

张肖, 云萌, 刘思宇, 等. 宽城地震台地倾斜观测的气压响应分析及排除[J]. 华南地震 2023, 43(1): 70–79. [ZHANG Xiao, YUN Meng, LIU Siyu, et al. Analysis and Elimination of Influence of Air Pressure on Ground Tilt Observation at Kuancheng Seismic Station[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(1): 70–79]

## 宽城地震台地倾斜观测的气压响应分析及排除

张肖<sup>1,2</sup>, 云萌<sup>1</sup>, 刘思宇<sup>1</sup>, 王虹宇<sup>1</sup>, 韩静<sup>3</sup>

(1. 雄安新区震灾预防中心, 河北 雄安 071700; 2. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 昆明 650500;  
3. 河北省地震局流动测量队, 河北 保定 071000)

**摘要:** 将宽城地震台地倾斜观测和气压观测数据, 通过小波变换分析提取气压对地倾斜观测的干扰时段, 再对气压干扰时段观测数据进行线性拟合去趋势、别尔采夫滤波获得观测数据的日漂移信息, 最终获得地倾斜观测和气压观测的相关系数, 通过线性拟合进行气压干扰的排除研究。结果表明: 宽城台地倾斜观测与气压观测具有正相关性, 通过此方案对地倾斜观测受气压干扰的观测数据进行干扰排除, 可以取得较好的效果, 提高观测数据可靠程度。

**关键词:** 地倾斜观测; 气压干扰; 线性相关; 回归模型

中图分类号: P315.73

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)01-0070-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.01.09

## Analysis and Elimination of Influence of Air Pressure on Ground Tilt Observation at Kuancheng Seismic Station

ZHANG Xiao<sup>1,2</sup>, YUN Meng<sup>1</sup>, LIU Siyu<sup>1</sup>, WANG Hongyu<sup>1</sup>, HAN Jing<sup>3</sup>

(1. Xiong'an Earthquake Disaster Prevention Center, Xiong'an 071700, China; 2. Faculty of Public Security and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
3. Mobile Survey Team of Hebei Earthquake Agency, Baoding 071000, China)

**Abstract:** Based on the data of ground tilt observation and air pressure observation at Kuancheng Seismic Station, this paper analyzes and extracts the interference period of air pressure to ground tilt observation by using wavelet transform method. Then, the daily drift information of the observation data is obtained by linear fitting detrending and Perstev's filtering during the air pressure interference period. Finally, the correlation coefficient between ground tilt observation and air pressure observation is obtained, and the air pressure interference is eliminated by linear fitting. The results show that there is a positive correlation between the ground tilt observation and air pressure at Kuancheng Station. By using this scheme to eliminate the interference of the observation data of the ground tilt observation interfered by the air pressure, a better effect can be obtained and the reliability of the observation data can be improved.

**Keywords:** Ground tilt observation; Air pressure disturbance; Linear correlation; Regression model

收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 河北省地震局地震科技星火计划(DZ20190419023、DZ2021121600008)联合资助

作者简介: 张肖(1986-), 女, 工程师, 从事地震前兆监测及分析预报工作。

E-mail: 412567276@qq.com

## 0 引言

我国目前广泛应用的地倾斜观测仪器灵敏度可达到 $10^{-9}$  rad<sup>[1]</sup>,足以探测到固体潮引起的微小变化,以期捕捉到地壳介质破裂前的力学变化信息<sup>[2]</sup>。地倾斜观测仪器一般安装于山洞内,由多道密封门隔绝与外界空气的流通,但仍不可避免受温度、气压、降水、大风及人类活动等影响。各类干扰因素的作用机制各异并相互影响,使前兆观测数据的质量和可靠程度降低。

国内外学者对大气环境变化与形变观测的响应进行了大量研究。国内学者孙伶俐等利用小波分析对地形变观测资料分析,发现气压和温度对形变干扰的影响频段不同,气象因素对形变潮汐观测的影响复杂<sup>[2-3]</sup>;邢喜民、徐璐等通过小波分析将形变观测和气压观测数据进行相关性分析,提出二者为线性相关<sup>[4-5]</sup>;曹建玲等利用有限元方法,将气温变化对地应力和地倾斜的变化量进行估算,提出地形可造成温度变化,进而影响观测数据<sup>[6]</sup>;何方璇、周龙寿等学者认为,大气压强波动引起气体通过地表上下运移,造成地面负荷的增减变化,微观上造成岩体孔隙压力变化,从而影响地壳形变观测<sup>[7-8]</sup>;李峰等认为大风对地倾斜观测有很大影响,强劲、持续的大风可能对山体施加作用力,岩体受力改变也会影响观测资料<sup>[9]</sup>。尹继尧、狄樑等也对气象因素干扰特征进行研究<sup>[10-11]</sup>。通过专家学者对大气环境变化的干扰形态、频段及机理等研究,对干扰因素排除提供了丰富的基础工作。何应文、郑永通等通过降雨对垂直摆的影响分析,并探索采用一元线性回归进行降雨干扰排除<sup>[12-13]</sup>;徐甫坤等提出,前兆观测中干扰通常具有宽频带分布、不同因素交叉影响等特征,简单的高频滤波不适合干扰因素有效排除,并提出局域化的相关分析技术(Local-CC)用于温度对洞体应变观测的干扰排除研究<sup>[14]</sup>。

综合前人研究发现,对干扰因素的特征分析较多,对如何有效排除干扰因素研究较少。而河北省形变台网多年观测表明,地倾斜观测受气象因素干扰较大,不同频段的影响特征及其排除方法也不尽相同,因此如何降低观测值中不同频段干扰水平,或消除各种干扰因素,成为学者们探究的方向。宽城地震台是河北省形变台站中一个形变综合台,其观测资料受气象因素干扰较大。因此,对干扰规律的识别并进行相应的排除,是

合理数据分析和准确识别地震前兆异常的前提和基础。本文对宽城台地倾斜观测与气压观测数据进行定量分析,发现地倾斜观测与气压呈正相关,通过线性拟合去趋势、别尔采夫滤波、回归模型进行气压干扰排除,对干扰因素识别及干扰因素排除有较好的效果。

## 1 台站简介

河北省形变台网现有固定台站11个,宽城地震台为其中定点形变台(见图1、图2)。宽城地震台位于河北省承德市宽城县宽城镇岔沟路,海拔310 m,属燕山构造带,受马兰峪大背斜控制,位于宽城盆地边缘<sup>[15-16]</sup>。台基岩性为震旦系硅质灰岩,走向近EW,沿节理透水,地貌上为高山区。目前安装形变仪器共有5套,分别为DSQ型水管倾斜仪、SS-Y型伸缩仪、VS型垂直摆倾斜仪、VP型垂直摆倾斜仪、TJ-2型体应变仪,并且安装有辅助观测气象三要素仪;其中水管倾斜仪、伸缩仪、及两种型号垂直摆仪均安装于形变山洞内(见表1),体应变仪和气象三要素仪安装于距形变山洞100 m的台站院内。仪器所处山洞覆盖层厚度为20~40 m,有少量植被覆盖,洞内年温差为0.5℃。自建台以来,各监测仪器观测资料质量较好,仪器观测精度高,但自然环境干扰对观测仪器影响较大。

在对宽城台观测资料评价时发现,宽城台地倾斜观测资料干扰因素中,气压干扰出现频率较高。因此本文选取2013—2018年间,宽城台地倾斜观测资料受气压干扰较为明显的时段进行分析研究,通过小波分析找到气压干扰明显时段,通过线性拟合、别尔采夫滤波、回归分析方法进行干扰分析和排除研究,以期将观测资料中干扰因素排除,对观测数据分析、前兆异常识别、提高异常信度具有重要意义。

## 2 研究方案

根据时间序列分解理论提出,原始的时间序列中包含了仪器记录的固体潮汐变化、仪器零漂、年变趋势、季节变化影响、不规则干扰等信息<sup>[14]</sup>。本文基于地倾斜和气压的观测资料进行分析,选取的研究方法为:

(1)判定数据异常频段。应用小波分析或观测资料对比法找到气压干扰时段,估计数据异常的特征频段;

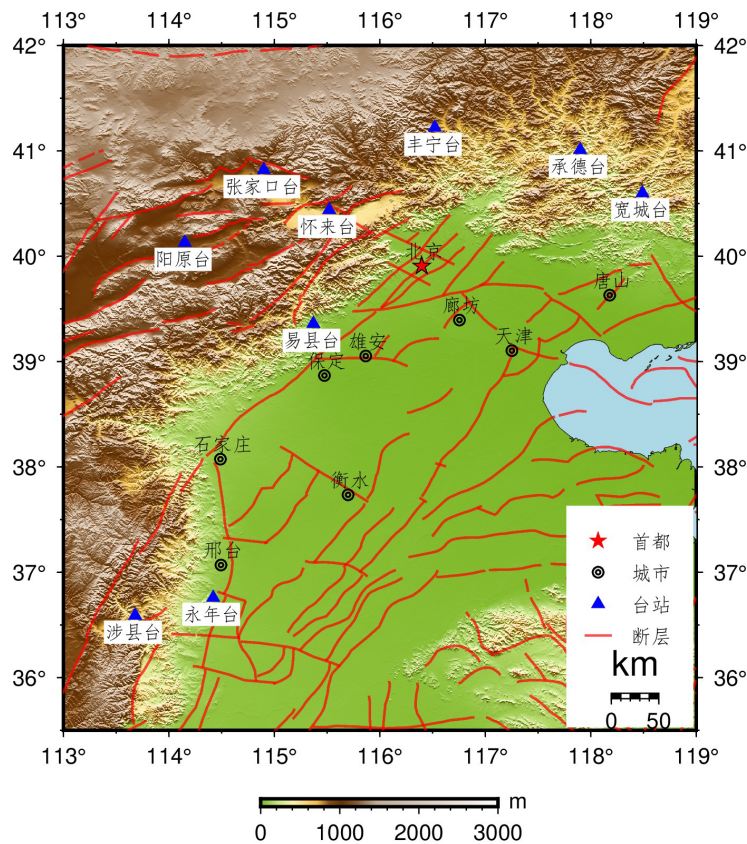


图 1 河北形变台网地倾斜观测分布图

Fig.1 Distribution of the ground tilt observation in Hebei deformation network

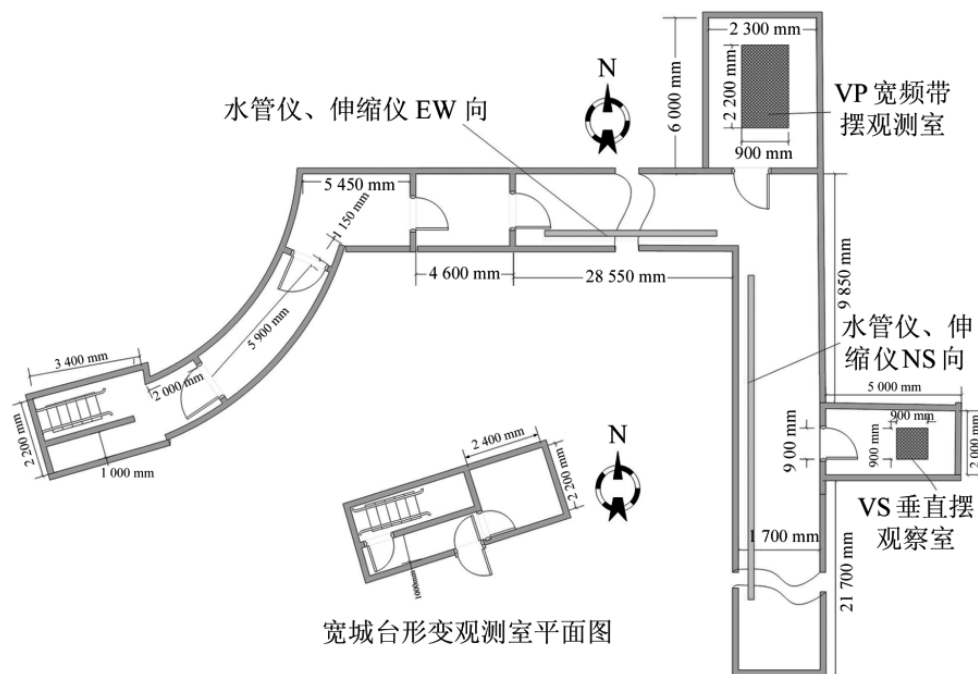


图 2 宽城台仪器布设图

Fig.2 Instrument layout of Kuancheng Station

(2)定量扣除高频段影响。基于地倾斜、辅助测项观测资料的整点值数据，应用线性拟合方法对观测数据去趋势，将去趋势后的数据应用别尔采夫滤波进行潮汐分离，扣除高频段和潮汐成份的影响，以获得地倾斜和辅助测项观测曲线的日漂移信息；



表1 宽城台定点形变仪器基本信息

Table 1 Basic information of fixed point deformation instruments of Kuancheng Station

仪器型号	山洞进深/m	基线长度/m	分辨率
DSQ 水管倾斜仪	75	EW:23.69, NS:28.39	0.000 5"
SS-Y 伸缩仪	75	EW:23.69, NS:28.39	$<1\times10^{-9}$
VS 垂直摆倾斜仪	75	/	0.000 1"
VP 垂直摆倾斜仪	75	/	0.000 1"

(3)估计影响因子。计算地倾斜与辅助测项目漂移信息的相关系数,估计影响因子大小。一般认为当相关系数达到0.5以上存在正相关关系<sup>[17]</sup>,可以使用回归分析定量扣除干扰因素的影响;

(4)数学回归定量扣除干扰:在求解观测值与干扰间的响应系数后,应用相关系数作为权重因子的线性回归模型,从观测值中减去干扰影响,达到定量扣除干扰的目的。

3 气压响应分析及定量排除

由于在前兆观测中,某一干扰在不同时刻对前兆观测值的影响程度不同,因此气压对地倾斜观测的干扰是分时段的<sup>[14]</sup>。为有效排除干扰,相关性较高的时段会起到更为关键的作用。本文为定量化分析干扰在不同时间点上对观测值的影响,通过观测日志查询、绘图分析,选取气压与倾斜观测相关性较好的月份进行处理。通过局域化的相关性分析,评价时间序列在不同时间点的相关性,以找出时间序列相关性较高的时间点。

3.1 气压高频干扰识别

本文结合观测日志、绘图分析、数据跟踪分析等不同方式,选取2017年6月宽城台水管倾斜观测与气压观测曲线为研究对象,发现该时段干扰因素与时间序列的相关性较高。利用小波分析方法对水管倾斜观测的气压响应进行分析,并对不同频段的细节与原始曲线对比(图3),其中6月12日至6月13日宽城台进行装置系统改造,安装防雷设备干扰,存在缺数处理;6月15至6月18日均因调试仪器(调零、标定等)干扰,缺数处理。根据小波分析结果显示,在数据缺失附近存在很多高频成份,这是由于人为干扰因素的影响。由于气象因素影响需要综合考量,虽然2017年6月存在多种人为干扰影响,但其他高频时段与气象三要素观测数据进行对比分析,仍存在较好的同

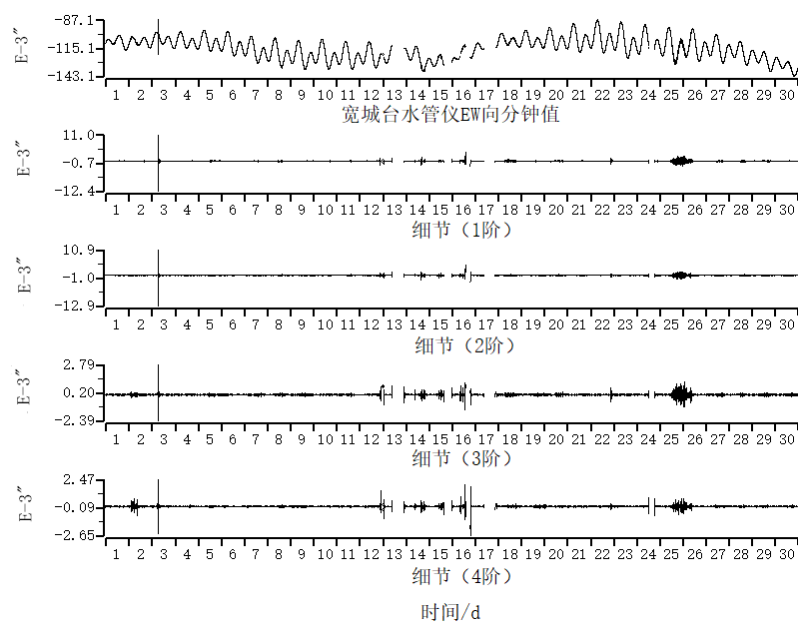
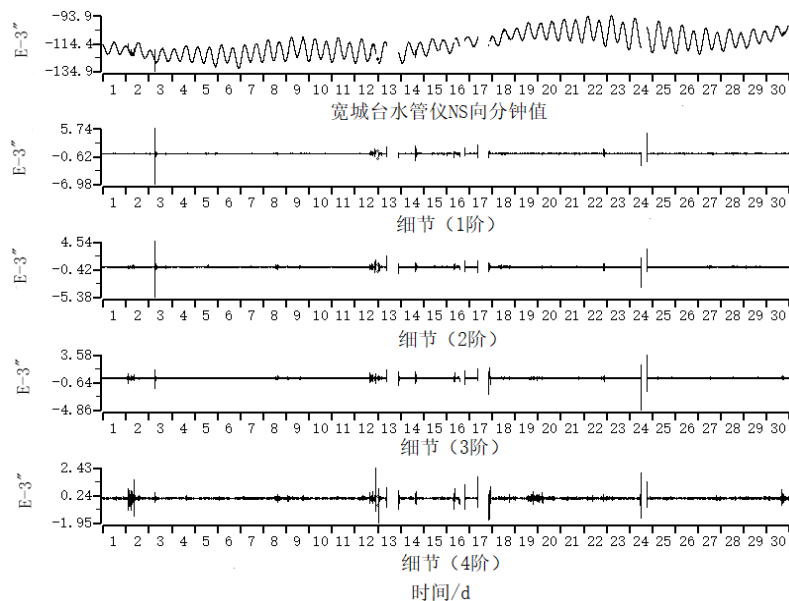
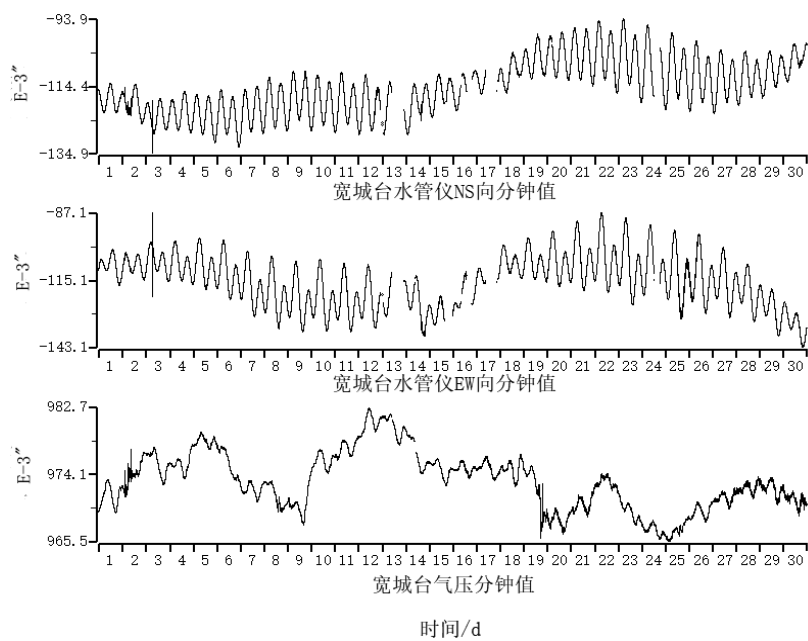
步性。

图3(a)为水管倾斜观测与气压观测的原始分钟值对比图,图3(b)、(c)、(d)分别是对2017年6月不同频段的细节与原始曲线对比图。根据结果可知,2017年6月2日,宽城台水管仪对气压的响应较为明显,且2017年5月10日至2017年6月5日宽城台无降雨,因此排除降雨干扰的影响。水管仪北南向气压干扰频段主要分布在细节2阶以上,东西向气压干扰频段主要分布在细节3阶以上。根据小波分析细节可以看出,宽城台水管倾斜观测两个测项的气压响应变化高度一致,并且受到干扰的细节频段也基本相同。

通过小波分析识别出气压干扰相关性较高的时段后,便可进行气压干扰的定量分析与排除。由于潮汐分离方法仅适用于整点值数据,因此在进行气压干扰排除时需采用整点值进行分析。宽城台地倾斜观测与气压观测整点值对比图(图4),可以看出,气压对水管倾斜观测的影响主要是以短周期干扰为主,观测曲线出现短时畸变,表现为不同幅度的抖动。水管倾斜观测相对气压的变化会呈现同步或短时滞后,且北南向观测曲线受气压干扰较为明显。气压对水管倾斜观测影响较大,需进行干扰因素排除方能进行地震前兆异常的识别与判定。

3.2 气压干扰排除

由于观测仪器传感器的漂移、观测环境干扰等都可能造成系统性偏移。因此通过拟合或参数估计建立数学模型来消除时间序列中的线性趋势,才能更好的对数据进行分析。由于本文侧重对气压干扰的排除分析,因此在去趋势时选择了最常用的线性拟合方法来进行去趋势分析。别尔采夫滤波,是通过滤波的方式将潮汐观测分成由日月引力作用引起的潮汐部分、由仪器零漂引起的高频趋势变化部分及其他干扰因素引起的高频部分等不同周期(或频率)的部分。通过别尔采夫滤波,



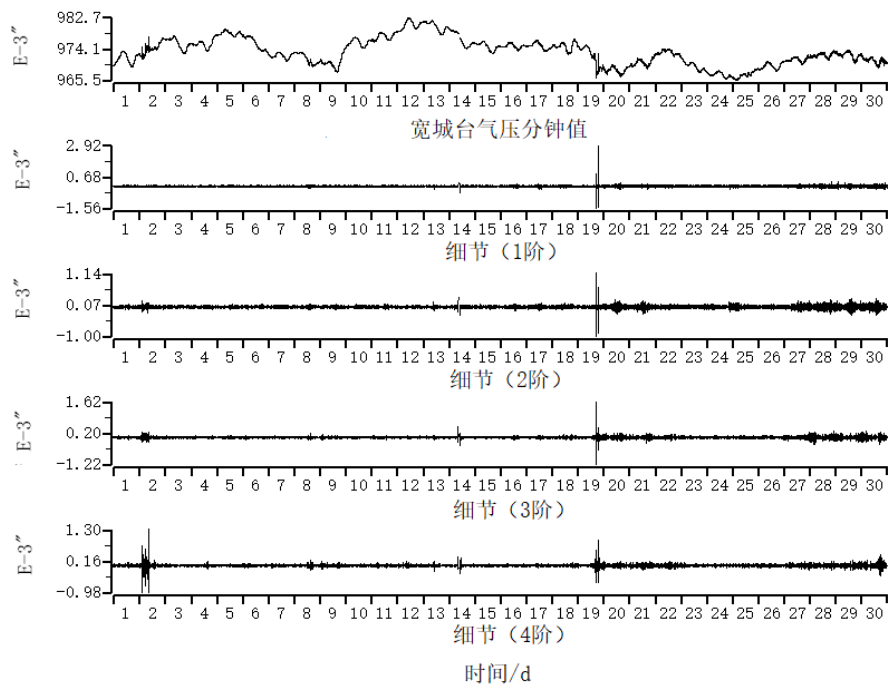


图3 宽城台水管仪观测曲线受气压影响(2017-06)

Fig.3 Influence of air pressure on the observation curve of water-tube tiltmeter at Kuancheng Station (2017-06)

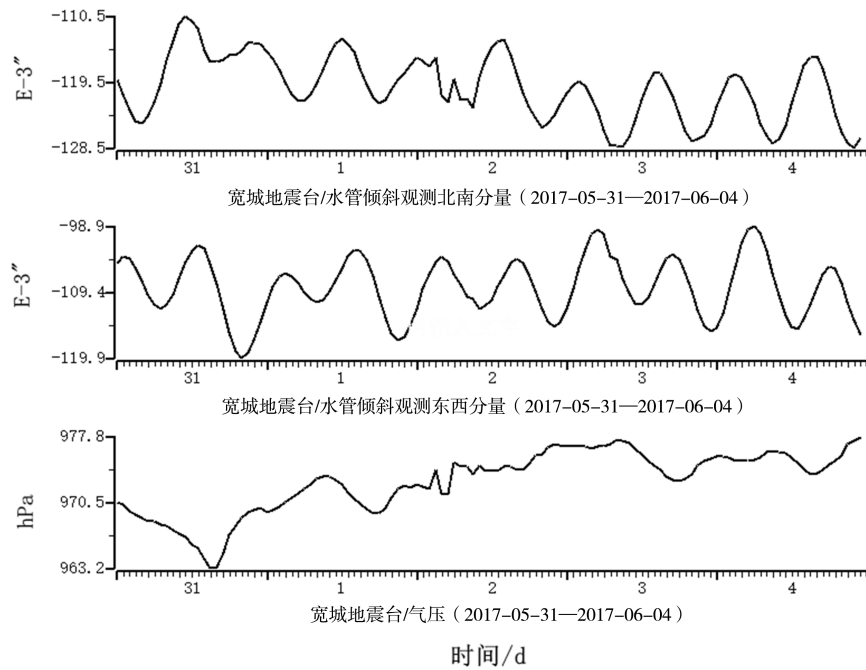


图4 宽城台水管仪受气压干扰曲线

Fig.4 Interference curve of water-tube tiltmeter affected by air pressure at Kuancheng Station

可以消除主要潮波分量和高频干扰,得到日漂移信息。虽然观测数据经过了线性拟合去趋势和潮汐分离获得日漂移信息,但水管仪EW向仍存在明显的线性变化,该线性变化不排除气压以外的其他环境影响或仪器自身原因所致。

找到气压干扰时段后,将该时段水管仪和气

压的整点值观测资料用MAPSIS软件计算出观测曲线的线性趋势,再将观测曲线减去线性趋势获得宽城台水管仪和气压去线性趋势后的结果(图5)。由图5可以看出,线性拟合去趋势后,仅能将仪器的漂移等信息排除掉,气压干扰的影响依然存在,尤其北南较为明显。

应用别尔采夫滤波<sup>[18]</sup>将观测数据进行潮汐分离, 获得水管观测数据和气压观测数据的日漂移信息(图6)。使用别尔采夫滤波能够排除时间序列中较长时段的高频气象干扰成份, 从而获得较平稳的时间序列。这样能够将观测值和干扰在同一

频段的明显响应, 通过合理的滤波方式将长周期的因素进行分离, 这样高频信息不参与线性回归分析, 以保证在最佳的条件求解干扰对测值的相关系数。

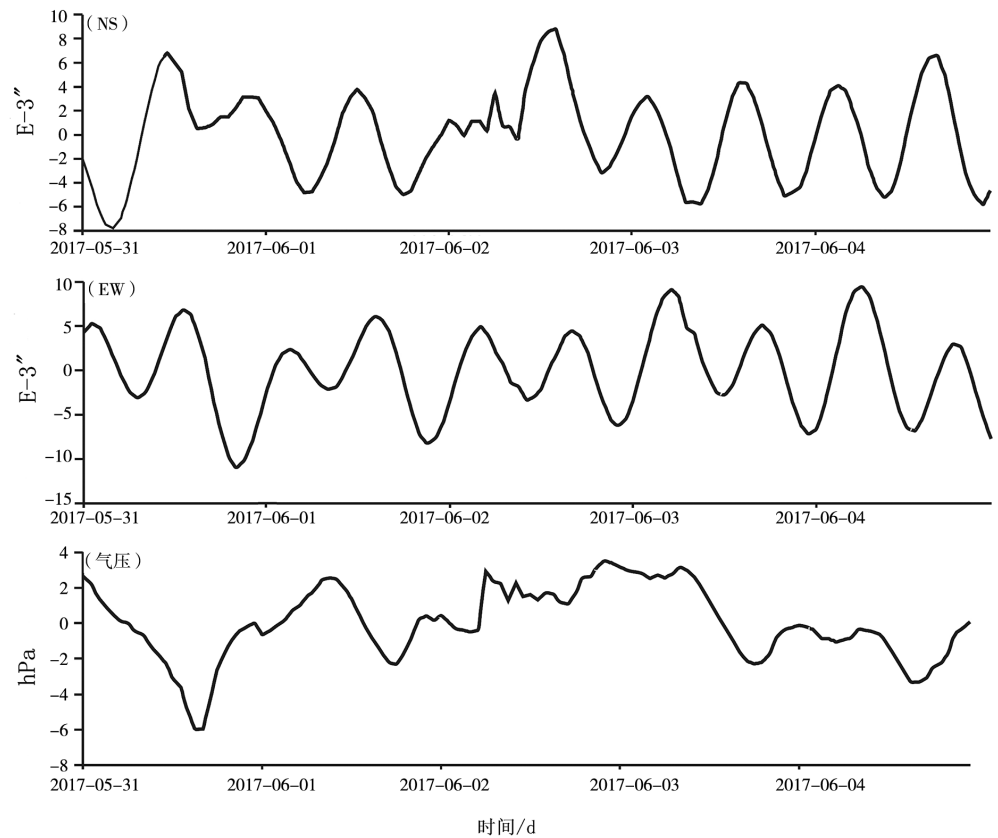


图5 宽城台水管倾斜观测、气压线性拟合去趋势结果  
Fig.5 Linear fitting detrended results of observation of water-tube tiltmeter and air pressure

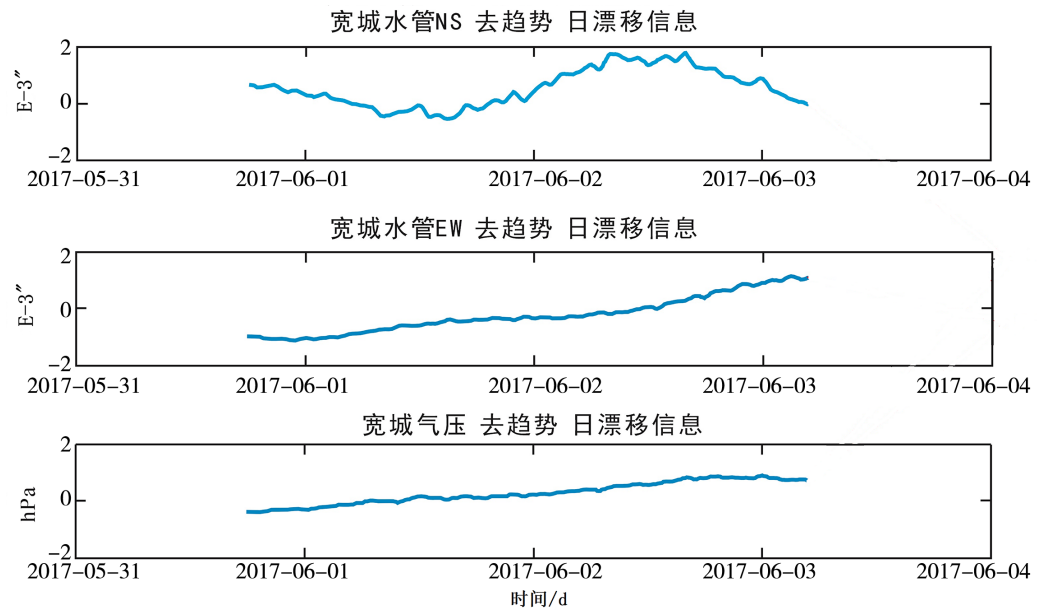
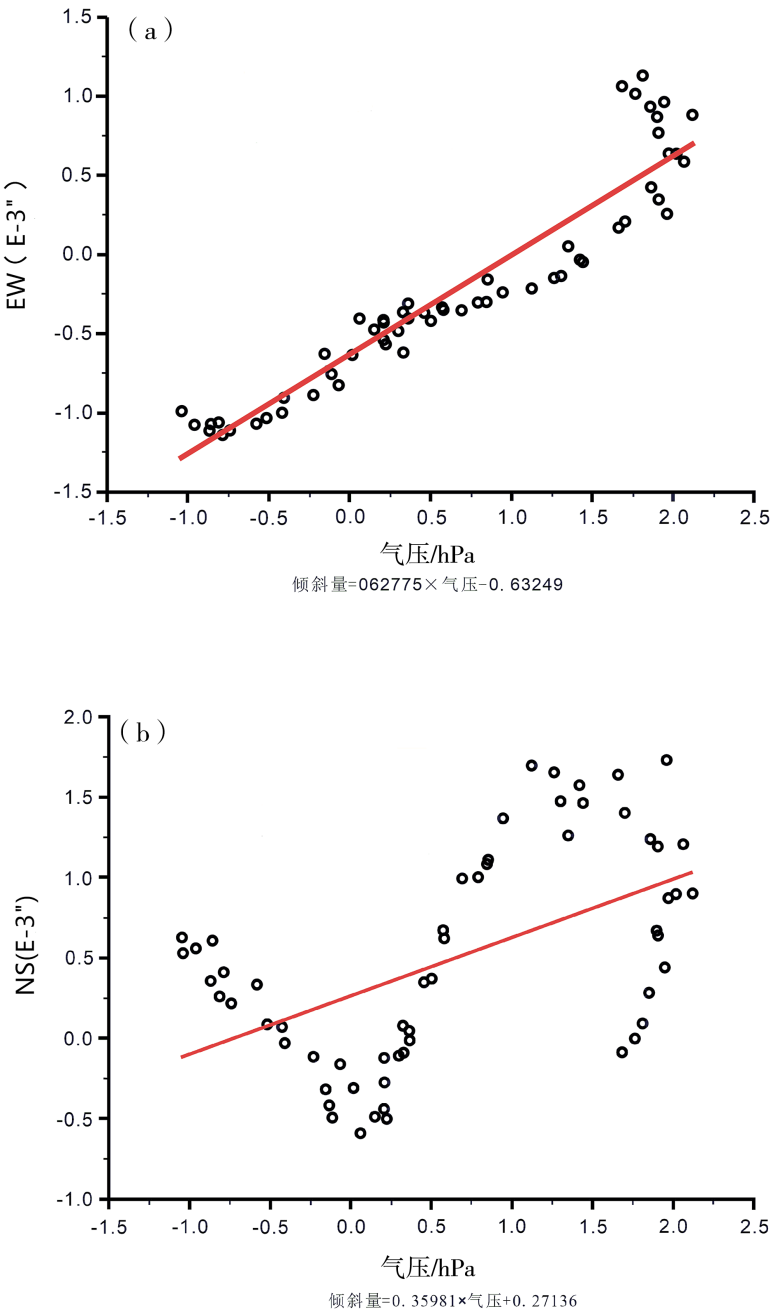


图6 宽城台水管仪、气压别尔采夫滤波及相关性  
Fig.6 Perstev's filtering results and correlation of water-tube tiltmeter and air pressure at Kuancheng Station

别尔采夫滤波后经计算,水管仪北南向与气压的相关系数为0.53,东西向与气压的相关系数为0.94。该结果与图4中,北南向受气压干扰较大的现象相反。经反复查阅文献<sup>[2, 14-15, 18]</sup>并同专家学者沟通,出现这一现象的原因可能是,本文选取的气压干扰为短时高频干扰(仅几小时的高频干扰),而别尔采夫滤波适用于潮汐频段和日漂移频段几天乃至几个月的气压干扰效果更为明显,对于短时干扰时采用别尔采夫滤波无法完全将非干扰信息进行排除。

因宽城台水管倾斜观测与气压观测相关系数达到0.5以上,因此二者正相关,可应用回归分析定量扣除气压干扰的影响。图7为宽城台水管倾斜观测与气压回归模型计算结果:

- (1)东西向观测数据与气压的回归计算结果,回归模型拟合值为:东西向倾斜量=0.62 775×气压-0.63 249;
- (2)北南向观测数据与气压的回归计算结果,回归模型拟合值为:北南向倾斜量=0.35 981×气压+0.27 136;





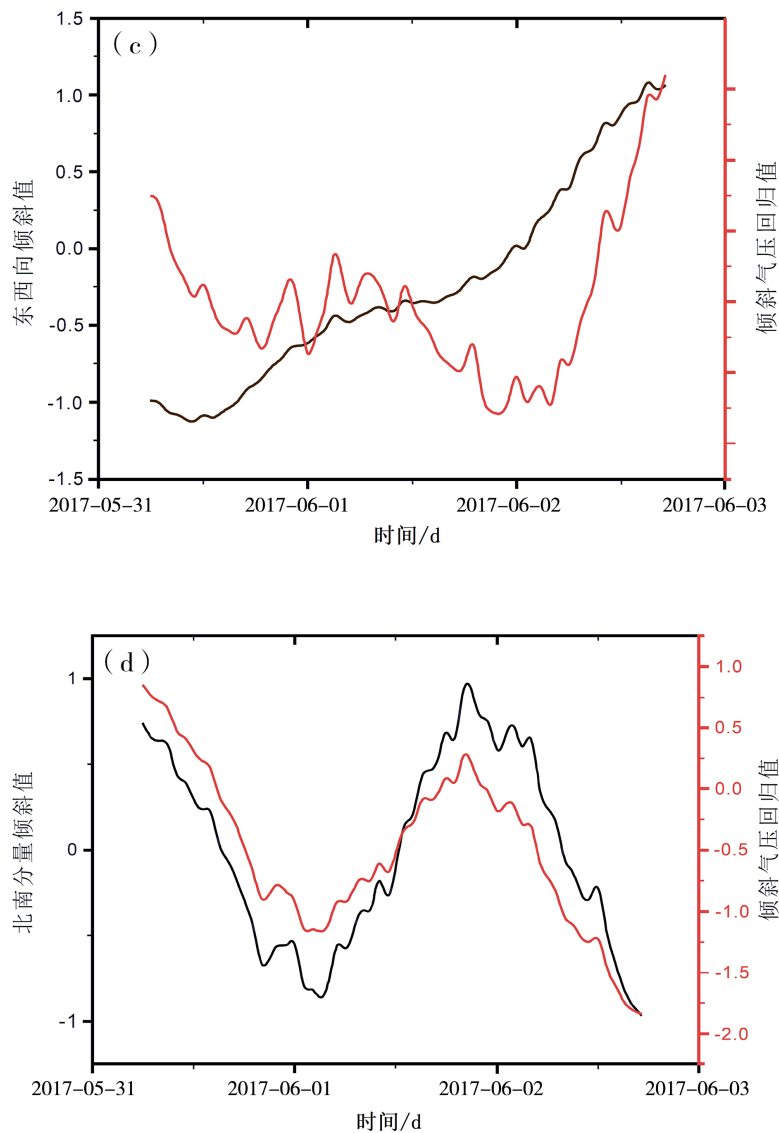


图7 宽城台水管倾斜观测回归模型计算结果

Fig.7 Calculation results of regression model for water-tube tiltmeter at Kuancheng Station

(3)获得的倾斜气压回归曲线即为排除气压干扰后的曲线，去噪后的曲线光滑度高，基本抑制了气压干扰噪声中的高频信号，保留了仪器的背景有效信号。

综上所述，宽城台气压与水管倾斜观测存在一定的正相关性，说明气压在某一时段起主要作用，但对于高频干扰，经过别尔采夫滤波后并未将干扰信息进行全部排除，对于高频干扰，有待进一步研究怎样进行排除。

4 结论和讨论

4.1 结论

本文采用宽城台地倾斜观测和气压观测分钟

值数据进行干扰因素识别，再采用整点值数据进行地倾斜观测的气压响应分析与研究。通过线性拟合去趋势、别尔采夫滤波获得观测数据的日漂移信息、计算观测值与干扰因素的相关系数，应用相关系数作为权重因子的线性回归模型，从观测值中减去干扰影响。结果表明：

(1)宽城台地倾斜观测受气压干扰较为明显，北南向气压干扰频段主要分布在细节2阶以上，东西向气压干扰频段主要分布在细节3阶以上。宽城台气压对水管倾斜观测的影响主要表现为观测曲线出现短时畸变，表现为不同幅度的抖动。水管倾斜观测相对气压的变化会呈现同步或短时滞后，且北南向观测曲线受气压干扰较为明显。

(2)通过观测资料线性拟合扣除趋势信息、别尔采夫滤波进行潮汐分离获得日漂移信息、计算影响因子一系列方法,对宽城台地倾斜观测数据与气压进行相关性研究,北南向与气压的相关系数为0.53,东西向与气压的相关系数为0.94。因此,宽城台水管倾斜观测与气压具有正相关性,符合回归关系。

## 4.2 讨论

本文提出的是一套排除形变地倾斜观测干扰的数学方案,用于排除干扰因素对观测值的影响。但是为了谨慎起见,对于随机干扰、其他干扰因素等交叉干扰,可能会继续进入最终的分析计算中,未被排除。此问题有待更深入的研究讨论。

别尔采夫滤波适用于潮汐频段和日漂移频段的干扰,对于高频干扰,采用别尔采夫滤波可能不太适用。宽城台水管EW向在原始资料中干扰较小,但是与气压相关性却很大,这可能是由于EW向低频段信息与气压低频段信息相关性好,而NS向经别尔采夫滤波未能消除高频干扰信息。本文的干扰因素排除在稳定而持续的干扰方面,是合理有效的,但对于短时高频干扰的排除,还有待进一步探讨。

干扰因素剔除后,对异常的分析判定具有重要意义。只要观测数据具有一定连续性和稳定性,并且某种干扰在某一时段起主要作用,就可以运用该方案将日漂移信息分离出来并进行回归分析,剔除该干扰因素的影响。另外,本方案仅针对单一干扰因素进行考虑和分析,若干扰因素具有相关性,则需要先获得干扰因素间的相关性并将相关性消除,变成独立影响因素,再逐个进行排除。

致谢:本文的研究方案和Matlab程序均由中国地震台网中心闫伟副研究员提供,并得到闫伟研究员、河北省地震局马栋高级工程师的热心指导和建议。

## 参考文献

[1] Blair D, Liu J F, Moghaddam E F, et al. Performance of an ultra low-frequency folded pendulum[J]. Phys Lett A, 1994, 193(3):223-226  
[2] 孙伶俐,李明,龙涛. 大气环境变化对地壳形变观测的影响研究[J]. 地震研究,2014,37(3):412-418.

[3] 孙伶俐,李明,蒋玲霞,等. 湖北省潮汐形变观测异常及干扰识别[J]. 大地测量与地球动力学,2013,33(S1):36-40  
[4] 邢喜民,杨绍富. 乌什体应变的气压响应特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,2016,36(10):930-932.  
[5] 许璐,邢喜民. 气压对巴伦台钻孔倾斜的影响特征级机制研究[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(8):873-876.  
[6] 曹建玲,石耀霖. 地表温度年变化对地应力和地倾斜的影响[J]. 中国科学院研究生院学报,2005,22(3):303-308.  
[7] 何方璇,李海龙,郭巧娜,等. 试论大气压波动引起的地表呼吸[J]. 地下水,2008,30(5):34-36.  
[8] 周龙寿,邱泽华,唐磊. 地壳应变场对气压短周期变化的响应[J]. 地球物理学进展,2008,23(6):1717-1726.  
[9] 李峰,宁海雯,刘燕翔,等. 河北张家口地震台形变观测干扰特征分析[J]. 山西地震,2017(3):16-19+24.  
[10] 尹继尧,朱元清. 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,2012,35(1):36-41.  
[11] 狄樑,陆德明,丁建国,等. 气象因素对倾斜仪观测干扰特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(8):870-875.  
[12] 何应文,杨建文,石宝文,等. 降雨变化对云县台垂直摆倾斜仪的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(4):426-432.  
[13] 郑永通,刘其寿,杨佩琴,等. 降雨对垂直摆倾斜仪的干扰与排除[J]. 大地测量与地球动力学,2015,35(2):353-355.  
[14] 徐甫坤,邓存华,杨艳珠,等. 温度对洞体应变观测的影响及排除方法研究[J]. 地震,2014,34(4):127-135.  
[15] 王嘉琦,孙澎涛,任俊峰,等. 宽城台定点形变气压干扰小波分析及干扰排除[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(8):860-864.  
[16] 任俊峰,孙澎涛,袁国旭,等. 宽城地震台水管倾斜仪端点一致性分析[J]. 地震地磁观测与研究,2016,37(4):111-116  
[17] 崔艳丽. 相关系数概念剖析[J]. 大学数学,2017,33(3):114-117.  
[18] 郭春生,斯琴,关东晓,等. 库尔勒地震台地倾斜数据一致性及气象因素分析[J]. 内陆地震,2022,36(1):58-65.  
[19] 李兰生,高力,赵钊,等. 气压对徐州地区三套体应变仪不同影响原因的分析[J]. 国际地震动态,2012(11):23-28.  
[20] 中国地震局监测预报司. 地形变测量[M]. 北京:地震出版社,2008.