

丁风和, 刘耀炜, 韩晓雷, 魏建民, 查斯. 2017. 基于井潮、气压效应的苏皖地区突出水位异常分析. 地震学报, 39(2): 248-256. doi:10.11939/jass.2017.02.008.

Ding F H, Liu Y W, Han X L, Wei J M, Zha S. 2017. Water level anomaly analysis in Jiangsu and Anhui Provinces based on the well tide and barometric pressure effect. *Acta Seismologica Sinica*, 39(2): 248-256. doi:10.11939/jass.2017.02.008.

基于井潮、气压效应的苏皖地区 突出水位异常分析^{*}

丁风和¹⁾ 刘耀炜²⁾ 韩晓雷^{1),*} 魏建民¹⁾ 查 斯¹⁾

1) 中国呼和浩特 010010 内蒙古自治区地震局

2) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

摘要 基于流体及岩石力学理论, 利用气压和潮汐效应, 研究了苏皖地区苏 02 井、苏 03 井、苏 06 井、苏 18 井和定远 04 井含水层介质在不排水状态下孔隙度和渗透系数的变化情况. 结合井-含水层系统在受力和水均衡两种状态下的微动态变化模型, 分析了各井水位自 2014 年下半年以来相继出现同步上升现象的水动力学成因机制. 结果表明: ① 5 口井的气压系数与 M_2 波潮汐因子之间存在明显的线性关系, 即气压系数越大, 潮汐因子也越大; ② 各井的孔隙度和渗透系数出现一组同步增大现象, 主要与补给量大于泄流量、补给增强有关.

关键词 井-含水层系统 不排水状态 卷积回归法 水文地质参数 水位上升

doi:10.11939/jass.2017.02.008

中图分类号: P315.72⁺3

文献标志码: A

Water level anomaly analysis in Jiangsu and Anhui Provinces based on the well tide and barometric pressure effect

Ding Fenghe¹⁾ Liu Yaowei²⁾ Han Xiaolei^{1),*} Wei Jianmin¹⁾ Zha Si¹⁾

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

2) *Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China*

Abstract: Based on the theories of fluid and rock mechanics, we have studied the variation of porosity and permeability coefficients of the wells Su02, Su03, Su06, Su18 and Dingyuan04 with barometric pressure and tidal effect in aquifer medium under undrained condition. Using the micro dynamic models of well-aquifer system under the conditions of force and water balance, we also analyzed the mechanism of simultaneous rise in water level since the second half of 2014. The results show that: ① There is a linear relationship between the barometric coefficient and the tidal factor of M_2 wave for the five wells, that is, the larger the barometric coefficient, the larger the tide factor; ② A set of synchronous enlargement phenomenon occurred in porosity and permeability coefficient of

* 基金项目 2016 年度地震跟踪合同制定向重点工作任务资助项目(2016020305)资助.

收稿日期 2016-06-28 收到初稿, 2016-10-08 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: nmwlhxl@163.com



each well, which is mainly because that the recharge is greater than the discharge.

Key words: well-aquifer system; undrained condition; convolutional regression; hydrogeological parameter; water level rise

引言

气压、井潮效应及含水层参数(孔隙度和渗透系数等)一直是国内外地震学者的研究热点(Bredehoeft, 1967; Rhoads, Robinson, 1979; van der Kamp, Gale, 1983; Narasimhan *et al*, 1984; 田竹君, 谷园珠, 1985; Rojstaczer, 1988; 张昭栋等, 1989, 1995; 李春洪等, 1990; Beavan *et al*, 1991; Erskine, 1991; Lai *et al*, 2013). 如在不排水(静态密闭)状态下, 利用潮汐因子和气压系数可定量获得孔隙度、固体骨架及水的体积压缩系数, 同时相应的渗透系数和贮水率等含水层参数也可在此基础上获得.

自 2014 年下半年以来, 苏皖地区出现了数量较多的水位异常, 且呈现时间上准同步、空间上相对集中的特征. 本文拟以苏 02 井、苏 03 井、苏 06 井、苏 18 井和定远 04 井的数字化水位、气压等资料为基础, 基于流体和岩石力学等相关理论, 利用各井潮汐因子和气压系数, 建立井-含水层系统在受力和水均衡两种状态下的微动态变化模型, 判定各井孔隙度和渗透系数等含水层参数的变化情况, 探寻水动力学成因机制. 以期排除非构造因素的影响, 明确异常变化所反应的构造活动信息, 为区域震情跟踪和判定提供科学依据.

1 研究区水井参数及资料处理

本文研究的苏 02 井、苏 03 井、苏 06 井、苏 18 井和定远 04 井等 5 口井, 运行时间较长, 数据连续稳定, 固体潮形态明显, 且自 2011 年 1 月以来具有完整的气压资料, 是开展基于井潮和气压效应的数字化水位分析研究的理想观测井. 各井的空间分布和具体参数分别如图 1 和表 1 所示.

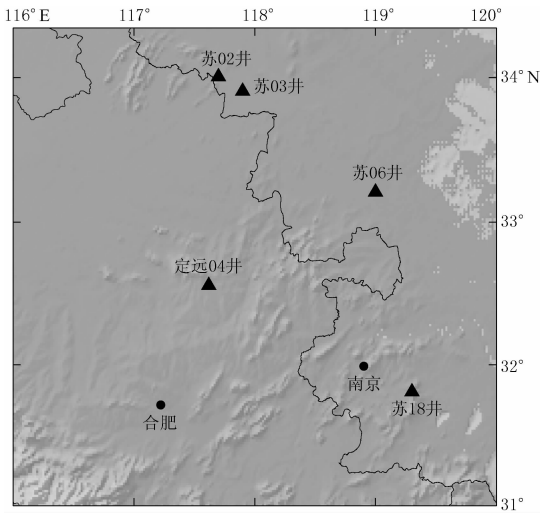


图 1 本研究所用 5 口井的空间分布

Fig. 1 The space positions of five wells in this study

表 1 本研究所用 5 口井的基本参数

Table 1 General information of five wells in this study

井点名称	东经/°	北纬/°	井深/m	含水层岩性	地下水类型	资料选取时间
苏 02 井	117.7	34.0	311.76	灰岩	裂隙承压水	2011 年 1 月
苏 03 井	117.9	33.9	449.30	震旦系白云质灰岩	孔隙裂隙混合水	2011 年 1 月
苏 06 井	119.0	33.2	102.00	砂岩、灰岩	孔隙裂隙混合水	2011 年 1 月
苏 18 井	119.3	31.8	2364.50	泥岩、砂岩	裂隙岩溶承压水	2011 年 1 月
定远 04 井	117.6	32.6	683.50	砂岩、砂砾岩	裂隙承压水	2011 年 1 月

对收集到的苏 02 井、苏 03 井、苏 06 井、苏 18 井和定远 04 井等 5 口井的数字化水位资料和相应的气压整点值资料进行处理: ① 对每口井的水位和气压数据按年逐月检查、整理, 并改为统一格式备用(气压单位: hPa, 水位单位: m); ② 将水位和气压数据整理成数据文本文件, 缺数的地方按照统一要求进行标记后, 结合三次样条插值和一般多项式分段拟合值对其进行替换; ③ 准备各井点的 excel 文件, 包括时间(等间隔的整点值)、水位、气压和理论固体潮, 为利用卷积回归法获得剩余水位(仅剩气压项或固体潮项的水位)提供可靠的数据. 需要强调的是, 此时水位须由埋深值换算成水头高度值, 单位为 m.

2 气压系数和潮汐因子

2.1 基本理论

考虑水位与气压间的非线性关系及滞后时间的卷积回归法, 一直是近年来气压校正的主要方法之一(Rasmussen, Crawford, 1997; Toll, Rasmussen, 2007; Darner, Sheets, 2012; 方慧娜, 2013; Hussein *et al*, 2013; 史浙明, 王广才, 2013; 赵丹, 王广才, 2013; 杨柳等, 2014). 其核心思想是: 引入井水位对气压的阶跃响应函数, 利用水位和气压数据拟合出阶跃响应函数的最佳值, 再由该最佳阶跃响应函数来校正水位. 如果考虑固体潮因素(一般由传感器测量值或理论固体潮代替), 该方法可同时校正观测井水位数据中的气压和固体潮.

依据前人的研究结果(Rasmussen, Crawford, 1997; Toll, Rasmussen, 2007; 王丽亚等, 2012; 李悦等, 2015), 采用卷积回归法, 利用水位、气压和理论固体潮数据拟合出阶跃响应函数的最佳值, 并判断响应的滞后时间, 最终计算出校正后的水位. 在不考虑其它因素(补给和排泄等)的情况下, 井水位的变化量可表示为

$$\Delta W(t) = \sum_{i=0}^m \alpha(i) \Delta B(t-i) + \sum_{i=0}^m \beta(i) \Delta E(t-i), \quad (1)$$

式中, i 为滞后时间, m 为选取的最大滞后时间, t 为水位变化时间, $\Delta W(t)$ 为 t 时刻的水位变化量, $\alpha(i)$ 为滞后 i 时刻的气压单位脉冲响应函数, $\Delta B(t-i)$ 为 $t-i$ 时刻的气压变化量, $\beta(i)$ 为滞后 i 时刻的固体潮响应系数, $\Delta E(t-i)$ 为 $t-i$ 时刻的固体潮变化量.

假设将水位的影响因素分解为气压、潮汐、趋势成分和随机成分等 4 个分项. 首先, 用卷积回归法剔除潮汐成分, 然后用一般多项式分段拟合去除趋势和随机成分, 此时剩余水位只剩气压效应项. 趋势明显的气压数据需事先进行线性去趋势. 最后利用剩余水位(只剩气压效应项的水位)和校正后的气压采用一阶差分来获取气压系数.

潮汐因子等的获取则首先用卷积回归法剔除井水位的气压成分(气压校正), 再用一般多项式分段拟合去除趋势和随机成分直至剩余水位只剩潮汐响应项, 最后利用维尼迪柯夫调和分析程序获得各波群的潮汐因子等参数.

2.2 各井水位的振幅谱特征

选取 2011 年数字化观测以来, 各井不同时段(水位相对变化稳定的年初时段)的水位整点值数据, 通过对这些数据进行振幅谱分析可知, 引起 5 口井水位变化的潮汐分波主要有 M_2 波、 K_2 波、 O_1 波和 K_1 波, 且 M_2 波的振幅最大(图 2). 因此, 我们采用维尼迪柯夫调和分析法来获取各井水位的 M_2 波潮汐因子.

2.3 结果分析

利用剩余水位(只剩气压效应项的水位)和气压,采用一阶差分获取气压系数,如图3a所示.可以看出:苏02井的气压系数最大,均值接近10 mm/hPa,其次为苏03井、苏06井和定远04井,苏18井的气压系数最小,均值约为1.1 mm/hPa.

利用剩余水位(只剩潮汐响应项的水位),通过维尼迪柯夫调和程序获得各井的M₂波潮汐因子,结果如图3b.可见:苏02井的潮汐效应最好,均值约为2.0 mm/10⁻⁹;苏03井与苏06井的潮汐效应基本接近,均值约为1.07 mm/10⁻⁹;苏18井和定远04井

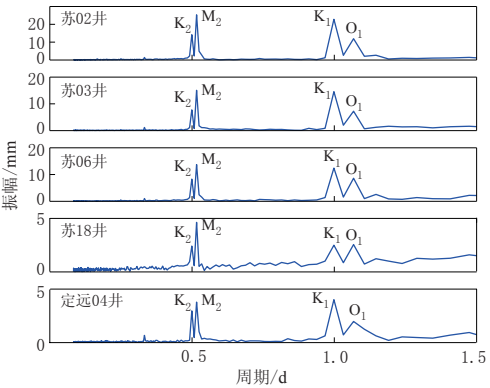


图2 各井水位的振幅谱特征分析结果
Fig. 2 The amplitude spectrum characteristic analysis results of each well water level

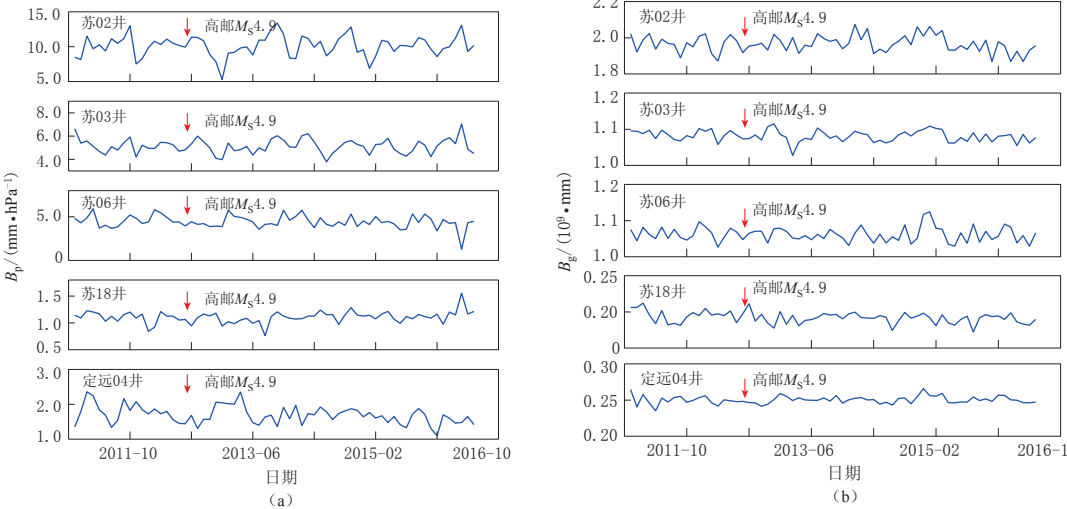


图3 各井气压系数B_p(a)和M₂波潮汐因子B_g(b)月值曲线

Fig. 3 Month value curve of barometric coefficient (a) and M₂ wave tide factor (b) for each well

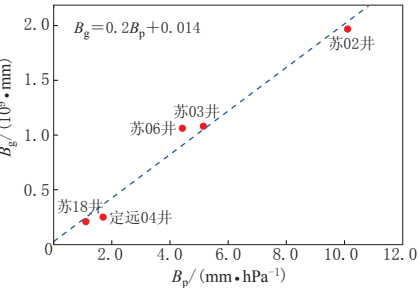


图4 各井水位气压系数B_p与M₂波潮汐因子B_g的关系

Fig. 4 Relation between barometric coefficient and M₂ wave tide factor of water level

的潮汐效应相对较小,均值各约为0.2 mm/10⁻⁹和0.25 mm/10⁻⁹,接近承压井和非承压井的临界状态(刘序俨等,2009).

图4给出了5口井的气压系数B_p与M₂波潮汐因子B_g之间的关系,即气压系数越大,潮汐因子也越大,两者之间呈明显的线性关系.但2012年7月20日高邮M_s4.9地震前后,5口井的气压系数B_p和M₂波潮汐因子B_g均变化平稳,没有明显短临异常.此外,各井都具有承压性质,承压性由强到弱依次为苏02井、苏03井、苏06井、定远04井和苏18井.

3 含水层参数的动态变化特征

3.1 基本理论

在不排水状态下, 水位气压系数 B_p 和潮汐因子 B_g 可分别表示为(张昭栋等, 1989, 1995; 李春洪等, 1990)

$$B_p = \frac{n\beta}{\alpha + n\beta}, \quad (2)$$

$$B_g = -\frac{1-n}{\rho g [(1-n)\alpha + n\beta]}, \quad (3)$$

由式(2), (3)可得

$$B_g = -\frac{1-n}{\rho g n\beta \left[\frac{(1-n)(1-B_p)}{B_p} + 1 \right]}, \quad (4)$$

式中: α 为固体骨架的体积压缩系数; β 为水的体积压缩系数; n 为含水层的孔隙度; ρ 为水的密度, g 为重力加速度, 两者乘积为水的重度, 其值为 0.098 hPa/mm.

贮水率 S 可按

$$S = \rho g [(1-n)\alpha + n\beta] \quad (5)$$

求得(Davis, DeWiest, 1966). 动态响应下, 渗透系数 K 、潮汐波频率 ω 、含水层导压系数 a 和 M_2 波相位滞后 φ 等参数满足如下关系(李春洪等, 1990):

$$\tan\varphi = \frac{r_0^2}{2T} \omega k_0, \quad (6)$$

$$k_0 = \ln \frac{1.12}{\sqrt{\frac{\omega}{a}} r_0}, \quad (7)$$

$$a = \frac{K}{S}, \quad (8)$$

式中, T 为导水系数, k_0 为开尔文函数实部, r_0 为井径. ω 需选取潮汐波中某一波群的固定频率, 本文选择振幅大、干扰少的 M_2 波, $\omega=1.9324$.

不排水状态下, 含水层导压系数 a 为

$$e^{k_0} = \frac{1.12}{\sqrt{\frac{\omega}{a}} r_0} = 1, \quad (9)$$

$$a = \frac{\omega r_0^2}{1.2544}, \quad (10)$$

则渗透系数 K 为

$$K = \frac{\omega r_0^2}{1.2544} S. \quad (11)$$

3.2 各井孔隙度和渗透系数的特征分析

图 5 和 6 分别给出了 2011 年以来苏 02 井、苏 03 井、苏 06 井、苏 18 井和定远 04 井的孔隙度和渗透系数的月值结果, 可见, 除了 2014 年下半年至 2015 年年初前后, 各井孔隙度和渗透系数有一组同步增大外, 其它时段不明显, 仅苏 03 井在 2012 年 7 月 20 日高邮

$M_s4.9$ 地震前, 变化相对明显. 这与 2014 年下半年各井水位开始转折上升, 表现出时间上的同步性和空间上的集中性的特点比较一致. 2015 年下半年以来, 各井孔隙度和渗透系数的变化又恢复至相对平稳的状态.

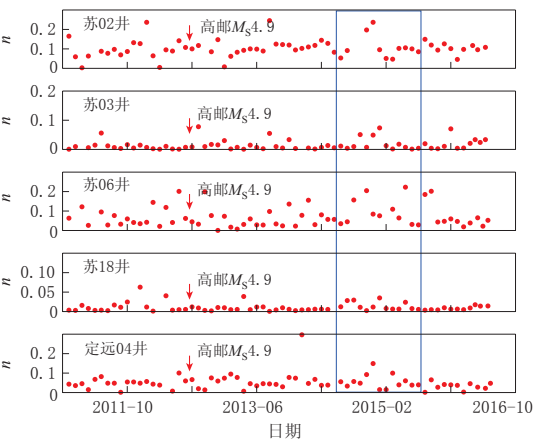


图 5 各井孔隙度 n 月值变化曲线
Fig. 5 Month value curve of porosity n for each well

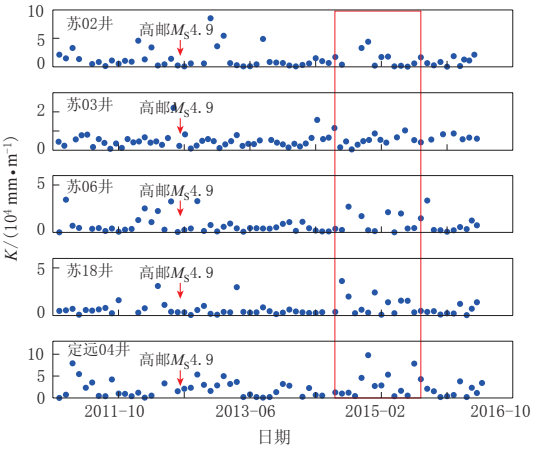


图 6 各井渗透系数 K 月值变化曲线
Fig. 6 Month value curve of permeability coefficient K for each well

4 水动力学成因机制

针对自 2014 年下半年以来上述各井相继出现的多井水位同步上升现象, 从应力变化(拉张和压缩)和环境干扰(地下水开采和补给)等方面, 构建了水动力学模型, 分析水位变化的成因机制.

自然状态下, 含水层介质由固、液、气三相物体耦合形成. 含水层介质的体积分为 4 种, 即总体积或称外观体积、岩石骨架体积、孔隙体积和水的体积, 且外观总体积等于其它 3 种体积之和. 在含水层因受力状态变化而引起地下水发生动态变化的过程中(表 2), 当含水层介质受压变形时, 孔隙度减小, 孔隙压力增大, 井水位表现为上升状态; 反之, 当

表 2 含水层受力状态变化引起的地下水动态示意

Table 2 Dynamic state of groundwater caused by change of stress state in aquifer

	总体积 V	孔隙度 n	孔隙压力 P	井水位 H
正常	$V = V_{\text{骨架}} + V_{\text{孔隙}} + V_{\text{水}}$	n	P	H
受压力变形	$V' = V_{\text{骨架}} + V'_{\text{孔隙}} + V_{\text{水}}$	$n - \Delta n$	$P + \Delta P$	$H - \Delta H$
受张力变形	$V'' = V_{\text{骨架}} + V''_{\text{孔隙}} + V_{\text{水}}$	$n + \Delta n$	$P - \Delta P$	$H + \Delta H$

表 3 含水层水均衡变化引起的地下水动态示意

Table 3 Dynamic state of groundwater caused by change of aquifer water balance

	总体积 V	孔隙度 n	孔隙压力 P	井水位 H
正常	$V = V_{\text{骨架}} + V_{\text{孔隙}} + V_{\text{水}}$	n	P	H
补给量 > 泄流量	$V' = V_{\text{骨架}} + V'_{\text{孔隙}} + V_{\text{水}}$	$n + \Delta n$	$P + \Delta P$	$H - \Delta H$
补给量 < 泄流量	$V'' = V_{\text{骨架}} + V''_{\text{孔隙}} + V_{\text{水}}$	$n - \Delta n$	$P - \Delta P$	$H + \Delta H$

含水层介质受张力变形时,孔隙度增加,孔隙压力减小,井水位表现为下降状态.在含水层介质因水均衡状态发生变化而引起地下水动态变化的过程中(表3),当孔隙度增大时,水位出现上升变化与外水进入井孔有关(补给量大于泄流量,补给增强),同时孔隙压力增大;反之,当孔隙度减小时,水位出现下降变化与井水外流有关(补给量小于泄流量,补给减小),同时孔隙压力减小.

2014年下半年至2015年年初,苏02井、苏03井、苏06井、苏18井和定远04井出现水位准同步上升,且孔隙度和渗透系数出现一组同步增大现象,而上述地下水动态变化模型可以很好地解释该现象的成因.孔隙度和渗透系数的增大将为区域浅层地下水的补给提供更有利的条件,亦即孔隙度增大时,水位出现上升变化与补给量大于泄流量、补给增强有关.苏02井、苏03井和苏18井尤为明显.

5 讨论与结论

针对苏02井、苏03井、苏06井、苏18井和定远04井的井水位自2014年下半年以来相继出现上升的异常现象,通过维尼迪柯夫潮汐调和分析及气压系数、含水层参数(孔隙度和渗透系数)等计算分析,得出以下结论:

1) 引起各井水位变化的主要潮汐分波有 M_2 波、 K_2 波、 O_1 波和 K_1 波,其中 M_2 波的振幅最大;

2) 卷积回归法是进行气压校正和剔除潮汐成分的有效方法;

3) 5口井的气压系数 B_p 与 M_2 波潮汐因子 B_g 间存在明显的线性关系,即气压系数越大,潮汐因子也越大.各井都具有承压性质,承压性由强到弱依次为苏02井、苏03井、苏06井、苏18井和定远04井;

4) 2011年以来各井的孔隙度和渗透系数的月值变化表明,除了2014年下半年至2015年年初,孔隙度和渗透系数出现一组同步增大外,其它时段这种现象不明显,这与2014年下半年各井水位时间准同步、空间集中的特点比较一致.这将为区域浅层地下水的补给提供更有利的条件.

本文研究结果获取的前提条件为,假设井-含水层处于不排水状态,且介质为线性、均质、各向同性的弹性体,井水为理想流体.另外,文中所述含水层水均衡变化引起的地下水动态模型,虽然可以很好地解释2014年下半年至2015年年初前后井水位、孔隙度和渗透系数的同步变化,但还需更翔实的资料和细致、深入的研究加以验证.

江苏省地震局廖阿丽、安徽省地震局王俊等同志在研究中提供了相关数据,作者在此表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 方慧娜. 2013. 利用地下水位气压效应反演汶川地震前后含水层参数的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 65-75.
- Fang H N. 2013. *Estimating Aquifer Parameters From Barometric-Pressure Effect of Groundwater Before and After Wenchuan Earthquake*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 65-75 (in Chinese).
- 李春洪, 陈益惠, 田竹君. 1990. 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, 6(2): 37-45.
- Li C H, Chen Y H, Tian Z J. 1990. The dynamic response of well-aquifer system to earth tides and its influence factors[J]. *Earthquake Research in China*, 6(2): 37-45 (in Chinese).

- 李悦, 姚会琴, 张杰卿, 邵永新. 2015. 2012 年天津地区三次地震前水位对固体潮振幅响应计算分析[J]. 地震, **35**(1): 131–139.
- Li Y, Yao H Q, Zhang J Q, Shao Y X. 2015. Responses of groundwater level to earth tides amplitude before three 2012 earthquakes in Tianjin area[J]. *Earthquake*, **35**(1): 131–139 (in Chinese).
- 刘序俨, 郑小菁, 王林, 季颖锋. 2009. 承压井水位观测系统对体应变的响应机制分析[J]. 地球物理学报, **52**(12): 3147–3157.
- Liu X Y, Zheng X J, Wang L, Ji Y F. 2009. Response analysis of the well-water-level system in confined aquifer[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(12): 3147–3157 (in Chinese).
- 史浙明, 王广才. 2013. 承压含水层地下水位固体潮潮汐因子和相位滞后与汶川地震的关系[J]. 中国科学: 地球科学, **43**(7): 1132–1140.
- Shi Z M, Wang G C. 2013. Relationship between the earth tidal factor and phase lag of groundwater levels in confined aquifers and the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake of 2008[J]. *Science China Earth Sciences*, **56**(10): 1722–1730.
- 田竹君, 谷园珠. 1985. 地下水位微动态资料的分析与处理[J]. 地震地质, **7**(3): 51–59.
- Tian Z J, Gu Y Z. 1985. Analysis and processing of data on fluctuations of groundwater level[J]. *Seismology and Geology*, **7**(3): 51–59 (in Chinese).
- 王丽亚, 郭海朋, 李文鹏, 范珊珊, 朱菊艳, 凤蔚. 2012. 气压对观测井水位的影响及校正方法[J]. 水文地质工程地质, **39**(6): 29–34.
- Wang L Y, Guo H P, Li W P, Fan S S, Zhu J Y, Feng W. 2012. Impact of atmospheric loading on the water level in a well and methods for calibrating it[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, **39**(6): 29–34 (in Chinese).
- 杨柳, 马建英, 曹井泉, 邵永新, 刘文兵. 2014. 利用华北地区承压井水位资料反演含水层体应变[J]. 中国地震, **30**(2): 249–259.
- Yang L, Ma J Y, Cao J Q, Shao Y X, Liu W B. 2014. Inversion of the volumetric strain of aquifer according to the tidal effect of groundwater in the North China region[J]. *Earthquake Research in China*, **30**(2): 249–259 (in Chinese).
- 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 1989. 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, **11**(3): 47–52.
- Zhang Z D, Zheng J H, Feng C G. 1989. Quantitative relationship between the earth tide effect of well water level, the barometric pressure effect and the parameters of aquifers[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **11**(3): 47–52 (in Chinese).
- 张昭栋, 郑金涵, 张广城. 1995. 水井含水层系统的潮汐响应函数[J]. 西北地震学报, **17**(3): 66–71.
- Zhang Z D, Zheng J H, Zhang G C. 1995. Response functions of well aquifer system to tide[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **17**(3): 66–71 (in Chinese).
- 赵丹, 王广才. 2013. 地下水位气压效应的消除及主要气压影响分波的识别[J]. 中国科学: 技术科学, **43**(1): 79–86.
- Zhao D, Wang G C. 2013. Removing barometric pressure effects from groundwater level and identifying main influential constituents[J]. *Science China Technological Sciences*, **56**(1): 129–136.
- Beavan J, Evans K, Mousa S, Simpson D. 1991. Estimating aquifer parameters from analysis of forced fluctuations in well level: An example from the Nubian Formation near Aswan, Egypt: 2. Poroelastic properties[J]. *J Geophys Res*, **96**(B7): 12139–12160.
- Bredehoeft J D. 1967. Response of well-aquifer systems to earth tides[J]. *J Geophys Res*, **72**(12): 3075–3087.
- Darner R A, Sheets R A. 2012. Using existing data to estimate aquifer properties, Great Lakes Region, USA[J]. *Groundwater*, **50**(3): 477–484.
- Davis S N, DeWiest R J M. 1966. *Hydrogeology*[M]. New York: John Wiley and Sons: 34–35.
- Erskine A D. 1991. The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK[J]. *Groundwater*, **29**(4): 556–562.
- George H R, Edwin S R. 1979. Determination of aquifer parameters from well tides[J]. *J Geophys Res*, **84**(B11): 6071–6082.
- Hussein M E A, Odling N E, Clark R A. 2013. Borehole water level response to barometric pressure as an indicator of aquifer vulnerability[J]. *Water Resour Res*, **49**(10): 7102–7119.

- Lai G J, Ge H K, Wang W L. 2013. Transfer functions of the well-aquifer systems response to atmospheric loading and earth tide from low to high-frequency band[J]. *J Geophys Res*, **118**(5): 1904–1924.
- Narasimhan T N, Kanehiro B Y, Witherspoon P A. 1984. Interpretation of earth tide response of three deep, confined aquifers[J]. *J Geophys Res*, **89**(B3): 1913–1924.
- Rasmussen T C, Crawford L A. 1997. Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers[J]. *Groundwater*, **35**(3): 502–511.
- Rhoads Jr G H, Robinson E S. 1979. Determination of aquifer parameters from well tides[J]. *J Geophys Res*, **84**(B11): 6071–6082.
- Rojstaczer S. 1988. Determination of fluid flow properties from the response of water levels in wells to atmospheric loading[J]. *Water Resour Res*, **24**(11): 1927–1938.
- Toll N J, Rasmussen T C. 2007. Removal of barometric pressure effects and earth tides from observed water levels[J]. *Groundwater*, **45**(1): 101–105.
- van der Kamp G, Gale J E. 1983. Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains[J]. *Water Resour Res*, **19**(2): 538–544.