赵小贺,公续升,闫万晓,等.马陵山和相公庄台钻孔体应变观测质量影响因素分析[J].地震工程学报,2018,40(增刊):95-100.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2018.Supp.095

ZHAO Xiaohe,GONG Xusheng,YAN Wanxiao,et al.Factors Affecting the Observation Quality of Borehole Volume Strain Meters at the Malingshan and Xianggongzhuang Stations, Shandong Province[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(Supp):95-100.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2018.Supp.095

马陵山和相公庄台钻孔体应变观测质量影响因素分析

赵小贺[1],公续升[1],闫万晓[2],范晓易[3],宁 斌[2],卢双苓[3]

(1. 山东省地震局郯城马陵山地震台,山东 郯城 276114;2. 山东省地震局相公庄地震台,山东 临沂 276025;3. 山东省地震局泰安基准地震台,山东 泰安 271000)

摘要: 对山东省内同一条断裂带内,气象条件相同、地理位置相近的两个台站体应变仪进行分析,探讨影响体应变观测质量的因素。结果表明:(1)两个台的数据完全符合规范中所要求的 M_2 波潮汐因子相对误差 $\delta_\alpha/\alpha \leqslant 0.05$ 的精度指标;2016 年月平均精度:相公庄台为 0.015 1,马陵山台为 0.032 1,相公庄高于马陵山。(2)两个台站受降雨、水位和气压影响明显,体应变和气压相关程度达到 0.85 以上。(3)两个台站均位于断裂带或其附近,除仪器及其他干扰因素外,井孔条件是造成马陵山比相公庄台精度低的主要因素。

关键词: 体应变;观测质量;影响因素;精度

中图分类号: P315.72$^+$7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000－0844(2018)增刊－0095－07

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2018.Supp.095

Factors Affecting the Observation Quality of Borehole Volume Strain Meters at the Malingshan and Xianggongzhuang Stations, Shandong Province

ZHAO Xiaohe[1], GONG Xusheng[1], YAN Wanxiao[2], FAN Xiaoyi[3], NING Bin[2], LU Shuangling[3]

(1.*Malingshan Seismic Station, Earthquake Agency of Shandong Province, Tancheng* 276114, *Shandong, China*;
2.*Xianggongzhuang Seismic Station, Earthquake Agency of Shandong Province, Xianggongzhuang* 276025, *Shandong, China*;
3.*Taian Seismic Station, Earthquake Agency of Shandong Province, Taian* 271000, *Shandong, China*)

Abstract: The factors affecting the observation quality of the borehole volume strain meters at two stations along the same fault zone in Shandong Province were analyzed and discussed. The two stations are under the same meteorological conditions and are at similar geographical positions. Results revealed the following information. (1) The data of two stations conformed completely to the accuracy index required in the specifications. The relative error of the M_2 wave tidal factor was $\delta_\alpha/\alpha \leqslant 0.05$. The average monthly accuracy of Xianggongzhuang Station in 2016 was 0.015 1 and was higher than that of Malingshan Station, which had a monthly average accuracy of 0.032 1. (2) The two stations were affected by rainfall, water level, and air pressure, and the

收稿日期: 2018-08-06

基金项目: 2017 年中国地震局"监测、预测、科研"三结合课题"钻孔类仪器稳定性影响因素研究"(CEA-JC/3JH-16150X)

第一作者简介: 赵小贺(1976－),男,工程师,主要从事地震前兆观测工作。E-mail:1322538376@qq.com。

correlation degree between volume strain and air pressure exceeded 0.85. (3) Both stations are located at or near the fault zone. In addition to instruments and other interference factors, borehole condition is the major factor that accounted for the lower precision of Malingshan Station than that of Xianggongzhuang Station.

Keywords: volume strain; observation quality; influencing factors; accuracy

0 引言

钻孔体应变是监测地壳变形的一种有效手段,观测精度达到 10^{-9},能清晰地记录到固体潮变化。苏恺之等[1]、郑江蓉等[2]、李杰等[3]对数字化钻孔体应变的观测进行了深入系统的研究,发现在影响观测资料精度的各种因素中气压和降雨成为最主要的干扰源,不同台站体应变对气压和降雨的响应模型均呈现出比较一致的物理机制和类似的干扰变化规律。但受各台站的地理位置、地质背景和仪器参数不同等多种因素影响,也呈现出较大的差异性和地区特性。

TJ-Ⅱ型钻孔体应变观测仪是一种观测地壳应变、研究地球物理学和地球动力学的动态观测仪器[1]。仪器安装在地下几十米甚至几百米的钻孔内,使用特种水泥作为耦合介质,受外界的人为干扰较小,具有较高的观测精度和稳定性,可以记录到清晰的固体潮汐和地壳的伸缩变形,为研究地震孕育过程中的应变变化规律提供数据,也为地球弹性研究提供重要参数指标。通过体应变仪可以精密观测地壳内部的应变状态,探索地震应变前兆的临震、短、中、长期及震后调整的时空分布和变化发展规律[4]。

我国是最早对地应力(应变)进行数据监测并将其用于地震分析预报的国家[5]。目前我国已有 100 多套 TJ-Ⅱ型钻孔体应变仪投入观测。山东省马陵山和相公庄台钻孔体应变经数字化改造以来,观测资料正常背景变化形态和固体潮观测精度较之以往有明显的提高,气压和降雨对观测资料的影响具有较强的典型变化图像。本文拟对山东省内同一条断裂带内,气象条件相同、地理位置相近的上述两个台站的体应变仪进行分析,探讨影响体应变观测质量的因素,分析气压和降雨这二种主要干扰因素的基本变化规律,并给予一定物理意义的量化,这对于体应变观测具有十分重要的意义。

1 台站及仪器概况

郯城马陵山地震台(以下简称马陵山台)地处沂沭断裂带南段(图 1),安丘—莒县断裂以西,东距沭河 3 km,海拔高度 110 m。台基为白垩系红色砂岩,受构造断裂影响,岩石较破碎。台站坐落在马陵山主峰西坡,远离居民点,周围是荒山、农田,无大型工矿企业,几乎没有干扰源,观测环境优越,是山东省重要的地震监测综合台站。该台体应变观测井于 2010 年 9 月 14 日完成打井,11 月 6 日完成洗井,井深为 79.35 m。11 月 24 日安装仪器,仪器探头安装在井下 78～79 m 深度。2011 年 1 月 1 日进入试运行。

相公庄地震台(以下简称相公庄台)地处沂沭断裂带边缘(图 1),海拔 71.3 m。观测场地属沂沭河冲积平原,台基为砂岩和花岗片麻岩,地下水埋深 2～5 m。2011 年 8 月 4 日完成钻井,井深 82.06 m,井管外径 145 mm,73 m 以下岩石完整。2011 年 12 月 28 日成功安装体应变仪器。2012 年 2 月 1 日开始接入“十五数据库”试运行。

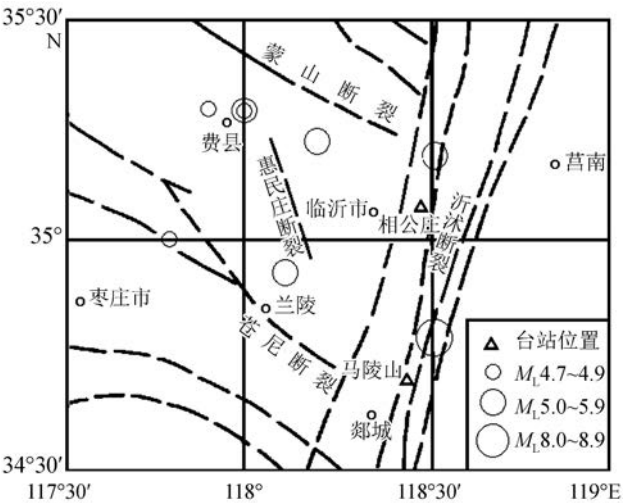

图 1 马陵山和相公庄台在断裂带中的位置

2 精度分析

通常采用 M_2 波潮汐参数的稳定性来分析仪器对应变固体潮的观测精度。应变固体潮 M_2 波潮汐因子的“内精度”是指 M_2 波的均方差与潮汐因子的比值,即相对误差。用内精度数值大小来说明观测固体潮数据可靠性,相对误差(内精度)数值越小,说明观测值越可靠,一般要求观测数据计算所得的体应变精度小于 0.05。我们选取 2016 年体应变的观测资料,利用维尼迪科夫调和分析方法进行逐月分

析，计算两个台体应变 M_2 波潮潮汐因子的“内精度”，以分析观测资料质量。表 1 为马陵山和相公庄台体应变内精度计算结果。从表 1 中可看出，两个台的 M_2 波潮汐因子相对误差 $\delta_\alpha/\alpha \leqslant 0.05$，均符合规范要求，但马陵山台相对误差远大于相公庄台，精度较差，稳定性不高。

表 1　2016 年马陵山和相公庄台体应变月相对误差计算结果(单位：%)

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
马陵山	3.70	2.77	2.09	2.97	3.16	5.29	4.02	3.13	2.17	3.71	2.92	2.57
相公庄	1.42	1.59	1.15	1.59	1.67	1.12	1.96	1.52	1.4	1.69	1.38	1.64

2016 年，马陵山台体应变运行正常，除受仪器停电导致缺测外，其他无影响，仪器标定正常；相公庄台体应变运行正常，同样受电源不正常影响，导致仪器死机缺测，仪器标定正常。

3　观测质量影响分析

影响体应变仪观测质量的因素主要有三大类：仪器工作状态的影响、气象因素干扰、人为干扰和不明原因造成的干扰。在日常工作中主要表现为钻孔气压干扰、降雨干扰和钻孔水位干扰。马陵山台和相公庄台相距仅 45 km，同处沂沭断裂带，台基岩性类似，影响体应变观测的因素相同，尤其是降雨等气象因素干扰相差不大，但从 2016 年观测资料来看，马陵山体应变的观测精度远低于相公庄台，究其原因，从以下几个方面进行分析。

3.1　降雨和地下水位干扰

降雨对体应变观测的影响很大，研究表明：降雨对应变干扰，首先是因为降雨改变了地壳表面承担的载荷，导致体应变仪探头部位的地壳应力发生了变化，从而引起体应变观测数据发生较大改变；其次是因为雨水随着时间慢慢渗入岩体的孔隙中，使得孔隙压力增大，导致应变数据发生变化[3]，确切地说，是体应变钻孔附近的含水层以及破碎带中的液体压力变化引起的。由于各个台站体应变观测井所处地下地质条件不同，降雨对水位的影响程度也不同。地下岩体越破碎，井孔条件越差，水位的变化越快，对体应变观测的影响也越大。能够导致孔隙水压力变化的因素很多，比如降雨、人为抽水、天气干旱等，本文只研究由于降雨引起水位变化而影响体应变观测的现象。由于地下构造的差异，降雨前后干旱程度不同以及降雨量不同，造成每次降雨引起水位的变化也不一样，所以对体应变观测的影响程度不一样。为了研究降雨及水位对马陵山台和相公庄台体应变仪的影响情况，我们选择 2013 年 5 月 26—28 日的观测数据进行分析，这期间马陵山台降雨 149.0 mm，相公庄台降雨 115.6 mm。

通过图 2 可以发现：马陵山和相公庄台体应变数据变化和水位变化有明显的相关性；降雨后，体应变数据随着水位升高而增大，但水位变化所导致的体应变变化的幅度大小不一样。马陵山台 5 月 26 日的水位值为 597.47 cm，降雨后 28 日水位即达到极值 1 041.13 cm，变化幅度为 443.66 cm，体应变数据则从 -108.0×10^{-9} 增大到 263.6×10^{-9}，变化幅度为 371.6×10^{-9}，即水位每变化 1 cm 引起体应变的变化量为 0.84×10^{-9}。相公庄台 5 月 26 日的水位值为 287.49 cm，28 日水位为 296.54 cm，变化幅度为 9.05 cm，体应变数据则从 616.0×10^{-9} 增大到 874.1×10^{-9}，变化幅度为 258.1×10^{-9}，即水位每变化 1 cm 引起体应变的变化量为 28.51×10^{-9}（表 2）。由此可得出，由降雨引起的水位变化，马陵山台比相公庄台变化的速度快，说明马陵山台台基比相公庄台要破碎，岩层裂隙较发育，透水性较好，雨水很快渗透到地下，引起体应变钻孔附近的含水层以及破碎带中的液体压力发生变化，导致体应变观测数据发生变化。从两个台站打井取出的岩心也印证了我们的分析，相公庄台提取到的岩心比马陵山台要完整。而 1 cm 水位的变化引起的体应变变化，相公庄台远大于马陵山台，说明相公庄台体应变比马陵山台灵敏。

3.2　大气压力干扰

气压的变化对体应变观测有非常显著的影响，且二者之间的变化是同步的，这是因为气压变化通过地球表面上产生的边界应力效应引起地表压力变化，使得岩体内部各种裂隙受到压缩或者拉伸改变了岩体的孔隙压力，最终导致体应变测量到的应变值随之发生变化[6]。气压变化能使观测应变值产生 10^{-9} 量级的变化，比固体潮对体应变的影响量级还要大，这对高精度应变观测来讲是一种不能忽视的较大干扰。为了能真正反映地壳自身产生的各种变化，在对体应变数据的分析及应用过程中，必须

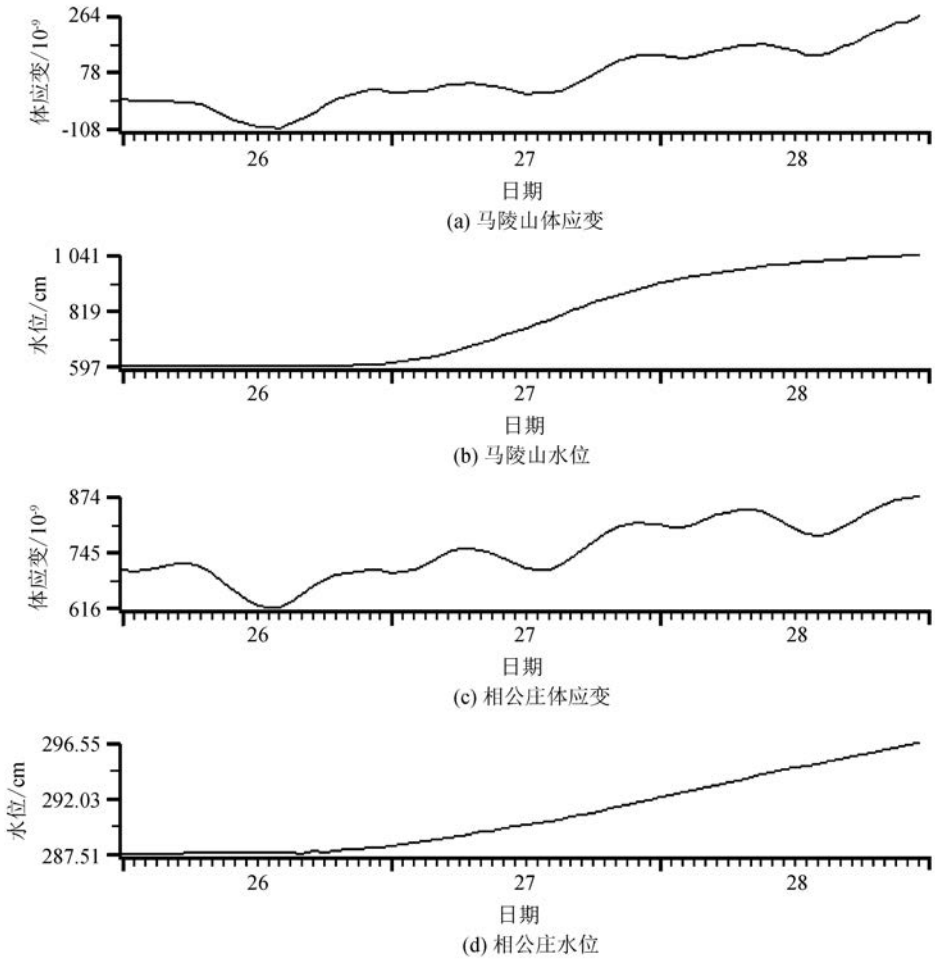

图 2 体应变和水位数据曲线对比图(2013-05-26—2013-05-28)

表 2 水位变化对体应变观测影响值

	马陵山台		相公庄台	
	水位/cm	体应/($\times10^{-9}$)	水位/cm	体应/($\times10^{-9}$)
降雨前	597.47	−108.0	287.49	616.0
降雨后	1041.13	940.6	296.54	874.1
变化量	443.66	1048.6	9.05	258.1
应变变化/cm 水位	2.36		28.51	

消除气压的影响。我们可将气压干扰分成两种情况,一种是由太阳、月亮引力等产生的周期性干扰,另一种是短时微动态影响,是由气压系统的移动及演变产生的无明显特点的非周期性干扰。为了消除气压干扰对体应变观测的影响,我们利用一元回归方法,对 2016 年 3 月 25 日—4 月 10 日马陵山和相公庄台气压数据、体应变数据进行线性回归分析,求出气压与体应变的相关系数:马陵山台为0.948,相公庄台为 0.858,两个台站的体应变观测受气压影响非常明显。通过图 3、图 4 看出,体应变与气压的原始曲线也极其相似,但固体潮不清晰。通过一元线性回归分析,去除气压干扰后的残差值显示,体应变记录的固体潮曲线清晰。

气压对体应变的短时微动态影响也非常显著。从图 5 可看出:马陵山台 2016 年 6 月 13 日 23 时 7 分气压发生变化,由 1 288.71 hPa 上升至 23 时 59 分的 1 291.43 hPa,上升幅度为 2.72 hPa,而体应变随之由 $-2\ 587.07\times10^{-9}$ 上升至 $-2\ 579.54\times10^{-9}$,上升幅度为 7.53×10^{-9},即气压每变化 1 hPa 体应变变化 2.77×10^{-9}。从图 6 可看出:相公庄台 2016 年 5 月 2 日 16 时 58 分气压发生变化,由 980.99 hPa 上升至 983.76 hPa,上升幅度为 2.77 hPa,而体应变随之由 $1\ 992.10\times10^{-9}$ 上升至 $2\ 011.74\times10^{-9}$,上升幅度为19.64×10^{-9},即气压每变化1 hPa

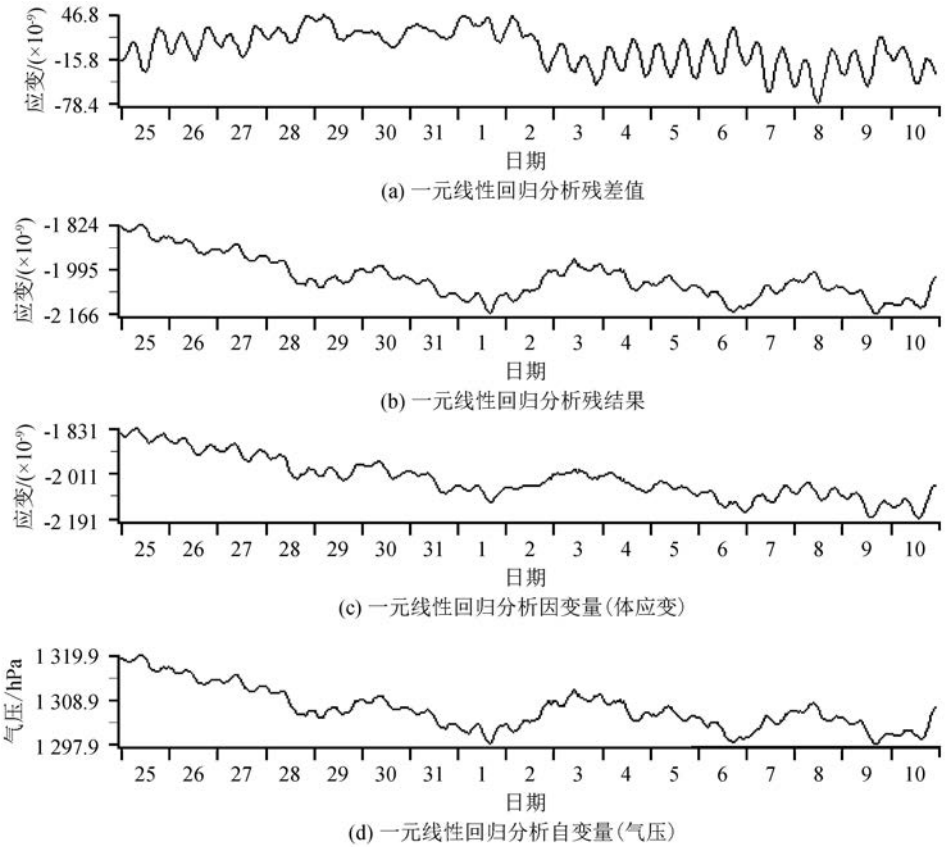

图 3　马陵山台体应变仪与气压相关性分析

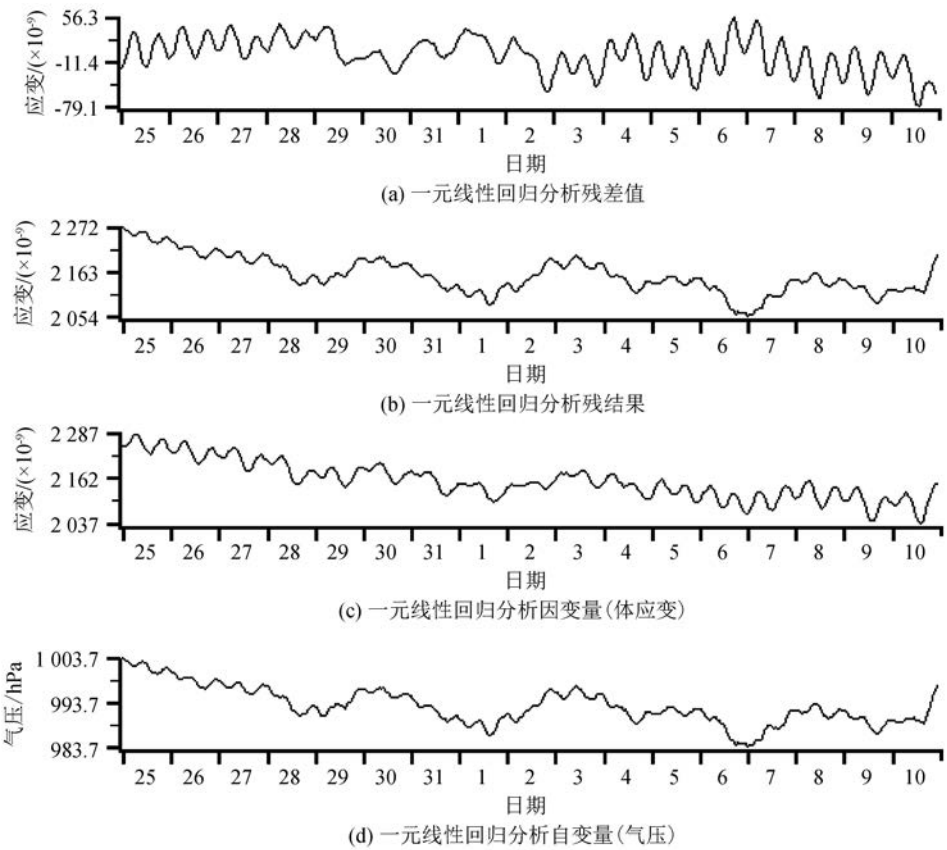

图 4　相公庄台体应变仪与气压相关性分析

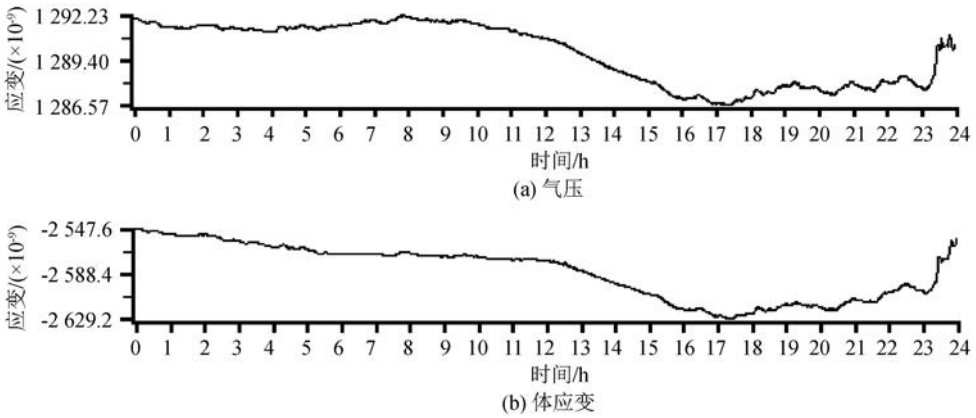

图 5 马陵山台气压、体应变微动态变化图(2016-06-13)

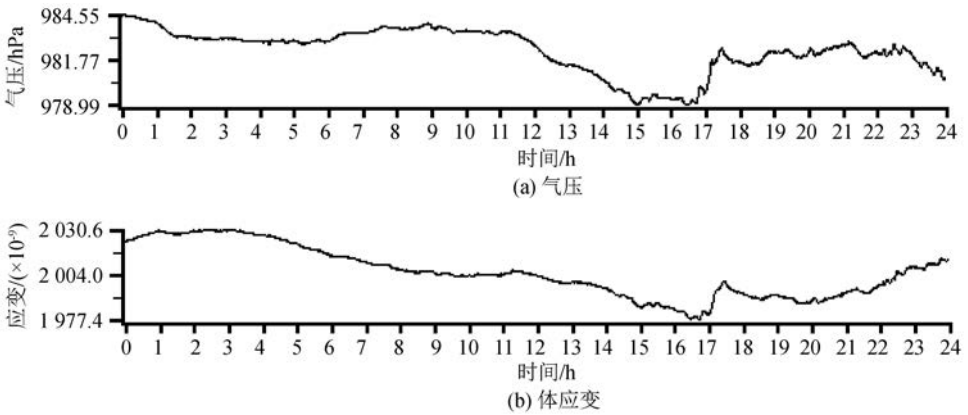

图 6 相公庄台气压、体应变微动态变化图(2016-05-02)

体应变变化 7.09×10^{-9}(表 3)。当地表压力发生变化时,传感器周围岩体的孔隙压力随之发生变化,在不考虑井口压力对体应变传感器影响的情况下,气压每变化 1 hPa,相公庄台体应变远高于马陵山台的体应变变化量,说明马陵山台台基相对破碎,气压的变化逐渐被传感器周围的孔隙所释放,导致传感器受到的压力减小,所以马陵山台单位气压的变化量引起的体应变变化量比相公台小。

表 3 气压变化对体应变观测影响值

	马陵山台		相公庄台	
	气压/hPa	体应变/($\times10^{-9}$)	气压/hPa	体应变/($\times10^{-9}$)
正常值	1 288.71	−2 587.07	980.99	1 992.10
变化值	1 291.43	−2 579.54	983.76	2 011.74
变化量	2.72	7.53	2.77	19.64
应变变化/hPa 气压	2.77		7.09	

4 结语

通过对马陵山台和相公庄台体应变观测资料分析认为:

(1) 两个台站受降雨、水位和气压影响明显,且特征相似。由降雨引起的水位变化,马陵山台比相公庄台变化的速度快,两个台站的体应变数据均随水位的升高而增大,变化趋势一致。马陵山台台基比相公庄台要破碎,透水性要好,降雨后很快渗透到地下,引起体应变钻孔附近的含水层以及破碎带中的液体压力变化,导致体应数据发生变化。对每单位水位变化引起的体应变变化相公庄台比马陵山台反映灵敏。

(2) 体应变对气压影响明显,马陵山台体应变和气压相关系数为 0.948,相公庄台为 0.858,对每单位气压变化引起的体应变变化相公庄台比马陵山台

(下转第 152 页)

参考文献

[1] 朱凤梅,梁一婧,安祥宇,等.基于 WebService 的地震信息快速发送系统[J].地震工程学报,2015,37(增刊 2):236-239.

[2] 周佳铭,倪健.无人值守型水库联动监控系统运行模式探讨[J].水利信息化,2017(1):57-61.

[3] 赵楠,石英杰,江沛春.区域虚拟地震台网数据流监控软件研发[J].地震地磁观测与研究,2015,36(4):150-153.

[4] 王中,黄亮,孙素梅,等.地震数据传输网络的设计与具体实施[J].东北地震研究,2009,25(1):53-57.

[5] 马宝君,赵谊,崔东源,等.NCDSN 台站地震监测系统实时监视软件[J].地震地磁观测与研究,2006,27(2):89-92.

[6] 吴永权,黄文辉,苏柱金.国家测震台网的实时数据传输与服务[J].华南地震,2013,33(3):77-84.

[7] 王翠芳,王松,张振勋,等.锦屏—官地临时地震台网的特殊性[J].地震地磁观测与研究,2011,32(2):85-90.

(上接第 100 页)

反映灵敏,反映出马陵山台台基相对破碎。在消除气压干扰后,体应变观测的固体潮观测质量有明显改善,较好地反映了数据的真实性,应该能够反映局部地区地壳应力场的变化,对提取地震前兆异常具有一定的意义。

(3) 两个台站的观测数据完全符合规范中所要求的 $\delta_\alpha/\alpha \leqslant 0.05$ 的内精度指标,且相公庄台精度优于马陵山台。从水位和气压影响分析可知,排除仪器及其他干扰因素外,造成两个台站观测资料精度差异的主要原因与钻孔地质条件有关,相公庄台钻孔所处的地质条件较好,台基相对完整,马陵山台台基较破碎,钻孔地质条件相对较差。

参考文献

[1] 苏恺之,李海亮,张钧,等.钻孔地应变观测新进展[M].北京:地震出版社,2003.

[2] 郑江蓉,徐徐,王俊,等.六合体应变干扰因素与地震短临异常特征研究[J].地震工程学报,2011,33(1):84-85.

[3] 李杰,刘敏,邹钟毅,等.数字化钻孔体应变干扰机理及异常分析[J].地震研究,2003,26(3):230-238.

[4] 卢双苓,于庆民,曲保安,等.山东数字化钻孔体应变观测干扰异常分析[J].地震工程学报,2010,32(2):186-190.

[5] 谢富仁,邱泽华,王勇,等.我国地应力观测与地震预报[J].国际地震动态,2005(5):54-58.

[6] 崔泽岩,张肖.地表流体变化对跨断层形变观测的影响[J].地震工程学报,2017,39(增刊 1):109-112.