

井水位对气压扰动的响应*

张子广¹, 盛艳蕊¹, 张素欣¹, 李薇², 尹宏伟³

(1. 河北省地震局, 石家庄 050021; 2. 石家庄市地震局, 石家庄 050055;
3. 深州市地震台, 河北 深州 053800)

摘要: 分析了河北省地震地下流体井网的黄骅、深州、无极、宁晋、永年五口深井水位对气压扰动的响应。结果表明, 气压瞬间的大幅度变化能够引起水位的准同步变化, 由此求得的井水位气压系数与利用日均值序列计算的气压系数基本相当; 与日均值序列相关分析结果比较, 水位对气压扰动的响应表现出了一定的波动性。

关键词: 气压扰动; 气压系数; 水位; 响应; 线性回归

中图分类号: P315.72⁺³

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2010)02-0170-06

0 引言

地下水微动态观测与研究中, 井水位的潮汐与气压效应比较明显, 两者对水位的影响机理、水位对潮汐或气压的响应程度、潮汐和气压效应在地震前后表现出的各种异常已有诸多研究成果。在气压研究方面, 车用太和杨会年(1985)提出: “大气压力同时作用在大地表面与井孔水面上, 作用在大地表面上的大气压力经转化成为附加应力后, 引起超孔隙压力时总会有一定的损失, 而作用在井孔水面上的大气压力则几乎毫无损失地转化成超孔隙压力。”张昭栋等(1989)研究了井水位对气压动态过程的响应及气压响应滞后的机理。殷积涛和汪成民(1988)对气压效应的成因机制进行了理论分析, 认为气压系数和荷载系数是互补的。气压效率的计算比较复杂, 需要对观测资料进行滤波、差分和回归等处理。吴伯等(1992)、刘裕生和杨林根(1994)、卜凡泉和杨燕(2002)对气压系数的求解进行了理论研究。气压系数在地震前可能会发生畸变现象, 利用这种畸变信息可进行地震预测(鱼金子等, 1990; 王新等, 2007), 气压效应在地震前后的异常变化及其机理解释亦有众多研究成果(耿杰等, 2002; 夏

菲, 万登堡, 1992; 赵洪声, 赵永亮, 1990; 魏焕等, 2001; 丁风和等, 2007)。

气压有比较稳定的周期变化, 一般是一天、数天至十几天不等, 但在各种气象条件下气压变化又具有随机性。在某些天气过程中气压会发生扰动, 其变化幅度可达10 hPa。本文在上述诸多研究成果的基础上, 分析气压瞬间大幅度变化时, 河北省地震局地下流体井网的黄骅、深州、无极、宁晋和永年等5个井孔井水位对气压的响应程度, 求解此时的气压系数并研究其与常规方法计算结果的差异。

1 井孔概况

黄骅井(又名埕古1井)位于河北省黄骅市, 地处埕西潜山构造带、羊二庄断裂东侧。井深1 250 m, 套管深度1 165.75 m, 于1 100 m处穿越羊二庄断裂带。含水层岩性为奥陶系灰岩, 地下水类型为裂隙承压水。气压、潮汐效应明显。

深州井(又名新泽5井)处于冀中拗陷的深县凹陷内, 深泽低凸起南缘(深泽—刘村构造带南缘), 滹沱河冲积扇的下游, 地势微向东倾, 第四系松散沉积物厚约450 m。井深3 364 m, 主要含水层是奥陶系灰岩和白云岩, 其次为石炭系

* 收稿日期: 2009-02-03.

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC01B02-03-02)资助.

白云质灰岩。地下水类型属岩溶裂隙承压水，水质高矿化度（含盐量大于 10 g/L），底部水温 83.9 ℃（汪成民等，1990）。由于该井深度深，顶板埋深也深（2 835.7 m），所以含水层封闭性较好。气压、潮汐效应明显，不受降雨直接渗入补给。

无极井（又名极 12 井）地处冀中坳陷无极低凸起高点，衡水断裂北侧。水文地质条件属岩溶水的弱交替区，地下水由西向东缓慢渗流，属大气成因的深循环热水，封闭性好。井深 2 984.5 m，套管深度 2 330.9 m，水泥固井效果良好，观测段深度为 2 333.89 ~ 2 984.52 m，主要含水层为寒武、震旦系灰岩和白云岩，地下水类型为岩溶裂隙承压水，底部水温 98.0℃（汪成民等，1990）。气压、潮汐效应显著，不受降雨直接渗入补给。

宁晋井（又名晋 96 井）位于华北沉降带的宁晋凸起东部斜坡带，井位在束鹿断裂带上，东侧为百尺口断裂带，西侧为柏乡断裂带。井深 2 003.78 m，观测层深度 1 899.0 ~ 1 919.0 m，含水层岩性为砂质灰岩，地下水类型为岩溶裂隙承压水。潮汐、气压效应明显，不受降雨直接补给。

永年井（又名北杜井）位于河北省永年县境内，沙河—马会河洪积扇的南缘，地势自西北向东南倾斜，构造部位上处于太行山山前断裂带东侧，邯郸凹陷的西缘。井深 1 034.89 m，井孔观测段深度为 810.15 ~ 1 034.89 m，含水层岩性为燕山期安山玢岩，地下水类型为裂隙承压水（汪成民等，1990）。气压、潮汐效应显著。

2 水位的气压效应

图 1 ~ 3 给出了上述五口井的水位、气压日均值曲线。图 1 显示由于受到气压年变周期变化的影响，深州、宁晋和永年井水位年变动态特征明显；无极井受地热开发影响，水位呈趋势下降动态，对其进行趋势拟合处理，亦能显示出明显的气压年变周期引起的水位年变化规律（图 2）；黄骅井水位趋势动态显示不出气压效应，主要原因是该井水位受观测环境影响，水位总体呈下降变化趋势，虽然 2006 年 11 月以来水位多次上升，但

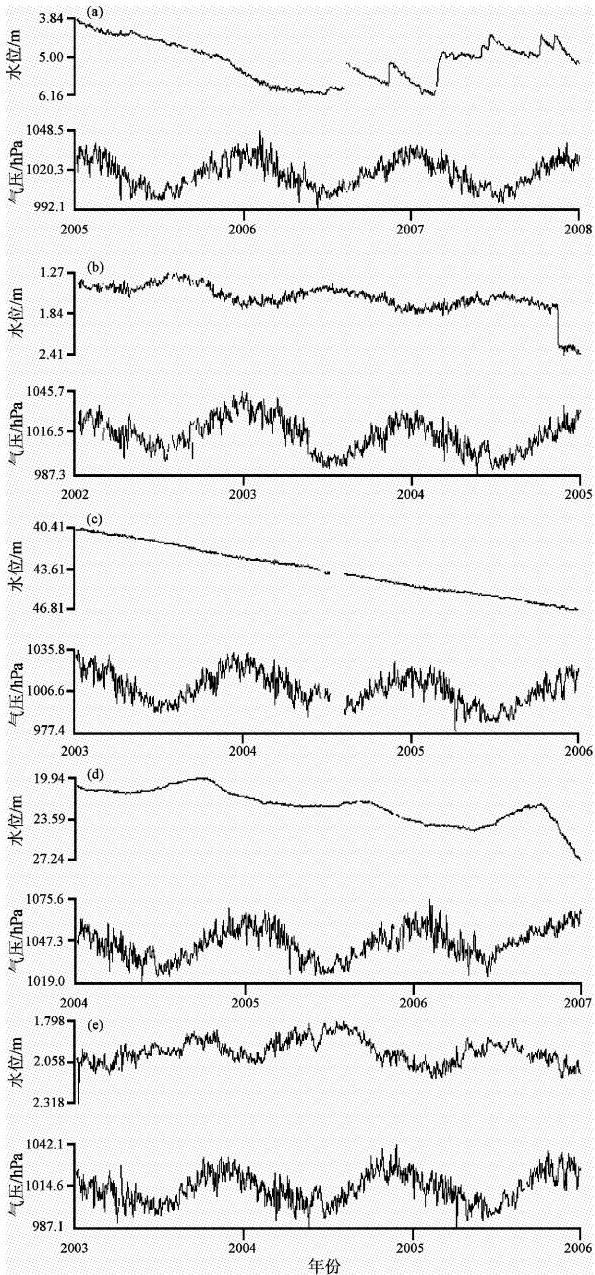


图 1 水位、气压日均值曲线
(a) 黄骅井；(b) 深州井；(c) 无极井；
(d) 宁晋井；(e) 永年井
Fig. 1 Daily curves of water level
and atmospheric pressure
(a) Huanghua Well; (b) Shenzhou Well; (c) Wuji Well;
(d) Ningjin Well; (e) Yongnian Well

曲线上不显示气压效应，并不是黄骅井水位没有气压效应，而是气压特征被掩盖了。把曲线图上某一段的水位、气压资料展开，上述五口井水位均有明显的气压效应（图 3）。

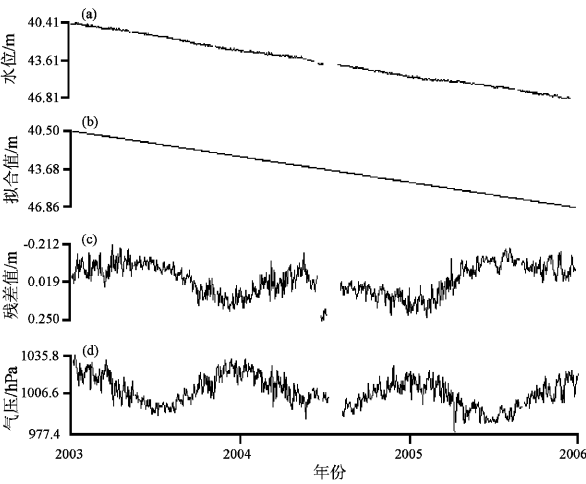


图2 无极井水位日均值、拟合残差值、
气压日均值曲线

(a) 水位日均值; (b) 水位直线拟合值; (c) 水位
拟合残差值; (d) 气压日均值

Fig. 2 Daily curves of water level, fitting residue
values and atmospheric pressure in Wuji Well
(a) daily average water level; (b) straight line fitted
values of water level; (c) fit residuals water level;
(d) daily average atmospheric pressure

气压变化随机性很大,水位的潮汐周期成分、气压的日变周期成分以及短周期的瞬时变化对求得的气压效率均有较大的影响。因此,计算水位气压效率(气压系数)时,一般采用水位和气压的日均值资料。选择计算时段的原则是(国家地震局地下水影响因素研究组,1985):(1)井孔附近地区地震活动相对平静;(2)水位动态比较稳定,其变化趋势主要由气压变化引起;(3)气压变化幅度较大,包含上升和下降的整个过程;(4)原始数据连续、准确、可靠。根据上述原则,选取每口井不同年份符合条件的整月份的水位、气压日均值资料,采用线性回归分析方法,分别对日均值和日均值一阶差分进行水位气压系数的计算(表1)。

表1显示水位和气压日均值一阶差分的相关性较好,均在置信水平 $\alpha=0.01$ 上显著相关;宁晋井水位、气压日均值相关系数最小,为0.5166,计算 F 值为10.19,按30天即第二自由度 $n_2=30$ 查 F 值分布表,在置信水平 $\alpha=0.01$ 上 $F=76.4$,说明宁晋井水位、气压日均值在置信水平 $\alpha=0.01$ 上相

关,其它井水位、气压日均值在置信水平 $\alpha=0.01$ 也应相关。水位与气压日均值一阶差分的相关性比日均值的相关性好。黄骅、深州、无极和宁晋井日均值一阶差分的气压系数比利用日均值求得的气压系数高,永年井计算结果则相反。以日均值一阶差分回归分析结果为准,无极井水位的气压系数最高,为0.77 cm/hPa,永年井水位气压效率最低。

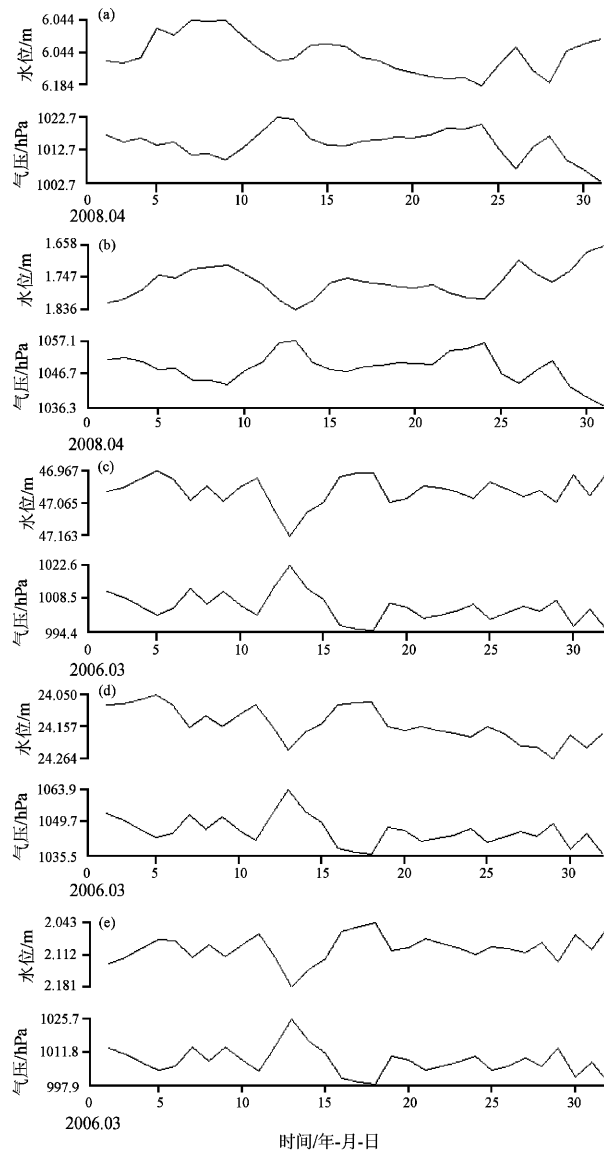


图3 水位、气压日均值曲线

(a) 黄骅井; (b) 深州井; (c) 无极井;
(d) 宁晋井 (e) 永年井

Fig. 3 Daily curves of water level
and atmospheric pressure

(a) Huanghua Well; (b) Shenzhou Well; (c) Wuji Well;
(d) Ningjin Well; (e) Yongnian Well

表 1 日均值的气压系数计算结果

Tab. 1 Results of daily values of atmospheric pressure coefficient

井名	水位、气压日均值回归分析结果		日均值一阶差分回归分析结果	
	相关系数	气压系数/cm · hPa ⁻¹	相关系数	气压系数/cm · hPa ⁻¹
黄骅	0.528 9	0.42	0.930 8	0.59
深州	0.965 3	0.69	0.974 8	0.71
无极	0.671 4	0.67	0.997 6	0.77
宁晋	0.516 6	0.40	0.970 6	0.61
永年	0.953 4	0.53	0.990 7	0.47

3 水位对气压扰动的响应

气压扰动具有较大的随机性，一般一个扰动过程在一两个小时完成，同一个扰动过程在不同的区域，变化时间、幅度不等。如 2004 年 7 月 4 日 19~22 时的一次气压扰动（图 4），深州井气压在 20:42 上升，到 20:49 上升幅度为 3.0 hPa，21:05 开始下降，至 22:05 下降幅度达 8.7 hPa；黄骅井气压 21:43~21:50 上升 1.9 hPa，21:56~22:02 下降 1.4 hPa；无极井气压 20:00~20:20 上升 4.5 hPa，20:20~21:01 下降 4.2 hPa；宁晋井气压 20:00~20:28 上升 4.4 hPa，20:28~21:10 下降 3.1 hPa；永年井 19 时 40~55 分气压上升变化只有 1.6 hPa。2008 年 6 月 25~28 日气压多次出现扰动变化，并且表现出了随机性（图 5）。

气压扰动引起水位同步变化，利用这种响应过程计算水位的气压系数。选取水位、气压分钟值资料，采用线性回归分析方法，对分钟值原始资料、分钟值的一阶差分、5 分钟滑动及滑动值的一阶差分分别计算。选取气压扰动显著的时段，如 2004 年 7 月 4 日 20~23 时、2005 年 4 月 1 日 17~23 时、2005 年 4 月 20 日 09~13 时、2006 年 6 月 7 日 08~

16 时、2006 年 7 月 5 日 15~20 时、2008 年 6 月 25~28 日（25 日 15~23 时、26 日 19~23 时、27 日 04~07 时、27 日 19 时~28 日 03 时、28 日 17~22 时）。计算结果取平均值（表 2）。

计算结果表明，利用原始分钟值、5 分钟滑动值、5 分钟滑动差分值进行回归分析相关系数较高，黄骅、宁晋和永年井水位和气压 5 分钟滑动差分值的相关系数高于同井其它序列的相关系数。原始值的差分值相关系数最低，气压系数亦低于同井其它序列的计算结果，相关结果差异是因为水位对气压响应滞后。与利用日均值一阶差分（表 1）的计算结果比较，依据 5 分钟滑动差分值求得的气压系数与之最为接近。4 种序列计算的气压系数，除利用原始分钟值的一阶差分回归结果普遍较低外，其它序列的气压系数高低不等。表 2 显示深州井气压系数较低，分析其原因是该井有石油溢出现象，井管内水面上浮着一层厚厚的石油，必须经常进行人工除油，油的粘滞系数大，对气压扰动有消减或滞后效应。

比较上述 4 种序列不同计算时段求得的结果，5 分钟滑动差分值相关性较稳定，相关系数和气压系数波动较小，原始分钟值的气压系数波动较大，原始值差分值的相关系数波动较大。比较 5 口井的

表 2 气压扰动过程中水位的气压效率

Tab. 2 Atmospheric pressure efficiency of water level in atmospheric pressure disturing

井名	水位、气压分钟值回归分析结果				分钟值一阶差分回归分析结果			
	原始值		5 分钟滑动		差分值		5 分钟滑动差分值	
	相关系数	气压系数/cm · hPa ⁻¹	相关系数	气压系数/cm · hPa ⁻¹	相关系数	气压系数/cm · hPa ⁻¹	相关系数	气压系数/cm · hPa ⁻¹
黄骅	0.757 3	0.55	0.751 5	0.53	0.553 8	0.41	0.871 5	0.60
深州	0.783 4	0.46	0.791 7	0.47	0.203 8	0.19	0.455 8	0.32
无极	0.805 1	0.59	0.806 5	0.60	0.531 2	0.44	0.887 9	0.73
宁晋	0.666 6	0.60	0.667 7	0.59	0.317 2	0.40	0.573 8	0.60
永年	0.878 4	0.73	0.862 8	0.70	0.568 1	0.44	0.916 0	0.51

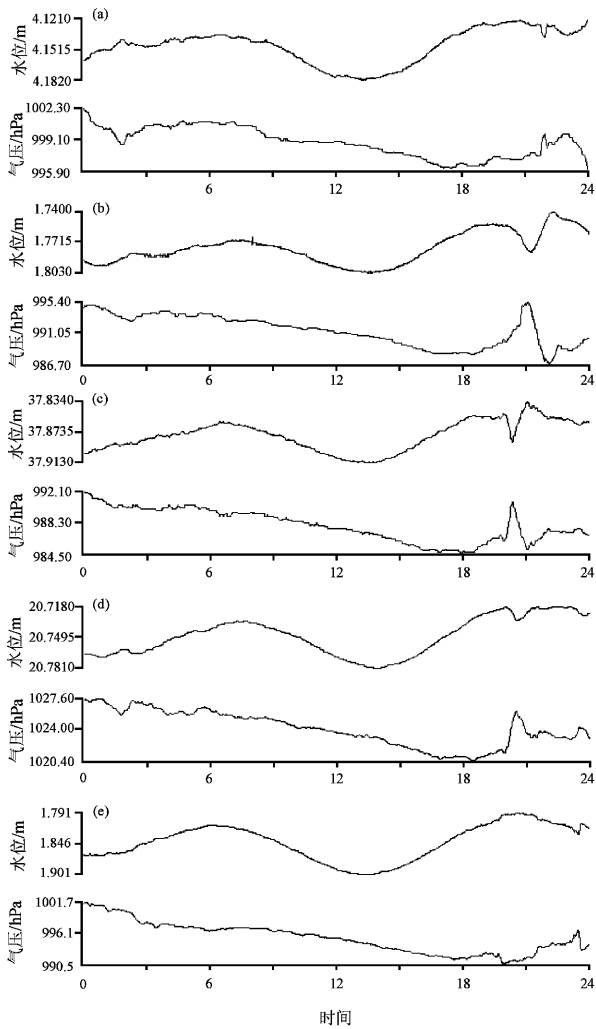


图4 2004年7月4日水位、气压分钟值曲线
(a) 黄骅井; (b) 深州井; (c) 无极井;
(d) 宁晋井 (e) 永年井

Fig. 4 Minute curves of water level and atmospheric pressure

(a) Huanghua Well; (b) Shenzhou Well; (c) Wuji Well;
(d) Ningjin Well; (e) Yongnian Well

计算结果, 黄骅井分时段回归分析结果稳定, 永年、无极井次之, 相关性较差的是深州井。水位对气压扰动的响应存在滞后效应。计算结果表明, 黄骅井水位对气压扰动响应较快, 滞后时间在2分钟之内, 深州井在4~5分钟, 其它3口井在3分钟之内。气压扰动过程较短的或扰动开始时气压变化速率较大者, 滞后时间明显; 过程较长或扰动开始时气压变化速率较缓者, 滞后时间不明显。

由于水位对气压扰动响应有滞后效应, 采用5

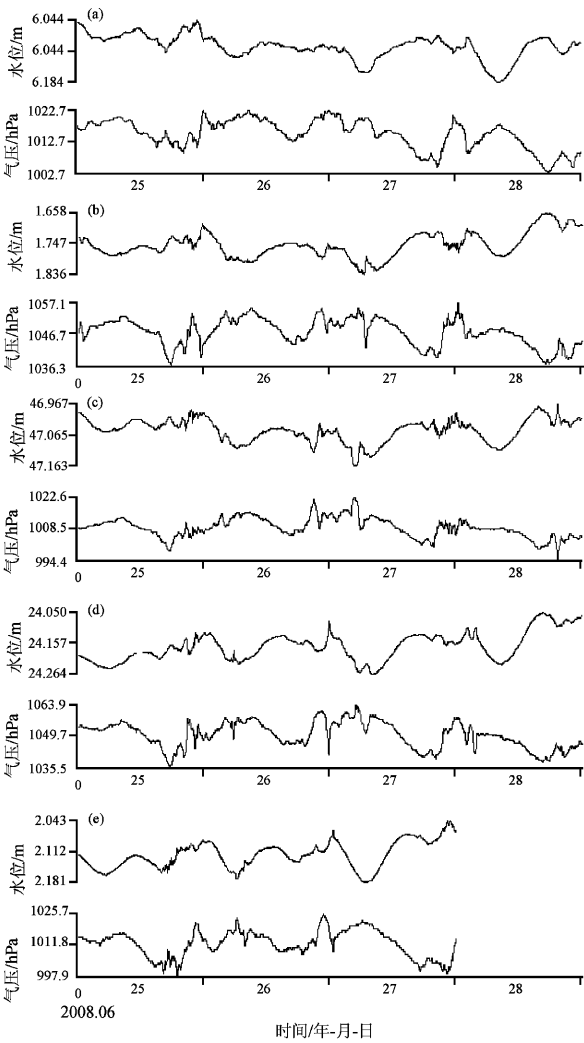


图5 2008年6月25日至28日
水位、气压分钟值曲线
(a) 黄骅井; (b) 深州井; (c) 无极井;
(d) 宁晋井 (e) 永年井

Fig. 5 Minute curves water level and atmospheric pressure

(a) Huanghua Well; (b) Shenzhou Well; (c) Wuji Well;
(d) Ningjin Well; (e) Yongnian Well

分钟滑动、差分预处理, 计算结果与日均值序列计算结果相接近, 无极井气压系数最高(7.3 mm/hPa)。深州井的水位、气压日均值和分钟值回归分析结果相差较大, 原因是该井存在石油溢出现象。分段计算结果表明, 日均值序列相关结果稳定, 分钟值相关分析结果波动大, 说明水位对不同周期气压变化的响应存在差异性, 水位对气压较长周期变化响应性高, 对短周期的瞬间扰动响应有一定的波动。

4 结语

利用水位和气压的不同周期的资料计算了井水位的气压系数并进行了分析,结果表明,不同周期序列的气压系数基本接近,水位对气压较长周期变化的响应比瞬间大幅度扰动的响应更加稳定。

水位对气压扰动的响应存在滞后效应,因此利用水位和气压分钟值、5分钟滑动的差分值进行的回归分析结果比较稳定,求得的气压系数与日均值序列计算结果相当。水位对气压扰动响应,当气压扰动过程较短或扰动开始时气压变化速率较大时,滞后时间明显,一般滞后在5分钟之内;当气压扰动过程较长或扰动开始时气压变化速率较缓时,滞后时间不明显。

气压扰动过程的随机性较大,选取的不同时段数据计算结果表明,水位对不同扰动过程的响应存在波动性,即同一口井对不同的气压扰动或同一次气压扰动对不同井孔水位的影响不同。这种现象的产生与井孔的水文地质条件及气压的随机变化特性有直接关系,有待深入研究。

参考文献:

卜凡泉,杨燕. 2002. 井水位气压效率 b 值动态响应的断层一前兆场主应力组合模式[J]. 西北地震学报, 24(4): 356-360.

- 车用太,杨会年. 1985. 井孔水位微动态形成机理的探讨[J]. 地震地质, 7(3): 43-50.
- 丁风和,赵铁锁,尹占军,等. 2007. 大甸子井水位的气压系数及其震前异常[J]. 西北地震学报, 29(2): 174-176.
- 耿杰,周斌,张昭栋,等. 2002. 深井水位气压效率和相关系数在中强地震前的变化特征[J]. 西北地震学报, 24(3): 257-261.
- 国家地震局地下水影响因素研究组. 1985. 地震地下水动态及其影响因素分析[M]. 北京:地震出版社.
- 刘裕生,杨林根. 1994. 井孔静水位的优选气压系数[J]. 地震学刊, (3): 27-29.
- 汪成民,李宣瑚,王铁城,等. 1990. 中国地震地下水动态观测网[M]. 北京:地震出版社.
- 王新,杨旭升,赵小茂,等. 2007. 周至井气压系数的变化特征及其与地震的关系[J]. 华北地震科学, 25(2): 15-19.
- 魏焕,张昭栋,耿杰,等. 2001. 水位随机气压效率的地震前兆异常研究[J]. 地震研究, 24(1): 88-91.
- 吴伯,丁守英,杨林根,等. 1992. 气压系数的封井试验求解法[J]. 华北地震科学, 10(2): 83-86.
- 夏非,万登堡. 1992. 井潮系数,气压系数与地震关系的探讨[J]. 地震研究, 15(1): 29-35.
- 殷积涛,汪成民. 1988. 承压含水层的荷载效应和井孔水位的气压效应[J]. 中国地震, 4(2): 39-48.
- 鱼金子,谷明珠,殷世林. 1990. 三口井水位的气压系数变化及其与地震关系初探[J]. 地震, (3): 25-32.
- 张昭栋,郑金涵,张广城,等. 1989. 承压井水位对气压动态过程的响应[J]. 地球物理学报, 32(5): 539-549.
- 赵洪声,赵永亮. 1990. 1966~1976年间云南11次 $M_s \geq 6$ 级地震的临震大气扰动[J]. 地震研究, 12(1): 43-51.

Response of Water Level on the Well to Air Pressure Perturbation

ZHANG Zi-guang¹, SHENG Yan-rui¹, ZHANG Su-xin¹, LI Wei², YIN Hong-wei³

(1. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

(2. Earthquake Administration of Shijiazhuang City, Shijiazhuang 050055, Hebei, China)

(3. Seismostation of Shenzhou City, Shenzhou 053800, Hebei, China)

Abstract

The paper analyses deep well's water level responding to atmospheric pressure perturbation disturbance, the wells are involved underground fluid well net of earthquake in Hebei Province such as Huanghua well, Shenzhou well, Wuji well, Ningjin well, Yongnian well. The result shows that atmospheric pressure momentary change on a large scale can cause the accurate synchronism change of water level, atmospheric pressure coefficient of water level calculated by this method is consistent to the result calculated by daily equal sequence. Compared to the correlative analysis result of daily equal sequence, water level responding to atmospheric pressure disturbance represents certain volatility.

Key words: atmospheric pressure disturbance, atmospheric pressure coefficient, water level, response, linearity regress