

地下水位中地震前兆信息提取方法研究^①

赵 栋¹, 易立新¹, 王广才², 张 玺¹

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083)

摘 要:地下水位观测值的影响因素包含降雨、气压、固体潮、地质构造作用等。为凸显地质构造作用对地下水位的影响, 需要滤除降雨、固体潮、气压等因素的影响量。本文首先分离地下水位受固体潮、气压作用的影响量; 然后依据降雨影响地下水位可以分为长期和短期变化的思路, 利用基流分割方法对地下水位的两种变化进行分离, 确定地下水位的降雨影响量; 最后分析各分量异常与地震活动性关系, 探查其中包含的地震前兆信息。本文的研究思路为地下水位观测值中地震前兆信息研究提供了一套可供尝试的系统技术方法。

关键词: 地下水位; 固体潮; 气压; 降雨; 基流分割法; 地震前兆

中图分类号: P315.723

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)02-0334-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0334

Research on the Technology of Extracting Earthquake Precursor Information from Groundwater Level

ZHAO Dong¹, YI Li-xin¹, WANG Guang-cai², ZHANG Xi¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. College of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Our country has established an improved seismic underground fluid observation network. Underground water level is an important earthquake precursor factor and is applied to prediction measures. The observation data of groundwater level is an integrated parameter and includes many components determined by such factors as precipitation, atmospheric pressure, Earth tide, and geological structures. To highlight the influence of tectonic forces on groundwater level and to recognize the earthquake precursor information obtained by this parameters must be separated from original observation data. Components influenced by Earth tide and atmospheric pressure can be separated on the basis of a widely used theory. The influence of climate conditions on underground water level at a watershed scale, changes of which are long-term and periodic, can be separated through smooth processing methods. On the contrary, rainfall peaks influence underground water level, which reduces the effects created by structure forces; therefore, the identification of earthquake precursor information is difficult. In order to highlight tectonic forces on groundwater level, it is necessary to separate the peak value of rainfall effects on underground water level.

In our study, we regarded the observation data of groundwater level as a linear combination of all of the components. Changes caused by Earth tide and atmospheric pressure were first sepa-

^① 收稿日期: 2012-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(40930637)

作者简介: 赵栋(1989-), 男(汉族), 山东聊城人, 硕士研究生, 从事城市综合防灾减灾相关研究。

通讯作者: 易立新(1964-), 男(汉族), 甘肃定西人, 教授, 研究领域为地下水资源评价, 地震地下流体和灾害评价理论与应用。

E-mail: yilixin@nankai.edu.cn

rated according to the BAYTAP—G procedure. Then, because quick and slow response existed in the influence of rainfall on groundwater level, these effects were distinguished by applying base flow separation methods. Changes induced by rainfall were separated from groundwater level by using base flow separation methods. By analyzing the relationships between the curve feature of every component and local seismic activities, local earthquake precursor information on groundwater level could be recognized. In this study, we selected as research objects two observation wells including the Deyang Well in Sichuan, one of China's earthquake underground fluid observation networks, the and Tuanjie—1 Well, one of the earthquake underground fluid dynamic monitoring networks located downstream of the Jinshajiang River. Based on the data of underground water level and pressure from the Deyang Well from April 1 to June 30, 2008, we analyzed the changes in curves before and after the $M8.0$ Wenchuan earthquake that occurred on May 12, 2008. On the basis of synchronous observation data of underground water level, rainfall, and pressure of the Tuanjie—1 Well from December 1, 2010, to December 31, 2011, we analyzed the effects of rainfall on water level.

Results show that methods that regarded the underground water level as a linear combination of various factors and separated types of effect value from the original data were effective in practice. In addition, base flow separation methods were effective in reducing peaks of the rainfall influence on underground water level. Thus, earthquake precursor information can be identified more effectively. Once significant change occurs, whether such change is induced by earthquake activities needs to be considered. Through systematic research of a large number of typical earthquake examples, a regional earthquake precursor change model can be created, which can be used for earthquake prediction.

Key words: Groundwater level; Earth tide; Atmospheric pressure; rainfall; Base flow separating method; Eearthquake precursor

0 引言

我国已经建立了比较完善的地震地下流体观测网,地下水位作为重要的地震前兆因子被应用于地震预测实践。地下水位观测值是一个包含降雨、气压、固体潮、地应力场等多种因素影响值的复合参数^[1]。为了从地下水位中探索地震前兆信息,需要从中分离出各种因素的影响量。

当前,固体潮、气压影响值已经可以用比较成熟的理论方法予以分离^[2-3]。流域尺度上气候条件对地下水的影响,曲线形态上表现为趋势性、周期性的变化,可以通过平滑等处理方法予以分离。降雨对地下水的影响表现为与降雨同步或者滞后的峰值。为了凸显构造作用对地下水的影响,识别水位变化中的地震前兆信息,对地下水位降雨影响值予以分离是十分必要的。本文依据地下水位是各种因素作用分量线性组合的思路,首先利用 BAYTAP—G 程序分离地下水位受固体潮、气压作用的影响量;然后依据降雨影响地下水位可以分为长期和短期变化的思路,利用基流分割方法对地下水位的两

种变化进行分离,确定地下水位的降雨影响量。通过研究当地地震活动性与各水位分量关系,探查各分量中包含的地震活动信息,提取本地化的地下水地震前兆信息特征。希望为地震地下流体资料处理提供一种可以尝试的新思路,为地震预测预报工作贡献点许的力量。

1 地下水位影响因素分析

地下水位观测值包含多种影响成分,包括气候、气压、固体潮、降雨、地应力及其他因素等。假定各因素影响值线性组合形成水位观测值,则水位观测值 GL 可以表示为

$$GL = C + P + T + R + G + O$$

其中, GL 为某时刻地下水位观测值; C 为地下水位长期变化趋势分量,即气候对地下水的影响值; P 为大气压力影响量; T 为固体潮影响量; R 为降雨影响量; G 为地应力影响量; O 为包含观测误差的其他因素导致的地下水位变化量。

地下水位常伴有季节性升降。无降雨时期由于

地下水深层入渗、侧向流动等,水位会随着时间的推移逐渐下降,称之为地下水位长期变化趋势。降雨时期,雨水入渗补给含水层,影响地下水位的变化。降雨入渗主要对潜水或位于承压水补给区的地下水而言。对于上部有较厚隔水层、埋深较大的承压含水层,入渗补给地下水的速度较慢,且入渗补给地下水的深度有限。由于入渗需要一定时间,降雨和地下水位变化可能会有时间上的延迟^[4]。除降雨入渗以外,降雨荷载作用也会对地下水位的变化产生一定的影响^[5],降雨荷载通过压力波的方式将能量传递到承压含水层,使含水层孔隙压力增加,致使地下水在短时间内快速上升。

大气压力同时作用于井水位和井区地面。作用于井水位的大气压力对地下水位产生直接影响,可以无衰减地通过水体作用于井—含水层系统,导致井水位和承压井含水层之间产生压力差,引起井水位的升降变化,形成地下水位的气压分量。气压对地下水位的影响具有普遍性^[6]。气压增加地下水位下降,气压降低地下水位抬升,气压对地下水位的影响大约在 2 cm 以内^[7],也有学者认为,气压对深井水位的影响最大可达 20 cm,一般在 5 cm 左右^[8]。

由于地球周期性自转与公转,在日、月等天体引力作用下,固体地球会产生周期性形变,含水层介质受到周期性的压缩与扩张变形,孔隙介质压力周期性的增大与减小,从而引起地下水位周期性的升降,称为地下水位的固体潮效应。含水层水文地质性质对地下水固体潮效应有重要影响^[9],一般孔隙度小,固体潮效应显著;孔隙度大,则固体潮效应微弱。固体潮对地下水位的影响一般在 1 cm 左右^[7]。

在含水层水量总体保持不变、封闭性良好和观测井足够深的前提下,地壳应力应变会引起地下水位显著变化^[10]。地下水对地质作用的响应,除构造作用强度外,还受区域地质条件和水文地质条件的影响,显示很强的本地特征。通过从地下水位中逐项分离上述各项,可以探查地壳应力应变状况的地下水响应,进而可以探索本土化的以地下水位为前兆因子的地震预测方法。

2 研究资料

本文选取中国地震局地震地下流体观测网四川德阳井、云南省向家坝库区团结 1 井两个观测井为研究对象。利用德阳井 2008 年 4 月 1 日至 6 月 30

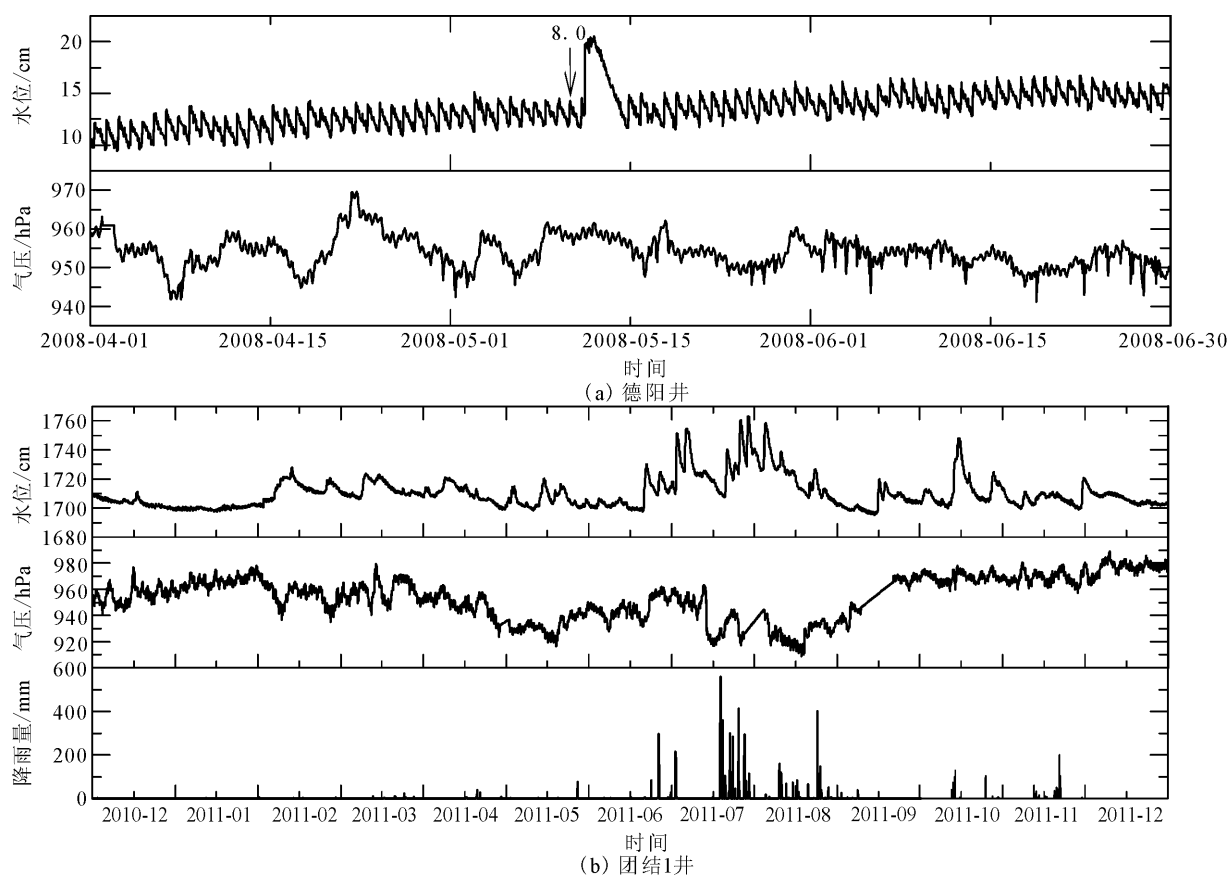


图 1 德阳井、团结 1 井基础数据资料

Fig. 1 Basic Data of Deyang Well and Tuanjie 1 # Well.

日的地下水位、气压数据为基础资料,分析 2008 年 5 月 12 日汶川地震(M8.0)前后各曲线变化。团结 1 井为金沙江下游梯级水电站水库地震地下水动态监测网之一,利用该井 2010 年 12 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日地下水位、降雨量和气压同步观测值,以分钟值得到的小时均值为基础数据资料,分析降雨对井水位影响。

首先对资料进行粗差处理,采用插值方法补全缺失数据,并以目视检查方法去除观测粗差。德阳井、团结 1 井粗差处理后的数据资料分别如图 1(a)(b)所示。从数据曲线可以看出,德阳井水位在地震前后出现显著变化,震后大概三天水位逐渐恢复正常水平。团结 1 井水位受气候、降雨、气压影响明显,强降雨对水位的影响表现为与降雨同步或滞后的峰值,强降雨时段水位波动十分显著。

3 数据分析

3.1 固体潮和气压影响量分离

由于土壤对气压应力变化的阻尼作用,气压变化对地下水位的影响会有时间延迟。即前期的大气压力 P_{n-i} 会影响当前地下水位,随着时间推进前期大气压力的影响会逐渐减小。假设 n 时刻大气压力引起地下水位的变化 P_n 可用 n 时刻及 $n-i$ 时刻的大气压力 p_{n-i} 进行推求,可将地下水位的气压影响量表示为 $P_n = \sum_{i=0}^{l_1} a_i p_{n-i}$ 。其中, a_i 为待定系数; l_1 为气压对地下水位有影响的时间间距。两参数均需根据地区特征通过试算加以确定,一般取 l_1 为 25^[11]。

在固体潮反应方面,同样由于土壤的阻尼作用,地下水位变化也会产生时间延迟。假设 n 时刻固体的

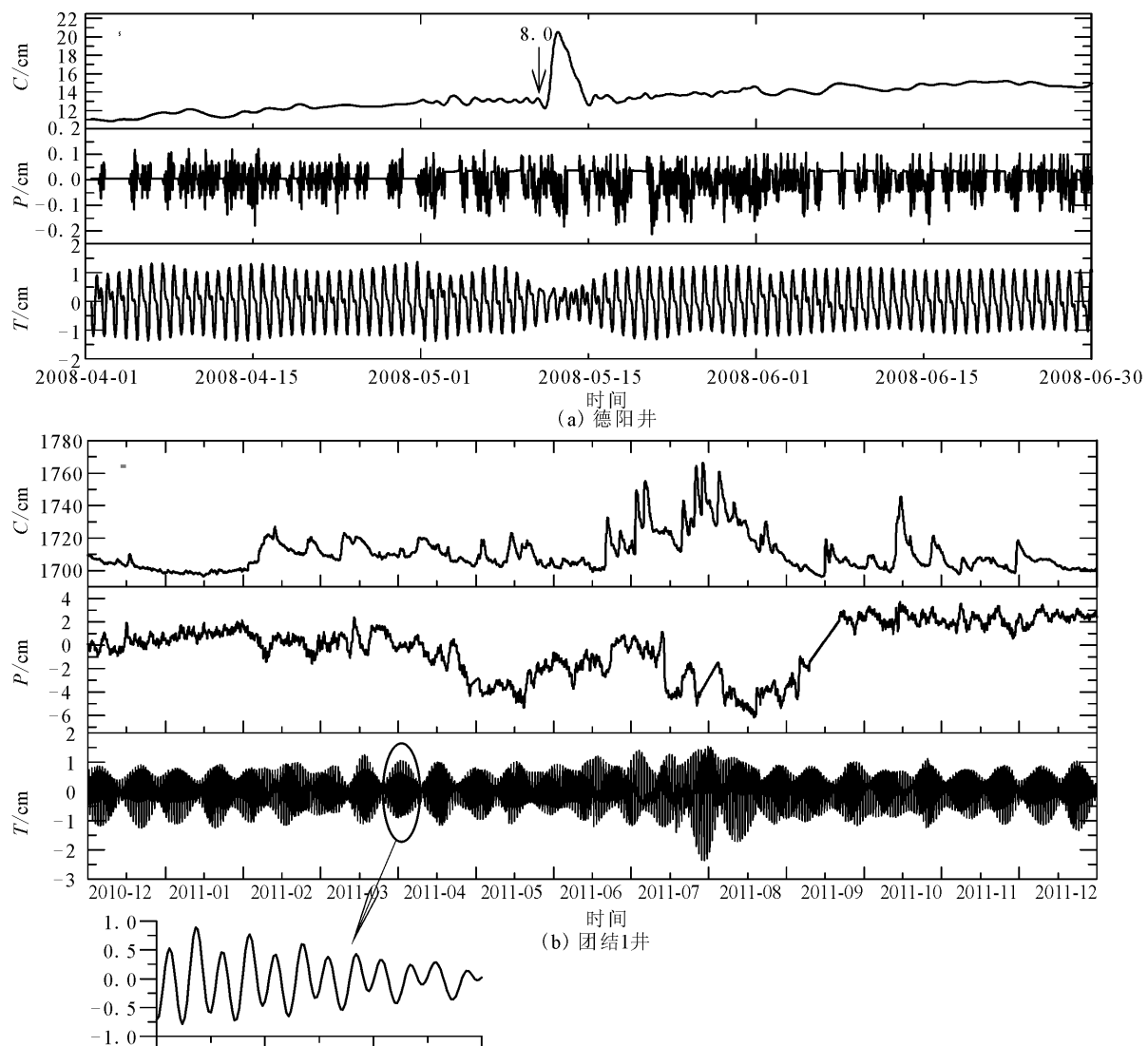


图 2 德阳井、团结 1 井地下水位数据分析结果

Fig. 2 Results of groundwater level analysis for Deyang Well and Tuanjie 1 # Well.

潮引起的地下水位变化 T_n 可用 n 时刻及 $n-i$ 时刻的理论固体潮变化 t_{n-i} 来计算,即可将地下水位变化的固体潮影响量表示为 $T_n = \sum_{i=0}^{l_2} b_i t_{n-i}$ 。其中, b_i 为固体潮待定系数; l_2 为前期理论固体潮对水位产生影响的时间间距,一般取 l_2 为 $2^{[11]}$ 。

气压、固体潮对地下水位产生的影响量可利用 Baytap-G 潮汐数据分析程序予以分离^[12],该程序利用贝叶斯理论和调和理论,依据数字信号处理中对多种模型作选择的 AIC 信息准则^[13],应用多重回归与自回归分析方法可以确定式中参数 a_i 、 b_i 、 l_1 、 l_2 理想值^[3],计算地下水位受大气压力与固体潮的影响分量。

利用 Baytap-G 对德阳井和团结 1 井数据进行处理,两井趋势、气压、固体潮作用对地下水位的的影响量分别如图 2(a)(b)所示。德阳井固体潮分量一般在 10 mm,地震发生前后固体潮对水位的影响值明显降低;气压对德阳井水位影响较小,一般在 2 mm 以内。团结 1 井水位日潮、半日潮反应明显,对地壳应力应变具有较好响应能力,最大固体潮分量 2 cm,一般在 1 cm 以内;最大气压分量 6 cm,一般在 5 cm 以内。

3.2 降雨影响量的分离

地下水位对降雨的响应较为复杂,决定于地形、水文地质条件和降雨类型等多种因素。降雨分量的确定方法大体可分为三类:第一类是水均衡法,在总降雨量中估算蒸发量、地表径流量、土壤截留量等,然后估算出地下水补给量;第二类是地下水动力学

模型法,建立地下水模型,通过数值模拟得到地下水补给量^[14];第三类也是本文采用的方法,通过统计学方法直接从水位观测值中分离出降雨影响量,可称为直接分离法。本文根据地下水位变化分为长期趋势和短期变化的思路,尝试利用基流分割的方法分离地下水位,推求水位的降雨响应分量。基流分割有多种方法,如直线分割法^[15]、SWAT 模拟分割法^[16]、数字滤波法、最小平滑法、PART 法^[17]等。本文集成使用应用较为广泛的数字滤波法和最小平滑法进行地下水位序列分割,确定不同参数下的基径比例(BFI),对两种方法所得滤波结果进行对比,确定最佳滤波参数和基流分割值,消除地下水位受降雨影响产生的峰值。

利用数字滤波法处理水位资料的滤波方程^[18-19]

为 $F_i = \lambda F_{i-1} + \frac{1+\lambda}{2}(H_i - H_{i-1})$ 。式中, F_i 表示 i 时刻分离出的渐变反应量(基流量); H_i 表示 i 时刻的地下水位趋势数据; λ 为滤波参数。数字滤波计算中设定不同滤波次数($r=1 \sim 6$),计算不同 r 和 λ 值下的基径比例,如图 3(a)所示。

以总水位滤除气压、固体潮分量的剩余分量进行最小平滑处理,具体有以下几个步骤^[20-21]:①确定时间间隔,将整个地下水位趋势分为若干互不交叉的时间单元,求得每个时间单元的最小值,记作 h_{i-1} 、 h_i 、 h_{i+1} ;②寻找最小值集合中的拐点,若 $0.97h_i < h_{i-1}$,且 $0.97h_i < h_{i+1}$,则 h_i 即为拐点;③针对判断得到的若干拐点,利用三次样条曲线内插法计算每

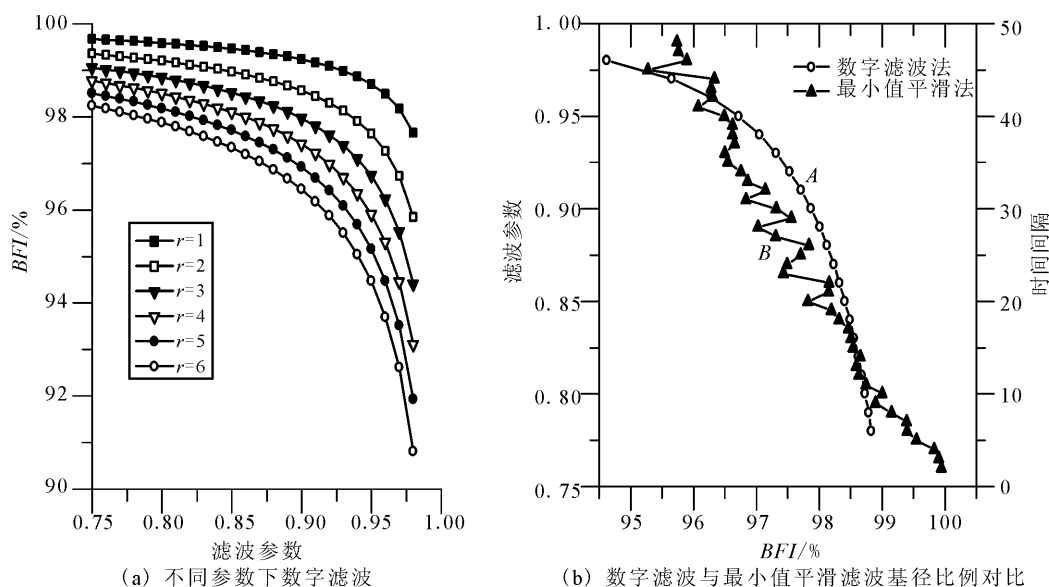


图3 不同基流分割法的基径比例对比图

Fig. 3 Comparison of BFI with different base flow separation methods.

个时刻的基流量;④如果计算所得基流量大于初始值,则以初始值取代计算值,最后将这些数据点连接起来获得基流曲线。不同时间单元划分下的基径比例如图 3(b)中曲线 B 所示。

应用基流分割方法时,不同的参数设置会得到不同基径比例。分别计算两种方法不同参数下的基径比例,以 BFI 最接近处的 λ 为最佳滤波参数。本

文通过比较两种方法计算结果,确定 λ 为 0.96。为防止数字滤波后波峰波谷产生位移,利用数字滤波对其进行四次滤波,结果如图 4 所示。从数字滤波结果看,利用基流分割方法可以有效分离地下水位的长、短期变化趋势,消除降雨引起的地下水位峰值。根据地下水位降雨影响量分离计算结果,观测井水位对降雨的最大快速响应为 20 mm。

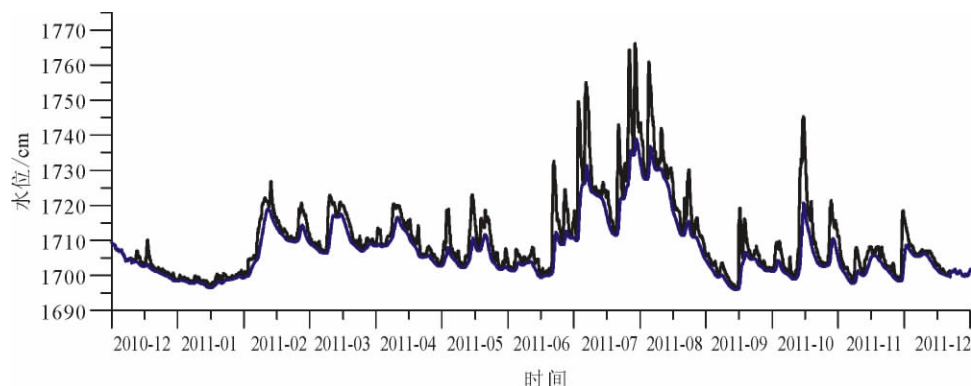


图 4 地下水位数字滤波结果

Fig. 4 Result of groundwater level dealing with digital filter method.

3.3 地震响应分析

对地下水位原始观测值逐项分离后,形成气压、固体潮、气候、降雨、残差等的时间序列资料,现尝试分析各曲线的地震响应。

首先考察德阳井、团结 1 井残差曲线,如图 5 (a)、(b)所示。理想状态下,若没有地震活动影响,残差曲线应近似为直线,仅显示观测误差。德阳井残差曲线一般在 10 mm 以内,地震发生时残差曲线上反应强烈,最大变幅 31 mm。2008 年 5 月 12 日

汶川 $M 8.0$ 地震前一个月,德阳井水位残差发生明显异变,表现为残差的突然增加。同时,对比不同井水位残差曲线可以对水位资料的观测质量作出比较。团结 1 井残差曲线反应的观测误差为 0~2 mm,德阳井观测误差 0~8 mm,由此可以判断团结 1 井观测误差小于德阳井。团结 1 井残差曲线中的突跳值,多发生在降雨时期,可能与降雨期间仪器运行有关。

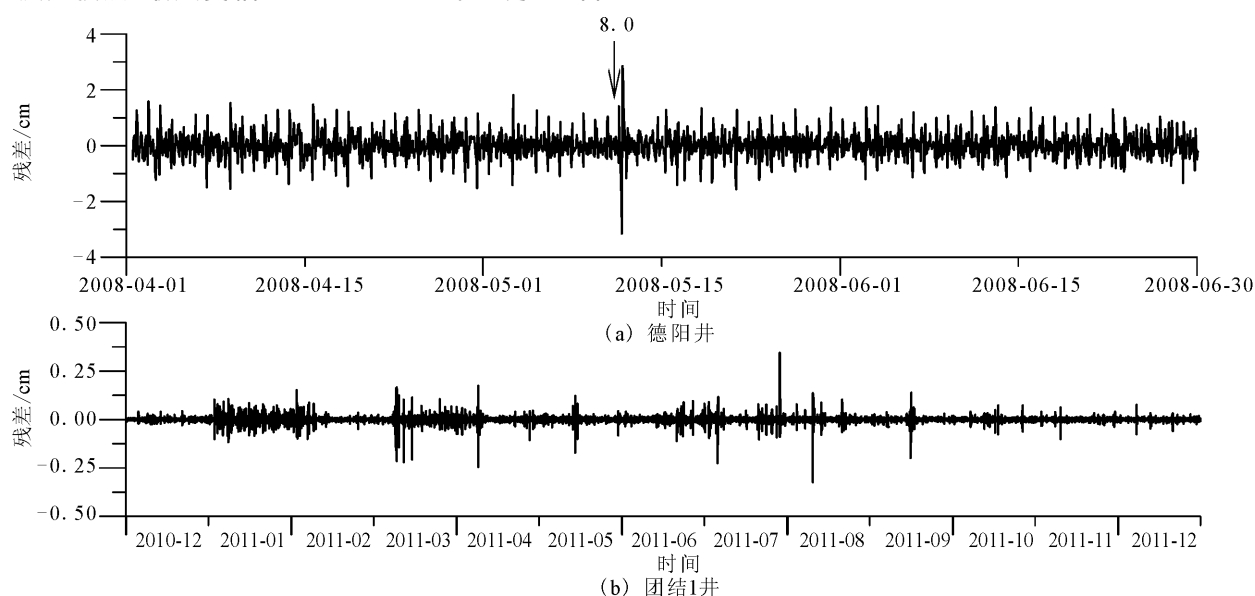


图 5 地下水位残差曲线

Fig. 5 Result of white noise in groundwater.

德阳井长期趋势分量(图2(a))反映了明显的地震前兆特征。理论上长期趋势反映地下水位受气候的影响情况,一般应该是平滑曲线。从2008年5月1日开始,德阳井长期趋势分量曲线表现出周期性波动,直到5月12日M8.0地震发生。

德阳井固体潮分量曲线(图2(a))也表现出明显的地震前兆特征。几乎与长期趋势同步,固体潮影响分量表现为逐天减小的特征,反映了地震以前含水层孔隙度逐渐增大的特征,地震后5天逐渐恢复原先水平。

通过以上初步分析可知,水位各分量地震前后变化更能凸显地震前兆信息。通过大量观测井典型震例的系统研究,研究各分量与当地地震活动性关系、或典型震例前后变化形式,相信可以总结出地区性的地下水前兆变化模式,用于地震预测预报实践。

4 讨论与结论

(1) 将地下水位看作各种因素作用量的线性组合,采取逐项分离的方法,得到固体潮、气压、降雨、气候、残差等系列曲线。初步分析结果表明利用分量资料能更好地识别地震前兆信息。本文采用的这种半理论半经验的技术思路是行之有效的。

(2) 地下水位残差曲线包含构造活动信息,但目前尚未有成熟的理论方法确定地震活动性对残差分量的影响,当残差曲线中出现显著变化时,就要进行异常判别,研究其与地震活动的关系。一个地区水位残差曲线中突跳与地震活动的关系,需要大量震例分析工作,才可以总结出地区性的规律。

(3) 利用基流分割方法分离地下水位降雨分量是可行的,该方法能够有效消除降雨影响峰值。从总体趋势上看,最小平滑法选取的时间间隔越小,基流越大,越接近总体径流水平;数字滤波法选取的滤波参数越小、滤波次数越少,越接近总体径流水平。对团结1井选取的滤波参数不具有普适性,本文仅是提供了一个处理水位资料的范例。若用该方法对其他地区水位进行处理,需考虑当地气候条件、水文地质条件等进行具体研究,确定合适参数。

[参考文献]

- [1] 车用太,鱼金子.地震地下流体学[M].北京:气象出版社,2006:228-298.
CHE Yong-tai, YU Jin-zi. Underground Fluids and Earthquake[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 228-298.
- [2] Zhang Z D, Zheng J H. Response of Water Level in Deep Well

- to Earth Tide and Barometric Pressure[J]. Journal of Seismological Research, 1993, 16(4): 431-439.
- [3] Tamura Y, Sato T, Ooe M, et al. A Procedure for Tidal Analysis with A Bayesian Information Criterion[J]. Geophysical Journal International, 1991, 104(3): 507-516.
- [4] 车用太,鱼金子,张大维.降雨对深井水位动态的影响[J].地震,1993,(4):8-15.
CHE Yong-tai, YU Jin-zi, ZHANG Da-wei. Influence of Precipitation of Behavior of Water Level in Deep Wells[J]. Earthquake, 1993, 4: 8-15.
- [5] 赵小茂,黄辅琼,王新,等.“集中降雨”与浅层承压井水位及区域地震活动关系的初步研究[J].西北地震学报,2009,31(3): 259-264.
ZHAO Xiao-mao, HUANG Fu-qiong, WANG Xin, et al. Preliminary Study on Relationship among the Concentrated Rainfall, Groundwater Level and Regional Seismicity [J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(3): 259-264.
- [6] 魏焕,张昭栋,耿杰,等.井水位气压加卸载响应比[J].西北地震学报,2003,25(1):82-85.
WEI Huan, ZHANG Zhao-dong, GENG Jie, et al. The Load/Unload Response Ratio of Water Level to Change of Air Pressure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2003, 25(1): 82-85.
- [7] 陈宗显,詹钱登.降雨引致地下水位变化之研究——以那菟、六甲与东和地下水位站为例[D].台湾:国立成功大学,2006.
Tsung-Hsien Chen, Chyan-Deng Jan. Study on Rainfall-Induced Groundwater Water Level Variation——Case Study at the Naba, Liuja, and Donher Well Stations[D]. Taiwan: National Chengkung Univ., 2006.
- [8] 余贵坤.降雨量与深井水位变动的关系研究[A]//台湾地区地球物理研讨会[G].台北:中国地球物理学会,1986:165-173.
YU Gui-kun. Study of Change Relations between Rainfall and Deep Well Water Level[A]// Geophysical Seminar in Taiwan [G]. Taipei: The Geophysical Society of China, 1986: 165-173.
- [9] 张昭栋,郑金涵,冯初刚.井水位的固体潮效应和气压效应与含水层参数间的定量关系[J].西北地震学报,1989,11(3):47-52.
ZHANG Zhao-dong, ZHENG Jin-han, FENG Chu-gang. Quantitative Relationship between the Earth Tide Effect of Well Water Level, the Barometric Pressure Effect and the Parameters of Aquifers[J]. Northwestern Seismological Journal, 1989, 11(3): 47-52.
- [10] 车用太,鱼金子,赵苹.地震地下流体物理化学动态形成的基础理论问题[J].国际地震动态,1995,6(12):6-10.
CHE Yong-tai, YU Jin-zi, ZHAO Ping. Basic Theoretical Studies on the Physicochemical Variations of Seismic Subsurface Fluids[J]. Recent Developments in World Seismology, 1995, 6(12): 6-10.
- [11] Matsumoto N. Regression Analysis for Anomalous Changes of Ground Water Level Due to Earthquakes[J]. Geophys.

- Res. Lett., 1992, 19(12): 1193-1196.
- [12] 陈晓东, 孙和平. 一种新的重力潮汐数据预处理和分析方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 83-87.
CHEN Xiao-dong, SUN He-ping. New Method for Pre-processing and Analyzing Tidal Gravity Observations[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(3): 83-87.
- [13] Hamparsum Bozdogan. Akaike's Information Criterion and Recent Developments in Information Complexity[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2000, 44(1): 62-91.
- [14] 束龙仓. 地下水动态预测方法及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 15-30.
SHU Long-cang. Methods of Forecast in Groundwater Level and Their Application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010: 15-30.
- [15] 叶镇国. 土木工程水文学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 17-18.
YE Zhen-guo. Civil Engineering Hydrology[M]. Beijing: China Communications Press, 2000: 17-18.
- [16] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000[R]. College Station, Texas: Texas Water Resources Institute Report TR-192, 2002.
- [17] Jia J, Wang W K, Duan L, et al. Comparative Study of Base Flow Separation Methods—Taking Huaxian Station of Weihe River for Example[R]. International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), 2011: 1000-1003.
- [18] Peter R F, Vijay K G. A physically Based Filter for Separating Base Flow from Streamflow Time Series[J]. Water Resources Research, 2001, 37(11): 2709-2722.
- [19] 林凯荣, 陈晓宏, 江涛, 等. 数字滤波进行基流分割的应用研究[J]. 水力发电, 2008, 34(6): 28-30.
LIN Kai-rong, CHEN Xiao-hong, JIANG Tao, et al. Application and Study on Base Flow Separation Using Digital Filters[J]. Water Power, 2008, 34(6): 28-30.
- [20] 黄国如. 流量过程线的自动分割方法探讨[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(1): 73-78.
HUANG Guo-ru. Base Flow Separation from Daily Flow Hydrograph Using Automated Techniques[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(1): 73-78.
- [21] 董晓华, 邓霞, 薄会娟, 等. 平滑最小值法与数字滤波法在流域径流分割中的应用比较[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 1-4.
DONG Xiao-hua, DENG Xia, BO Hui-juan, et al. A Comparison between Smoothed Minima and Digital Filtering Methods Applied to Catchment Baseflow Separation[J]. Journal of China Three Gorges Univ. (Natural Sciences), 2010, 32(2): 1-4.
- [22] 高玲, 林元武, 杨明波. 延庆五里营井稀有气体地球化学特征[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3): 274-276, 288.
GAO Ling, LIN Yuan-wu, YANG Ming-bo. Geochemistry Characteristics of the Minor Gases in Wuliying Well at Yanqing County, Beijing[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 274-276, 288.