

地脉动记录中台风扰动和低频波前兆信息的频带区别研究^{*}

尹亮¹, 杨立明², 庞成³

(1. 甘肃省地震局 张掖中心地震台, 甘肃 高台 734300; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000;
3. 张掖市气象局, 甘肃 张掖 734000)

摘要: 通过对宽频带数字资料在昆仑山口西 8.1 级、汶川 8.0 级、民乐—山丹 6.1 级地震前地脉动幅度和频谱变化的研究, 发现在震前几天地脉动有明显的扰动变化, 初步认为是大震的低频波前兆异常。而强台风对地脉动也有类似的扰动现象。从频率域对比研究后初步认为: 低频波前兆异常的可能频带范围是 0.1 ~ 0.14 Hz, 而强台风对地脉动的扰动频率范围是 0.15 ~ 0.30 Hz。区别对待这两个频带, 对跟踪强震临震异常有现实意义。

关键词: 地脉动; 强台风; 低频波; 频谱分析; 地震前兆异常

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)01-0066-07

0 引言

在一般情况下, 任何时刻在地球表面的任何地点都可以用高灵敏度的仪器观测到一种振幅很小的微弱振动, 其位移一般只有几微米到几十微米, 我们把这种人体难以察觉的微小振动称为地脉动(许建聪, 2003)。以往人们常将地脉动看作是一种干扰, 为了有效地记录地震信号, 总是设法避免或消除它, 或者作为无用信息不被关注。1971 年傅承义先生提出了“红肿”的设想(朱传镇等, 1977), 他认为较大地震孕育过程中, 地壳上层几百公里尺度内的介质, 都处于某种异常状态, 这种异常会影响脉动的传播。1964 年美国 Alaska 8.4 级地震前数天, 日本东京重力仪记录到了脉动变粗现象(Kizawa, 1972)。2001 年昆仑山口西 8.1 级地震前高台钻孔应变仪也记录到了类似现象(尹亮等, 2002)。杨又陵等(2003)研究发现新疆地震台网宽频带数字地震资料在 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震前出现低频波前兆异常; 尹亮(2010)研究发现高台, 成都, 安西、格尔木地震台宽频带地脉动资料在 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震前也记录到了类似的异常现象, 且与高台重力地脉动资料的扰动现象相对应(尹

亮, 2011)。杨立明(2009)通过对距离汶川地震余震区较近的地震台震前连续记录资料的傅里叶频谱特征分析, 发现震前临震阶段 0.1 ~ 0.3 Hz 频段的幅值出现快速、持续的增大现象; 该现象于 2008 年 7 ~ 9 月间发生的多次地震前在多个台站出现, 表现出现象的重现性、时间进程上的持续性和过程属性。然而, 大地震似乎总与台风相伴而来, 胡小刚和郝晓光(2009)通过分析地脉动信号的振幅变化与台风强度和行动路径的关系, 认为汶川大地震前及昆仑山大地震前的“震前扰动”可能与台风事件有关。因此, 从频率域进一步区别研究大震前低频波异常和台风引起的扰动异常将很有必要。

1 宽频带数字资料低频波短临前兆信息

1.1 数据处理方法

笔者将来自中国地震台网中心的连续波形数据(SEED 文件)经过相关软件及自编程序处理后转换成文本文件, 用于 MATLAB 频谱分析。地脉动波形资料是由数据采集器采集的离散数据, 采样频率 50 Hz, Niquist 频率 25 Hz, 其快速傅立叶变换(FFT)的计算公式(尹亮, 2010)为

^{*} 收稿日期: 2013-03-01.

基金项目: 中国地震局“三结合”课题(2013057)资助.

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

$$\text{其中, } a_0 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i, a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cos \frac{2\pi ki}{N};$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \sin \frac{2\pi ki}{N}, C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, k = 1,$$

2, ..., m。

其中, C_k 表示了 k 次谐波的振幅大小。本文主要研究振幅谱的变化, 频谱分析算法主要参考《数字信号处理的 MATLAB 实现》(万永革, 2007) 里的例程而编制。

由于高台和安西地震台受到爆破等高频干扰, 所以本文涉及的高频滤波均采用 Butterworth 低通数字滤

波器, 设计通带边界频率为 1.5 Hz, 通带波纹为 1 dB; 阻带边界频率为 2.5 Hz, 阻带衰减为 30 dB。

1.2 震例分析

2001 年 11 月 14 日 17 时 26 分 (北京时间) 昆仑山大断裂中段发生了 $M_s 8.1$ 地震, 高台、安西地震台的宽频带数字地震仪在震前 3.5 d 记录到显著的长周期异常波动信号 (图 1a、c)。自 11 月 10 日 20 时 (国际时间) 开始, 波动逐渐增强, 13 h 后 (11 日 9 时) 达到第一个峰值, 12 日 4 时达到第二个峰值, 这与固体潮日潮周期不一致, 整个异常于 12 日 10 时左右结束, 持续约 35 h, 13 日比较平静, 14 日发生 8.1 级地震。

对相应的波形数据进行 FFT 频谱分析 (图 1b、d), 振幅谱显示自 11 月 11 日开始, 高台和安西地

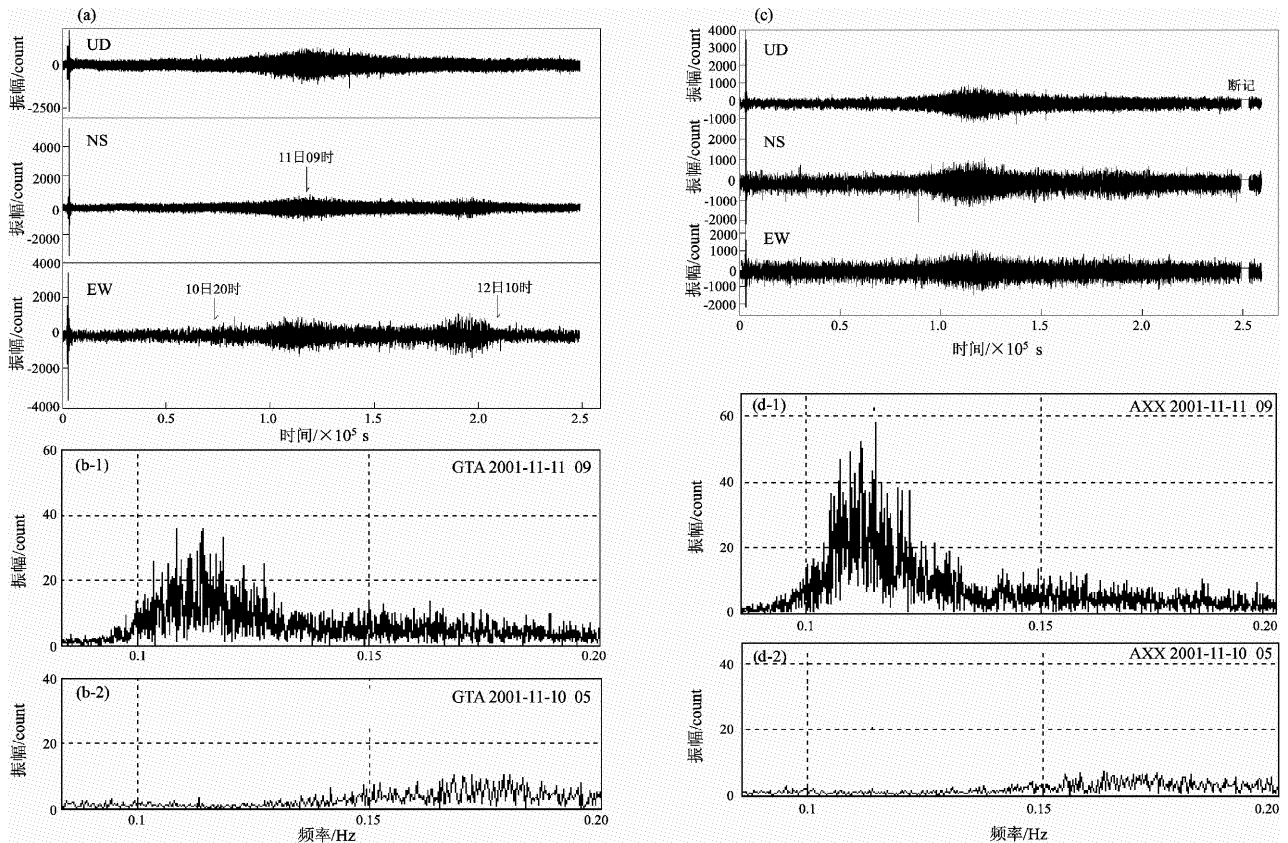


图 1 昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震前地脉动记录及频谱分析结果

(a) 高台 JCZ-1 地脉动前驱波记录; (b) 高台地脉动幅频图 (信号长度 3 600 s); (c) 安西 CTS-1 地脉动前驱波记录; (d) 安西地脉动幅频图 (信号长度 3 600 s)

Fig. 1 Microtremor records and their spectral analysis results before west to Kunlun Mountain Pass $M_s 8.1$ earthquake

(a) microtremor precursory wave recorded by JCZ-1 seismometer at Gaotai Station; (b) amplitude-frequency curve of microtremor at Gaotai Station (signal length is 3 600 s); (c) microtremor precursory wave recorded by CTS-1 seismometer at Anxi Station; (d) amplitude-frequency curve of microtremor at Anxi Station (signal length is 3 600 s)

震台记录到的低频异常波动优势频率在 $0.1 \sim 0.13$ Hz 之间, 即周期在 $7 \sim 10$ s 之间。两台频幅在一天之内分别增大了 34 count 和 57 count。NS 和 EW 方向的频谱分析与 UD 分向有相同的结果。

参考新疆宽频带数字地震台网的前驱波记录(杨又陵等, 2003), 发现高台台、安西台与新疆台网几乎是在同一时段记录到了相似的地脉动异常波形, 低频异常大约在震前 85 h 开始出现。

2001 年昆仑山口西 8.1 级地震后, 2008 年汶川 8.0 级地震的发生表明青藏高原的挤压应力集中区由北部转向东部, 应力沿龙门山北川—映秀断裂带北东方向约 300 km 长的地带释放。震前 1 天, 成都、兰州、高台地震台的宽频带地震仪都记录到了明显的低频 ($0.1 \sim 0.25$ Hz) 前兆信息。若以成都台 5 月 4 ~ 8 日的频谱形态(图 2a)为基础, 可以看出 5 月 11 日 $0.1 \sim 0.35$ Hz 的频幅突然

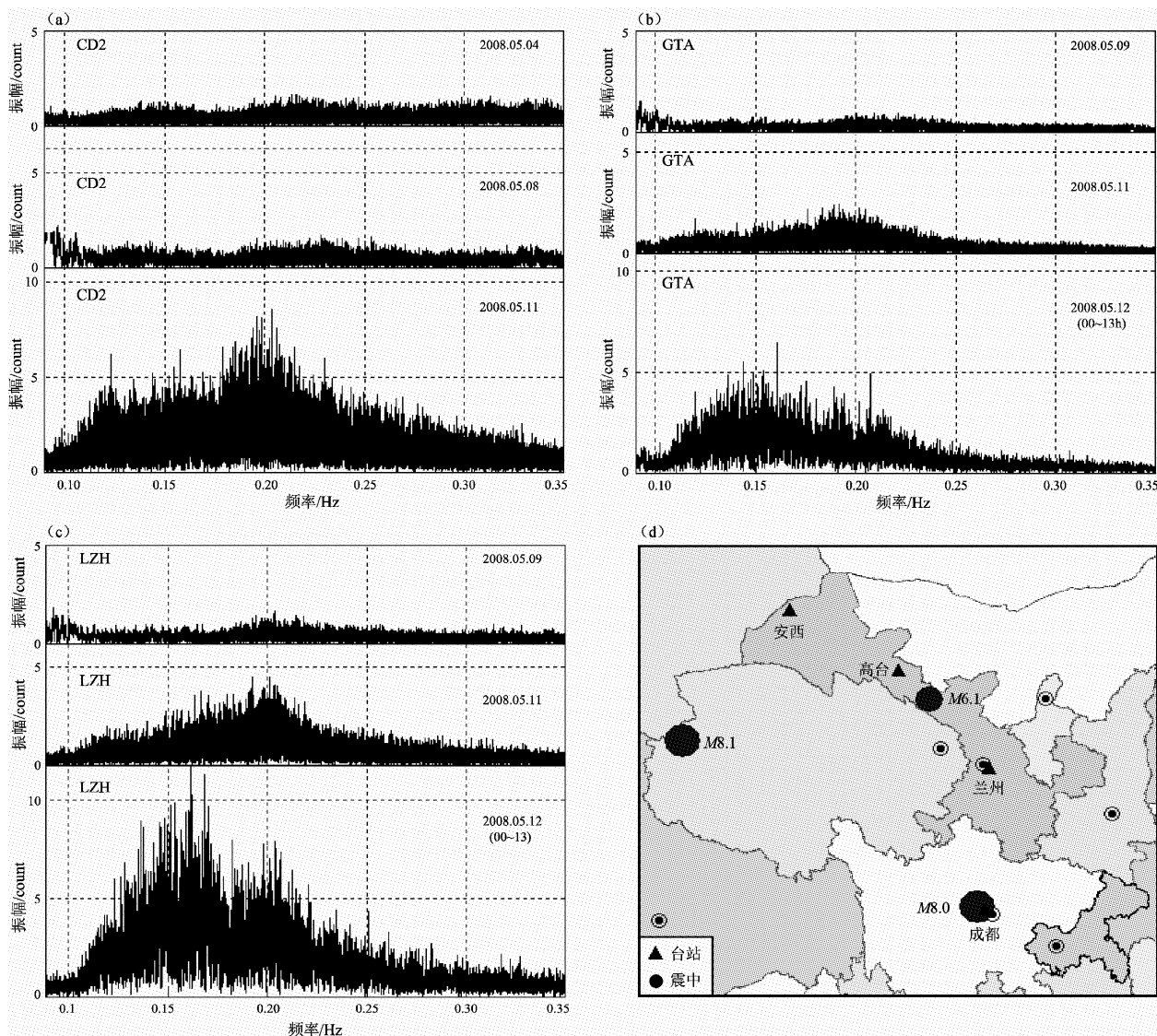


图 2 汶川 $M_s 8.0$ 地震前地脉动频谱分析及台站分布图

(a) 成都 JCZ-1 地脉动幅频图; (b) 高台 JCZ-1 地脉动幅频图;
(c) 兰州 CTS-1 地脉动幅频图; (d) 台站位置及震中分布图

Fig. 2 Spectral analysis of microtremor before Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake and the distribution of stations

(a) amplitude-frequency curve of microtremor recorded by JCZ-1 seismometer at Chengdu Station; (b) amplitude-frequency curve of microtremor recorded by JCZ-1 seismometer at Gaotai Station; (c) amplitude-frequency curve of microtremor recorded by CTS-1 seismometer at Lanzhou Station; (d) distribution of station location and epicenter

震台记录到的低频异常波动优势频率在 0.1 ~ 0.13 Hz 之间，即周期在 7 ~ 10 s 之间。两台频幅在一（图 2b）和兰州台（图 2c）也于 5 月 11 日起记录到了 0.1 ~ 0.25 Hz 的频幅变化。其中，上述 3 个台站在 0.1 ~ 0.13 Hz 的频幅增大明显，这与昆仑山口西 8.1 级地震前异常频带一致。

2 台风扰动

台风是海洋上空围绕低气压中心猛烈旋转的热带大气漩涡，台风蕴含着巨大的能量，其风力影响半径在几十公里至上百公里。台风靠近大陆海岸时，会引起巨浪冲击海岸和海底，产生大量的反射波浪。反射波浪与原生海浪的频率相近，传播方向相反，二者相互干涉后会产生很强的海洋驻波，在海底产生巨大的压力变化，在此压力的作用下，地壳会产生很强的脉动（Hasselmann, 1963）。由于中国大陆地壳较为完整，台风引发的地脉动所产生的地震波可在中国大陆传播很远，因而在中国内陆的地震仪上可经常观测到由近海台风引起的异常地脉动。这种通过孕震介质传播的地脉动的各种特征在孕震过程中可能出现一定的异常变化，而这些异常变化又可以作为地震预报的一类指标（陈化然等，1998）。

胡小刚和郝晓光（2009）通过对中国地震台网中心大量的地脉动记录进行频谱分析发现，两次大震前中国东部台站（如西安、琼中、昆明、恩施台等）记录到异常地脉动的数量更多，且 0.15 ~ 0.35 Hz 的频谱幅度优于西部台站。他们利

用中国地震局测震台网中的宽带地震仪的连续观测数据，用小波分析方法和傅里叶分析方法提取了一些台站在 Rammasun 台风事件发生期间所记录到的地脉动信号。通过分析地脉动信号的振幅变化与台风强度和行动路径的关系，初步认为汶川及昆仑山大地震（同期生成 LingLing 台风）的“震前扰动”可能与台风事件有关。强台风通过驻波理论可以影响中国内陆深处的地脉动变化，由于驻波触发了大陆地块的慢滑移，从而使得断层积累的应力得以释放而产生低频波的传播，这就是内陆地震仪记录到的台风震颤信号，这类信号的优势频率在 0.15 ~ 0.30 Hz（胡小刚，郝晓光，2009）。昆仑山 8.1 级地震与汶川 8.0 级地震分别对应了两次强台风，台风信息如表 1。

由于台风 LingLing 的行动路径距离中国大陆海岸较近，从地理位置上来说昆明台和恩施台记录到的昆仑山大地震的“台风扰动”应该比新疆地震台记录到的异常扰动大，但需要注意的是：与昆明台和恩施台记录到的异常地脉动相比，新疆境内地震台记录到的异常地脉动有明显的区别。图 3a 表明：在 8 ~ 16 s（0.06 ~ 0.125 Hz）的周期范围，乌鲁木齐地震台的异常扰动明显强于昆明台和恩施台的异常地脉动。进一步进行傅立叶频谱分析（图 3b），结果表明：昆明台和恩施台，异常地脉动的优势频率范围为 0.15 ~ 0.25 Hz（周期 4 ~ 6.25 s）；而乌鲁木齐台异常扰动的优势频率范围为 0.1 ~ 0.15 Hz（周期 6.7 ~ 10 s），且新疆的 5 个地震台（乌什、库尔勒、喀什、和田，乌鲁木齐台）异常扰动的优势频率范围一致（胡小刚，郝晓光，2009）。

表 1 昆仑山口西 8.1 级地震及汶川 8.0 级地震对应强台风信息
Fig. 1 The information of severe typhoon corresponding to west to Kunlun Mountain Pass M_s 8.1 and Wenchuan M_s 8.0 earthquakes

时间/年-月-日	地震	台风名称	台风过程	地扰动记录情况
2001-11-14	昆仑山口西 8.1 级	Lingling (玲玲)	11 月 7 ~ 13 日中国南海上空产生了一次强台风 LingLing，其行动路径距离中国大陆海岸较近。11 月 11 日当 LingLing 的风力达到 17 级时，此时台风中心距离中国大陆海岸线最近，距离海南岛约 560 km	该台风激发了强烈的异常地扰动，其产生的震动波能深入到中国大陆内地
2008-05-12	汶川 8.0 级	Rammasun (威马逊)	Rammasun 于 5 月 8 日在菲律宾以东的西北太平洋洋面生成，开始时为强热带风暴，风暴中心附近最大风力为 8 级（18 m/s）。随后，风暴中心向偏北方向移动，风力强度逐渐增强，形成强台风。在 5 月 11 日风力达到最大，为 14 级（45 m/s）。此后，Rammasun 的风力逐渐减弱，于 5 月 13 日变性为温带气旋	在汶川大地震发生前三天，扰动信号开始出现，并逐渐增大；扰动信号振幅的外包络线呈现明显的喇叭形状；扰动信号周主要集中在 2 ~ 8 s 范围

汶川大地震期间地脉动异常扰动持续时间较长,扰动一直与大地震的余震相伴。图4显示了昆明台在2008年5月1~27日记录到的地脉动信号。由图可见:5月13日后,汶川大地震和台风过程都已经完全结束,该台记录到的地脉动信号仍然保持较大的振幅。扰动从5月10日一直持续到22

日,这种情况比较罕见,很难完全用台风影响进行解释。另外,恩施、西安台也有类似的观测结果(胡小刚,郝晓光,2009)。从成都、兰州、高台3个台站相应时段的地脉动频谱分析结果看(尹亮,2010),在0.15~0.25 Hz频带内,各台都记录到异常变化,且3个台最大频谱幅度的大小关

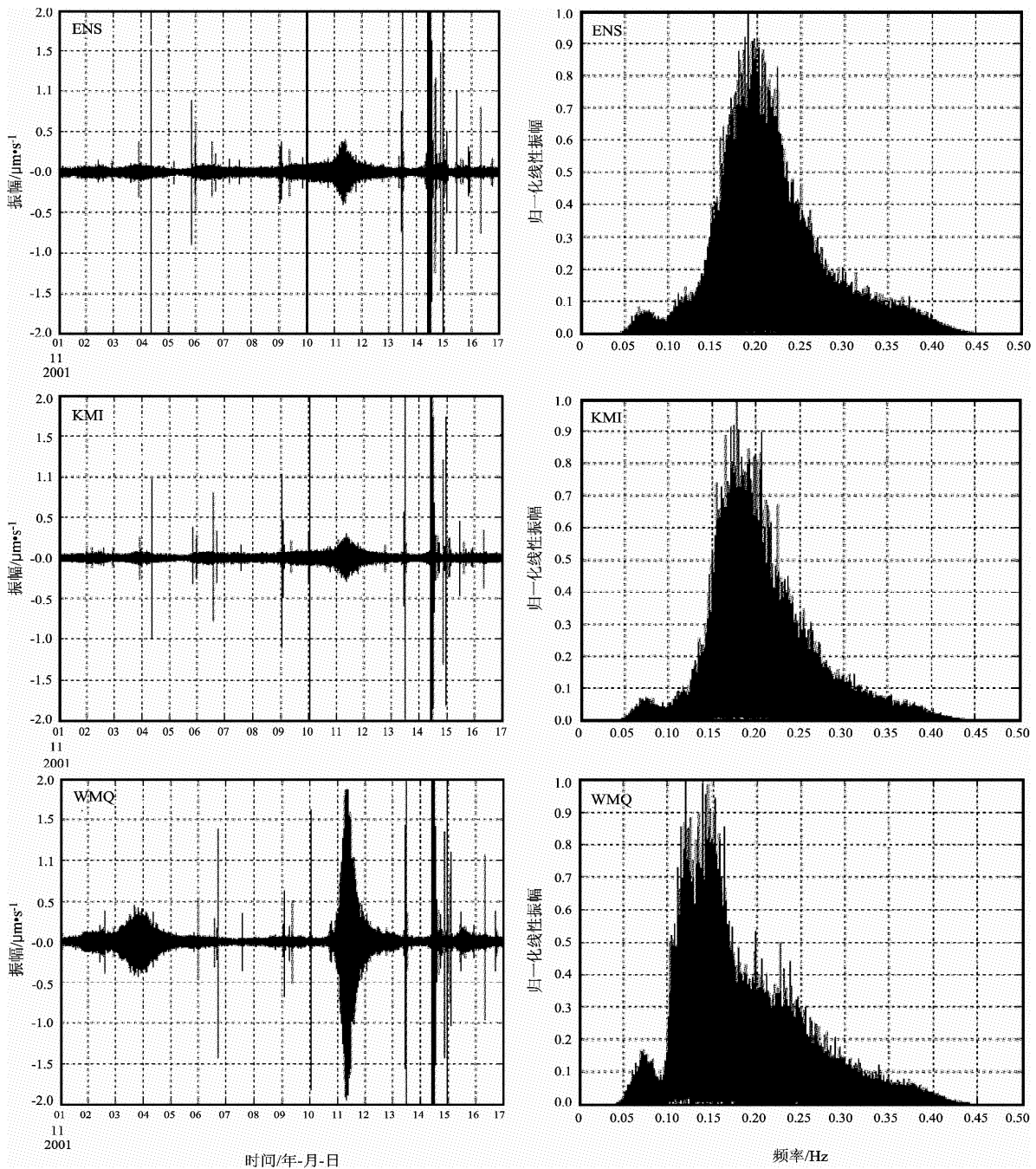


图3 LingLing 台风期间恩施、昆明、乌鲁木齐台地脉动异常记录(8~16 s) (a)
及频谱分析结果(2~16 s) (b)

Fig. 3 The microtremor anomalous recordings (8~16 s) (a) and their spectral analysis results (2~16 s) (b) observed at Enshi, Kunming, Urumqi Stations during the LingLing typhoon

系是：成都>兰州>高台；而各台距海岸的距离的关系是：高台>兰州>成都，正好相反。所以初步认为，虽然 Rammasun 台风的行动路径远离中国海岸，但也引起了内陆台站的地脉动异常，不过影响频率在0.15~0.25 Hz 频带内。汶川地震前地脉动异常源于地震孕震区的可能频带是0.1~0.14 Hz。

作者通过高台地震台和兰州地震台数字地震观测资料跟踪多次强台风（如2009年“莫拉克”和“芭玛”），结果一致，即强台风对地脉动扰动信息的优势频率在0.15~0.25 Hz 范围内。

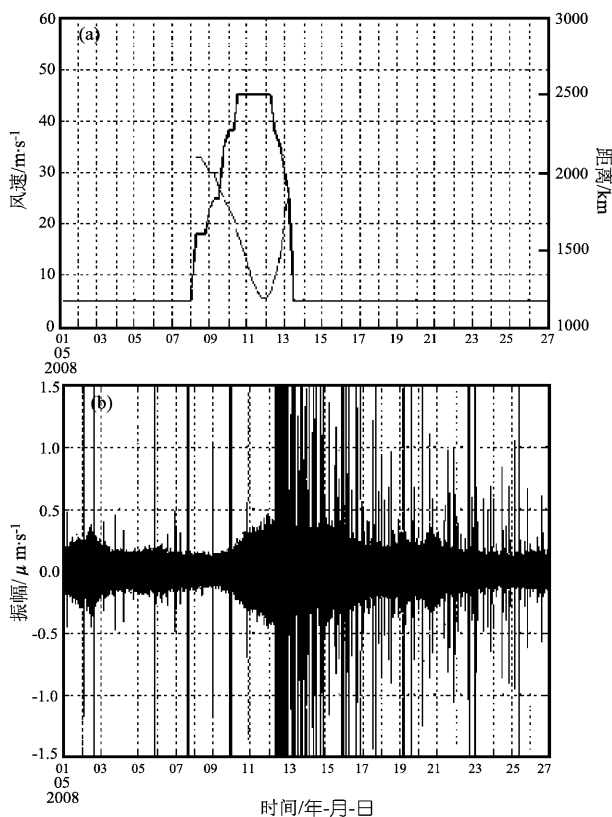


图4 Rammasun 台风过程 (a) 与昆明台地脉动信号 (b) 对比

Fig. 4 Comparison of process of Rammasun typhoon and microtremor signal at Kunming Station

3 无台风相伴的地脉动异常变化

在没有台风出现时，地震仪也可记录到异常扰动的情况。例如2003年6月7~11日恩施地震台记录到了一次明显的异常地脉动，但在这期间并未有任何台风事件发生，而在6月9日台湾宜兰发生了 $M_s6.3$ 地震（胡小刚，郝晓光，2009）。2003年10月25日20时，甘肃民乐、山丹发生

$M_s6.1$ 地震，从图5可看出，震前1天起，高台（GTA）和安西台（AXX）都记录到了0.1~0.14 Hz 的频幅增大变化，这与昆仑山口西8.1级及汶川8.0级地震前异常频带一致。

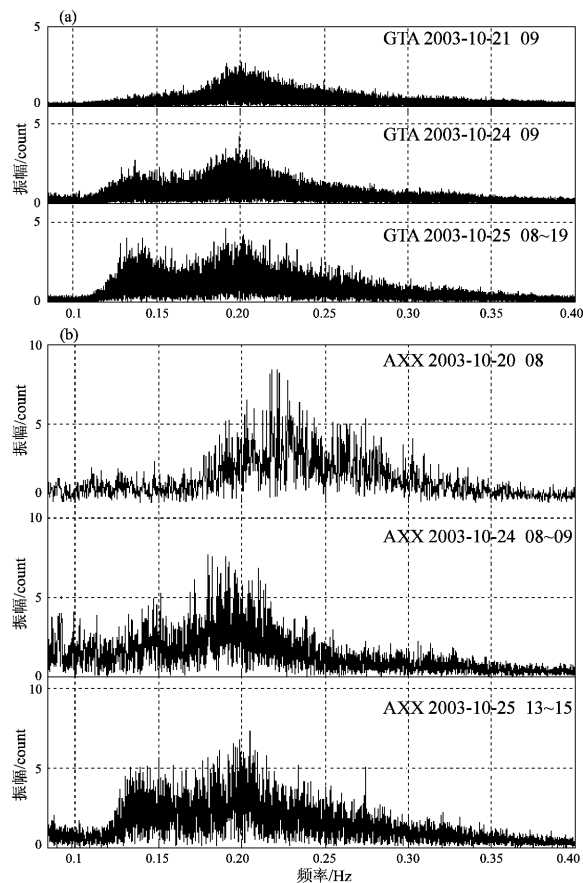


图5 民乐、山丹 $M_s6.1$ 地震前地脉动频谱分析图 (a) 高台 JCZ-1 地脉动幅频图；(b) 安西 CTS-1 地脉动幅频图

Fig. 5 Spectral analysis of microtremor before Minle-Shandan $M_s6.1$ earthquake

(a) amplitude-frequency curve of microtremor recorded by JCZ-1 seismometer at Gaotai Station; (b) amplitude-frequency curve of microtremor recorded by CTS-1 seismometer at Anxi Station

4 结论与讨论

(1) 实际资料研究表明，6级以上地震前，有些测震台站在震前几天可以记录到地脉动临震异常信息，该异常在数字地震观测曲线上的表现形式是震前几天脉动曲线变粗呈纺锤型增大变化。

(2) 距离中国大陆海岸较强的强台风也能引起内陆台站脉动曲线的纺锤型增大变化，尤其是台风

期间发生地震时,给识别地震前兆异常带来困难。

(3) 通过傅里叶频谱分析,初步认为在没有台风的情况下,大震前地脉动异常信息对应的频带是 0.10 ~ 0.15 Hz,称相应的异常信息为低频波前兆异常。强台风对应的异常信息优势频率在 0.15 ~ 0.30 Hz 范围内,称为台风扰动。虽然两个频带紧邻,但精细分析也可区分。

(4) 通过跟踪多次强台风,进一步验证了地脉动记录中台风扰动信息的优势频率为 0.15 ~ 0.30 Hz,所以进一步认为,大震前地脉动临震异常信息对应的频带可能是 0.10 ~ 0.15 Hz。

(5) 台站观测人员通过监控地脉动曲线的变粗和纺锤型增大变化可以为临震预报提供有用信息。另外,区别台风引起的脉动异常也可为进一步确认地震前兆信息提供参考。

参考文献:

Hasselmann K. A. . 1963. A statistical analysis of the generation of micro-seisms[J]. Rev. Geophys. ,1:177 - 209.

Kizawa T. 1972. The records of the gravitational instruments before and after large earthquake[J]. Overseas Earthquakes, (1):39 - 41.

陈化然,郭瑞芝,冯德益. 1998. 地脉动及特殊波形的频谱特性在地震预报中的应用[J]. 地震,18(1),75 - 82

胡小刚,郝晓光. 2009. 强台风对汶川大地震和昆仑山大地震“震前扰动”影响的分析[J]. 地球物理学报,52(5):1363 - 1375.

万永革. 2007. 数字信号处理的 MATLAB 实现[M]. 北京:科学出版社.

许建聪. 2003. 地脉动频谱结构与场地土动力响应研究[D]. 福州:福州大学.

杨立明. 2009. 汶川地震临震地脉动记录特殊频率波动现象及其重现性初步研究[J]. 国际地震动态,(1):14 - 19.

杨又陵,赵根模,高国英. 2003. 昆仑山 8.1 地震前的缓慢地震事件[J]. 国际地震动态,(9):1 - 4.

尹亮,李兴坚,陈兰新,等. 2002. 昆仑山口西 Ms8.1 地震前高台钻孔应变异常[J]. 大地测量与地球动力学,22(4):89 - 91.

尹亮. 2010. 宽频带地脉动频谱异常震例分析及重力观测的验证研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所.

尹亮. 2011. 大震前重力地脉动异常分析[J]. 地震研究,34(4):442 - 446.

朱传镇,房明山,安镇文,等. 1977. 脉动与地震关系的初步探讨[J]. 地球物理学报,20(1),20 - 32.

Research on Frequency Difference between Typhoon Disturbance and Precursor Information of Low Frequency Wave in Microtremor Recordings

YIN Liang¹, YANG Li-ming², PANG Cheng³

(1. Zhangye Central Seismic Station, Earthquake Administration of GanSu Province, Gaotai 734300, Gansu, China)

(2. Earthquake Administration of GanSu Province, Lanzhou 730000, GanSu, China)

(3. Zhangye Meteorological Bureau, Zhangye 34000, Gansu, China)

Abstract

Through studying the amplitude and spectral change of microtremor before the west to Kunlun Mountain Pass M_s 8.1 earthquake, Wenchuan M_s 8.0 earthquake and Minle-Shandan M_s 6.1 earthquake based on the broadband digital data, we found that the microtremor disturbance changed obviously in a few days before the earthquake, which might be the low-frequency wave precursory anomalies before the large earthquake, and the strong typhoon has the similar disturbance to the microtremor. From the comparison of frequency domain of typhoon disturbance and precursor information of low frequency wave, we obtained that the frequency range of low-frequency wave precursor anomaly is 0.1 ~ 0.14 Hz, and the disturbance frequency range of strong typhoon on the microtremor is 0.15 ~ 0.30 Hz. To distinguish these two bands has the realistic significance to tracking the impending earthquake anomaly of the strong earthquake.

Key words: microtremor; strong typhoon; low-frequency wave; spectrum analysis; earthquake precursor anomaly