

# 永安井水位潮汐变化在闽台地区中强地震前兆特征中的分析研究\*

秦双龙, 廖丽霞, 陈莹, 刘水莲, 王青平

(福建省地震局, 福建 福州 350003)

**摘要:** 采用 2003 ~ 2011 年永安井的水位资料, 利用 Venedikov 调和分析方法进行潮汐变化计算, 从中挑选出对固体潮影响比较大的  $M_2$  波潮汐振幅比和潮汐相位差, 结合同期福建地区发生的多次 4 级以上中强地震和台湾地区发生的 7 级以上强震进行分析, 发现多次地震震前该井的这两个潮汐参数异常变化明显, 分析认为这可能与永安井所处的地质构造特征有关。

**关键词:** 调和分析; 潮汐振幅比; 潮汐相位差; 水位异常

**中图分类号:** P315.723

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2013)03-0275-06

## 0 引言

固体潮汐是地球固体部分在太阳和月亮引潮力作用下产生的内部应力或应变(张昭栋, 1988), 对水位固体潮资料做调和分析计算, 是提取地震信息、预报地震的方法之一。当地震孕育到一定阶段后, 孕震区的微裂孔隙便出现扩展串通, 介质性质发生变化, 地球对潮汐力的响应也会发生变化。通过计算和分析固体潮汐的变化, 可以获取一定的地震前兆信息, 达到一定的地震预测预报目的。自 1879 年 Klonne 在捷克的达乔尔特(Duchort)地区发现固体潮汐现象后(Klonne, 1880), 潮汐效应成为国内外一些地震学家关注的热点问题。Hsieh 等(1987)根据加利福尼亚帕克菲尔德地区附近的水井水位资料, 推导出井水位潮汐效应的振幅比和相位差解析式, 认为可以利用水位潮汐振幅比和相位差表达含水层的渗透系数和储水系数; Erskine(1991)指出潮汐会通过含水层透水特性影响地下水位; 张昭栋等(1991)首次介绍了地下水潮汐的理论基础, 并将结果运用于地震预报中; 唐九安等(1993)计算了 1986 ~ 1991 年甘 06 井的潮汐

参数, 分析该井水位和潮汐参数在共和、景泰地震前的中期异常, 结果表明, 该井自 1989 年起的潮汐因子有明显增大的趋势。

本文对永安井水位资料采用 Venedikov 调和分析方法进行潮汐变化的计算, 从中挑选出对固体潮影响比较大的  $M_2$  波潮汐振幅比和潮汐相位差两个潮汐参数, 结合同期福建地区发生的多次 4 级以上中强地震和台湾地区发生的 7 级以上强震进行分析, 探寻这两个潮汐参数在这一系列地震前后的成因与变化规律。

## 1 永安井地质构造特征与水位资料分析

永安水位观测井是我国东南沿海最深的地震地下水动态观测井, 井深 1 000.44 m。观测井孔位于华南断块区内 NNE 向以压性为主的政和一海丰断裂带和 NW 向以张扭性为主的永安—晋江断裂带交汇处附近(图 1), 观测井的地质观测岩层为火山岩裂隙承压汇合水, 封闭条件较好。5.2 ~ 400 m 是第三系—白垩系上统赤石群, 岩性为紫红色砂岩; 400 ~ 1000 m 是侏罗系上统南园组, 岩性为凝灰岩层。含

\* 收稿日期: 2012-06-13.

**基金项目:** 福建省地震局 2012 年震情跟踪合同制定向工作任务资助(JF2012021)及中国地震局 2013 年度震情跟踪合同定向任务(2013020309)联合资助。

水层分布在70~552 m,为混合承压水。永安井水位动态比较稳定,年变幅都在1 m左右,可清晰地记录到固体潮、气压、地震波等地壳应力—应变信息,属于福建省A类地震观测水井。

永安井水位动态观测始于1982年,在1982年1月至1985年2月采用红旗-1型水位计记录,1985年3月至今采用SW40-1型水位计记录,自

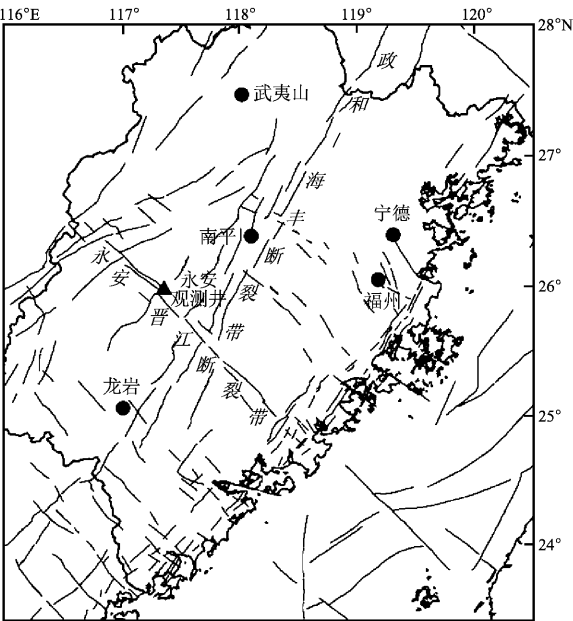


图1 永安水位观测井所处地质构造图  
Fig. 1 Geological structure of water level observation in Yong'an Well

1988年11月开始,受附近塑料厂抽水影响,地下水位动态受到严重干扰。2001年8月塑料厂破产停止抽水,2001年9月~2002年12月地下水动态逐渐稳定;2003年开始,年变化趋势基本稳定,年变规律恢复,呈夏高冬低的年变化特征(图2),目前干扰源主要是每年雨季大范围长时间降雨和上游安砂水库泄洪及西门电站放水影响(黄跃进等,2007)(表1)。在2011年永安井水位与以往相比比较低,通过降雨量分析对比,认为是受到年降雨量小的影响(表2),但该井水位的年变形态没有因降雨量小而改变。

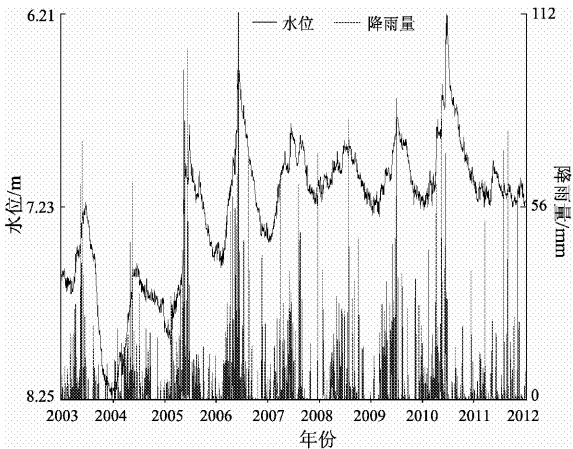


图2 2003~2011年永安井水位与降雨变化分析  
Fig. 2 Analysis of water level in Yong'an Well varying with rainfall from 2003 to 2011

表1 永安井水位受上游泄洪影响列表  
Tab. 1 List of water level effected by upper stream flood discharge in Yong'an Well

序号	井孔名称	开始时间/年-月-日	结束时间/年-月-日	水位动态变化/mm	干扰异常原因
1	永安冷冻厂井	2005-05-12	2005-05-16	水位值上升417	暴雨,上游安砂水库、西门电站泄洪
2	永安冷冻厂井	2005-05-19	2005-05-20	水位值上升291	暴雨,上游安砂水库、西门电站泄洪
3	永安冷冻厂井	2005-05-22	2005-05-24	水位值上升266	暴雨,上游安砂水库、西门电站泄洪
4	永安冷冻厂井	2006-05-17	2006-05-17	水位值上升313	安砂水库放水泄洪
5	永安冷冻厂井	2008-06-28	2008-06-28	水位值上升185	上游西门电站放水
6	永安冷冻厂井	2009-07-03	2009-07-03	水位值上升306	西门电站放水
7	永安冷冻厂井	2010-06-14	2010-06-15	水位值抬升521	暴雨,上游安砂水库泄洪

表2 2003~2011年永安地区年降雨量统计  
Tab. 2 Annual rainfall statistics in Yong'an area from 2003 to 2011

时间/年	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
年降雨量总和/mm	816.5	899.1	1388.5	1649.5	1288.2	1127.8	1251.7	1397.1	890.3

2 井水位潮汐分析方法与资料预处理

2.1 井水位潮汐分析方法

深井水位的潮汐变化主要是由地壳的体应变固体潮引起的（张昭栋等，1986）。在地下水位资料处理中，利用水位变化值研究地震孕震过程中含水层的应力—应变变化时，往往采用 Venedikov 调和分析方法。Venedikov 调和分析方法是把日波、半日波群分开，分离出不同的日波波群和半日波波群，然后利用最小二乘法分别求出它们的振幅比和相位差以及每个潮汐波计算结果的均方差和总的均方差。振幅比  $\delta$  和  $\Delta\varphi$  相位差表达式分别为

$$\delta = \left| \frac{h_0}{H_0} \right| = (E^2 + F^2)^{-1/2}, \tag{1}$$

$$\Delta\varphi = \arg \frac{h_0}{H_0} = -\tan^{-1} \frac{F}{E}. \tag{2}$$

其中,  $h_0$  和  $H_0$  分别表示井水位和含水层潮汐分波的振幅值;  $E \approx 1 - \omega r_c^2 Kei(\alpha)/2T$ ,  $F \approx \omega r_c^2 Ker(\alpha)/2T$ ,  $\alpha = r_\omega \sqrt{(\omega S/T)}$ ,  $Kei$  和  $Ker$  分别为开尔文函数的实部和虚部,  $r_c$  和  $r_\omega$  分别表示井孔套管半径和含水层处的井孔半径,  $S$  和  $T$  分别表示含水层的储水系数和导水系数。

潮汐振幅比是指实际观测潮汐振幅与理论潮汐振幅比, 相位差是指实际潮汐相位与理论潮汐相位之差, 它们主要体现了含水层贮水系数与导

水系数等参数的变化特征, 包含着丰富的地震孕震信息（国家地震局, 1996）。

2.2 观测资料预处理与计算

在进行潮汐观测资料分析前, 对观测资料进行适当的预处理是非常必要的。在计算中对受到长期环境干扰的部分资料进行剔除（2003 年以前的水位资料）; 对主要是由仪器或者降雨及上游水库泄洪引起观测资料短时间阶变和脉冲进行人工修整; 对由于仪器等问题引起的缺数问题, 采用 MATLAB 提供的 3 次样条内插方法进行内插处理, 以此来提高计算的精度; 同时为了消除地球固体潮日波和半日波等周期成分的影响, 先对水位和相应时段的气压整点值观测资料进行三点滑动滤波, 然后对这个月的水位和气压数据资料进行拟合, 求得气压系数  $B_p$ , 从而得到消除气压影响后的水位

$$H_\theta(t) = H(t) - B_p * P(t). \tag{3}$$

式中,  $H_\theta(t)$  为消除气压后的水位数据,  $H(t)$  为滤波后的水位数据,  $P(t)$  为滤波后的气压数据。

为了计算永安井水位的潮汐变化, 在采用 Venedikov 调和分析方法进行潮汐变化计算时, 把资料按每个月分开, 计算每个月水位的潮汐变化。在计算中, 我们发现潮汐因子受干扰因素较多, 为了排除一定的干扰, 清晰地突出潮汐变化特征, 进一步对结果进行 db4 小波分析处理。同时结合 2003 ~ 2011 年福建地区发生的 4 级以上的中强地震和台湾地区 7 级以上强震进行分析。

表 3 2003 ~ 2011 年福建 4 级以上中强震和台湾 7 级以上强震目录

Tab. 3 Catalog of  $M \geq 4$  moderate strong earthquakes in Fujian and  $M \geq 7$  strong earthquakes in Taiwan from 2003 to 2011

编号	发震时间 年 - 月 - 日	震级	$\varphi_N$ /( $^\circ$ )	$\lambda_E$ /( $^\circ$ )	地点	震井距 /km
1	2003 - 12 - 10	$M_S 7.0$	23.08	121.21	台湾台东东北近海	499.6
2	2006 - 12 - 26	$M_S 7.2$	21.90	120.60	台湾南部海域	553.1
3	2007 - 03 - 13	$M_L 4.9$	26.72	117.73	福建顺昌	87.9
4	2007 - 06 - 12	$M_L 4.0$	24.93	117.62	福建华安	118.9
5	2007 - 08 - 29	$M_L 4.6$	25.48	117.77	福建永春	69.1
6	2008 - 03 - 06	$M_L 4.8$	26.37	118.67	福建古田	136.0
7	2008 - 07 - 05	$M_L 4.7$	24.60	117.83	福建长泰	159.3
8	2009 - 03 - 23	$M_L 4.3$	25.42	119.90	福建平潭	259.7

3 潮汐变化结果分析

3.1 井水位  $M_2$  波潮汐振幅比和相位差分析

计算结果显示,井水位  $M_2$  波潮汐振幅比最大值出现在 2011 年 7 月,为 3.353,最小值出现在 2007 年 7 月,为 3.053,平均值为 3.228;  $M_2$  波潮汐相位差最大值出现在 2003 年 7 月,为  $8.06^\circ$ ,最小值出现在 2007 年 8 月,为  $-0.36^\circ$ ,平均值为  $3.87^\circ$ 。

由表 3 和图 3 可见,在 2003 ~ 2011 年间,在永安井水位  $M_2$  波潮汐振幅比处于低值异常期间发生了华安 4.0 级、永春 4.6 级地震,在  $M_2$  波潮汐相位差低值异常期间发生了华安 4.0 级、永春 4.6 级、古田 4.8 级地震;同时台东 7.0 级、台南 7.2 级地震都是发生在井水位  $M_2$  波潮汐相位差高值向低值转折期间,只是台东 7.0 级地震比台南 7.2 级地震高值异常更明显,这可能与震中所在的地质构造特征有关。自 2006 年 12 月台南 7.2 级地震发生后,井水位  $M_2$  波潮汐相位差开始明显由高值异常转折,在下降过程发生顺昌 4.9 级地震、华安 4.0 级、永春 4.6 级,然后开始调整恢复,在恢复阶段发生了古田 4.8 级、长泰 4.7 级地震。自 2008 年以后,  $M_2$  波潮汐振幅比总体由低值转为高值状态,认为可能是永安井所处的含水层渗透性质发生了变化。

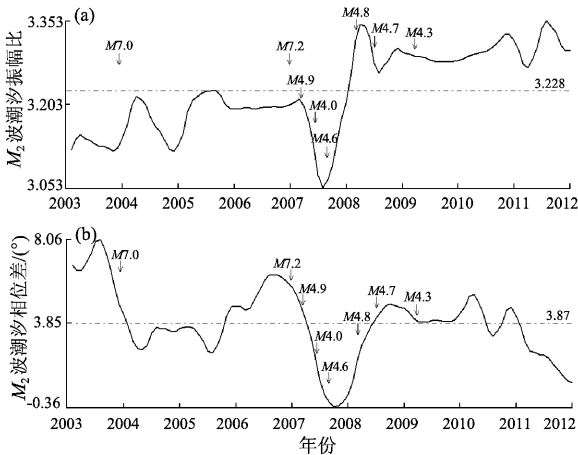


图 3 2003 ~ 2011 永安井水位  $M_2$  波潮汐变化  
(a) 振幅比; (b) 相位差

Fig. 3  $M_2$  wave tide variation of water level  
in Yong'an Well from 2003 to 2011  
(a) amplitude ratio; (b) phase difference

同时我们发现永安井水位  $M_2$  波潮汐相位差自 2011 年进入低值异常阶段,而 2011 年永安水位观测井周围并没有受到环境干扰。但在该年永安地区的降雨量与前几年相比较小,由于在计算中无法排除降雨的干扰,所以分析  $M_2$  波潮汐相位差与降雨量的关系是必要的。

3.2 井水位  $M_2$  波潮汐相位差与降雨量关系分析

通过对 2003 ~ 2011 年永安井井水位资料的  $M_2$  波潮汐相位差年平均值与年降雨量统计分析 (图 4),发现  $M_2$  波潮汐相位差年平均值与年降雨量有较好的正相关性,即随着年降雨量的增大,  $M_2$  波潮汐相位差年平均值也增大,所以认为 2011 年永安井水位  $M_2$  波潮汐相位差整体处于低值异常,可能是由年降雨量小所引起的。同时经过对比分析,2003、2004、2011 年年降雨量相差不大 (表 2),但 2003 年永安井水位  $M_2$  波潮汐相位差明显比 2004、2011 年高出很多 (图 3); 2007 与 2008 年年降雨量相差不大 (表 2),但 2007 比 2008 年低出很多 (图 3),更加验证了异常的可靠性。

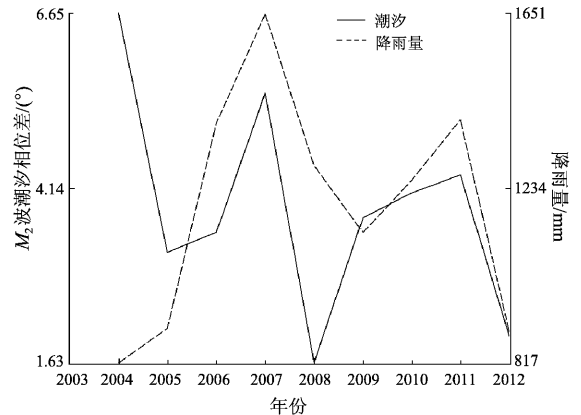


图 4 永安井水位  $M_2$  波潮汐相位差年平均值  
与年降雨量分析

Fig. 4 Analysis of annual average value of  $M_2$   
wave tide phase difference of water level and  
annual rainfall in Yong'an Well

4 前兆模式解释与震例分析总结

扩容—扩散 (DD) 模式认为,当岩石中积累的应力大到一定程度时,岩石的变形将由弹性阶段转入塑性阶段,岩石中逐渐产生微裂隙而使其体积膨胀 (扩容),扩容到一定程度时扩容区外围

的水将渗入扩容区内（扩散渗透），使其中的孔隙压力迅速增大并导致破裂发震（车用太等，2005）。从永安井水位潮汐变化分析中， $M_2$ 波潮汐相位差能更好地验证这一物理过程。在台东7.0级地震发生前后， $M_2$ 波潮汐相位差的变化过程为上升—下降—恢复，在下降过程中发震；台南7.2级地震前后， $M_2$ 波潮汐相位差的变化过程也是如此，只是台南7.2级地震发生后， $M_2$ 波潮汐相位差变化程度比台东7.0级地震大，可能引起了福建地区震源应力场的变化，从而触发福建地区一系列中强地震的发生。由于福建地区地震的发生受台湾地区应力调整控制程度比较大，台湾强震对福建影响比较大（傅再扬等，2008），这可能为我们以后对福建地区地震预报提供一个思路。

根据永安井水位波的潮汐振幅比和潮汐相位差对应台湾7级以上强震、福建4级以上中强地震的统计事实，充分体现利用井水位的 $M_2$ 波潮汐振幅比和潮汐相位差这两个潮汐变化物理参数对于地震短临预报具有一定的价值和前景。比较而言， $M_2$ 波潮汐相位差这一物理量与地震的对应关系比 $M_2$ 波潮汐振幅比更好，同时发现异常幅度与地震震级大小无明确关系，但有一明显的事实，当异常幅度较大而且是成簇出现时，能较好对应地震。通过该井水位求得的 $M_2$ 波潮汐振幅比和潮汐相位差比较好的应台湾7级以上强震和福建4级以上中强地震的关系以及井水位波振幅比和相位差的物理本质来看，永安井水位 $M_2$ 波潮汐振幅比可能主要反映的是福建地区地震震源引起含水层性质的变化，所以认为井水位 $M_2$ 波潮汐振幅比可能主要反映的是含水层渗透系数的变化；通过永安井水位 $M_2$ 波潮汐相位差的变化过程来看，认为 $M_2$ 波潮汐相位差可能主要反映的是周围应力场变化的调整。从地质构造角度来看，永安井水位 $M_2$ 波潮汐振幅比和潮汐相位差比较好地对应台湾7级以上强震和福建中南部的4级以上中强地震，尤其是永安—晋江断裂带周围的地震，由于永安—晋江断裂带连接福建地区的长乐—诏安断裂带和政和一海丰断裂带，主要受这两条断裂带的控制，可能在这样的地质构造处，易于接受应力，对周围应力变化比较敏感，而且该井是深井观测，含水层对周边的应力积累和释放反应比较好（丁祥焕，1998）。

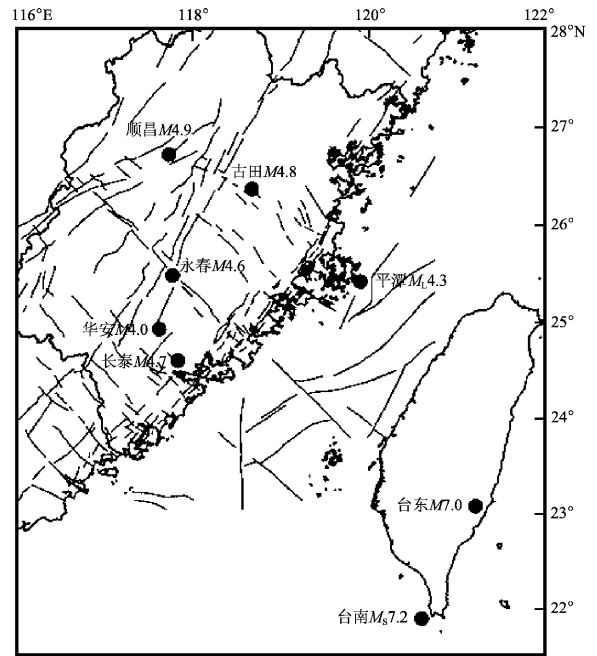


图5 闽台地区中强地震分布图  
Fig. 5 Distribution of strong earthquakes in Fujian and Taiwan area

## 5 主要结论与认识

（1）通过永安地区降雨量和该井水位资料以及该井水位求得的 $M_2$ 波潮汐相位差结果对比分析，认为2011年永安井水位低值异常和 $M_2$ 波潮汐相位差低值异常可能是由于该地区该年降雨量小引起的。

（2）永安井水位 $M_2$ 波潮汐相位差在台东7.0级、台南7.2级地震中的前兆特征表现为上升—高值—下降，在下降过程中发震，这一物理过程符合扩容—扩散（DD）模式。

（3）通过永安井水位 $M_2$ 波潮汐振幅比和潮汐相位差对应台湾7级以上强震和福建4级以上中强地震的关系以及井水位波振幅比和相位差物理本质，认为井水位 $M_2$ 波潮汐振幅比可能主要反映的是含水层渗透系数的变化， $M_2$ 波潮汐相位差可能主要反映的是周围应力变化的调整。本研究以期对闽台地区的中强地震预报提供一个新的参数。

## 参考文献：

- 车用太, 鱼金子, 等. 2005. 地震地下流体学[M]. 北京: 气象出版社.  
丁祥焕. 1998. 福建东南沿海活动断裂与地震[M]. 福州: 福建科技

- 出版社.
- 傅再扬,李祖宁,丁学仁,等.2008. 福建和台湾地震台网测定地震震级差异研究[J]. 地震研究,31(1):32-36.
- 黄跃进,许书元,刘水莲,等.2007. 永安冷冻厂深井地下水动态观测资料质量分析[J]. 地震地磁观测与研究,28(6):53-57.
- 国家地震局.1996. 地下流体地震预报方法[M]. 北京:地震出版社.
- 唐九安,白亚平,杨淑英,等.1993. 甘06井水位潮汐参数的震前中期异常[J]. 地震,3(6):21-28.
- 张昭栋,王尤培,张教祥.1991. 地震地下水潮汐研究综述[J]. 地震学刊,11(4):29-35.
- 张昭栋,郑金涵,冯初刚.1986. 体膨胀固体潮对水井水位观测的影响[J]. 地震研究,9(4):465-472.
- 张昭栋.1988. 地下水潮汐分析[M]. 济南:山东大学出版社.
- Erskine A D.1991. The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK[J]. Groundwater,29(4):556-562.
- 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.
- Klönne F W.1880. Die Periodische Schwankungen in den Inundierten Kohlschächten Von Dux in Der Periode Vom 8 April Bis 15 September 1879[J]. Sitzungsber Kais Akad Wiss,101(14):78-86.

## Analysis on Water Level Tides Variation of Yong'an Well Corresponding with Moderate Earthquake Precursor Characteristic in Fujian and Taiwan Area

QIN Shuang-long, LIAO li-xia, CHEN-Ying, LIU Shui-lian, WANG Qing-ping  
(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China)

### Abstract

Base on well water level data recorded by Yong'an Well during 2003 and 2011, we calculated tidal changes by Venedikov harmonic analysis method, and picked up the amplitude ratio of  $M_2$  wave tidal and phase difference of tidal which have great influence on earth tide. Combined with  $M > 4$  moderate strong earthquakes in Fujian and  $M > 7$  strong earthquakes in Taiwan in the same period, we found that these two tidal parameters of Yong'an well changed significantly before many earthquakes, and analyze that it may had associated with geological structure characteristic of Yong'an Well.

**Key words:** harmonic analysis; amplitude ratio of tidal; phase difference; water level abnormal