

维尼迪科夫调和分析对大甸子井水位潮汐因子和相位的气象影响研究^①

王玥琪, 杨立明

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 73000)

摘要:利用维尼迪科夫潮汐调和计算方法计算内蒙古大甸子井水位原始资料和剔除气压、降雨资料后的潮汐因子和相位。结果显示,两种情况下得到的潮汐因子和相位具有较好的一致性,说明采用维尼迪科夫潮汐调和计算方法得到的结果基本不受降水、气压等因素的影响。这对于缺少气压和降水等辅助观测的水位观测资料,使用原始资料进行维尼迪科夫潮汐调和计算,可获取比较可靠的潮汐因子和相位参数。

关键词:大甸子井; 水位; 潮汐因子; 相位; 气压; 降水

中图分类号: P315.72⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0255-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0255

Meteorological Influence of Venedikov Harmonic Analysis Method on Tidal Factor and Phase of the Dadianzi Well Water Level

WANG Yue-qi, YANG Li-ming

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The water level response sensitivity to crustal dynamic process has been proved by the tide water level effect, air pressure effect, and seismic wave records. A series of observation and experiments is conducted to provide the physical basis of reliability for earthquake prediction according to groundwater dynamics. When the mechanical state and external observation environment medium remained constant, changes in the physical properties of the crust medium reveal change in the tidal waves. Therefore, accurate determination of the variation characteristics of tidal water wells may eliminate the importance of tidal factors in the work of earthquake prediction to improve measurement efficiency and also eliminate the utilization of measurement data. Tidal harmonic analysis is an effective method for evaluating the intrinsic quality of well data, which is vital for improving the quality of monitoring data analysis. In this method, digital filtering is used to analyze changes in water level observation data to objectively evaluate the well observation data. Groundwater level in wells is affected by the solid Earth tide, barometric pressure, fault creep, and seismic waves and is thus sensitive to crustal dynamic process. In this study, hourly data was obtained in Dadianzi well, Chifeng, Inner Mongolia, for 156 months from May 2001 to April 2014. The Venedikov tidal harmonic analysis method was used to calculate the tide factor and phase of water level raw data. After eliminating air pressure, rainfall data recorded by the well in Dadianzi were analyzed. The results indicate that tensile stress increased well porosity before the medium-strong earthquakes, which led to this seismic activity. In addition, two cases of wave phase in strong earthquakes are mainly related to phase lag, and the phase of wave interference is eliminated after obvious lag. The M2 wave tide factor and phase in the two cases are very close, which indicated that by using Venedikov tidal harmonic analysis method can reduce the influence of precipitation and the pressure of non-body strain factors on well water level tidal observations to a great extent, which can ensure the reliability and stability of this observation. We obtained good consistency and determined the relevance between tidal factors and phase lag by adopting the Venedikov tidal harmonic analysis method. For well points lacking supplementary observation of barometric pressure and precipitation, we can ob-

① 收稿日期: 2014-10-21

基金项目: 中国地震局“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK19B02-01)

作者简介: 王玥琪(1990-), 女(蒙古族), 内蒙古呼和浩特人, 在读硕士研究生, 主要从事地震预报研究工作. E-mail: yyqqking@sohu.com

tain more reliable parameters such as tidal factor and phase lag by adopting this method to analyze the original data directly.

Key words: Dadianzi well; water level; tidal factor; phase; air pressure; rainfall

0 引言

井水位对地壳动力过程响应的敏感性已被井水位固体潮效应、气压效应、地震波记录、断层蠕动效应等一系列观测及实验所证实,为地下水动态预报地震奠定了可靠的物理基础^[1]。固体潮汐波的变化是反映地壳介质的物性变化,当介质的力学状态及外部观测环境保持不变时,固体潮汐应是一个不变的量。但地壳内应变积累到一定程度,力学状态明显改变时,介质物性发生变化,潮汐波就会发生明显的变化^[2-3]。采用数字频率滤波器对水位观测数据进行滤波以取得日波或半日波中的波群观测振幅与理论振幅之比(振幅比或潮汐因子)以及观测相位与理论相位之差(相位滞后)的维尼迪柯夫潮汐调和与分析方法,是一种既简便易行,又可掌握水位动态变化过程信息的重要手段。水位观测值的影响因素包含降雨、气压、固体潮、地质构造作用等^[4]。固体潮调和与分析是评价观测井资料内在质量的一项有效方法,是提高监测数据分析质量的重要依据。准确把握各水井固体潮变化特征,可在地震分析预报工作中排除固体潮因素影响,进一步提高井水位资料的分析价值^[5]。

大甸子井地处辽蒙交界地区,是一口静水位观测井,已有的研究发现该井水位在多次区域中强地震前出现了水位固体潮畸变异常^[6-7]。从多年观测资料来看,气压和降雨对该井水位观测有一定的影响。然而气压和降雨是否对该井固体潮的结果有影响尚未有相关研究。为此,本文采用维尼迪柯夫潮汐调和与分析方法对内蒙古大甸子井水位原始资料 and 剔除气压和降雨后资料的潮汐因子和相位变化进行了对比分析研究。

1 观测井基本情况

大甸子井位于赤峰市敖汉旗大甸子乡,距敖汉旗新惠镇 90 km。所处区域位于努鲁尔虎山脉东南缘北端,属低山丘地形,西北高、东南低,位于敖汉复向斜与新华夏系的老虎山一道尔登断裂的交叉复合部位,宝国吐掩斜盆地的西部边缘,周围断裂、褶皱密集,EW 向赤峰—开原深大断裂从该区域穿过。所在区的水系多为季节性冲沟,以佛爷山为界,东南坡有大凌河水系的上游黑城子河,北西坡发育着教来河水系(图 1)。研究区域可依地形特点分两个水文地质单元,即努鲁尔虎山东南缘山地水文地质单元和宝国吐掩斜盆地水文地质单元。大甸子井即位于两个单元的过渡带宝国吐掩斜盆地一侧,努鲁尔虎山地的侧向补给,地表降水补给,还有教来河的远源补给等,另外观测井房附近的季节性冲沟对水位的变化也有一定的影响。由于受盆地沉积坡度较缓的影响,地下水径流长,排泄条件差^[6-7]。大甸子井深 200.76 m,含水层岩性为石炭系砂岩,砂板岩等,且破碎强烈,性脆,水位观测段在 57.0~116.0 m 之间,水位埋深 18.8 m 左右。

1993 年正式观测,井况良好,观测系统比较稳定,仪器工作正常,产出的观测数据可信度较高,多年资料的连续性和稳定性很好,是开展潮汐因子和相位动态变化特征研究的理想观测井^[8-9]。2011 年 1 月 17 日对大甸子井水位进行数字化改造,改造后水位年变仍继续保持“夏高冬低”的形态。

2 数据处理和分析

杨玲英等^[8]通过对云南数字与模拟水位观测资料的对比分析,认为其动态变化特征一致,与固体潮的相关系数也基本一致;杨兴悦^[9]、王燕等^[10-11]对甘肃境内部分井同一测点不同时段观测资料或同一测点模拟与数字化资料进行校正后再研究。本文收集了大甸子井水位 2001 年 5 月—2014 年 4 月间共 156 个月的模拟与数字化观测的整点值资料进行分析。由于该井数字化观测与之前模拟观测存在 2 m 左右的系统误差,故在分析过程中进行人为校正,并对数据进行了粗差检查。目的是检查整个数据段内的基线值是否统一,数据中是否有特别明显的错误,甚至是非法的数据等。本文对照观测记录与基础资料对该井水位资料进行校正,对明显的因仪器以及周围环境变化等比较清楚的因素引起水位呈台阶状的变化进行了人为校正。

2.1 维尼迪科夫潮汐调和与分析

保加利亚学者维尼迪柯夫提出了一种采用数字频率滤波器对观测数据进行滤波的方法以取得日波或半日波中的波群观测振幅与理论振幅之比(振幅比或潮汐因子),式(1)以及观测相位与理论相位之差(相位滞后),这种方法称为维尼迪柯夫调和与分析法。其作用是:各固体潮汐因子与地壳介质的弹性有关,其变化反映了地壳介质的应力应变和物性变化;相位是实际观测地球与理论地球模型比较的相位差异^[12]。

$$\delta = \frac{\Delta h/c}{\Delta g} \quad (1)$$

其中, δ 是井水位潮汐因子; $\Delta h/c$ 为水位观测值; Δg 为固体潮理论值。

在实际对地下流体固体潮的分析研究中,通常采用维尼迪柯夫调和与分析法求解出各井孔固体潮效应的各个参数值。固体潮观测值可表示为

$$y(t_j) = \sum_i h_i \cos(\omega_i t_i + \varphi(T_j)) + \Phi(t_j) \quad (2)$$

其中, $y(t_j)$ 为时间观测序列; h_i 是角频率为 ω_i 的潮汐波观测振幅; $\varphi(T_j)$ 为同一潮汐波的初相位; T_j 为观测序列中央时刻的时间间隔; $\Phi(t_j)$ 为 t_j 时的零点漂移。

利用维尼迪柯夫设计的偶数字滤波器和奇数字滤波器作用于连续 48 小时的固体潮观测整点值,经过数学变换后,可按最小二乘法原理求得各波群的潮汐因子和相位、残差矢量等参数,提取所需的全日波、半日波的固体潮信息。

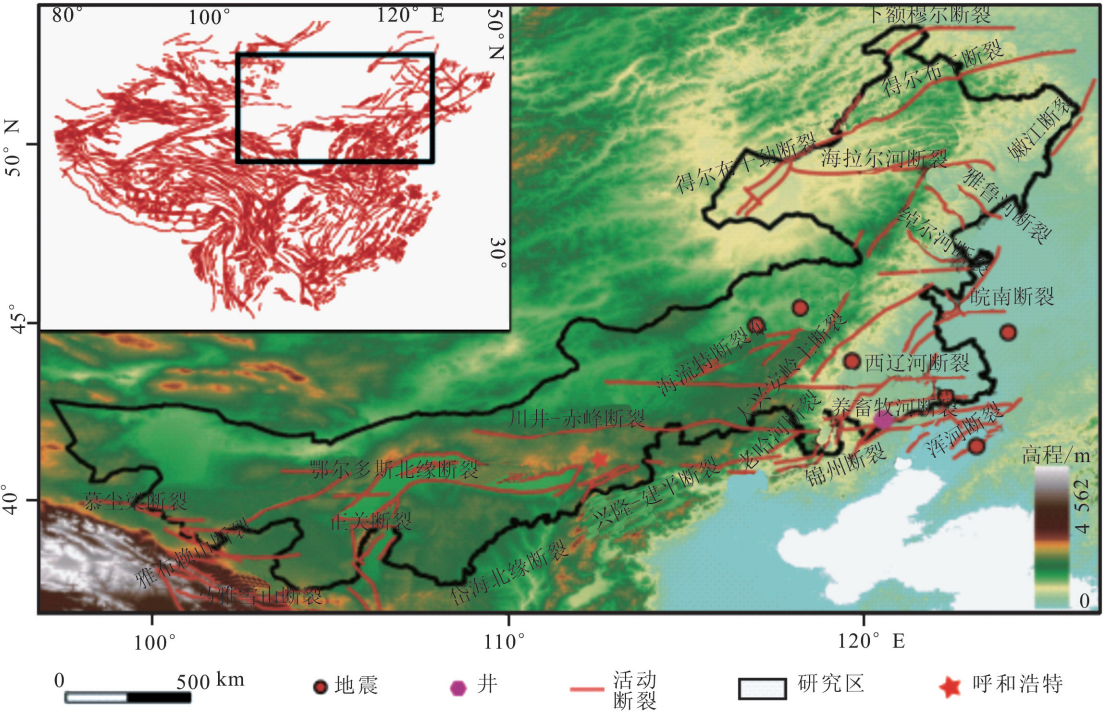


图 1 研究区域地质环境与主要断裂分布示意图

Fig.1 Geological environment and distribution of main faults in study area

2.2 潮汐因子和相位的确定

(1) 利用维尼迪科夫潮汐调和和分析方法对 2001 年 5 月—2014 年 4 月间共 156 个月的大甸子井水位分别剔除气压与降雨后的原始整点值资料进行 M_2 波调和和分析。结果显示,潮汐因子的均值在 $0.239 \text{ mm}/10^{-9}$ 左右,最大变化幅度在 $0.09 \text{ mm}/10^{-9}$ 左右;相位的均值为 -11.5 (图 2)。

(2) 将校正过的水位、气压以及区域降雨整点值资料分别进行回归分析,剔除气压与降雨的影响,然后对剔除干扰后的水位资料进行调和和分析。结果表明,剔除气压与降雨后的水位潮汐因子低值异常变化更加显著。潮汐因子均值在 $0.235 \text{ mm}/10^{-9}$ 左右变化,最大变化幅度在 $0.14 \text{ mm}/10^{-9}$ 左右;相位均值为 -12 (图 3)。

从图 2 和图 3 可以看出,利用大甸子水位原始整点值和剔除干扰后的水位资料得到的潮汐因子均值前者略大于后者,而相位均值后者略大于前者,但相差不大,总体变化趋势一致。

2.3 潮汐因子和相位数据与相关地震事件的关联分析

在 2002 年 10 月 20 日西乌珠穆沁旗 $M_s5.0$ 、2003 年 8 月 16 日巴林左旗 $M_s5.9$ 、2004 年 3 月 24 日东乌珠穆沁 $M_s5.9$ 、2006 年 3 月 31 日吉林乾安 $M_s5.1$ 、2013 年 1 月 23 日灯塔 $M_s5.1$ 和 2013 年 4 月 22 日科左后旗 $M_s5.3$ 地震前,大甸子水位原始整点值 M_2 潮汐因子出现不同程度的低值异常,其中在巴林左旗 $M_s5.9$ 地震前幅度最大(达 $0.072 \text{ mm}/10^{-9}$ 左右),且震后未恢复,共持续 10 个月。在灯塔 $M_s5.1$ 和科左后旗 $M_s5.3$ 地震前,这种低值异常不太明显。剔除干扰后的水位 M_2 潮汐因子在上述地震前也出现类似

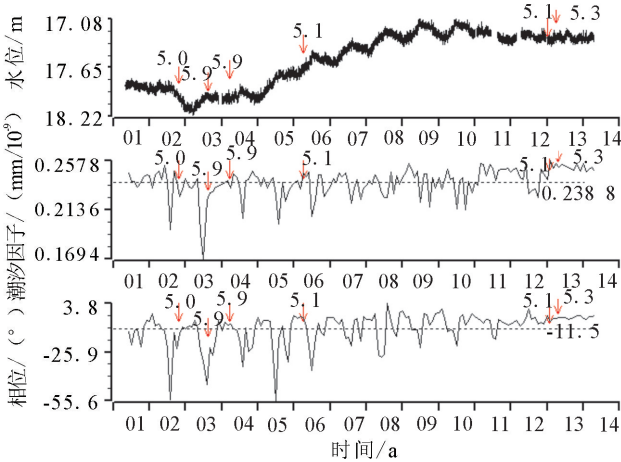


图 2 大甸子井水位原始整点值、 M_2 波潮汐因子和相位月值曲线(2001 年 5 月—2014 年 4 月)

Fig.2 Curves of the water level original hour values, M_2 wave tidal factors and phase month values of Dadianzi well (from May, 2001 to April, 2014)

情况。相位变化在上述中强震前都以滞后为主。其中,在乾安 $M_s5.1$ 地震前,水位原始整点值 M_2 波相位滞后明显(达 -48 左右),持续 9 个月。剔除干扰后的水位 M_2 波相位在巴林左旗 $M_s5.9$ 地震前,滞后明显(达 -124 左右),且震后未恢复,共持续 8 个月。另外,在灯塔 $M_s5.1$ 和科左后旗 $M_s5.3$ 地震前,水位原始整点值 M_2 波相位和剔除干扰后的水位 M_2 波相位变化幅度都很小,甚至异常不明显。

将直接利用原始水位资料与剔除气压和降雨后的水位

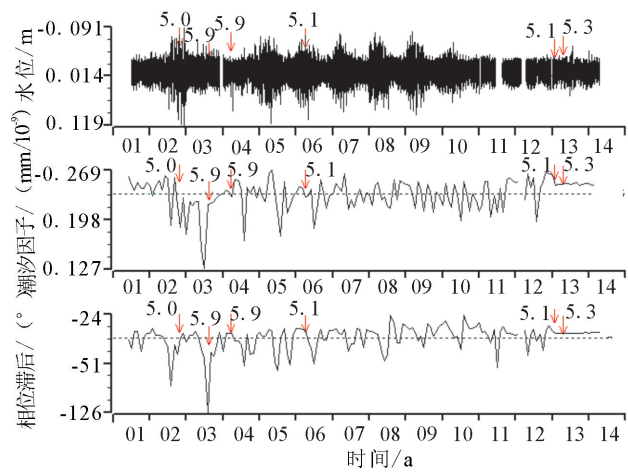


图3 剔除气压与降雨后大甸子井的水位整点值、 M_2 波潮汐因子和相位月值曲线(2001年5月—2014年4月)

Fig.3 Curves of the water level hour values, M_2 wave tidal factors and phase mouth values in Dadianzi well after removing air pressure and rainfall data (from May, 2001 to April, 2014)

资料进行潮汐调和分析得到的潮汐因子和相位进行统计分析发现,两种情况下得到潮汐因子之间和相位之间满足线性关系,且相关性较好(表1)。表明两种情况下得到的潮汐因子和相位具有较好的一致性和相关性。

表1 利用原始水位和剔除气压与降雨后的水位进行潮汐调和分析相关性统计

Table 1 Correlation statistics of the tidal harmonic analyses by using original water level and the water level after removing air pressure and rainfall data

序号	类型	分析结果及检验			
		相关系数	回归残差标准差	回归系数	
1	潮汐因子	0.714	0.009	$a=0.143\ 29$	$b=0.402\ 40$
2	相位	0.887	4.560	$a=-6.696\ 87$	$b=0.437\ 18$

3 结果与讨论

(1) 无论从原始水位获取的 M_2 波潮汐因子和相位还是剔除气压与降雨后获取的 M_2 波潮汐因子和相位,其变化形态都非常相似,而且在区域中强震前其异常变化特征也具有-一致性。 M_2 波潮汐因子在上述中强震前都以低值为主(且剔除干扰后的值更小),有可能与上述中强震震前井孔隙度变大,应力以拉张等原因有关。 M_2 波相位都以滞后为主(且剔除干扰后更明显),这可能与含水层受到应力作用时,岩块内孔隙流对应力作用的响应与岩块间裂隙流对应力作用的响应差异,导致孔隙流向裂隙流的释水滞后有关。

(2) 大甸子井具有承压水的埋藏条件且井水水位与区域气压具有较为明显的年变特征,这是该并能记录到微动态信息的基本条件,可作为开展固体潮特征研究的理想观测井。从大甸子井水位原始整点值可以看出,该井固体潮效应

非常明显,且剔除气压与降雨后的水位整点值尤其突出。

(3) M_2 波潮汐因子和相位在两种情况下的均值都非常接近,这说明采用维尼迪柯夫潮汐调和分析方法在很大程度上削弱和降低了降水、气压等非体应变因素对井水位潮汐观测的影响,从而保证了潮汐观测的可靠性和稳定性。本文只分析了大甸子井气压和降雨对井水位潮汐因子和相位的影响,因此对于在那些缺少气压和降水等辅助观测的井点,可参考使用原始水位资料进行维尼迪柯夫潮汐调和分析。

参考文献(References)

[1] 汪成民,车用太,万迪蕉,等.地下水微动态研究[M].北京:地震出版社,1988.172-175.
WANG Chen-min, CHE Yong-tai, WAN Di-jiao, et al. Micro Dynamic Study of Underground Water[M]. Beijing: Seismological Press, 1988. (in Chinese)

[2] 车用太,鱼金子.地震地下流体学[M].北京:气象出版社,2006: 97-121.
CHE Yong-tai, YU Jin-zi. Underground Fluids and Earthquake[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 97-121. (in Chinese)

[3] 张昭栋,王宝银,高玉斌,等.中国地下水潮汐的观测研究和分析[J].地震学报,1989,11(4):392-401.
ZHANG Zhao-dong, WANG Bao-yin, GAO Yu-bin, et al. The Observation Research and Analysis of Underground Water Tide in China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1989, 11(4): 392-401. (in Chinese)

[4] 赵栋,易立新,王广才,等.地下水位中地震前兆信息提取方法研究[J].地震工程学报,2013,35(2):334-341.
ZHAO Dong, YI Li-xin, WANG Guang-cai, et al. Research on the Technology of Extracting Earthquake Precursor Information from Groundwater Level[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 334-341. (in Chinese)

[5] 巩浩波.地下水位微动态对应力的响应关系研究[D].吉林:吉林大学,2009.
GONG Hao-bo. The Research of Groundwater Level Microdynamic Responding to Stress[D]. Jilin: Jilin University, 2009. (in Chinese)

[6] 丁风和,赵铁锁,尹占军,等.大甸子井水位的气压系数及其震前异常[J].西北地震学报,2007,29(2):174-176.
DING Feng-he, ZHAO Tie-suo, YIN Zhan-jun, et al. Barometric Pressure Coefficient of Water Level in Dadianzi Well and Its Anomalies before Some Earthquakes[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(2): 174-176. (in Chinese)

[7] 丁风和,赤峰大甸子水位预报方法效能及指标研究[J].防灾减灾学报,2010,26(4):35-40.
DING Feng-he. Chifeng Dadianzi Water Level Forecast Method Potency and Index Research[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2010, 26(4): 35-40. (in Chinese)

[8] 杨玲英,毛先进.云南部分水位观测点模拟与数字化并行观测资料对比分析[J].地震研究,2011,34(3):291-295.
YANG Ling-ying, MAO Xian-jin. Comparative Analysis on Analog and Digital Parallel Observation Data Recorded at Several Under-

ground Water Level Seismic Stations in Yunnan[J].Journal of Seismological Research,34(3):291-295.(in Chinese)

[9] 杨兴悦,王燕,侯亚江,等.甘东南水氡特征异常研究[J].地震研究,2011,34(1):8-18.

YANG Xing-yue,WANG Yan,GOU Ya-jiang,et al.Study on Mid-term Anomalies of Radon in Southeast Gansu Province[J].Journal of Seismological Research,2011,34(1):8-18.(in Chinese)

[10] 王燕,杨兴悦,周建强,等.甘肃模拟水位资料处理方法研究及映震效能评估[J].地震研究,2013,36(1):24-33.

WANG Yan, YANG Xing-yue, CHEN Xue-mei, et al. Research on Processing Method of Analogue Water Level Data and Evaluation of Earthquake-reflecting Efficacy in Gansu Province[J].Journal of Seismological Research,2013,36(1):24-33.(in Chinese)

[11] 杨兴悦,王燕,王建荣,等.甘东南地下流体异常与甘肃岷县6.6级地震关系探讨[J].地震工程学报,2013,35(4):808-815.

YANG Xing-yue, WANG Yan, WANG Jian-rong, et al. The Relationship Between Underground Fluid Anomalies in Southeastern Gansu and the Minxian $M_s6.6$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 808-815.(in Chinese)

[12] 廖欣.承压井水位潮汐异常机理研究[D].长沙:湖南师范大学,2010.

LIAO Xin. Study on the Mechanism of Well Water Level Tidal Anomaly [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2010.(in chinese)