

解晓静. 海南省井水位的数字化观测在地震前兆监测中的效能[J]. 华南地震, 2015, 35 (2): 28-36. [XIE Xiaojing. The Efficiency of Digital Observation of Well Water Level in Hainan Province Earthquake Precursor Monitoring[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(2): 28-36.]

# 海南省井水位的数字化观测在地震前兆监测中的效能

解晓静

(海南省地震局海口地震台, 海口 570203)

**摘要:** 分析了海南省在运行中的 7 口数字化观测井井水位的年、月、日正常动态特征, 利用小波分析方法得出异常动态特征, 以及各井对大震远震的响应特征, 并根据以往的震例及未来可能发生的地震, 研究了数字化观测井水位在地震前兆监测中的效能情况。结果表明: 海南省部分井水位在地震中期和短期前兆异常监测中可发挥效能。在此基础上, 提出以后的观测中应加强管理台站周边环境、减少不必要的人为干扰等, 保证各井水位的观测在地震前兆监测中的效能发挥。

**关键词:** 井水位; 动态特征; 监测效能; 海南地区

**中图分类号:** P315.723 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2015) 02-0028-09

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2015.02.005

## The Efficiency of Digital Observation of Well Water Level in Hainan Province Earthquake Precursor Monitoring

XIE Xiaojing

(Earthquake Administration of Hainan Province, Haikou 570203, China)

**Abstract:** The paper analyzes the yearly, monthly and daily normal dynamic characteristics from digital water level observation seven wells running for many years in Hainan Province. Based on the abnormal dynamic characteristics obtained by wavelet analysis method, the response characteristics of each well to large or far earthquake, and the previous earthquakes and earthquakes which may occur in the future, the paper deeply studies the efficiency of the digital observation well water level in the earthquake precursor monitoring. The results show that all well water levels can play efficiency in the medium-term earthquake precursory anomaly monitoring; the 85.7% wells water level can play a better performance in the earthquake short-term and short-term precursory monitoring. On this basis, the paper puts forward that the staff should strengthen the management of stations surrounding environment, to reduce unnecessary man-made interference, and ensure the effectiveness of well water level observation in earthquake monitoring.

**Keywords:** Water level; Dynamic characteristics; Monitoring effectiveness; Hainan area

收稿日期: 2014-04-23

作者简介: 解晓静(1982-), 女, 工程师, 主要从事地震前兆观测和地震预测研究。

E-mail: madxyxj@163.com.

0 引言

海南省地下流体数字化观测井水位已有多年历史,仪器也由“九五”更新换代到“十五”,相比模拟观测各个层面都有了很大的进步,包括数据采

样率精确到分钟,极大增加了每日数据产出量。但其观测现状,特别是在地震前兆监测中的效能发挥情况,尚未系统研究。为此,对海南省在运行中的 7 口数字化观测井井水位进行了初步分析。海南省地下流体观测点的分布情况见表 1。

表 1 数字化水位观测井基本情况表  
Table 1 The basic situation table of digital water level observation wells

序号	井点	井点位置			井-含水层特征			观测仪器	开始数字化观测时间
		经度/°	纬度/°	所在断裂	井深/m	地层岩性	地下水类型		
1	海口 ZK26 井	110.35	20.03	马袅-铺前断裂	706.3	Q4 玄武岩砂砾岩	承压水	LN-3	1996-06-01
2	火山流体井	110.35	20.00	马袅-铺前断裂	276.1	细砂岩	裂隙混合水	LN-3A	2001-09-01
3	海口向荣村井	110.26	20.00	马袅-铺前断裂	320.0	砂砾岩	裂隙混合水	DLZ-1	2001-01-01
4	琼海加积井	110.45	19.24	文昌-琼海-三亚断裂带	525.93	K2 砂砾岩	裂隙承压水	LN-3A	2001-05-18
5	三亚南滨井	109.17	18.38	崖城-雅亮和天涯-高峰断裂	104.76	砂砾岩	裂隙混合水	LN-3A	2003-02-18
6	文昌潭牛井	110.78	19.72	王五-文教断裂	150.76	复矿砾岩	裂隙混合水	LN-3	2005-03-19
7	儋州西流井	109.63	19.56	王五-文教断裂	135.0	砂质粉土、花岗岩、石英岩	裂隙混合水	LN-3A	2010-04-22

1 海南省数字化水位正常动态分析

1.1 水位的正常动态

1.1.1 水位的多年、年动态分析

以月均值为样本绘制海南省 7 口地下流体井水位多年动态曲线,如图 1 所示,数字化水位观测以来各井水位多年动态类型,表现为除海口 ZK26 井水位呈现趋势缓慢下降型外,其它均为趋势平稳起伏型(忽略因明显干扰因素造成曲线破年

变部分)。分析认为海口 ZK26 井水位观测自 706 m 深度第七承压含水层,受外界环境的干扰影响甚小,较真实地反映了地下深部流体层的水位动态情况。而其它各井均较浅,观测层为潜水,地下水类型多为裂隙混合水,易受外界干扰环境影响,如台风、降雨等气候因素及抽水、灌溉等人为因素的影响,故观测井水位的多年动态多数因以上因素影响而呈现趋势平稳起伏形态。

井水位的年动态曲线选取 2011 年月均值为基础

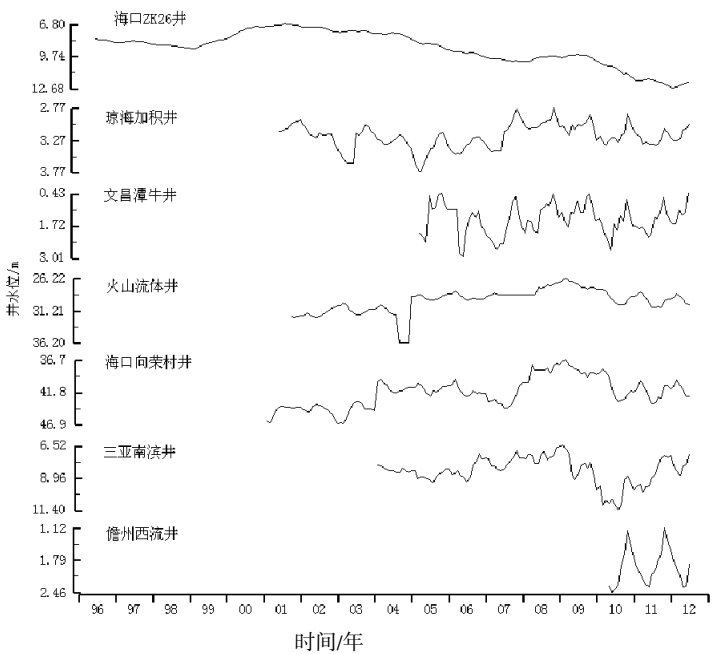


图 1 海南地区数字化井水位观测以来月均值动态类型图

Fig.1 The dynamic type map of monthly mean value of digital water digital well observation in Hainan area

绘制, 分析结果表明: 井水位均表现出一定的年变规律性。年动态类型可分为 4 种类型: 下降-上升-下降、上升-下降-上升、上升-下降、上升, 各井动态曲线如图 2 所示<sup>[1-2]</sup>。

各井水位年变幅度均小于 5 m, 因此有望在破坏性地震的中期前兆监测中发挥一定的效能, 即

较容易识别出年变形态破坏类异常, 也有可能识别出趋势转折型异常。

### 1.1.2 水位的月动态分析

水位月动态分析是在日均值为基础绘制的曲线上进行的, 主要分析一个月的时间尺度上是否有规律可循, 分析时把渐升、渐降与平稳的变化

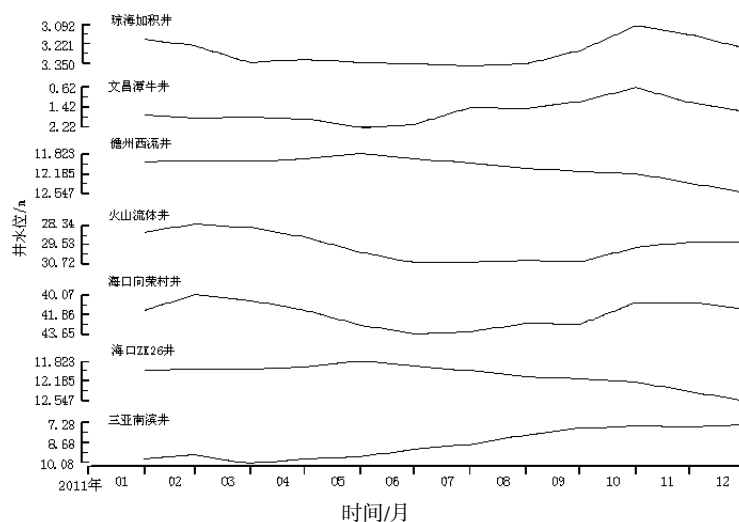


图 2 海南地区 2011 年各井水位月均值动态曲线

Fig.2 Monthly mean dynamic curve of water level of each well in Hainan area in 2011

作为有规律的变化标志, 把无规律起伏、阶变和明显的脉冲作为无规律变化的标志<sup>[3]</sup>。

为作月动态规律性的分析, 抽查了 2011 年 1 月的数据。分析结果表明: 月动态规律清楚的有 6 口井, 基本清楚的有 1 口井, 各井动态曲线见图 3。由此可知, 本地区所观测的井水位动态中, 较容易识别出转折、阶变、脉冲等具有短期预测意义的前兆异常。

再分析其 2011 年全年各月观测井水位动态, 给出表 2 海南地区 7 口井水位 2011 年各月变规律性统计表, 可知, 对于同一个观测井而言, 其水位月变规律性是随时间变化的。一般来讲, 一年中月变规律较清晰的时段多为年初及年末, 因本区井水位动态多数是季节性的降水补给开采型, 受降雨及人为开采影响较大(图 4), 所以月动态规律不够清楚及无规律的时段基本是由该原因造成

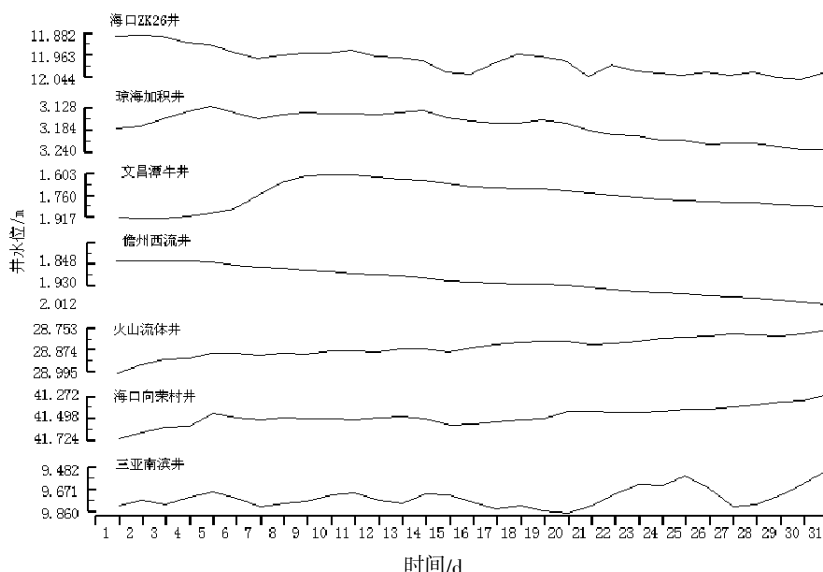


图 3 海南地区 7 口井 2011 年 1 月井水位的日均值动态曲线

Fig.3 The daily mean dynamic curve of well water level of 7 wells in Hainan area in January, 2011

表 2 海南地区 7 口井水位 2011 年各月变规律性统计

Table 2 The statistics table of monthly variation of water level of 7 wells in Hainan area in 2011

观测井	时间/月											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
海口 ZK26	√	√	√	√	√	△	△	√	√	√	√	√
海口向荣村	√	√	×	√	√	√	△	√	√	△	△	√
三亚南滨	△	△	△	△	√	△	△	√	√	√	√	△
火山流体	√	√	△	√	√	√	√	△	△	√	△	△
琼海加积	√	△	△	△	△	×	△	×	√	△	△	√
文昌潭牛	√	√	×	√	△	△	×	×	×	×	√	√
儋州西流	√	√	√	√	×	△	△	△	△	√	△	△
规律清楚井数	6	5	2	5	4	2	1	3	4	4	3	4
规律基本清楚井数	1	2	3	2	2	4	5	2	2	2	4	3
无规律井数	0	0	2	0	1	1	1	2	1	1	0	0

的。因此，地震短期前兆异常出现在有规律月变的时段时，才有可能识别出来。

2.1.3 水位的日动态分析

(1) 整点值动态分析。井水位整点值日动态，最显著的特征是地球重力固体潮效应，以及海潮、大气潮、江河潮的复合潮汐效应，即井水位随各潮汐引力的大小而降升变化。不同井的水位潮汐显现程度不同，多数井水位固体潮汐十分显著，

相位清晰，幅度较大，而距海较近的井则受海潮影响显著于其他潮汐，部分井则形态不够清晰或潮汐水位背景上叠加有不规律的起伏，甚至个别井水位没有潮汐显示。

如图 5 所示，以海口 ZK26 井为例，同一口井水位受固体潮、海潮、大气潮的复合潮汐影响下，分别给出不同时段下(2011 年 1 月 1 日、2011 年 1 月 22 日、2011 年 1 月 13 日)固体潮汐效应显著、

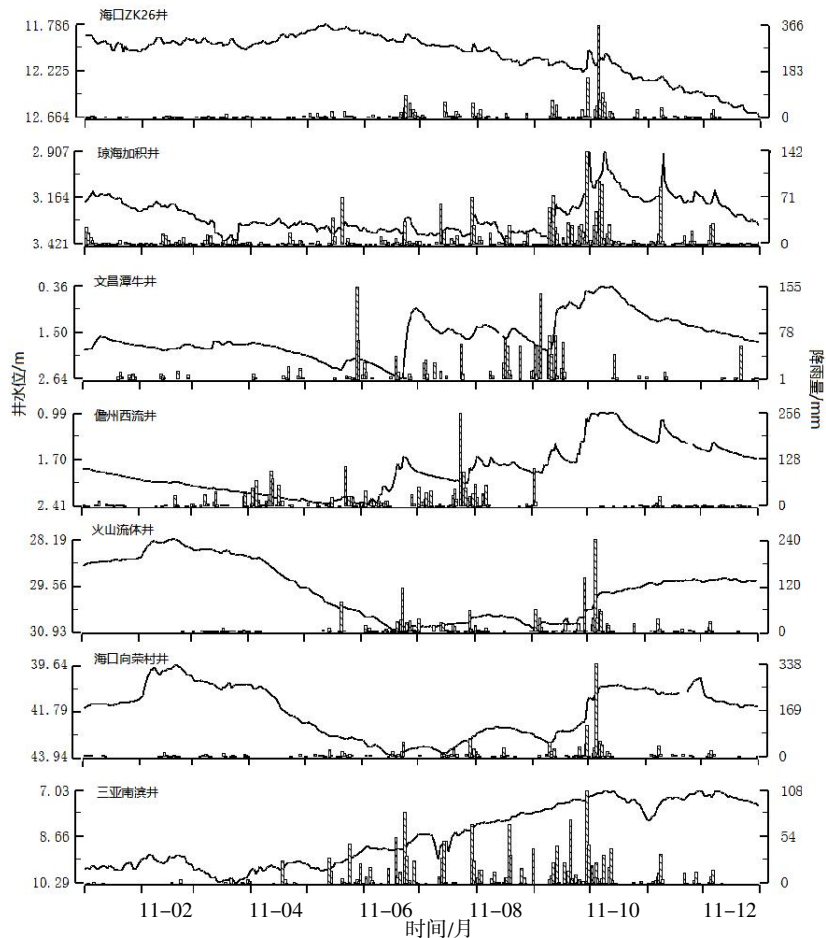
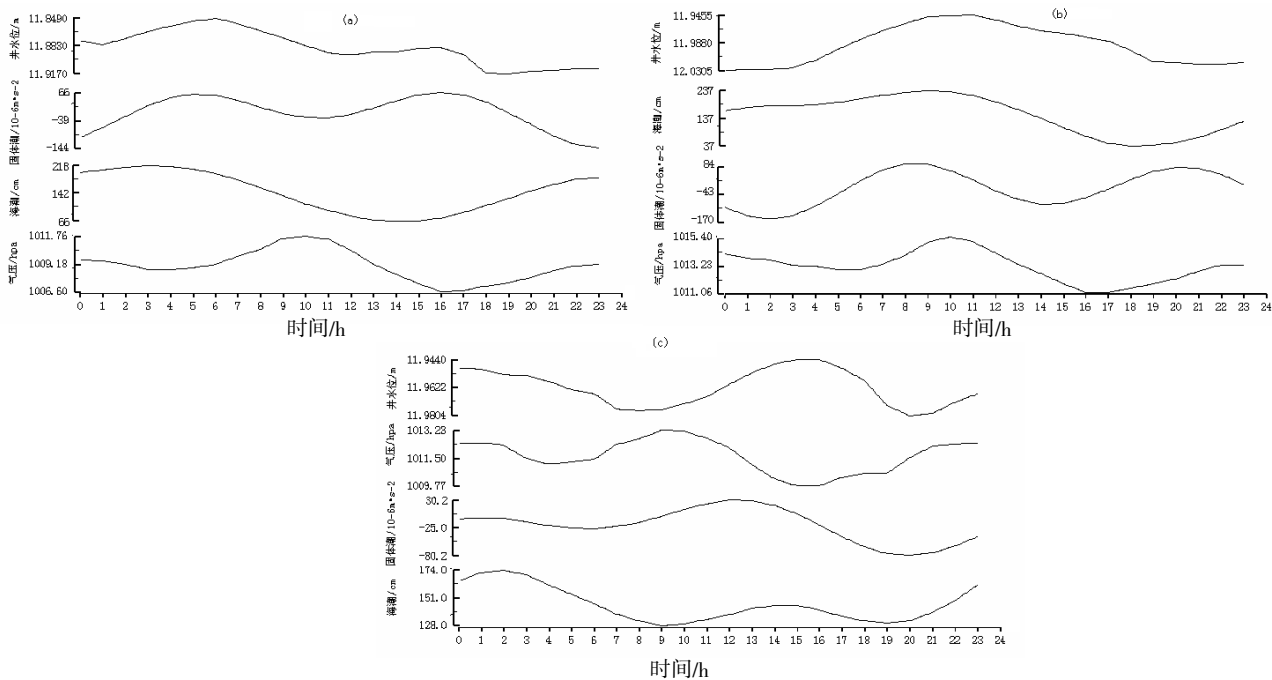


图4 海南地区 2011 年 7 口井水位与降雨日均值对比曲线

Fig.4 Comparison curve of well water level of 7 wells and daily mean of rainfall in Hainan area in July, 2011

海潮潮汐效应显著及大气潮汐效应显著的水位与重力理论固体潮、海潮、大气潮的整点值动态对比曲线。同时给出不同时段下井水位与各潮汐因素的相关系数(表 3), 清晰可见各时段下潮汐效应显著的潮汐因素, 其相关系数均大于另外两个。

以 2011 年 1 月 1 日动态统计为依据, 本地区流体井除了海口 ZK26 井以外, 还有 2 口井即海口向荣村井、火山流体井也因地理位置距海较近受复合潮汐影响较明显, 另外琼海加积井、文昌潭牛井、儋州西流井日动态形态主要为固体潮汐效



(a) 固体潮汐效应显著各动态对比曲线(2011-01-01); (b) 海潮潮汐效应显著各动态对比曲线(2011-01-22)  
(c) 大气潮汐效应显著各动态对比曲线(2011-01-13)

图 5 海口 ZK26 井不同时段受不同潮汐效应显著动态对比曲线

Fig.5 The Comparison curve of different tidal effect of Haikou ZK26 well at different times

表 3 井水位与各时段固体潮、海潮、大气潮汐相关系数  
Table 3 Correlation coefficients of well water level and the solid tide, tide, atmospheric tides in each period

时间/月-日	固体潮 $r$	海潮 $r$	大气潮 $r$
01-01	-0.5068	-0.4171	-0.3309
01-22	-0.3615	-0.4389	-0.3233
01-13	-0.4304	-0.4856	0.5867

应型, 而潮汐基本无显示的为三亚南滨井。

井水位日动态中显示出潮汐效应, 一方面说明了井水位对地壳应力-应变的响应具有很高的灵敏度, 另一方面为各潮汐畸变、阶变、脉冲等短期和短临前兆异常的识别提供了可靠的动态背景(表 4)。

(2) 分钟值动态分析。数字化水位的观测以分钟值为采样率, 极大地丰富了资料的完整性、细致性, 为应用流体资料进行分析提供了更广的平台。利用一般多项式分段曲线拟合的方法对原始观测值序列进行滤波, 分解成“低频”的变化

趋势数值与“高频”的反应数值, 然后分别绘制原始观测值动态、低频趋势动态与高频动态曲线, 如图 6 所示。在低频数值动态曲线上, 分析日变规律的稳定性, 在高频数值动态曲线上, 分析超过二倍和三倍均方差的脉冲状“异常”。

分析结果表明, 日变动态规律性可分为好、

表 4 海南地区 2011 年 1 月井水位日动态  
规律性与脉冲统计

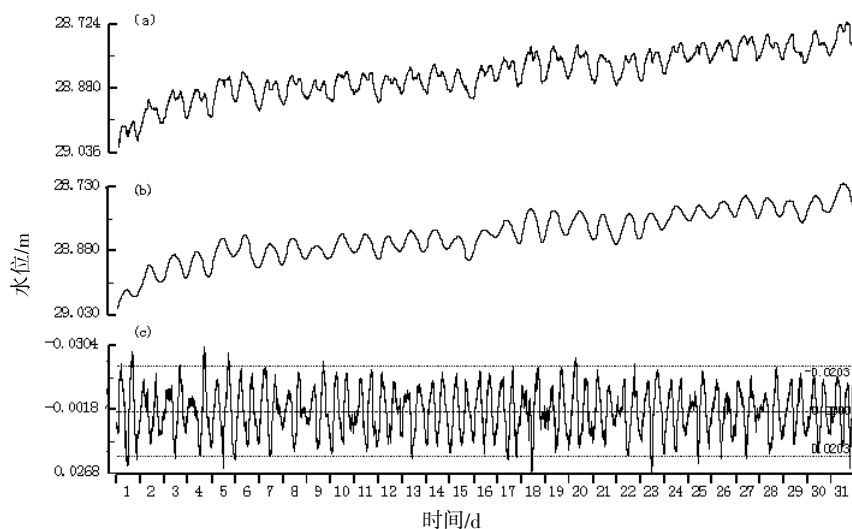
Table 4 The statistics table of daily dynamic regularity of water level well and impulse in Hainan area in January, 2011

观测井	日动态规律性	超 $n\sigma$ 的脉冲组数		图示
		$>2\sigma$	$>3\sigma$	
海口 ZK26 井	时好时坏	14	0	图 6b
海口向荣村井	好	9	4	
火山流体井	好	9	0	
琼海加积井	时好时坏	7	0	图 6a
文昌潭牛井	时好时坏	9	0	
儋州西流井	好	13	0	图 6c
三亚南滨井	不好	18	1	

时好时坏和不好(日变无规律)三类;脉冲分为超 2 倍均方差( $>2\sigma$ )和超 3 倍均方差( $>3\sigma$ )二类,分别计算各月中超过一定均方差的脉冲组数,每一个组数中数据个数可不等。分类结果的典型实例见图 7。

对低频曲线上的日动态规律性及高频动态曲

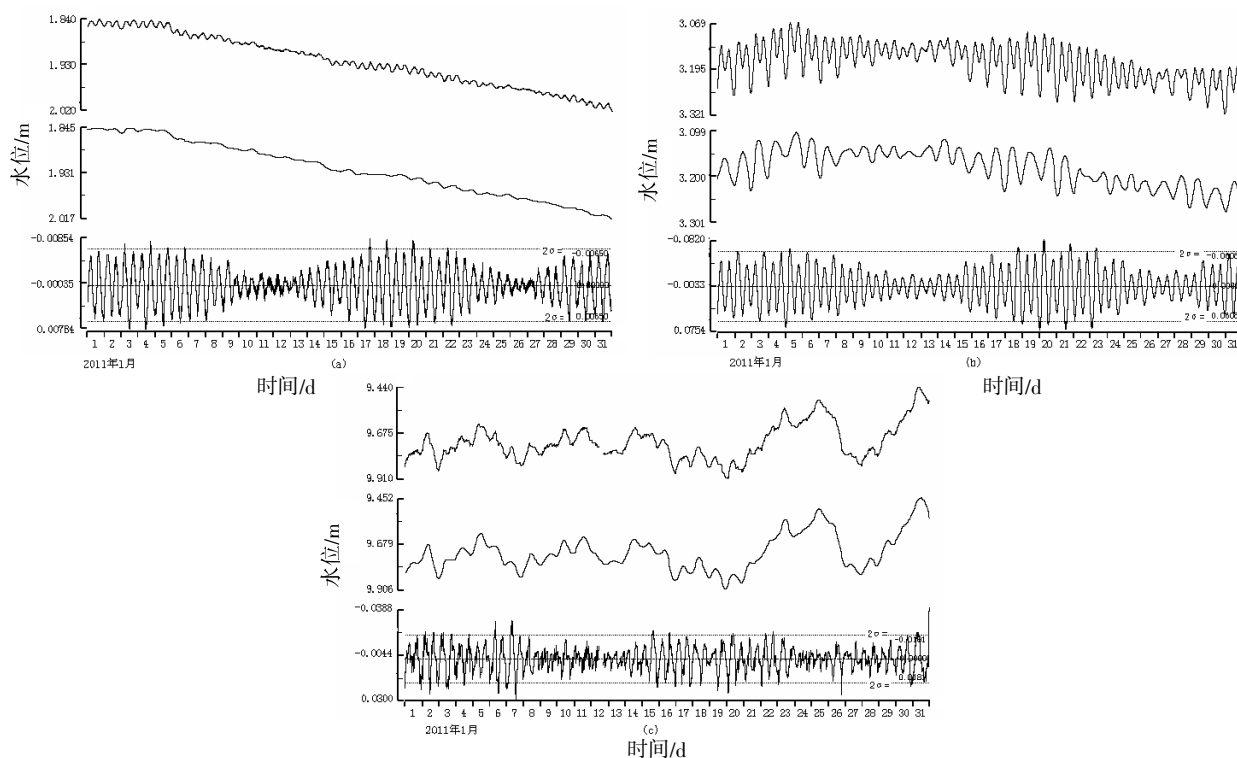
线上的脉冲组数,逐井分析结果列于表 4 中。由表 4 可见,日动态规律好而稳定的井有 3 口(占 42.9%),日动态规律时好时坏而不稳定的井有 3 口(占 42.9%),日动态无规律的井有 1 口(占 14.2%);7 口井的水位高频动态中,都有超过 2 倍均方差( $>2\sigma$ )的脉冲出现,但出现超过 3 倍均方差



(a) 原始观测值动态; (b) 滤波产生的低频动态; (c) 滤波产生的高频动态

图 6 火山流体井 2011 年 1 月水位的分钟值动态曲线

Fig.6 The minute value dynamic curve of volcano fluid well level in January, 2011



(a) 日变动态有规律,且无 $>3\sigma$ 的脉冲; (b) 日变动态时好时坏,且无 $>3\sigma$ 的脉冲; (c) 日变动态无规律,且有 $>3\sigma$ 的脉冲

图 7 2011 年 1 月井水位分钟值动态的三种典型曲线

Fig.7 Three kinds of typical curve of well water level minute value in 2011 January

( $>3\sigma$ )脉冲的则只有2口井,且出现的次数少。

根据以往震例,以井水位的日变规律及阶变与脉冲为地震短期和短临前兆异常的主要形态时,无疑要求无震时段的动态变化有规律且稳定,无很大的阶变或脉冲“异常”出现。按着这样的判据,海南地区7口井中,除了三亚南滨井其它井均可在地震短期与短临前兆监测中发挥较好的效能(占85.7%)。

## 2 海南省数字化水位的异常动态特征分析

### 2.1 2001年以来海南及邻区 $M_s \geq 4.9$ 级地震前数字化水位前兆异常特征

数字化前兆变化过程是典型的观测信号非平稳变化过程,具有不稳定性、变化快等时频特点。对此类数据采用现代的时频分析方法,在提取和分析地震异常信息方面可获得较好的效果。小波方法在时、频两域都具有表征信号局部特征的能力,尤其对于频率成分比较简单的确定性信号,可以将其表示成各频率成分的叠加和的形式,特别适合于地震前兆这类不稳定的复杂信号。

#### 2.1.1 小波变换原理

对于任意具有有限能量的信号  $f(t)$ , 其对应的二进制离散小波变换定义为

$$W(j, k) = 2^{-j/2} \int f(t) \psi^*\left(\frac{t-k}{2^j}\right) dt \quad (1)$$

式(1)中,  $W$  表示连续小波变换;  $k$  是平移因子;  $j$  为小波分解水平;  $\psi$  是小波基函数,  $j$  值越大时小波变换对应频率越低。

相应的  $f(t)$  的二进制小波重构方法为:

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_k c_{j,k} \varphi_{j,k}(t) + \sum_k \sum_j d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \\ &= A(t) + \sum_j D_j(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中,  $A_j$  和  $D_j$  是原始信号的近似部分(低频部分)和细节部分(高频部分);  $c_{j,k}$  和  $d_{j,k}$  是二进制

离散小波变换系数;  $\varphi$  和  $\psi$  是小波基函数。其中, 细节部分反映信号在各个尺度上的细节特征, 近似部分反映了信号在不同尺度上的趋势特征。

#### 2.1.2 小波基的选取

选 Daubechies 小波进行分析, 大多数观测资料都呈现出规律性较好的年变动态。本文采用 db4 小波对数据进行处理, 首先考虑到 db4 小波在地球物理学研究范围被广泛采用; 其次考虑到 db4 小波仅支撑正交小波, 这可以使 Mallat 算法更快捷。它的光滑性也可以更高精度地模拟和分析信号。Db4 小波随着分解层级的增加其正则型也增加, 它抑制了该多项式信号在零阶和一阶的部分信号, 而仅对该信号的二阶部分及噪声进行分解。因此, 分解的细节信号部分 db4 中也包含了噪声信号的不规则性, 其余各层细节中的信号周期性随层级的增加而增大。另外也考虑到 db4 小波在时域和频域局部化方面的强劲性<sup>[4-6]</sup>。

#### 2.1.3 小波异常分析

对于此次分析, 鉴于数字化资料的短暂局限性, 我们选用了部分井的较长数字化资料以及模拟资料配合分析, 以便使 2001 年以来的短期数字化资料应用该小波分析方法的论证更有说服力。

海南及邻区地震目录列于表 5, 各测井距各地震的震中距如表 6, 海南为弱震区, 故降低目标地震的震级下限, 取其为  $M_s$  4.9, 地震的时间间隔为 5~6 年。取用海南省海口 ZK26 井的数字化水位月值资料以及琼海加积井、儋州西流井的模拟水位月值资料。经小波分析结果显示: 细节 5 信号的平稳性最好, 与本区历史地震相关性较好。为此, 在海南及邻区选择细节 5 用以提取地下水的异常。

经分析总结, 对于静水位, 以小波分解的水位值  $\leq 0$  为异常判定指标; 对于动水位, 以小波分解的水位值  $\geq 0$  为异常判定指标。如图 8 所示, 给出了海南地区水位月均值的小波中期异常图, 可知, 1987—2012 年, 在海南及邻区出现 6 组小波异常, 其中 4 次分别对应 1988 年北部湾  $M_s$  5.0, 1994 年北部湾  $M_s$  6.0, 1999 年海南万宁  $M_s$  4.9, 以及 2004 年广东阳江  $M_s$  4.9 地震, 1 次为虚

表 5 海南及邻区地震目录表

Table 5 Earthquake catalog in Hainan and its neighboring area

序号	日期/年-月-日	震中位置		$M_s$	地点
		纬度/ $^{\circ}$	经度/ $^{\circ}$		
1	1988-11-10	21.25	108.42	5.0	北部湾
2	1994-12-31	20.50	109.40	6.1	北部湾
3	1999-05-17	18.30	109.50	4.9	海南万宁近海
4	2004-09-17	21.70	111.90	4.9	广东阳江

表 6 海南各测井距各地震的震中距表

Table 6 Epicentral distance table of the wells from the earthquake in Hainan

时间 /年-月-日	地点	$M_s$	震中距/km						
			海口 ZK26 井	火山流体井	海口向荣村井	琼海加积井	三亚南滨井	文昌潭牛井	儋州西流井
1988-11-10	北部湾	5.0	244.2	246.2	238.6	309.7	331.9	300.9	229.1
1994-12-31	北部湾	6.1	113.4	114.8	106.3	194.8	228.8	169.0	101.1
1999-05-17	万宁 近海	4.9	170.3	167.0	167.7	89.9	132.5	140.9	144.2
2004-09-17	广东 阳江	4.9	249.8	252.4	258.3	317.9	470.8	144.2	338.7

报,最近的 1 次异常目前为止尚未有相应的中强地震对应,值得特别跟踪。那么对于与模拟资料相关性很好的数字化资料,2001 年以来的前兆异常特征也同理。

2.2 大震远震同震响应特征

观测井对已发生的大震远震是否存在同震响

应,以及响应的特征,都在一定程度上表征了井孔的性能。

观测仪器的配备情况也对同震响应的记录产生着影响。近年来,随着数字化观测技术的推广,数字化水位仪的采样率普遍达到了每分钟 1 次,因此可记录到很清晰的水震波波形。

现选取海南 2001 年以来数字化观测井水位受

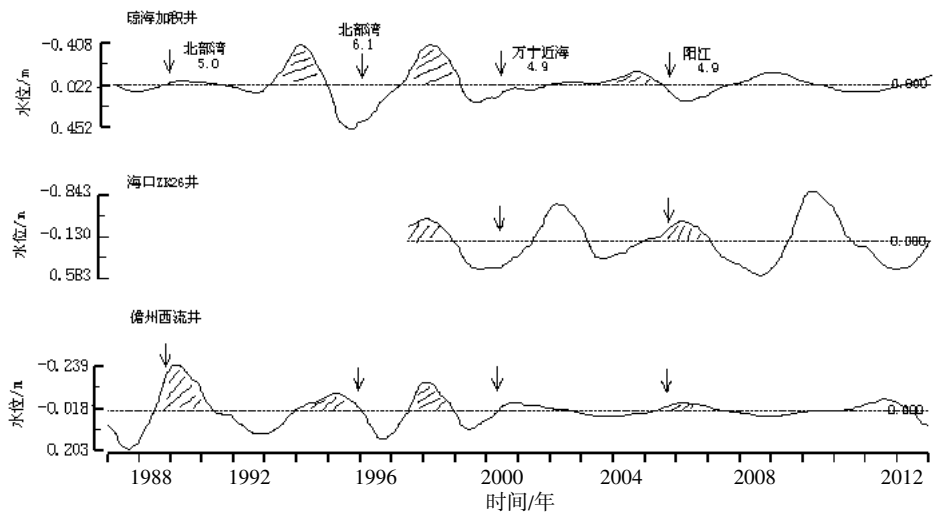


图 8 海南地区三口井水位小波(细节 5)中期异常变化曲线图

Fig.8 The wavelet(detail 5) medium-term anomaly curve of water level of three wells in Hainan area

几次典型大震远震影响而产生的同震响应水震波图(图 9)。

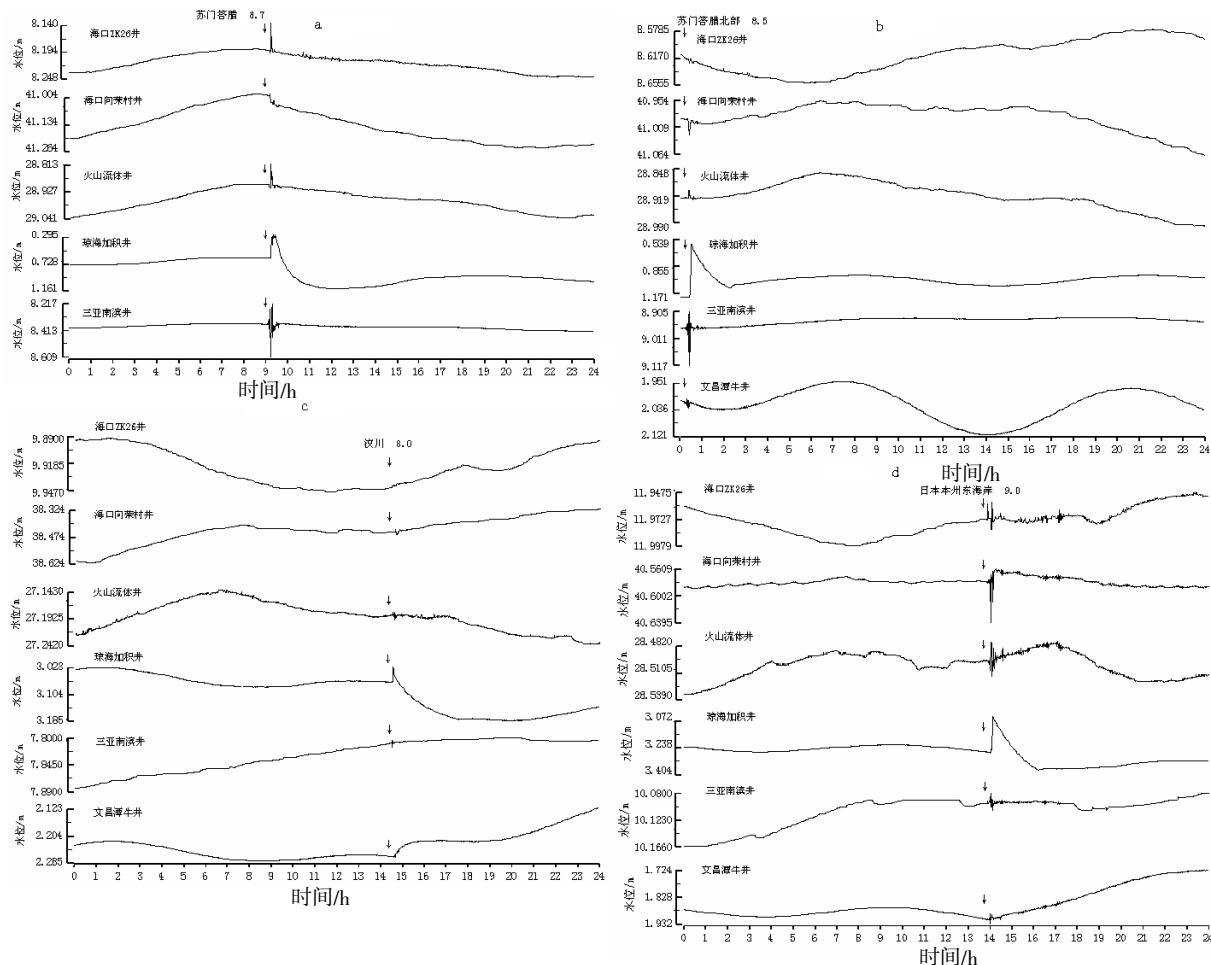
由图 9 可知,除了儋州西流井 2010 年数字化改造观测以来,无法记录到较大地震发生时的水震波,其原因可能为井孔改造后使井-含水层间水动力学特性随之改变了。海南地区其他各井水位均对不同大震远震有较好的同震响应,其水震波波形多数呈脉冲振荡型,另外还有少数的阶变型,并且幅度也不一致,分析认为,海南岛不大,各个水位观测井相距不远,它们遭遇地震波的强度基本相同,由此可推断各个观测井的井孔构造部位、水文地质条件及含水层岩石的力学性质等因素,特别是井-含水层间水动力学特性有较大差异,因而造成了水震波形态和幅度的不一致。

综合同震响应情况来说,表征了我区各井孔的数字化水位观测记震能力较好,在地震前兆监测上有一定的效能发挥价值。

3 结语

- (1) 从本区数字化井水位观测井有 7 口,全部正常运行。
- (2) 从井水位月均值多年、年动态分析看,其动态趋势规律稳定,正常运行的所有井水位年变幅均小于 5 m,因此,所有井水位在地震中期前兆异常监测中可发挥效能。
- (3) 井水位日均值月动态分析看,本区 70% 的井月变有规律,且除了受季节性降水开采等影响井水位动态外,其出现在有规律月变时段的地





a. 2004 年 12 月 26 日苏门答腊  $M_s$  8.7 地震效应; b. 2005 年 3 月 29 日苏门答腊北部  $M_s$  8.5 地震效应  
c. 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s$  8.0 地震效应; d. 2011 年 3 月 11 日日本本州东海岸  $M_s$  9.0 地震效应

图 9 海南地区不同井水位受不同大震远震影响产生的水震波图

Fig.9 The water seismogram of different well water level in Hainan area impacted by different teleseismic earthquake

震短期前兆异常便容易被识别。

(4) 从井水位整点值日动态和分钟值的月动态特征上分析, 本区 7 口井中只有 1 口井水位基本无潮汐效应表现, 其余各井均表现有相应特征的潮汐效应, 而且该井日动态规律性不好, 有超 3 倍均方差的脉冲出现。本区占 85.7% 的井水位可在地震短期与短临前兆监测中发挥较好的效能。

海南省地下流体数字化井水位观测中, 还存在一些有待解决的问题: 各井水位月动态规律存在不够清楚及无规律的时段, 其原因除了自然因素诸如降雨、潮汐等造成的影响无法避免之, 而人为开采、抽蓄水等人为干扰因素却也占了很大比例, 严重影响了以短临预测为主的流体前兆异常特征。井水位日动态规律看, 本区三亚南滨井水位规律不好且存在较多的脉冲状“异常”, 主要也因观测环境受周边干扰严重所造成, 因此, 加强对台站周边观测环境的管理是非常必要的, 使其尽量减少人为干扰, 保证观测质量的提高, 从

而在地震前兆监测中发挥效能。

#### 参考文献:

- [1] 车用太, 赵文忠, 鱼金子, 等. 京津冀地区井水位的数字化观测及其地震前兆监测效能评估[J]. 地震, 2006, 26 (4): 105-114.
- [2] 顾申宜, 李志雄, 张慧. 海南地区 5 口井水位对汶川地震的同震响应及其频谱分析[J]. 地震研究, 2010, 33 (1): 37-44, 121.
- [3] 刘耀炜, 陆明勇, 付虹, 等. 地下流体动态信息提取与强震预测技术研究[M]. 北京: 地震出版社, 2010.
- [4] 张昱, 常青, 冯博. 甘肃地区数字化水位资料的初步分析[J]. 华南地震, 2013, 33 (2): 27-33.
- [5] 王俊, 王行月, 陶月潮, 等. 泾县凤村井水位异常与地震关系分析[J]. 华南地震, 2013, 33 (2): 27-33.
- [6] 赵栋, 易立新, 王广才, 等. 地下水位中地震前兆信息提取方法研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35 (2): 342-353.