

文章编号: 1003-1375(2012)01-0040-04

# 宁晋井水位潮汐因子响应比异常特征分析

于 伟<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 2. 邢台市地震局, 河北 邢台 054001)

摘要: 应用加卸载响应比的理论, 对宁晋井水位数据进行加卸载响应比计算, 结果表明, 在 2002 年 4 月 22 日邢台 M4.8 级地震前存在加卸载响应比异常, 该方法可作为今后邢台及邻区一项中短期地震趋势预测异常依据。

关键词: 井水位; 加卸载响应比; 潮汐因子; 异常特征

中图分类号: P315.723 文献标志码: A

## 0 引言

从力学的角度看, 地震孕育过程的物理实质就是震源区介质的损伤、破坏或失稳, 并伴随着能量快速释放的过程, 因此地震孕育过程确切地说就是震源区介质的损伤演化过程。1987 年, 尹祥础教授根据震源区介质的破坏即非线性系统失稳这一自然现象, 提出了加卸载响应比理论这一新的地震预报方法。张昭栋等专家将该理论和方法运用到地下水数据资料分析中, 取得了较好效果。宁晋井是位于邢台老震区的唯一一口深水观测井, 本文拟用加卸载响应比的方法来研究该井地下水位变化, 以提取邢台老震区及邻区中强地震前异常信息, 并研究其异常特征, 为地震预测提供前兆依据。

## 1 原理与方法

加卸载响应比理论的关键与核心就是将孕震区作为一个非线性系统, 设法对该孕震系统输入某些信号, 然后重点观测该系统在临近失稳时对输入信号的各种响应。

设当一系统载荷的改变为  $\Delta P$  时, 其响应的改变为  $\Delta R$ 。当系统稳态(载荷为  $P_0$ )时的响应率为  $\Delta R_0/\Delta P_0$ , 载荷为  $P_1$  时的响应率为  $\Delta R_1$ , 则系统对于  $P_1$  的响应比  $F_1$  为

$$F_1 = \left( \frac{\Delta R_1}{\Delta P_1} \right) / \left( \frac{\Delta R_0}{\Delta P_0} \right) \quad (1)$$

系统加载(增量为  $\Delta P_+$ )引起的响应率为  $\Delta R_+/\Delta P_+$ , 卸载(增量为  $\Delta P_-$ )引起的响应率为

$\Delta R_-/\Delta P_-$ , 则系统的加卸载响应比  $F$  为

$$F = \left( \frac{\Delta R_+}{\Delta P_+} \right) / \left( \frac{\Delta R_-}{\Delta P_-} \right) \quad (2)$$

当系统处于稳定状态时,  $\Delta R_+ = \Delta R_-$ ; 当系统偏离稳定状态时,  $\Delta R_+ > \Delta R_-$ , 即使  $\Delta P_+ = \Delta P_-$ ,  $\Delta R_+$  也大于  $\Delta R_-$ 。偏离程度越大,  $\Delta R_+ > \Delta R_-$  的程度也越大。由此可得出,  $F$  与  $F_1$  皆能定量说明体系趋向失稳的程度, 并描述孕震系统所处的状态<sup>[1]</sup>。

对穿过封闭承压含水层的水井能够反映地球固体潮的认识已有 100 多年的历史。由于井水位响应的量值与含水层的弹性性质有关, 水文地质学家、地球物理学家和其他地球科学家都对用含水层的弹性参数解释这种响应的方法感兴趣, 开展了大量的研究工作<sup>[2-3]</sup>。从理论上证明了深井水位的潮汐是水井含水层对地壳固体潮体应变的响应。以固体潮的振幅因子来探测地震孕震区的思路与方法, 实际上就是对孕震系统的响应率的研究。一般来说, 振幅因子是对固体潮应力整个加卸载过程的总的平均力学响应; 而加卸载响应比则是将整个加卸载过程的响应率分为加载响应率与卸载响应率, 再研究其比值。事实上, 含水层不仅受固体潮应力作用, 而且还有构造应力作用, 由此, 含水层的应变是两者作用的结果, 即

$$\epsilon = \frac{1}{E(t)} (\sigma_t + \sigma_s) \quad (3)$$

式中:  $\sigma_t$  为潮汐应力;  $\sigma_s$  为构造应力;  $E(t)$  为介质的杨氏模量, 其值随受应力作用的地层岩性不同而不同。当时间很短时, 认为构造应力变化不大, 则

收稿日期: 2010-12-29

基金项目: 河北省地震局青年地震科研基金项目

作者简介: 于伟(1975-), 男(汉族), 河北赵县人, 吉林大学地球科学探测科学与技术学院在职研究生, 主要从事地震监测预报工作。

E-mail: advance@eq-he.ac.cn

有

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma_t}{E(t)} \quad (4)$$

即潮汐应力引起岩石的潮汐应变,此应变又影响含水层的应变(如果这个含水层与震源区较近),导致含水层孔隙压力发生变化,表现为承压井水位

$$y(t_i) = \begin{cases} A^+ R(t_i) - \Delta t^+ A^+ \frac{dR}{dt} \Big|_{t_i} + K_0^+ + K_1^+ t_i + K_2^+ t_i^2 & (\dot{P}(t) > 0) \\ A^- R(t_i) - \Delta t^- A^- \frac{dR}{dt} \Big|_{t_i} + K_0^- + K_1^- t_i + K_2^- t_i^2 & (\dot{P}(t) < 0) (i=1, 2, \dots, N) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $y(t_i)$  为地下水固体潮的实际观测值,即为系统输出;  $\dot{P}(t)$  为载荷的一阶导数,即为系统输入;对于地下水位固体潮的加卸载响应比计算分析,载荷有 3 种形式可选,即体应变固体潮理论值  $\Theta$ 、断层面上的潮汐有效剪切应力增量  $\Delta\tau_e$  和最大构造方向的潮汐剪切应力  $\tau_{\max}$ 。  $R(t_i) = \Theta$  和  $\frac{dR}{dt} \Big|_{t_i} = \Theta'$  分别为  $t_i$  时刻的体应变固体潮理论值及其对时间的一阶微商,可以通过固体潮理论值准确地计算出来;  $A^+$ 、 $A^-$  为拟合振幅因子(亦称为潮汐因子),即为潮汐响应;  $\Delta t^+$ 、 $\Delta t^-$  为时间滞后;  $K_0^+$ 、 $K_1^+$ 、 $K_2^+$  与  $K_0^-$ 、 $K_1^-$ 、 $K_2^-$  分别为拟合多项式各阶的系数,为非潮汐响应,其中“+”代表加载,“-”代表卸载,则  $K_0^+$ 、 $K_0^-$  代表非潮汐零点漂移;  $K_1^+$ 、 $K_1^-$  代表非潮汐速率;  $K_2^+$ 、 $K_2^-$  代表非潮汐加速度。实际计算分析中,可选取  $N=24, 48, \dots, 120, \dots$  值(即以 1, 2,  $\dots, 5, \dots$  等任意天数为 1 组),用最小二乘法解(5)式,即可得地下水物理观测资料的加卸载响应比(均为无量纲量)<sup>[4]</sup>。

本文以相应的体应变固体潮理论值  $\Theta$  作为加卸载方式,选取  $N=72$ (即 3 天的整点值数据为 1 组),对宁晋井 1997—2008 年的地下水位固体潮观测数据进行加卸载响应比值计算,求取加卸载振幅因子比来分析。

## 2 井孔概况和水文地质条件

宁晋井位于河北省宁晋县苏家庄乡李羊盂村南,地理坐标为 115.12°E, 37.76°N, 孔口标高 33.90 m, 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。该井井深 2003.78 m,观测层深度 1899.0~1919.0 m,为含水层岩性观测砂质灰岩,地下水类型为岩溶裂隙承压水<sup>[5]</sup>。补给区在太行山一带,但

也发生变化,所以近震源区的承压井水位有可能观测到震前非线性失稳的变化。

实际上,地下水位固体潮观测对固体潮应力加卸载的响应可由类似于对固体潮资料分析的 Nakai 拟合模型获得<sup>[4]</sup>。

不受降雨直接补给。水位微动态存在较明显的固体潮效应,气压效应较明显,如图 1 所示。

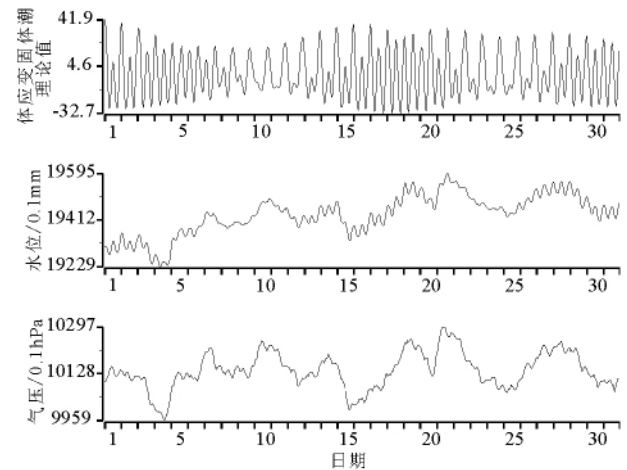


图 1 宁晋井水位固体潮效应和气压效应  
(1999 年 3 月 1—31 日)

## 3 资料处理与异常分析

(1)排除气压干扰。由于井下水位是地壳含水层孔隙压的反映,承压井水位对含水层的应力反应较灵敏,影响水位变化的干扰较多。气压对宁晋井是主要干扰,应设法从井水位的观测资料中扣除气压的影响。本文采用日值一阶差分回归分析方法进行气压扣除<sup>[6]</sup>。水位日均值主要受气压和水位趋势性升降的影响,后者在不太长的计算时段内(一般取月长度)近似为直线升降,这时有:

$$H(t) = b_0 + b_1 + b_p Q(t) \quad (6)$$

$H(t)$  为水位日均值,  $Q(t)$  为气压日均值。第 1 项只是时间  $t$  的一次线性函数,这就使得有可能将此二元回归化为一元回归来解,两边求一阶差分得:

$$\Delta H(t) = b_1 + b_p \Delta Q(t) \quad (7)$$

在一个月长度的资料中,按筛选原则( $\Delta H(t)$ 与

$\Delta Q(t)$ 符号相反者不取; $\Delta H(t)/\Delta Q(t) > 10$  mm/hPa者不取)筛选掉不合理的数据,然后作一元回归分析, $b_p$ 为所求的气压系数。其方法优点是:采用水位日值序列,已基本去掉了潮汐引力对水位的影响;通过筛选原则,基本上可把降雨等随机干扰筛选掉,水位和气压的相关程度较高,所求气压系数比较合理、准确。采用日值一阶差分回归分析方法,宁晋井水位和气压日均值一阶差分的相关性为0.9706,在置信水平 $\alpha=0.01$ 上显著相关<sup>[5]</sup>。以此系数进行水位气压改正,得出改正后的水位。

(2)震例选择。为检验振幅因子响应比方法在宁晋井中的预测效能,需要对其进行震例检验。根据流体学科其它分析方法震例总结的经验,同时考虑到邢台本区地质构造情况,本文选择以观测井为中心 $\Delta \leq 100$  km范围内M4.0~4.9级地震, $\Delta = 101 \sim 200$  km范围内M5.0~5.9级地震。从1997年到2008年底,符合条件的地震有2次:2002年4月22日邢台M4.8级地震,距离该井约76 km;2006年7月4日文安M5.1级地震,距离该井约165 km。

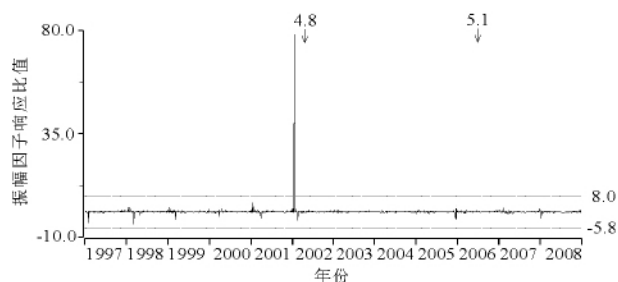


图2 宁晋井水位加卸载振幅因子响应比计算结果

(3)振幅因子响应比计算。将经过气压改正后的水位整点值进行加卸载响应比计算,计算结果显示,平时水位振幅因子响应比值在1附近上下波动,震前异常表现为大幅单值突跳现象,在2002年1月

22日,该井出现78.12的高值响应,时间上距离4月22日M4.8级地震为90天。为此,根据震例检验结果,可选用3倍标准差作为提取异常的方法(1997—2008年振幅因子响应比总体平均值为1.1)。从计算结果可看出,固体潮加卸载响应比方法可以有效提取地震前兆信息。

## 4 基本认识

(1)宁晋井加卸载响应比异常形态主要表现为单点高值突跳。根据加卸载响应比理论,在构造应力和能量累积的过程中,这一区域的地壳介质严重损伤,地壳介质将对外界任何微小的扰动(例如潮汐应力)都很敏感,而敏感时间段只占整个时间窗非常小的一段。另外,一次中强震前,地下水位不仅有趋势变化,而且也可能有突升或突降现象。这种突升或突降现象也有可能造成加卸载响应比单点高值突跳现象。

(2)在时间上,异常出现在震前3个月,单点高值突跳后,恢复到正常背景值左右,临震前、震时、震后均无异常高值。

(3)对距离较远的中强震,井水位加卸载振幅因子响应比值基本无明显异常。如2006年7月4日文安M5.1级地震,距离该井约165 km,震前该井加卸载振幅因子比未出现明显异常值。可能是由于震源孕育过程中,承压井含水层离震源区较远,难以观测到震源区介质发生的非线性失稳,井水位的变化可能是震源区介质非线性失稳变化次生效应的反映<sup>[7]</sup>。

(4)通过研究分析,宁晋井水位震前存在加卸载响应比异常。研究结果可为今后邢台及邻区中短期地震趋势预测提供一项较好的异常依据。同时,加卸载响应比方法还有待进一步应用到河北省地下水观测网的数字化资料中,深入研究群井异常与地震三要素的关系。

## 参考文献:

- [1] 尹祥础,尹灿.非线性系统失稳的前兆与地震预报[J].中国科学(B辑),1991,21(5):512-518.
- [2] 张昭栋,郑金涵,冯初刚.深井水位的固体潮响应[J].地震学报,1991,13(1):66-75.
- [3] 张昭栋.地下水潮汐分析[M].济南:山东大学出版社,1988:25-79.
- [4] 蒋骏,李胜乐,邓志辉,等.地震前兆信息处理与软件系统[M].北京:地震出版社,2000:169-173.
- [5] 张子广,盛艳蕊,张素欣,等.井水位对气压扰动的响应[J].地震研究,2010,33(2):170-175.
- [6] 国家地震局科技监测司.地震地下水手册[M].北京:地震出版社,1995:302.
- [7] 中国地震局监测预报司.华北地区强地震短期前兆特征及预测方法研究[M].北京:地震出版社,2005:295-314.
- [8] 万永芳,刘特培.地下水固体潮加卸载响应比分析及其预测意义[J].华南地震,2004,23(1):28-34.
- [9] 张素欣,王晓山,马栋,等.华北北部地区地下水10年准周期及其与地震活动关系分析[J].华北地震科学,2008,26(2):27-31.
- [10] 张子广,张素欣,杨立早.地下水物理参量强地震中短期预报方法的检验[J].华北地震科学,2001,26(2):27-31.
- [11] 李富,焦伟,王小坤,等.珲春7.0级深震前地下流体加卸载响应比群体异常变化[J].东北地震研究,2003,19(4):35-39.

[12] 马君钊,张磊,王建国,等.天津地区井水位固体潮观测的加卸载响应比变化与附近地震关系的研究[J].地震地磁观测观测与研究,2010,31(2):25-30.

## Analysis on Earth Tidal Factor Load-unload Response Ratio Anomaly of Water Level in Ningjin Well

YU wei<sup>1,2</sup>

(1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Earthquake Administration of Xingtai city, Hebei Xingtai 054001, China)

**Abstract:** Using the method of load-unload response ratio, the observation data of water level in Ningjin well are processed, the result shows that there is load-unload response ratio anomaly before Xingtai M4.8 earthquake, the method can be used as a basis method in the medium and short term earthquake prediction in Xingtai and its surrounding area.

**Key words:** water level; load-unload response ratio; earth tidal factor; anomaly characteristics

## 《华北地震科学》征稿简则

一、《华北地震科学》是河北省地震局主办的地震科学综合性学术季刊。每季末出版。主要刊登地震学方面具有创新性的研究成果,也登载一些与地震有关的地球物理、地震地质、地震工程等方面的学术论文及与地震科学有关的实验、观测、考察、问题讨论等方面的论文。

### 二、来稿要求及注意事项

1. 来稿要求选题新颖、论点明确、论据可靠、数据准确、文字简练。每篇论文(包括图、表、参考文献和300字以内的摘要)一般要求不超过8000字,其中插图以不超过6幅为宜;其它短文(含图、表和参考文献)一般不超过3000字,其中插图以不超过3幅为宜。字号为5号字。另附英文题目及英文摘要。

2. 来稿包括:摘要、关键词(3~8个)、引言、正文、结语和参考文献,以及何种基金资助、作者简介等内容。文中外文字母、符号必须分清大小写、正斜体;上下角的字母、数字和符号,其位置高低应区分明显。对易混淆的外文字母、符号及字母的大小写需标清。文中计量单位一律采用中华人民共和国国家标准《量和单位》中颁布的法定计量单位,非许用单位,务请换算成许用单位。

3. 文中插图需提供激光打印图,线条要均匀;照片层次、反差要分明。图中内容、文字及符号须清晰,并与正文一致。插图如涉及国界,可尽量避开;如必须保留,则须把图中内容直接绘在地图出版社最新出版的带有国界的地理图上。

4. 表格一律采用“三线表”,即每个表基本上由三条组成,去掉竖线(必要时可加少量辅助线)。

5. 参考文献应列全,而且应是已公开发表的;未公开发表的资料请勿列入,但可做为脚注处理。文中所引文献必须与文末所列文献一一对应。文末参考文献的著录格式,每条文献内各项的排序是:

专著—作者.书名[M].出版地:出版者,出版年.页码.

期刊—作者.文章名称[J].刊物名称,出版年,卷(期):页码.

论文集—作者.文章名称[C]//文集名.出版地:出版者,出版年,页码.

译著—作者.(或中译姓名).中译书名.译者.出版地:原著出版者,出版年,页码.

学位论文—作者.题名[D].学位授予地:学位授予单位,发表年,页码.

6. 文稿中引用他人研究成果时,务请按《著作权法》有关规定指明原作者姓名、文题及来源,并在参考文献中列出。否则由此引发的责任由投稿人自负。

7. 凡经本刊录用的文章,除本刊负责出版、发行外,将一律由本刊编辑部统一纳入万方数据—数字化期刊群,科技部西南信息中心资源部,北京京华艺咨询有限公司,进入因特网提供信息服务;并同时参加中国学术期刊(光盘版)的出版发行。不同意者,请另投它刊。

8. 投稿请注明第一作者或联系人的姓名、工作单位、详细通讯地址、邮政编码和联系电话,以及E-mail。

三、编委会有权对来稿作适当修改或退请作者自行修改,来稿请勿一稿两投。收稿后3个月内如未得到采用通知(或修改稿件通知),作者可自行处理。

来稿请发至:E-mail:he3g@eq-he.ac.cn 联系电话:(0311)85814313

联系地址:石家庄市槐中路262号河北省地震局《华北地震科学》编辑部,邮政编码050022