

抽水对体应变的干扰及其消除方法*

张凌空 刘北顺 高福旺

(国家地震局分析预报中心)

摘要 通过对北京昌平台 Sacks 体应变和气压、水位及抽水资料的综合对比分析,较系统地论述了抽水对体应变年变、月变和日变的干扰作用,并探讨了消除干扰的方法。结果表明,去掉干扰后的体应变曲线与 1989 年大同地震存在一定的对应性。本文在研究体应变的同时,也研究了地下水位的变化,并比较了二者的异同。

主题词: 体应变 固体潮 间歇性抽水 体应变残差

1 抽水基本情况概述

首都圈 Sacks 体应变综合观测台网是联合国开发计划署援建的华北地震预报实验场的一个重点项目,1987 年至今已获得 6 年多的连续观测资料。工作中我们发现各井体应变都不同程度受到人工抽水的干扰,其中以北京昌平台最为显著。查明抽水的干扰并将其消除是体应变资料能否正确运用于地震预报的关键问题。为此,1990 年到 1992 年笔者调查了昌平台的抽水情况,并做了 3 年抽水记录。

该台观测井深度为 320 m,第四系厚 83 m,为山前冲积的砂砾土层,其下为震旦纪白云岩和灰岩,地下水补给与径流条件均好。该井四周 800 m 范围内有南大门、六道口、大场和王家洼 4 口抽水井,流量除王家洼为 $40 \text{ m}^3/\text{hr}$. 外,其余均为 $60 \text{ m}^3/\text{hr}$. ,井深分别为 60、70、90 和 200 m。采用直灌方式浇地,总抽水量为 4 口井在同一时间内抽水量之和,详情已在专文^[1]中述及。

2 体应变对抽水作用的响应

2.1 抽水对体应变年动态的干扰

图 1(a)是体应变和水位年动态对比图,最明显的特征是两条曲线每年都出现一个有规律的年变化,即 4~6 月份都大幅度下降,7~9 月份又都大幅度回升,11 月份又有一定程度的下降或回升。现查明这种年变主要是由农田抽水引起的。当地每年一般进行 3~4 次抽水灌溉,分别在春、夏、冬三季,这种抽水活动是大面积的,因而严重影响了地下水位的升降,导致岩石孔隙压力的改变,引起体应变相应的变化。

图 2(a)、(c)是 1990 年和 1991 年 3~8 月份体应变、水位和抽水量关系图(对水位而言纵坐标每格代表 1500 mm)。由图可看出,体应变与水位几乎完全吻合,其下降点与抽水的起点相对应,抽水量越大,下降量也越大;上升点与抽水结束点或抽水量减少点相对应。抽水不仅能

* 本研究系地震科学联合基金资助项目

说明体应变整体的变化特征,甚至可解释某些细节。由于每年的抽水时间和抽水量不完全一致,导致各年体应变曲线形态不完全相同。

2.2 抽水对体应变月变化的干扰

1990年5月是抽水集中的一个月,体应变和水位受抽水的干扰都很大,是一个典型的实例(图3)。图中 T_1 、 W_1 分别是体应变和水位原始观测曲线(含日变的曲线), T_2 、 W_2 分别是去掉日变化的体应变和水位观测曲线(光滑的实线)。直观地看,体应变和水位同步变化,曲线的下落段都与抽水段相对应,其下降速率与抽水量成正比。对该月体应变和抽水量进行了回归分析,得知回归系数不是定值,在 $0.148 \sim 0.237 (1 \times 10^{-9} / \text{m}^3)$ 之间变化。这说明体应变与抽水量之间是一种非线性关系。

2.3 抽水对体应变日变的干扰

将图3(a)、(b)中的 T_1 、 W_1 曲线用数字滤波的方法处理,并去掉气压影响后得到两条日变曲线(图4(a)、(b))。在抽水段体应变和水位的日变曲线都发生了大幅度的波动,其幅值比非抽水段大3~5倍,包络线没有理论固体潮(图4(c))那种纺锤形态,日变也没有理论值那种M型的双峰变化,而是呈大幅度的单峰脉冲变化,已查明这种变化是由于每日间歇性抽水作用引起的^[1]。

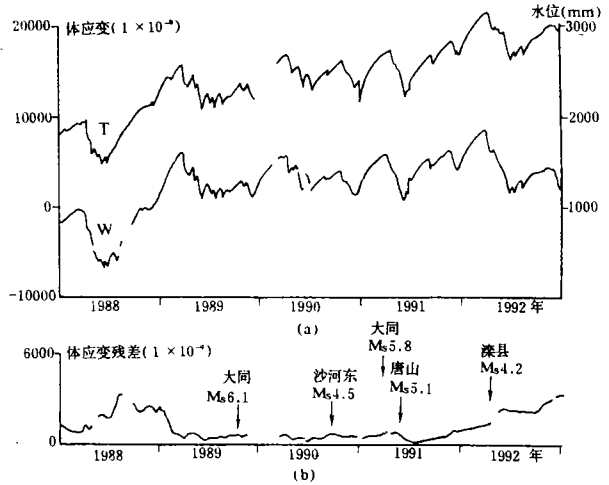


图 1 (a)体应变和水位年动态对比图

(b)体应变残差与地震的关系

T 体应变观测曲线;W 水位观测曲线

Fig. 1 (a) Comparison between body strain and annually dynamic Water level;

(b) Relationship between body strain residual and earthquake.

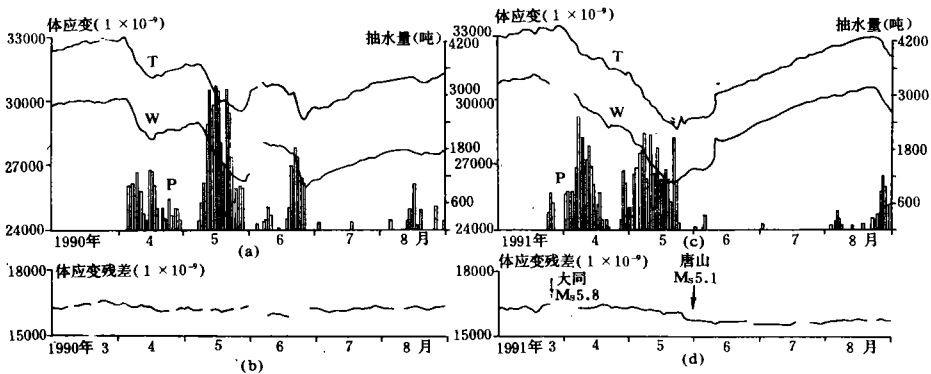


图 2 抽水对体应变年变化的干扰及消除

T 体应变; W 水位; P 抽水量

(a)、(b) 1990年(3—8月); (c)、(d) 1991年(3—8月)

Fig. 2 The disturbance of pumping to annual volume strain change and elimination of the disturbance.

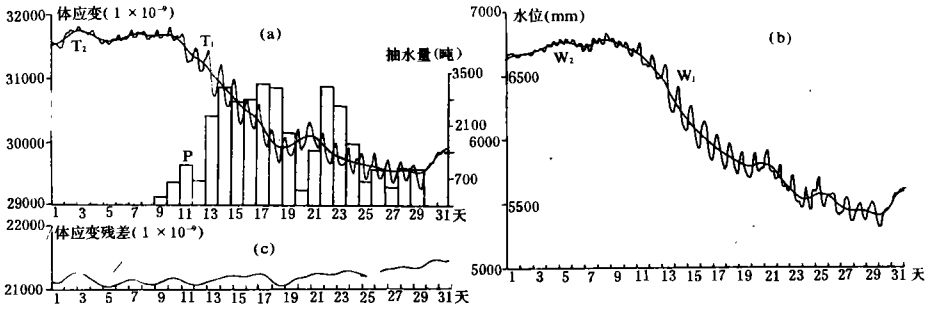


图 3 抽水对体应变月变化的干扰及消除

T_1 、 W_1 体应变和水位原始观测曲线； P 抽水量直方图； T_2 、 W_2 去掉日变化的体应变和水位观测曲线

Fig. 3 The disturbance of pumping to monthly volume strain change and elimination of the disturbance.

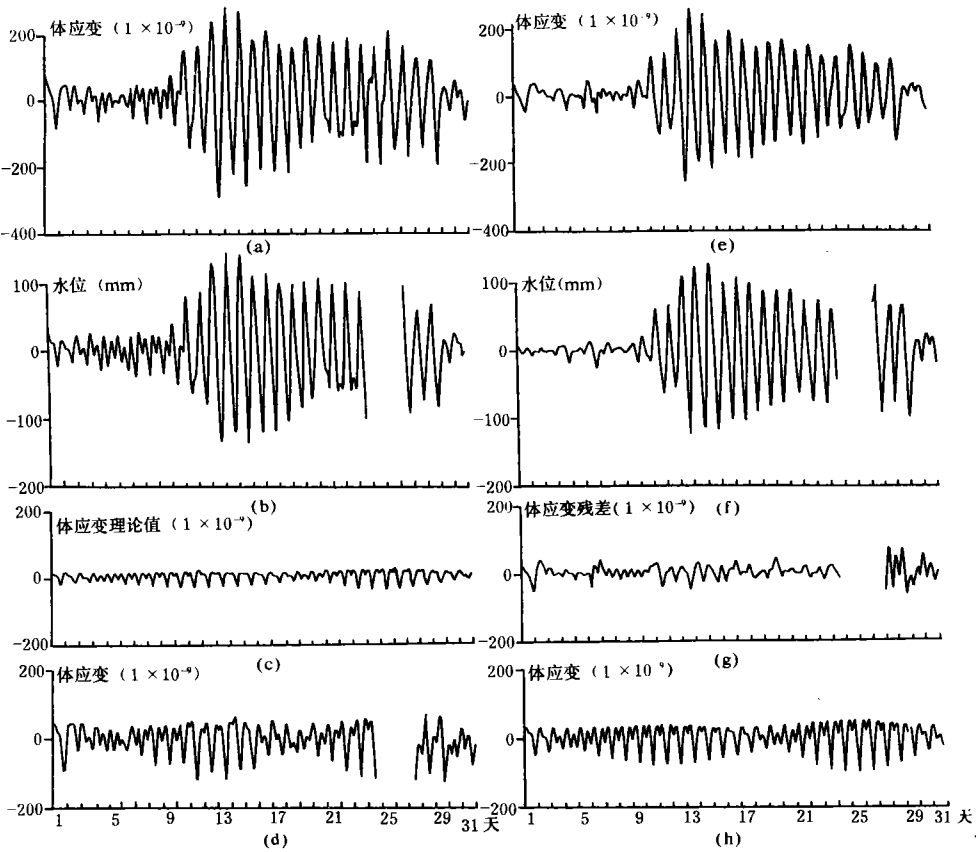


图 4 抽水对体应变日变化的干扰及消除

(a)体应变日变曲线；(b)水位日变曲线；(c)理论固体潮体应变；(d)体应变潮汐观测曲线；(e)去掉理论固体潮后的体应变日变曲线；(f)去掉理论固体潮后的水位日变曲线；(g)消除水位影响后的体应变曲线；(h)体应变理论固体潮拟合曲线

Fig. 4 The disturbance of pumping to daily volume strain change and elimination of the disturbance.

3 抽水对体应变干扰作用的物理机制

3.1 体应变与水位的关系

体应变 Δa 与孔隙压力 P 的关系^[2]有

$$\Delta a = P/K_a \quad (1)$$

式中 K_a 为含水层体积压缩模量,在流体力学中 P 与水位 S 的关系为

$$P = \rho g s \quad (2)$$

ρ 为水的密度, g 为重力加速度,将(2)式代入(1)式,得

$$\Delta a = (\rho g/K_a)s \quad (3)$$

这就是理论上体应变与水位的关系,该式表明, Δa 随 s 而变化,这一结论与实际观测结果基本是相符的。

3.2 体应变受抽水干扰作用的理论模型

钻孔资料表明该井区地层为潜水含水层,水位降深 S 可用潜水的雅各布公式^[3]表达

$$(zh_0 - S)S = \frac{2.3Q}{2\pi k} l g \frac{2.5Tt}{r^2\mu} \quad (4)$$

式中 h_0 为潜水含水层厚度, Q 为水泵流量, k 为含水层渗透系数, T 为导水系数, μ 为含水层给水度, r 是抽水井到观测井的距离, t 是抽水时间。由于水位每年最大降深为3 m,含水层厚度大于83 m, $s \ll h_0$,故 s 项可省略,(4)式变为

$$S = \frac{2.3Q}{4\pi k h_0} l g \frac{2.5Tt}{r^2\mu} \quad (5)$$

根据叠加原理^[3],干扰井群工作时,观测点处产生的降深值,等于各井单独工作时在该点产生降深值的代数和。于是(5)式变为

$$S = \frac{2.3}{4\pi k h_0} \sum_{i=1}^n (Q_i l g \frac{2.5Tt_i}{r_i^2\mu}) \quad (6)$$

式中 n 表示共有 n 口抽水井, $i=1,2,3,\dots,n$ 。(6)式代入(3)式得

$$\Delta a = \frac{\rho g}{K_a} \cdot \frac{2.3}{4\pi k h_0} \sum_{i=1}^n (Q_i l g \frac{2.5Tt_i}{r_i^2\mu}) \quad (7)$$

这就是体应变受抽水干扰作用的理论模型,当 k 、 h_0 、 Q_i 、 T 、 r_i 和 μ 都是定值时, Δa 只随 t 而变化,二者呈对数关系,为非线性变化,这一结论也与实际观测结果相符。抽水引起水位的变化,水位又引起含水层孔隙压力的变化,进而导致体应变的改变。

4 抽水对体应变年变和月变干扰的消除及其与地震的关系

把体应变、气压和水位小时值数据进行数字滤波,滤出的短周期日变在下一节专门讨论,这里只研究剩下的长周期项。在非抽水段选取水位变化平稳的段落,作体应变和气压的一元线性回归分析,求得回归系数 $k_1=1.3(1 \times 10^{-8}/\text{mb})$;再选取水位与气压对应较好的时间段作线性回归分析, $k_2=4.1(\text{mm}/\text{mb})$;在抽水段选取体应变与水位变化最同步的段落作回归分析,得 $k_3=1.81(1 \times 10^{-9}/\text{mm})$ 。

抽水使体应变和水位下降,若停止抽水,地下水补给又使体应变和水位回升,并且体应变与抽水量又呈非线性关系,致使情况十分复杂,因此难以直接用抽水数据消除其干扰。体应变的改变主要是由水位变化直接引起的,因此消除水位影响也就消除了抽水的干扰。基于这一思想,按上面求得的回归系数分别把气压干扰从体应变和水位中消去,再从剩余体应变中去掉水

位的影响,其计算公式为

$$V_t' = (V_t - k_1 P_t) - (W_t - k_2 P_t) k_3$$

式中 V_t 、 W_t 和 P_t 分别为体应变、水位和气压观测值, V_t' 是修正后的体应变。根据该式编制计算程序,处理了 1988~1992 年的各项数据,得到体应变残差曲线(图 1(b)),其数据为日均值,结合地震预报,该曲线特征是 1989 年大同 6.1 级地震前有一个显著的隆起。

为了看清体应变残差的细节,再用日均值绘制半年图(图 2(b)、(d))。1990 年 3~8 月份无地震,曲线表现得比较平坦(图 2(b));图 2(d)则不同,1991 年大同 5.8 级地震前曲线有一个明显上升,唐山 5.1 级地震前又有一个明显下降。这是该台监测范围内记录到的两个典型震例。

抽水对体应变月变干扰的消除也与上面的方法相同。图 3(c)是用小时值绘制的体应变残差曲线。

5 抽水对体应变日变干扰的消除

根据 Nakai 多项式拟合法⁽⁴⁾,某一时刻固体潮观测数据 Y_t 与理论值 R_t 和导数 R_t' 的关系有

$$Y_t = A + B_1 R_t + B_2 R_t' \quad (8)$$

利用最小二乘法原理编制计算程序求得系数 A 、 B_1 和 B_2 ,再代入(8)式得到一组 Y_t 值,这就是观测值对理论值的拟合值。

基于这一原理,首先选择非抽水段(1~8日)的原始观测数据进行回归分析。对于体应变,回归系数 $B_1 = -2.352$, $B_2 = 1.730$,检验值 $F = 105.8$,临界值 $\lambda = 6.63$, $F > \lambda$,相关性较好。将这些值代入(8)式求得体应变潮汐观测值对理论值的拟合曲线(图 4(h)),把拟合曲线(NCHP9005)从原始曲线(YCHP9005)中消去,再对气压值(YPCH9005)作一元线性回归分析得回归系数 $b = 7.323(1 \times 10^{-9}/\text{mb})$, $F = 70.2$, $\lambda = 6.63$, $F > \lambda$,说明体应变日波观测值受到气压影响。把 YPCH9005 从 YCHP9005 中消去得到曲线 PCHP9005(图 4(a));该曲线消去 NCHP9005 得到曲线 UCHP9005(图 4(e))。

用同样的方法处理水位数据,原始观测值 YWCH9005 与理论值二元线性回归分析的结果是 $B_1 = -1.390$, $B_2 = 0.8037$, $F = 184$, $\lambda = 6.63$, $F \gg \lambda$,相关性很好,说明水位也受到固体潮的作用。把拟合曲线 NWCH9005 从 YWCH9005 中消去,对 YPCH9005 作一元线性回归分析得 $b = -4.781(\text{mm}/\text{mb})$, $F = 272.9$, $\lambda = 6.63$, $F \gg \lambda$,说明水位受气压的影响很显著;将其影响消去得到曲线 UWCH9005(图 4(f)),把 YPCH9005 从 YWCH9005 中消去得到曲线 PWCH9005(图 4(b))。

采用与长周期项消除抽水干扰的相同方法处理日变曲线(e)、(f)。首先考虑 1~8 日非抽水段,作体应变(e)与水位(f)的一元线性回归分析得 $b = 1.383(1 \times 10^{-9}/\text{mm})$, $F = 50.47$, $\lambda = 6.63$, $F > \lambda$,存在相关关系,按这一关系把水位的干扰消除;然后考虑抽水段 9~31 日(24~26 日缺数据),9~23 日体应变与水位不存在相位滞后,作二者的一元线性回归分析得 $b = 1.851(1 \times 10^{-9}/\text{mm})$, $F = 15638$, $\lambda = 6.63$, $F \gg \lambda$,相关性非常显著,由求得的 b 值将水位影响消除;27~31 日体应变与水位存在相位滞后,这时有

$$Y_t = A + B_1 W_t + B_2 W_t' \quad (9)$$

式中 Y_t 表示某一时刻体应变, W_t 和 W_t' 则分别表示该时刻的水位和其导数,由(9)式作二元线性回归分析得 $B_1 = 0.3657$, $B_2 = 3.852$, $F = 66.2$, $\lambda = 6.63$, $F > \lambda$,存在相关关系,利用 B_1 、 B_2

消去水位影响。最后将消除水位影响后的3段数据连结起来,得到一条体应变残差曲线SCHP9005(图4(g)),将其与拟合曲线NCHP9005叠加就得到了消除抽水干扰的体应变潮汐观测曲线ZCHP9005(图4(d))。利用ZCHP9005就可以进一步从事调和分析及加卸载响应比计算等工作,而直接使用YCHP9005,将会使计算精度大大降低,导致错误结论。

6 体应变与水位的比较

(1)二者均受到固体潮的作用,体应变日潮差最大可达 2×10^{-7} (由于存在井孔放大效应,该值为视体应变,下同),水位可达100 mm。

(2)二者同受气压影响,但气压对二者的作用是相反的,气压增大,体应变上升,水位则下降,回归分析检验值 $F_{水} > F_{体}$,说明气压对水位的影响更显著。

(3)二者都受抽水的干扰且基本同步变化。体应变每年约下降 4.9×10^{-6} ,水位约下降2.5 m;间歇性抽水作用可造成体应变日变达 6×10^{-7} ,水位日变达300 mm。

(4)体应变残差曲线表明,体应变探头还接收到了许多水位探头没有感应到的地下信息。

7 结束语

综上所述,抽水不仅造成体应变显著的长周期年变和月变,也造成了体应变短周期大幅度的日变。消除其干扰后,长周期的体应变残差与大同等地震有一定的对应性。短周期的体应变潮汐观测值也可直接用于地震预报的分析计算。但我们还应注意到钻孔局部岩土力学性质改变(如溶洞、微裂隙)对体应变探头产生的干扰作用,这是我们下一步应深入研究的课题。

本项研究曾得到国家地震局地质研究所车用太的支持和帮助,何世海的理论指导,同时郝钦文对初稿也提出了许多宝贵意见,在此谨致诚挚谢意!

(本文1994年5月27日收到)

参考文献

- 1 张凌空. 抽水时体应变大幅度波动成因的探讨. 西北地震学报, 1992, 14(4).
- 2 汪成民, 等. 地下水微动态研究. 地震出版社, 1988. 151~154.
- 3 李俊亭, 等. 地下水动力学. 地质出版社, 1987. 47~90.
- 4 张雁宾. 数值微分法在潮汐资料的 Nakai 处理方法中的应用. 地壳形变与地震, 1989, (4).

THE DISTURBANCE OF PUMPING TO BODY STRAIN AND ELIMINATION OF THE DISTURBANCE

Zhang Lingkong Liu Beishun Gao Fuwang

(Center for Analysis and Prediction, SSB)

Abstract

Based on the comprehensive comparison analysis of the Sacks body strain, atmospheric pressure, water level and pumping data at Changping station in Beijing, the disturbance of pumping to body strain is systematically expounded and the method for eliminating the disturbance is discussed. The results show that the body strain curve after eliminating the disturbance was corresponding to the Datong earthquake in 1989. This paper studies not only body strain but also groundwater level change and compares their similarities and differences.

Key words: Body strain, Earth tide, Intermittent pumping, Body strain residual error