

陈美梅, 刘水莲, 全建军, 等. 数字化改造后的永安井水位观测资料分析及地震前兆监测效能评估[J]. 华南地震, 2017, 37(S1): 75–82. [CHEN Meimei, LIU Shuilian, QUAN Jianjun, et al. Analysis of Underground Water Level Observation Data and Monitoring Efficiency Evaluation of Earthquake Precursor of Yong'an Well after Digital Reconstruction[J]. South China journal of seismology, 2017, 37(S1): 75–82.]

数字化改造后的永安井水位观测资料分析及 地震前兆监测效能评估

陈美梅, 刘水莲, 全建军, 林慧卿
(福建省永安地震台, 福建 永安 366000)

摘要: 2013 年 7 月 4 日永安地震台观测井进行数字化改造, 安装了福建省首台 SWY-II 型数字式水位仪, 并且同步安装了 SZW-1AV2004 数字式温度计和 WYY-1 型气温、气压、降水量综合测量仪。以 2014、2015、2016 三年数字化观测资料为研究对象, 对水位资料的年、月、日动态特征及主要干扰因素等进行分析, 研究数字化观测水位在地震前兆监测中的效能情况。结果表明: 水位数字化观测资料连续可靠, 对大地震有明显的同震效应, 地壳应力-应变响应灵敏度高。观测资料年变规律明显, 有望在破坏性地震的中期或中短期前兆监测中发挥一定的效能。

关键词: 数字化; 水位动态; 监测效能

中图分类号: P315.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2017) S1-0075-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.S1.012

Analysis of Underground Water Level Observation Data and Monitoring Efficiency Evaluation of Earthquake Precursor of Yong'an Well after Digital Reconstruction

CHEN Meimei, LIU Shuilian, QUAN Jianjun, LIN Huiqing
(Yong'an Seismic Station of Fujian Province, Yong'an 366000, China)

Abstract: Based on the water level data of the well during 2014 and 2016, the paper analyzed the annual, monthly and daily dynamic characteristics of water level data and main disturbance factors, and studied the efficiency of the digital observation well water level in the earthquake precursor monitoring. The results show that the water level digital observation data is continuous and reliable, significant coseismic effect to large earthquake, and the crust stress – strain response is highly sensitive. The yearly behaviors have some regularity, and can exert its efficiency in the medium term or the short term precursory monitoring.

Keywords: Digital observation data; Ground-water dynamic state; Earthquake prediction efficacy

收稿日期: 2017-03-30

作者简介: 陈美梅 (1988–), 女, 助理工程师, 现主要从事地震监测工作。

E-mail: 116512898@qq.com.

0 引言

我国地震地下流体观测研究工作开始于 1966 年邢台地震之后, 地下流体观测项目分为地下水、地下气和地热三大基本类型^[1], 地下水位观测一直是地震前兆观测的重要测项国内外地震专家学者在井水位动态、对地壳应力-应变响应灵敏度、井水位变化的干扰因素等方面做了大量研究工作^[2-3], 取得了一定的研究成果, 为评估地下流体观测资料质量提供了一些相对直观和有效的方法。

2009 年经中国地震背景场探测项目组专家对永安冷冻厂井进行温度梯度测试, 福建省地震局分析预报处堪选, 在永安冷冻厂井原址进行数字化改造, 于 2013 年 7 月 4 日安装了福建省首台 SWY-II 型数字式水位仪, 至今已经正式运行三年。本文从井水位潮汐效应、气压效应、同震效应等方面对数字化观测水位资料做了简单的分析, 在此基础上, 对数字化水位动态特征及其效能做初步探讨。

1 数字化水位观测概况

1.1 观测井及环境概况

福建省永安市区位于中生代红色断陷山间盆地, 外缘绕以中-古生代岩层的丘陵山地, 是北东向政和-海丰断裂带与北西向永安-晋江断裂带交汇处。地下水动态观测点位于永安盆地燕江支流高岸阶地, 该观测井为中国地震背景场探测项目, 高程为 172.01 m, 井孔深度为 1000.44 m。井孔顶部地层为透水性差、不含水的砂黏土为主的坡积层组成, 封闭性良好, 地下水位稳定, 年变幅 0.5 m 左右, 可记录到固体潮, 具有同震效应, 气压效应等地壳应力-应变信息^[4]。于 1981 年 12 月 29 日列入全国地下流体基本观测井开始观测, 2013 年 7 月 4 日数字化改造, 安装了 SWY-II 型数字式水位仪, SZW-1A V2004 数字式温度计和 WYY-1 型气温、气压、降水量综合测量仪, 经过三年的数字化观测, 水位观测资料趋于稳定。

1.2 观测历史

永安井于 1981 年 12 月 29 日列入全国地下流体基本观测井开始观测, 1985 年投资约 3 000 元建地下水动态观测房 (面积约 10 m²), 并于 1995 年 3 月 1 日采用 SW40-1 型水位计长期观测, 该观测模式为人工观测, 每日换纸, 用量板采集正点

值数据。2013 年 7 月 4 日数字化改造后, 安装了 SWY-II 型数字式水位仪, SZW-1A V2004 数字式温度计和 WYY-1 型气温、气压、降水量综合测量仪, SWY-II 型数字式水位仪是由中国地震局地壳所研制出厂, 为地下流体前兆观测设计的压力式水位仪。在保留 SWY-I 原有特性的前提下, 进行了仪器硬件、仪器性能、功能等多方面的提升, 摆脱了传感器整体外加工的局限性; 实现了低功耗, 高稳定性、数字化自动观测等特点^[5]。2014 年 1 月 24 日并入中国地震局十五前兆台网正式运行, 经过三年的数字化观测跟踪, 水位仪运行稳定, 资料连续率较高。

2 水位观测资料分析及主要影响因素

2.1 潮汐效应及其灵敏度

日月引潮力持续作用于地球, 地球对引潮力产生的响应反映了其内部的物性特征。本文中采用维尼迪柯夫调和和分析方法计算固体潮潮汐参数, 即使用维尼迪柯夫滤波器进行滤波, 滤去观测值中的漂移和长周期成分, 分离出日波、半日波和 1/3 日波的潮汐参数, 以此方法分离出的井水位中的 M_2 波潮汐因子。对 2014 年 01 月 01 日~2016 年 12 月 31 日的水位资料做月 Venedikov 调和和分析, 由表 1、表 2 发现 M_2 波月潮汐因子值 ≥ 3.0 , 变化较为稳定, 符合静水位观测潮汐因子 ≥ 1.00 , 观测精度 < 0.01 的标准^[6], 表明本井潮汐响应能力较强, 观测资料精度较高, 水位内在质量高。

表 1 水位月潮汐因子表 (mm/10⁻⁹ 体应变)

Table 1 Monthly tidal factor of water level (mm/10⁻⁹)

月份	年份		
	2014	2015	2016
1	-	3.659 0	3.685 1
2	3.651 3	3.689 9	3.605 4
3	3.673 3	3.658 5	3.625 7
4	3.632 3	3.637 9	3.692 8
5	3.670 8	3.634 2	3.637 1
6	3.646 8	3.650 2	3.637 1
7	3.698 1	3.719 6	3.722 2
8	3.653 4	3.637 4	3.667 1
9	3.633 6	3.640 4	3.688 8
10	3.644 2	3.681 4	3.668 2
11	3.665 3	3.656 4	3.670 5
12	3.660 3	3.666 7	3.665 0

大量的地下水观测事实表明, 一个好的承压井水位变化能反映地球潮汐体应变的变化, 可以

表 2 水位观测精度年均值表

Table 2 Annual accuracy of water level observation accuracy

时间/年	潮汐因子年均值	误差年均值	观测精度年均值
2014	3.654 7	0.009 5	0.002 6
2015	3.658 7	0.009 5	0.002 6
2016	3.660 4	0.008 7	0.002 4

通过计算井水位在潮汐作用下含水层体应变的响应灵敏度，来判断井水位是否有较好的固体潮效应。取 2015 年 4 月 1 日至 4 月 30 日的水位观测数据进行分析，由水位潮汐记录可计算出，井水位的最大日潮差 $H=23.7\text{ cm}$ ，潮汐因子 $\delta=3.6323\text{ (mm/10}^{-9}\text{ 体应变)}$ (表 1)通过井水位变化与体应变的关系式

$$1/\delta=\Delta\theta/\text{dh}^{[5]} \tag{1}$$

得出潮汐体应变的最大值 $\theta=6.53\times10^{-8}$ 。式(1)中， δ 为潮汐因子、 θ 为潮汐体应变、 H 为潮差。

因此可以计算出 2015 年 4 月 1 日至 4 月 30 日井水位在潮汐作用下含水层体应变的响应灵敏度为 2.7×10^{-10} (体应变)/1 mm (水位)。该结果表明永安观测井的水位潮汐效应较强，能清晰记录到固体潮。

2.2 地震响应能力

地下流体同震效应是揭示地壳介质对应力-应

变过程响应最有效和直接的手段之一，我们通过对国家台网速报目录，统计 2014 年 1 月 1 日-2016 年 12 月 31 日国外 $M_s\geq7$ 级 62 次，本井有同震反映的 38 次，占总数的 61.29%；国内 $M_s\geq6$ 级 23 次，本井有同震反映的 2 次，占总数的 0.09%；福建省内近年地震平静，4 级以上的地震仅 1 次，本井无同震响应。本井对 $M_s\geq7.0$ 级以上远震响应能力较好，记录的峰值大小与持续时间受到震中距及震级大小的直接影响，这可能与远震面波成分丰富，传播距离较远有关，而对于 $M_s\leq7$ 级的仅能记录到 600 km 范围内的台湾近震， $M_s\leq5$ 级的近震基本无同震响应，笔者认为这一现象受到两方面因素的影响，一个是近震衰减较快，水位拾取能力较弱，另一个方面是近年福建省内（测点周边 300 km 范围内）4 级以上地震事件少，无法有效地验证本井近震响应能力，表 3 为水位 $M_s\geq7.5$ 级地震水震波记录统计表。

表 3 水位同震响应统计表

Table 3 Seismic response statistics of water level

日期	振荡起始 时间/h:min	振荡结束 时间/h:min	振荡持续 时间/min	响应形态	最大峰值 变化/mm	震中距/km	地震名称
2014-04-02	08:30	09:32	62	震荡波	33	18 947	智利北部海岸近海 8.1 级地震
2014-04-03	11:19	12:27	68	震荡波	14	18 947	智利北部附近海域 7.8 级地震
2014-04-13	04:32	05:31	60	震荡波	23	6 121	所罗门群岛附近海域 7.8 级地震
2014-04-13	20:52	21:13	22	震荡波	5	6 129	所罗门群岛附近海域 7.5 级地震
2014-04-19	21:44	22:07	24	震荡波	4	5 449	巴布亚新几内亚 7.6 级地震
2014-06-24	05:10	05:26	17	震荡波	51	5 833	拉特群岛 7.9 级地震
2015-04-25	14:15	17:40	205	震荡波	12	3 237	尼泊尔 8.1 级地震
2015-05-12	15:14	15:24	10	震荡	4	3 102	尼泊尔 7.5 级
2015-05-30	19:24	19:39	15	震荡	12	2 305	日本小笠原群岛地区 8.0 级
2015-09-17	07:43	14:57	434	震荡波	88	18 957	智利 8.2 级地震
2015-10-26	17:28	17:41	13	震荡波	10	4 537	兴都库什地区 7.8 级地震
2016-03-02	20:58	03:48	410	震荡波	73	4 250	苏门答腊 7.8 级
2016-04-16	00:34	00:46	12	震荡波	8	1 504	日本九州岛 7.3 级
2016-04-17	08:41	10:54	133	震荡波	22	16 567	厄瓜多尔 7.5 级
2016-07-30	05:23	05:36	13	震荡波	37	3 018	马利亚纳群岛 7.8 级地震
2016-11-13	19:26	23:06	220	震荡波	18	9 525	新西兰 8.0 级地震
2016-11-22	05:10	05:15	5	震荡波	4	2 595	日本本州东岸近海 7.2 级地震
2016-12-09	01:57	02:20	23	震荡波	26	6 268	所罗门群岛 7.8 级地震
2016-12-17	19:02	22:18	23	震荡波	2	5 167	新爱尔兰 7.8 级地震
2016-12-25	23:05	23:59	55	震荡波	5	17 852	智利 7.6 级地震

本井同震曲线表现形态多种多样,近震一般表现为阶跃或脉冲突跳,远震一般记录形态为完整的水震波,如图 1 所示,永安观测井 SWY-II 型数字式水位仪记录到的 2015 年 09 月 17 日 06:54 智利发生的 M_L 8.2 级远震水震波,震中距永安观

测井距离为 18 957 km,从图 1 中可以看出,永安观测井同震变化显著,该井于 07 时 43 分至 08 时 42 分记录到了最大双振幅 88 mm 的同震震荡波,震荡持续时间为长达 59 min,由于远震面波丰富,因此此次记录波形包含完整的首波及面波。

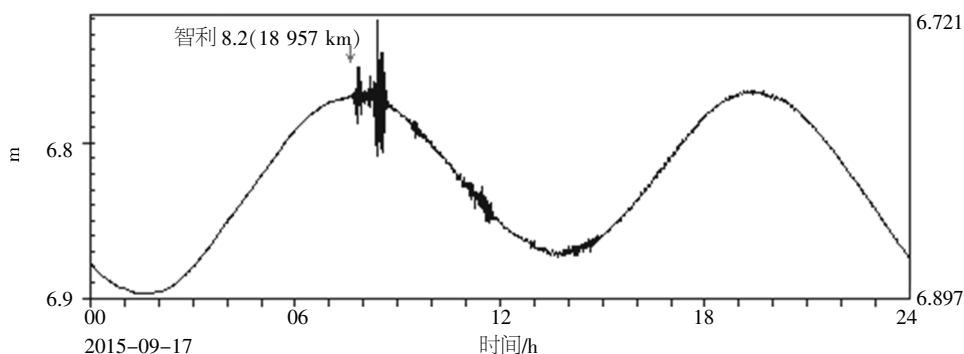


图 1 智利 M_L 8.2 级地震

Fig.1 Chile M_L 8.2 earthquake

而台湾与福建省相邻,距离 ≤ 600 km,因此永安观测井 SWY-II 型数字式水位仪能清晰记录到该区 $M_s \geq 5.0$ 级近震^[7],如图 2 所示 2016 年 02 月 06 日 03:57 台湾高雄市发生 M_L 6.7 级地震,水位

仪记录到的水位同震变化曲线及其一阶差分曲线,震中距永安观测井距离为 465 km,水位曲线表现为向下阶跃的变化形态。

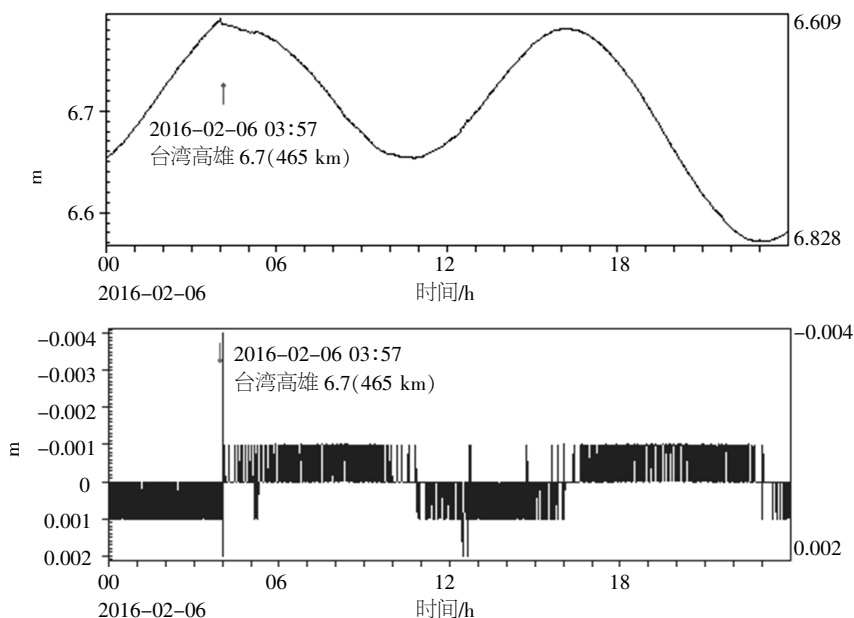


图 2 台湾高雄市 M_L 6.7 级地震

Fig.2 Taiwan kaohsiung M_L 6.7 earthquake

2.3 主要影响因素

气候变化是影响井水位的主要自然因素,主要表现为降雨量变化和气压变化,在本井主要表现为降水干扰。

降雨是地下水补给最主要的来源,降雨入渗

补给地下水受到降雨量、包气带岩性、地下水埋深等因素影响。地表水的渗入补给,发生在地表水位高于地下水面的河谷地区,常见于一条河流的上游地区,特别是在洪水季节^[1]。本井位于燕江支流高阶地区,上游距测点约 25 km 处有一水库,

水位受降水影响表现为遇到降雨或上游水库泄洪，会明显上升，统计井水位年变幅度与降水量的相关性，结果如表 4，二者相关系数在 0.30~0.60 之间，呈现一定的正向相关性。

表 4 水位与降水量相关系数表
Table 4 The correlation coefficient of water level and rainfall

年份	水位年变幅/mm	年降水量/mm	相关系数
2014	436.4	736.9	0.59
2015	515.3	1731.8	0.30
2016	539.0	1999.1	0.27

图 3 为 2015 年 4 月 1 日至 2015 年 6 月 30 日永安井水位日均值与降雨量日均值对比图，可以看出两者呈正比关系，其中 5 月 19 日至 5 月 20 日降雨总量达到了 160.4 mm，19 日 16: 00 开始观测井上游安砂水库泄洪，泄洪量 3 000 m³/s，除此之外未发生地震及其他干扰因素，井水位幅度突升 430 mm，水位日均值曲线呈现脉冲变化。

从对2014 年 1 月 1 日至 2016 年 9 月 15 日水位数据进行五日均值一阶差分结果也可以看出

(图 4)，水位五日均一阶差分超过 2.5 倍均方差控制线部分都是强降雨干扰引起水位突升所导致的。如前所述，水位受到降雨的影响如此显著，究其原因有以下两点：(1) 从井孔内构造来说，本孔含水段在 70~552 m 处，89.2 m、118.0 m、129.0 m 处存在裂隙，成孔时注水实验显示轻微漏水，因此，大范围降水会导致地下水补给能够直接进入井孔。(2) 降雨量大、上游水库泄洪，直接导致永安盆地地下水水量增加，在含水层中产生高水位，地下水灌入井孔。

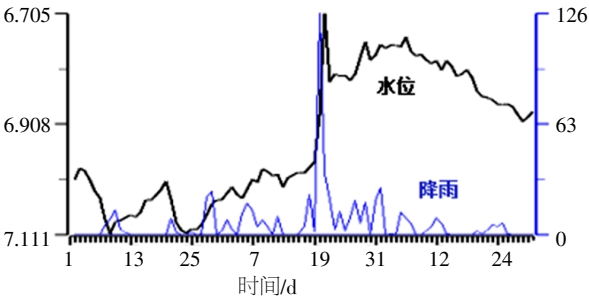


图 3 水位日均值与降雨量日均值对比图
Fig.3 Contrast figure of the daily average between water level and rainfall

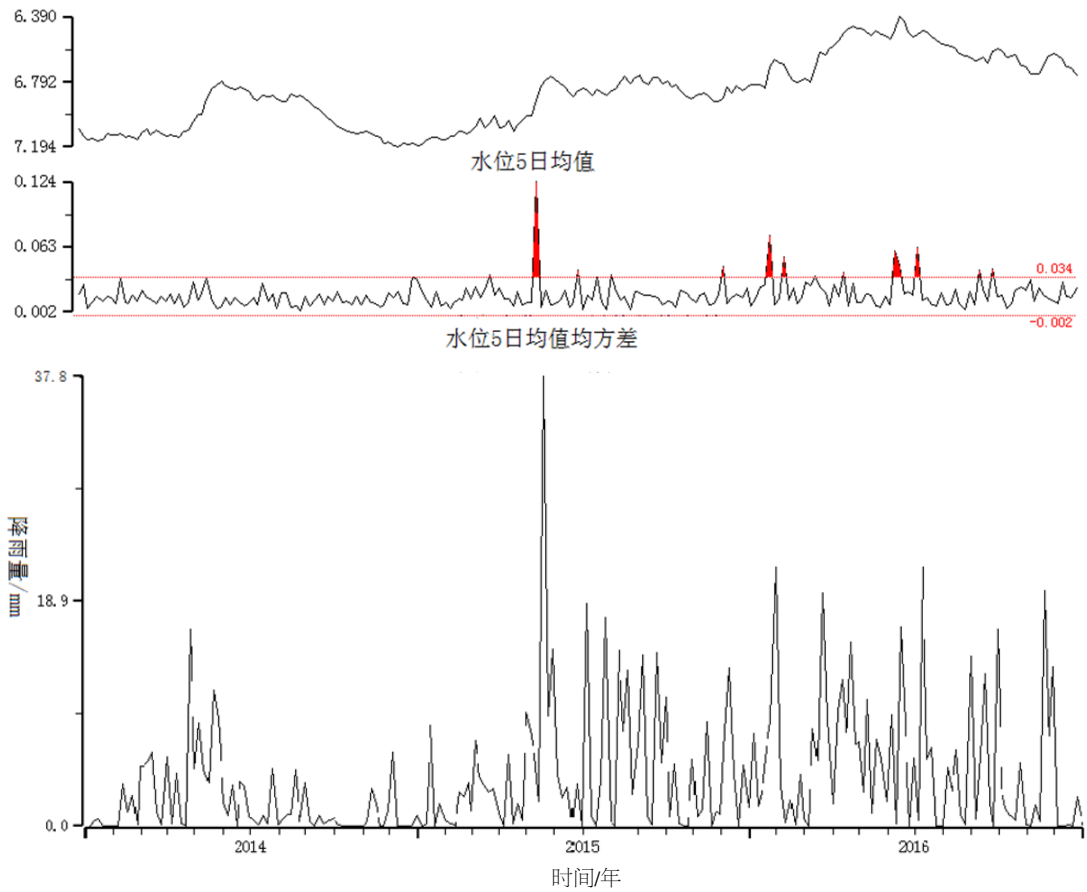


图 4 水位五日均值一阶差分图
Fig.4 The first order difference of 5 day average of water level

气压每变化 1 hPa 所引起的水位变化量,称为井水位气压效率,单位为 mm/hPa,它是反应井孔水位的气压效应强弱的一个重要指标^[9]。对永安井水位与大气气压进行相关分析,如图 5 所示为 2014—2016 年水位与大气气压图,表现为当大气压力增大时井水位下降,大气压力变小时井水位上升,二者负相关明显。随机抽取 2016 年水位、气压数据,作相关分析,分析结果见表 5,可以看出井水位与气压的相关性在不同时段是有差异的,相关性不稳定,总体呈现负相关。

表 5 水位与气压相关系数

Table 5 The correlation coefficient of water level and Air pressure

时间	相关系数
2016-01-01~2016-03-31	-0.394
2016-04-01~2016-06-31	-0.066
2016-07-01~2016-09-31	-0.411
2016-10-01~2016-12-31	-0.587

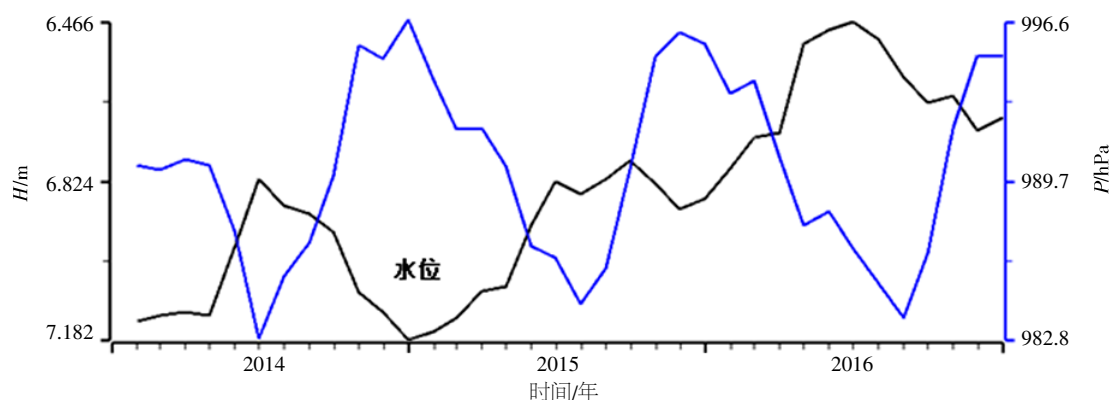


图 4 水位气压效应

Fig.4 Water pressure effect

3 井水位动态分析其地震前兆效能评估

3.1 水位年动态分析

井水位的年动态曲线是以月均值为基础绘制的,以月均值为样本绘制井水位多年动态曲线,

如图 6 所示,从图中可以看出,数字化水位观测 3 年井水位年变规律清晰,呈现夏高冬低的变化形态,总体呈现出趋势上升形态。井水位年变幅 0.4 m 左右,因此有望在破坏性地震的中期或中短期前兆监测中发挥一定的效能。

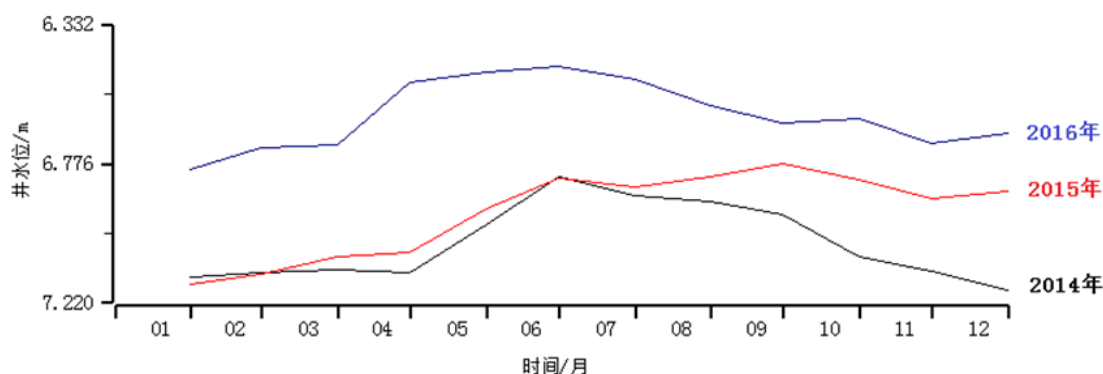


图 6 永安井水位月均值动态曲线图

Fig.6 The dynamic curve of monthly mean of Yongan well

3.2 水位月动态分析

水位月动态分析是以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^[8]。分析结果表

明,月动态规律不清晰,很难识别出转折、脉冲、阶变等具有短期预测意义的前兆异常。

3.3 水位的日动态分析

以井水位时均值绘制水位日动态曲线,井水位时均值动态最显著的特征是地球固体潮汐效应,

随机抽取 2016 年 01 月 01 日的数据进行分析,如图 7 所示,水位随潮汐引力的大小升降变化十分显著,二者相位基本一致。说明了,井水位对地壳应力-应变的相应具有很高的灵敏度,为识别短期和短临前兆异常提供了可靠的动态背景^[9]。

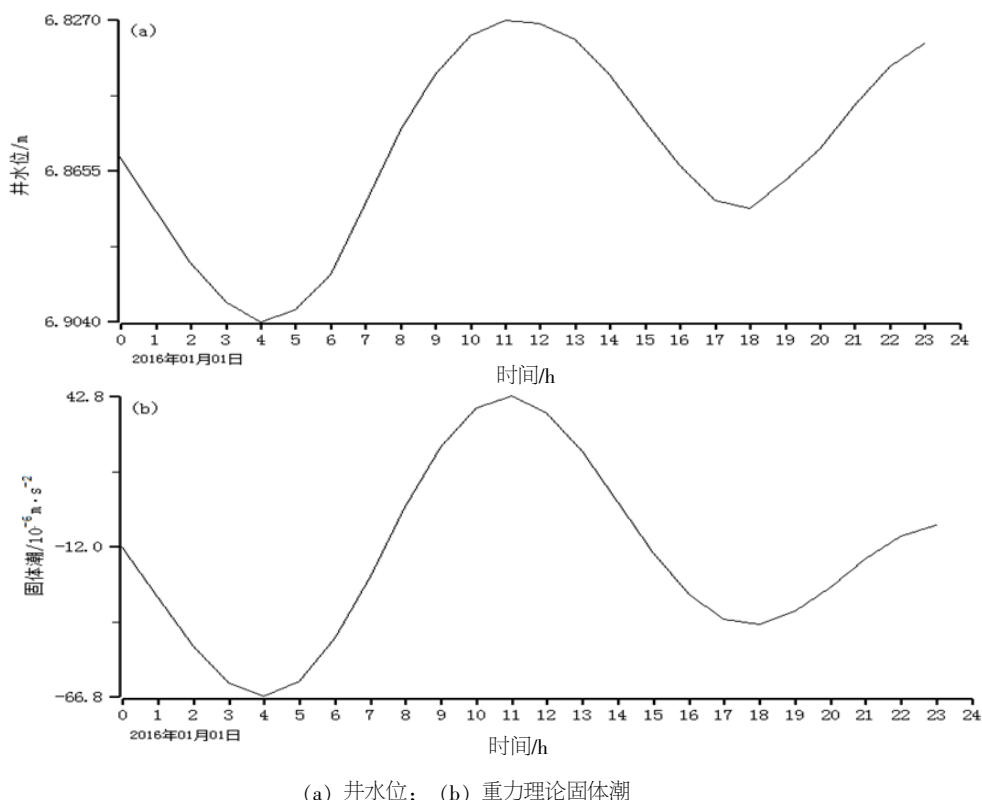


图 6 水位时均值与重力理论固体潮时值动态对比曲线图

Fig.6 Dynamic contrast curve of water level and the theoretical solid tides of gravity

4 结语

本文通过永安井 SWY-II 型数字式水位仪 3 年观测情况分析及其地震前兆效能评估,得到:

(1) 数字化水位固体潮调和计算得出 M2 波月潮汐因子值 ≥ 3.0 ,井水位在潮汐作用下含水层体应变的响应灵敏度达到 2.7×10^{-10} (体应变)/1 mm (水位),潮汐因子较大,潮汐效应明显,相应灵敏度高,表明本井潮汐响应能力较强,观测资料精度较高。

(2) 综合同震响应情况分析,本井数字化水位观测记震能力较好,在地震前兆监测工作上能发挥一定的价值。

(3) 自然干扰因素中,本井主要表现为降水干扰,井水位年变幅度与降水量的相关系数在 0.20~0.60 之间,呈现一定的正向相关性,五日均

值分析也显示超过 2.5 倍均方差控制线部分都是强降雨干扰引起水位突升所导致的,究其原因可能是受井孔本身构造及大范围降水后永安盆地地下水水量增加后在含水层中产生高水位,使得地下水灌入井孔两方面的影响。

(4) 从井水位的动态分析看,水位潮汐十分显著,相位清晰,幅度较大,为识别短期和短临前兆异常提供了可靠的动态背景。有明显的年变规律,呈现夏高冬低形态,井水位年变幅 0.4 m 左右,因此有望在破坏性地震的中期或中短期前兆监测中发挥一定的效能。

以上结果表明,该观测井在点位选择、观测环境等因素条件合适。水位观测曲线能反映其具有的固体潮特性,观测日变趋势明显,观测效果较好。该观测井具备了采用全自动数字化地下流体监测仪正式开展水位、气象要素等多测项的条

件,通过对资料的初步评估,值得指出的是,由于数字化观测的时间还不够长,井水位月动态规律不稳定的问题,可能是由多种因素造成的,必须对更多更长时间的数字化观测资料进行分析和研究,提高该井地下水监测质量,从而在地震前兆监测中发挥效能。

参考文献:

- [1] 中国地震局监测预报司. 地震地下流体理论基础与观测技术[M]. 北京:地震出版社,2007.
- [2] 车用太,刘五洲,鱼金子,等. 井水位对地壳应力-应变响应灵敏度的研究[J]. 地震,2003,23(3):113-120.
- [3] 张昱,刘小凤,邵辉成,等. 甘肃"十五"数字化水位观测资料分析及地震前兆监测效能评估 [J]. 地震研究,2010,33(4):281-287.
- [4] 史舜华,丁学仁,王志鹏,等. 福建省地震监测志[M]. 北京:地震出版社,2005.
- [5] 何案华,贾鸿飞,王宝锁,等. WYY-1 型水位仪的研制[J]. 大地测量与地球动力学,2012,32(6):156-159.
- [6] 刘佳丽. 岫岩 1 号井数字化水位观测内在质量分析[J]. 防灾减灾学报,2013,29(1):64-68.
- [7] 廖丽霞,王玫琳,吴绍祖. 福建省流体台网井水位的同震效应及其地震预测意义[J]. 地震学报,2009,31(4):432-441.
- [8] 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):103-112.
- [9] 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.