

刘芳,祝意青,赵云锋.2016年门源6.4级地震前连续重力频率特征分析[J].地震工程学报,2019,41(2):469-475.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.469

LIU Fang, ZHU Yiqing, ZHAO Yunfeng. Frequency Characteristics of Continuous Gravity before the 2016 Menyuan M_s 6.4 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 469-475. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.469

2016年门源6.4级地震前连续重力频率特征分析

刘芳,祝意青,赵云锋

(中国地震局第二监测中心,陕西西安710054)

摘要:利用兰州地震台及高台地震台连续重力资料,分析研究了2016年1月21日门源地震前连续重力变化特征。对震前5 d及震后2 d秒采样数据使用快速傅里叶变换(FFT)变换方法进行功率谱分析,发现其频率幅度持续增大,临震前一天减小到正常值后发生地震,同时对震前6 d秒采样数据进行滤波处理,发现在临震前48 h观测到重力扰动信号,周期为4~8 s。门源地震前观测到的频率特征及重力扰动信号分析,可能反映了门源地震前孕震的一个整体过程,这为揭示门源地震产生机理提供了参考。

关键词:连续重力;FFT;重力扰动;门源地震

中图分类号:P315

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2019)02-0469-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.469

Frequency Characteristics of Continuous Gravity before the 2016 Menyuan M_s 6.4 Earthquake

LIU Fang, ZHU Yiqing, ZHAO Yunfeng

(The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Based on continuous gravity data at the Lanzhou and Gaotai seismic stations, variations in continuous gravity prior to the Menyuan earthquake that occurred on January 21, 2016 were analyzed. Fast Fourier transform was used to conduct a power spectral analysis on data sampled five days before and two days after the earthquake. The results showed that the frequency amplitude continuously increased, then decreased to a normal value within one day of the earthquake. Furthermore, data from the second sampling, i.e., data sampled 6 days before the earthquake, was filtered, and we found that the gravity disturbance signal was observed within the 48-h preceding the earthquake, with a period of 4–8 s. The frequency characteristics and gravity disturbance signal observed prior to the Menyuan earthquake may reflect a whole seismogenic process before the earthquake, providing a reference for revealing the mechanism of the Menyuan earthquake.

Keywords: continuous gravity; FFT; gravity disturbance; Menyuan earthquake

0 引言

连续重力观测能精确探测到地球内部物质迁移

引起的重力变化效应^[1-2]。国内外许多地球物理学

家多年来已经认识到地球内部的活动在地表重力观

测上的反应是不稳定的。目前还不清楚这种不稳定性的原因,且多数被当作观测不稳定或不可靠的资料,但是,每当高精度重力仪的观测资料出现异常时,总会引起科研人员的极大兴趣。陈益惠等对重力仪高频信息和地脉动的观测进行了研究,发现重力仪高频信息地脉动异常,震前 48 h 内,地脉动出现频率和幅度异常^[3]。近年来许多学者又在我国及周边发生的多次强震前发现了连续重力扰动信号,例如,2001 年昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震前扰动出现在震前 3.5 d^[4];2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前扰动从震前 2 d 开始增加^[5];2011 年日本 $M_s 9.0$ 地震前扰动出现在震前 3 d^[6]和 10 d^[7];2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震前扰动从震前 7 d^[8]开始出现;2014 年于田 $M_s 7.3$ 地震前扰动从震前 6 d^[9]出现。以上研究表明,秒、分钟采样的连续重力观测往往能够在大震前数天内记录到重力扰动现象,每次地震前扰动出现时间有所不同,但大都在震前 10 d 以内,这些在大地震前出现的观测资料异常现象,其可能的前兆信息逐渐成为人们关注和研究的热点。但到目前为止,这种扰动现象的特征尚无统一描述,其产生机理仍无定论,需要更多的震例来进行研究。

2016 年 1 月 21 日 1 时 13 分,我国青海省门源县(101.6°E , 37.4°N)发生了 6.4 级地震,震源深度 10 km,震中位于祁连山东中段冷龙岭断裂带附近^[10],随后还发生了一次 3.4 级余震,西宁、兰州等地地震感强烈。此次地震引发了国内外相关学者的广泛关注,流动重力对这次地震有较好的反映,并做了中短期预测,尤其是强震地点的判定^[11-12]。本文主要选取兰州地震台和高台地震台(以下简称兰州台和高台台)连续重力观测资料,使用快速傅里叶变换(FFT)变换方法进行谱分析,研究门源地震震前频率变化特征,同时利用滤波器进行滤波处理,分析门源 6.4 级地震前 6 d 的连续重力扰动信号,研究兰州台和高台台连续重力变化与门源 6.4 级地震的关系。

1 观测仪器

连续台站重力观测通过对重力加速度的连续观测得到重力潮汐数据,通过预处理可以得到潮汐变化和非潮汐变化,是中国大陆重力观测的重要组成,属于国际先进的综合观测手段,结合地球重力场与重力固体潮等地球物理学基础理论,可开展中国大陆重力固体潮与区域重力场变化规律的研究,尤其是针对地震孕育发生全过程的监测与探索。兰州台

和高台台重力仪均为为 PET 型相对重力仪,该重力仪是由美国 Micro-g LaCoste, Inc 公司生产的一种全自动型重力仪,可用于测量地球表面各点重力随时间的变化,该仪器分辨率为 $0.01 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,精度为 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ^[13]。相对重力仪安放在山洞内或者地下观测洞室,良好的观测环境保证了观测数据的可靠性,为重力数据的分析提供了保障。图 1 为震中与兰州台及高台台的分布图。

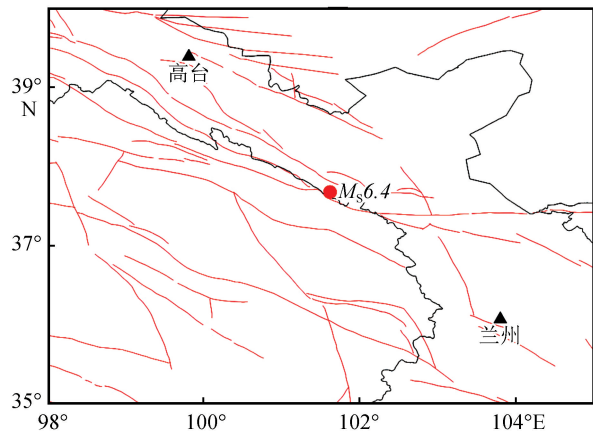


图 1 震中与台站分布图

Fig.1 Distribution of stations and the epicenter of Menyuan $M_s 6.4$ earthquake

2 门源地震前重力扰动分析

选取门源地震前 10 d 的连续重力观测秒采样数据进行滤波处理,兰州台和高台台在震前一周有连续、可靠的观测数据,采用 FFT 滤波器对原始秒值观测数据进行滤波,可以看出周期为 4~8 s 的震前重力扰动信号,如图 2 所示。

由图 2 可看出,在门源地震前 3 d 开始有重力增加现象,从 $\pm 20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 增加到 $\pm 50 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$,并出现明显的“纺锤型”重力扰动,兰州台和高台台出现时间基本一致。

3 门源地震前频率特征分析

连续重力观测可以得到三方面的信息,重力场缓慢变化,重力潮汐变化及叠加在潮汐曲线上的高频信息^[3]。由于高频信息幅度仅为潮汐量的 1%~5%,对震前及震后几天秒采样数据进行功率谱计算,从而对高频信息的频谱特征分布进行系统分析和研究。

本文针对 2016 年门源 6.4 级地震,选取了震前 5 d 及震后 2 d 兰州台和高台台连续重力观测资料,使用数据为秒采样原始观测数据,对秒采样数据采

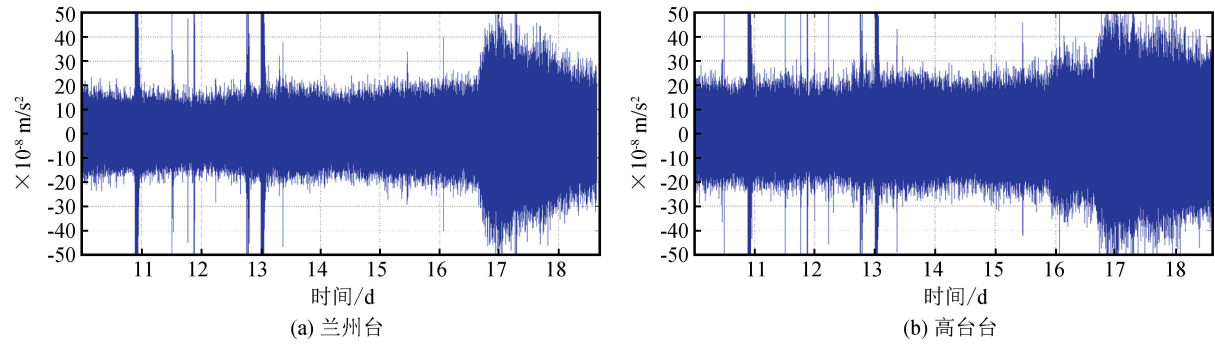


图 2 周期 4~8 s 的震前重力扰动信号

Fig.2 Gravity disturbance signals before Menyuan earthquake (period 4~8 s)

用快速傅里叶变换(FFT)进行功率谱计算,得到高频信息的主要频率成分及各频率成分振幅的大小。

图 3 采用兰州台连续重力观测站秒采样数据,通过快速傅里叶变换,进行频率分析。研究表明,门源地震前(16—20 日)经过快速傅里叶变换(FFT)后可以看出不同的频率分布,频率成分主要分布在 0.2 Hz 及 0.8 Hz 左右,在 16—17 日,振幅基本在 0.4 以下,从 18 日开始,持续到 19 日,振幅增大到 0.6 以上,而到 20 日振幅又减小到 0.4 左右,在 22 日(震后)在 0.05 Hz 和 0.95 Hz 处,有强峰值,是地震后余震的影响,23 日振幅又恢复至 0.4 附近,接近于正常状态频率。图 4 采用高台台连续重力观测站秒采样数据,通过快速傅里叶变换,进行频率分析。研究表明,门源地震前(16—20 日)经过快速傅里叶变换(FFT)后可以看出不同的频率分布,频率成分主要分布在 0.2 Hz 及 0.8 Hz 左右,在 16—17 日,振幅基本在 0.3 以下,从 18 日开始,振幅增大到 0.4,而到 19 日,振幅增大到 0.6,而到 20 日振幅又减小到 0.4 左右,在 22 日(震后)在 0.05 Hz 和 0.95 Hz 处,也出现强峰值,是地震后余震的影响,23 日振幅又恢复至 0.3 附近,接近于正常状态频率,与兰州台一致。

4 结论

根据已有震例研究表明,重力仪记录到的震前“重力扰动”现象,一般 7.0 级以上大震才有显著现象,而本次门源地震为 6.4 级,重力信号频率变化特征及扰动增强现象都十分显著。经查阅,门源地震前一周,中国近海无台风事件出现,排除了地面外界大规模自然环境的干扰,同时兰州台和高台台频率变化特征及重力扰动均呈现出较好的一致性。震前的频率异常可能是对震前岩石微破裂发射出来高频

信息的反映^[3]。在地震监测及预报中,基于倾斜仪、重力仪、应变仪、水位仪、长周期地震仪、海洋潮位仪、脉动仪、应力仪等多种仪器都曾记录到前驱波,但对前驱波产生机理的认识仍然不清楚。许多学者推测和认识到断层滑动引起的“慢地震”和台风等现象可以作为震前观测值异常的扰动源,也有许多学者研究表明,在大震发生前,震源及其附近介质壳层会产生许多微小错动或裂缝,大量的微错动或微裂缝进一步发展将导致大破裂大错动的产生。但当针对到某个地震时,不同学者给出的解释存在较大分歧。例如,2001 年的昆仑山口西 8.1 级大地震前地震台网观测到的前驱波,杨又陵等推测该现象是震前昆仑山断裂带临震预滑动引起的“慢地震”事件^[4]。而张雁滨等则认为该现象是由来自欧洲北部及欧亚大陆的强温带气旋引发^[14]。又如,胡小刚等认为 2008 年汶川 8.0 级地震前观测到的短临异常产生的可能原因是地震爆发前华南地块慢滑移摩擦产生的低频颤动^[15],而傅容珊等则认为该短临异常可能是西太平洋 02 号台风“威马逊”激发的脉动异常^[16]。而 2014 年的新疆于田 7.3 级地震发生前,西太平洋及中国近海并没有强台风事件,并在震前 6 d 和 2 d 形成两个条带^[17]。由此可见,我们对这种前驱波产生的机理仍然不清楚。人们之所以对昆仑山和汶川地震前观测到异常现象产生机理存在激烈争论,很大的一个客观原因在于这两次地震前均出现了强台风,从而增加了对该问题的研究难度。而门源地震发生前一周,中国近海没有发生强台风事件,从而排除了强台风的干扰,虽然位于不同地点的重力仪同时检测到了地震前的重力频率变化特征及扰动现象,但相对昆仑山口西与汶川大地震,门源地震震级较小,这给该现象成因的解释带来了困难。

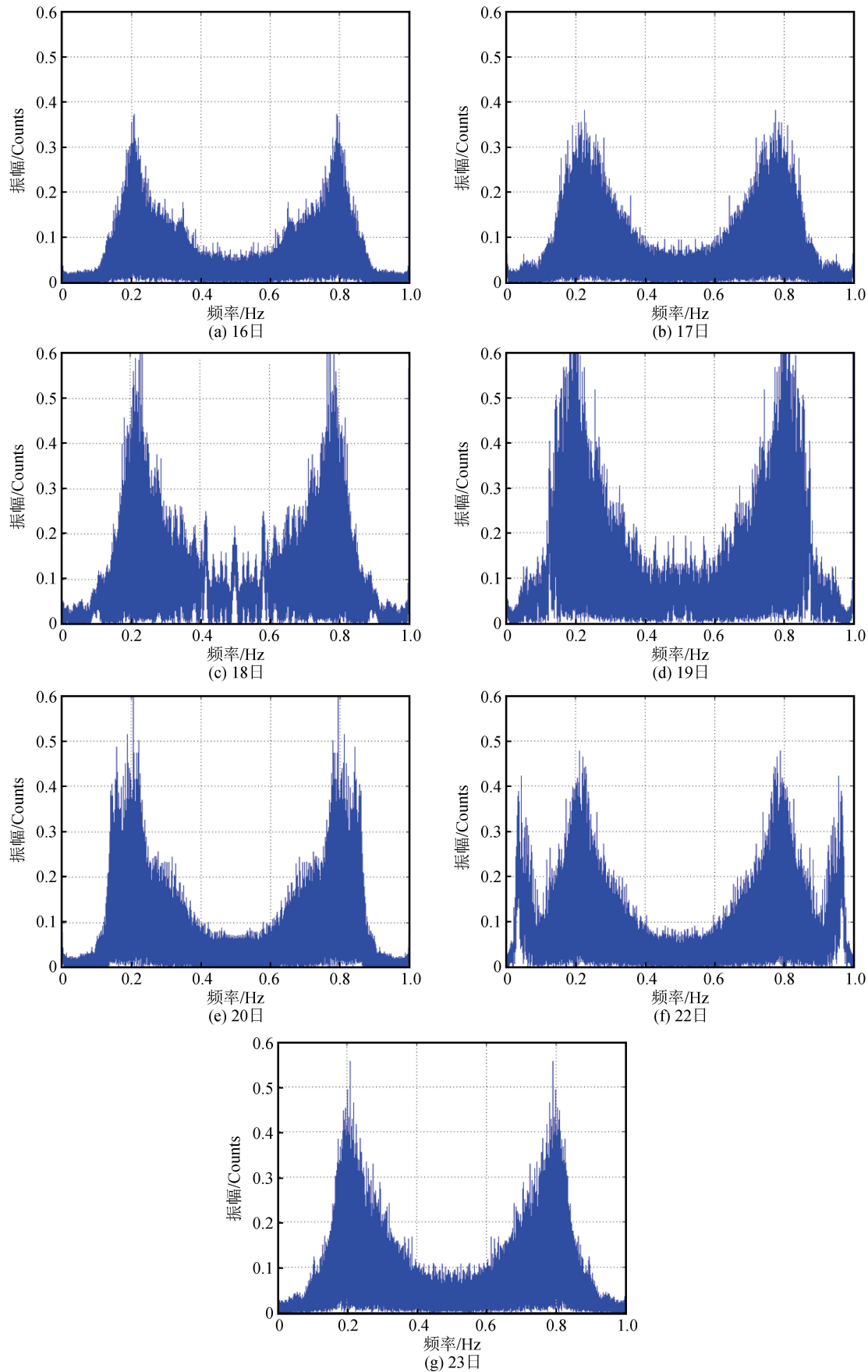


图 3 兰州台连续重力功率谱

Fig.3 Continuous gravity power spectrum of Lanzhou station

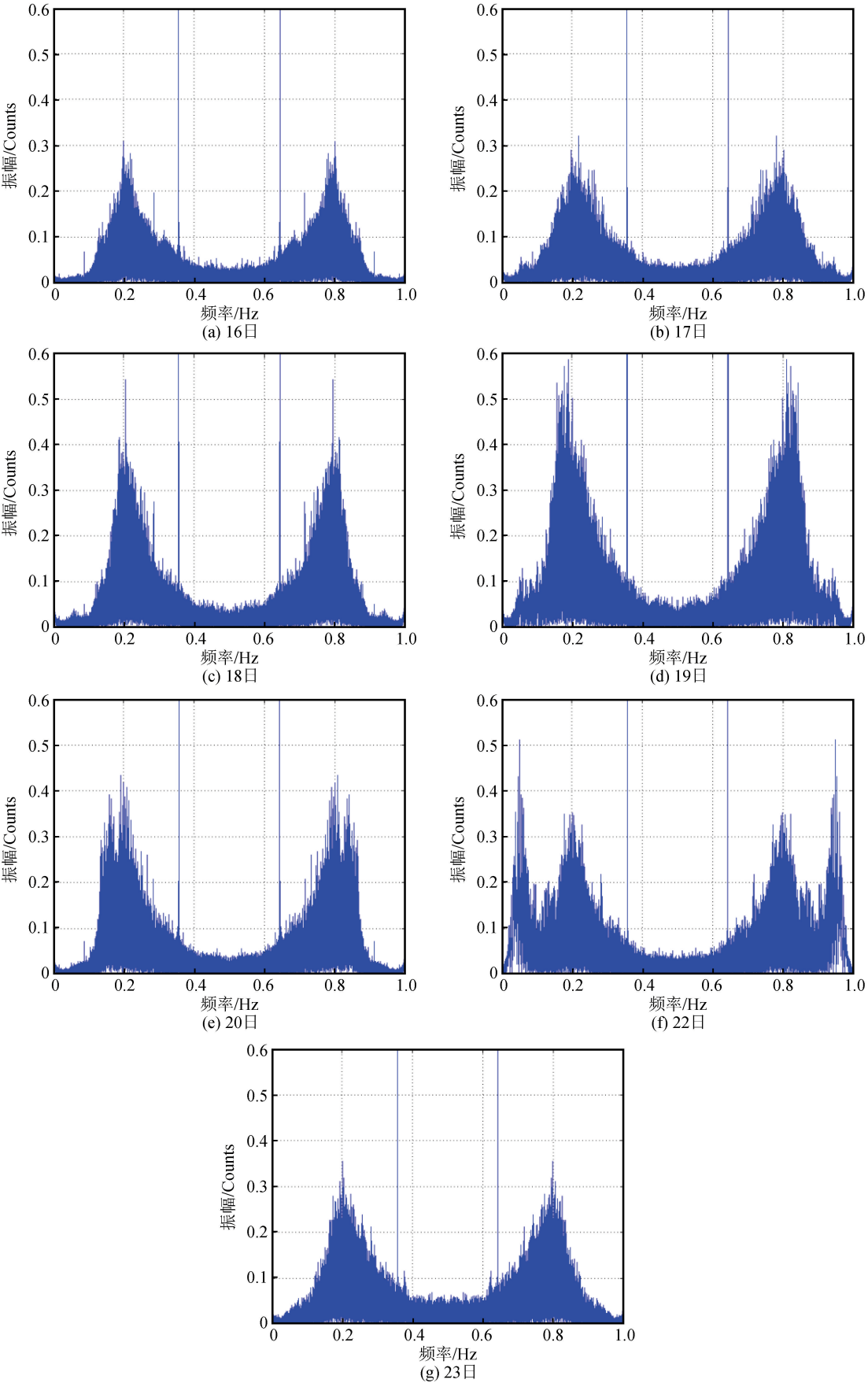


图 4 高台台连续重力功率谱

Fig.4 Continuous gravity power spectrum of Gaotai station

地震的孕育过程是地球内部物质调整的过程,表现为密度的变化。通常情况下,地表观测到的重力变化是由于地球内部密度变化或地壳垂直形变引起的,大地震发生前,断层未发生明显错动,地壳不会发生较大的垂直形变。所以震前重力扰动信号主要可能是由于地球内部密度变化引起的。因此,门源地震前观测到的重力扰动信号,可能反映了门源地震前孕震的一个整体过程,这为揭示门源地震产生机理提供了参考。对于重力干扰源的探讨,还需建立在多震例的基础之上,这仍是我们的一个努力方向。

致谢:感谢重力与形变数据共享分中心(www.dcgcd.ac.cn)提供的重力台站连续数字化记录数据。感谢匿名评审专家对本文给出了有益的建设性意见。

参考文献(References)

- [1] SUN W K, WANG Q, LI H, et al. Gravity and GPS Measurements Reveal Mass Loss beneath the Tibetan Plateau: Geodetic Evidence of Increasing Crustal Thickness[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(2): 206-218.
- [2] SUN W K, WANG Q, LI H, et al. A Reinvestigation of Crustal Thickness in the Tibetan Plateau Using Absolute Gravity, GPS and GRACE Data[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2011, 22(2): 109-119.
- [3] 陈益惠, 雷雨田, 朱涵云, 等. 重力仪高频信息和地脉动的观测研究[J]. *地球物理学报*, 1998, 31(5): 527-539.
CHEN Yihui, LEI Yutian, ZHU Hanyun, et al. Studies on High-Frequency Signals of Gravimeter and Microseisms[J]. *Chinese Journal of Geophysics* 1998, 31(5): 527-539.
- [4] 杨又陵, 赵根模, 高国英, 等. 2001年11月14日昆仑山口西 M_{8.1} 地震前的缓慢地震事件[J]. *国际地震动态*, 2003(9): 1-4.
YANG Youling, ZHAO Genmo, GAO Guoying, et al. The Slow Earthquake Event Occurring before West to Kunlun Mountain Pass Earthquake of M_{8.1} on November 14, 2001[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2003(9): 1-4.
- [5] 郝晓光, 胡小刚, 许厚泽, 等. 汶川大地震前的重力扰动[J]. *大地测量与地球动力学*, 2008, 28(3): 129-131.
HAO Xiaoguang, HU Xiaoguang, XU Houze, et al. Gravity Disturbance before Wenchuan M_{8.0} Earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(3): 129-131.
- [6] 韦进, 刘子维, 郝洪涛, 等. 日本 M_{9.0} 地震前的连续重力观测异常[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(2): 9-11, 16.
WEI Jin, LIU Ziwei, HAO Hongtao, et al. Gravity Anomalies in Before M_{9.0} Earthquake in Japan Observed by Continuous Relative Gravimeter in China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(2): 9-11, 16.
- [7] 刘子维, 韦进, 郝洪涛, 等. 日本 M_{9.0} 地震前的重力高频扰动[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(2): 4-8.
LIU Ziwei, WEI Jin, HAO Hongtao, et al. Pre-seismic Gravity disturbance of High frequency before M_{9.0} Earthquake in Japan[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(2): 4-8.
- [8] 王新胜, 贾路路, 韩宇飞, 等. 芦山地震前的重力扰动[J]. *地学前缘*, 2013, 20(6): 80-84.
WANG Xinsheng, JIA Lulu, HAN Yufei, et al. The Gravity Disturbance Signals before Lushan Earthquake[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(6): 80-84.
- [9] 王新胜, 贾路路, 王阅兵, 等. 于田 M_{7.3} 地震前的重力扰动[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(4): 60-63.
WANG Xinsheng, JIA Lulu, WANG Yuebin, et al. The Gravity Disturbance Signals before Yutian M_{7.3} Earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(4): 60-63.
- [10] 李晓峰. 2016年1月26日青海门源 M_{6.4} 地震震源机制解及发震构造初步探讨[J]. *地震工程学报*, 2017, 39(4): 0657-0661.
LI Xiaofeng. Preliminary Discussion on the Focal Mechanism Solutions and Seismogenic Structure of Menyuan M_{6.4} Earthquake on Jan 21, 2016 in Qinghai[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(4): 0657-0661.
- [11] 祝意青, 李铁明, 郝明, 等. 2016年青海门源 M_{6.4} 地震前重力变化[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(10): 3744-3752.
ZHU Yiqing, LI Tieming, HAO Ming, et al. Gravity Changes before the Menyuan, Qinghai M_{6.4} Earthquake of 2016[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(10): 3744-3752.
- [12] LIANG W F, ZHANG G Q, ZHU Y Q, et al. Gravity Variations before the Menyuan M_{6.4} Earthquake[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2016, 7(4): 223-229.
- [13] 李盛, 解晓静, 郭昱琴, 等. 琼中台连续重力观测记录地震特征分析[J]. *国际地震动态*, 2015, 12: 13-18, 24.
LI Sheng, XIE Xiaojing, GUO Yuqin, et al. The Signature of Seismic Events Recorded by the Continuous Gravimeter at Qiongzong Seismic Station[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2015(12): 13-18, 24.
- [14] 张雁滨, 蒋骏, 李才媛, 等. 昆仑山强震前颤波并非源自慢地震[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(3): 869-877.
ZHANG Yanbin, JIANG Jun, LI Caiyuan, et al. The Tremor Wave before the Kunlun Strong Earthquake is not Slow Earthquake Event[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(3): 869-877.
- [15] 胡小刚, 郝晓光. 汶川大地震宽带地震仪短临异常及成因初探[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1726-1734.
HU Xiaogang, HAO Xiaoguang. The Short-Term Anomalies Detected by Broadband Seismographs before the May 12 Wenchuan Earthquake, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(6): 1726-1734.
- [16] 傅容珊, 万柯松, 崇加军, 等. 地震前兆还是其他因素? ——与“汶川大地震宽带地震仪短临异常及成因初探”作者商榷[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 584-589.
FU Rongshan, WAN Kesong, CHONG Jiajun, et al. Earthquake Auspice or other Factor? -Discuss with Authors of the Paper “The Short-term Anomalies Detected by Broadband

Seismographs before the May 12 Wenchuan Earthquake, Sichuan, China”[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2):584-589.

[17] 王新胜,贾路路,王阅兵,等.于田 $M_s7.3$ 级地震前的重力扰动[J].大地测量与地球动力学,2014,34(4):60-63.

WANG Xinsheng, JIA Lulu, WANG Yuebin, et al. The Gravity Disturbance Signals before Yutian $M_s7.3$ Earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(4):60-63.

(上接第 411 页)

[7] 周辉,王文青,赵峰,等.基于 Android 的跨断层测距记簿程序的开发[J].现代电子技术,2017,40(1):17-19.

ZHOU Hui, WANG Wenqing, ZHAO Feng, et al. Development of Cross-Fault Range Finding Record Program Based on Android[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(1):17-19.

[8] 王子珺,赵伯明.高速铁路地震预警 P 波与 S 波复合自动快速识别的理论方法与应用[J].中国铁道科学,2016,37(4):121-127.

WANG Zijun, ZHAO Boming. Theatrical Method and Application of Auto-Rapid P and S Waves Recognition in Earthquake Early Warning for High Speed Railway[J]. China Railway Science, 2016, 37(4):121-127.

[9] 李拴虎,陈立峰,姚远,等.现代地震预警系统中的时间延迟效应分析[J].地震工程学报,2017,39(4):790-796.

LI Shuanhu, CHEN Lifeng, YAO Yuan, et al. Analysis of the Time Delay Effect in Modern Earthquake Early Warning Systems[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4):790-796.

[10] 张家田,赵红伟,严正国.一种姿态自校正无线网络地震传感器的设计[J].现代电子技术,2017,40(8):137-140.

ZHANG Jiatian, ZHAO Hongwei, YAN Zhengguo. Design of a Wireless Network Seismic Sensor with Posture Self-Correction[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(8):137-140.

[11] 杨庆刚,孙明,倪小东,等.超浅埋隧道下穿铁路引起变形敏感度数值分析[J].现代隧道技术,2017,54(3):112-119.

YANG Qinggang, SUN Ming, NI Xiaodong, et al. Numerical Analysis of the Sensitivity of Deformation Caused by a Super Shallow-Buried Tunnel Passing under an Existing Railway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(3):112-119.

[12] 于来波.高速铁路路基常用沉降变形监测方法探究[J].黑龙江科学,2016,7(19):72-73.

YU Laibo. Research on Common Settlement and Deformation Monitoring Method for High-Speed Railway Subgrade[J]. HEILONGJIANG SCIENCE, 2016, 7(19):72-73.

[13] 崔伟,吕高航,刘春阳.高速公路拓宽新路基差异沉降计算分析[J].科学技术与工程,2017,17(34):326-331

CUI Wei, LÜ Gaochang, LIU Chunyang. Computational Analysis of Differential Settlement on New Subgrade in Express Way Widening [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34):326-331.

[14] 李健,杨梅.高填路堤边坡失稳机理与处治措施分析[J].中国安全生产科学技术,2016,12(10):113-117.

LI Jian, YANG Mei. Analysis on Failure Mechanism and Treatment Measures of High-filling Embankment Slope[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(10):113-117.