

三峡井网井水位固体潮汐和气压响应特征研究^{*}

张卫华^{1,2)} 梅建昌^{1,2)} 李家明^{1,2)} 李井冈^{1,2)}

(1)中国地震局地震研究所,武汉 430071
(2)地壳运动与地球观测实验室,武汉 430071)

摘要 计算了长江三峡工程地下水动态观测井网(8口)井水位的潮汐、气压响应特征、气压系数以及含水层参数。研究认为,三峡井网各井点由于选址较好,具有较好的水文地质条件,含水岩体弹性模量较大,低孔隙度储水系数、压缩系数较强,井孔水位能灵敏反映应力、应变的微变化。

关键词 三峡井网; 固体潮汐; 气压响应; 应力; 应变

中图分类号:P315.72+8

文献标识码:A

STUDY ON WATER-WELL EARTH TIDE AND ATMOSPHERIC RESPONSE IN THREE GORGES WELL NETWORK

Zhang Weihua^{1,2)}, Mei Jianchang^{1,2)}, Li Jiaming^{1,2)} and Li Jinggang^{1,2)}

(1) *Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071*
(2) *Crustal Movement Laboratory, Wuhan 430071*

Abstract On the basis of analysis of the change of water level related to earth tide, atmospheric pressure at 8 stations among the the ground water monitoring well network in the Three Gorges, the sensitivity of response to earth tide, co-efficient of atmospheric pressure are cauculated. It can be shown that because of the particular well location, high elastic modulus, low porosity and high compressibility coefficient, the water well is quite sensitive to small stress-strain variations.

Key words: the Three Gorges well network; earth tide; atmospheric response; stress; strain

1 引言

长江三峡工程诱发地震监测系统地下水动态监测井网(简称三峡井网)是我国第一个以监测诱发地震为目的地下水前兆专用台网,自2001正式运行以来获取了丰富的地壳应力-应变信息,如固体潮汐效应和气压效应等^[1,2]。在三峡地区地震前兆监测特别是水库一、二期蓄水期间发挥起了积极的作用。但目前的工作多限于现象和定性分析,缺少定

量分析,特别是对各井潮汐响应、气压响应等特征差异的机理没有进行系统的研究。为此,笔者对整个井网8口井资料的潮汐、气压效应进行了研究,并对其特征、差异给予了初步解释。

2 三峡井网井水位的变化特征

三峡井网各井台井水位具有明显的年度与季节性周期性变化特征,影响井水位变化的主要因素是降雨^[1-3]。由于井网所在地每年的1—3月份雨量

* 收稿日期:2008-05-14

基金项目:科技部公益研究专项(2006BAC01B04-02-02)

作者简介:张卫华,男,1972年生,硕士,助研,从事地下流体、地壳形变与地震预报方向的研究. E-mail:zwh@eqhb.gov.cn

较少,此期间水位变化大多呈平稳或下降趋势。4—9 月份随着雨季来临井网含水层接受补给的增加使得井水位上升到最高水位。不同水文地质条件的井孔水位的回升速率不同,距补给区远且径流补给条件较差的含水层水位上升较慢,距补给区近且径流补给条件较好的含水层水位上升较快。随着 10—12 月期间降雨量的减少,井水位呈下降变化趋势。此外,井台还可清晰地记录到潮汐效应和气压效应等多种地壳应力-应变信息。

3 井水位变化反映的潮汐特征

三峡井网 8 口井井水位的日周期变化形态与月相关系密切,都能清晰地记录到固体潮汐效应,其中丁家坪(W2)、大河口(W5)、周坪(W7)和郭家坝

(W8)等 4 口井尽管都是动水位观测井,相当多的信息以流量方式损失,但井水位仍显示出固体潮汐效应。图 1 为高家溪(W1)、茅坪(W3)井水位与重力固体潮理论曲线的关系。由图 1 可见,观测值与理论值潮汐特征的一致说明井网井水位反映的不是引潮力引起的地下水液体潮,而是潮汐应力引起的地球固体潮。朔、望日时井水位日变曲线呈双峰双谷,是朔、望月前后潮差较大的半日潮与潮差相对较小的日分潮相互叠加的结果;每月上、下弦前后水位日变曲线呈单峰单谷,是上、下弦前后潮差较小的半日潮与潮差相对较大的日分潮相互叠加所致,每天出现一峰一谷。因此,井水位的升降变化反映的是潮汐应力引起的含水层系统发生体应变的间接效应。各井水位潮汐每日的最大潮差范围如表 1 所示。

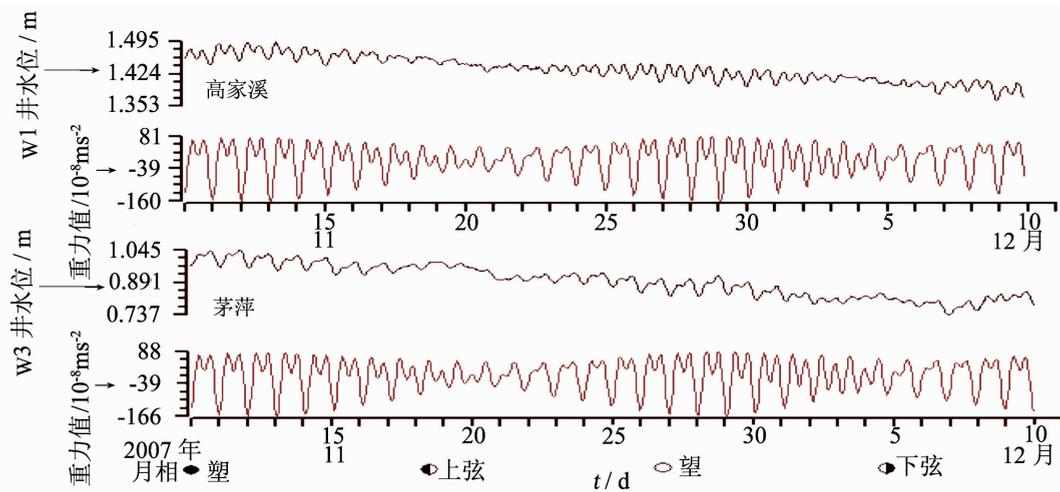


图 1 高家溪、茅坪井水位固体潮波形

Fig. 1 Earth tides of water levels at Gaojiaxi and Maoping stations

表 1 三峡井网 8 口井水位的体应变灵敏度

Tab. 1 Response sensitivity of water level to earth tide in the Three Gorges wells network

井台号	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
潮差(mm)	35-45	20-30	65-70	20-40	25-35	40-50	30-55	45-60
响应灵敏度(10^{-10})/体应变 \cdot mm $^{-1}$	7.50	11.3	4.86	8.50	9.71	14.7	6.18	5.6

4 井水位气压效应分析

4.1 井网所在地气压变化特征

大气压力是表征大气状态的一个基本要素^[4,5],其分布随空间和时间位置的变化而变化,且与大气运动及天气变化有密切关系,有周期变化和非周期变化。周期变化是大气层外潮汐引起的,称为大气潮汐,后者主要是由天气变化引起的。三峡井区气压变化主要是由日波、半日波、几天至十几天的随机变化组成,各井台 2006—2007 年的气压变化曲线体现井区气压年变曲线具有典型的大陆性特征

(一年中气压最高值出现在冬季,最低值出现在夏季)。

4.2 井水位的气压效应

气压变化对地下水的影响具有普遍性。井水位的气压效应强弱,一般用井水位的气压系数或气压效率表述。对三峡井网 8 口井的水位、气压观测数据分析结果表明,水位气压效应明显,与气压变化之间呈负相关关系(图 2 和图 3),且水位变化滞后于气压变化。滞后时间各井不一,气压系数高的井滞后时间短,反之滞后时间较长,一般滞后时间为几分钟到几小时不等。

气压效率是指由气压变化引起的井水位变化与水柱高表示的气压变化之比。表2为三峡井网2006年6月的气压系数和气压效率。

5 潮汐、气压效应机理解释

5.1 含水层系统潮汐响应机制

井水位潮汐响应主要是在起潮力作用下,含水层内部发生弹性形变使孔隙压力变化,造成井-含水层间水流运动,导致井水位变化。其中,含水层对起潮力响应的弹性形变大小决定其水位潮差的变化幅

度。

从表1可见,三峡各井台最大潮差有所差别,这主要是各井台的含水层对潮汐响应的灵敏度不同所致。井水位变化与含水层的体积压缩模量(K_r)、孔隙度(ϕ)、储水系数(S)、单位储水系数(S_s)及水体的体积模量(K_w)和密度(ρ_w)等有关,综合关系式^[6,7]为:

$$dh = \frac{1}{\rho_w g \left(\frac{1-\phi}{K_r} + \frac{\phi}{K_w} \right)} \left(\frac{6G-2E}{4G-E} \right) \times (2h-6L) \frac{T}{Rg} \quad (1)$$

表2 三峡井网井水位的气压系数与气压效率

Tab.2 Pressure coefficients and a number of efficiency of water level in the three Gorges well network

井台号	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
气压系数(mm/hPa)	5.2	5.6	5.3	3.7	2.8	6.3	2.2	2.7
气压效率	0.522	0.562	0.532	0.371	0.281	0.633	0.221	0.271

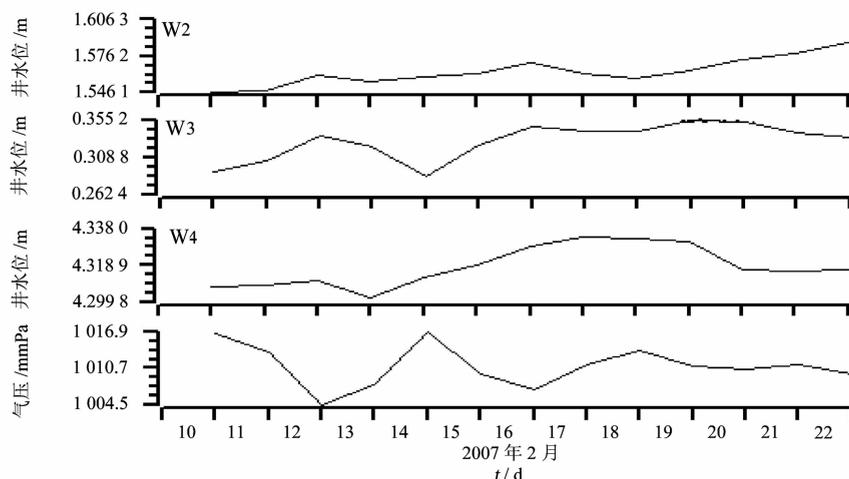


图2 坝区3井台水位、气压曲线对比图(1)

Fig.2 Comparison between well water levels and atmospheric pressures in the three wells in the Three Gorges dam area(1)

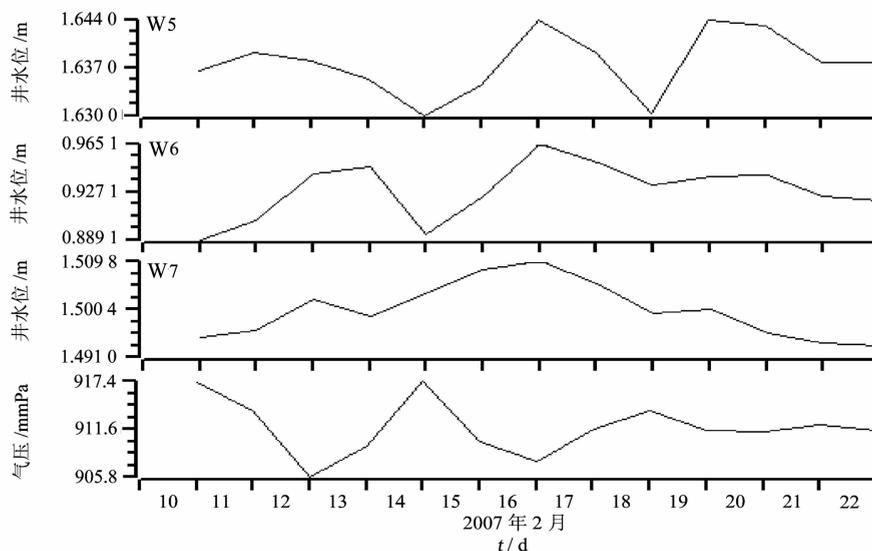


图3 库首区3井台水位、气压曲线对比图(2)

Fig.3 Comparison between well water levels and atmospheric pressure in the three wells in the Three Gorges front area(2)

$$\text{或} \quad dh = \frac{\Theta}{S_s} \quad (2)$$

其中 $S_s = \rho_w g S$; $S = \frac{1-\phi}{K_r} + \frac{\phi}{K_w}$; Θ 为含水层的体应变。

由式(2)可见,体积模量大,孔隙度小,水体密度低,水位对固体潮的振幅响应大,与含水层的剪切模量(G)、杨氏模量(E)的相关性不明显。因此,影响水位固体潮效应的决定因素是含水层的单位储水系数。

月亮引起的潮汐体应变 Θ_m 和太阳引起的潮汐体应变 Θ_s 公式^[8]为:

$$\Theta_m = \frac{1}{19\lambda + 14G} \frac{fM\rho R^2}{L_m^3} (3\cos^2\theta - 1) \quad (3)$$

$$\Theta_s = \frac{1}{19\lambda + 14G} \frac{fM\rho R^2}{L_s^3} (3\cos^2\theta - 1) \quad (4)$$

由式(3)、(4)可求得月亮和太阳联合作用下最大体应变 $\Theta_m = 3.4 \times 10^{-8}$, 由水位潮差计算出各井水位所反映出的体应变灵敏度见表1。由表1可见,三峡井网的井水位所反映出的体应变灵敏度达到甚至超过洞体应变仪的灵敏度^[9]。

5.2 井网含水层系统气压效应的机理分析

呈压水井水位气压效应的主要基础是:大气压力同时作用在地面和井水面上且向深处传递,传播过程中两个途径有差异。气压通过井孔水柱传递时因水为“刚性体”,可无损耗地将大气压力传递到井-含水层系统两者界面上;气压通过大地传递时因岩土为“弹性体”发生变形而消耗部分压力,使传递到井-含水层系统界面上的力要小于通过井孔水柱传递来的力,两个力差导致井-含水层间的水流运动,引起井水位的升降变化,即大气压升高时井水由井孔流向含水层,井水位下降,大气压降低时井水由

含水层流向井孔,井水位上升。

从表2可见三峡各井台井水位的气压效应的差别(主要是各井台的含水层参数不同所致)。水位的气压效应与含水层的参数关系式^[6]为:

$$dh = - \frac{\phi}{\rho_w g \left(\frac{K_w}{K_r} (1-\phi) + \phi \right)} dP \quad (5)$$

$$dh = - \frac{K_r}{\rho_w g \left(\frac{K_r}{\phi} + (K_r - K_w) \right)} dP \quad (6)$$

$$dh = - \frac{\phi}{K_w S_s} dP \quad (7)$$

由式(5)~(7)可知,含水层体积模量和孔隙度大,水体密度和体积模量小,水位对气压的振幅响应大。综合看来,影响水位气压效应的决定因素是含水层的单位储水系数、孔隙度和水体的体积模量。

井孔水位气压效率 b_p 、气压系数以及含水层水体的体积模量(K_w)、孔隙度(ϕ)、储存系数(S)、单位储存系数(S_s)、体积压缩模量(K_r)和密度(ρ_w)之间的换算关系见式(8)~(10)。

$$b_p = - \frac{dh}{dP} \quad B = -r \frac{dh}{dP} \quad (8)$$

$$K_w = -\rho_w V_p^2 - 4G/3 \quad (9)$$

$$B = \frac{\phi}{K_w S} \quad (10)$$

$$S = \frac{1-\phi}{K_r} + \frac{\phi}{K_w} \quad (11)$$

$$a = \frac{1}{K_r} \quad (12)$$

三峡井网各井台含水层参数计算结果见表3。由表3中参数值知,三峡井网含水层的体积模量较大,压缩系数和储存系数小,孔隙度较大。

表3 三峡井网含水层参数

Tab.3 Parameters of aquifer in the Three Gorges well network

井台	单位储水系数 (10^{-9})	储水系数 (10^{-12})	水体体积模量 (10^{10})	孔隙度 (10^{-3})	体积压缩模量 (10^{11})	压缩系数 (10^{-12})
W1	7.55	7.70	2.14	8.60	11.6	8.63
W2	11.3	11.5	2.14	13.8	7.97	1.25
W3	4.86	4.95	2.14	5.64	19.1	0.52
W4	8.5	8.67	2.14	6.88	7.98	1.28
W5	9.7	9.8	2.14	5.89	6.29	1.59
W6	6.8	6.9	2.14	9.35	16.7	1.49
W7	5.6	5.7	2.14	2.70	10.3	0.970
W8	6.1	6.2	2.14	3.59	9.96	1.03

6 结论与讨论

1) 从整个井网地下水位变化规律及其影响因素来看,各井地下水变化规律特征明显。

2) 各井台井水位每日潮差的振幅差异主要与各井含水层的孔隙度、水体密度以及水体体积模量有关,其与孔隙度、水体密度成反比,和水体体积模量成正比。与含水层的剪切模量(G)、杨氏模量(E)的关性不大。

3) 三峡井网8口井的水位潮汐反映的是潮汐应力引起的地球固体潮,井水位潮汐振幅所反映出的潮汐响应变灵敏度范围为 $(4.86 \sim 14.7) \times 10^{-10} / \text{体应变} \cdot \text{mm}^{-1}$,高于洞体应变仪的 10^{-9} 量级。

4) 整个井网井水位的气压效应明显,气压效率在 $0.2 \sim 0.6$ 之间。各井台水位的气压效应与含水层体积模量、孔隙度成正比,与水体密度和体积模量成反比。

5) 三峡井网8口井的地质构造特殊,含水层封闭、承压条件好,体积模量较大,压缩系数和储水系数小,孔隙度较大,说明井网所在地的井-含水层系统对地壳应力、应变具有较大的放大作用,能灵敏地反映应力、应变的变化。

参 考 文 献

- 1 车用太,刘五洲,颜萍. 三峡井网地下流体动态在水库蓄水前后的变化[J]. 大地测量与地球动力学,2004,24(2):14-22.
- 1 Che Yongtai, Liu Wuzhou and Yan Ping. Subsurface fluid behaviors and its changes in Three Gorges well network before and after reservoir impounding[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(2): 14-22. (in Chinese)
- 2 张卫华,姚运生,李胜乐. 三峡井网二期蓄水前后水位动态特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(5):94-98.
- 2 Zhang Weihua, Yao Yunsheng and Li Shengle. Analysis of dynamic characteristics of groundwater before and after second impoundment of Three Gorges reservoir[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(5): 94-98. (in Chinese)
- 3 梅建昌,等. 三峡水库二期蓄水前后井网地下水温度特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(专刊):84-88.
- 3 Mei Jianchang, et al. Analysis of water temperature characteristics of monitoring well network in Three Gorges area before and after second impounding[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(Spec.): 84-88. (in Chinese)
- 4 车用太,等. 三峡井网地下水动态观测的技术系统[J]. 地震地质,2002,22(3):423-434. (in Chinese)
- 4 Che Yongtai, et al. Technical system of ground water observation in Three Gorges well network[J]. Seismology and Geology, 2002, 22(3): 435-444. (in Chinese)
- 5 车用太,等. 三峡井网的布设与观测井建设[J]. 地震地质,2002,22(3):423-434.
- 5 Che Yongtai, et al. Technical system of ground water observation in Three Gorges well network[J]. Seismology and Geology, 2002, 24(3): 435-444. (in Chinese)
- 6 Melchior P. The tides of the planet earth[M]. Oxford: Pergamon Press, 1978.
- 7 Clark S P, et al. Handbook of Physical Constants[S]. New York, Geol. Soc. Am. 1966.
- 8 蔡祖煌,等. 北京洼里深井水位变化所记录的地球固体潮和地震波[J]. 地震学报,1980,2(2):205-214.
- 8 Cai Zhuhuang, et al. Earth tides and seismic waves recorded by the level fluctuations in a deep borehole at Wali near Beijing[J]. Acta Seismologica Sinica, 1980, 2(2): 205-214. (in Chinese)
- 9 侯茂生,等. 苏10井水位与应力应变的关系[J]. 地震学报,1984,6(1):92-93.
- 9 Hou maosheng, et al. On the relation between the stress-strain condition at depth and the Water level variation in the SU-10 water well[J]. Acta Seismologica Sinica, 1984, 6(1): 92-93. (in Chinese).