

井水位降雨影响的定量改正*

张昭栋 耿 杰

(中国济南 250021 山东省地震局)

高玉斌 张铸钢

(中国济南 250014 山东省计算中心)

摘要

给出了井水位降雨影响定量改正的新方法. 利用褶积滤波和多元回归的方法, 考虑到降雨对井水位影响的滞后“记忆”效应, 对井水位进行降雨影响改正. 对鲁 08 井水位的降雨改正结果表明, 该方法的改正效果是比较好的.

关键词 褶积滤波; 井水位; 降雨改正; 鲁 08 井; 滞后记忆

1. 前 言

利用地下水动态观测来研究地震前兆信息, 已被国内外充分注意, 也成为我国地震监测预报三大主要手段之一(汪成民等, 1988). 为了从井水位观测资料中提取孕震信息, 就必须把井水位的各种干扰影响尽量扣除干净. 从前对井水位的固体潮和气压等影响的干扰机理和排除方法进行了研究(张昭栋等, 1986a; b; 1989a; 1991), 而对井水位的降雨影响研究得较少, 只是对井水位的降雨荷载效应进行了机理分析(张昭栋等, 1986c; 1989b), 却没有找到井水位降雨影响的定量排除方法, 这是因为降雨对井水位的影响是相当复杂的.

本文分析了降雨对井水位影响的特点. 由于这一影响不但有时间的滞后, 而且有一种类似“记忆”的作用, 因此, 用以前的一般回归分析方法是难以消除的. 我们采用了能消除“记忆”影响的褶积滤波方法, 并结合多元回归分析, 先找出各项的响应系数, 然后对井水位进行降雨影响的改正. 从鲁 08 井的观测资料来看, 井水位降雨影响定量改正的效果是比较好的.

* 地震科学联合基金资助项目.

1991 年 7 月 20 日收到本文初稿, 1992 年 4 月 27 日决定采用.

2. 降雨对井水位影响的特点

降雨入渗是地下水的主要补给形式之一. 水文地质学中的降水入渗补给, 是指对浅埋的潜水或位于承压水补给区地下水的直接入渗补给, 对于埋藏深度较大、上部有较厚隔水层的承压水来讲, 在一次降雨过程中是不能直接入渗补给的. 这是由于降雨入渗补给的速度很缓慢, 一般每天渗透的距离不过几m. 而且, 降雨入渗补给地下水的深度也是有限的. 例如, 对一般平原区, 若降雨量为 10 mm 时, 下渗深度为 0.8—1.0m; 降雨量为 30mm 时, 下渗深度不超过 3.2m(汪成民等, 1988).

近年来发现, 一些远离补给区, 位于承压区的深井或封闭条件相当好的咸水井, 在井孔周围降雨后, 井水位在开始降雨后 1—3h 就开始上升, 这种井水位变化并不是降雨直接补给产生的, 而是降雨在地表层形成“降雨荷载”, 这种荷载使含水层产生垂直向应力变化, 致使含水层发生压缩, 孔隙水压增高造成的(张昭栋等, 1986c). 有些井孔可能存在着降雨直接入渗补给和降雨荷载效应两种影响. 它们的共同特点是, 降雨后井水位滞后于降雨开始升高, 达到高值后逐渐下降, 升高过程所需的时间比下降的时间要短(图 1).

井水位的降雨升高后的渐降过程之所以较慢, 是由于降雨造成的非平衡再达到平衡, 需要一个过程, 需一段时间. 降雨停止后, 由于土壤中水分的蒸发, 地面植物的蒸腾作用, 地表水的径流及补给排泄等等, 都使降雨荷载逐渐减少, 承压井水位因部分卸载而下降. 另一方面, 由于降水荷载分布的不均匀, 并且荷载应力的传递也不均匀, 使得含水层的压力水头变化分布也不均匀, 这样造成了新的水力坡度, 迫使含水层内的水渗流, 从而形成了水位的调整恢复变化, 直到含水层受力状态达到新的平衡为止. 所以, 恢复比上升的时间长.

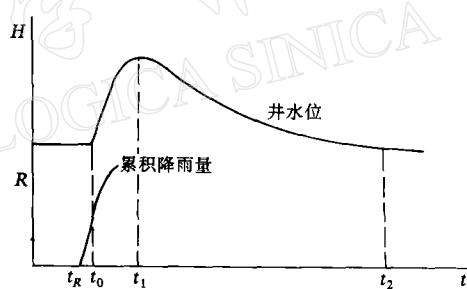


图 1 降雨对井水位的影响

3. 褶积滤波理论

褶积滤波可以用来处理一个系统对外来干扰的响应, 尤其是有时间滞后“记忆”影响的响应, 它能较好地把干扰对系统的“记忆”影响消除. 所以, 在许多科学领域中都引用褶积滤波的处理方法.

对于两个连续函数 $u(t)$ 和 $v(t)$, 它们的褶积定义为

$$y(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau)v(t - \tau)d\tau = u(t) * v(t) \quad (1)$$

在地震地下水观测中, 一般把井水位观测曲线进行时值采样, 形成一个时间序列. 对于两个离散型的时间序列

$$u(t): u(0), u(1), u(2), \dots, u(n)$$

$$v(t): v(0), v(1), v(2), \dots, v(n)$$

若存在一个新的时间序列

$$y(t): y(0), y(1), y(2), \dots, y(n)$$

如果

$$y(0) = u(0)v(0)$$

$$y(1) = u(0)v(1) + u(1)v(0)$$

$$y(2) = u(0)v(2) + u(1)v(1) + u(2)v(0)$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$y(t) = \sum_{\tau=0}^t u(\tau)v(t-\tau)$$

那么,称新序列 $y(t)$ 为序列 $u(t)$ 和 $v(t)$ 的褶积. 记为

$$y(t) = \sum_{\tau=0}^t u(\tau)v(t-\tau) = u(t) * v(t) \quad (2)$$

由(2)式可见,离散型的褶积滤波是按时间序列求各次干扰影响的累积总和,而对每次影响,又顾及干扰本身的大小及相对于观测的时间间隔两个因子,并以此来消除有时间滞后的“记忆”影响. 也就是说,它不仅考虑到 t 时刻干扰的影响,而且考虑到 t 时刻前各时刻的干扰对该时刻的影响. 所以褶积滤波是处理井水位有时间滞后“记忆”影响的一种较好的方法.

4. 井水位降雨影响的改正

一般采用如下的数学模型来拟合井水位的变化

$$H(t) = H_p(t) + H_g(t) + H_k(t) + F(t) \quad (3)$$

式中, $H_p(t)$ 和 $H_g(t)$ 分别为气压和固体潮对井水位的影响. 一般认为, 井水位对气压变化和固体潮体应变变化的响应基本上是线性的. 所以, 可以用回归分析的方法求出响应系数, 再从井水位中把它们的影响扣除(汪成民等, 1988). 式(3)中 $F(t)$ 为井水位的趋势变化, 一般也用一线性函数代替, 即

$$F(t) = a_0 + a_1 t \quad (4)$$

式(3)中的 $H_k(t)$ 是降雨对井水位的影响, 它与降雨量并无一种简单的线性关系. t 时刻的降雨量对 t 时刻的井水位影响不大, 而是经过一定的时间后才产生作用, 并且其影响可延续较长时间(图 1). 考虑到这一特点, 选取单位降雨量对井水位的影响函数为非线性形式

$$R(t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ A_0 + A_1 t + A_2 t^2 & t_0 < t < t_1 \\ A_3 + A_4 t + A_5 t^{-1} + A_6 t^{-2} & t_1 < t < t_2 \\ 0 & t > t_2 \end{cases}$$

那么, 降雨对井水位的影响为

$$H_k(t) = R(t) * C_R(t)$$

式中, $C_R(t)$ 为累积降雨量函数, 把 $C_R(t)$ 也取为时值离散序列, 则有

$$\begin{aligned}
 H_R(t) &= R(t) * C_R(t - \Delta t) = \sum_{\tau=0}^{t_2-t_0} R(\tau) C_R(t - \Delta t - \tau) \\
 &= \sum_{\tau=0}^{t_1-t_0} R(\tau) C_R(t - \Delta t - \tau) + \sum_{\tau=t_1-t_0}^{t_2-t_1} R(\tau) C_R(t - \Delta t - \tau) \\
 &= A_0 \sum_{\tau=0}^{t_1-t_0} C_R(t - \Delta t - \tau) + A_1 \sum_{\tau=0}^{t_1-t_0} \tau C_R(t - \Delta t - \tau) \\
 &\quad + A_2 \sum_{\tau=0}^{t_1-t_0} \tau^2 C_R(t - \Delta t - \tau) + A_3 \sum_{\tau=t_1-t_0}^{t_2-t_1} C_R(t - \Delta t - \tau) \\
 &\quad + A_4 \sum_{\tau=t_1-t_0}^{t_2-t_1} \tau C_R(t - \Delta t - \tau) + A_5 \sum_{\tau=t_1-t_0}^{t_2-t_1} \tau^{-1} C_R(t - \Delta t - \tau) \\
 &\quad + A_6 \sum_{\tau=t_1-t_0}^{t_2-t_1} \tau^{-2} C_R(t - \Delta t - \tau) \tag{5}
 \end{aligned}$$

其中, t 和 τ 为两个时间变量, $\Delta t = t_0 - t_R$, 它是井水位对降雨响应的滞后初始时间(图 1).

对于进行固体潮和气压影响改正的井水位, 可写为

$$H(t) = F(t) + H_R(t) \tag{6}$$

由式(4)知, 井水位趋势变化项有两个待定系数 a_0 和 a_1 . 由式(5)知, 一次降雨对井水位影响有 7 个待定系数 $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ 和 A_6 , 可以通过多元回归法求出这 9 个待定系数. 对于每一个井水位观测时值, 可得出 1 个含有 9 个待定系数的方程

$$h = a_0 + a_1 t + A_0 c_0 + A_1 c_1 + \cdots + A_6 c_6 \tag{7}$$

其中, c_0, c_1, \dots, c_6 分别为式(5)中与系数 A_0, A_1, \dots, A_6 相乘的因子.

对于 n 个井水位观测时值, 可得出误差方程

$$\mathbf{H} = \mathbf{CA} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{8}$$

其中

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & t_1 & c_{01} & c_{11} & \cdots & c_{61} \\ 1 & t_2 & c_{02} & c_{12} & \cdots & c_{62} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n & c_{0n} & c_{1n} & \cdots & c_{6n} \end{pmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}_n \end{pmatrix}$$

而 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为观测偶然误差及其它影响的总和.

由最小二乘原理可得出方程(8)的解

$$\mathbf{A} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{H}$$

从而得出回归方程

$$\bar{H} = a_0 + a_1 t + A_0 c_0 + A_1 c_1 + \cdots + A_6 c_6 \tag{9}$$

利用求出的系数 $a_0, a_1, A_0, \dots, A_6$ 就可以返回去对井水位做降雨影响的定量改正.

5. 鲁 08 井水位的降雨影响定量改正

利用上述的方法,对鲁 08 井水位的观测资料进行降雨影响定量改正。鲁 08 井位于胜利油田,东经 $118^{\circ}45'$, 北纬 $37^{\circ}25'$ 。该井对固体潮、气压及降雨荷载都有明显反映。该井含水层为灰黄色粉细砂岩, 观测段在 505—525m, 含水层的渗透系数为 0.115m/d。该井对降雨反映较快, 一般在降雨 2h 后就出现井水位响应上升(邹泉生等, 1983)。

图 2 给出了一次降雨定量改正曲线, 图中 H_0 曲线为经固体潮和气压改正后的井水位, H 为降雨改正后的井水位。从图中清楚地看出, H_0 曲线比较平直, 说明褶积滤波确实可以消除降雨对井水位的滞后“记忆”影响, 对鲁 08 井水位的降雨定量改正效果是比较好的。

6. 讨 论

在对井水位进行降雨改正前, 必须先对井水位进行固体潮和气压影响改正。做这一改正最好不用别尔柴夫(Pertsev)滤波。计算结果表明, 别尔柴夫滤波是一种处理固体潮影响较好的方法, 但它有一美中不足之处, 即有时可产生因果颠倒的弊病。例如, 在处理降雨影响问题中, 用别尔柴夫滤波出现井水位反而提前于降雨产生上升(图 3), 也就是因果颠倒。这种弊病出现的原因在于, 别尔柴夫滤波器是以计算点为中心, 用中心点前后的各 18 点来进行滤波, 所以产生了后 18 点井水位对中心点井水位的滤波影响。为了正确地找出式(5)中的滞后时间 Δt , 不要采用别尔柴夫滤波的方法, 可用其它方法进行。

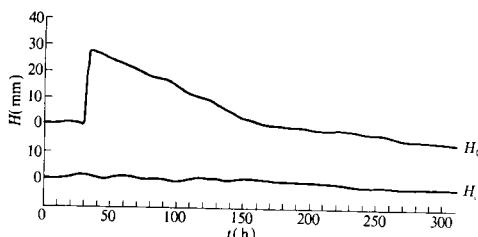


图 2 鲁 08 井水位一次降雨的改正

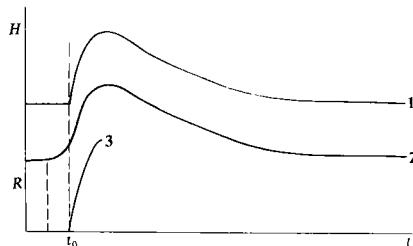


图 3 两种滤波结果比较
1. 褶积滤波; 2. 别尔柴夫滤波; 3. 降雨量

7. 小 结

(1) 降雨对井水位的影响并不是线性的, 所以用一般的回归分析方法, 难以对井水位

进行降雨影响改正. 褶积滤波方法考虑到 t 时刻前各时刻干扰影响的总和, 所以能消除系统对干扰的滞后“记忆”影响. 因此, 用褶积滤波处理降雨对井水位的影响效果比较好. 鲁 08 井水位的降雨影响的定量改正, 也说明了这一点.

(2) 别尔柴夫滤波可以滤掉周期变化的日波和半日波等成分, 但存在一种因果倒置的弊病, 而褶积滤波计算方法没有这种弊病.

感谢胜利油田地震办公室帮助我们收集鲁 08 井的有关资料.

参 考 文 献

- 郭敦仁, 1979. 数学物理方法, 49—130. 人民教育出版社, 北京.
- 汪成民、车用太、万迪堃、董守玉, 1988. 地下水微动态研究, 253—271. 地震出版社, 北京.
- 邹泉生、陈正品、靖继才, 1983. 降雨对井水位的“效应”. 地震研究, 6, 65—71.
- 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 1986a. 气压对水井水位观测的影响. 地震, 1: 42—46.
- 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 1986b. 体膨胀固体潮对水井水位观测的影响. 地震研究, 9, 465—472.
- 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 1986c. 水井水位的降水荷载效应. 地震学报, 8, 增刊, 101—110.
- 张昭栋、郑金涵、张广城、靖继才, 1989a. 承压井水位对气压动态过程的响应. 地球物理学报, 32, 539—549.
- 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 1989b. 水井水位的气压效率和降水荷载效率之间的定量关系. 地震, 6, 38—44.
- 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 1991. 深井水位的固体潮效应. 地震学报, 13, 66—75.
- 张昭栋、顾功叙、汪成民, 1988. 地下水潮汐分析, 5—82. 山东大学出版社, 济南.