

# 苏10井水位与应力应变的关系\*

侯 茂 生

(江苏省地震局)

## 摘 要

本文通过对苏10井井孔特性的阐述,对水位反映固体潮、气压和降雨等情况的分析研究,认为,该井由于位于特殊的构造部位,具有特殊的水文地质条件和井孔结构,含水层埋藏较深,弹性模量大,储存系数、压缩系数、阻尼系数小,渗透性较强,封闭条件好,干扰因素少,所以能灵敏地反映应力、应变的微变化,这样的井孔——含水层系统,犹如埋设在地下深处具有较高放大倍数的应力、应变仪,对于地震预报和地震孕育过程的探索,具有一定意义。

## 一、引 言

近年来,国内外对于利用深井水位探索地震预报,进行地震科学研究的工作比较重视,发展较快。美国、日本、苏联等许多国家都开展了深井观测,建立了地下水动态观测网(试验站),我国也先后在苏、鲁、皖、豫和京、津、唐等地区建立了地下水动态观测网。本文试图通过苏10井水位反映固体潮、气压和降雨等情况的分析研究,揭示深井水位对于地震预报和科学研究的作用。

## 二、井 孔 概 况

苏10井位于北东向泰州—溱潼断裂带,该断裂带自第三纪以来一直在不断活动,沿断裂带有多期火成岩出现。井孔地理坐标北纬 $32^{\circ}33'48''$ ,东经 $119^{\circ}55'30''$ ,井深2887.03米。直径为140毫米的钢质套管下达1339.875米处,固井良好,水泥塞封底,射孔位置为1194—1194.765米,原井口高出地面30厘米时,井水自流,但流速缓慢,焊接1.3米套管后,水位保持在井口以下1.2米左右(水位埋深),井口标高5米。1979年11月开始用仪器连续自动记录水位,测量灵敏度达1毫米。主要含水层为砂砾岩,上下有厚度较大的泥岩作隔水层,封闭、承压条件好,分布面积广,人为干扰因素少,透水性较强,井孔结构好,这样一个井孔——含水层系统,就象一个巨大的连通管,含水层小幅度的挤压和引张可以引起其容积的较大变化,这种变化通过截面积很小的井孔反映出来,引起水位的明显变化。因此,苏10井水位对地壳应力、应变具有较大的放大作用,能灵敏地反映固体潮、气压

\* 1982年4月27日收到初稿,1983年3月21日收到修改稿。

和降雨。

### 三、苏 10 井对固体潮的反映

苏 10 井水位曲线,重力固体潮理论曲线与月相的关系示于图 1。由图 1 可见,消除气压影响后的水位曲线与重力固体潮曲线变化形态很相似,峰谷和相位基本一致,朔望时为高潮,一日有两峰两谷;上下弦时为低潮,一日单峰单谷<sup>[1]</sup>。

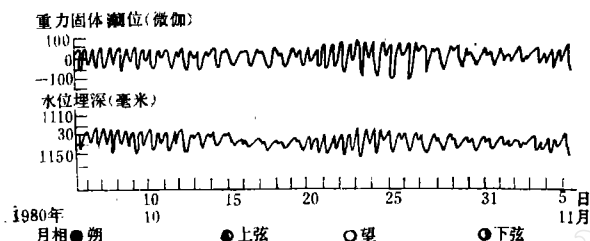


图 1 苏 10 井水位曲线、重力固体潮理论曲线与月相关系

井水位对固体潮的反映是天体起潮力(主要是月亮和太阳的起潮力)作用于井孔——含水层系统的结果。在起潮力作用下,地球内部各点发生弹性形变,形成一个随着时间而变化的周期性应力场,这种周期性的弹性形变引起地壳中的含水层和井中水柱也随着发生周期性的弹性变形,致使孔隙、裂隙水压变化,引起水位升降。水位变化( $dh$ )与潮汐应力变化( $d\sigma$ )的平衡关系式为:

$$(a - b)d\sigma = -rdh \quad (1)$$

式中:  $r$  为水的容重(单位体积的重量);  $a$ 、 $b$  为分别为含水层和井水柱的潮汐应力系数,  $a > b > 0$ 。

由(1)式可见,当应力  $\sigma$  增大时,  $d\sigma > 0$ , 含水层受拉而体积膨胀,孔隙、裂隙体积增大,重力固体潮和含水层水压减小,  $dh < 0$ , 井水位下降。反之,  $d\sigma < 0$ ,  $dh > 0$ , 水位上升。朔望时太阳、月亮、地球三天体近乎在一条直线上,太阳和月亮的起潮力相互迭加形成高潮,并且此时半日潮差大,这种潮差大的半日分潮与潮差相对较小的日分潮迭加后,出现每日两峰两谷。上下弦时,日、月相对于地球的位置形成直角,太阳和月亮的起潮力相互抵消了一部分形成低潮,并且此时半日潮差小,与潮差相对较大的日分潮迭加后形成一日单峰单谷。由上述可见,井水位的升降变化反映的是潮汐应力引起井孔——含水层系统发生体应变的间接效应。

水位变化与含水层的体积压缩模量( $K_r$ )、孔隙度( $\phi$ )、储存系数( $S$ )、单位储存系数( $S_s$ )、水体的体积模量( $K_w$ )、密度( $\rho_w$ )等有关,其综合关系式为<sup>[1,2,3]</sup>

$$dh = -\frac{1}{\rho_w g \left( \frac{1-\phi}{K_r} + \frac{\phi}{K_w} \right)} \left( \frac{6G-2E}{4G-E} \right) \times (2h_2 - 6L_2) \frac{T_2}{Rg} \quad (2)$$

或者

$$dh = -\frac{\Theta}{S_s} \quad (3)$$

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

由(2)式可见,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。综合来看,影响水位固体潮效应的决定性因素是含水层的单位储存系数(3式)。

根据月亮引起的潮汐体应变  $\Theta_m$  和太阳引起的潮汐体应变  $\Theta_s$ , 公式<sup>[4]</sup>:

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

$$\Theta_s = \frac{1}{19\lambda + 14G} \frac{fS\rho R^2}{L_s^3} (3\cos^2\theta - 1) \quad (5)$$

取  $\lambda = G = 5.0 \times 10^{11}$ ,  $fE = 3.986 \times 10^{20}$ , 月地质量比  $\frac{M}{E} = \frac{1}{81.3}$ , 月地平均距离  $L_m = 3.844 \times 10^{10}$  厘米, 日地平均距离  $L_s = 1.496 \times 10^{13}$  厘米, 地球平均密度  $\rho = 5.5$  克/厘米<sup>3</sup>, 地球平均半径  $R = 6.37 \times 10^8$  厘米, 求得在月亮和太阳联合作用下最大体应变  $\Theta_{\max} = 3.4 \times 10^{-8}$ , 而  $dh_{\max} = 68$  毫米, 由(3)式可得苏 10 井水位反映体应变的灵敏度为  $5 \times 10^{-10}$ , 这样的灵敏度高于目前所使用的应力、应变仪。

#### 四、苏 10 井水位对气压的反映

苏 10 井水位可以明显地记录到由于气压的升降引起的水位波动(图 2)。图中  $P$  为实测气压逐时值,  $H_g$  为消除固体潮影响后的水位埋深逐时值。

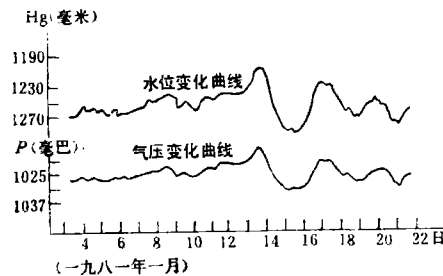


图 2 苏 10 井水位与气压的关系

气压对水位的影响,是由于气压直接作用于井水面和周围地面,使含水层水压与井水压形成压差所致。水位变化与气压变化的平衡方程为

$$-rdh = dP_i - d(P_i - P_r) \quad (6)$$

$$-rdh = dP_i - dP_w \quad (7)$$

$$-rdh = dP_r \quad (8)$$

由(6)–(8)可见,水位变化量( $dh$ )与气压引起的含水层水压变化量( $dP_w$ )成正相关,与气压变化量( $dP_i$ )及含水层固体骨架及其上复岩层所承担的气压附加应力的变化

量 ( $dP_r$ ) 成负相关, 气压增大时,  $dP_i > d(P_i - P_r) > 0$ , 井孔水压  $P_i$  大于含水层水压  $P_w$ , 井水向含水层渗流, 井水位下降,  $dh < 0$ . 反之, 气压减小时,  $dP_i < d(P_i - P_r) < 0$ ,  $P_w > P_i$ , 含水层中的水流向井孔, 井水位上升,  $dh > 0$ .

水位的气压效应也与含水层的参数有关, 其关系式为<sup>[2]</sup>

$$dh = -\frac{\phi}{\rho_w g \left[ \frac{K_w}{K_r} (1 - \phi) + \phi \right]} dP \quad (9)$$

$$dh = -\frac{K_r}{\rho_w g \left[ \frac{K_r}{\phi} + (K_r - K_w) \right]} dP \quad (10)$$

$$dh = -\frac{\phi}{K_w S_s} dP \quad (11)$$

由(9)(10)式可见, 含水层的体积模量和孔隙度大, 水体的密度和体积模量小, 水位对气压的振幅响应大. 综合来看, 影响水位气压效应的决定因素是含水层的单位储存系数、孔隙度和水体的体积模量(见 11 式).

我们定义: 气压系数  $b_p = \frac{dh}{dP}$ , 气压效率  $B = r \frac{dh}{dP}$ <sup>[5]</sup>. 根据最小二乘法原理, 对气压和水位进行相关分析求得苏 10 井的气压系数  $b_p = -5.67 \frac{\text{毫米}}{\text{毫巴}}$ , 气压效率  $B = -0.57$ . 在气压变化的影响下, 苏 10 井水位变化幅度可达 200 多毫米, 可见, 该井对气压的反映也是十分灵敏的.

由(3)式求得含水层的单位储存系数  $S_s = 5.00 \times 10^{-9}$ /厘米, 储存系数  $S = 5.10 \times 10^{-12}$  厘米·秒<sup>2</sup>/克;

根据文献[3]得  $K_w = \rho_w V_p^2 - 4G/3$ , 取水中的  $P$  波速度  $V_p = 1.463 \times 10^5$  厘米/秒, 由于流体的剪切模量  $G = 0$ , 所以水体的体积模量  $K_w = \rho_w V_p^2 = 2.14 \times 10^{10}$  克/厘米·秒<sup>2</sup>;

由  $B = \frac{\phi}{K_w S}$ <sup>[2]</sup> 求得苏 10 井含水层的体孔隙度  $\phi = 6.22 \times 10^{-2}$ ;

由  $S = \frac{1 - \phi}{K_r} + \frac{\phi}{K_w}$  求得  $K_r = 4.27 \times 10^{11}$  克/厘米·秒<sup>2</sup>;

含水层的压缩系数  $\alpha = \frac{1}{K_r} = 2.34 \times 10^{-12}$  厘米·秒<sup>2</sup>/克.

由以上参数值可知, 苏 10 井含水层的体积模量较大, 压缩系数和储存系数小, 这是该井反映应力、应变十分灵敏的决定性因素.

## 五、苏 10 井水位反映固体潮和气压的相位延迟性

由于地壳的弹性力学性质及其内部物质的粘滞性等原因, 同阶次同时刻的固体潮观测值与理论值之间存在着相位差即相位滞后, 另外, 水位对固体潮和气压的反映又是通过

既具有弹性又具有一定粘性的岩石的形变而间接显示出来的,因此,水位对气压和理论固体潮的反映不可能完全同步,水位往往落后于气压和固体潮的变化。滞后时间的长短,与井孔——含水层系统的阻尼系数有关,阻尼系数大,延迟时间长,阻尼系数小,延迟时间短。阻尼系数 ( $\beta$ ) 公式为<sup>[6]</sup>

$$\beta = \frac{r_w^2}{4T} \sqrt{\frac{g}{h}} \text{Ker}(\alpha) = \frac{r_w^2}{4dK} \sqrt{\frac{g}{h}} \text{Ker}(\alpha) \quad (12)$$

式中,  $r_w$ :井孔半径,  $T$ :含水层的导水系数,  $h$ :井孔水柱的有效高度或滤管(射孔位置)以上的水柱高度,  $\text{Ker}(\alpha)$ :开尔芬函数的实部,  $d$ :揭露含水层的厚度或滤管(射孔)的长度,  $K$ :含水层的渗透系数。

由(12)式可见,阻尼系数与井孔半径的平方成正比,与含水层的揭露厚度、渗透系数、导水系数及水柱高度的平方根成反比,也就是说,相位滞后时间的长短与井孔半径、含水层揭露厚度、渗透系数、导水系数及水柱高度有关。

根据已知数据求得苏 10 井的阻尼系数  $\beta = \frac{0.0145}{K} \text{Ker}(\alpha)$  厘米/秒,由此可见,该井阻尼系数小,故水位反映固体潮和气压的相位比较接近。

为确定苏 10 井水位的滞后时间,分别取同一时间的水位、气压、固体潮值及水位滞后半小时、1 小时、1.5 小时、2 小时、3 小时和固体潮提前 1 小时等七种情况、各 50 组数据,进行二元回归分析,分析结果列于表 1。

表 1 不同滞后时间水位气压固体潮二元回归分析结果

水位滞后时间 (小时)	回 归 方 程	复相关系 数 $R$	回归平方和 $S_{\text{回}}$	剩余平方和 $S_{\text{余}}$	剩余标准 离差 $S$
0	$\hat{H} = -4451.26 + 5.4713P - 0.1799g$	0.8926	21493.68	5481.04	10.80
0.5	$\hat{H} = -4545.94 + 5.5645P - 0.1895g$	0.9202	22448.72	4064.99	9.30
1	$\hat{H} = -4652.55 + 5.6694P - 0.1992g$	0.9436	23523.61	2896.08	6.86
1.5	$\hat{H} = -4657.53 + 5.6742P - 0.1780g$	0.9422	22847.83	2886.67	7.84
2	$\hat{H} = -4662.44 + 5.6790P - 0.1568g$	0.9341	22311.60	3261.68	8.33
3	$\hat{H} = -4409.67 + 5.4309P - 0.0917g$	0.8789	19613.75	5776.57	11.03
固体潮提前 1 小时	$\hat{H} = -3973.37 + 5.0014P - 0.1492g$	0.8709	20462.04	6512.68	11.77

表 1 示出水位滞后 1 小时的情况下,由于气压、固体潮与水位的相关性所得的回归平方和及复相关系数最大,由其他偶然因素、非线性影响、方法误差和测量误差等所产生的剩余平方和及剩余标准离差最小,这说明,用  $H(t+1)$ 、 $P(t)$ 、 $g(t)$  的数值组进行二元回归分析,效果较好,回归方程的精度较高,较能反映客观实际。所以,苏 10 井水位反映固体潮和气压的确切滞后时间为 1 小时左右。

## 六、苏 10 井水位对降雨的反映

长时间内间断性的降雨对水位的影响是个比较复杂的问题,需要做大量深入细致的工作才能找出它的规律。但复杂现象是许多简单现象的组合。本节从较为简单的情况出

发,探讨一些问题,为分析研究复杂现象创造条件.

图 3—6 示出较短时间内相对集中的降雨对水位的影响过程 and 变化特征.

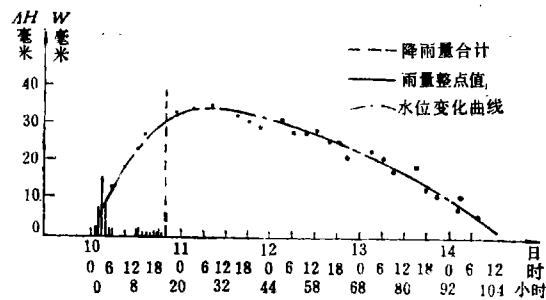


图 3 1981 年 7 月泰州市降雨引起的水位随时间的变化曲线

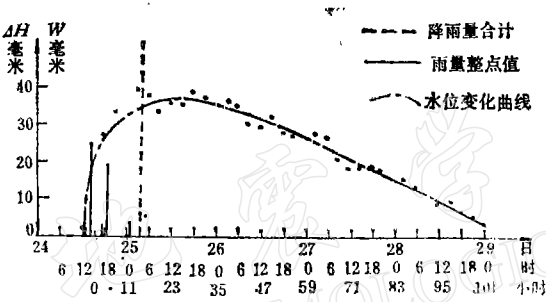


图 4 1981 年 8 月泰州市降雨引起的水位随时间的变化曲线

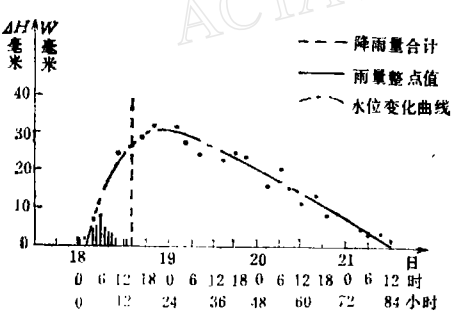


图 5 1981 年 4 月泰州市降雨引起的水位随时间的变化曲线

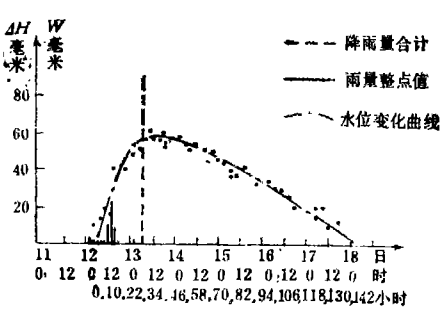


图 6 1980 年 8 月泰州市降雨引起的水位随时间的变化曲线

图中:  $\Delta H$ : 降雨引起的水位埋深逐时变化值,  $\Delta H = \hat{H} - H$ ,  $\hat{H}$  为根据水位与气压、固体潮之间的二元回归方程求得的水位埋深理论逐时值,  $H$  为实测逐时值,  $w$ : 降雨量逐时值(根据泰州市气象站资料), 横坐标第三行以开始降雨的时间作为起点 0.

由图 3—6 可见, 短时间内的降雨, 引起水位迅速上升, 然后缓慢下降恢复正常, 上升到极大值的时间约 20—30 小时, 衰减时间一般为 65—110 小时, 降雨量相近, 降雨时间短, 降雨速率大的, 水位上升快, 衰减时间短(图 5). 反之, 上升慢, 衰减时间长(图 3、4). 降雨时间段相近, 降雨量大, 水位上升时间和衰减时间都比较长(图 6).

降雨引起水位变化的极大值  $\Delta H_{\max}$  与雨量  $w$  的大小有关, 两者之间的关系示于表 2 和图 7.

表 2 降雨量  $w$  与降雨引起的水位变化最大值  $\Delta H_{\max}$  之间的关系

降雨时间	年	1980						1981			
	月	6	7	7	8	8	9	4	5	7	8
	日	28.30	1	9	12.13	19	6	18	1	10	24
$w$ (毫米)		143		76	93	33	26	39	32	38	52
$\Delta H_{\max}$ (毫米)		112		53	65	20	16	31	25	32	35

由图 7 看出, 雨量增大时, 降雨引起的水位变化最大值也增大. 通过相关分析求得, 剩余标准离差  $S = 3.958$ , 相关系数  $R = 0.9924$ , 关系式为:

$$\Delta \hat{H}_{\max} = -2.61 + 0.7754w \tag{13}$$

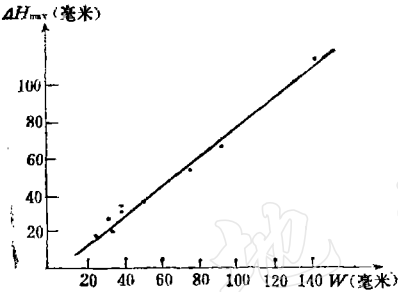


图 7 降雨量  $w$  与水位最大变化值  $\Delta H_{\max}$  的关系

七、初步结论

1. 苏 10 井位于特殊的地质构造部位, 井孔结构好, 含水层埋深较大, 封闭、承压条件较好, 体积模量较大, 储存系数、压缩系数、阻尼系数较小, 透水性强, 井孔——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、应变的微变化. 另外, 该井干扰因素少, 主要的干扰因素——气压和固体潮引起的水位变化具有一定的规律性, 可以定量或半定量的识别和分离, 降雨的影响也可以定性分析或半定量分离<sup>[7]</sup>. 因此, 该井对于探索地震预报、解释震源机制、研究地震成因、了解地震孕育和发生过程等都将具有重要意义.

2. 降雨对水位的影响比较复杂, 水位的年变和多年变化的规律性也尚未掌握, 而地震异常和前兆信息又是十分复杂的自然现象. 因此, 要解决地震预报问题, 必须多井孔, 多手段的综合观测、分析、研究, 反复实践, 揭示地震孕育和发生的客观规律.

参 考 文 献

[1] 侯茂生, 地下水位与固体潮关系的探讨, 地震科学研究, 2, 1—5 1982.  
[2] P. Melchior, The Tides of the Planet Earth, 294—303, 1978.  
[3] S. P. Clark, Jr., Handbook of Physical Constants, 20—26, 98—102, 160—170, New York, Geol. Soc. Am. 1966.  
[4] 蔡祖煌, 北京洼里深井水位变化所记录的地球固体潮和地震波, 地震学报, 2, 2, 205—214 1980.  
[5] В. С. Ковалевский, Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод, Издательства «НЕДРА», Москва, 1973.  
[6] Hilton H. Cooper, Jr., John D. Bredchoeft, Istavros S. Papadopoulos, and Robert R. Bennett, The Response of Well-Aquifer Systems to Seismic Waves, J. Geoph. Res., 70, 16, 3915—3926, 1965.  
[7] 侯茂生, 水位逐时值综合分析 with 地震信息的提取, 地震, 2, 9—13 1983.

# ON THE RELATION BETWEEN THE STRESS-STRAIN CONDITION AT DEPTH AND THE WATER LEVEL VARIATION IN THE SU-10 WATER WELL

HOU MAOSHENG

(*Seismological Bureau of Jiangsu Province*)

## Abstract

This paper describes the characteristics of the SU-10 deep well. By analysing the change of water level in the well with reference to earth tide, atmospheric pressure and rainfall, it can be shown that because of the particular well location on the geological structure, the unusual hydrogeological condition, deep burial of the water-bearing stratum of high elastic modulus, porosity and compressibility, its low attenuation constant, high permeability coefficient, good confinement condition and finally less disturbing factors, the water well is quite sensitive to small stress-strain variations.

Such a system consisting of a water well and a water bearing horizon behaves as a stress-strain measuring device of high magnification buried at certain depth. It may be significant for the study of the process of development of the earthquake source and its prediction.