

大震前重力地脉动异常分析*

尹亮¹, 杨立明², 雷登学³, 刘鸿斌¹, 邹小波¹

(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;
3. 甘肃省地震局 肃南地震台, 甘肃 肃南 734400)

摘要: 研究了高台地震台和兰州地震台在2008年5月12日汶川8.0级、2009年8月28日青海海西6.4级、2009年9月30日撒摩亚群岛8.1级地震前重力记录资料脉动幅度及频谱变化, 总结了重力地脉动在时间域和频率域上的临震前兆异常特征, 发现有与宽带地震仪低频波异常对应的异常信息, 即震前时域脉动曲线出现纺锤型或喇叭口形态, 0.1~0.14 Hz的频幅最大值在震前几天加速增大直到发震。跟踪地脉动异常变化可以为地震短临预报提供有用信息。

关键词: 重力观测; 地脉动; 频谱分析; 震例; 地震预报

中图分类号: P315.72*6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)04-0442-05

0 引言

地震对地动观测的影响有两种表现: 一是震后的地震波对正常地脉动信息的干扰, 另一个是震前出现的地脉动异常。大地震后, 重力仪由于受地震波的影响产生强烈振动, 在功率谱上呈现大幅度的谱峰, 周期为20 s, 这样强的地震波将严重干扰正常地脉动信息的观测, 不过这种干扰在功率谱上容易被识别。在以往的重力固体潮观测中, 某些大地震发生之前, 在照相记录的潮汐曲线上, 曾观测到曲线有变粗或高频抖动现象, 在倾斜仪照相记录图上也观测到曲线变粗现象, 这实际上就是地脉动幅度异常的一种表现, 其中包括地震前兆引起的脉动异常和台风引起的脉动异常。这种高频信息是叠加在潮汐曲线上的, 幅度仅为潮汐量的1%~5%, 在固体潮观测中, 为了获得光滑潮汐曲线, 工作人员都采用时间常数很大的滤波器将高频信息作为噪声而滤去, 因此有可能也将与地震有关的信息滤去(陈益惠等, 1988)。在重力观测资料的应用中, 如何分析这些高频信息, 找到它们与孕震信息的关系(朱传镇等, 1977), 值得我们关注。

1 重力固体潮与正常地脉动

重力仪可以认为是一种超长周期地震仪, 可以记录正常地震波形。所谓重力仪记录的高频信

息, 是指叠加在潮汐曲线上的高频扰动, 它反应地面微弱振动的信息, 重力地脉动就包含在这类高频信息之中。通过对离散采样的重力观测数据进行傅立叶变换, 可以计算重力地脉动资料的频谱, 图1是兰州地震台重力地脉动曲线及频谱分析结果。笔者选取兰州台和高台台2009年全年无震时段的重力地脉动资料(采样间隔为1 s)进行频谱分析, 结果表明, 地脉动频率在0.1~0.5 Hz范围内, 优势频率是0.22 Hz, 与宽频带地震仪地脉动频谱分析结果一致(郝晓光, 胡小刚, 2008)。为了与宽频

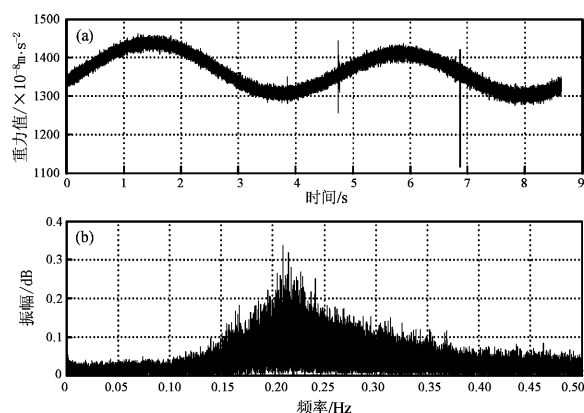


图1 2008年5月1日兰州台重力地脉动曲线(a)及频谱分析结果(b)(信号长度3 600 s×24 h)
Fig. 1 Gravity microtremor records(a) and the results of spectral analysis(b) recorded at Lanzhou Station from May 1, 2008(signal length 3 600 s×24 h)

* 收稿日期: 2010-11-24.

基金项目: 国家自然科学基金“低频电磁在地震预测应用中的探讨”(41174059)资助.

带地震仪地脉动信息验证对比（陈化然等，1998），笔者用 `firls` 函数设计带通滤波器，消除固体潮干扰，只保留 0.08 ~ 0.4 Hz 的频率成分，得到新的重力地脉动曲线（图 2）。

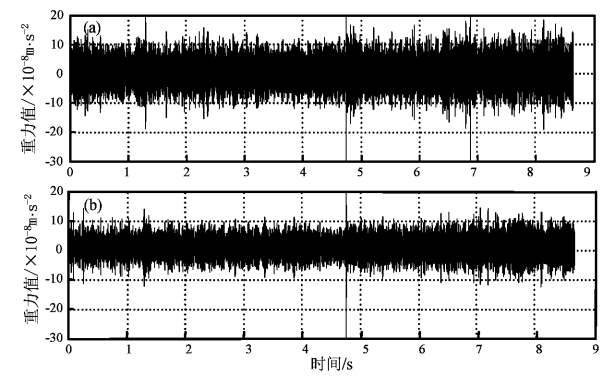


图2 2008年5月1日兰州台(a)、高台台(b)重力记录滤去固体潮后的地脉动曲线(信号长度24 h)
Fig. 2 Gravity microtremor records and the results of spectral analysis recorded at Lanzhou Station(a) and Gaotai station(b) from May 1, 2008 (signal length 24 hours)

图2显示，无震时段地脉动幅度变化平稳，没有明显的纺锤型或喇叭口形态。下文将通过震例来研究重力地脉动曲线在大震前有无明显的幅度和频率变化。

2 震例研究

2.1 2008年5月12日汶川8.0级地震

图3a, b分别显示了2008年5月汶川地震前兰州、高台台重力地脉动信息叠加在固体潮曲线上的形态。可以看出，自5月10日起脉动开始变粗且一直持续到5月汶川8.0级地震发生，其中兰州台的地脉动异常幅度尤为明显。

为了更清楚看到地脉动异常形态，地震工作者设计带通滤波器（万永革，2007），消除固体潮成分，只保留地脉动优势频率 0.08 ~ 0.4 Hz 的频段部分。兰州台和高台台重力观测均使用美国 PET 相对重力仪，采样频率 1 Hz，精度达到 $10^{-8} \mu\text{Gal}$ 。从滤波后的地脉动曲线（图4）上可看出明显的“异常扰动”：2008年5月10日地脉动幅度开始逐渐增大，呈喇叭口形态一直持续到12日震前，且两个台站的曲线的记录形态一致，异常起始时间一致。另外，从图4中看出，5月2日、4日也出现了地脉动变粗的现象，这与宽频带地震仪记录

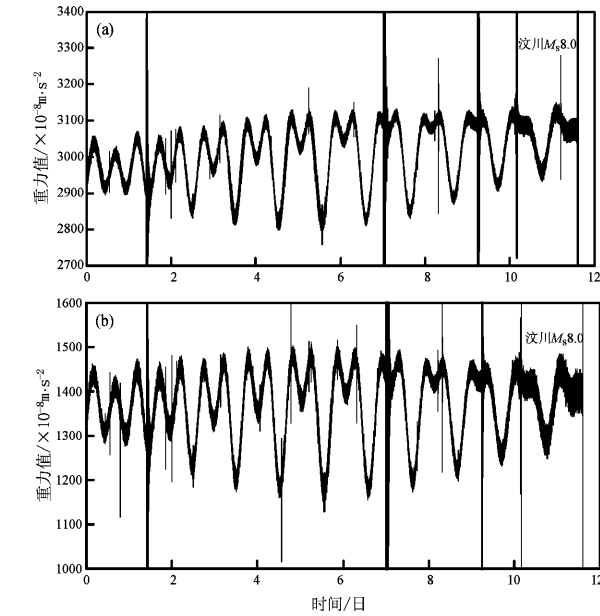


图3 2008年5月1~12日高台台(a)、兰州台(b)重力地脉动曲线
Fig. 3 Gravity microtremor records at Gaotai Station(a) and Lanzhou station(b) from 1 to 12 May, 2008

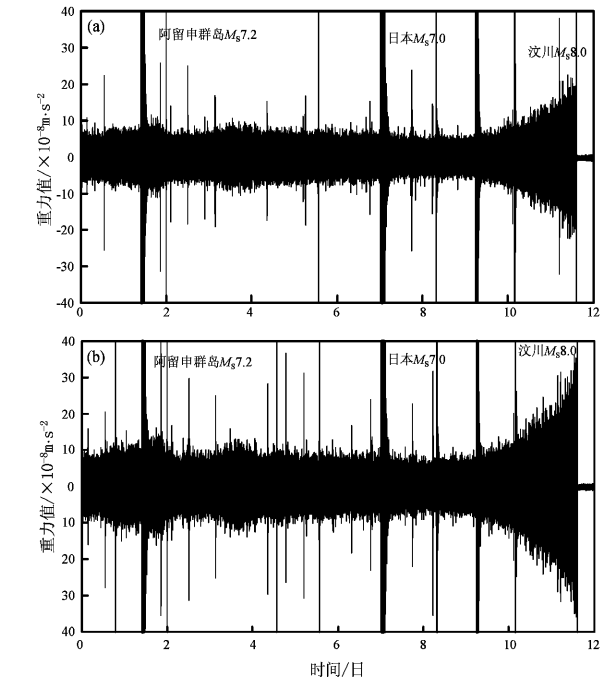


图4 2008年5月1~13日高台台(a)和兰州台(b)重力地脉动曲线(滤去固体潮成份，只保留0.08~0.4 Hz的成分)
Fig. 4 Gravity microtremor records at Gaotai station(a) and Lanzhou Station(b) from 1 to 13 May, 2008 (solid tide filtered out, ingredient in 0.08 ~ 0.4 Hz retained)

到的震前纺锤型形态类似,而且该时段没有台风,期间发生的地震也没有影响到纺锤型形态的变化趋势,说明该地脉动异常也是汶川 8.0 级地震的前兆异常的反映。事实上,最早的“震前扰动”现象是日本的 Kizawa 在 GS-12 重力仪的观测记录中发现的(冯德益等,1984):1964 年 3 月 28 日的美国阿拉斯加 8.4 级地震和 1964 年 6 月 16 日的日本新潟 7.5 级地震的“震前重力扰动”——强震前 3 天观测到有一系列的特殊脉动叠加在重力潮汐曲线上,并一直持续到强震发生。另外,日本的 Kanamori 在美国加州 Pasadena 地震台宽带地震仪的记录中发现了 1960 年 5 月 22 日智利 8.3 级大震前数十小时的“震前扰动”现象(郝晓光,胡小刚,2008)。

为了更清楚地分析震前脉动频谱幅度的变化过程,笔者对兰州台和高台台的重力地脉动做快速傅立叶变换(采用秒采样数据,截取信号长度为 3 600 s),从频谱图中 0.1~0.14 Hz 频带范围内每小时取一个频幅最大值作为纵坐标绘图(图 5)。以 5 月 10 日 13~23 时频幅波动形态为正常基线水平,自 11 日 09 时开始,两个台频幅最大值同步呈现加速增大变化(杨立明,2009),直至发震前一小时幅度达到最大,高台台增幅为 146%,兰州台增幅为 310%。据此,笔者认为可以用重力地脉动频谱幅度的增大异常变化预测发震时间。

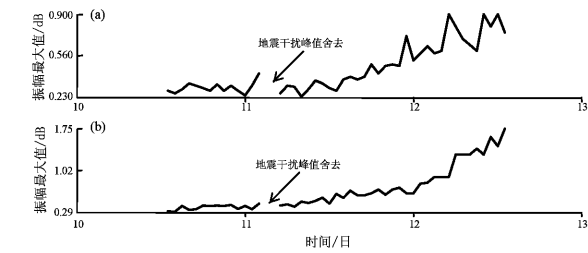


图 5 2008 年 5 月 10 日 13 时至 12 日 13 时高台台(a)、兰州台(b)重力地脉动频谱变化(0.10~0.14 Hz)
Fig. 5 Spectrum changes of gravity microtremor recorded at Gaotai Station(a) and Lanzhou Station(b) from 10 to 12 May, 2008(0.10~0.14 Hz)

2.2 2009 年 8 月 28 日青海震群

2009 年 8 月 28 日青海海西自治州发生 $M_s6.4$ 地震,之后 4 天之内,又连续发生 6 次 5 级以上地震。图 6、7 分别显示的是高台台和兰州台的重力地脉动潮汐曲线,曲线自 8 月 25 日起开始加粗,一直持续到震前。笔者用 remez 函数设计带通滤波器,滤去固体潮后兰州台的脉动曲线于 8 月 25 日

~26 日出现脉动加粗现象(图 7b),高台台记录的异常不太明显(图 6 b),可能由于震级偏小。

对高台重力地脉动按信号长度 3 600 s 做快速傅立叶变换,在 0.1~0.14 Hz 频带范围内每小时取一个频幅最大值作为纵坐标绘图(图 8)。以 8 月 26 日 16 时至 27 日 16 时频幅波动形态作为正常基线水平,自 27 日 21 时开始,频幅最大值突然上升,至发震前一小时幅度达到最大,增幅达 48%。与汶川 8.0 级地震前地脉动频谱幅度最大值增大异常变化过程相比,青海海西 6.4 级地震前频谱幅度最大值呈突然增大后保持平稳变化的特点。

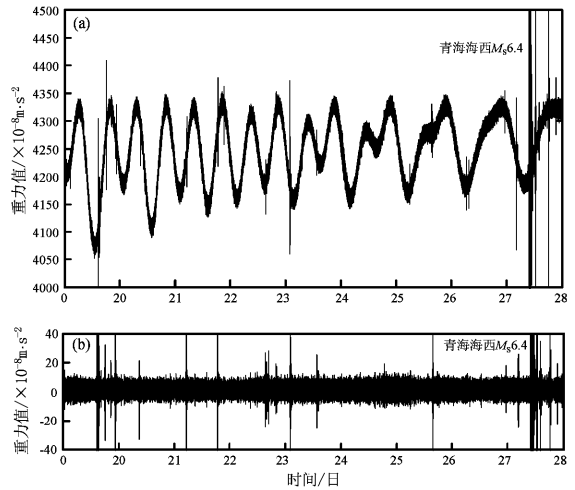


图 6 高台重力固体潮曲线(秒值)(a)和重力滤去固体潮汐成份的地脉动曲线(秒值)(b)
Fig. 6 Gravity solid tide records recorded at Gaotai Station (second sampling) (a) and gravity microtremor records by filtering out the solid tide(second sampling) (b)

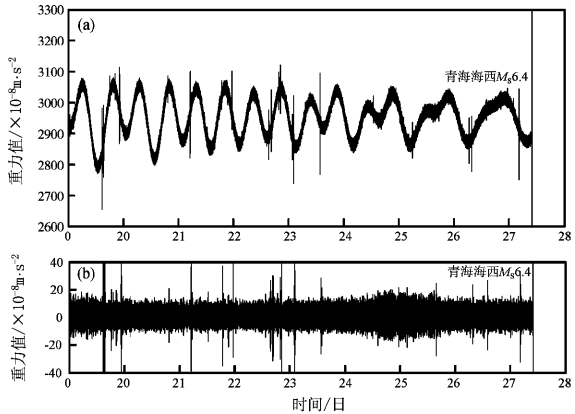


图 7 兰州台重力固体潮曲线(秒值)(a)和重力滤去固体潮汐成份的地脉动曲线(秒值)(b)
Fig. 7 Gravity solid tide records recorded at Lanzhou Station (second sampling) (a) and gravity microtremor records by filtering out the solid tide(second sampling) (b)

2.3 2009 年 9 月 30 日撒摩亚群岛 8.1 级地震

图 9a 显示, 2009 年 9 月 21 ~ 30 日高台台的重力固体潮曲线自 9 月 28 日起开始变粗, 至 8.1 级地震后恢复正常水平。用 firls 函数设计带通滤波器, 对固体潮曲线进行滤波处理后得到图 9b, 可以看出, 9 月 28 ~ 30 日, 地脉动曲线出现纺锤型异常扰动, 与宽频带地震仪记录的地脉动异常形态相似 (陈益惠等, 1988)。震前兰州台重力地脉动异常扰动与高台类似, 分析结果也基本相同: 震前 2 天, 重力地脉动曲线出现变粗现象。

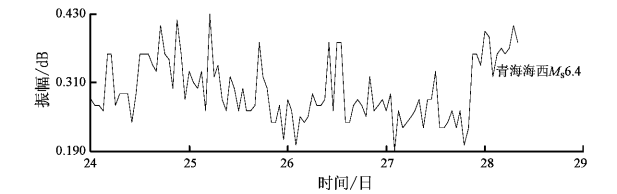


图 8 2009 年 8 月 24 ~ 28 日高台台重力地脉动频谱幅度变化(0.10 ~ 0.14Hz)
Fig. 8 Spectrum changes of gravity microtremor recorded at Gaotai Station from 24 to 28 Aug., 2009 (0.10 ~ 0.14Hz)

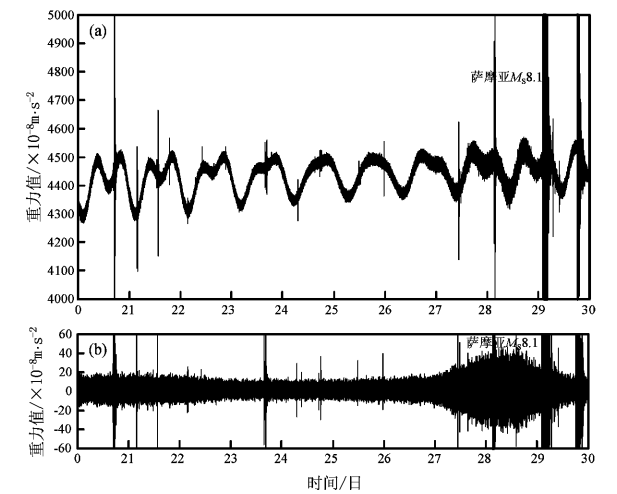


图 9 高台台重力固体潮曲线(a)和滤去固体潮成份的地脉动曲线(b)(时段: 2009 年 9 月)
Fig. 9 Gravity solid tide records recorded at Gaotai Station(a) and the gravity microtremor records by filters out the solid tide(b) (duration: Sep., 2009)

图 10 与图 3 及图 6 类似, 显示了萨摩亚 8.1 级地震前, 高台台的重力地脉动频谱幅度最大值增大的变化过程 (0.1 ~ 0.14 Hz)。与地脉动原始曲线开始变粗相对应, 震前 2 天, 频谱幅度最大值

呈增大变化, 增幅达 92%, 不同的是临震前几小时, 该最大值出现回落现象。

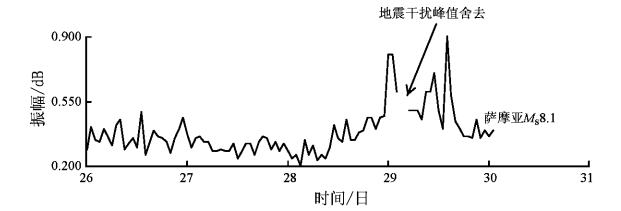


图 10 2009 年 9 月 26 ~ 30 日高台重力地脉动频谱幅度变化 (0.10 ~ 0.14 Hz)
Fig. 10 Spectrum range changes of gravity microtremor recorded at Gaotai Station from 26 to 30 Sep., 2009 (0.10 ~ 0.14Hz)

3 结论与讨论

重力观测以记录长周期形变波为主, 但随着数字化和采样率的提高, 重力仪也可记录地震波和地脉动。在本文研究的 3 次地震发生前, 高台台、兰州台的 PET 相对重力仪都记录到了明显的地脉动异常扰动, 在固体潮曲线上表现为震前 2 天脉动开始变粗, 在滤波后的残差曲线上表现为纺锤型或喇叭口型脉动异常; 在 0.10 ~ 0.14 Hz 范围内, 震前两三天出现频谱幅度增大异常。对高台台来说, 海西地震震中距 ($\Delta = 408$ km) 比汶川地震震中距 ($\Delta = 900$ km) 小很多, 但由于震级较小, 脉动异常幅度也较小, 说明脉动异常对震级大小更敏感, 或者跟发震构造及台址构造有关 (郑文俊等, 2005; 刘小凤, 2003)。笔者认为, 大地震发生前, 在震源区及其附近会产生许多微小的错动和裂缝, 大量微裂隙串通和位错的进一步发展 (与震级即能量有关), 将导致断裂发生大的错动。震前这种微裂位错的产生可以引起频带较宽的振动, 并且振动可以以波的形式向外传播, 既有高频、中频的, 也有低频的 (赵根模等, 2001)。本文关注的是在 6.4 级以上地震前, 在重力仪潮汐曲线低频频带 (0.10 ~ 0.14 Hz) 内地脉动表现为异常扰动 (脉动变粗) 现象。

笔者在以往的研究中, 发现宽频带数字地脉动记录在大震前也会出现脉动变粗及频谱幅度异常现象 (杨又陵等, 2003), 且异常频带主要集中在 0.10 ~ 0.14 Hz 范围内 (尹亮, 杨立明, 2010), 另外, 尹亮 (2010)、胡小刚和郝晓光 (2009) 认为台风对地脉动的影响频带大致在 0.15 ~ 0.30 Hz

范围内,因此,作为两种物理观测手段,重力仪和宽频带地震仪记录的地脉动异常信息(0.10 ~ 0.14 Hz)可以相互佐证,在预测大震的发震时间方面提供前兆依据。

参考文献:

- 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.
- 陈益惠,雷雨田,朱涵云,等.1988.重力仪高频信息和地脉动的观测研究[J].地球物理学报,31(5):527-539.
- 冯德益,潘琴龙,郑斯华,等.1984.长周期形变波及其所反应的短期相临震地震前兆[J].地震学报,6(1):41-57.
- 郝晓光,胡小刚.2008.宽带地震仪资料证实汶川大地震“震前重力扰动”[J].地球物理学进展,23(4):1332-1335.
- 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.
- 刘小凤.2003.青藏高原北部地区弱震空间图像特征与中短期地震

- 预测方法[J].地震研究,27(2):209-215.
- 万永革.2007.数字信号处理的MATLAB实现[M].北京:科学出版社.
- 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,361:14-19.
- 杨又陵,赵根模,高国英,等.2003.2001年11月14日昆仑山口8.1地震前的缓慢地震事件[J].国际地震动态,(9):1-4.
- 尹亮,杨立明.2010.宽频带数字资料低频波在大震前的短临前兆信息研究[J].西北地震学报,32(1):82-87.
- 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.
- 赵根模,杨港生,陈化然.2001.寂静的前震与地震预测[J].地震,21(1):69-76.
- 郑文俊,何文贵,赵广坤,等.2005.2003年甘肃民乐、山丹6.1、5.8级地震发震构造及发震机制探讨[J].地震研究,28(2):133-140.
- 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.

Analysis on the Abnormalities of Gravity Microtremor before the Strong Earthquakes

YIN Liang¹, YANG Li-ming², LEI Deng-xue³, LIU Hong-bin¹, ZOU Xiao-bo¹

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

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

(3. Sunan Seismic Station, Earthquake Administration of Gansu Province, Sunan 734400, Gansu, China)

Abstract

Analyzing the variation of microtremor-amplitude and frequency spectrum of the gravity data recorded by Gaotai Station and Lanzhou Station before the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake on May 12, 2008, the Haixi, Qinghai, $M_s 6.4$ earthquake on August 28, 2009, and the Samoa Islands $M_s 8.1$ earthquake on September 30, 2009, we summarized the characteristics of impending precursors of the gravity data in the time domain and frequency domain. Then we discovered that before the earthquakes, the microtremor curve in the time domain appeared to be spindlelike or bell-mouthed. Further, the amplitude-frequency value in 0.1 Hz ~ 0.14 Hz acceleratedly rose a few days before the earthquakes. Tracking the abnormal variation of the gravity microtremor, we may find the useful information for the short-term earthquake prediction.

Key words: gravity; microtremor; spectrum analysis; earthquake case; earthquake prediction