

石云, 刘春平, 廖欣, 唐彦东, 万飞. 2013. 潮汐水位振幅和位相变化研究及其在地下水异常分析中的应用. 地震学报, 35(3): 421-429.  
Shi Yun, Liu Chunping, Liao Xin, Tang Yandong, Wan Fei. 2013. Research of tidal water level amplitude and phase and application to causation analysis of well water level changes. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 421-429.

# 潮汐水位振幅和位相变化研究及其在地下水异常分析中的应用<sup>\*</sup>

石 云 刘春平<sup>\*</sup> 廖 欣 唐彦东 万 飞

(中国河北三河市 065201 防灾科技学院)

**摘要** 将多孔介质中井-含水层-隔水层的潮汐水位振幅和位相的计算公式推广到裂隙饱水岩体潮汐分析中, 分析了裂隙含水层中井与裂隙, 裂隙与微裂隙的潮汐孔压响应原理和水流交换过程, 提取了影响裂隙含水层潮汐水位振幅和位相的主要因素, 应用井-裂隙排水产生的井水位-引潮高的振幅比  $A$  和位相差  $\alpha_2$  主要随径向等效导水系数  $T$  同向变化, 裂隙和微裂隙(孔隙)排水产生的孔压-引潮高的振幅比  $D$  和位相差  $\alpha_1$  主要随不排水条件下微裂隙与裂隙间振幅比  $E'/E$  反向变化的规律, 提出了潮汐井水位振幅和位相的 8 种不同变化类型, 分析了不同类型所反映的含水层形变, 并用于分析东川、弥勒和西昌川 03 等 3 口井井水位振幅和位相变化的成因.

**关键词** 潮汐 位相 振幅 裂隙 含水层

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.03.013 中图分类号: P331 文献标志码: A

## Research of tidal water level amplitude and phase and application to causation analysis of well water level changes

Shi Yun Liu Chunping<sup>\*</sup> Liao Xin Tang Yandong Wan Fei

(Institute of Disaster Prevention, Sanhe City, Hebei Province 065201, China)

**Abstract:** The theory of the amplitude and phase shift of tidal well water-level variation in well-aquifer-aquiclude system (WAAS) is introduced to study hydraulic flow among the well, fractures and micro-fractures (porosity) in the well-fracture-micro-crack fracture (porosity) system (WFMS). While analyzing the tide induced pore pressure and the hydraulic flow process in WFMS, the main factors affecting amplitude and phase shift in WFMS were drawn up. The amplitude ratio  $A$  and phase  $\alpha_2$  of the tide water-level caused by hydraulic flow between the well and fractures vary with the same tendency as equivalent transmissivity ( $T$ ). The amplitude ratio  $D$  and phase  $\alpha_1$  of tidal water-level caused by hydraulic flow between fracture and micro-crack (porosity) vary in opposite

<sup>\*</sup> 基金项目 河北省教育厅科学研究计划项目(Z2009104)、防灾减灾青年科技基金(2010001, 2010003)、科技部地震行业科研专项(200808055, 201208009)和中央高校基本科研业务费专项(ZY20120203)资助.

收稿日期 2012-01-29 收到初稿, 2012-09-14 决定采用修改稿.

<sup>\*</sup> 通讯作者 e-mail: lcp@fzxy.edu.cn

trend with the tidal amplitude ratio ( $E'/E$ ) between fracture and micro-crack under undrained condition. An analysis table on aquifer deformation is listed in this paper according to the changes of well water level, tidal amplitude and phase ratio. And is used to analyze abnormal causes of water level changes in Dongchuan, Mile and Xichangchuan 03 three wells.

**Key words:** tide; phase; amplitude; fracture; aquifer-zone

## 引言

自从发现了井水位的固体潮效应,含水层孔压与应力-应变间的关系受到了研究者的广泛关注. Biot(1962)构建了孔压与介质形变耦合的孔弹性理论; Bredehoeft (1967)分析了井孔水位对岩体骨架固体潮应变的响应与含水层弹性储水系数的关系; Hsieh 等(1987)建立了井-含水层水流交换下,井水位-孔压响应的振幅比和位相差计算公式; 刘春平等(2011a, b)在此基础上进一步推导出了井-含水层间和含水层-隔水层间,井水位-引潮高的振幅比和位相差的计算公式. 这些研究都是基于多孔介质的应力-渗流耦合模型,而地震监测井多数观测的是裂隙含水层. 由于裂隙的不连续性和各向异性,裂隙应变导致的流体压力分布与多孔介质的迥然不同,其潮汐水位变化规律也不相同. 研究裂隙含水层观测井(以下简称裂隙井)潮汐现象的一些基本特征,以及利用其潮汐效应分析地震活动等,都需要借助裂隙井的潮汐响应特征. Hanson 和 Owen (1982)、Burbey(2010)应用潮汐分析理论量化了裂隙特征,但仍是基于多孔介质模型. Bower(1983)提出了单裂隙潮汐应力公式,但没有明确提出裂隙潮汐应力的振幅和位相公式,不便于分析裂隙特征对振幅和位相的影响. 刘春平等(2011c)在 Bower (1983)基础上,提出了单裂隙和多裂隙孔压-引潮高的振幅比和位相差响应公式,并分析了岩体和裂隙弹性参数对振幅比和位相差的影响. 这些研究揭示了裂隙井潮汐水位振幅比和位相差的一些基本特征.

本文考虑裂隙各向异性特征,将多孔介质中井-含水层-隔水层的潮汐水位振幅和位相的计算公式进一步推广到饱水裂隙岩体中,分析裂隙含水层中井与裂隙,裂隙与微裂隙的潮汐孔压响应原理和水流交换过程,提取影响裂隙含水层振幅和位相的主要因素,尝试揭示潮汐水位振幅和位相变化的成因及其所反映的应变状况.

## 1 裂隙岩体中潮汐水位振幅和位相变化

根据多孔介质中井-含水层-隔水层的潮汐水位振幅比  $M$  和位相差  $\alpha$  公式(以下简称  $M_\alpha$  公式)(刘春平等, 2011b):  $M = EAD$ ,  $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2$ . 式中,  $E$  和  $\alpha_0$  分别是不排水条件下含水层潮汐孔压-引潮高的振幅比和位相差. 不排水条件下隔水层潮汐孔压-引潮高的振幅比定义为  $E'$ . 由于  $E' \neq E$ , 潮汐力作用下含水层和隔水层孔压不同而产生垂向排水,  $D$  和  $\alpha_1$  是垂向排水产生的孔压-引潮高的振幅比和位相差,  $A$  和  $\alpha_2$  是井-含水层径向排水产生的孔压-引潮高的振幅比和位相差. 将多孔介质模型中含水层-隔水层排水、井-含水层排水对应裂隙模型中裂隙-微裂隙(孔隙)排水、井-裂隙排水,则裂隙模型中  $M_\alpha$  公式与多孔介质模型相同. 其中,  $D$  和  $\alpha_1$  是裂隙-微裂隙(孔隙)排水产生的振幅比和位相差,  $A$  和  $\alpha_2$  是井-裂隙排水产生的振幅比和位相差. 由于裂隙、微裂隙(孔隙)的交替分布,裂隙岩体水流交换与多孔介质有所不同. 更重要的是,裂隙岩体弹性参数与裂隙的非线性孔弹性形变有

关,随着裂隙岩体的非线性弹性压缩和膨胀,拉梅常数也相应地增加和减小(刘春平等, 2011c). 下面运用这些裂隙岩体特征,进一步分析裂隙岩体的潮汐孔压响应机理和水流交换过程,并简化变量,从而提炼出影响裂隙含水层水位振幅、位相变化的主要因素.

1) 裂隙、微裂隙(孔隙)岩体潮汐孔压响应. 裂隙与微裂隙(孔隙)交替分布,裂隙附近的岩体是微裂隙(孔隙),微裂隙(孔隙)附近的岩体主要是裂隙. 根据单裂隙潮汐应力分析,不排水条件下裂隙的孔压-引潮高振幅比  $E$  与裂隙产状及裂隙附近(即微裂隙(孔隙))岩体的拉梅常数有关(Bower, 1983). 同理,微裂隙(孔隙)孔压-引潮高振幅比  $E'$  与微裂隙产状及微裂隙(孔隙)附近(主要是裂隙)岩体的拉梅常数有关. 应力作用下,裂隙、微裂隙(孔隙)的非线性弹性形变导致岩体拉梅常数变化,  $E$  和  $E'$  也随之变化. 由于微裂隙(孔隙)的非线性弹性形变比裂隙的非线性弹性形变大得多,因此岩体中微裂隙(孔隙)拉梅常数的变化要比裂隙的拉梅常数的变化大得多,即  $E'$  的变化较  $E$  大得多. 所以  $M_\alpha$  公式中,  $E$  可视为常量,  $E'$  视为可变量.

2) 水流交换过程. 在裂隙岩体中,裂隙导水,而微裂隙(孔隙)储水,因此,主要是井-裂隙的水流交换. 径向导水系数  $T$  是指各条裂隙径向的等效导水系数. 同时因产状和岩石力学特征不同,裂隙与微裂隙(孔隙)的潮汐应力和孔压不同,两者间产生水流交换. 如果把裂隙视为含水层,裂隙开度  $2b$  视为含水层厚度  $m$ ,微裂隙(孔隙)视为隔水层,并设  $k_z$  和  $k'_z$  分别是裂隙法线方向上裂隙与微裂隙(孔隙)的渗透系数,  $S$  和  $S'$  分别是裂隙与微裂隙(孔隙)的等效储水系数,则裂隙与微裂隙(孔隙)在裂隙法向上的水流交换,类似于含水层-隔水层之间的水流交换过程,可归入到垂向水流交换中,由  $M_\alpha$  公式中的  $D$  和  $\alpha_1$  项描述.

对于裂隙岩体,在  $M_\alpha$  公式中,  $A$  和  $\alpha_2$  的变化主要受裂隙径向等效导水系数  $T$  的影响,储水系数  $S$  的变化对  $A$  和  $\alpha_2$ ,即  $M$  和  $\alpha_2$  的影响可忽略(Hsieh *et al.*, 1987). 一般静应力作用下岩体形变很小,对含水层厚度的影响可以忽略. 但由于岩体形变主要作用在裂隙上,对裂隙开度  $2b$ ,尤其是裂隙最小过水断面的影响却较大. 例如岩体厚度 1 m,裂隙开度  $2b=2$  mm,压缩为 1.8 mm,岩体形变只有  $2 \times 10^{-4}$ ,但裂隙开度减小 10%,渗透系数至少减小 10%. 因此,应力应变的演化将导致裂隙膨胀或压缩,使  $A$  和  $\alpha_2$  发生变化. 且  $A$  和  $\alpha_2$  随  $T$  是同向变化,即  $A$  和  $\alpha_2$  随  $T$  的增加而增加,随  $T$  的减小而减小(Hsieh *et al.*, 1987; 刘春平等, 2011a).

对于裂隙岩体,在  $M_\alpha$  公式中,  $D$  和  $\alpha_1$  的变化主要受参数  $E'/E$  的影响. 其中,  $E$  主要与裂隙附近岩体(即包含微裂隙(孔隙)的岩体)的 Skempton 系数  $B$  有关,  $E'$  主要与微裂隙(孔隙)附近岩体(即包含裂隙的岩体)的 Skempton 系数  $B'$  有关. 应力作用下,由于裂隙、微裂隙(孔隙)的张开或闭合,裂隙、微裂隙(孔隙)岩体的 Skempton 系数都将发生变化,从而导致  $E$  和  $E'$  的变化. 且  $D$  和  $\alpha_1$  是随  $E'/E$  反向变化,即  $D$  随  $E'/E$  增加而增大,  $\alpha_1$  随  $E'/E$  的增加而减小(刘春平等, 2011b).

## 2 潮汐水位振幅、位相变化型态及成因分析

含水层特征的变化主要受两类因素影响:一类是强排水或强震动导致含水层孔隙(裂隙)疏通,导水性增加,如 Elkhoury 等(2006)研究了地震波作用下井水位振幅变化过程. 由于上游物质的沉积作用,在强排水或震后一段时间内,含水层导水性又将逐渐减小并趋

于稳定,之后潮汐振幅和位相变化仍然由长趋势的区域应力控制.因此,由强排水和地震波引起的导水性变化不能反映地壳应力变化.另一类是地壳应力变化导致含水层孔隙(裂隙)的膨胀或压缩,含水层导水性,甚至弹性力学特征(如 Skempton 系数)发生变化.应力变化包括震源附近地震前后应力的瞬时调整,也包括区域应力应变的长期演化过程.应力的调整和演化必然引起岩体特征变化,并反映在井水位的潮汐振幅和位相的变化上.以下根据不同排水条件下井水位潮汐振幅和位相变化特征,分析含水层的形变状态.

根据上面的分析可知,  $A$  和  $\alpha_2$  主要与  $T$  的变化有关;  $D$  和  $\alpha_1$  主要与  $E'/E$  的变化有关.单纯径向排水情况下,  $A$  和  $\alpha_2$ , 即  $M$  和  $\alpha$  随  $T$  同步增减.单纯垂向排水情况下,  $D$  和  $\alpha_1$ , 即  $M$  和  $\alpha$  随  $E'/E$  成反向变化, 即  $E'/E$  增加,  $M$  增加、 $\alpha$  减少;  $E'/E$  减小,  $M$  减小、 $\alpha$  增加.由径向或垂向排水产生的振幅和位相变化,是振幅和位相变化的两种基本形态.实际潮汐井水位的振幅和位相变化可能是单一排水,或两种排水共同作用综合产生的.表 1 列出了振幅和位相的两种基本变化类型,以及它们组合形成的 4 种变化特征.根据振幅和位相的变化类型,尝试分析变化成因,以及变化所反映的裂隙含水层(以下简称含水层)形变特征.其中,第 1, 2 种是径向排水为主,分别表现为振幅、位相同步增加或减少,反映  $T$  增加或减少,含水层膨胀或压缩;第 3, 4 种类型是垂向排水为主,这种类型的振幅、位相变化不能直接确定含水层是否压缩或膨胀,但可根据特定时段内水位变化,如震后水位随应力调整发生趋势性的上升或下降,对应该时段振幅和位相的变化趋势,可判断该井含水层压缩或膨胀;第 5—8 种类型都是两种排水综合作用下的表现,如第 5 种类型,位相波动、振幅增加,只可能是  $T$  增加,含水层膨胀情况下的排水产生的,其它几种含水层的形变也可类推.

表 1 潮汐井水位振幅和位相的变化形态、成因及所反映的裂隙含水层形变

Table 1 Changes of phase shift and amplitude of tide water-level, causes and deformation of aquifer-zone

序号	振幅与位相变化类型	振幅、位相变化成因和含水层形变
1	同步增加	径向排水为主, 含水层裂隙导水系数增加, 含水层膨胀
2	同步减小	径向排水为主, 含水层裂隙导水系数减小, 含水层压缩
3	振幅增加、位相减小	垂向排水为主. 不能直接确定含水层形变, 但可根据特定时段水位升降与振幅或位相关系, 判断振幅或位相变化与裂隙含水层应变关系
4	振幅减小、位相增加	
5	振幅增加、位相波动	径向排水导致位相、振幅同步增加, 垂向排水导致振幅增加、位相减小. 综合起来, 位相波动、振幅持续增加, 含水层膨胀
6	振幅减小、位相波动	径向排水导致位相、振幅同步减小, 垂向排水导致振幅减小、位相增加. 综合起来, 位相波动、振幅持续减小, 含水层压缩
7	振幅波动, 位相增加	径向排水导致位相、振幅增加, 垂向排水导致振幅减小、位相增加. 综合起来, 振幅波动、位相持续增加, 含水层膨胀
8	振幅波动, 位相减小	径向排水导致位相、振幅减小, 垂向排水导致振幅增加、位相减小. 综合起来, 振幅波动、位相持续减小, 含水层压缩

3 潮汐水位振幅和位相变化解译及其在地下水异常分析中的应用

由于潮汐  $M_2$  波水位的分离精度较高,  $M_2$  波水位振幅和位相的变化能够较好地反映裂隙受岩石力学、水动力学参数的影响.因此,本文将井水位实测数据整理成以 1 小时为时间间隔的时间序列数据,逐月计算潮汐  $M_2$  波井水位振幅和位相.分别以东川、弥勒和西昌川 03 井为例,分析 3 种典型的潮汐水位振幅、位相变化曲线随时间的变化,以及位

相、振幅变化与区域应力变化的关系。

### 3.1 东川井

东川井位于小江断裂新村盆地内, 井深 605.96 m. 其表层 0—95.59 m 为第四系冲洪积、冰碛块石层, 富水性中等, 与表层耕植土、含碎石砂土一起构成潜水含水层; 95.59—491.16 m 为冲洪积、湖积层, 含水性较弱, 为相对隔水层; 491.16—600.87 m 为玄武岩基岩破碎层, 裂隙发育, 透水性较好; 600.87—605.96 m 为灰岩, 含水性中等偏强. 其中观测含水层位于 557.42—600.16 m 深度, 与上覆岩层间水力联系较弱.

图 1 是东川井静水位、 $M_2$  波潮汐水位振幅和位相变化曲线. 该井水位呈年变上升趋势, 振幅和位相基本同步变化, 反映了该井含水层以径向排水为主.

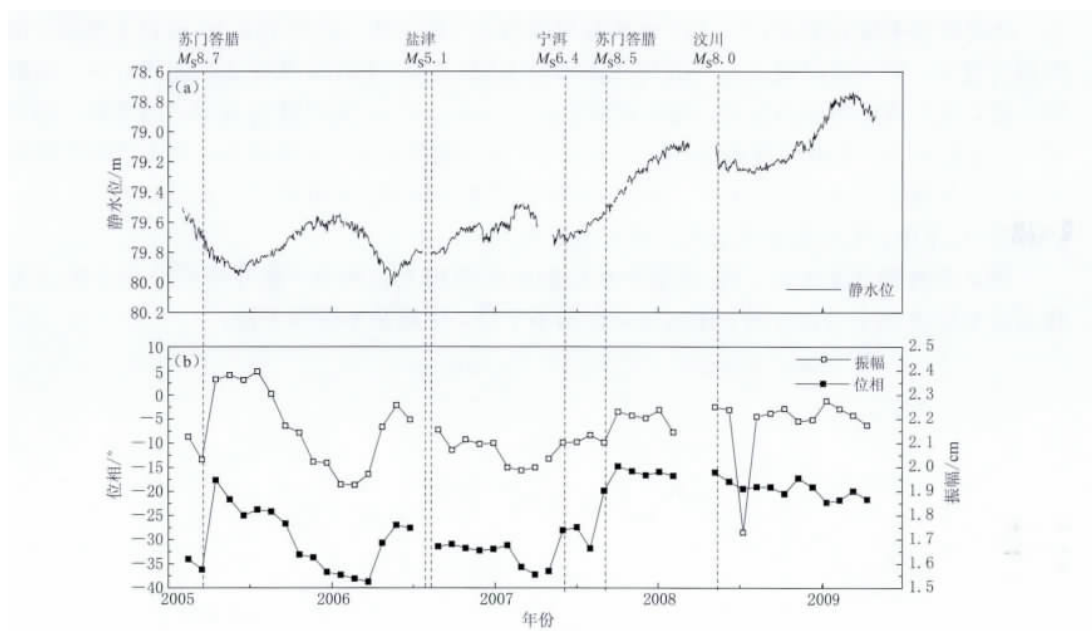


图 1 东川井静水位(a)、 $M_2$  波潮汐水位振幅和位相(b)变化曲线

Fig. 1 Change of static water-level (a), amplitude and phase shift for  $M_2$  tide (b) in Dongchuan well

2005 年苏门答腊  $M_s 8.7$  地震 3 个月后, 该井水位逐渐上升, 振幅和位相同步持续减小, 含水层呈以径向排水为主的压缩状态. 在 2006 年 2—4 月, 振幅和位相都发生了明显趋势性的改变, 但该时段其周边并未有相应地震事件发生. 若认为含水层振幅和位相的变化只与地震波扰动导致的含水层导水性变化有关, 显然无法解释这一变化. 推测可能该时期区域应力有所调整, 导致了含水层呈现出压缩—膨胀的变化过程. 但此次区域应力调整是否有后续的地震事件, 具体与哪次地震事件相关, 还有待进一步分析研究.

2006 年 7—8 月盐津发生两次  $M_s 5.1$  地震, 震后 2 个月内, 该井水位失去往年上升趋势, 转而维持在一定水位, 振幅和位相较震前有所下降. 此时段的变化可能是受地震波扰动和区域应力调整影响, 含水层出现了短时间的堵塞. 之后, 水位回复上升趋势, 振幅和位相先逐渐平稳, 后同步下降, 反映一方面导水性在逐渐恢复, 另一方面含水层仍处于受压状态, 两者综合作用下, 含水层总体呈压缩的状态.

2007 年 6 月发生宁洱  $M_s 6.4$  地震, 9 月发生苏门答腊  $M_s 8.7$  地震. 地震期间, 该井振

幅和位相都有所增加,反映了受地震波疏通影响,含水层导水性有明显增加.但10月份后,水位仍旧不断上升,振幅和位相趋于平稳.这段时间可能是震后疏通含水层造成振幅和位相增加,以及含水层压缩导致振幅和位相减小,两者综合作用导致了振幅和位相趋于平稳,含水层应处于压缩状态.水位的持续大幅上升可能受当年降雨量偏多影响.

2008年5月汶川 $M_s8.0$ 地震以后,该井水位波动中持续上升,振幅和位相则波动中逐渐下降,反映了含水层一直处于压缩状态.

综上所述,东川井自2005—2009年4月间,含水层基本处于压缩状态.

### 3.2 弥勒井

弥勒井位于弥勒—师宗断裂,井深614.4 m.其表层0—5 m为第四系覆盖层,由耕植土、冲湖积层夹碎石组成;5—140 m为厚层状灰岩、白云岩,其中102.16 m以上裂隙、溶洞极为发育,它与表层覆盖层一起构成潜水含水层;140—190 m为页岩、泥质砂岩、粉砂岩3层,偶夹薄层泥质白云岩,为相对隔水层;190—240 m为层状白云岩,偶夹粉、细砂岩,富水性较强,是承压含水层;240—614.40 m为泥质页岩、含钙页岩,泥质及钙质粉砂岩、砂岩和薄层泥质灰岩、灰岩、白云岩互层,富水性较弱.其中观测含水层位于355.04—603.58 m深度,与上覆含水层有一定水力联系.

图2是弥勒井动水位、 $M_2$ 波潮汐水位振幅和位相变化曲线.该井所反映出来的主要特征是水位波动中总体上升,振幅波动但基本平稳,位相基本持续下降.

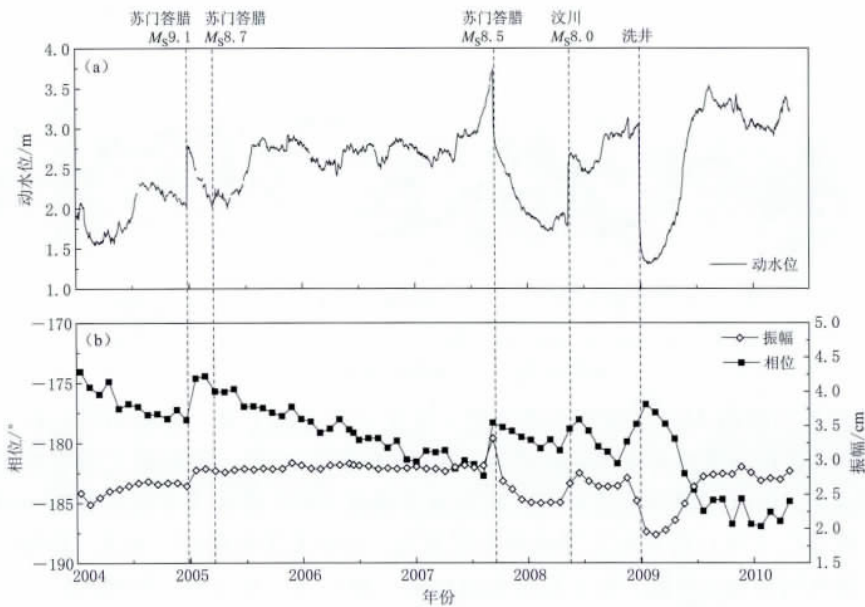


图2 弥勒井动水位(a)、 $M_2$ 波潮汐水位振幅和位相(b)变化曲线

Fig. 2 Change of water-level (a), amplitude and phase shift for  $M_2$  tide (b) in Mile well

2004年12月苏门答腊 $M_s9.1$ 地震前10个月,该井水位总体波动上升,振幅波动增大后逐渐平稳,位相持续减小,反映了含水层以垂向排水(振幅增加、位相减小)为主,径向排水(振幅减小、位相减小)为辅,含水层应处于区域应力控制的压缩状态.2004年12月—2005年3月,水位、振幅和位相都出现了突增后的逐渐下降,3个月后(2005年6月),

水位逐渐恢复到震前水平,振幅稳定,位相基本持续下降.表明受两次苏门答腊地震影响,含水层的导水性因地震波的扰动有明显“增大—减小—稳定”的变化,且振幅和位相的同步变化反映当时段排水主要以径向为主,之后水位波动上升,振幅持续下降,反映了含水层又恢复到压缩状态.

2007年9月苏门答腊  $M_s8.7$  地震前2个月,该井水位急剧上升,振幅基本平稳,位相持续下降,含水层不断压缩;震后水位大幅持续下降(近0.7 m),振幅阶梯性下降,位相同步减小,3个月后水位仍旧持续下降后保持在较低水位,振幅逐渐平稳,且保持在较小值没有恢复.含水层的水位与振幅的大幅异常变化,推测可能是地震波扰动引起井周边含水层堵塞造成的,这种状态一直持续到2008年5月汶川  $M_s8.0$  地震.此后受地震波疏通影响,含水层的导水性有所增加,水位和振幅都有所上升,但仍低于2005—2007年水平,推测疏通后的含水层导水性仍比2007年苏门答腊地震前要小.在2008年12月进行洗井,受其影响,水位、振幅和位相出现了大幅变化.2009年7月后,水位逐渐稳定在高水位波动,振幅趋于平稳并与汶川地震后水平基本一致,位相则大幅下降后逐渐稳定,反映了含水层的导水性基本恢复到汶川地震后的水平,区域应力比较稳定.

综上所述,在2004年12月苏门答腊  $M_s9.1$  地震,2007年9月苏门答腊  $M_s8.7$  地震,以及2008年5月汶川  $M_s8.0$  地震期间,受地震波扰动影响,震后几个月,弥勒井的含水层导水性有明显变化,该时段排水主要以径向为主.在地震相隔的其它时段,水位基本呈现波动性上升、振幅变化较小、位相持续下降的现象,反映了该时段含水层主要处于垂向排水为主的压缩状态.

### 3.3 西昌川03井

西昌川03井位于安宁河断裂带中段,井深765 m.其表层0—17.71 m为第四系石英正长岩礅冰层;17.71—39.95 m是第三系粉砂质、粘土质页岩;39.95—100.02 m是第三系松散砾石层;100.02—765 m是辉长岩、磁铁矿,裂隙发育,含水性较强.其中观测含水层位于105—765 m深度,与上覆岩层有较弱的水力联系.

图3是西昌川03井静水位、 $M_2$ 波潮汐水位振幅和位相变化曲线.该井所反映出来的主要特征是水位波动变化,振幅波动但变化较平稳,位相波动且趋势性上升.

2001年11月发生昆仑山  $M_s8.1$  地震,震前12个月开始,该井水位较去年略有上升,潮汐振幅和位相由稳定转而出现波动,且趋势性略有减小.震前2个月,水位出现大幅上升后逐渐下降,振幅和位相则由降转升,反映这段时间含水层出现了压缩—膨胀的变化,之后发生昆仑山地震.震后,水位始终在较高值波动,振幅平稳,位相则趋势性增加,表明震后含水层处于径向(振幅增加、位相增加)和垂向(振幅减小、位相增加)共同作用下的膨胀状态.

振幅平稳而位相持续增加的趋势一直延续到2003年6—7月西昌两次发生  $M_L4.8$  地震之前.西昌两次地震后,该井水位波动下降,振幅仍然平稳,但位相在短期增加后逐渐减小且平稳.反映含水层的导水性在地震波作用下短时间增大,但几个月后又逐渐减小并稳定,含水层则由震前的膨胀转为压缩并逐渐趋于稳定状态.2004年12月和2005年3月两次苏门答腊地震,振幅依然稳定,位相略有上升(含水层疏通)后迅速稳定,这种状态一直延续到2007年9月.表明该时段含水层应变稳定,水位变化主要是水量补排不平衡所致.

2007年9月苏门答腊  $M_s8.5$  地震以后,该井水位波动下降,振幅波动,位相阶梯性增



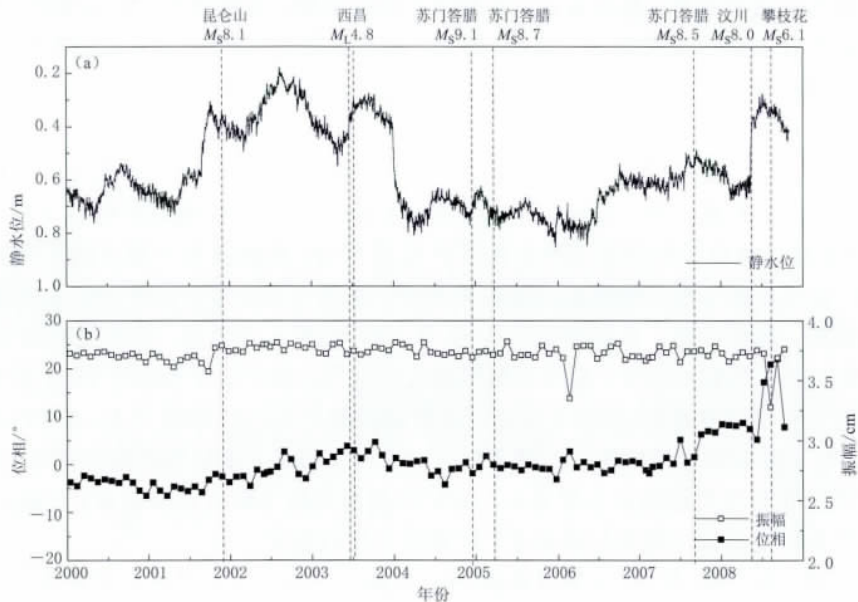


图3 西昌川03井静水位(a)、 $M_2$ 波潮汐水位振幅和位相(b)变化曲线

Fig 3 Change of static water-level (a), amplitude and phase shift for  $M_2$  tide (b) in Xichangchuan 03 well

加后趋于稳定,反映了含水层受地震波和区域应力影响,其导水性有一定程度增加但一直未恢复,含水层应处于膨胀稳定状态。

2008年5月发生汶川地震,震后该井水位急升,振幅波动,位相减小后大幅增加,在最高值时发生攀枝花地震。这段时间因地震波震荡加上区域应力释放,含水层导水性大幅增加,且含水层持续膨胀。

综合上述分析,西昌川03井含水层自2001年8月—2003年6—7月两次西昌地震前,位相持续增加,含水层处于持续膨胀状态;西昌地震后,含水层形变逐渐趋于稳定。2007年9月苏门答腊地震后,含水层转为膨胀。2008年5月汶川 $M_S8.0$ 地震后,含水层膨胀进一步加剧,随后发生了攀枝花 $M_S6.1$ 地震。

#### 4 讨论与结论

本文将多孔介质中井-含水层-隔水层水流交换所产生的潮汐水位-引潮高的振幅和位相理论,进一步推广到裂隙岩体中,分析了影响裂隙含水层振幅和位相的主要因素,提出了井-裂隙间径向排水产生的孔压-引潮高的振幅比 $A$ 和位相差 $\alpha_2$ ,主要与径向等效导水系数 $T$ 的变化有关;裂隙与微裂隙(孔隙)间的垂向排水产生的孔压-引潮高的振幅比 $D$ 和位相差 $\alpha_1$ ,主要与不排水条件下微裂隙与裂隙间振幅比 $E'/E$ 的变化有关。在此基础上,构建了单一排水或两种排水共同作用下,振幅和位相的8种不同变化类型,分析了振幅和位相的变化特点,以及所反映的含水层形变特征。将该方法用于分析东川、弥勒和西昌川03等3口井井水位潮汐振幅和位相异常变化的成因。结果表明,东川井2005—2009年4月间含水层基本处于压缩状态。弥勒井2004—2010年间,含水层除受大震(2004年12月苏门答腊 $M_S9.1$ 地震,2007年9月苏门答腊 $M_S8.7$ 地震,2008年5月汶川 $M_S8.0$ 地震)的影响,含水



层导水性发生变化, 其它时段含水层则主要处于垂向排水为主的压缩状态. 西昌川 03 井含水层 2000—2008 年间, 自 2001 年 8 月—2003 年 6—7 月两次西昌地震前, 含水层处于持续膨胀状态, 其它时段, 含水层形变较稳定. 但在 2007 年 9 月苏门答腊地震后, 该井含水层转为膨胀, 2008 年 5 月汶川  $M_s 8.0$  地震后, 含水层膨胀进一步加剧, 随后发生了攀枝花  $M_s 6.1$  地震.

该方法利用井水位数据能较好地提取含水层所在区域形变状态的信息, 及时反映区域变形随时间的调整情况, 为进一步分析地下流体隐含的地震前兆信息奠定了基础. 该方法主要用于分析固体潮效应较好的井, 分析的可靠性一定程度上取决于潮汐分析精度大小. 水位、振幅和位相变化的定性判断需要一定的经验. 关于水位、振幅和位相变化的定量判断指标有待进行更深入探讨.

### 参 考 文 献

- 刘春平, 唐彦东, 廖欣, 万飞, 石云. 2011a. 线弹性含水层井水位、孔压对引潮位响应的研究及其应用[J]. 地震地质, **33**(1): 133—140.
- 刘春平, 唐彦东, 廖欣. 2011b. 垂向和径向排水的潮汐水位振幅和位相变化研究[J]. 地震, **31**(4): 68—76.
- 刘春平, 石云, 万飞. 2011c. 不排水条件下裂隙流体压力对引潮高的振幅比和位相差的响应[J]. 中国地震, **27**(3): 300—308.
- Biot M A. 1962. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media[J]. *J Appl Phys*, **33**(4): 1482—1498.
- Bower D R. 1983. Bedrock fracture parameters from the interpretation of well tides [J]. *J Geophys Res*, **88**(B6): 5025—5035.
- Bredehoeft J D. 1967. Response of well-aquifer systems to earth tides[J]. *J Geophys Res*, **72**(12): 3075—3087.
- Burbey T J. 2010. Fracture characterization using earth tide analysis[J]. *J Hydrol*, **380**(3—4): 237—246.
- Elkhoury J E, Brodsky E E, Agnew D C. 2006. Seismic waves increase permeability[J]. *Nature*, **441**(7097): 1135—1138.
- Hanson J M, Owen L B. 1982. Fracture orientation analysis by the solid earth tidal strain method[C]// *The 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. Louisiana: New Orleans; 26—29.
- Hsieh P A, Bredehoeft J D, Farr J M. 1987. Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis[J]. *Water Resour Res*, **23**(10): 1824—1832.

## 作者简介



姚 丽 中国地震台网中心副研究员。2005 年中国科学技术大学地球物理专业毕业，获理学硕士学位；2009 年中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气专业毕业，获博士学位。现从事地磁与空间物理研究工作。



石 云 防灾科技学院讲师，湖南师范大学水文水资源专业在读博士研究生。2004 年湖南科技大学地理科学专业毕业，获理学学士学位；2008 年湖南师范大学自然地理专业毕业，获理学硕士学位。2010 至今主要从事地震地下流体研究。



周洪娟 哈尔滨工业大学（威海）讲师，哈尔滨工业大学信号与信息处理专业的在读博士研究生。2005 年天津大学通信与信息系统专业毕业，获硕士学位。曾从事雷达信号预处理等方面的研究。现主要从事

舒曼谐振观测分析与地震电磁信号处理等方面的研究。



李孝波 中国地震局工程力学研究所在读博士研究生。2008 年中国地质大学（北京）土木工程专业毕业，获工学学士学位；2009 年进入中国地震局工程力学研究所攻读岩土工程专业硕士学位，2011 年获得直接攻读岩土工程专业博士学位资格。主要从事岩

土工程抗震和场地地震反应方面的研究工作。



孙小龙 中国地震局地壳应力研究所助理研究员，中国地质大学（北京）在读博士研究生，2007 年中国地震局兰州地震研究所构造地质学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事地震与地下水相互关系的研究。

现从事地震地下流体动力学与地震监测预报研究工作。



蔡 寅 山东省地震局工程师。2007 年大连理工大学软件工程专业毕业，获工程硕士学位。曾从事地震信息化软件开发研究工作。现从事强震动数据分析、地震烈度速报及强震预警研究工作。地球物理

学会会员。

注：池顺良、孟令媛的简介分别见本刊：Vol. 14, No. 1；Vol. 33, No. 5.