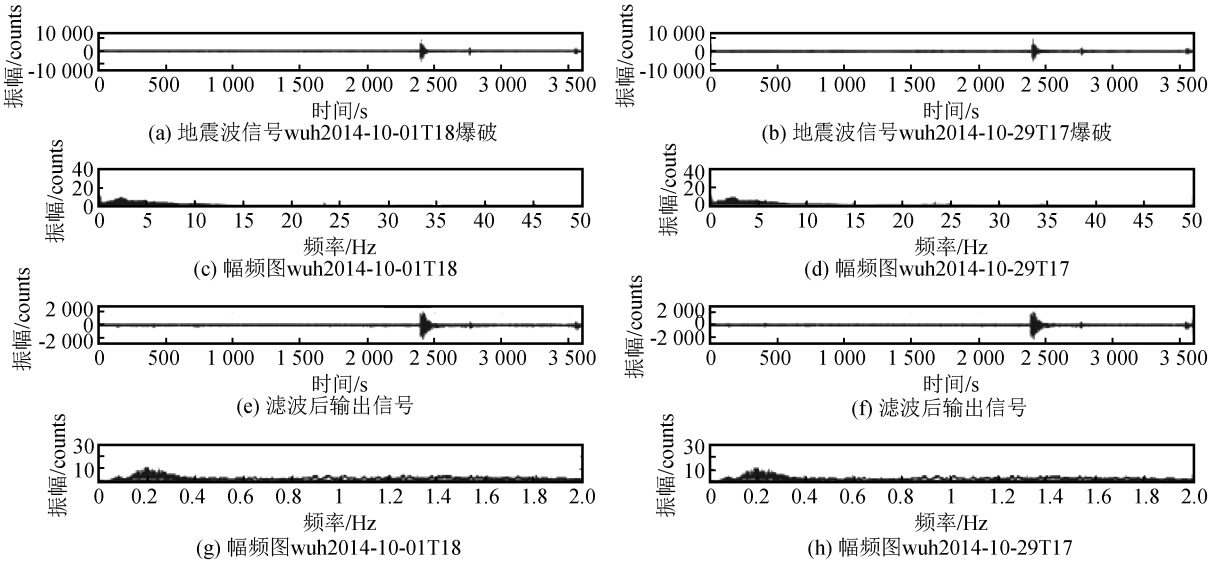


图 9 乌海台记录 2014 年 10 月 1 日 18 时、10 月 29 日 17 时爆破的频谱特征图

Fig.9 Spectrum characteristics of blasting recorded by Wuhai station at 18:00 on October 1 and 17:00 on October 29, 2014

2.3.2 小地震

2015 年 4 月 15 日阿拉善左旗 5.8 级地震前 4 月 1 日 00 时—4 月 15 日 15 时段内,跟据全国统一正式目录,在震中附近仅发生过两次小地震,分别是 2015 年 4 月 4 日 20 时内蒙古阿拉善左旗 2.3 级地震、2015 年 4 月 5 日 20 时宁夏永宁 2.0 级地震,两

次地震所在小时段内的数据显示(图 10)低频现象基本没有,虽然 4 月 5 日 20 时的宁夏永宁 2.0 级地震略显示出低频信号,但幅值较低,对结果不会产生影响,可以排除;内蒙古阿拉善左旗所处的宁蒙交界处测震台站稀疏,监测能力较弱,故 2.0 级以下地震是否会对结果产生影响还不清楚。

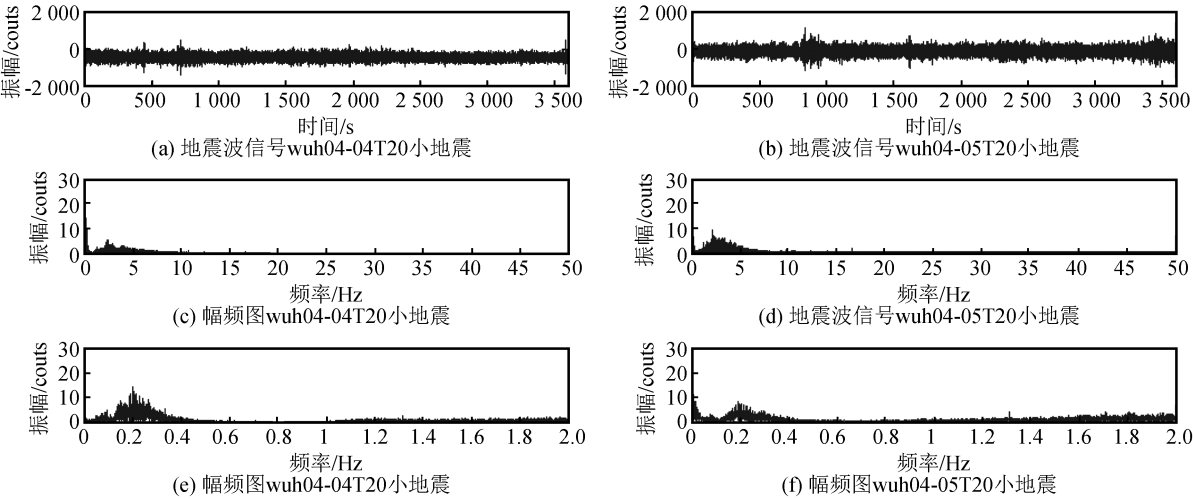


图 10 乌海台记录 2015 年 4 月 4 日 20 时、4 月 5 日 20 时小地震的频谱特征图

Fig.10 Spectrum characteristics of small earthquakes recorded by Wuhai station at 20:00 on April 4 and 20:00 on April 5, 2015

2.3.3 远震

2015 年 4 月 1 日 00 时—4 月 15 日 14 时时间段内全国没有发生 $M_s5.0$ 地震,在 2015 年 4 月 15 日 15 时 8 分 36 秒时甘肃临洮发生 $M_L5.0$ 地震,该地震位于甘肃南部,与 2015 年 4 月 15 日 15 时 39 分 28 秒阿拉善左旗 5.8 级地震相差半个小时左右。其中甘肃白银台(BYT)记录到甘肃临洮 5.0 级地震的地震波形频谱图频率范围在 0~20 Hz 范围内(图 11),但内蒙古乌海台记录到的频谱图频率范围主要在 0~8 Hz 范围内,且大部分聚集在 2.5 Hz 以内(图 12),由此可见,甘肃临洮 5.0 级地震的低频信号已被乌海台接收到,只是振幅有所减弱,故甘肃临洮 5.0 级地震对乌海台周边的地震应力积累及促发有一定的影响,而大约 30 min 后距离乌海台 42 km 的内蒙古阿拉善左旗发生 5.8 级地震绝非巧合,甘肃临洮地震对阿左旗 5.8 级地震有重要影响,但是本文所研究的震前低频异常信号在 4 月 10 日就已出现,重在异常信号的持续性。

2.3.4 台风及雷雨

2015 年 4 月 1 日 00 时—4 月 15 日 14 时时间

段内内蒙古阿拉善左旗所在的震中位置附近没有发生强雷雨天气,同时离海岸线也非常远,故排除台风产生的低频信号对数据的影响;内蒙古阿拉善左旗 4 月气候较干燥,大风可能对数据产生影响,但也不具有持续性,故排除。

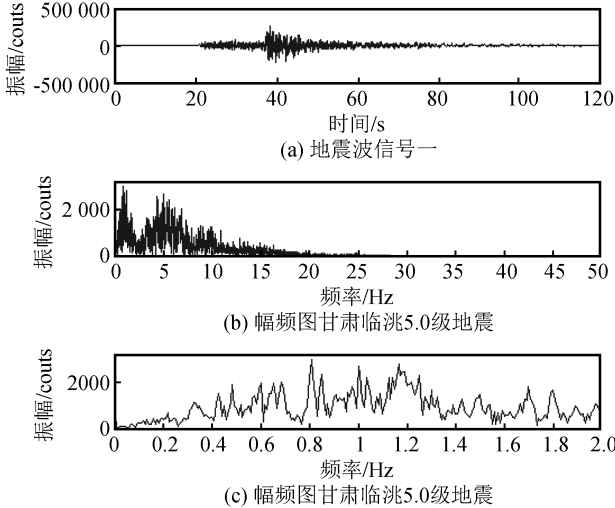


图 11 白银台记录 2015 年 4 月 15 日 15 时 8 分甘肃临洮 5.0 级地震频谱图

Fig.11 Frequency spectrum of Lintao, Gansu $M5.0$ earthquake recorded by Baiyin station at 15:08 on April 15, 2015

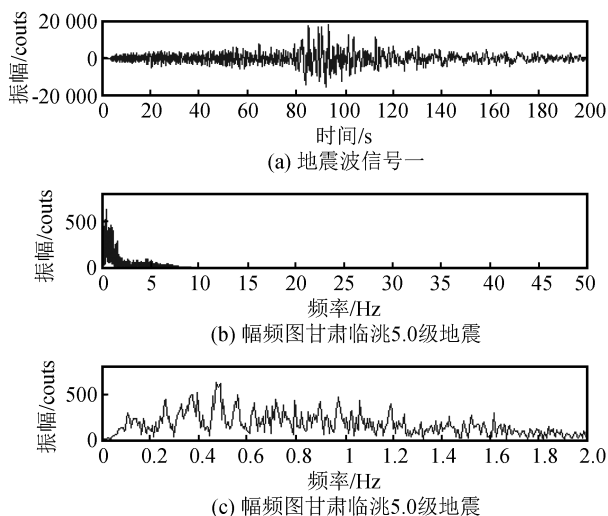


图 12 乌海台记录 2015 年 4 月 15 日 15 时 8 分
甘肃临洮 5.0 级地震频谱图

Fig.12 Frequency spectrum of Lintao, Gansu M5.0 earthquake
recorded by Wuhai station at 15:08 on April 15, 2015

3 结论

本文对 2015 年 4 月 15 日内蒙古阿拉善左旗 5.8 级地震周边的乌海台、石嘴山台、东升庙台记录的地震波形进行频谱跟踪分析,探讨了发震前 0~0.25 Hz 范围频谱图的形态特征及频率范围内的包络幅值极大值的异常持续特征。具体有如下结论:

(1) 2015 年 4 月 15 日阿左旗 5.8 级地震前乌海台、石嘴山台、东升庙台记录的地震波形均出现过明显的地震波频谱偏移现象,且低频信号的频谱特征有多种形式。

(2) 三个台站的幅值包络线极大值距震中由远及近表现出完全不同的变化形态,其中石嘴山台呈持续突跳变化,可能反映了地下岩石先产生破裂,但该破裂还无法形成应力积累,反而这种应力会影响乌海地震台所在区域地下岩石介质的应力积累,并大约在 2015 年 4 月 10 日开始产生微破裂,故包络幅值极大值跟踪结果在 10 日开始出现曲线波动状态,而不是石嘴山台间断突跳的形态;但在震中北侧,三个台站中距震中最远的东升庙台反而在研究时间段内持续着背景波动值状态水平变化,这可能是由于在乌海地震台地下有较大的凹凸体已将应力拦截并积累,所以表现出东升庙台的低频信号包络幅值极大值跟踪曲线基本没有异常变化。

(3) 异常信号的间断连续出现可能是地震微破裂、亚失稳态的前期表现,也可能是区域介质地下岩石破碎损伤、裂隙扩展成核的过程。该项指标在石嘴山台、乌海台、东升庙台表现出不同的形态,如果

测震台站足够密(至少 50 km)也许恰能对中强地震的震中进行判断,但是需要结果的实施产出。

总之,低频信号所蕴含的地下介质异常信息丰富,对低频异常信号的分析结果能够与数据采集一同达到实时状态将是下一步重要的研究工作。

参考文献(References)

- [1] 杨立明,王建军,冯建刚,等.汶川地震前地脉动低频波动现象及其应用的初步研究[J].中国地震,2009,25(4):356-366.
YANG Liming, WANG Jianjun, FENG Jiangang, et al. Preliminary Study and Application on the Tremors with Lower Frequency Recorded by Seismograph Before the Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Research in China, 2009, 25(4): 356-366.
- [2] 冯德益,盛国英.大震前短周期瑞利面波的前兆异常特性[J].地球物理学报,1983,26(3):288-294.
FENG Deyi, SHENG Guoying. Premonitory Abnormal Characteristics of Short-period Rayleigh Surface Wave before Strong Earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1983, 26(3): 288-294.
- [3] 冯德益,陈化然,丁伟国.大震前地震波频谱异常特征的研究[J].地震研究,1994,17(4):319-329.
FENG Deyi, CHEN Huaran, DING Weiguo. Study of Anomalous Characteristics of Seismic Wave Spectra Before Large Earthquakes[J]. Journal of Seismological Research, 1994, 17(4): 319-329.
- [4] 陈运泰,黄立人,林邦慧,等.用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式[J].地球物理学报,1979,22(3):201-217.
CHEN Yuntai, HUANG Liren, LIN Banghui, et al. A Dislocation Model of the Tangshan Earthquake of 1976 from the Inversion of Geodetic Data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1979, 22(3): 201-217.
- [5] 郭增建,秦保燕.地震成因和地震预报[M].北京:地震出版社,1991.
GUO Zengjian, QIN Baoyan. Earthquake Genesis and Earthquake Prediction[M]. Beijing: Seismological Press, 1991.
- [6] DIETERICH J H. Earthquake Nucleation on Faults with Rate- and State Dependent Strength[J]. Tectonophysics, 1992, 211(1-4): 115-134.
- [7] 杨立明,梅秀苹,姜佳佳.前震或广义前震识别的频谱偏移法及其应用研究[J].中国地震,2015,31(2):189-197.
YANG Liming, MEI Xiuping, JIANG Jiajia. Research on Spectrum Deviation Method of Identification of Foreshocks or Generalized Foreshocks and Its Application[J]. Earthquake Research in China, 2015, 31(2): 189-197.
- [8] 万永革.数字信号处理的 MATLAB 实现[M].北京:科学出版社,2007.
WAN Yongge. MATLAB Implementation in Digital Signal Processing[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [9] 杨立明,刘小凤,祁连山.地震带地震短期综合预报方案研究[J].西北地震学报,2006,28(3):193-203.
YANG Liming, LIU Xiaofeng. A Composite Scheme of Earthquake Short-term Prediction in Qilianshan Seismic Belt[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(3): 193-203.