# 气氡日变与固体潮关系的探讨

张凌空

(国家地震局分析预报中心)

**摘要** 本文通过对北京顺义台气氡和体应变、气压、水位、水温及气温的综合对比观测,论证了地下水逸出氡日变曲线存在潮汐现象,其值与体应变固体潮理论值密切相关。由于用气氡资料预报地震是地球化学方法的一个新探索,因而本项工作为其深入研究提供了一定的实际观测基础。

**主题词**: 氡气测量 固体潮 地震预报

## 1 引言

地下水逸出气氡(有别于水氡)是否能够反映潮汐变化,是国内外地球化学界一直努力探索的一个重要问题。1989年国家地震局分析预报中心首次在北京东三旗台安装了自行研制的SD-1型双道自动测氡仪,并进行了一天24小时的连续记录,初步发现了气氡的潮汐现象[1]。1993年又在顺义台建立了第二个实验点,气氡仪每隔1小时记一次数(氡浓度用脉冲数表示)。与气氡同时观测的项目还有体应变、气压、水位、水温和气温,观测结果更进一步证实了气氡潮汐现象的存在。

## 2 基本情况简述

顺义台位于怀柔—琢县断裂带的端部,井深370 m。第四系厚15.2 m,为亚粘土与中细砂互层,以下至159 m为花岗岩,再往下是寒武纪页岩、砾岩和灰岩。地下水位深10 m,受抽水和降雨的影响,水位年动态变化1.5 m。该台与东三旗台同属联合国开发计划署援助建成的Sacks体应变综合观测台网,1989年开始正常观测,体应变固体潮记录完好,水位潮幅较小,只有8 mm左右。众所周知,用地壳岩石固体潮变化来衡量氡对地壳应力变化的敏感程度是最理想的方法,因此我们选择了该台进行气氡潮汐的综合对比观测。

## 3 气氡潮汐观测的理论依据

通常情况下,地下水逸出气氡浓度W可以看成是压力P和温度T的函数,当井水温度不变时,$W=f(P)=f(P_a+\triangle P_a)$,其中Pa为孔隙压力,△Pa为孔隙压力变化,进一步可导出气氡浓度变化为

$$\triangle W=\frac{df(P)}{dP_a \cdot P_a} \tag{1}$$

又根据文献[2],可知含水层内孔隙压力与体应变(体膨胀)的关系

$$\triangle P_a=K_a \cdot \triangle a \tag{2}$$

其中比例系数 $K_a$ 为含水层的体积压缩模量，$\triangle a$ 为孔隙介质的体应变，将(2)式代入(1)式，得

$$\triangle W=\frac{df(p)}{dP_a}\cdot K_a\cdot\triangle a \tag{3}$$

可以看出气氡浓度与岩石体应变成正比。如果排除了各种干扰，则$\triangle a$只表示固体潮体应变，$\triangle W$随$\triangle a$而变化，这是二者在理论上的内在关系。

## 4　综合观测的原始结果

在原始记录中选择记录完整的 5 月份资料进行重点研究。图 1 是气氡、体应变、气压、水位和气温的原始观测数据经数字滤波处理后的图形。气氡、体应变、气压和水位及气温都有明显的日波和半日波变化，体应变固体潮观测值(除去气压影响)与理论值形态基本吻合，说明实测体应变真实、完整地记录到了固体潮的变化；气压变化也有潮汐(气压潮)特征，与理

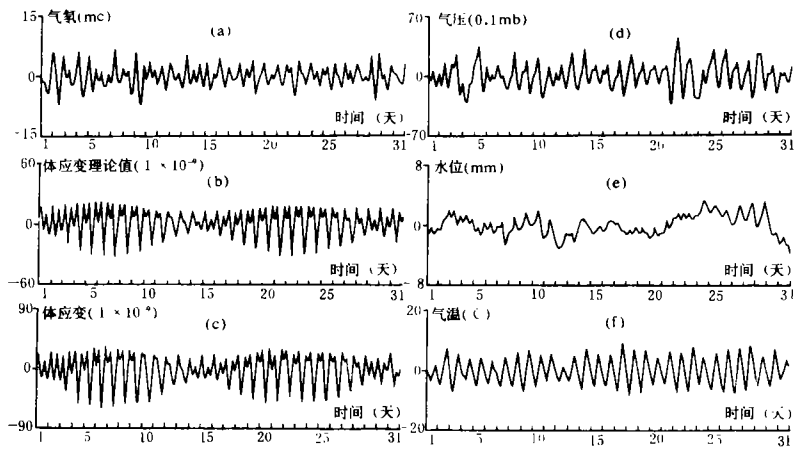


图 1　对比月图

(a)气氡观测图　(b)体应变固体潮理论值　(c)体应变观测图

(d)气压观测图　(e)水位观测图　(f)气温观测图

Fig. 1　Comparison between theoretical and observed curves in May.

论值比较不很规则，有一些随机变化；水位幅值变化较小(在 8 mm 以内)，也记录到了潮汐(水位潮)，但在该月 8－12 日，24－29 日间的几个日变化明显是非潮汐变化，这是受观测井周围农田机井间歇性抽水影响产生的脉冲；气氡观测也记录到了潮汐现象，但没有理论值那种明显的纺锤状变化，而且其中还有一些非潮汐的脉冲变化，这一点与气压有些类似，但这种变化与气压和水位都没有明显的对应关系。该井水温变化很稳定，在 13.3℃左右，此月最大温差为 0.05℃，它不可能引起这么大的气氡变化。气温变化较剧烈，昼夜温差最大可达 15℃，但气氡与气温直观上也无明显的对应关系。由此可知，气氡曲线变化比较复杂，既反映了一部分潮汐变化特征，同时也叠加了不少非潮汐成分的信号。

由于 5 月 22－27 日气氡与理论值吻合较好，所以有必要再进一步研究这 6 天的情况(图 2)。气氡在形态上与理论值基本吻合，气压在形态上也基本反映了潮汐特征，但 23－24 日的气压日变化与固体潮理论值和实测值都是反向的，而气氡与理论值和实测值都是一致

的.因此可以直观地看出气氡反映的是固体潮汐变化,而不是大气压变化。

## 5 付立叶谱分析

对 5 月 22－27 日这 6 天的气氡、固体潮理论值和观测值进行了付立叶谱分析[3],结果表明在各周期成分中三者均以日波和半日波的振幅为最大,这与图 2 给出的直观结果是一

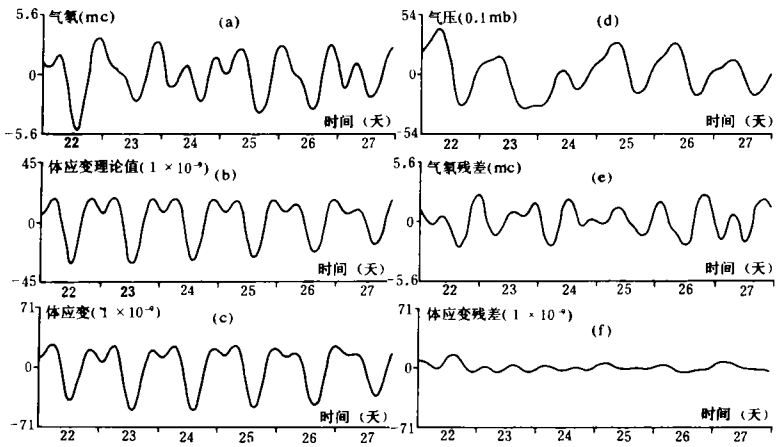


图 2 对比 6 天图

(a)气氡观测图 (b)体应变固体潮理论值 (c)体应变观测值

(d)气压观测值 (e)气氡残差 (f)体应变残差

Fig. 2 Comparison between theoretical and observed curves from 22nd to 27th of May.

致的。先后经过了多次谱分析,气氡日波和半日波的潮汐因子及相位差见表 1 和表 2,由此可知日波平均潮汐因子是 0.1095 脉冲数/$1\times100^{-9}$应变,半日波平均潮汐因子是 0.1206 脉冲数/$1\times10^{-9}$应变,各日波族和半日波族的潮汐因子很接近,相位差也很小,说明气氡与固体潮理论值的谱系结构是一致的,具有相同的组成,因而进一步证实了气氡潮汐的存在。

由潮汐因子求得顺义台气氡潮与体应变固体潮之间的转换值的平均值为 8.688($1\times100^{-9}$/脉冲数),而东三旗台的平均值为 2.312($1\times100^{-9}$/脉冲数),二者相差 3.8 倍。东三旗台井深 285 m(第四系厚 198 m),为自流井(承压水),其氡的浓度高于顺义台。

**表 1 气氡日波的潮汐因子及相位差**

| 周期(小时) | 潮汐因子(脉冲数/$1\times10^{-9}$) | 相位差(度) |
|---|---|---|
| 23.67 | 0.1062 | 0.2025 |
| 23.75 | 0.1011 | −0.4334 |
| 23.80 | 0.1161 | 0.1560 |
| 23.83 | 0.1148 | 0.4834 |
| 24.20 | 0.1153 | 0.1850 |
| 24.25 | 0.1061 | −0.5160 |
| 24.33 | 0.1069 | 0.0330 |

表 2　气氡半日波的潮汐因子及相位差

| 周期(小时) | 潮汐因子(脉冲数/1×10⁻⁹) | 相位差(度) |
|---|---|---|
| 11.83 | 0.1101 | −2.082 |
| 11.87 | 0.1268 | −1.901 |
| 11.90 | 0.1326 | −1.523 |
| 12.08 | 0.1291 | 4.899 |
| 12.10 | 0.1155 | 4.500 |
| 12.12 | 0.1200 | 4.166 |
| 12.16 | 0.1101 | 3.935 |

## 6　逐步回归分析

设某一时刻固体潮观测值为 $Y_t$，固体潮理论值为 $R_t$，其导数为 $R_t^1$，观测值相对于理论值的时间滞后为△t，日本中井采用多项式拟合法对潮汐理论值进行了拟合，对漂移部分用时间的多项式加以近似，并只取到二次项，于是得

$$Y_t=A+B_1\cdot R_{t+\Delta t}+K_1t+K_2t^2 \tag{4}$$

式中

$$R_{t+\Delta t}=R_t+\Delta t\cdot R_t^1 \tag{5}$$

由于这些数据首先进行了数字滤波，因此漂移部分已被滤掉，(4)式变为

$$Y_t=A+B_1\cdot R_t+B_1\cdot \Delta t\cdot R_t^1 \tag{6}$$

令 $B_2=B_1\cdot\Delta t$，则(6)式又变为

$$Y_t=A+B_1\cdot R_t+B_2\cdot R_t^1 \tag{7}$$

为了简化计算，采用 5 个等距结点的近似求导公式[4]求理论值导数

$$R_t^1=\frac{2}{3}(R_{t+1}-R_{t-1})-\frac{1}{12}(R_{t+2}-R_{t-2}) \tag{8}$$

体应变固体潮理论值计算参考文献[5]，选用观测值与理论值对应最好的时间段的数据代入(7)式，应用最小二乘法原理[6]求得系数 A、$B_1$ 和 $B_2$，再代入(7)式经计算得到一组 $Y_t$ 值，这就是观测值对理论值的拟合值，利用这一点我们还可以作任一观测值 $Y_t$ 对 $R_t$ 和 $R_t^1$ 的二元线性回归分析。

### 6.1　体应变数据处理

根据中井的观点，体应变固体潮观测值(用 YSHY9305 表示)和理论值(用 LSHY9305 表示)与其导数有关，所以我们首先对这三者进行二元线性回归分析，F＝2813，λ＝6.63，F≫λ，相关性非常好，由得到的回归方程计算体应变拟合值，把其从原始曲线 YSHY9305 中消除，得到拟合残差 ASHY9305，再把 ASHY9305 对气压值(用 PSHY9305 表示)作一元线性回归分析，F＝1110，λ＝6.63，F≫λ，说明体应变日波观测值受气压影响(回归系数为 4.225(1×10⁻⁹/mb))，消去该影响后得到文件 QSHY9305，曲线见图 2(f)。

### 6.2　气氡数据处理

与上面的方法类似，先取与体应变理论值对应最好的 22－27 日这 6 天的数据作回归分析，F＝137.7，λ＝6.63，F≫λ，相关性很好，把由回归方程算得的拟合值从气氡原始观测值(用 YSQD9305 表示)中消去，得到文件 USQD9305，其曲线见图 2(e)，再与气压作一元线性

回归分析.$F=0.06075$,$\lambda=6.63$,$F\ll\lambda$.说明气压对气氡日波观测没有影响.由图2也可直观地看出这一点。

把USQD9305对QSHY9305做一元线性回归分析,$F=0.6573$,$\lambda=6.63$,$F<\lambda$.不相关.即体应变残差(消去固体潮理论值和气压)对气氡残差(消去理论值)无影响。把USQD9305对水位日波观测值作一元线性回归分析.$F=0.07245$,$\lambda=6.63$,$F\ll\lambda$.亦不相关,说明气氡残差也不是由水位引起的。把USQD9305对气温作一元线性回归分析,$F=3.758$,$\lambda=6.63$.$F<\lambda$,表明气温变化对气氡观测无影响。

### 6.3 气氡潮与体应变固体潮的关系

把气氡日波观测值YSQD9305与消去气压影响的体应变观测值做一元线性回归分析,$F_1=137.7$,与体应变固体潮理论值做回归分析,$F_2=160.8$,$F_2>F_1$,说明气氡观测值与理论值的相关性比实测值好.所以我们进一步分析时可以理论值为依据。从理论上可以对气氡产生的潮汐现象进行定性解释:固体潮引起地壳不断发生压缩与膨胀,因而造成地下水中氡的浓度发生变化.气氡的逸出量也就随之改变。

### 6.4 气氡残差与残余应变

实测体应变消除理论值及气压影响后.残余应变已很小(见图2(f)).而气氡消除这些影响后.残差仍然很大(图2(e)),并且这种变化与残余应变不相关,说明除了潮汐影响外,气氡曲线还迭加了许多原因不明的信号,这些信号存在日波和半日波的变化.其幅值为0.90—1.20脉冲数/千分钟,没有明显的周期,具有随机性特征,这一点与大气压相似。此特征越显著.气氡曲线形态就越偏离潮汐,且难以将其从潮汐观测中滤出.因而会给进一步的调和分析和加卸载响应比计算等工作带来较大误差,这是利用气氡潮汐资料从事地震预报工作必须解决的问题。

美国加州的H. A. Wollenberg等在朗瓦利火山口进行过水氡的连续观测[7],他们发现氡在地下水中的变化具有日变及半日变的周期组分。国内有些学者在某些台站用自记测氡仪也曾观测到水氡日变现象[8]。气氡来自于水氡,二者有其必然联系。笔者认为如果开展气氡与水氡的同时对比观测,通过两者日变曲线的相关分析及与理论固体潮的关系,有可能找到消除气氡随机干扰的方法,从而提取出真正的潮汐变化。

## 7 结束语

综上所述,气氡日变曲线一方面较好地反应了固体潮的变化,但同时也迭加了许多随机干扰信号,并且这些信号与气压、水位、水温、气温及残余体应变无关,如何查明其产生的原因,并将其从气氡潮汐观测中消除,是我们下一步急需完成的课题。目前,使用体积应变仪进行固体潮观测是国际上公认的比较理想的方法,如果气氡观测彻底解决了干扰问题,那么高灵敏度的气氡仪就可以与地壳应变仪并用.从而为地震预报的潮汐观测研究开辟一条新途径。

本项研究属于八五攻关0342课题内容之一(该课题负责人是张炜),曾得到国家地震局分析预报中心刘北顺、刑玉安、何世海的支持和帮助,郗钦文对本文初稿提出过许多宝贵意见.在此谨致诚挚谢意。

(本文1994年5月6日收到)

## 参考文献

1 张炜，等. 地下水中逸出气氡的研究——水化地震前兆新项目探索. 中国地震，1992，(1)
2 汪成民，等. 地下水微动态研究. 地震出版社，1988：151－154
3 王宝银，等. 地学数据处理. 山西地震，1986，(增刊)
4 北京矿业学院高等数学教研组编著. 数学手册. 煤炭工业出版社，1975
5 刘澜波. 体应变固体潮理论值计算. 地震研究，1984，(6)
6 王宋贤. 应用最小二乘法原理对观测值的拟合. 地震，1983，(4)
7 H. A. Wollenberg. Radon－222 in Groundwater of the Long Valley Caldera. California：PAGEOPH，1984/1985，122
8 罗光伟. 用自记测氡仪在某些台站观测到的日变现象. 地震，1986，(6)

## A STUDY OF RELATIONSHIP BETWEEN DAILY VARIATION OF GAS Rn AND SOLID TIDE

Zhang Lingkong

*(Center for Analysis and Prediction, SSB)*

**Abstract**

By the synthetically comparing observation of the gas Rn with the volumetric strain, air pressure, water level, water temperature and atmospheric temperature at Shunyi station in Beijing, it is found that in the curves of daily changes of gas radon from ground water there exists a tide phenomenon, and its value is closely related with the theory value of volumetric strain solid tide. To predict earthquake by using data is a new probe of geochemistry methods, so this work provides real observation base for its deepgoing study.

**Subject words**: Radon survey, Earth tide, Earthquake prediction