

解晓静, 李 盛, 卢启明, 等. 海南琼海加积井水位受万泉河水位的影响特征及震例分析[J]. 华南地震, 2015, 35(3): 25–33. [XIE Xiaojing, LI Sheng, LU Qiming, et al. Characteristics of Jiayi Well Water Level of Qionghai City Influenced by Wanquan River Water Level in Hainan and Its Earthquake Example Analysis[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(3): 25–33.]

海南琼海加积井水位受万泉河水位的 影响及震例分析

解晓静, 李 盛, 卢启明, 余 宙
(海南省地震局, 海口 570203)

摘要: 利用逐步回归法分析了琼海加积井受万泉河水影响各因素, 可知地下井水受河水的影响, 其距离越近影响越大; 在日均值数据背景下, 相比固体潮、气压、降雨量, 河水位对井水位的影响最大; 河流潮汐与固体潮汐效应, 以及河水位对地下井水影响的滞后时间在不同时期下是不同的。以 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震为震例分析背景, 得出井水位与万泉河水位小波细节 3 阶中在震前或震后均有较显著的震兆异常反应, 值得跟踪类似的震兆异常。

关键词: 井水位; 水位; 影响特征; 小波细节分析; 琼海加积; 万泉河

中图分类号: P315.723 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2015) 03-0025-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.03.004

Characteristics of Jiayi Well Water Level of Qionghai City Influenced by Wanquan River Water Level in Hainan and Its Earthquake Example Analysis

XIE Xiaojing, LI Sheng, LU Qiming, YU Zhou
(Earthquake Administration of Hainan Province, Haikou 570203, China)

Abstract: The paper analyzes the factors of Jiayi well influenced by Wanquan river by using the stepwise regression method. The results show that: the closer the distance between the river and well, the greater the influence of underground well water impacted by the river impact; in the daily mean data background, comparing with the tide, atmospheric pressure, rainfall, the effects of river level to well water level is biggest; for river tide, solid tide effect, and the river level, the lag time effect on the underground water is different in different period. Taking Wenchuan earthquake as example analysis background, the paper gets the significant precursor anomalies in 3-order wavelet details of the well water level and Wanquan river water level before or after the earthquake, which is worth tracking.

Keywords: Jiayi well water level; Wanquan river water level; Influence characteristics; Wavelet details analysis

收稿日期: 2014-09-25

基金项目: 中国地震局“三结合”项目(201345)资助

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

深层地下水是一种含有多种地球信息的物理量载体,利用深井地下水位异常动态来预报地震,无论在理论上,还是在实践上已证明是一种有效的方法。地下水本身含有多种有用信息,但同时又受着多种自然的、人为的因素影响。另外,地下水位的升降变化,还取决于井口所处的地理环境、地质构造、含水层的岩性、成井工艺等诸多因素。因此,要从地下水中得到地震前兆异常信息,去伪存真,取决于我们对井水位变化特点的研究和水位观测资料的处理分析水平。

上世纪 80 年代以来,我国地震地下流体学界对地下水动态及其影响因素做了全面、深入的研究,出版了多部专著和发表了大量论文。近十余年来,人们引入小波分析方法研究了地震前兆的多种有关问题。顾申宜等人研制的“水位、水氡小波分析中期异常提取方法”,在地震年度预测中

具有较大的可操作性和实用性。

前人关于地下水动态及其影响因素的研究成果,为我们分析研究琼海加积井水位与万泉河水位的的关系提供了理论和方法。本文还依据小波分析方法,讨论了 2008 年汶川 8.0 级地震前加积井水位的异常变化。

1 加积井与万泉河的地理地质简况

琼海加积井位于海南岛中生代隆起构造的东部边缘,地处北东向南林-清澜大断裂的附近,而北西向东寨港-清澜断裂在它的东北方约 20 km 处通过。地理坐标为北纬 19.24°、东经 110.45°,井孔标高 14.06 m,井深 525.93 m。地层岩性为白垩系上统砂砾岩,地下水类型为断层隙承压水,万泉河位于该井西南约 400 m 处,加积井处于万泉河水的中下游地带(图 1)。该地区属热带海洋气候,春夏多雷雨,秋季为台风季节。



图 1 琼海加积井与万泉河地形分布图

Fig 1 Terrain distribution map of Jiayi well and Wanquan river

2 加积井水位主要影响因素分析

2.1 万泉河水位变化及其与加积井水位的关系

河流是地表水表现的一种形式。南方的河水主要来自雨水和地下水,在靠近河流的地方,地下水有可能获得地表水的补给,或向地表水排泄,两者的关系是十分密切的。在雨季时,降雨落到地表后,部分经表面径流汇集到一起,流入江河,使河水位上升,随着降雨的增多,便形成丰水期。

在干旱季节,降雨量极微,河水实际上不能获得降水的补给或获得量极少,这时河水位下降,形成枯水期。河流水位与地下水位变化随季节相互依赖,属同向变化。在雨季,河水补给地下水的强度取决于江河水位与地下水位的相对高差、洪水延续的时间。水位相对高差越大,洪水延续的时间越长,补给量就越大。另外,河流的流量、含水层的透水性、以及河水与地下水存在水力联系地段的长短、河流水系与地下水含水层的距离

等,也是相互间影响的主要因素。

河流水位与井水位、气压、降雨、气温等气象因素一样,存在着类似的年变化季节脉动。如图2所示,万泉河水位在一年内有一个高水位期和一个低水位期,高低水位之间的变幅一般只有几米。在海南岛地区,一般来说,河水位的季节变化与降雨基本一致,7~10月为高水位期,即洪水期,此时也是降雨集中的季节。11月至翌年的3月为低水位期,即枯水期,亦即是降雨的干旱季节。河水位年动态曲线较平缓,呈现一种渐变的过程。

从图2可以看出,深井水位与河水位曲线形态基本一致,但井水位的年变曲线比河水位的年变曲线更平缓,而河水位的年变曲线比降雨的年变曲线平缓,河水位变化曲线可看作是经自然滑动的降雨曲线,它反映了该区及上游区降雨量对地表水影响的总和。

2.2 逐步回归影响特征分析

下面,利用相关分析法研究河水位与井水位距离的关系。万泉河与各井分布情况如图3。

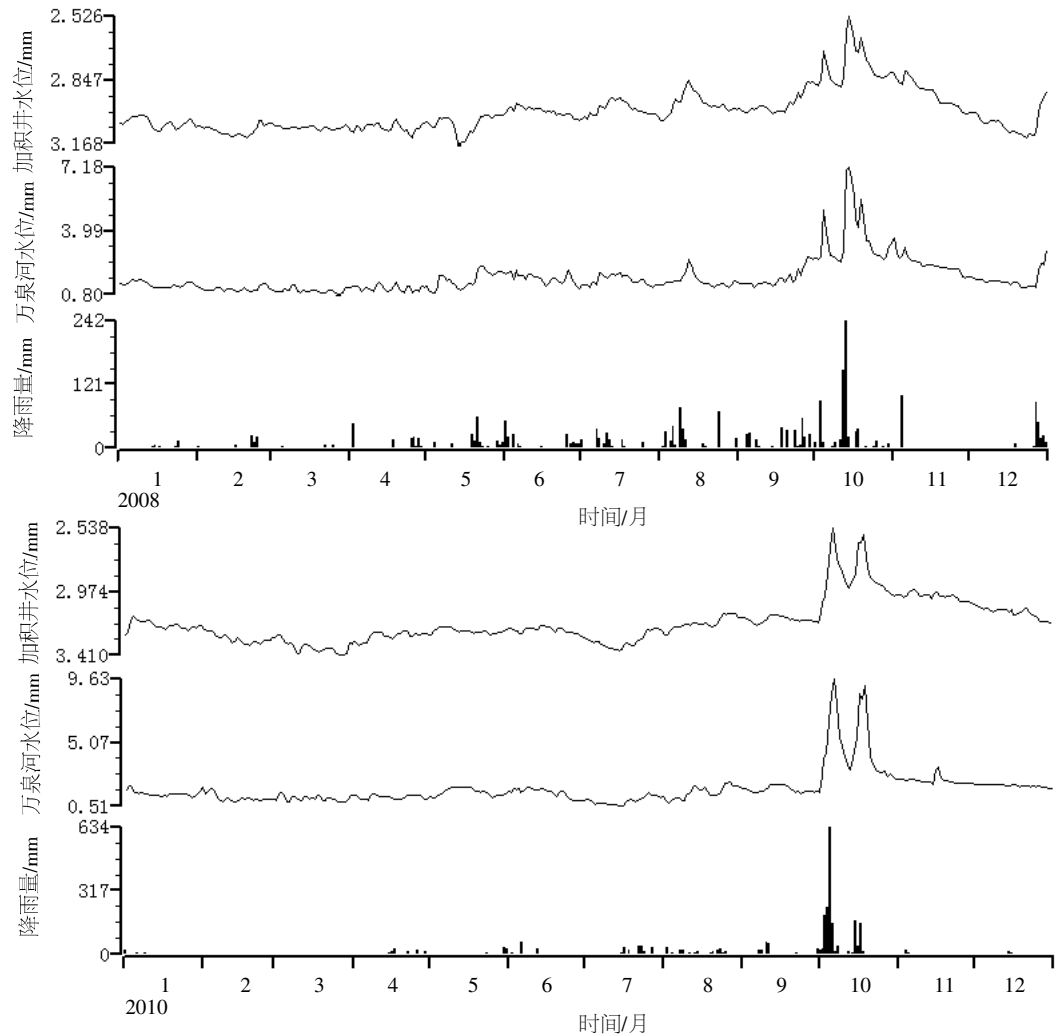


图2 2008、2010年加积井、万泉河水位与降雨日均值图

Fig.2 The daily average value map of water level of Jiaji well, Wanquan river and rainfall in 2008 and 2010

以2010年日均值数据为例,分别计算万泉河水位与琼海加积井、海口ZK26井、文昌潭牛井水位之间的相关系数(表1)。从表1和图3可见,地下水受河水的影响随着离河流的距离增大而减少,万泉河离琼海加积井最近,文昌潭牛井次之,而离海口ZK26井最远,因而其相关系数多数(占

83%)依次呈递减状态。这表明万泉河水位与加积井水位之间具有密切的关系。

表2、3列出了加积井水位与万泉河水位以及气压、固体潮理论值、降雨量四个因素日均值的逐步回归分析结果。从表中,我们可以看到:

(1)以一年为单位的资料作统计分析,加积井均是以河水作为最重要因素,降雨次之。

表 1 万泉河水位与三口井水位日均值相关系数(以 2010 年为例)

Table 1 The correlation coefficient of daily mean value of Wanquan river water level and the water level of three wells(for example in 2010)

时间/年-月	相关系数		
	琼海加积井水位	文昌潭牛井水位	海口 ZK26 井水位
2010-01	-0.025 3	0.366 5	-0.612 9
2010-02	-0.764 4	-0.626 7	-0.437 3
2010-03	-0.631 9	-0.291 0	-0.226 9
2010-04	-0.357 4	-0.003	-0.083 1
2010-05	-0.416	-0.269 3	-0.698 2
2010-06	-0.738 8	-0.718	-0.619
2010-07	-0.922 1	-0.886 5	0.704 3
2010-08	-0.878 2	0.773 6	0.640 7
2010-09	-0.865 3	0.502	-0.203 5
2010-10	-0.929 9	-0.502 4	-0.366 3
2010-11	-0.559 8	-0.254 5	-0.196 1
2010-12	-0.863 5	-0.808	-0.850 1
年均值	-0.662 7	-0.500 1	-0.469 8

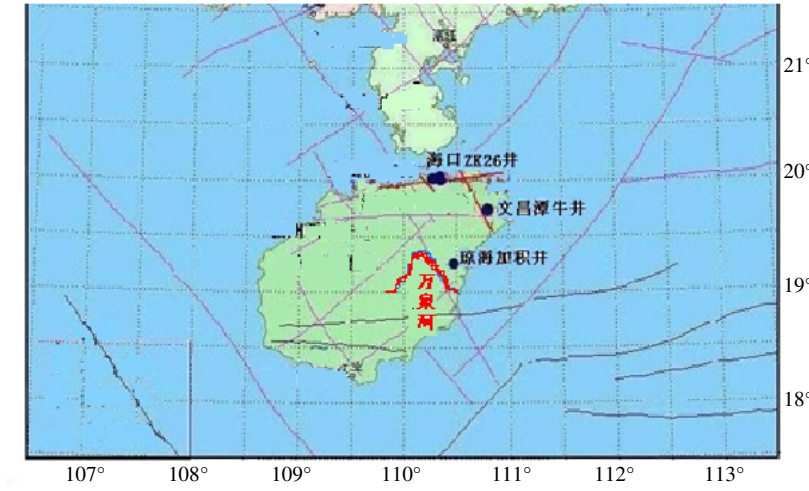


图 3 万泉河与各井分布图

Fig.3 The distribution map of Wanquan river and each well

表 2 加积井水位与固体潮、气压、降雨、万泉河水位日均值逐步回归

Table 2 The stepwise regression of daily mean value of Jiaji well water level and tidal, pressure, rainfall, Wanquan river water level

时间	单相关系数				复相关系数	剩余标准差
	固体潮	气压	降雨	河水位		
2010-01	0.467 3	0.153	0.295 6	-0.025 3	0.467 3	0.025 2
2010-02	0.286 6	0.048	0.361 8	-0.764 4	0.836 7	0.017 2
2010-03	0.394 1	0.661 8	0.341 6	-0.631 9	0.836 9	0.022
2010-04	0.279	0.361 6	-0.095	-0.357 4	0.513 3	0.025 4
2010-05	0.065 3	0.346 8	-0.003 2	-0.416	0.560 2	0.013 8
2010-06	0.257 7	0.031 2	-0.048 5	-0.738 8	0.777 1	0.013 4
2010-07	-0.181	0.174 6	-0.155	-0.922 1	0.931 1	0.018 2
2010-08	0.202 9	0.214 3	0.222 4	-0.878 2	0.968 7	0.011
2010-09	-0.415	-0.073	0.056 6	-0.865 3	0.916 8	0.008
2010-10	0.310 9	0.41	-0.530 6	-0.929 9	0.951 5	0.045 8
2010-11	-0.448 2	0.203 8	-0.191 5	-0.559 8	0.740 7	0.016 9
2010-12	-0.425 6	0.281 1	-0.090 6	-0.863 5	0.926 1	0.014 6
年均值	0.311 1	0.246 6	0.199 4	-0.662 7	0.785 5	0.019 3

表 3 加积井水位与固体潮、气压、降雨、万泉河水位日均值逐步回归

Table 3 The stepwise regression of daily mean value of Jiaji well water level and tidal, pressure, rainfall, Wanquan river water level						
时间	单相关系数				复相关系数	剩余标准差
	固体潮	气压	降雨	河水位		
2010-01~02	0.055 7	-0.546 9	-0.031 6	-0.695	0.754 2	0.036 7
2010-03~05	-0.228 6	0.657 3	-0.187 7	-0.681	0.808 8	0.033
2010-06~08	0.139 1	0.108 4	-0.019 4	-0.857 4	0.863 4	0.032 5
2010-09~11	0.081 2	0.089 9	-0.509 6	-0.915	0.946 5	0.049 5
2010-01~12	0.092	-0.079	-0.411 3	-0.886 2	0.908 3	0.059 9

(2) 以一个月为单位作统计分析时, 河水因素作为主要影响因素的月份, 占 11/12。

(3) 以季节为单位作统计分析时, 加积井无论在旱季或雨季, 万泉河水位都是加积井水位主要影响因素。

2.3 潮汐效应及滞后影响特征分析

地下水位的变化常常滞后于地表水位的变化, 滞后的时间各地不同, 即使是同一口井与同一条河水位滞后的时间也会随各种因素的不同而不一

致。除了因季节性的变化, 河流对地下水有重要影响。众所周知, 江河水位由于受到太阳、月亮的潮汐引力的作用, 在日变化上存在高潮、低潮的变化, 也有双峰双谷或单峰单谷的起伏, 其波形形态与重力固体潮相同, 但方向相反。如果深井离江河比较近, 且河水与含水层之间具有水力联系, 则深井水位的变化既受固体潮的影响, 也受江河水潮的影响, 水位曲线是这两种形态大体一致、方向相反波的合成。下面选取枯水期的 2008、2010 年 2、3 月及丰水期的 2008、2010 年

表 4 加积井水位与万泉河水位、重力固体潮理论值的整点值滞后相关系数

Table 4 The correlation coefficient of whole point value lag of Jiaji well water level, Wanquan river water level and theory value of tidal gravity								
时间	潮汐类型	滞后时间/h						
		0	1	2	3	4	5	6
2008-02	河流潮汐	-0.257 1	-0.258	-0.260 4	-0.263 2	★-0.265 4	-0.264 8	-0.260 7
	固体潮汐	★-0.847 8	-0.766 5	-0.519 7	-0.167 4	0.205 1	0.509 2	0.674 4
2010-02	河流潮汐	-0.453	-0.454 2	-0.458 7	-0.465 1	-0.470 3	★-0.472	-0.469 8
	固体潮汐	★-0.749 2	-0.717 2	-0.519 3	-0.205	0.149 7	0.459 9	0.652 4
2008-03	河流潮汐	★-0.099	-0.085	-0.071 1	-0.059 7	-0.051 5	-0.047	-0.046
	固体潮汐	★-0.969 3	-0.863	-0.564 1	-0.144 5	0.294	0.645 2	0.826 2
2010-03	河流潮汐	★-0.416 3	-0.407 1	-0.398 2	-0.390 5	-0.385 1	-0.381 2	-0.378 7
	固体潮汐	★-0.689 1	-0.635 6	-0.430 9	-0.125 3	0.205 2	0.479 5	0.631 5
2008-10	河流潮汐	★-0.921 8	-0.919 4	-0.915 7	-0.911	-0.905 5	-0.899 5	-0.893 2
	固体潮汐	-0.298 4	★-0.308 9	-0.248 1	-0.130 3	0.016	0.155 7	0.255 6
2010-10	河流潮汐	-0.903 7	-0.906	-0.907 3	★-0.907 8	-0.907 6	-0.906 8	-0.905 6
	固体潮汐	★-0.234 1	-0.223 4	-0.157 2	-0.050 9	0.070 2	0.177 4	0.245 3

10 月加积井水位与万泉河水位、重力固体潮理论值的整点值计算滞后相关系数(表 4)。

加积井对河流潮汐和固体潮汐效应及滞后时间是不同的, 相关系数最大时所对应的时间即滞后时间。图例给出了 2010 年 2 月及 10 月加积井水位、万泉河水位与重力固体潮理论值波形图(图 4)。

由表 4 及图 4 可知, 枯水期的 2、3 月份, 其井水位与河流潮汐的相关系数明显小于与固体潮

汐的, 故井水位变化以反映固体潮汐为主; 而丰水期的 10 月份, 则井水位与河流潮汐的相关系数明显比与固体潮汐的相关系数大很多, 故以反映河流潮汐为主, 这充分说明了丰水期降雨补给江河水以后再影响到深井水位的变化。

同样处于枯水期的 2、3 月份, 其 2008、2010 年 2 月份井水位日变化形态比河水位分别滞后 4 h、5 h, 而 3 月份均未滞后; 处于丰水期的 10 月份, 其井水位日变化形态比河水位分别滞后

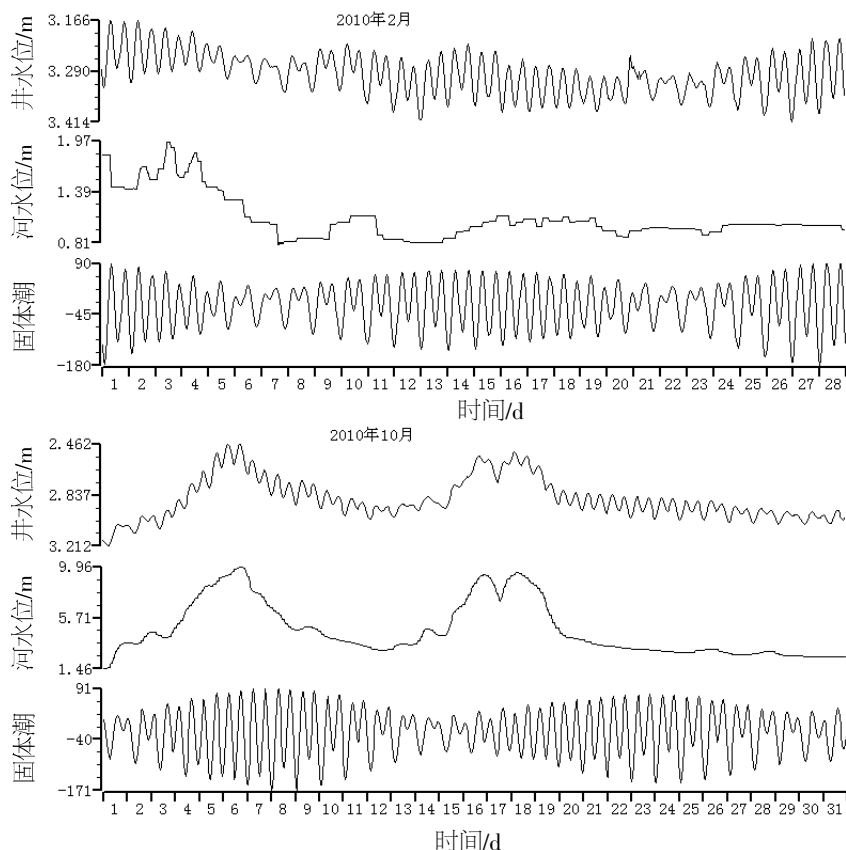


图4 2010年2、10月加积井水位、万泉河水位、重力固体潮整点值图

Fig4 The whole point value graph of Jiayi Well water level, Wanquan river water level and tidal gravity in February and October, 2010

0 h、3 h。亦即井水位滞后于河水水位约数小时达到最大相关，且日变化形态呈同向变化。而井水位基本上未滞后于重力固体潮汐，日变化形态也呈正相关。

3 井水位与河水位的震例分析

3.1 小波分析理论简介

数字化前兆变化过程是典型的观测信号非平稳过程，具有不稳定性，变化快等时频特点。因此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^[1]。

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； ψ 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； φ 和 ψ 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。

3.2 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化动态。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^[2]。

3.3 小波细节短期异常震例分析

选用加积井水位与万泉河水位观测资料,以 2008 年 5 月 12 日汶川大地震为震例分析背景。因加积井的井孔条件决定其动态变化类型属于降水补给型,井水位年变化受气象、开采等因素影响明显。在选取分析数据上,因 9、10 月份的大降雨很大程度上影响了井水位、河水位的正常动

态,为此,本次异常震例的分析截取了较稳定的 1~8 月份数据。针对本次异常分析,取小波值超出 2 倍标准差控制线为异常判定指标,并关注其细节 1~3 阶的分析图形。如图 5 所示,分别给出了 2008 年 1~8 月加积井水位、万泉河水位日均值与气压、降水及加积井水位小波细节各阶对应分析图。

由图 5 井水位原始数据及小波细节 1 阶可看出,井水位除了受 5 月 12 日汶川地震影响有较大幅度的同震响应外,其 6、7、8 月中旬的较大起伏形态是受降水影响所致,而 4 月中下旬呈现的水位较大幅度影响也与气压、降雨形态相对应。但是,在细节 3 阶中,便只剩 4 月份的超出 2 倍标准差的异常及 5 月份同震响应部分。在此,值得我们关注的便是 4 月份的超差异常,虽然其受

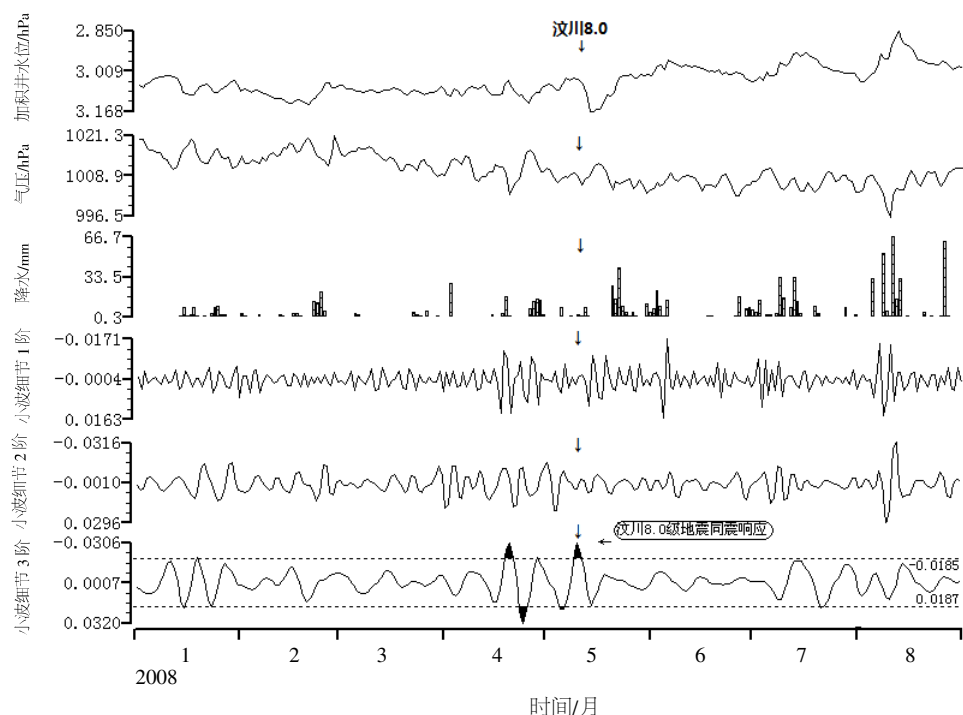


图5 加积井水位与气压、降水及小波细节对应分析图

Fig.5 The corresponding analysis figure of Jiayi well water level, pressure, precipitation and the wavelet details

气压、降雨有一定影响,但是在同一个细节 3 阶中,因其它同类因素影响而呈现的小波值并无超差异异常,且相较其它部分,4 月份的超差异异常反而更加突出。而之后的 5 月 12 日便发生了汶川 8.0 级的大地震,推测该超差异异常可能与大地震的发生有一定的关系。

按照同样方法,给出了万泉河水位与加积井测点气象仪观测的气压、当地降水及小波细节各

阶对应分析图(图 6)。由前面的分析已知万泉河水位与加积井水位年日均值相关系数达到 0.908 4,由图 6 可看出,河水位也受气象因素影响较大,其水位年日均值形态均呈气压、降水影响动态型。经水位小波细节分析,细节 1、2 阶显示因气象因素的影响而导致小波值多处超 2 倍标准差控制线,但细节 3 阶中,这些干扰异常超差的部分基本上不存在,而 4 月底至 5 月间的两次超差异异常便更

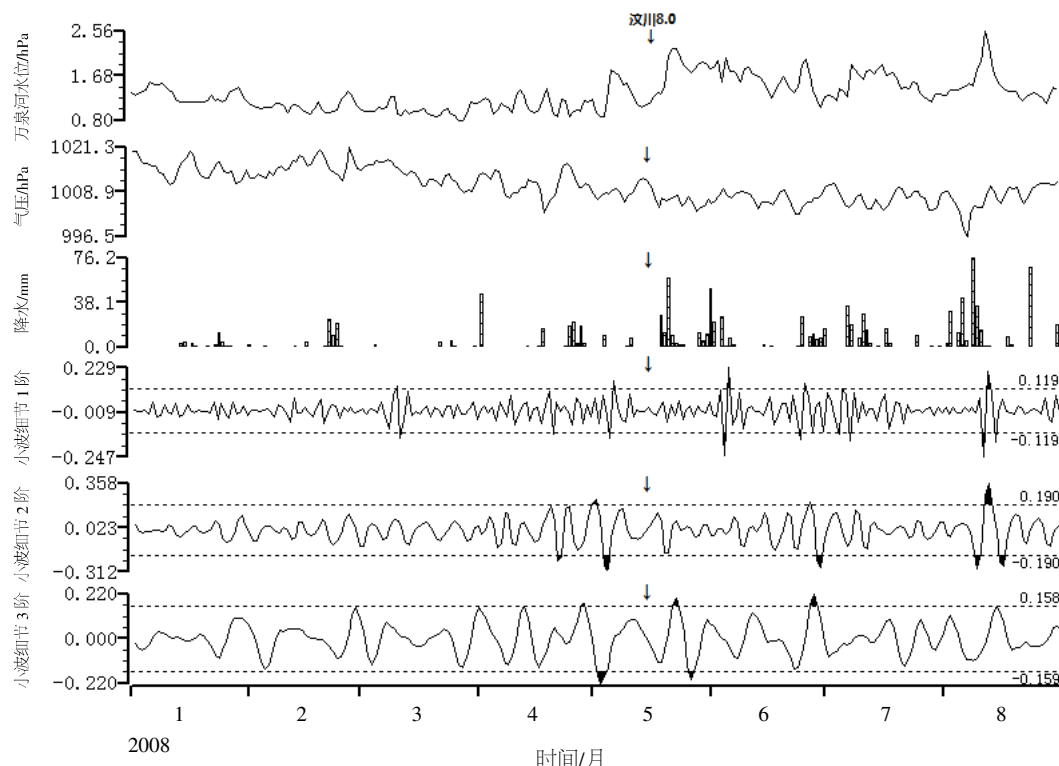


图6 万泉河水位与气压、降水及小波细节对应分析图

Fig.6 The corresponding analysis figure of Wanquan river water level, pressure, precipitation and wavelet details

为突出,与之后发生的汶川大地震,似乎有震前异常及震后调整或异常的对应关系,值得关注。

以上分析可知,水位经小波细节分析后,其小波细节3阶数据曲线对于提取相关大震震前的短临异常或震后响应效果较显著。且以汶川地震为震例分析背景,该处理方法作用于相关性较好的同时段井水位与河水位数据,其提取的震前或震后异常反应也较一致。我们知道,河水位受外界影响因素诸多,且水文站收集的河水相关资料有限,那么在排除掉外界影响的情况下,可视为该河水位具有与近处井水位同步的前兆异常反应。为此,在以后的观测中,应密切跟踪分析类似的震兆异常反应,特别要关注井水位与河水位同步出现异常的状况^[10-15]。

4 结语

以上分析可知,琼海加积井水位受万泉河水位的影响,有以下6个特征:

(1) 万泉河水位的变化过程,相当于滑动了的降雨过程,它比降雨序列更实际地表现出对加积井水位的干扰作用,因此,与加积井水位序列变化较为一致。

(2) 井水位受河水的影响,与它们之间距离密切相关,距离越近,影响越大。

(3) 多尺度逐步回归分析结果表明,在气压、固体潮、降雨及河水各种影响因素中,万泉河水对琼海加积井的影响最为显著。

(4) 加积井水位与万泉河水位日变化形态呈同向变化,且井水位滞后于河水位约数小时达到最大相关;而井水位与重力固体潮日变化形态也呈正相关,但井水位基本未滞后于重力固体潮。

(5) 加积井水位与万泉河水位随季节变化相互依赖,呈同向变化。

(6) 加积井对河流潮汐和固体潮汐效应是随季节而变化的,其枯水期,井水位的固体潮汐效应显著;而丰水期,则以反映河流潮汐为主。

另外,以2008年5月12日汶川地震为震例分析背景,同时对该震例时段期间的加积井水位与万泉河水位进行小波细节分析,得出两水位细节3阶中在震前或震后均有较显著的震兆异常反应,值得在以后的观测中,继续跟踪该类似的震兆异常。

因万泉河水资料收集的局限,本文对其影响特征及震例分析的内容较单薄,在此之后,将尽

可能地收集较全面的资料,有助于更全面的分析研究,为今后利用地下水位预报地震提供更多的参考依据。

参考文献:

- [1] 顾申宜,张慧.水位、水氡小波分析中期异常提取方法[J].地震学报,2011,33(4):471-482.
- [2] 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,2010.7
- [3] 廖华康.深井水位受江河水位的影响及排除[J].华南地震,1989,9(3):52-61.
- [4] 刘春国,赵红丽,谷元珠,等.中国地震地下流体台网中心技术系统[J].地震地质,2002,24(3):422-433.
- [5] 刘春国,谷元珠,赵红丽,等.地下流体前兆数据库的质量监控系统研制及其开发技术[J].地震,2002,22(4):74-79
- [6] 刘春国,李正媛,王建国,等.地下流体数据处理与产品加工软件系统设计[J].中国地震,2014,30(2):260-271
- [7] 范雪芳,王吉易,等.汶川8.0级地震前典型流体中期前兆异常的初步研究[J].地震,2009,29(1):132-140.
- [8] 范雪芳,王吉易.地下流体中期和中短期前兆异常的四种种判定方法[J].地震,2002,22(4):136-139.
- [9] 范雪芳,刘耀炜,陆明勇,等.华北地区水位与水氡中期、中短期前兆异常特征研究[J].地震研究,2010,33(2):147-158.
- [10] 张昱,常青,冯博,等.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
- [11] 刘水莲,全建军,陈美梅,等.水位观测资料的小波变换及异常提取[J].华南地震,2014,34(2):123-132.
- [12] 尤宇星,陈小云,谢文杰,等.泉州地区地下水位观测资料初步分析[J].华北地震科学,2014,32(1):65-72.
- [13] 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):334-341.
- [14] 李华,杨林根.白安14井地下水观测资料变化的原因剖析[J].华南地震,2013,33(3):85-91.
- [15] 王鑫.兴济1井水位脉冲型变化与地震活动的关系研究[J].华北地震科学,2014,32(4):44-49.