2012年3月

张凌空、吴利军、杨颖,2012,雷暴产生的气压突变对体应变与同井水位干扰的对比研究,中国地震,28(1),69~77。

雷暴产生的气压突变对体应变与同井 水位干扰的对比研究

张凌空¹⁾ 吴利军²⁾ 杨颖²⁾

1) 中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街5号 100045

2) 中国地震局地震预测研究所,北京 100036

摘要 对首都圈地区涞水台等 Sacks 体应变与同井水位数字化分钟值观测数据进行对比 研究,发现在雷暴时段二者潮汐观测曲线会发生同步显著畸变异常。经小波分析、回归分析和 功率谱分析,并与气压资料比对,证实这是由于雷暴引发了气压瞬间突变而产生的干扰,其幅值 比背景值分别高近 8 倍和 11 倍,这种现象主要集中在雷雨季节的 6~8 月。进一步研究了周期 气压波对体应变与井水位的影响规律和机制,并将雷暴日与无雷日气压对体应变和井水位的影 响系数曲线进行了比较,总结了它们之间的差异和特征。

关键词: 雷暴 潮汐畸变 体应变 井水位 气压突变

[文章编号] 1001-4683 (2012) 01-069-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

对地壳应变场和地下水变化的动态追踪是探索短临地震前兆的重要途径,一般通过地 下岩石钻孔体应变和井水位的测量来实现。20世纪80年代中期,在联合国开发计划署援 助下,中国地震局在首都圈地区建立了Sacks体应变观测台网(刘澜波等,1986)。实际工作 中笔者曾发现体应变固体潮光滑的模拟记录曲线上有时会叠加一些短时波动信号,表现为 目视就可辨识的显著畸变,持续时间一般在2小时以内。如1990年7月14~16日涞水、顺 义、东三旗、昌平、大兴和宝坻等6个台站体应变都记录到3组准同步异常,幅度为7.14×10⁻⁹ ~57.00×10⁻⁹,通过与气象资料比对,发现这3天京津地区曾出现大范围雷雨天气,于是初 步判断该异常可能与气象因素有关。汪成民等(1988)认为"在雷暴高压作用下井水位将产 生相应变化,如龙卷风接触地面时,井水位会剧烈升降",但可能受当时数据采集技术条件 的限制,尚未给出具体的观测实例和图形。近些年随着中国地震局"九五"、"十五"数字化 地震观测网络建设项目的实施,全国大约有90套钻孔体应变仪(其中Sacks型6套,国产 TJ-2型80余套)和360套水位计先后实现了分钟值采样,很多台站还配备了辅助观测用的

E-mail: zhll1023@163.com

[[]收稿日期] 2011-01-06

[[]项目类别] 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(02092440)和地震行业专项(201108009)共同资助

[[]作者简介] 张凌空,男,1962 年生,高级工程师,主要从事钻孔应变和地形变等前兆方法的观测研究。

气压计,从而为这一频率域的资料分析研究创造了有利条件。又有研究者(冯志军等,2009;卢双苓等,2010;张子广等,2010)相继注意到短时突变气压会引起体应变(应变仪为TJ-2型)或井水位潮汐产生畸变现象,并给出了有关实例,笔者从中发现潮汐畸变出现的时间均分布于每年的4~7月,正好与雷雨季节吻合。于是笔者对Sacks体应变、井水位、气压数字化分钟值观测数据及雷电和降雨资料等重新进行了对比研究,发现在雷雨季节(一般是4~10月,主要集中在6~8月)体应变和井水位潮汐观测曲线上确实记录到一些短时畸变信息,其中井水位曲线上显示尤其显著,小波分析、回归分析和功率谱分析等表明这是由于雷暴引发了气压瞬时突变所产生的干扰。本研究的目的主要有两个:一是揭示雷暴产生的突变气压对体应变与井水位干扰的客观现象,二是总结雷暴日与无雷日气压对体应变和井水位干扰系数曲线之间的差异和特征,以期对地震前兆微动态信息观测背景场的正确认

1 观测井概况

涞水台位于怀柔-涿县断裂南端的河北省涞水县王村,井深 388m,第四系厚 40m,上层 为粘土和砂土,下层为卵石,基岩为震旦纪硅质和泥质白云岩。美国华盛顿卡内基研究所生 产的 Sacks 体应变探头被膨胀水泥固结在井底基岩中,仪器灵敏度设置为 10⁻⁹/mV,规定体 应变观侧曲线上升表示探头受压,下降则为膨胀。水位和气压探头都采用美国 setra 公司生 产的压力传感器,分辨率为 0.01mb。

2 雷暴产生的突变气压对体应变与井水位的干扰

雷暴是一种产生闪电及雷声的大气放电现象,属局地强对流性气象。涞水县气象站位 于体应变观测井西南方向约7km,该站记录的资料显示,2004年7月在这一地区共发生4次 典型雷暴,时间分别是3日19时20分~20时(晚20时至次日早8时无记录)、4日19时11 分~20时、10日14时52分~17时45分和23日15时28分~17时11分。图1(a)~(c) 是无雷日的正常观测曲线(13~15日),体应变和井水位都记录到清晰而完整的潮汐变化, 目视看不出明显的气压影响。图1(a1)~(c1)是雷暴日出现的异常图像(3~5日),在雷暴 时段气压值曲线剧烈抖动发生突变,导致大气潮汐的形态被明显破坏,与之同步,体应变在 光滑固体潮汐背景上出现了目视可辨的畸变现象,井水位曲线则表现出更加显著的潮汐畸 变异常。图2展示了10~11日和23~24日雷暴时的观测结果,情况与图1(a1)~(c1)类 似。这4次雷暴图像充分表明体应变、井水位和气压潮汐畸变或突变在时间点上与雷暴的 发生密切相关。相关的气象学研究表明(朱乾根等,1992;虞昊,2005),雷暴时云层放电会 引起气温骤然剧变,温度可达(1~2)×10⁴℃,影响的水平距离为几千米到几十千米,伸向 空中的高度可达8~15km,可持续几分钟到几十分钟,从而导致局部气压的急剧变化,这是 雷暴发生时气压产生突变的直接原因。

张子广等(2010)研究了河北省黄骅、深州、无极和宁晋台等4口深井水位(1000~3000m)对气压扰动的响应现象,给出9组实例,时间分别是2004~2008年的4~7月,正是 雷雨季节。这4口井分布在涞水台的南端,相距不很远,分别为213、150、151和188km。巧 合的是他们给出的一组气压扰动时间是2004年7月4日19~22时,正是涞水县气象站记 录到的雷暴时间,与 Sacks 体应变井的观测情况一致(图 1),说明这次气压扰动是由雷暴引起的,而且影响到比较大的区域,如果能得到当地气象雷暴记录,就可以明了其它几次气压高频扰动的原因。



图 1 2004 年 7 月无雷日和雷暴日体应变、井水位和气压观测曲线对比 (3 日 19 时 20 分~20 时、4 日 19 时 11 分~20 时雷暴)

3 小波分析与功率谱分析

以图 2 (a3) ~ (c3) 为例进行分析。首先为了凸显信号的细微变化,可用数学方法将观测曲线上的短周期信号(相对于潮汐而言)分离出来,即在 128 分钟内,按6 个周期段:2~4、4~8、8~16、16~32、32~64 和 64~128 分钟,分别对图 2 (a3)~(c3) 曲线作小波分析(陆远忠等,2002),得到6 个波段各自的周期信号,再分别将6 个波段信号叠加,得到图 3 (a)~(c),这一步相当于对原始曲线作高通滤波。可清晰地看出,7 月 23 日雷暴时段各周期体应变、井水位和气压都同时出现了高幅值脉冲突变异常,与 24 日无雷段的波形比较,体应变最大振幅相差 8 倍,井水位相差 11 倍,气压相差 10 倍。对图 3 (a)~(c)分别作傅立叶功率谱分析,相应得到图 3 (a - p)、(b - p)、(c - p),可以看到,体应变与气压的功率谱特征完全一致,在整个频率域二者均呈镜像关系;水位有所不同,与气压不具有一一对应的关系。

将图 3 (a) ~ (c) 中7 月 23 日 14 ~ 17 时的图形分别取出放大示于图 4,以便清晰地观察 雷暴时刻各曲线的精细变化。分别将图 4 (a) ~ (c) 作回归分析,得到各自相关系数 R 和回 归系数 b,其中体应变 R = 0.992, $b = 3.085 \times 10^{-9}$ /HPa,可见体应变与气压呈高度正相关,两 曲线十分吻合,结合谱分析结果充分说明体应变潮汐畸变系由气压突变干扰所引起;水位中



图 2 2004 年 7 月雷暴日体应变、井水位和气压观测曲线对比 (10 日 14 时 42 分~17 时 45 分雷暴,23 日 15 时 28 分~17 时 11 分雷暴)



图 3 体应变、井水位与气压突变波及傅立叶功率谱分析的比对(2004 年 7 月 23 ~ 24 日)

R=0.359,*b*=1.600mm/HPa,可知水位与气压也呈正相关,但相关程度不算高。从谱分析的结果看,这是因为不同频段的气压波对井水位的影响程度不同所致,这与体应变存在明显差异,就此下文还将具体分析。



图 4 体应变、井水位潮汐畸变波与气压突变波及雷暴时间对比(2004 年 7 月 23 日 14~18 时)

4 周期气压波动对体应变与井水位干扰的对比分析

4.1 周期气压波对体应变干扰的理论计算

周期为几分钟到几小时的气压波动对体应变仪的测量有干扰已为人们所知,周龙寿等 (2008)系统地总结了该领域的研究成果和现状,并根据 Sacks 等(1971)、Evertson(1977)、 Fung(1965)和苏恺之等(2003)的研究,从理论上推导出气压对体应变仪的影响系数计算 公式

 $b = -0.5 e^{-\pi Z/L} \left[(-3.7 + 3.3\mu) + 4/5 (\pi Z/L) (1 + \mu) \right] /E$ (1)

其中,b为气压对体应变的影响系数;Z为钻孔深度;L为气压波长,L=vt,v为气压传播速度,平均值是4.5m/s,t为气压波周期;E和μ为岩石弹性模量和泊松系数。由于公式推导时设定体应变膨胀为正值,为与实际观测规定相一致,笔者在式(1)左端加了负号。式(1)适用于国产TJ-2型体应变仪的工作情况,国内使用的Sacks体应变仪因在1988年标定时将观测数据的单位转换格值人为放大2倍,所以理论计算公式应修正为(张凌空等,2011)

$$b = -e^{-\pi Z/L} \left[(-3.7 + 3.3\mu) + 4/5 (\pi Z/L) (1 + \mu) \right] /E$$
(2)

在涞水台, *E* = 7.1×10¹⁰ Pa, μ = 0.32, *Z* = 388m。根据式(2)可计算出6个周期段(2~4、4~8、8~16、16~32、32~64和64~128分钟)该台气压对体应变的理论影响系数均值(表1)并绘成图5(a)。理论曲线基本特征是在高频段气压影响系数不稳定,数值变化较大,当周期大于32分钟后才逐渐趋于稳定达到高值,曲线形态呈倒"L"字型。



图 5 雷暴日与无雷日周期气压波对体应变的影响系数和相关系数曲线对比

4.2 雷暴日与无雷日周期气压波对体应变的干扰

用小波分析和回归分析法分别计算出无雷日(2004 年 7 月 13 ~ 19 日)及 3 个雷暴日 (2004 年 7 月 3、4、23 日)在 6 个周期段气压对体应变的影响系数(表 1),分别绘于图 5 (a)、 (c),体应变与气压的相关系数绘于图 5 (b)、(d)。可以看出几点特征:

(1)无雷日平稳气压的影响系数变化规律与理论曲线比较接近,说明理论公式较好地 反映了平稳气压对体应变的实际干扰情况,不同的是实测曲线在周期大约为16分钟时就基 本达到高值,而理论曲线有一个时间稍长的过渡过程。

(2) 雷暴日体应变与突变气压的 3 条相关系数曲线基本重合(图 5 (d)), 均呈倒 "L"字型,并且在周期小于 32 分钟时, 雷暴日的相关性比无雷日要更好一些, 之后相关性趋于一致。

(3)当周期小于16分钟时,雷暴日气压对体应变的影响系数比无雷日略大一些,周期 再增大时雷暴日的气压影响系数变得不太稳定,与无雷日比较数值有所波动。

4.3 雷暴日与无雷日周期气压波对井水位的干扰

用与分析体应变干扰相同的方法对井水位干扰进行分析,得出如下认识:

(1)无雷日平稳气压对井水位的影响系数和相关系数均呈上升-下降型变化,规律性较强,即周期在16~32分钟左近二者的相关性最好,曲线达到高峰,之后随着周期延长数值不断下降,详见图 6(a)、(b)和表 2。

表 1	周期气压波对体应变的影响系数比较					
周期	b _{理论值}	$b_{\mathcal{R}_{\mathrm{T}}\mathrm{H}}$	b _{雷暴日} (10 ⁻⁹ /HPa)			
(分)	(10 ⁻⁹ /HPa)	(10 ⁻⁹ /HPa)	2004年7月3日	2004年7月4日	2004年7月23日	
2 ~ 4	0.5672	0.0637	1.0670	1.4360	0.0626	
4~8	1.3990	1.0840	2.6830	2.4330	2.8700	
8~16	2.2580	3.0510	3. 5290	3.2990	3.9970	
16 ~ 32	2.8920	3. 5260	3.7180	3.6060	3.3360	
32 ~ 64	3.2800	3.5640	3.8230	3.7000	3.1260	
64 ~ 128	3.4940	3.5830	3.5030	3.4330	3.1590	

(2) 雷暴日突变气压的影响系数和相关系数曲线在高频段,即当周期小于 32 分钟时, 气压与井水位的相关程度最高、干扰最大,之后随着周期的延长干扰迅速减弱,并当周期大 于 96 分钟以后与井水位开始由正相关演变为负相关,详见图 6 (c)、(d) 和表 2。



图 6 雷暴日与无雷日周期气压波对井水位的影响系数和相关系数曲线对比

表	2
নহ	4

周期气压波对井水位的影响系数比较

周期(分)	气压影响系数	气压影响系数(雷暴日)(mm/HPa)			
	(无雷日)(mm/HPa)	7月3日	7月4日	7月23日	
2~4	1. 333	7.293	7.427	9.242	
4~8	4. 725	10.15	8.967	9.332	
8 ~ 16	8.574	8.108	8.381	9.994	
16 ~ 32	6. 506	8.789	5.019	5.893	
32 ~64	3.652	5.029	4.626	3.315	
64 ~ 128	0. 8382	1.067	- 0. 069	- 1. 545	

4.4 周期气压波动对体应变与井水位干扰机制的比较

在128分钟周期频段内,气压对体应变的影响系数都为正值(日波、半日波和月波也是 如此),说明气压干扰机制相同,即大气压都是通过地层基岩而对探头产生侧向围压作用, 并且低频气压(周期大于 32 分钟)对体应变的干扰大。井水位的情况较复杂,当周期大于 32 分钟后气压的干扰逐渐减小,大于 96 分钟后气压的影响系数逐渐由正值演变为负值,实 际观测资料表明,日波、半日波和月波均为负值。如选取涞水台无雷雨、无抽水干扰的 2004 年 2 月份资料进行分析,对日波、半日波(卓越周期为 12、24 小时)其 R = -0.518, b = -1.645mm/HPa,对月波(卓越周期为 2~7 天) R = -0.892, b = -1.378mm/HPa,可知水位 与气压均呈负相关。相关性相反说明气压的影响机制发生了改变,一般情况下大气压力即 可由井口直接作用于水面,也可通过地面作用于含水层而间接对井水位产生影响,双方的作 用能相互抵消一部分;当大气压在井口的作用大于含水层时井水位与气压就表现为负相关, 即井水被气压压出井孔的量值多于从含水层流入井中的量值,反之为正相关,显然高频气压 波对含水层影响大,而低频气压波对井口的影响大,该现象以前未受到关注。

5 结果与讨论

(1) 雷暴会引起气压短时突变(又称雷暴鼻),周期一般不超过2小时。受气压剧烈波动干扰,钻孔体应变和井水位潮汐观测曲线会发生显著畸变异常,从而偏离正常背景值,该现象在北京地区6个体应变台站普遍存在,每台年均出现约20次。其中,涞水台记录到的异常振幅与无雷日相比,体应变约高8倍,井水位高11倍,气压高10倍。

(2) 雷暴日突变气压对体应变的干扰规律与理论值基本相符,即气压影响系数随周期 增大都呈倒"L"型变化,与无雷日和理论值相比,差异仅在于达到高值的时间稍有提前,并 且数值的平稳性略差。

(3) 雷暴日突变气压对井水位的干扰特征是高频段影响系数大(频带比无雷日略宽、数 值略大),低频段影响系数小,并且当周期大于96分钟以后二者的相关性逐渐由正变负,说 明不同频段的气压波对井水位的干扰机制存在差异,这是此研究中发现的一个新现象。

(4)观测数据表明雷暴对地形变与井水位的干扰是普遍存在的,目前全国运行的钻孔 应变台站大约有140个(包括体应变仪和分量式应变仪)、洞体应变台站92个(伸缩仪)、地 倾斜台站151个、井水位台站402个,这些站点主要分布于华北、东南沿海和南北地震带,属 雷电活动较强地区(http://www.zjfl.org/html/article/science/011957.html.),因此观测资料 受雷暴的影响较大、范围很广,地震前兆的相关监测研究人员对此应引起足够重视。

致谢:河北省涞水县气象站和北京市气象局提供了有关雷暴资料,牛安福研究员对本项工作给予了建 设性的支持、帮助,匿名审稿专家对本文提出了中肯的修改建议,在此谨致诚挚谢意。

参考文献

冯志军、赵金花、荆强等,2009,青岛钻孔体应变短时畸变分析,山西地震,(4),40~45。 刘澜波、何世海、宁长平等,1986,Sacks-Evertson钻孔应变仪观测网在京津地区安装,中国地震,2(4),102~104。 卢双苓、于庆民、曲保安等,2010,山东数字化钻孔体应变观测的干扰异常分析,西北地震学报,22(2),186~190。 陆远忠、李胜乐、邓志辉等,2002,基于 GIS 的地震分析预报系统,成都:成都地图出版社。 苏恺之、李海亮、张均等,2003,钻孔地应变观测新进展,北京:地震出版社。 汪成民、车用太、万迪堃等,1988,地下水微动态研究,北京:地震出版社。 虞昊,2005,现代防雷技术基础,北京:清华大学出版社。 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,地球物理学进展,23(6),1717~1726。 张凌空、王广才、牛安福,2011,周期气压波对地壳应变场观测影响的若干因素分析,地震学报,33(3),351~361。 张子广、盛艳蕊、张素欣等,2010,井水位对气压扰动的响应,地震研究,33(2),170~175。 朱乾根、林锦瑞、寿绍文,1992,天气学原理与方法,北京:气象出版社。

Evertson D W, 1977, Borehole strainmeters for seismology, Rep ARL-TR-77-62, Applied Research Lab, University of Texas, Austin, Texas.

Fung Y C, 1965, Foundation of Solid Mechanics, Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Sacks I S, Evertson D W, Dorman L M, 1971, Borehole strainmeters, Washington, D C Carnegie Institution Yearbook, 68, 448 ~ 453.

Comparative study of the interference of mutation pressure generated by thunderstorms with volume strain and same well water-level

Zhang Lingkong¹⁾ Wu Lijun²⁾ Yang Ying²⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract The paper studies Sacks volume strains with the same well water-level observation data of digital minute values at Laishui stations in the Capital Circle Region. It is found that both tidal curve in thunderstorm periods have simultaneously significant distortion abnormal. The analyses of wavelet, regression and power spectral in comparison with the pressure data confirm that this was an interference due to a pressure instantaneous mutation triggered by thunderstorms. The value is about 8 times and 11 times higher than the background value. This phenomenon mainly occurs in the thunderstorm season from June to August. It also studies the laws and mechanisms of the cycle pressure wave affection on the volume strain and well water level. The coefficient curves between thunderstorm days and non-thunderstorm days are compared in terms of air pressure on the volume strain and well water level and their variations and features are summarized.

Key words: Thunderstorms Tidal distortion Volumetric strain Well water-level Mutation air pressure