

泰安重力观测高频波动信号分析^①

李 杰¹, 卢双苓², 殷海涛¹, 荆 强³, 范 军⁴

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 泰安基准地震台, 山东 泰安 271600;
3. 山东经济学院, 山东 济南 250014; 4. 山东省潍坊地震局, 山东 潍坊 261041)

摘要:系统分析了泰安重力观测资料正常和异常时信号的周期特征,研究了高频异常信号与台风、气压和强震之间的关系。结果表明:泰安重力观测正常时信号周期为 2~4 分钟,异常时信号周期只有 2~3 分钟,异常信号幅值约为正常信号的 5 倍;高频异常信号主要是由西太平洋洋面上生成的进入中国大陆或近海的台风引起的,占台风引起泰安重力出现高频异常信号的 90%;重力高频信号与台风中心速度正相关,与台风距离负相关,并且随台风的结束高频信号也随之消失;少数高频异常信号与强震也有一定关系,占地震总数的 17.24%;高频异常信号与气压变化无关。

关键词:重力观测;高频异常信号;台风;强震;地壳脉动

中图分类号: P315.72⁺6 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2009)03-0265-07

Analysis on the High-frequency Fluctuation Signals in Taian Gravity Observation

LI Jie¹, LU Shuang-ling², YIN Hai-tao¹, JING Qiang³, Fan Jun⁴

(1. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China;
2. Taian Fiducial Seismics station, Shandong Taian 271600, China; 3. Shandong Economic University, Jinan 250014, China;
4. Earthquake Administration of Weifang, Shandong Weifang 261041, China)

Abstract: The periodic characteristics of normal and abnormal signals in gravity observation data from Taian station are analyzed systematically. The relationship among the high-frequency abnormal signals and typhoon, strong earthquake and atmospheric pressure is studied. The results show that the signal period are about 2~4 minutes for normal cases and 2~3 minutes for abnormal cases, the amplitude of signals for abnormal cases are about 5 times than for normal cases. High-frequency abnormal signals are mainly caused by the typhoon which originated on western Pacific Ocean and go to China mainland or near regions, with percentage of 90%, and the signals are positively correlated with the velocity in center of typhoon. The abnormal signals would disappear with typhoon ended. Some abnormal signals are related with trong earthquake, taking number of 17.24% of earthquakes. But the signals have no relation with atmospheric pressure.

Key words: Gravity observation; High-frequency abnormal signals; Typhoon; Strong earthquake; Pulsstion

0 前言

作为精确地测量地球重力场微小变化的固体潮重力观测是研究固体潮和地震前兆的一种重要手段。对于重力观测中高频信息及其与地震关系的研究国内外地学工作者早已关注研究过。1964 年 3

月 28 日美国阿拉斯加地震和 1964 年 6 月 16 日日本新潟地震,在震前几天日本东京气象研究所 GS12 型重力仪潮汐记录图出现高频扰动并一直延续到地震发生^[1];1976 年唐山 7.8 级地震、1975 年海城 7.3

① 收稿日期:2008-10-23

基金项目:“十一五”科技支撑项目(2006BAC01B03-03-04)

作者简介:李 杰(1963-),女(汉族),黑龙江密山人,正研级高级工程师,主要从事地形变地震分析预报和研究工作。

级地震、1986年11月15日台湾6.5级地震和1988年11月6日澜沧—耿马7.6级地震时,潍坊地震台重力、北京地震台重力和下关地震台重力仪均记录到地壳脉动增强异常变化^[2-3]。陈益惠在1987年应用电磁反馈零位检测技术改造的重力仪进行了高频信息观测,并对于重力观测中的高频信息频谱分布特征进行了研究。根据北京香山台重力仪记录的地脉动功率谱分析表明,平时的脉动优势周期为5s左右,但在1986年5月8日阿留申M7.7大震前一天出现周期为2~3s的异常脉动^[4-5],可见震前出现的异常信号周期较正常时信号周期短了。这些高频信息异常变化因其相对正常的地震波而言其频率较低,衰减较慢,因而称为“长周期事件”,亦称为地震“前驱波”事件引起地学界的重视。上世纪90年代后期,随着观测技术的发展与进步数字观测逐渐代替了模拟观测。采样率和观测精度的提高使地震前兆观测仪器能够记录到更加丰富的信息,因此对于前兆仪器记录的地震前驱波的研究再次引起地学界的广泛关注^[6-8]。

泰安固体潮重力仪自观测以来多次出现曲线加粗变化,并且有的变化与国内外中强以上地震有较好的对应。这些叠加在正常固体潮上的高频信号是如何产生的?它们与地震的关系如何?是否具有地震短临预报意义?为了回答这些问题,本文开展了有关分析研究工作。

1 资料及分析方法概况

泰安PET型便携式固体潮重力仪安放在山东泰安基准地震台地震专用山洞内,2008年4月正式观测,5月12—28日仪器遭雷击损坏,5月29日修复正常。自观测以来仪器漂移较大,约为800微伽/月。采用Venedikov调和和^[9]分析了M2波潮汐因子及精度(表1),可见资料变化平稳,精度较高。该仪器系统分辨率较高,为0.01微伽,因此在观测值中多次记录到了高频震颤信号。本文采用数字低通滤波法^[9]首先滤去了观测资料中存在的日波、半日波和三分之一日波等长周期成份,分离出观测资料中存在的高频信号,再采用傅立叶变换谱分析方法^[9]对观测资料正常和异常信号进行谱分析,进而分析信号特征、产生的原因及与地震的关系。

2 高频异常波动信号分析

2.1 异常信号的频谱分析

采用低通滤波和傅立叶变换谱分析方法对泰安

重力2008年4—9月的观测资料进行了处理。泰安重力在短短的半年时间里多次出现了观测值曲线脉动加粗异常变化,低通滤波(汉名窗)滤除日波、半日波和三分之一日波等长周期成份后非常清晰地显示出观测值曲线中存在着高频信号叠加在正常的背景噪声曲线上。如图1所示,2008年8月21日至2008年8月24日13时滤波后的残差曲线明显地高于正常背景值。用傅立叶变换谱分析方法分别对低通滤波后的正常时间(2008年9月2日)信号和异常时间(2008年8月22日)信号进行频谱分析,发现泰安重力正常时的信号周期主要为2~3分钟,另外还包含有4分钟周期信号;异常时间存在的高频震颤信号周期主要为2~3分钟(图2),异常波动时4分钟周期信号消失了。异常高频信号与正常信号幅值相差较大,异常时约为正常时的5倍(图3)。

表1 泰安重力观测资料潮汐分析结果

时间	M ₂ 波潮汐因子	潮汐因子中误差	潮汐因子相对中误差	潮汐相位滞
2008年4月	1.175 5	0.000 9	0.000	0.2
2008年5月	1.175 9			-0.029 5
2008年6月	1.173 6	0.001 7	0.001 4	-0.346 4
2008年7月	1.176 8	0.003 3	0.002 8	0.015 8
2008年8月	1.176 3	0.003 8	0.003 3	-0.113 9
2008年9月	1.174 6	0.001 4	0.001 2	-0.343 4

注:5月资料较短,为采用Nakai拟合检验法计算结果

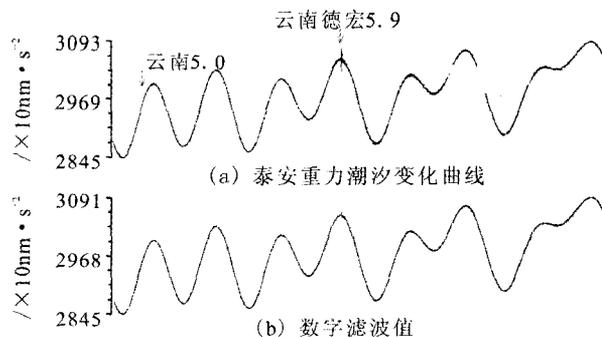


图1 泰安重力观测值低通滤波结果
Fig. 1 Result of Taian gravity observation using Low-pass filter.

2.2 台风影响分析

台风可导致地壳脉动增强,使潮汐重力能够观测到高频异常信号,并且台风的影响与台风中心位置、台风移动速度有关^[4,5]。那么泰安重力监测到的地壳脉动加粗异常变化是否与台风过程有关?为此我们统计分析了泰安重力观测出现的几次高频信号与台风的关系。

利用低通滤波方法对泰安重力2008年4—9月观测资料进行了处理,共出现比较明显的高频异常

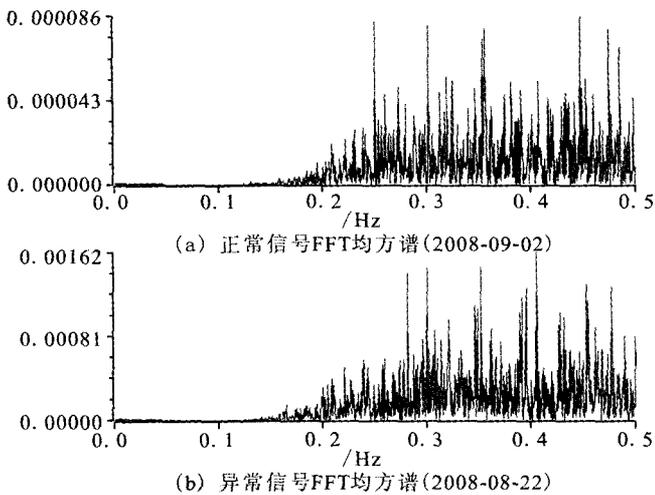


图2 重力正常和异常时的谱分析图

Fig. 2 Spectrum analysis of normal and abnormal gravities.

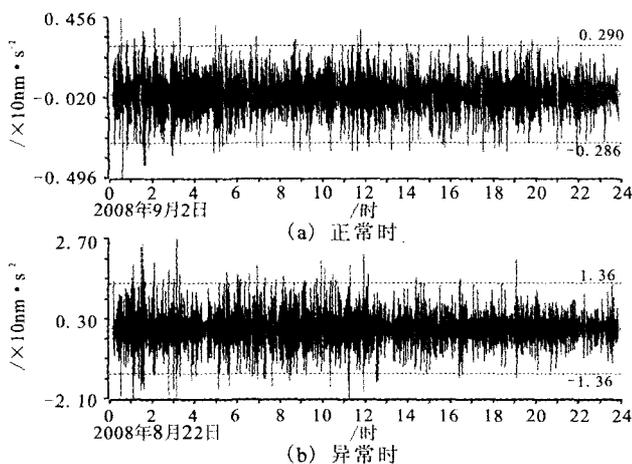


图3 重力正常和异常时信号幅值对比图

Fig. 3 Comparison of the amplitude between normal and abnormal variation of gravities.

信号17次(表2)。对照2008年西太平洋洋面生成的16次台风(浣熊、威马逊、麦德姆、夏浪、娜基莉、风神、海鸥、凤凰、北冕、巴蓬、黄蜂、鸚鵡、森拉克、黑格比、蔷薇、米克拉)^①过程发现,泰安重力观测出现的高频异常信号有10次与台风(浣熊、威马逊、风神、海鸥、凤凰、北冕、鸚鵡、森拉克、黑格比、蔷薇)过程有较好的对应关系,占58.82%。这10次台风移动路径有7次进入中国大陆,有2次进入中国近海(森拉克、蔷薇);1次距中国大陆较远(威马逊台风),它的最近距离约为1328 km。可见对大陆及近海影响较大的台风有9次,占台风引起泰安重力出现高频异常信号的90%。而其它6次台风路径均在中国大陆东、南方向沿西南向东北或东南向西北方向运动,且距离较远,多数台风持续时间较

短。图4给出了10次泰安重力高频信号与同期出现的台风中心速度和台风距泰安测点的距离(图中距离为泰安测点至台风中心距离减去泰安至南京的距离),可见重力高频信号与台风中心速度正相关,与台风中心距泰安测点距离负相关,并且随台风的结束高频信号也随之消失。分析认为这主要是台风导致海浪对中国大陆架作用增强的结果。

2.3 气压影响分析

我们对比分析了高频异常信号与气压的关系(表2),发现部分高频信号出现时同时伴有气压的显著变化,但同时还存在台风或地震因素。如2008年8月21-22日泰安重力出现高频异常信号时正值台风“鸚鵡”在广东登陆,山东大部分地区气压出现了显著变化;2008年8月31日四川攀枝花5.6级地震前气压和重力观测均出现了显著的变化(图5)。由表2可见,泰安重力观测出现的17次高频异常信号与气压剧烈变化并没有一一对应,因此认为泰安重力出现的高频异常信号与气压变化无关。

2.4 高频异常信号与地震的关系

对2008年4-9月世界7级和中国大陆5级以上地震对比分析发现,在不考虑气压的影响下,部分高频异常信号出现后1-5天内只有中强以上地震发生(表2)。由表2可见,统计时间段内泰安重力观测出现17次高频异常信号,之后的1-5天内均有地震发生,其中12次查到震中位置^②,5次未查到震中位置(但测震图像显示国外有远震)。统计时间段内世界7级、中国5级以上地震共发生29次(扣除了汶川8.0级地震后的34次5级以上余震和其它地震的双震),可见,震前出现高频异常信号的地震占41.38%(不包括未查到震中的地震)。但其中仅有17.24%属于同时未发生西太平洋台风生成或其它因素的单纯地震影响,可见无台风生成时震前出现高频异常信号的比例较低。

3 讨论与结论

通常情况下重力固体潮汐观测记录到的是地壳的正常脉动变化。脉动是地壳微弱的弹性波运动,主要由海浪作用产生。海浪的脉动效应有两种:一是原生脉动,二是次生脉动。重力仪所记录到的脉动主要是次生脉动,其周期为海浪周期的一半,能量

① 江浙省台风路径实时发布系统, <http://www.zjwater.gov.cn/typhoneweb/tflj.asp>.

② 山东防震减灾信息网地震目录。

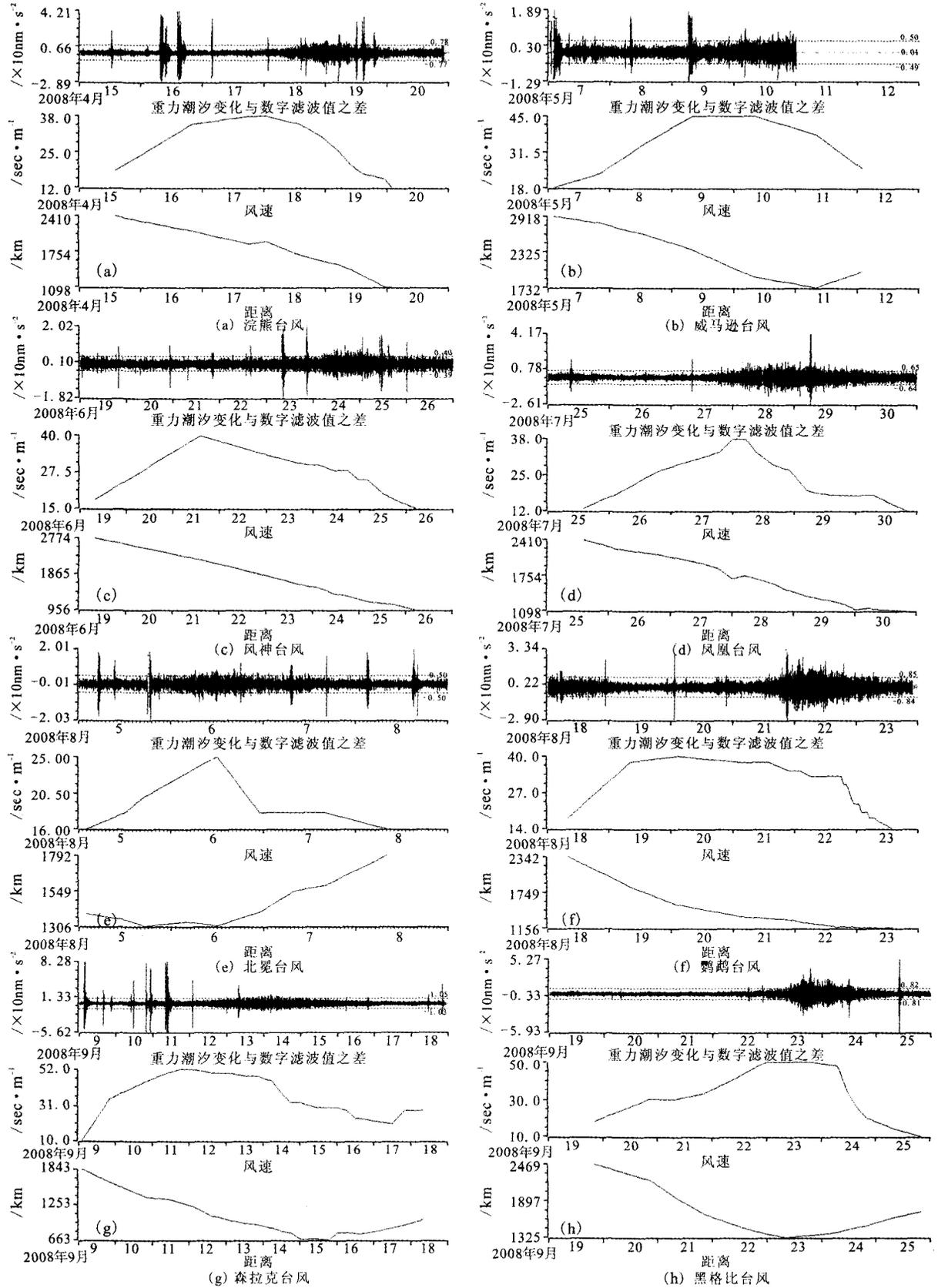


图4 泰安重力高频异常信号与10次台风中心速度、距测点距离关系对比图

Fig. 4 Comparison of gravity high-frequency abnormal signals with the velocity in center of typhoon, and the distance to Taifan observation points among 10 typhoons.

表 2 泰安重力高频震颤信号与台风、强震、气压变化统计表

异常 序号	异常信号 起始时间	异常信号 终止时间	异常信号 持续时间	对应 地震	震中位置		震级 M _s	震中距 /km	异常信号 超前时间	气压变化 特征	对应台风地震 气压情况
					经度(E)	纬度(N)					
1	2008-04-08T11:00	2008-04-11T12:00	3天1小时	洛亚尔提群岛	168° 54'	-20° 12'	7.3	8 400	1天9小时	突变上升	地震
2	2008-04-18T06:00	2008-04-19T20:00	1天14小时	未查到震中				远震	1天8小时	无变化	台风地震
3	2008-04-25T18:00	2008-04-26T11:00	53小时	未查到震中				远震	1天50小时	突变上升	气压地震
4	2008-05-04T06:00	2008-05-04T20:00	14小时	日本本州	141° 36'	36° 06'	7.1	2 180	3天18小时	无变化	地震
5	2008-05-10T18:00	2008-05-11T23:00	9小时	台湾 汶川	122° 30'	24° 00'	5.6	1 470	1天5小时	无变化	地震台风
6	2008-06-11T10:00	2008-06-12T19:00	1天9小时	未查到震中				远震	1天9小时	无变化	地震
7	2008-06-15T07:00	2008-06-16T23:00	1天16小时	青海治多	91° 12'	35° 18'	5.4	2 340	3天6小时	无变化	地震
8	2008-06-24T05:00	2008-06-25T10:00	1天5小时	未查到震中				远震	1天5小时	无变化	台风地震
9	2008-07-17T23:00	2008-07-19T10:00	1天57小时	日本本州	142° 18'	37° 30'	7.3	2 260	1天47小时	无变化	台风地震
10	2008-07-27T16:00	2008-07-30T04:00	2天12小时	四川绵阳	104° 42'	32° 06'	6.1	1 230	5天	无变化	台风地震
11	2008-08-05T17:00	2008-08-07T16:00	1天59小时	四川广元 四川平武	105° 30'	32° 42'	6.1	1 140	49分钟	无变化	台风地震
12	2008-08-17T15:00	2008-08-19T11:00	1天56小时	云南盈江	104° 42'	32° 06'	5.0	1 240	1天23小时	突变上升	地震气压
13	2008-08-21T11:00	2008-08-24T13:00	3天2小时	西藏仲巴	97° 48'	24° 54'	5.9	2 220	4天5小时	突变上升	台风气压地震
14	2008-08-30T23:00	2008-09-02T02:00	3天3小时	四川攀枝花	83° 36'	31° 00'	6.8	3 140	4天10小时	突变上升	地震气压
15	2008-09-12T14:00	2008-09-16T00:21	3天53小时	未查到震中	101° 54'	26° 12'	5.6	1 840	17小时	突变上升	台风地震气压
16	2008-09-22T16:00	2008-09-25T04:00	2天12小时	西藏仲巴	83° 36'	30° 48'	6.1	3 160	17小时	无变化	台风地震气压
17	2008-09-26T01:00	2008-09-30T23:00	4天22小时	菲律宾群岛 克马德克群岛	13° 24'	120° 24'	6.1	2 560	1天10小时	突变上升	台风地震气压
					-177° 48'	-29° 42'	7.2	15 200	3天22小时	无变化	台风地震

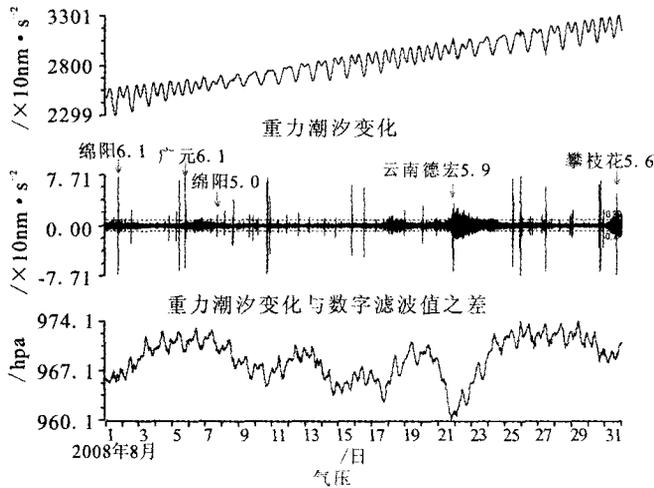


图5 重力高频异常信号与气压、地震对比图

Fig. 5 Relationship of gravity high-frequency signals with pressure and earthquakes.

为原生脉动的 100 倍以上^[4]。由本文分析结果可见,大多数的高频异常信号是由西太平洋洋面上生成的台风进入中国大陆或近海的过程中对中国大陆作用导致地壳脉动增强而引起的变化。由于次生脉动是浅水或深水的海浪相互干涉,由海水驻波振荡产生的脉动,因此不是所有台风都对地脉动有影响,它与台风移动速度、路径、台风中心距测点距离、海上气旋以及是否产生强烈的驻波振荡对地壳影响等有关^[4]。这就是为什么 2008 年 4—9 月间出现的 16 次台风中仅有 10 次对泰安重力观测造成了影响。通过对泰安重力观测记录到的高频异常波动信号的统计分析发现,大多数的高频异常信号持续时间在 2~4 天,并且信号呈纺锤状叠加在正常的背景噪声上。信号形态特征说明了重力观测到的是种渐变性质的异常信号,与进入中国大陆或近海的台风移动路径和风速变化过程非常吻合。信号的频谱特征分析表明正常信号与异常信号的优势周期均为 2~3 分钟,但正常信号中还混有 4 分钟相对较长周期信号,异常信号幅值为正常信号的 5 倍,说明台风的影响主要导致了地壳脉动幅值的显著增强,而脉动周期变化不显著。

由表 2 可见,泰安重力出现高频异常信号 5 天之内均有强震发生,其中 7 次没有台风生成,显示出高频异常信号与强震(5 次可查到震中)也具有一定的关系,与张雁滨得出的结论比较一致^[10]。如果只考虑高频信号与强震在时间上的对应关系,不考虑台风的影响,则泰安重力在 2008 年 4—9 月间出现高频异常信号 5 天之内 100% 的对应了地震。当然这种 100% 的对应是否具有普适性还需资料的进一

步积累研究给出结论,但是这种现象还是应该引起我们的关注。强震前兆仪器可能记录到“前驱波”短临异常事件已得到有关实验研究和震例的证实^[11-12]。临震前岩石在强应力作用下在震源区内有大量微裂缝产生和发震断层出现加速蠕滑都可能激发出长周期形变波。另外由于某种气象过程与海岸的相互作用使地壳在短期内产生脉动异常,也有可能破坏地壳内不稳定的平衡状态而触发了地震的发生,因此重力仪记录到的某些高频异常信号也可能是多种因素共同作用的结果(图 6)。由图 6 可见,26 日出现的高频信号减弱后发生了菲律宾 6.1 级地震,蔷薇台风的影响使得高频异常信号在 28 日达最高值,随后信号幅度减小,但其衰减过程与以往不一样,直到 29 日克马德克群岛 7.2 级地震后高频信号才逐渐恢复正常。虽然 29 日至 30 日有米克拉台风生成,但由其移动路径、风速和持续时间来看不会引起重力观测的变化。令人遗憾的是 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震前泰安重力仪损坏,资料只截止到 5 月 11 日,但由 12 日之前的资料可清晰地看出重力观测资料在 5 月 10 日 18 时后出现了明显的高频信号(图 4(b)),虽然此次高频信号与西太平洋洋面上生成的威马逊台风时间对应较好,但是在统计时间段内仅有本次台风移动路径与中国大陆或近海无关,可见此次高频信号的性质需日后研究。

研究结果显示地震发生时间与高频信号幅值的变化并没有很好的关系,有的地震发生在高频信号生成初期,有的发生在信号最大值附近,有的则在信号结束恢复正常后发震。因此泰安重力产生的高频异常信号与地震的关系还需随着资料的积累作进一步的分析研究。由于本文资料较短,给出的统计结果不具有推广性,仅是一种现象描述。

综上所述讨论可归纳出如下几点结论:

(1) 泰安重力正常信号与异常信号的优势周期均为 2~3 分钟,但正常信号中还混有 4 分钟相对较长周期信号,异常信号幅值为正常信号的 5 倍。说明台风的影响主要导致了地壳脉动幅值的显著增强,而脉动周期变化不显著。

(2) 重力观测中的高频异常信号主要是由西太平洋洋面上生成的进入中国大陆或近海的台风引起的。重力高频信号是随台风中心速度的增加和距测点距离的缩短而出现变化的,其幅值与台风中心风速和距测点距离密切相关,显示出与风速正相关,与距离呈负相关的变化特征。

(3) 高频异常信号与强震也有一定关系。高频

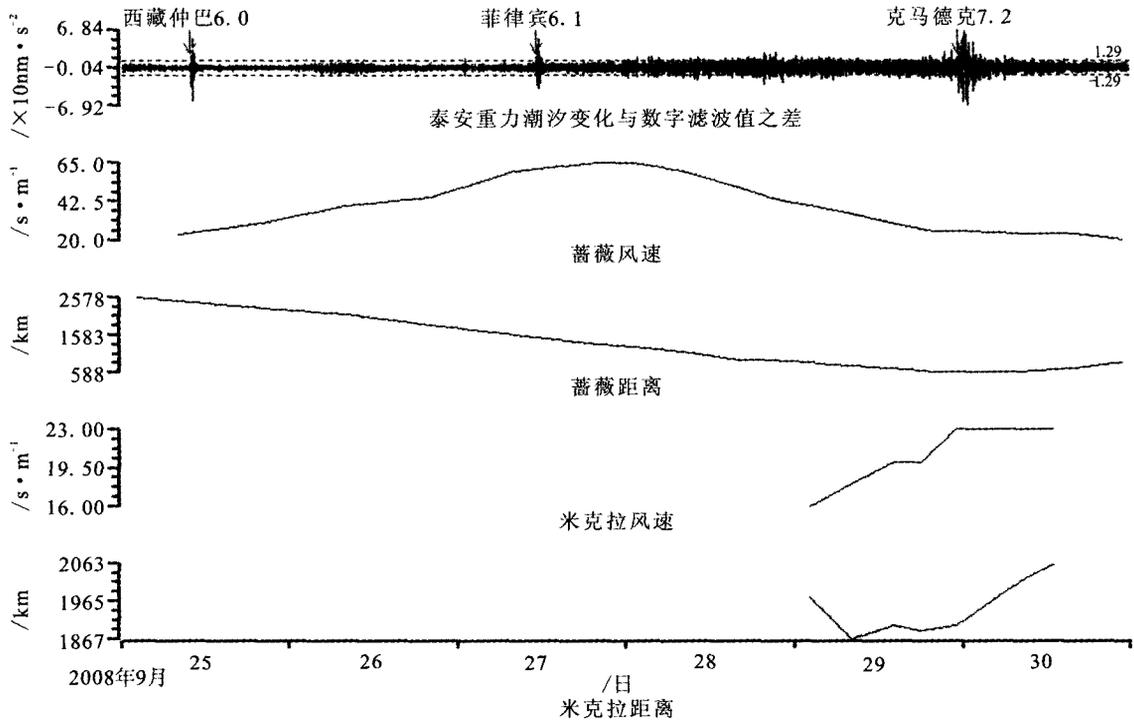


图6 泰安重力高频信号与强震、台风速度和距离关系

Fig. 6 Relationship among the Tai'an gravity high-frequency signals and strong earthquake, velocity of typhoon and distance to typhoon centre.

信号出现后5天之内均有强震发生,如不考虑台风的影响,高频信号出现后100%地对应了发生的强震,如考虑了台风的影响有17.24%的强震前(不包括未知震中的地震)出现了高频异常信号。

(4)泰安重力观测出现的17次高频异常信号与气压剧烈变化没有一一对应,多数还另外对应了台风或强震,认为泰安重力出现的高频异常信号与气压变化无关。

王庆良研究员对本文提出宝贵修改意见,在此表示衷心的感谢!

[参考文献]

[1] Kizawa T. 大地震前后重力仪的记录[J]. 国外地震, 1992, (1):19-41.
 [2] 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.
 [3] 陈德福. 潮汐形变前驱波的时空特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2006,26(2):24-30.
 [4] 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, 1988,31(5):527-539.
 [5] 陈益惠,朱涵云,朱自强. 重力仪高频信息与地震前兆[J]. 地震, 1987, (5):1-5.
 [6] 高原,苏永刚,康好林,等. 甘肃省民乐6.1级与岷县5.2级地震前武都形变资料的变化及临震预测[J]. 西北地震学报, 2005,27(Suppl.):95-99.

[7] 蒲小武,苏永刚,高原,等. 武都数字化流体资料对岷县5.2地震的前兆异常反映[J]. 西北地震学报, 2005, 27(Suppl.):143-145.
 [8] 王秀文,郭星全,宋美琴. 形变数字化观测对大陆地震响应能力及机理分析[J]. 四川地震, 2006, (4):23-26.
 [9] 蒋骏,李胜乐,张雁滨,等. 地震前兆信息处理与软件系统(EIS2000)[M]. 北京:地震出版社,2000.
 [10] 张雁滨,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.
 [11] 李世愚,滕春凯,卢振业,等. 典型构造微破裂集结的实验研究[J]. 地震学报, 2000,22(3):278-287.
 [12] 冯德益,潘琴龙,郑斯华,等. 长周期形变波及其所反映的短期和临震地震前兆[J]. 地震学报, 1984,6(1):41-56.