

静态密闭状态下大甸子井孔隙度与 体积压缩系数时序特征分析^①

梁 莹, 张立丰, 李 惠

(内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:以内蒙古大甸子观测井为数据收集对象,利用原始水位观测数据得到该井静态密闭下气压系数、水位与气压的关系以及孔隙度与气压系数的关系,从而分析该井静态密闭状态下孔隙度与体积压缩系数时序特征。结果表明,孔隙度与固体骨架的体积压缩系数和含水层内水的体积压缩系数间存在幂函数关系;在第一象限内,各井含水层介质固体骨架的体积压缩系数随着孔隙度的增大而增大;含水层内水的体积压缩系数随着孔隙度的增大而减小。

关键词:大甸子井水位;静态密闭;孔隙度;体积压缩系数

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-1103-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1103

Analysis of the Porosity and Temporal Characteristics of the Volume Compression Coefficient of the Dadianzi Well in a Static and Hermetically Sealed State

LIANG Ying, ZHANG Li-feng, LI Hui

(Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: This study analyzes the relationship between porosity and temporal characteristics of the volume compressibility coefficient of the Dadianzi well and provides reliable data and information for earthquake prediction. Data from the Dadianzi well are digitized data of the water level that are checked by data processing and are used because the well observation system is relatively stable, the measuring instrument works properly, and the observed data have high reliability. On the basis of relevant theories from mechanics, elasticity, and fluid mechanics, making use of the elastic state of the aquifer medium and a three-phase change model of material volume, the porosity, volume compression coefficient of the solid skeleton, and volume compression coefficient of water in the aquifer were calculated using digitized data of the well water level. The results show that there exists a power function relation among the three aforementioned factors. In the first quadrant, the volume compression coefficient of the well aquifer solid skeleton increases with an increase in porosity, whereas the volume compression coefficient of water decreases with an increase in porosity.

Key words: water level of the Dadanzi well; static and hermetically sealed state; porosity; volume

① 收稿日期: 2014-12-25

基金项目: 震情跟踪项目(2015010305)

作者简介: 梁莹, 工程师, 主要从事地震分析预报工作。E-mail: 327267262@qq.com。

compression coefficient

0 引言

孔隙度和岩石压缩系数等方面的研究是油藏工程领域研究的热点问题。岩石压缩系数指的是岩石孔隙体积压缩系数,在评价油藏弹性产能和动态地质储量方面有重要的应用价值,但这些参数一般都要通过实验仪器测量来获取。固体骨架的压缩系数则是在上述参数确定的基础上,通过理论关系式来求得。李传亮^[1]认为对于特定的岩石来说,固体骨架的压缩系数为一常数,即岩石骨架处于压实状态,不存在弹性变形。而地震工作者较多是利用井潮、气压等资料来分析井-含水层系统的固体潮效应、气压效应、以及它们与含水层参数(孔隙度、固体骨架和水的体积压缩系数或模量等)的关系^[2-12]。例如,在不排水状态下,一般都是给出气压系数或潮汐因子和孔隙度、固体骨架的体积压缩系数、水的体积压缩系数间的定量关系进行分析讨论。结合含水层介质在弹性状态下的三相物质体积变化模型,丁凤和等^[13]对孔隙度与固体骨架的体积压缩系数和水的体积压缩系数间的变化规律进行机理分析,并给出了三者的变化关系式。

本文以大甸子井数字化水位等资料为基础,基于岩石力学、弹性力学和流体力学的相关理论,利用该井气压效率和潮汐因子,对其含水层介质在不排水(静态密闭)状态下的孔隙度与固体骨架的体积压缩系数和水的体积压缩系数进行计算。

1 观测井基本情况

大甸子井(120°35'27" E;42°17'17" N)位于赤峰市敖汉旗大甸子乡,距新惠镇 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。大甸子井地层岩性为石炭系砂岩、砂板岩等,且破碎强烈、性脆。该井井深 200.76 m。水位观测段在 57.0~116.0 m,水位埋深 18.8 m 左右。石炭系基岩丘水,受山区侧向补给和教来河近源补给,径流较差。大甸井自 1993 年开始观测,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。

2 区域水文地质条件

大甸子井所处区域整体上位于阴山东西复杂构造带与大兴安岭华夏系的复合部位,其构造形迹既有反映东西复杂构造带的,亦有属于大兴安岭华夏系的,且有两者复合相互作用而生成的各种构造形

迹,东西向赤峰—开原深大断裂从该区域穿过。该井位于敖汉复向斜与新华夏系的老虎山—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,是应力易于集中的地点。

该区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,该井即位于两个单元的过渡带宝国吐掩斜盆地一侧。该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。该井由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^[14]。

3 数据的整理和处理

收集了 2001 年 5 月至 2014 年 12 月共 164 个月大甸子水位的整点值资料,对其按年逐月检查、整理,并改变为统一格式备用(单位:m)。在数据整理过程中,考虑了 2011 年 1 月 17 日大甸子井数字化观测与之前模拟观测的系统误差(模拟和数字水位值相差 2 m 左右)因素,对数据进行了粗差检查,使整个数据段内的基线值统一。

4 气压系数的获取

4.1 水位与气压回归模型选取

水位与气压回归模型的选取非常关键。从 2001 年、2012 年 7—12 月与 2002 年和 2004 年 1—6 月水位和气压关系图(图 1、图 2)看出,大甸子井的水位和气压线性关系非常明显。因此选择了一元回归模型,从而可以更直观地反映出水位和气压的线性关系。

4.2 基本理论

依据大甸子井水位与气压观测值间非常密切的线性关系,确定气压系数[式(1)~式(2)]的动态变化过程。

$$\begin{cases} w_i = Bp_i \cdot p_i + b_i \\ w_{i+1} = Bp_i \cdot p_{i+1} + b_i \end{cases} \quad (1)$$

$$Bp_i = \frac{w_i - w_{i+1}}{p_i - p_{i+1}} \quad (2)$$

其中: w_i 为 i 时刻水位值, w_{i+1} 为 $i+1$ 时刻的水位值; p_i 为 i 时刻气压值, p_{i+1} 为 $i+1$ 时刻的气压值; Bp_i 为 i 时刻的气压系数。

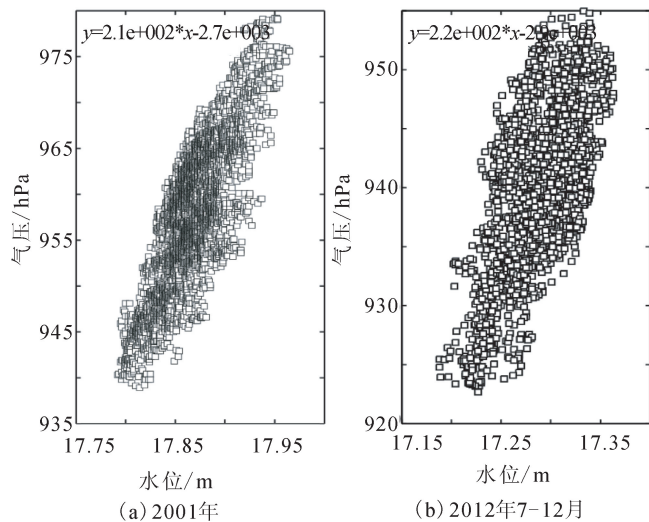


图 1 大甸子井 2001 年和 2012 年 7—12 月水位和气压关系

Fig.1 Relationship between the water level and pressure in Dadianzi well in 2001 and from July to December, 2012

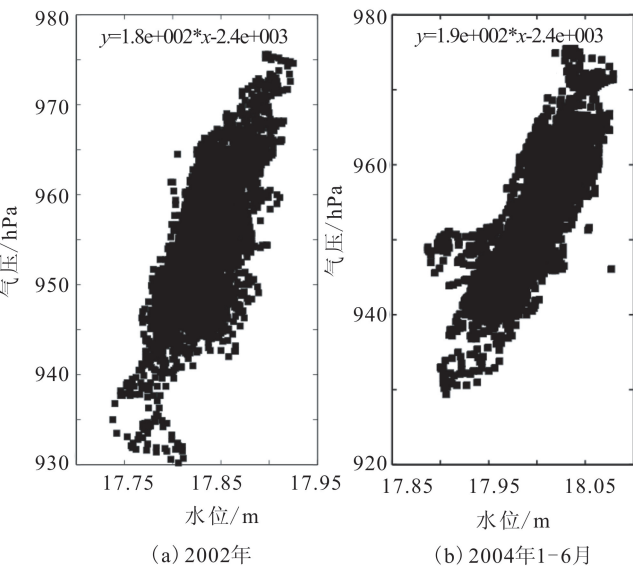


图 2 大甸子井 2002 年和 2004 年 1—6 月水位和气压关系

Fig.2 Relationship between the water level and pressure in Dadianzi well in 2002 and from January to June, 2004

排水状态下单位气压变化引起水井水位的变化,即水井水位的气压效率为:

$$B_p = \frac{\frac{n\beta}{\alpha + n\beta}}{\sqrt{4T^2 - 4Tr_w^2 \omega K e i(a_k) \cos \varphi + r_w^4 \omega^2 K^2 e i(a_k)}} \quad (3)$$

对于长周期信号来说,当角频率 $\omega \rightarrow 0$,根据三

角函数和贝塞尔函数的性质,可以推得:

令

$$\sqrt{\frac{4T^2}{4T^2 - 4Tr_w^2 \omega K e i(a_k) \cos \varphi + r_w^4 \omega^2 K^2 e i(a_k)}} = f_w \quad (4)$$

使

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \sqrt{\frac{4T^2}{4T^2 - 4Tr_w^2 \omega K e i(a_k) \cos \varphi + r_w^4 \omega^2 K^2 e i(a_k)}} = \lim_{\omega \rightarrow 0} f_w = 1 \quad (5)$$

由此可知,当 $\omega \rightarrow 0$ 时,式(3)就变成了式(6):

$$B_p = \frac{n\beta}{\alpha + n\beta} \quad (6)$$

也就是说,当 $\omega \rightarrow 0$ 时,信号的变化周期变得无穷大,也就是无周期信号,此时和不排水情况相当(静态密闭状态下)。

5 潮汐因子的获取

动态响应状态下,井水位潮汐效率表达式一般为:

$$B_g = -\frac{1-n}{\rho g [(1-n)\alpha + n\beta]} \cdot \cos \varphi \quad (7)$$

当 $\cos \varphi = 1$ 时,为不排水或密闭体系下的潮汐效率。

依据式(7)(令 $\cos \varphi = 1$)和式(6)得到:

$$B_g = -\frac{1-n}{\rho g n\beta \left[\frac{(1-n)(1-B_p)}{B_p} + 1 \right]} \quad (8)$$

含水层的孔隙度 n 、水的体积压缩系数 β 和固体骨架的体积压缩系数 α 即可求出,相应的含水层导水系数 T 、贮水率 S_s 和渗透系数 K 的动态变化过程亦可获得。

6 孔隙度和压缩系数的关系

从孔隙度和压缩系数的关系可以看出(图 3、图 4),二者间存在明显的幂函数性质。从表 1 中可以详细得知,静态密闭环境下,大甸子井孔隙度为 0.115 7,固体骨架的体积压缩系数为 $76.86 \times 10^{-10} / \text{hPa}$,水的体积压缩系数为 $264.9 \times 10^{-10} / \text{hPa}$ 。固体骨架的体积压缩系数 α 与孔隙度 n 之间的拟合方程为 $\alpha = 16.57(1-n)^{-0.5322}$,两者间存在幂函数关系。其孔隙度 n 的范围为 $0 \sim 1$, α 的范围为 $0 \sim +\infty$,且幂指数小于零,表明在第一象限内,该井含水层介质固体骨架的体积压缩系数随着孔隙度的增大而增大。其原因在于,当骨架应力减小的同时骨架体积

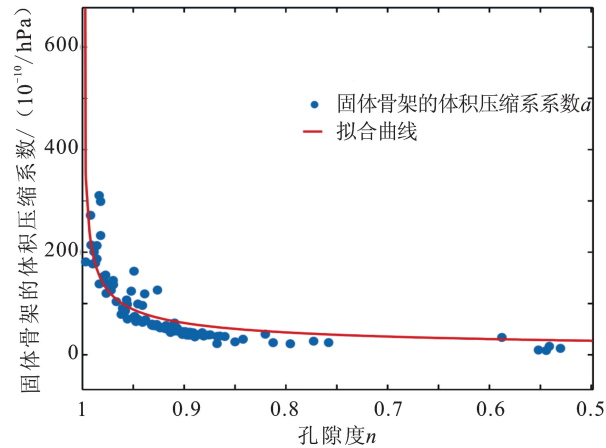


图3 静态密闭状态下孔隙度 n 和固体骨架的体积压缩系数 α 间的关系

Fig.3 Relationship between the porosity (n) and solid skeleton volume compression coefficient (α) of the Dadianzi well in a static and hermetically sealed state

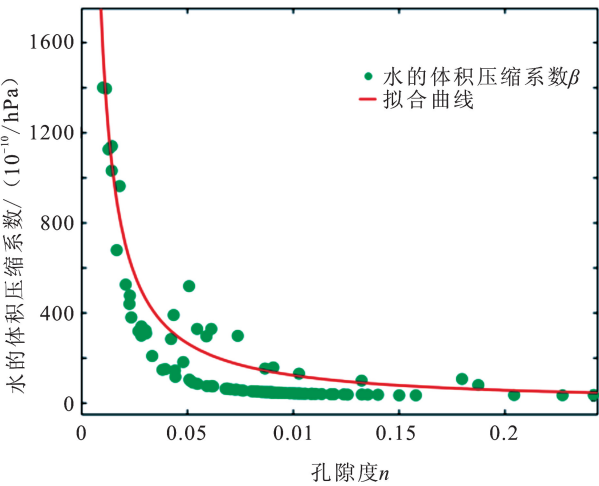


图4 静态密闭状态孔隙度 n 和水的体积压缩系数 β 间的关系

Fig.4 Relationship between the porosity (n) and water volume compression coefficient (β) of the Dadianzi well in a static and hermetically sealed state

表1 静态密闭状态下大甸子井含水层参数结果对比		
Table 1 Comparison of the aquifer parameters of the Dadianzi well in a static and hermetically sealed state		
含水层参数	孔隙度 n	0.115 7
	固体骨架的体积压缩系数 α	$76.86 \times 10^{-10} / \text{hPa}$
孔隙度 n 和固体骨架的体积压缩系数 α 间的关系	水的体积压缩系数 β	$264.9 \times 10^{-10} / \text{hPa}$
	拟合方程	$\alpha = 16.57(1 - n)^{-0.532\ 2}$
孔隙度 n 和水的体积压缩系数 β 间的关系	R^2	0.701
	标准差	30.97
	拟合方程	$\beta = 9.704n^{-1.105}$
	R^2	0.811 3
	标准差	273.3

增大(膨胀),其体积变化量越大(较容易压缩)。因此固体骨架体积压缩系数随着孔隙度的增大而增大。

孔隙度 n 和水的体积压缩系数 β 的拟合方程为 $\beta=9.704n^{-1.105}$,也存在幂函数关系。大甸子井含水层介质的体积压缩系数在第一象限随着孔隙度的增大而减小(图4)。其原因在于,当孔隙压力增大时水体难于压缩,则其体积压缩系数减小。

在此过程中,水的弹性形变越来越小。这是因为水的压缩系数越来越小,其体积变化量也就越小,水也越来越难以压缩。于此同时,固体骨架则表现为易压缩、弹性形变逐渐增强的过程。

7 孔隙度和压缩系数的时序特征分析

从静态密闭状态下大甸子井孔隙度、水的体积压缩系数和固体骨架的体积压缩系数月时序变化情况来看(图5),2001年5月以来大甸子井孔隙度整体变化相对较大。2002年10月20日西乌旗5.0级地震前孔隙度呈偏低到增大的过程,又恢复低值;2003年8月16日巴林左旗5.9级地震前孔隙度经历了偏高到偏低的过程;2004年3月24日东乌旗5.9级地震前孔隙度在均值线以下波动变化;2006年3月31日乾安5.1级地震前孔隙度出现了3组高值现象。2007年相继又出现了2次孔隙度偏高的现象,2008以来孔隙度整体表现为低值波动(图中的红色部分都表示压应力情况下)。

从水的体积压缩系数 β 的时序特征看,仅在2002年10月20日西乌旗5.0级地震和2003年8月16日巴林左旗5.9级地震前出现过 β 偏高(膨胀,但幅度不大)现象,2004年年中又出现了一次幅度不大的 β 偏高现象。2013年4月内蒙古科尔左后旗地震以及2013年10月前郭震群前后也相继出现了 β 偏高现象。2014以来水的体积压缩系数整体表现为高值波动(膨胀,幅度也较大)。

固体骨架的体积压缩系数 α 时序变化和水的体积压缩系数 β 变化非常一致, α 越小对应的 β 越大(压应力情况下)。2002年10月20日西乌旗5.0级地震、2003年8月16日巴林左旗5.9级地震、2013年4月内蒙古通辽科左后旗地震和2013年10月前郭震群前出现过 α 偏低(压缩,但幅度不大)现象。2014年年中又出现了一次幅度不大的 α 偏低现象。2015以来固体骨架的体积压缩系数整体表现为低值波动(压缩,幅度较小)。

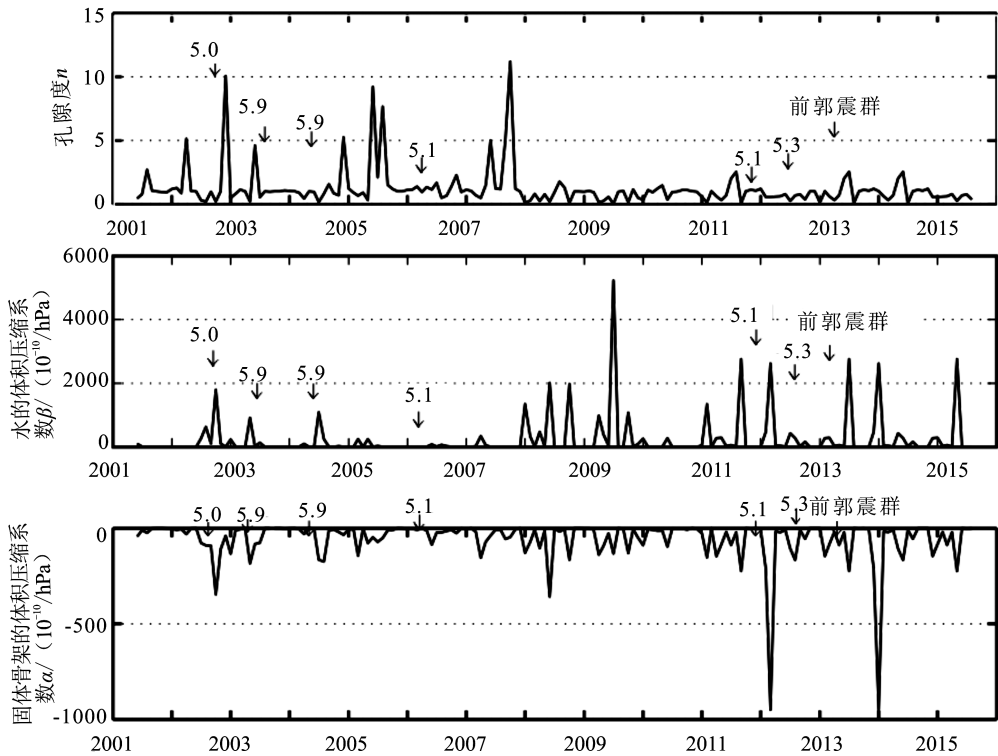


图 5 静态密闭状态下大甸子井孔隙度、水的体积压缩系数和固体骨架的体积压缩系数月时序曲线(注:固体骨架的体积压缩系数膨胀为负,水的体积压缩系数压缩为正)

Fig.5 Monthly time-sequence curves of the porosity,solid skeleton volume compression coefficient,and water volume compression coefficient of the Dadianzi well in a static and hermetically sealed state

8 结果讨论

(1) 在上述研究过程中,假设大甸子井含水层是线性、均质和各向同性的弹性体,井水为理想流体(水的重度为一常数,且不存在剪切应变)。

(2) 依据该井的地质剖面 and 固体潮体应变响应特征,该井具有承压水的埋藏条件和特征。2011 年数字化改造以来,该井水位不受降水季节变化的影响,其承压性似乎比以前更强,这也是该井能记录到微动态信息的基本条件。

(3) 水的体积压缩系数 β 和固体骨架的体积压缩系数 α 与孔隙度 n 成反函数关系。孔隙度越大,固体骨架的体积压缩系数 α 越大,水的体积压缩系数 β 越小。

(4) 从静态密闭状态下大甸子井孔隙度、水的体积压缩系数和固体骨架的体积压缩系数月时序曲线来看,2008 年以来尤其是 2011 年数字化以来,大甸子井受外界跃层补给和侧向径流补给越来越小,究其原因很可能是井水的扰动使悬浮的胶质物流向含水层孔隙,从而使孔隙度减小,降低或阻断该井与外界的水力联系,水的承压性增强。

参考文献(References)

[1] 李传亮.岩石压缩系数与孔隙度的关系[J].中国海上油气:地质,2003,17(5): 355-358.
LI Chau-liang.The Relationship between Rock Compressibility and Porosity[J].China Offshore Oil and Gas:Geology,2003,17 (5):355-358.(in Chinese)

[2] Bredehoeft J D.Response of Well-aquifer Systems to Earth Tides[J].Journal of Geophysical Research,1967,72 (12): 3075-3087.doi:10.1029/JZ072i012p03075.

[3] George H R,Edwin S R.Determination of Aquifer Parameters from Well Tides[J].Journal of Geophysical Research,1979,84 (B11):6071-6082.doi:10.1029/JB084iB11p06071.

[4] Kamp G, Gale J E,Theory of Earth Tide and Barometric Effects in Porous Formations with Compressible Grains[J]. Water Resources Research,1983,19 (2): 538-544. doi: 10. 1029/WR019i002p00538.

[5] Narasimhan T N,Kanehiro B Y,Witherspon PA.Interpreta-tion of Earth Tide Response of Three Deep Confined Aquifers [J].Journal of Geophysical Research.1984,89(B3):1913-1924. doi: 10.1029/JB089iB03p01913.

[6] 田竹君,谷园珠.地下水微动态资料的分析与处理[J].地震地质,1985,7(3):51-62.
TIAN Zhu-jun, GU Yuan-zhu.Analysis and Processing of Data on Fluctuations of Groundwater Level [J]. Seismology and

- Geology, 1985, 7(3): 51-62. (in Chinese)
- [7] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 井水位的固体潮效应和气压效应与含水层参数间的定量关系[J]. 西北地震学报, 1989, 11(3): 47-52.
- ZHANG Zhao-dong, ZHENG Jin-han, FENG Chu-gang. Quantitative Relationship between the Earth Tide Effect of Well Water Level, the barometric Pressure Effect and the Parameters of Aquifers[J]. Northwestern Seismological Journal, 1989, 11(3): 47-52. (in Chinese)
- [8] 李春洪, 陈益惠, 田竹君. 井-含水层系统对固体潮的动态响应及其影响因素[J]. 中国地震, 1990, 6(2): 37-45.
- LI Chun-hong CHEN Yi-hui, TIAN Zhu-jun. The Dynamic Response of Well-Aquifer System to Earth Tides and Its Influence Factors[J]. Earthquake Reserch in China, 1990, 6(2): 37-45. (in Chinese)
- [9] John B, Keith E S, Mousa D S. Estimating Aquifer Parameters from Analysis of Forced Fluctuations in Well Level: An Example from the Nubian Formation Near Aswan, Egypt 2 Poroeleastic Properties[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(B7): 12139-12160. doi: 10.1029/91JB00956.
- [10] Erskine A D. The Effect of Tidal Fluctuation on a Coastal Aquifer in the UK[J]. Groundwater, 1991, 29(4): 556-562. doi: 10.1111/j.1745-6584.1991.tb00547.x.
- [11] 张昭栋, 郑金涵, 张广城. 水井含水层系统的潮汐响应函数[J]. 西北地震学报, 1995, 17(3): 66-71.
- ZHANG Zhao-dong, ZHENG Jin-han, ZHANG Guang-cheng. Presponse Functions of Well Aquifer System to Tide[J]. Northwestern Seismological Journal, 1995, 17(3): 66-71. (in Chinese)
- [12] Gui J L, Hong K G, Wei L W. Transfer Functions of the Well-Aquifer Systems Response to Atmospheric Loading and Earth Tide from Low to High-Frequency Band[J]. Journal of Geophysical Research, 2013, 118(5): 1904-1924. doi: 10.1002/jgrb.50165.
- [13] 丁风和, 韩晓雷, 哈媛媛, 等. 承压井含水层孔隙度与固体骨架和水的体积压缩系数之间的关系[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2015, 7: 1248-1253.
- DING Feng-he, HAN Xiao-lei, HA Yuan-yuan, et al. Relationship of Porosity and Volume Compression Coefficient of Solid Skeleton and Water in Artesian Well Aquifer[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 7: 1248-1253. (in Chinese)
- [14] 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)