

晏锐、高福旺、陈颢, 2007, 由井一含水层系统的水位动态反演含水层体应变, 中国地震, 23(3), 303~309。

# 由井一含水层系统的水位动态反演 含水层体应变

晏锐<sup>1, 2)</sup> 高福旺<sup>1)</sup> 陈颢<sup>3)</sup>

1) 中国地震台网中心, 北京市三里河南横街5号 100045

2) 中国地震局地震预测研究所, 北京市复兴路63号 100036

3) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘要** 以孔隙弹性理论和水文地质学原理为基础, 给出井水位波动与含水层介质体应变变化关系的数学表达式, 结合固体潮理论分析了井一含水层系统水位潮汐波动对体应变固体潮的响应特征, 用水位潮汐波来反演含水层体应变的变化, 将反演结果与体应变实测资料得到的结果进行对比, 发现二者有较好的一致性, 说明用水位潮汐波来反演含水层体应变的方法是可行的, 它为了解含水层的水文地质特性、体应变的变化及探索地震前兆提供了借鉴。

**关键词:** 井一含水层系统 水位潮汐 体应变 反演

[文章编号] 1001-4683(2007)03-303-07

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

## 0 引言

大量的观测事实表明, 地壳应变是引起地下水位变化的主要原因, 因此可将水位变化当作灵敏的体应变仪(Bodvarsson, 1970)。为了从水位观测资料中提取有用的地壳应变信息, 需要建立有效的数学模型, 该模型必须能反映以下两方面信息: 一方面是含水层系统中流体压力对地壳应变的定量响应, 另一方面是井一含水层系统中的观测量对流体压力的定量反应。为提高模型的可信度, 要求该模型必须能够成功地说明水位的变化是由已知的应变变化引起的。

周期性的地球固体潮体膨胀是由日月引潮力引起的, 它与地球和日月的质量及相对位置有密切关系, 其各谐波分量可在假定地球是完全刚性的条件下由潮汐静力学理论计算得出, 况且在井一含水层系统的井水位观测过程中常观测到潮汐成分, 显然, 固体潮理论计算值和实际水位潮测量值是不完全符合的。很多学者正是利用二者的差异来研究浅层地壳及含水层的特性(Bredehoeft et al., 1967; Carr et al., 1969; Rhoads et al., 1979; 汪成民等, 1988; 张昭栋等, 2002)。这为建立用潮汐力反演含水层体应变变化的数学模型提供了基础。

本文分析了井一含水层系统水位对体应变的响应特征, 给出了含水层水位与体应变之

[收稿日期] 2007-05-15; [修定日期] 2007-06-21。

[项目类别] 地震科学联合基金(105141)资助项目。

[作者简介] 晏锐, 男, 生于1978年, 理学学士, 主要从事地下流体与地震预测研究。

间的数学关系式,并用潮汐力反演含水层体应变变化的方法求得井水位对体应变的响应系数;另一方面以体应变和水位实测资料为基础,对排除气压影响因素之后的水位和体应变观测资料进行系统分析,得出实测水位对体应变的平均响应系数,与起潮力方法得到的响应系数进行对比,发现二者有较好的一致性,说明由井水位固体潮反演含水层体应变是合理可行的。

## 1 理论基础

### 1.1 井一含水层水位对体应变的响应

对理想的封闭承压含水层而言,假设含水层为无限延伸且由固体颗粒间没有黏聚力的多孔透水性介质组成,其上部和下部均为不透水的隔水层。由于含水层应力变化足以使含水层孔隙流体上升到与含水层相通的观测井孔中,当作用于含水层的应力增加(或减少)时会引起含水层固体骨架的压缩(或膨胀),从而引起含水层的弹性失水(或吸水),表现为与含水层相通的井孔中压力水头的升降变化和流量的变化。

根据孔隙弹性介质理论,作用于含水层某一平面上的荷载分别由固体颗粒和颗粒间的孔隙流体共同承担。假设孔隙度为  $n$  的含水层由压缩系数为  $\alpha$  的岩石固体颗粒和压缩系数为  $\beta$  的孔隙流体两部分组成,其平均压缩系数为  $\lambda$ ,那么压缩系数可以分别表示为(Rhoads et al., 1979)

$$\lambda = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP} \quad (1)$$

$$\alpha = -\frac{1}{V_m} \frac{dV_m}{dP_m} \quad (2)$$

$$\beta = -\frac{1}{V_w} \frac{dV_w}{dP_w} \quad (3)$$

式中, $P$  为含水层中某一体积增量所引起的流体静压力, $V$  为该增量的总体积, $V_m$  为含水层中固体颗粒所占的体积, $V_w$  为孔隙中流体所占的体积,结合孔隙度的定义可以得到以下表达式:

$$V = V_m + V_w \quad (4)$$

$$\frac{dV}{dP} = \frac{dV_m}{dP} + \frac{dV_w}{dP} \quad (5)$$

$$V_w = nV \quad (6)$$

$$V_m = (1-n)V \quad (7)$$

由(1)~(7)式可得

$$\lambda = (1-n)\alpha + n\beta \quad (8)$$

因此,由于含水层体膨胀  $\Theta = dV/V$  造成的流体压力水头  $H$  的变化可表示为

$$-dH = \frac{\Theta}{\rho g \lambda} = \frac{\Theta}{\rho g [(1-n)\alpha + n\beta]} \quad (9)$$

$$S_s = \rho g [(1-n)\alpha + n\beta] \quad (10)$$

$$S_s = -\frac{\Theta}{dH} \quad (11)$$

式中,  $\rho$  为含水层流体密度,  $g$  为重力加速度,  $S_s$  为含水层的贮水率或释水率, 它表示单位面积单位厚度的含水层, 当压力水头降低(或升高)一个单位时所能释出(或贮入)的水的体积。由(10)式可以清楚地看出, 当含水层流体密度  $\rho$  和重力加速度  $g$  为常数时, 含水层体应变的变化与水头变化是孔隙度  $n$ 、流体压缩系数  $\beta$  及含水层固体介质压缩系数  $\alpha$  的函数。对于某一具体的含水层而言, 若含水层介质参数变化不大, 则含水层体应变的变化与水位变化量之比可以用一简单的参数  $S_s$  来描述。

### 1.2 体应变对固体潮的响应

对于分层均匀、各项同性球谐模型, 理论固体潮起潮力位  $W$  与体应变之间的关系可表示为

$$\epsilon_{kk} = \frac{1-2\nu}{1-\nu} (2h-6l) \frac{W}{rg} \quad (12)$$

式中,  $h$  和  $l$  为地球的勒夫数,  $\nu$  是泊松比,  $r$  为地球半径,  $g$  为重力加速度 (Melchoir, 1983)。在准静态条件下, 往往用体应变  $\epsilon_{kk}$  的敏感系数  $E_s$  表示孔隙流体压力对体应变的响应 (Roeloffs, 1995)

$$E_s = -\frac{P_f}{\epsilon_{kk}} = -\left(\frac{1}{\rho_f g}\right) \frac{3(1-2\nu_u)}{2BG(1+\nu_u)} \quad (13)$$

$\nu_u$  为非饱和泊松比,  $B$  为 Skempton 常数,  $G$  为剪切模量,  $\rho_f$  为流体密度。

### 1.3 由井水位反演体应变的变化

井一含水层系统水位潮汐为研究与含水层相通的井水位对体应变的响应提供了有效途径。由于井水位潮汐是固体地球潮汐扰动的直接结果, 况且固体地球潮汐的频率特性也可以根据天文观测了解得很清楚, 它的每一个谐波分量都可以根据理论公式计算出来。此外气压潮、海潮和地表水体负荷潮汐也会造成含水层的体应变, 不过在观测井孔距离海岸较远的地方, 可以忽略海潮对水位的影响 (周坤根等, 1989)。因此, 在不考虑海潮对观测水位和体应变影响的条件下, 根据(11)、(12)式可得出与含水层相通的井水位对体应变的比例系数

$$S_s = -\frac{\Theta}{dH} = \frac{\epsilon_c}{dh_w + B_p dh_b} \quad (14)$$

式中,  $B_p$  为气压效率,  $dh_w$  和  $dh_b$  分别为水位和大气压力波动。(14)式是利用承压含水层观测井孔水位变化来反演含水层体应变变化的主要数学表达式。根据固体潮理论计算出不同纬度井孔的起潮力位  $W$ , 再由(12)式计算出体应变固体潮理论值, 体应变固体潮各分波 (通常主要考虑  $M_2$  波、 $O_1$  波、 $K_1$  波、 $S_2$  波和  $N_2$  波 5 个主要分量, 这 5 个分波已经占了全部起潮力的 95% 以上) 理论振幅与消除气压影响后的水位潮汐波相应分波振幅比, 即为含水层水位对体应变的响应系数  $S_s$  (见表 1), 根据这个响应系数就可以利用(11)式来计算水位变化所对应的含水层体应变的变化量。

## 2 观测资料分析

### 2.1 观测水位对体应变的响应

由(11)式可以看出, 对于非排泄的承压含水层井孔而言, 水位变化对体应变变化的比值为—常数, 因此体应变与压力水头变化关系可以用零阶线性系统来描述, 这已经被大量观测

事实所证明(如图 1)。水位对体应变的响应系数可以用体应变的变化量与水位变化量的比值来表示,对于某一确定的含水层而言,这个比值是一个常数,而对于不同特性的含水层来说,这个比值是不同的。

对于可用零阶线性系统来描述的系统,通常情况下用传递函数来表示输入和输出之间的关系。即将体应变  $\Theta(t)$  信号看成是水位  $H(t)$  信号与系统函数  $S(t)$  的褶积

$$\Theta(t) = S(t) * H(t) \tag{15}$$

对(15)式进行傅立叶变换得

$$\Theta(\omega) = S(\omega) \cdot H(\omega) \tag{16}$$

对于这样的系统,通常可以构建传递函数  $\hat{S}(\omega)$  来辨识输入和输出之间的频率响应特性。因此,  $\hat{S}(\omega)$  可以表示为观测水位和体应变的互相关谱  $P_{\Theta H}(\omega)$  与观测水位自相关谱  $P_{HH}(\omega)$  的比值

$$\hat{S}(\omega) = \frac{P_{\Theta H}(\omega)}{P_{HH}(\omega)} \tag{17}$$

往往将传递函数表示成幅度比和相位差两部分

$$|\hat{S}(\omega)| = \frac{|P_{\Theta H}(\omega)|}{|P_{HH}(\omega)|} \tag{18}$$

$$\angle \hat{S}(\omega) = \angle P_{\Theta H}(\omega) - \angle P_{HH}(\omega) \tag{19}$$

对于理想的封闭承压含水层井孔,在不考虑贮水效应的情况下,水位和体应变之间的关系可作为零阶线性系统来处理,因此,  $|\hat{S}(\omega)|$  应该简化为一常数,  $\angle \hat{S}(\omega)$  为零度。但观测事实表明,由于存在各种干扰因素和噪声,使得  $|\hat{S}(\omega)|$  值并非为一简单常数,而是随频率变化有小幅变化;  $\angle \hat{S}(\omega)$  值也并非为零,而是表现为体应变变化比水位变化略显滞后(图 1)。

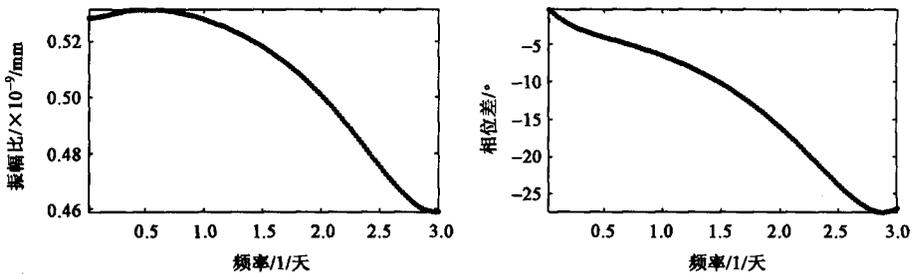


图 1 昌平台观测井水位对体应变振幅比和相位差随频率变化曲线

### 2.2 频谱分析

大量的观测事实表明,大气压力波动对水位和体应变的变化存在显著影响(高福旺等, 2004)。对昌平台体应变、水位、气压观测值及理论固体潮作频谱分析,可以看出不同观测手段主要潮汐分量的某些频谱特征及信号相对于背景噪声的强度。由图 2 可以看出:对体应变及水位不仅观测到了日波和半日波,而且还观测到日波和半日波的某些具体潮汐分量。大气压力观测尽管没有水位和体应变观测得到的潮汐分波详细,但日波和半日波的潮汐分量还是很清楚的。因此,在分析体应变观测、水位观测时,必须考虑气压因素的影响。

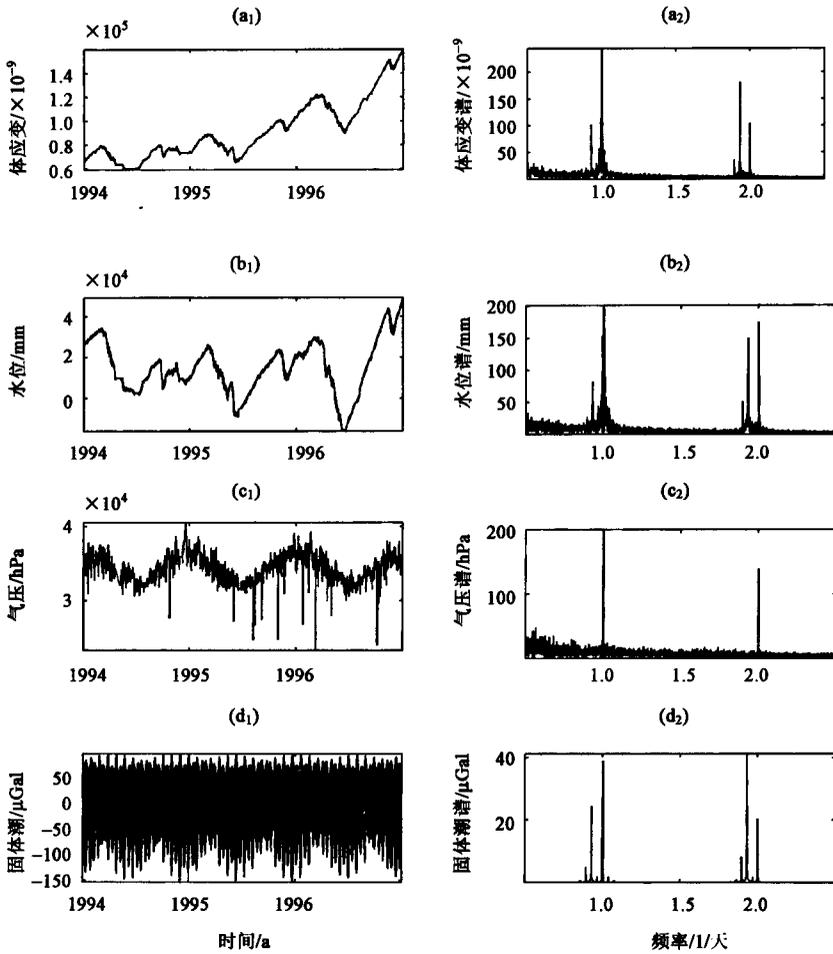


图 2 昌平台 1994 ~ 1996 年时间序列曲线及相应的频谱图

图中(a<sub>1</sub>)、(a<sub>2</sub>)分别为体应变时值观测曲线及相应的频谱图；(b<sub>1</sub>)、(b<sub>2</sub>)分别为水位时值观测曲线及相应的频谱图；(c<sub>1</sub>)、(c<sub>2</sub>)分别为气压时值观测曲线及相应的频谱图；(d<sub>1</sub>)、(d<sub>2</sub>)分别为理论体应变固体潮时值曲线及相应的频谱图

### 2.3 计算结果比较

根据公式(12),首先计算出潮汐力所引起的地球体应变固体潮各分波理论振幅,再扣除大气压力对观测水位的影响,求出体应变固体潮各分波理论振幅与消除气压影响后相应的水位潮汐波振幅比  $S_i$ ,取各分波振幅比的平均值来表示体应变对水位的响应系数。另外,对于某些同时具备体应变、水位和气压观测的台站,本文在消除气压对水位和体应变的影响后(高福旺等, 2004),将水位和体应变的剩余值分别看作系统输入和系统输出,利用(18)和(19)式计算出观测水位对体应变的响应系数和相位差,从而得到体应变对观测水位的响应特性。由表 1 可以看出,两种方法得到的系数非常接近,说明用潮汐体应变系数来确定体应变的变化是一简明而可行的方法。

表 1

水位体应变响应系数表

台站	$S_1 (\times 10^{-9}/\text{mm})$	气压水位系数/(mm/Pa)	气压体应变系数( $\times 10^{-9}/\text{Pa}$ )	水位体应变系数( $\times 10^{-9}/\text{mm}$ )
昌平大官门	5.401	0.058	0.412	5.273
大兴天堂河	4.330	0.127	0.306	4.882
涑水	6.431	0.051	0.125	6.193
易县	5.032	0.036	0.401	5.258
张家口	1.483	0.076	0.354	1.738
东三旗	3.874	0.253	0.142	4.004

### 3 结论与讨论

体应变固体潮理论值和实测水位潮汐波二者之间存在相互关系,又不完全相同,本文通过确定性的体应变固体潮和水位潮汐波相应振幅比值来确定封闭承压含水层水位对体应变的响应系数,再通过该系数与水位变化的乘积来反演体应变的变化,为地壳含水层体应变的研究提供了一种简便而可行的方法。

实测水位和体应变传递函数也表明,水位对体应变的响应并非常数,而是随频率的变化有大幅度变化,并且存在一定的相位差,表现为体应变对观测水位略有滞后,说明水位的变化可能引起体应变的变化,而体应变的变化反过来又影响水位的变化。

#### 参考文献

- 高福旺、李丽、牛安福等,2004,对体应变干扰因素的识别及排除,地震,24(增刊),90~96。
- 汪成民、车用泰、万迪堃等,1988,地下水微动态研究,149~180,北京:地震出版社。
- 张昭栋、郑金涵、耿杰等,2002,地下水潮汐现象的物理机制和统一数学方程,地震地质,24(2),208~214。
- 周坤根、殷积涛,1989,井水固体潮观测资料的海潮改正问题,地壳形变与地震,9(4),37~45。
- Bodvarsson G, 1970, Confined fluids as strain meters. J. Geophys. Res., 75(14), 2711~2718.
- Bredhoeft J D, 1967, Response of well-aquifer systems to earth tide. J. Geophys. Res., 72(12), 3075~3087.
- Carr P A, G S Van Der Kamp, 1969, Determining aquifer characteristic by the tide method. Water Resource Research, 5(5), 1023~1031.
- Melchoir P, 1983, The tides of the planet earth, Second Ed. Pergamon, Oxford.
- Rhoads G H, Jr E S Robinson, 1979, Determination of aquifer parameters from well tides. Journal of Geophysical Research, 84(B11), 6071~6082.
- Roeloffs E A, 1995, Poroelastic techniques in the study of earthquake related hydrological phenomenon. Geophys. 37(Adv.), 135~195.

## Study on Volume Strain Version from Water Level Change of Well-aquifer System

Yan Rui<sup>1,2)</sup> Gao Fuwang<sup>2)</sup> Chen Yong<sup>3)</sup>

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100036, China

2) Institute of Earthquake Science, Beijing 100036, China

3) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** Based on the linear poroelastic and hydrogeology theory, mathematical express between water level change and aquifer volume strain is given. Combined with earth tidal theory, the authors analyzed the response characteristics from well-aquifer water level change to earth tide of volume strain and gave out the method of volume strain reversion from water level change. Compared the results of version with real observed data, the authors found that there is a good accordance. This suggests that the method of volume strain version from water level change is proper. It will offer a reference for understanding about hydrogeology characteristics, volume strain and searching for precursor anomalies.

**Key words:** Well-aquifer system Water lever tide Volume strain Reversion