

大气环境变化对地壳形变观测的影响研究*

孙伶俐^{1,2}, 李 明^{1,2}, 龙 涛³

(1. 中国地震局地震研究所 (地震大地测量重点实验室), 湖北 武汉 430071; 2. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430071;
3. 华中科技大学 网络与计算中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 采用2003~2013年湖北省数字化地壳形变潮汐分钟值资料, 利用小波分析方法, 对地壳形变观测数据对大气环境变化各影响因素(大气压强、温度、降雨、台风及日食活动)的响应规律进行了研究。结果表明: 近地表大气环境因素对形变观测数据的影响频段各不相同。大气压强和温度对形变观测的影响频段主要集中在较低频段(64~128 min); 降雨的影响主要集中在0~全日波(0~32 min)范围内, 且存在高频、非潮汐成份。而台风在形变观测较高频段上有明显影响, 频段分布在1~4 s和2~4 min之间。黄梅台应变观测对2009年日食事件在128~256 min低频段上有响应。

关键词: 大气环境变化; 地壳形变; 潮汐异常; 小波分析; 响应频段

中图分类号: P315.725 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)03-0412-07

0 前言

大气压强波动引起气体通过地表上下运移(何方璇等, 2008), 宏观上造成地面负荷的增减变化, 微观上造成岩体孔隙压力的变化, 从而影响力地壳形变观测值(周龙寿等, 2008), 量级可达 10^{-9} (胡小刚等, 2010)。大气温度变化对形变潮汐观测的影响一般反映台址条件受地温的控制。而短时大气温度变化对定点形变观测产生影响的物理解释尚不明确, 吕品姬等(2010)认为大幅温度变化会引起台站周围地表介质微变形, 而易帆(1997)认为其原因为来自大气层结不稳定或外来振荡的激发而造成的声重力波浮力振荡引起。

降雨对形变观测的影响情况复杂(陈德福等, 1993; 王梅等, 2003; 马栋等, 2011), 与许多外界条件和初始条件有关, 包括土层的膨胀和变形以及降雨量的大小和持续时间, 还与地形地貌、地下径流、渗透率、孔隙率以及初始含水量有密切的关系。

台风也可能导致地壳脉动增强, 使地壳形变

仪器能够观测到高频异常信号, 并且台风对地壳形变的影响与台风中心位置、移动速度有关。胡小刚等(2010)和李杰等(2009)利用形变观测数据发现台风与地壳脉动增强存在潜在关系; 张燕等(2012)和吕品姬等(2011)利用超宽频带地震仪观测资料得出观测数据受到台风和地震影响明显, 且影响频段不同的结论。

地应变、地倾斜等定点形变测量指标能直接反映地壳介质的微动态变化, 捕捉到地壳介质破裂前的力学变化信息, 观测变化量级在 10^{-6} ~ 10^{-10} 间, 适用于监测地震的中短和短临阶段的前兆(陈运泰, 2009; 蒋海昆, 2005; 张雁滨等, 2002)。湖北省形变台网多年观测结果表明, 潮汐观测受气象因素干扰概率较高, 影响机理复杂, 对其判定与识别困难。我们选择背景噪声比较低、观测项目齐备的台站, 对干扰形态进行系统总结, 寻找规律, 分析成因, 对前兆异常识别、提高异常信度具有重要意义。

1 研究区及资料的选取

湖北省形变台网现有固定台站7个、观测点9

* 收稿日期: 2013-05-24.

基金项目: 2013年武汉市科技计划项目[2013060501010166]、2013年中国地震局三结合课题(1829-02)、中国地震局2011、2012年度震情跟踪合同制项目(2011020205、2012020304)和2009年中国地震局地震研究所所长基金(IS200946086)联合资助。

表 1 湖北省形变台网固定测点主要仪器基本参数统计表

Tab. 1 Statistics of basic parameters of main instruments at the fixed stations in Hubei crustal deformation network

测点名	台基地质条件	测项	在运行仪器	仪器数合计	观测起始时间
武汉九峰台	泥盆系五通组石英砂岩	重力、钻孔倾斜	DZW、CZB-1	2	2007
武汉狮子山台	泥盆系中原层石英砂岩	水管倾斜、摆式倾斜、洞体应变	DSQ、VS、SS-Y	3	2007
宜昌地震台	白垩系下统石门组砾岩	重力、水管倾斜、摆式倾斜、洞体应变、钻孔应变	DZW、DSQ、VS、SS-Y、YRY-4	5	2001
麻城地震台	大别期混合花岗岩	水管倾斜、摆式倾斜、洞体应变、钻孔应变	DSQ、VS、SS-Y、YRY-4	4	2001
黄梅地震台	燕山期花岗岩	重力、水管倾斜、洞体应变	DZW、DSQ、SS-Y	3	2001
襄樊地震台	三迭系厚层灰岩	钻孔应变	YRY-4	1	2007
黄石地震台	二叠系下统硅质灰岩	地倾斜、洞体应变	DSQ、SS-Y	2	2007
十堰地震台	元古界武当群片岩	重力、地倾斜、洞体应变	DZW、DSQ、SS-Y	3	2007

个。观测项目包括地倾斜、洞体应变、钻孔应变、台站重力等，观测仪器有 DSQ 型水管倾斜仪、VS 型垂直摆倾斜仪、CZB-1 竖直摆倾斜仪、SS-Y 型钢瓦棒伸缩仪、YRY-4 型分量式钻孔应变仪、DZW 型微伽重力仪等。湖北省形变台网固定观测点分布如图 1 所示，笔者选择其中观测质量较高的鄂西的十堰、宜昌和鄂东的麻城、黄梅、武汉等台站资料进行研究分析。

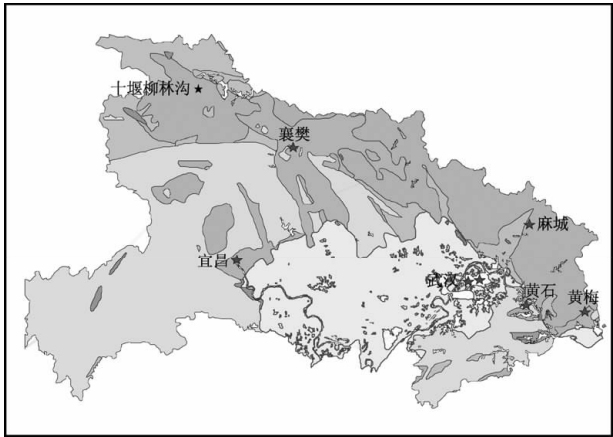


图 1 湖北省形变台网固定观测点分布图

Fig. 1 Distribution of the fixed stations in Hubei crustal deformation network

2 利用小波方法分析形变潮汐对大气环境影响因素的响应特征

在 2003 ~ 2013 年湖北省数字化形变观测中，

多次发生气压、温度、降雨、台风等大气环境变化典型事件。观测数据受到影响后会发生突跳、阶变、抖动、震颤、速率/幅度增大或减小等多种异常变化。应用 db 小波方法对数字化前兆观测资料进行细节分解，对其中不同频率的潮汐波信息进行识别与分析，能清晰地辨别固体潮畸变信息成分，有利于进行地震前兆异常或者干扰的深度认识（尹继尧，朱元清，2013）。

2.1 气压影响

气压对湖北省形变观测的影响表现为观测数据在高压与低气压控制下产生的不同变化。高压时区内气流辐散，中心盛行下沉气流，在曲线上反映为抖动（图 2a）。而低压时地面中心的气压低，中心盛行上升气流，通常伴随有降水发生，此时潮汐响应形态为颤动（图 2b）。从响应形态上来看，前者很可能是地表气压波动造成地面负荷变化的微观反映，后者是受洞腔内空气振荡引起气流扰动在潮汐观测上的响应（陈德福等，1993；李希亮，2008）。图 2c、d 中观测资料小波分析结果显示，观测数据分钟值在 64 ~ 128 min 频段与高低气压同频段数据变化特征对应。

2.2 气温影响

2012 年 11 月 4 ~ 7 日麻城台的垂直摆倾斜观测 NS 分量分钟值原始数据出现间隔抖动（图 3a），经核实观测环境无异常、无人为干扰、无降雨发生，仪器运行状况正常，当地气温最高 21.1℃，最低 -1.9℃，温差达 23℃。将倾斜观测量、温度、气压分钟值共同进行小波分解（图 3b），结果显示 NS 分量数据在 64 ~ 128 min 频段

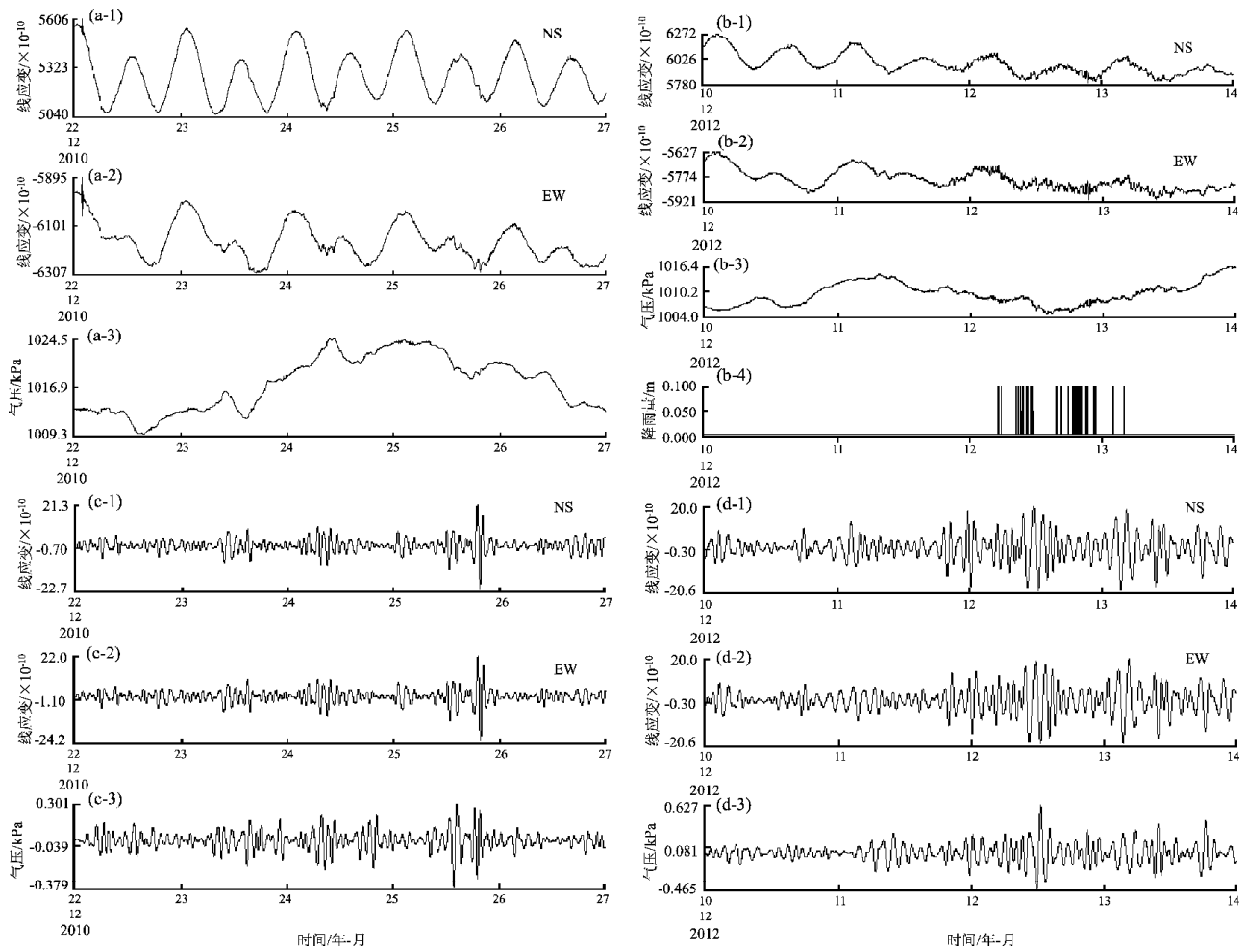


图2 麻城台洞体应变仪观测数据受气压变化的影响

(a) 高压无降水 (2010-12-22~26); (b) 低压有降水 (2010-12-10~13); (c) 小波方法处理后细节 (2010-12-22~26); (d) 小波方法处理后细节 (2010-12-10~13)

Fig. 2 Response for atmospheric variation on minute value data recorded by cave stain meter at Macheng Station
(a) high pressure without rainfall; (b) low pressure with rainfall; (c) the details processed by wavelet method;
(d) the details processed by wavelet method

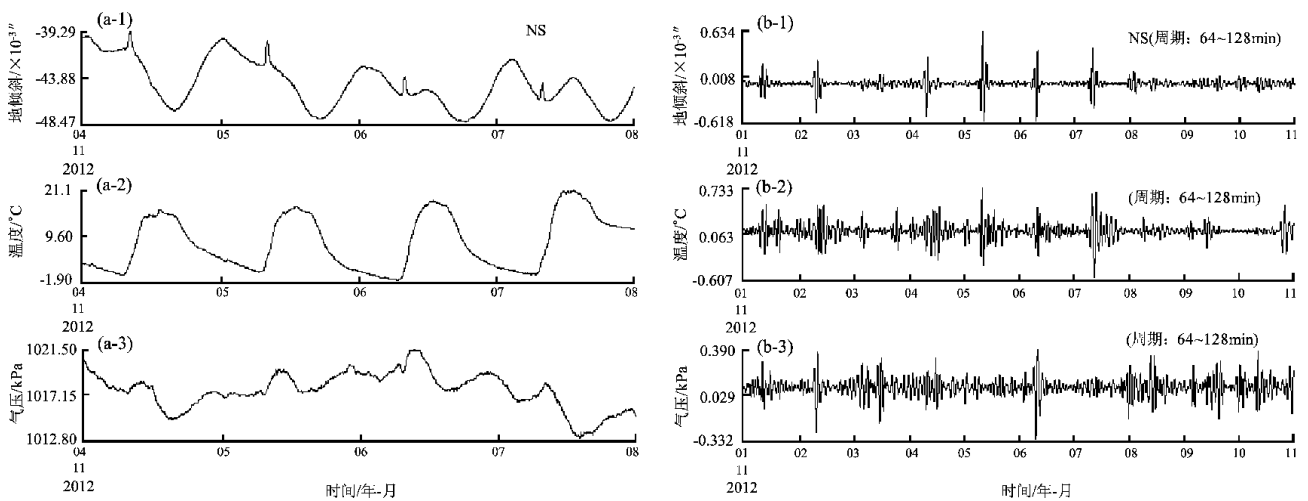


图3 麻城台地倾斜观测分钟值曲线受气温变化的影响

(a) 垂直摆 NS 分量分钟值 (2012-11-04~07); (b) 小波分析提取细节 (2012-11-01~10)

Fig. 3 Response for temperature variation on minute value data recorded by tiltmeter at Macheng Station
(a) minute value data in NS component recorded by vertical pendulum tiltmeter; (b) the details processed by wavelet method

出现高频抖动,与温度值同频段结果在形态和时间保持一致,而与气压值细节无明显对应。因此该扰动现象与温度变化存在明显相关,也有可能是某种其他干扰源造成观测曲线和温度在特定频段出现同步变化,其机理解释还待进一步明确。类似的情况在2011年9月宜昌台垂直摆、2013年4月黄石台水管仪的地倾斜观测中也发生过,据查当时均无其他干扰源。

2.3 降雨影响

2007~2013年湖北省武汉、黄石、麻城等台站的地倾斜、地应变类仪器对降雨因素的响应表现十分敏感,影响时段大部分集中在每年的4~8月间,畸变形态多为抖动或阶变。

武汉台地倾斜、地应变观测受降雨影响后,潮汐观测值发生阶变,且幅度较大,随着降雨的发生或停止会持续1~2 d(图4);结合该台站的地理位置发现降水渗透和周边湖水水位变化共同对数据产生影响(孙伶俐等,2010)。

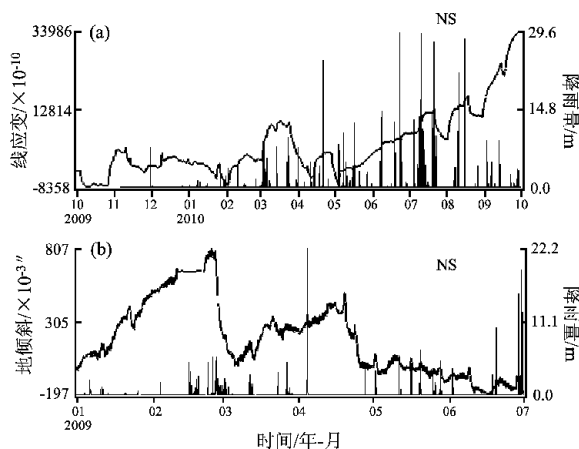


图4 武汉台地倾斜、地应变观测分钟值受降雨的影响

(a) 洞体应变仪整时值曲线(2009-10-01~2010-09-30);(b) 垂直摆倾斜仪整时值曲线(2009-01-01~2009-06-30)

Fig. 4 Response for rainfall on minute value data recorded by tiltmeter and strain meter at Wuhan Station

(a) hour value data recorded by cave strain meter; (b) hour value data recorded by vertical pendulum tiltmeter

麻城台地应变观测随降雨的发生同步抖动,分钟值曲线日变规律发生改变,并伴随有高频成份,速率与加速度也有所改变(图5a)。通过小波分解发现(图5b),应变观测分钟值对降雨在2~

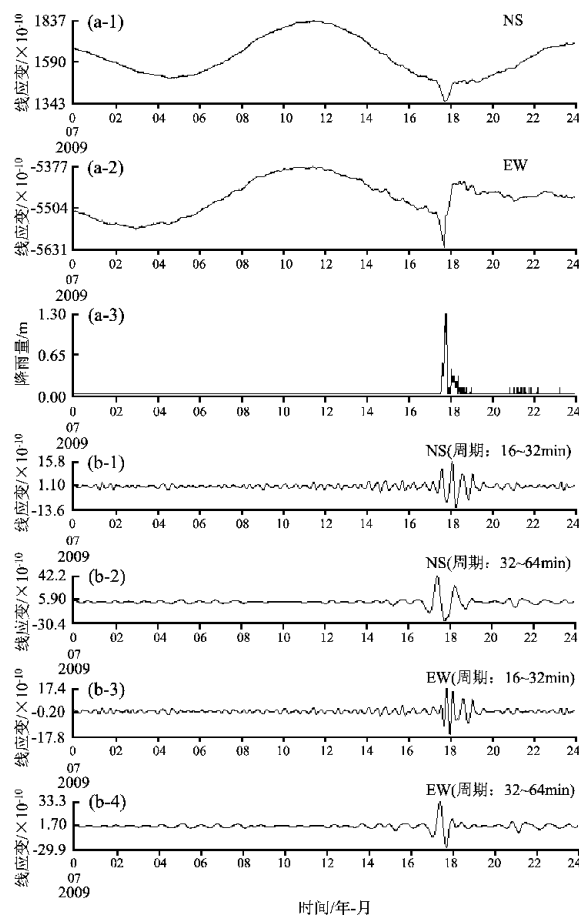


图5 麻城台洞体应变仪分钟值曲线受降雨的影响

(a) 洞体应变仪分钟值曲线(2009-07-05);

(b) 小波分析提取细节

Fig. 5 Response for rainfall on minute value data recorded by cave strain meter at Macheng Station

(a) minute value data recorded by cave strain meter;

(b) the details processed by wavelet method

4阶即0~全日波频段上响应明显,且伴随有高频与非潮汐成份。

2.4 台风影响

位于鄂东的黄梅、鄂西的宜昌等形变观测台站数据都曾受到过台风影响。在垂直摆倾斜仪(VS/VP)的观测数据中均有不同程度响应,响应频段有秒值和分钟值。

(1) 台风对秒值采样观测数据有明显影响

在2007年4月21~25日台风“浣熊”登陆期间,黄梅VP型垂直摆倾斜仪的观测数据受到影响,数据出现明显抖动(图6a)。利用小波方法处理后(图6b),发现数据在1~2s和2~4s频段上对台风响应强烈,形态呈纺锤状,过程非常清晰。

(2) 台风对分钟值采样观测数据产生微震颤信号

2011 年 5 月 28 ~ 29 日, 我国海域出现“桑达”台风, 宜昌台 VS 型垂直摆分钟值观测曲线出现与台风同步的持续微震颤信号 (图 7a)。用相同小波方法提取后 (图 7b), 在 2 ~ 4 min 频段上数据对台风的响应明显, 响应形态也呈纺锤状, 但表征不如秒采样数据响应清晰。

2.5 日食事件

在 2009 年 7 月 22 日日全食发生时, 黄梅台洞体应变仪 NS/EW 分量分钟值原始数据的小波分析结果在 128 ~ 256 min 频段出现暂态波动 (图 8a), 与当地气温的小波分析结果有对应, 但未构成趋势性持续变化。当地气温最高 37.6 °C, 最低 26.6 °C, 温差达 11 °C。当地温度和气压有波动变化, 无其他或人为干扰, 除黄梅台洞体应变仪外其他仪器并未发生同步异常 (图 8b) (吕品姬等, 2010)。

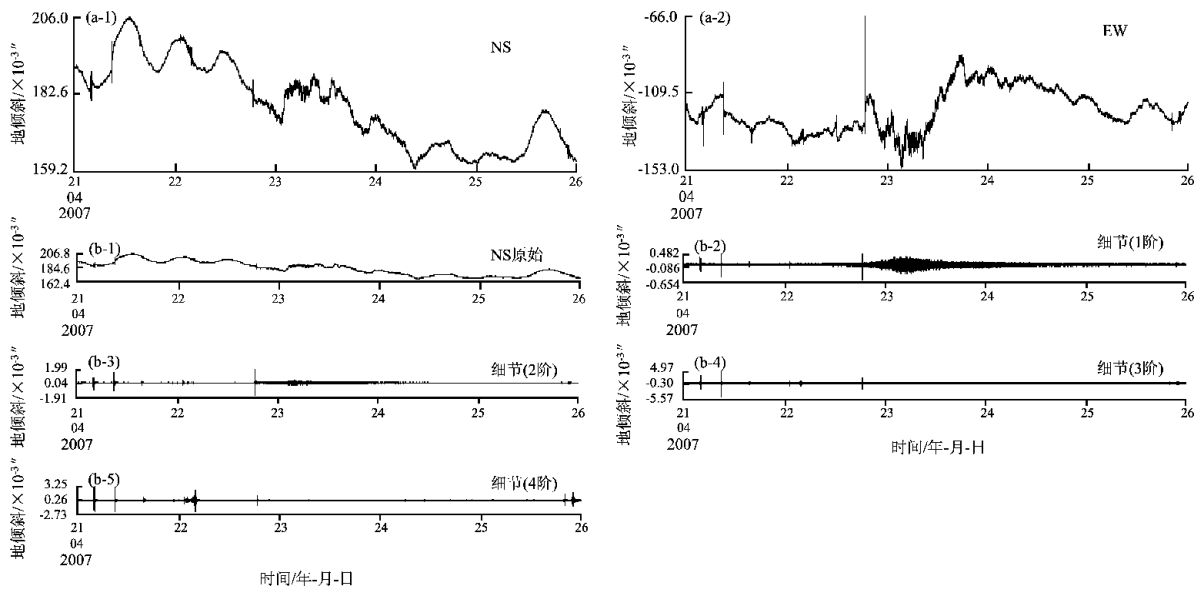


图 6 黄梅台垂直摆倾斜仪秒值观测数据受台风影响

(a) VP 仪秒值; (b) 小波方法处理后细节

Fig. 6 Response for typhoon on second value data recorded by vertical pendulum tiltmeter at Huangmei Station

(a) second value data of VP; (b) the details processed by wavelet method

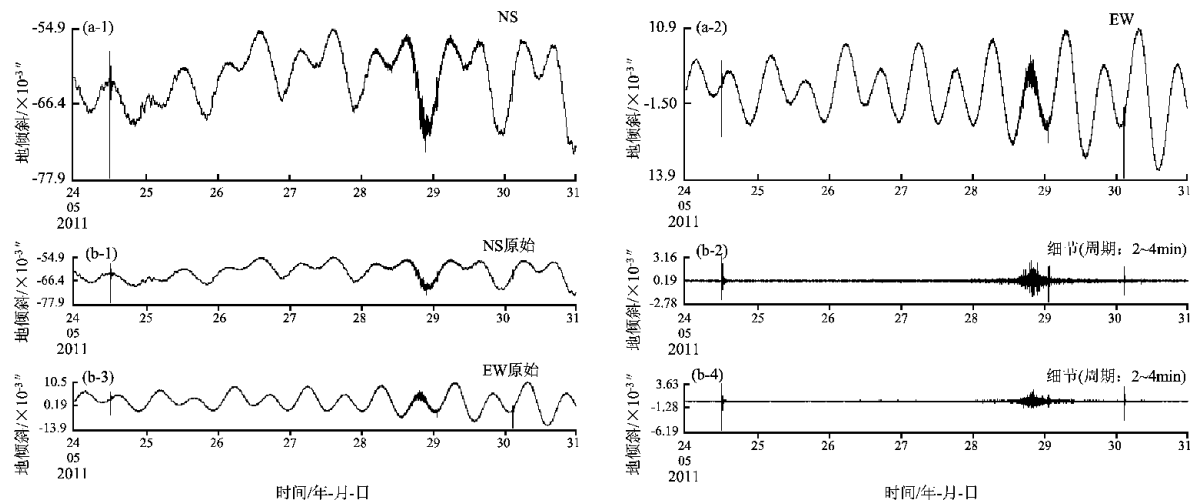


图 7 宜昌台垂直摆倾斜仪分钟值观测数据受台风影响 (2011-05-24 ~ 30)

(a) VS 仪分钟值; (b) 小波方法处理后细节

Fig. 7 Response for typhoon on minute value data recorded by vertical pendulum tiltmeter at Yichang Station

(a) minute value data of VS; (b) the details processed by wavelet method

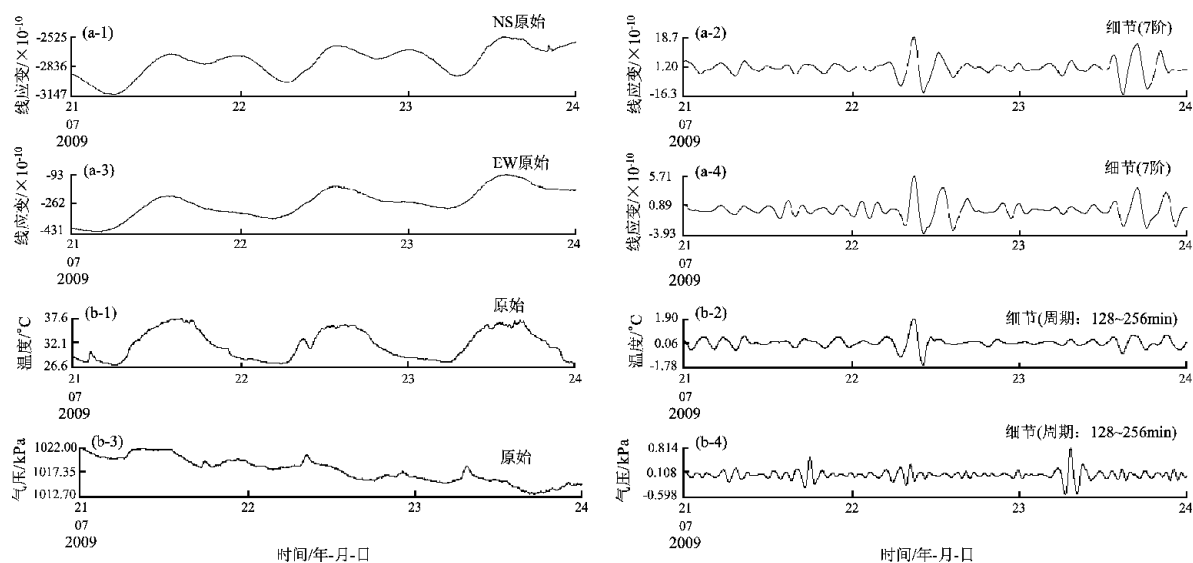


图8 日食活动期间黄梅台线应变观测资料受温度影响

(a) 洞体应变仪分钟值小波分析结果；(b) 气温、气压观测分钟值小波分析结果（2009-07-21~23）

Fig. 8 Response for temperature disturbance on line strain data at Huangmei Station during the solar eclipse event

(a) the details of line strain curves processed by wavelet method; (b) the details of temperature and atmospheric curves processed by wavelet method

3 结论

大气环境变化对2003~2013年湖北省形变观测产生影响，典型影响因素有气压、气温、降雨、台风等，对形变潮汐观测产生的影响机理复杂，形态多样，频段分布不同。

(1) 高气压场控制时，潮汐观测曲线发生抖动；在低气压场控制多伴随降水发生时，观测曲线出现颤动；观测数据对高/低气压响应频段相同，均在64~128 min之间。

(2) 短时大气温度变化会对定点形变观测产生扰动。2012年11月4~7日麻城台垂直摆NS分量在64~128 min频段出现高频抖动，与温度数据相同频段细节保持较好对应。明确的机理解释还需进一步研究。

(3) 降雨会使形变观测产生潮汐阶变并伴随高频、非潮汐成份影响。在0~32 min的全日波范围内均有不同程度响应。

(4) 台风产生的高频信号在分钟和秒值采样形变仪器中均能记录得到。小波方法处理结果显示，秒钟值数据在1~2 s和2~4 s频段、分钟值在2~4 min频段上对台风的响应明显，响应形态呈纺锤状，影响形态为抖动或震颤。

(5) 黄梅台洞体应变观测数据对2009年7月22日日全食有响应，小波分解结果显示分钟值在128~256 min频段出现暂态波动。

参考文献：

- 陈德福, 罗荣祥, 刘国培. 1993. 地壳形变动力学观测与研究——倾斜异常图象分类及其特征浅析[M]. 北京: 海洋出版社.
- 陈运泰. 2009. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学(D辑): 39(12): 1633-1658.
- 何方璇, 李海龙, 郭巧娜, 等. 2008. 试论大气压波动引起的地表呼吸[J]. 地下水, 30(5): 34-36.
- 胡小刚, 郝晓光, 薛秀秀, 等. 2010. 汶川大地震前非台风扰动现象的研究[J]. 地球物理学报, 53(12): 2875-2886.
- 蒋海昆. 2005. 重视预报过程反思提高地震预测水平[J]. 国际地震动态, (5): 151-153.
- 李杰, 卢双苓, 殷海涛, 等. 2009. 泰安重力观测高频波动信号分析[J]. 西北地震学报, 31(3): 265-271.
- 李希亮. 2008. 山东形变固体潮数字化资料的干扰因素分析[J]. 高原地震, 20(3): 36-41.
- 吕品姬, 赵斌, 陈志遥, 等. 2010. 2009年日全食期间黄梅台的固体潮扰动[J]. 大地测量与地球动力学, 30(增刊): 116-119.
- 吕品姬, 赵斌, 陈志遥, 等. 2011. 一种新的固体潮观测数据特征量提取方法[J]. 大地测量与地球动力学, 31(2): 76-79.
- 马栋, 牛安福, 袁淑芳, 等. 2011. 据频谱特征分析短时气压波动对体应变的影响[J]. 内陆地震, 25(3): 255-262.
- 孙伶俐, 罗俊秋, 龙涛, 等. 2010. 大气降水对数字化地倾斜观测干扰特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 30(增刊): 105-110.

- 王梅,宋治平,李峰,等. 2003. 形变数字化资料综合分析[J]. 大地测量与地球动力学,23(4):60-64.
- 易帆. 1997. 中高层大气重力波的研究——辨明近地空间环境扰动的关键过程[J]. 中国科学基金,3(1):195-200.
- 尹继尧,朱元清. 2012. 上海佘山钻孔形变观测资料正常背景噪声变化特征分析[J]. 地震研究,35(1):36-41.
- 张雁滨,蒋骏,钱家栋,等. 2002. 地壳介质微形变异常与强震短临前兆[J]. 地震学报,24(1):103-108.
- 张燕,吴云,吕永清,等. 2011. 超宽频带地震计观测到的汶川地震震前异常[J]. 大地测量与地球动力学,31(1):15-18.
- 周龙寿,邱泽华,唐磊. 2008. 地壳应变场对气压短周期变化的响应[J]. 地球物理学进展,23(6):1717-1726.

Research on Influence of Atmospheric Environmental Change on Crustal Deformation Observation

SUN Ling-li^{1,2}, LI Ming^{1,2}, LONG Tao³

(1. Key Laboratory of Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China)

(2. Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan 430071, Hubei, China)

(3. Network and Computing Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract

Tidal minute value data of digital crustal deformation in Hubei province from 2003 to 2013 are applied to analyze the response rule of observational crustal deformation on influence factor of atmospheric environmental change (atmospheric pressure, rainfall, typhoon and solar activity) by wavelet transform analyze method. The research results show that the influence of near surface atmospheric environmental factors on deformation observation data has the different characteristic in different frequency. The influence frequency of atmospheric pressure and temperature on deformation observation data mainly concentrates in low frequency range (64 ~ 128 min). The tidal data respond to rainfall mainly concentrates in frequency spectrum from 0 to diurnal wave (0 ~ 32 min) along with high frequency noise and non-tidal components. The influence of typhoon on tidal data is significant in high frequency spectrum of 1 ~ 4 s and 2 ~ 4 min. The strain observation data responds to the eclipse in low frequency (128 ~ 256 min) at Huangmei station in 2009.

Key words: atmospheric environmental change; crustal deformation; tidal anomalies; wavelet analysis; response spectrum