

宽频带数字资料低频波在大震前的短临前兆信息研究

尹 亮¹, 杨立明²

(1. 甘肃省地震局高台地震台, 甘肃 高台 734300; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:通过对高台、兰州、成都、安西地震台宽频带数字资料在 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震, 2008 年汶川 8.0 级地震以及 2003 年山丹、民乐 6.1 级地震前低频波频谱变化的研究, 总结了数字资料在频率域上的短临前兆异常特征, 发现 0.1~0.14 Hz 频幅在震前几天成逐渐增强的趋势。并结合震源区构造特征对前兆机理进行了探讨。认为低频波的产生与静地震和慢地震有关。

关键词: 宽频带; 数字资料; 脉动; 低频波; 静地震; 慢地震; 短临前兆

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)01-0082-06

Research on Low-frequency Wave of the Broadband Digital Data and the Information of Short-imminent Precursor before Strong Earthquakes

YIN Liang¹, YANG Li-ming²

(1. Gaotai Seismic Station, Earthquake Administration of Gansu Province, Gansu Gaotai 734300, China;

2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Through the studying on the broadband digital seismic data from Gaotai, Lanzhou, Chengdu and Anxi seismic stations, the spectral variation of low-frequency wave before the west to Kunlun Mountain Pass earthquake with $M_s = 8.1$ in 2001, Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake in 2008 and Minle-Shandan $M_s 6.1$ earthquake in 2003, is analyzed, and the characteristics of short-impending term precursory anomaly in the data is summarized in frequency domain. It is found that the amplitude of frequency in 0.1~0.14 Hz increases gradually in a few days before strong earthquake. The mechanism of the anomaly is discussed also combined with tectonic features of the earthquake source area and the low-frequency wave is considered has relation with quiet-earthquake and slow-earthquake.

Key words: Broad band; Digital data; Microtremor; Low-frequency wave; Quiet-earthquake; Slow-earthquake; Short and imminent precursor

0 引言

中国国家数字地震台网所使用的地震计主要是 JCZ-1 超宽频带地震计和 CTS-1 甚宽频带地震计, 具有宽频带、高灵敏度、低噪声及长期稳定性等特点。其中 JCZ-1 它的频带是 DC-20 Hz, 可以观测从短周期(周期数量级 1 s)地震波至固体潮(周期数量级 10^4 s)的宽广频带; 它有两个通道输出, 其中一个输出与地动速度成正比(VBB 通道)。从“九五”数字化建设至今“十五”数字化改造完成, 已积累

了近十年的数字化地脉动波形资料, 期间国内发生过两次 8 级及以上地震。

目前对地脉动的频谱分析是大家关注的一个问题, 低频波的产生和传播与地应力的变化与调整有关, 蕴涵着断层主破裂面不均匀介质的结构、应力状态、介质力学参数量及其动力学响应的物理学信息, 是揭示断层现今运动力学过程和地震孕育过程以及地震前兆信息的资源, 具有重要的研究和开发价值。

收稿日期: 2009-02-18

基金项目: 中国地震局“三结合”课题(677); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2010015

作者简介: 尹 亮(1970-), 男(汉族), 甘肃山丹人, 高级工程师, 在读硕士研究生, 主要从事台站管理与资料分析研究工作。

本文选取了高台、兰州、成都、安西 4 个地震台的宽频带数字地震仪资料进行频谱分析,研究其在几次大地震前的短临前兆异常。并对前兆机理进行探讨。

1 频谱分析方法

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^[1]为

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

其中,

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

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

$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$, 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》^[1]里的例程而编制。

由于高台和安西主要有爆破等高频干扰, 所以本文涉及的高频滤波器均采用 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 1dB; 阻带边界频率为 2.5 Hz, 阻带衰减为 30 dB。

为了研究震前数字波形的频谱异常变化, 首先要对正常地脉动进行频谱分析。选取高台 (GTA)、兰州 (LZH)、成都 (CD2)、安西 (AXX) 地震台 2008 年 5 月 4 日的地脉动资料采用快速 Fourier 变换 (FFT) 进行频谱分析 (信号长度 $24 \times 3\ 600$ s, 无滤波), 可以看出地脉动信号的优势频率在 0~0.4 Hz, 其中 0.1~0.4 Hz 频谱幅度都小于 2.5 count。

2 震例分析

本文选取的 4 个台的低频波在 2001 年昆仑山口西 8.1 级大震、2008 年汶川 8.0 级大震以及 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震前都存在明显的短临前兆异常。图 1 为台站位置和震中分布。

2.1 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震

2001 年 11 月 14 日昆仑山大断裂中段发生了 $M_s 8.1$ 地震。该断裂是青藏高原北缘地震带的一部分, 总体走向北西西, 地震时地表破裂带长达 350

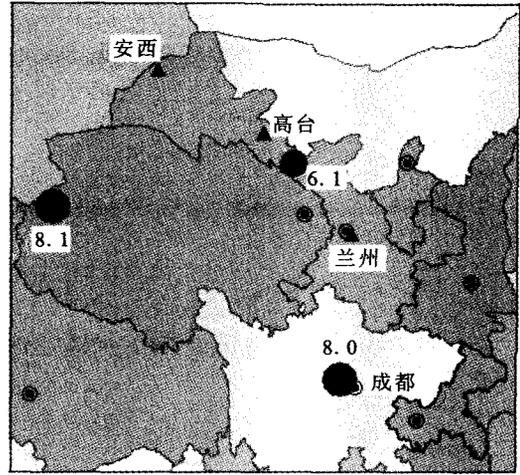


图 1 台站位置及震中分布图

Fig. 1 Distribution of the selected stations and the epicenters of earthquakes.

km 左右。从正常地震的频带看该地震没有前震, 但是高台、安西的宽频带数字地震台在震前 3.5 天普遍记录到显著的长周期异常波动信号 (图 2(a)、(c))。自 11 月 10 日 20 时 (国际时) 开始波动逐渐增强, 13 小时后 (11 日 09 时) 达到第一个峰值, 12 日 04 点达到第二个峰值, 这与固体潮日潮周期不相吻合, 且在 11 月 10 日 VBB 波形上几乎看不到潮汐变化。整个异常于 12 日 10 时左右结束, 持续约 35 小时。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 2(b)、(d)), 振幅谱显示自 11 月 11 日开始高台和安西的低频异常波动优势频率在 0.1 Hz~0.13 Hz, 即周期在 7 s 到 10 s。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 方向有相同的结果。

另外参考新疆宽频带数字地震台网的前驱波记录^[2], 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 小时开始出现。

2.2 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 地震

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分汶川发生了 $M_s 8.0$ 地震。2001 年 11 月昆仑山 8.1 级地震后, 汶川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 NE 方向约 300 km 长的地带释放。震前 1 天, 成都、兰州、高台的宽频带地震仪都记录到了明显的低频 (0.1~0.25 Hz) 前兆信息。

若以成都台 5 月 4 日至 8 日的频谱形态 (图 3

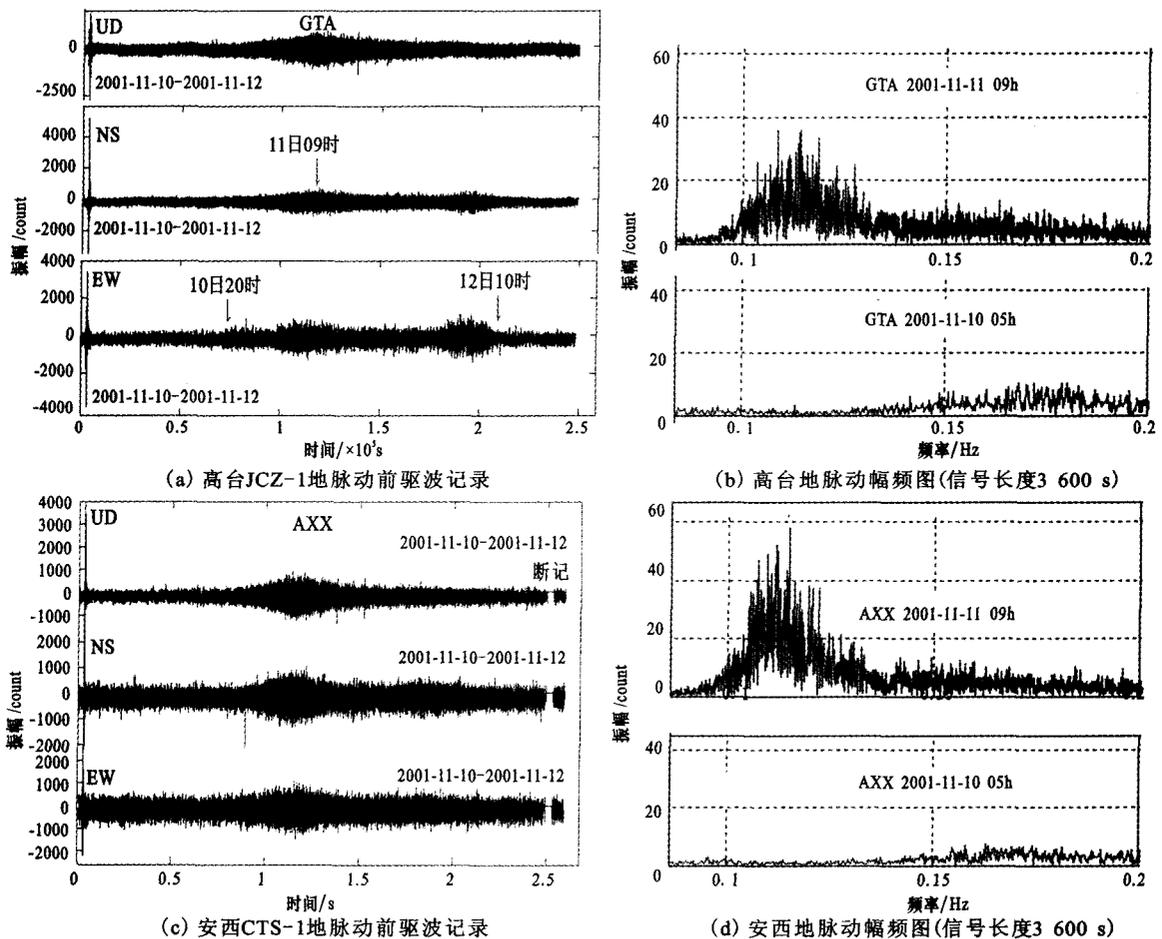


图2 昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震前高台、安西台的地脉动及频谱分析图

Fig. 2 Microtremor records and the results of spectral analysis recorded at Gaotao and Anxi stations before the west to Kunlun Mountain Pass earthquake with $M_s 8.1$.

(a)为基础,可以看出5月11日0.1~0.35 Hz的频幅突然增大,最大频幅变化幅度达7 count。高台(图3(b))和兰州(图3(c))也于5月11日起记录到了0.1~0.25 Hz的频幅变化。

另外,从成都台5月4日起的地脉动波形可看出规则的脉冲异常(图4),尤其5月11日脉冲增多,异常显著。频谱分析结果显示0.000 2~0.003 Hz的频谱幅度有逐渐增大的趋势。该频带在地球自由振荡到固体潮的频带(周期在 $10^3 \sim 10^4$ 数量级之内)范围内,兰州和高台却没有记录到此现象。由于成都台距离汶川地震震中最近,因此0.000 2~0.003 Hz的频谱幅度增大变化可能是判定震中在成都附近的参考判据之一。

2.3 2003年10月25日民乐—山丹 $M_s 6.1$ 地震

2003年10月25日20时甘肃民乐、山丹之间发生 $M_s 6.1$ 地震,震中位于 NWW 方向的祁连山北缘断裂与昌马—俄博断裂之间。从图5可看出,震

前5天起高台和安西台都记录到了0.1~0.25 Hz的频幅异常变化,同样都是震前一天开始0.11~0.15 Hz的频率成份明显增强。

2.4 低频波前兆信息特征

昆仑山口西8.1级地震发生在青藏块体内;山丹、民乐6.1级地震发生在块体东北缘;汶川8.0级地震发生在块体东缘。高台、安西、成都、兰州4个台都位于青藏高原东北缘到东缘一线。以上三次地震前4个台的低频波记录表现出共同的特征:即震前几天至临震各台都记录到0.1~0.14 Hz的低频前兆信息,且频谱分析结果显示越临近地震发生,异常频谱幅度越大,呈加速增强趋势(表1)。

3 前兆机理探讨

2006年许绍燮^[3]报道了宽频带地震仪记录到的大尺度地层运动及强震有关的震颤事件;Ito等^[4]对俯冲带观测到的震颤信号的研究表明,震颤信号

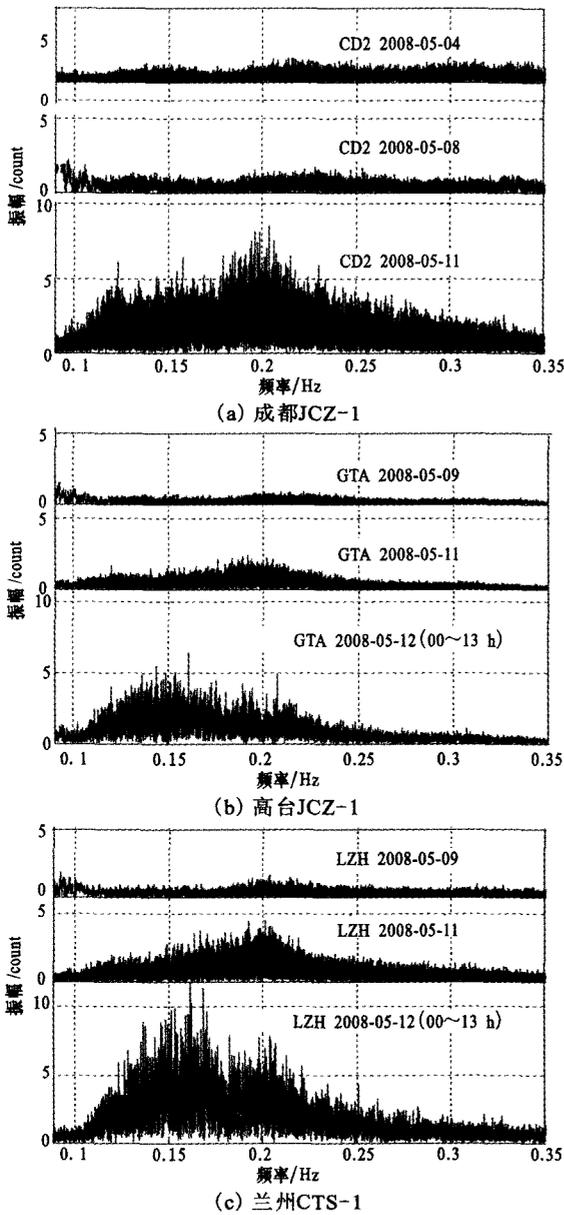


图 3 汶川 $M_s 8.0$ 地震前成都、高台、兰州台的地脉动频谱分析

Fig. 3 The results of spectral analysis on the microtremor records from Chengdu, Gaotao and Lanzhou stations before Wenchuan earthquake with $M_s 8.0$.

与这些地区的慢地震和构造运动是相关的。从震例情况看,杨立明^[5]研究发现 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震及 5.0 级以上余震前甘肃地震台网都记录到了了相似的地脉动特殊频率波动异常现象,且表现出异常现象的重现性。张雁冰^[6]等研究认为震颤信号一部分与台风有关,另一部分原因不明。本文研究的震中及台站在中国西部,距离海岸遥远,且发震前至少高台没有大范围特殊天气变化记录(局张掖气象局资料)。这表明本文研究的地脉动异常

很可能源自震中区。

表 1 震前异常频带频幅统计(0.1~0.14 Hz)

时间	地震地点	震级/M	台站	震中距 Δ/km	异常时间	最大幅度/count		
2001-11-14	昆仑山口西	8.1	高台	987	-4 d	2		
			高台	987	-3 d	36		
			安西	779	-4 d	1		
			安西	779	-3 d	58		
2008-05-12	汶川	8.0	兰州	500	-8d	1.5		
					-4d	1.5		
					-1d	6.2		
					-3 d	1		
					-1 d	3		
2003-10-25	民乐-山丹	6.1	高台	155	-14 h	10		
					-3 d	0.5		
					-1 d	1.5		
					-14 h	5.5		
					高台	155	-4 d	1
					高台	155	-1 d	3
2008-05-12	汶川	8.0	兰州	500	-12 h	4		
					-5 d	3		
					-1 d	5		
					-7 h	5.5		

地震发生时震源仅释放地震孕育过程中所积累的部分能量,很多能量是在地震前以各种方式缓慢释放的,低频波可能就是这些方式中的一种。近年来提出了多种有关低频波成因的理论模型,包括断层预扩展理论、流变介质的亚临界扩展、静地震与慢地震假说、微破裂集结—广义成核理论、滑动弱化导致失稳—狭义成核理论等。笔者倾向于静地震与慢地震理论。静地震是指发生了缓慢的位错(地震矩不为零)、却几乎没有地震波辐射的“地震”。静地震与蠕变现象相似,在时间上比蠕变快得多,在空间上比蠕变范围小,而更象一次“地震”。Dragon 等^[7]研究认为:“静地震”是一种缓慢震源过程,属于无震断层活动与脆性破裂之间的现象,运动的时间尺度比“正常”地震要长得得多,可以辐射较长周期弹性波或长周期成份异常大的地震,与“低频地震”有密切关系。“静地震”辐射效率低,但大于零;传播速度低,量级 $V \approx 10$ m/s,远小于剪切波速度,断层滑动速率量级 1 cm/h^[8]。

许永绍等人^[9]通过岩石的高温高压破裂试验与有机玻璃的试验对慢地震机制进行了研究,认为慢地震是临界或亚临近破裂或预先滑动所致,是低频应变波动,是材料屈服,弱化或塑性变化的必然结果。昆仑山口西地震破裂方向为 NWW,高台、安西位于祁连山断裂带及延伸带上,走向 NWW,与昆仑山口西地震破裂方向大致平行;汶川地震破裂方向为 NE,与兰州和高台的连线近于垂直。如果说慢

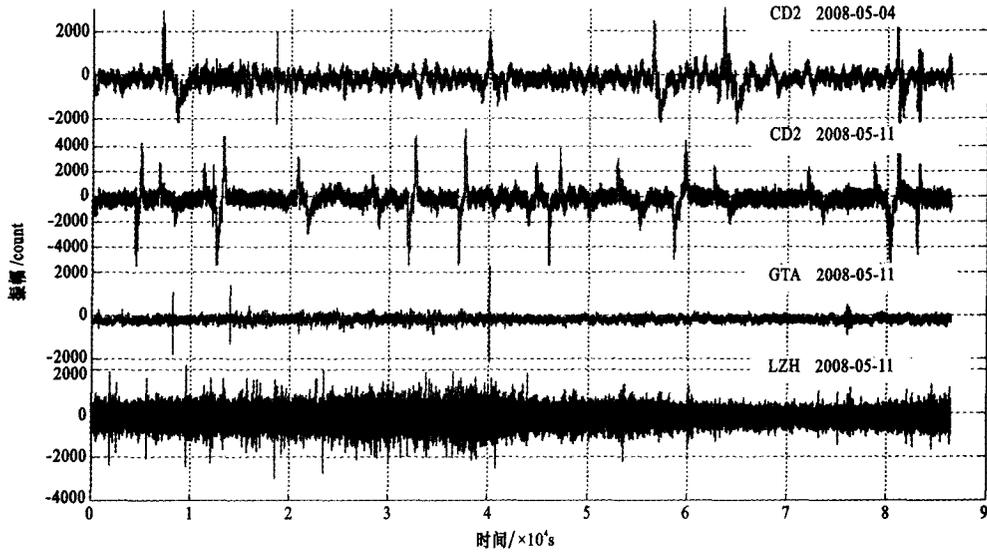


图 4 汶川 Ms8.0 级地震前成都台地脉动记录

Fig. 4 Microtremor records at Chengdu station before Wenchuan earthquake Ms8.0.

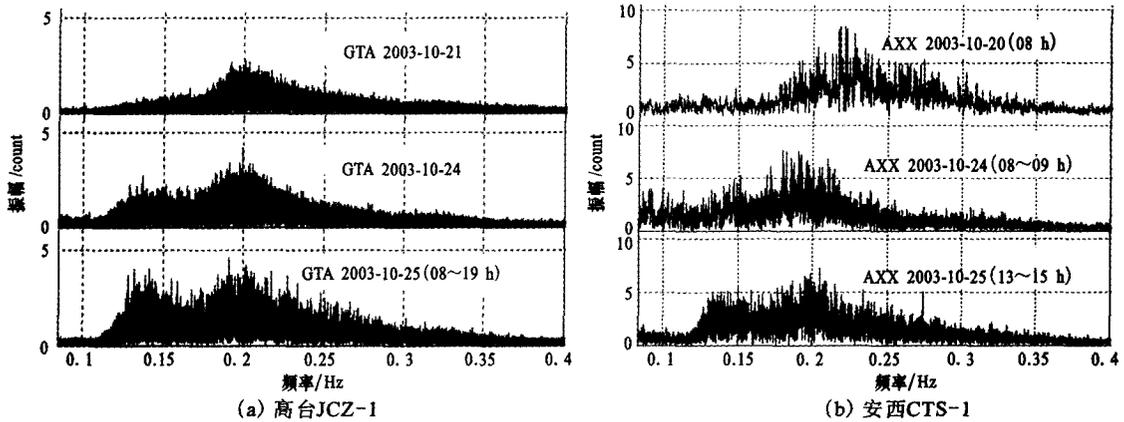


图 5 民乐—山丹 Ms6.1 地震前高台、安西台的地脉动频谱分析图

Fig. 5 The results of spectral analysis on the microtremor records from Gaotai and Anxi stations before Minle—Shandan earthquake with Ms6.1.

地震是对断层运动的一种适时记录,那么低频波就是静地震或慢地震应变能的传播。高台、安西台在昆仑山口西 8.1 级地震前 0.15 ~0.25 Hz 的频率成份没有明显变化,是否因为一系列走向 NW 的断裂带影响正应变能的传播所致,有待进一步研究。初步看来,破裂面正应变方向上的台站更易于记录到 0.1~0.14 Hz 的前兆波。

4 结语

目前,研究人员对宽频带数字地震资料的频谱分析比较关注,也希望从不同频带范围内找到强震的前兆异常。本文研究得出低频波前兆异常频带范围是 0.1~0.14 Hz,虽然可以据此预测发震时刻,但低频波的方向性和能量指标还有待深入研究。另

外,成都台在汶川地震前 4 天起出现连续的脉冲式异常,且在震前一天尤为突出,频谱分析结果显示脉冲响应周期在 333~5 000 s 之间,这个周期成份增强是否预示着南北地震带这个特殊的发震区域呢?宽频带数字资料信号丰富,有待我们进一步研究。

致谢:本研究开展期间中国地震台网中心杨辉高工提供了 SEED 数据资料,兰州地震研究所硕士研究生郑国磊编写了数据格式转换程序,兰州地震研究所硕士研究生张连海、姚家骏以及高台地震台丁宏等所有人员在资料整理方面给予了大量帮助,在此一并表示感谢!

[参考文献]

[1] 万用革. 数字信号处理的 MATLAB 实现[M]. 北京:科学出

- 版社,2007.
- [2] 杨又陵,赵根模,高国英. 昆仑山 8.1 地震前的缓慢地震事件[J]. 国际地震动态,2003,297(9):1-4.
- [3] 许绍燮. 大地震地层内的分层运动[J]. 中国工程科学,2006,8(6):14-22.
- [4] Ito Y, Obra K, Shiomi K, et al. . Slow earthquakes coincident with episodic tremors and slow slip events[J]. Science, 2007. 315(5811):503-506.
- [5] 杨立明. 汶川地震临震地脉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,2009, 361:14-19.
- [6] 张雁冰,蒋骏,廖盈春. 宽频地震计及倾斜、重力仪对长周期波动信号的综合观测[J]. 地震学报,2008,30(6):626-633.
- [7] Dragoni M, Bonafede E, Boschie. Silent earthquake and rupture mechanics along plate boundaries[J]. Earthquake Predict Res. 1986,(4):121-129.
- [8] 赵根模,杨港生,陈化然. 寂静的前震与地震预测[J]. 地震, 2001, 21(1) :69-76.
- [9] 许绍永,杨润海,胡毅力. 慢地震慢机制的研究[J]. 地震, 2003,23(2):12-20.
- [10] 吴志坚,车爱兰,王兰民. 常时微动测试在汶川地震甘肃灾区建筑结构震害调查中的应用[J]. 西北地震学报,2009,31(1): 86-90.
- [11] 周青云,何永锋,靳平. 地震信号处理中相位匹配滤波器的设计[J]. 西北地震学报,2007,29(2):114-118.
- [12] 安张辉,吕子岚,杜学彬. 甘肃省各数字测震台下方地壳速度结构研究[J]. 西北地震学报,2008,30(3):270-275.
- [13] 姚凯,卢大伟,刘旭宙. 利用汶川余震流动观测资料探讨地形对峰值加速度的影响[J]. 西北地震学报,2009,31(1):46-50.
- [14] 陈立军. 禾青井动水位对断层蠕动与慢地震过程的响应初析[J]. 华南地震,1997,17(2):40-44.
- [15] 韩延本,李志安,田静. 日月引潮力变化与某些地区地震发生时间的相关研究[J]. 地球物理学进展,1996,11(2):114-122.
- [16] 王庆良,张晓东,崔笃信,等. 理解前兆异常变化机理和地震短临前兆[J]. 国际地震动态,2005,(5):131-144.
- [17] 杨立明,王兰民. 民乐-山丹 6.1 级地震短期预报的科学总结[J]. 西北地震学报,2004,26(1):1-9.
- [18] 杨立明,梅秀萍. 地震活动相关性定量方法及其在印度板块动力触角对中国西部地区地震影响中的应用[J]. 西北地震学报,2005,27(4):317-321.
- [19] 刘小凤,杨立明,范兵. 昆仑山口西 8.1 级地震后青藏高原北部地区地震活动初步研究[J]. 西北地震学报,2003,25(1): 52-58.
- [20] 杨立明,王振亚,郑卫平,等. 青藏高原北部地区 7 级以上地震孕育演化特征及其应用研究[J]. 西北地震学报,2000,22(2):147-153.
- [21] 杨立明,肖丽珠,张小美,等. 青藏高原北部地震活动形势及其与中国大陆地区地震活动的关系研究[J]. 西北地震学报, 2001,23(3):244-249.