

小波变换在深井水位异常识别中的应用*

敬少群¹, 刘春平², 王佳卫¹, 车伟³, 张子广⁴

(1. 湖南省地震局, 湖南 长沙 410004; 2. 防灾科技学院, 河北 三河 065204;
3. 常德市地震局, 湖南 安乡 410000; 4. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要: 在小波多尺度分解的基础上, 首先利用小波谱识别出所研究时间序列的主尺度, 然后采用正弦拟合对主尺度的主频信息进行消除, 以达到识别被主频信息掩盖的异常信息的目的。通过对湖南省安乡井水位日均值序列和河北省浅牛6井水位日均值序列的分析处理实验, 获得了较好的结果。

关键词: 深井水位; 小波变换; 主尺度; 主频率

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)02-0171-06

0 引言

地下水是地壳中十分活跃的组分。深井中的地下水不仅远离地表水的干扰, 而且由于其具有承压性, 当它处在一定的封闭条件下时, 井孔—含水层系统能够灵敏地反映出地壳中的各种应力应变变化, 因此受到地震研究人员的青睐。通过一系列对深井水位观测成果的研究, 汪成民等(1988)、车用太和鱼金子(2006)、张子广等(2010)发现深井水位对降雨荷载、气压、固体潮汐、地震波等引起的地壳应力变化过程反映灵敏, 其响应频率从高频的脉动到低频的11年周期变化, 频带响应相当宽。

为了能从水位观测结果中辨识出一些来自特定因素(如降雨、气压、地震等)的影响, 特别是与地震发生有关的前兆现象, 一系列数据处理方法如频率滤波、递归滤波、维纳滤波、卡尔曼滤波、周期滤波、回归分析等被引入到水位的观测数据分析处理中。然而, 这些传统的数据分析处理方法在消除相关干扰因子的影响时, 由于只对处于某一频段范围内的成分有效, 有些甚至要求有辅助观测资料, 因此在日常应用中受到了限制。

小波分析是近十几年发展起来的现代分析学的一个分支, 因其在时域、频域都具有高度的自适应性, 可以聚焦到所处理信号的各种频率成分

的任意细节, 在地震前兆数据处理中日益受到重视(郑治真等, 2001; 吴立辛等, 2007; 顾申宜等, 2010)。敬少群等(2002)利用小波多尺度分解对湖南省地下水位观测数据进行分析时发现, 不必将原始数据进行完全分解, 就可将水位日均值序列中的高频部分与低频部分分开。对于不同的井孔—含水层系统, 分离出的频率成分的主模不同, 主模的频率反映了正常背景下井孔—含水层系统的优势频率。王卫光和张仁铎(2008)研究表明在不同的时间尺度分辨率下, 地下水位序列会表现出不同的周期交替现象。晏锐等(2007)利用小波分析, 将气压、固体潮波动逐步细化成多个细节分量和一个近似分量, 探讨了地下水位在不同尺度下对固体潮和气压的响应等。

这些研究均以方法应用和机理探讨为目的, 虽然这对我们分析观测资料中不同频段的正常背景特征和噪声的分布规律以及识别地震前兆异常是有益的, 但作为地震前兆观测手段, 其主要目的是提取和观察监测对象的异常动态特性, 为地震监测预报服务。因此, 如何充分考虑观测资料自身变化的规律性、非震因素的复杂性及人类认知水平的局限性, 从中合理提取和识别出有别于常态的异常动态, 就成为我们要解决的首要问题。本文旨在利用小波分析方法, 针对深井水位自身的特点选择合适的滤波, 来识别水位观测值中一些来自特定因素的影响, 从而使地下水位观测更好的为地震监测预报服务。

* 收稿日期: 2011-07-12.

基金项目: 2008 公益性行业科研专项项目(200808055, 200808079)资助.

1 方法和原理

1.1 原始数据的分频处理

利用多分辨率小波分解与重构算法将原始信号分解成不同频率的信号成分。多分辨率小波分解与重构采用 Mallat 提出的算法 (Daubechies, 1988), 具体简述如下:

设 $\{V_i\}_{i \in \mathbb{Z}}$ 是空间 $L^2(\mathbb{R})$ 的一列互相嵌套的闭子空间, ϕ 和 ψ 分别是相应的尺度函数和小波函数, 对于数据序列 c^0 构造一个函数 $f(t) = \sum_n c_n^0 \phi_{0n}$, 对某个 $j \in \mathbb{Z}, j > 0$, 函数 $f(t) \in V_j$, 有

$$\begin{aligned} f(t) &= S_1 f(t) + D_1 f(t) = S_2 f(t) + \sum_{k=1}^2 D_k f(t) = \\ &\cdots = S_j f(t) + \sum_{k=1}^j D_k f(t). \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $S_j f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n^j \phi_{j,n}(t)$ 为 $f(t)$ 在尺度 2^j 分辨率下的连续逼近; $D_j f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^j \psi_{j,n}(t)$ 为 $f(t)$ 在

尺度 2^j 分辨率下的连续细节。也可以理解成: $S_j f(t)$ 为 $f(t)$ 的分辨率尺度不超过 2^{-j} 的成分, $D_j f(t)$ 为 $f(t)$ 的分辨率尺度介于 2^{-j} 和 $2^{-(j-1)}$ 之间的成分。

$$\text{当} \begin{cases} \langle \phi_{j+1k}, \phi_{jn} \rangle = h(n-2k) \\ \langle \psi_{j+1k}, \psi_{jn} \rangle = g(n-2k) \end{cases} \text{时}, \quad (2)$$

$$\text{则} \begin{cases} c_n^j(t) = \sum_n h(n-2k) \cdot c_n^{j-1}(t), \\ d_n^j(t) = \sum_n g(n-2k) \cdot c_n^{j-1}(t). \end{cases} \quad (3)$$

利用 (1) 式还可以对已分解的信号进行重构。采用重构算法对小波分解后的信号进行重构可以增加信号点数, 使重构信号和原始信号的点数一样, 从而得到不同分辨率尺度的变化信息。

本文采用 db5 小波, 分解尺度 j 取 8。db5 小波是对给定支集宽度, 具有极值相位和最高消失矩的紧支集小波, 其相关的尺度滤波器是最小相位滤波器。db5 小波的尺度函数和小波函数如图 1 所示。

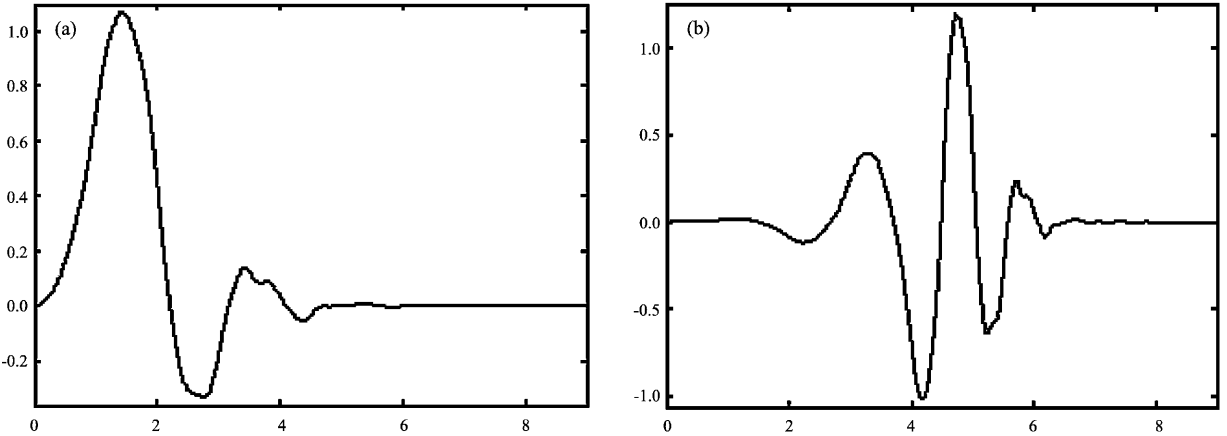


图 1 db5 小波的尺度函数 (a) 和小波函数 (b)

Fig. 1 Scaling function (a) and the wavelet function (b) of db5 wavelet

1.2 计算小波能量谱

对小波分解后的信号, 按照正则变换小波谱的定义 (Meneveau, 1991) 计算小波能量谱:

$$E(m) = \sum_n |D_{m,n}|^2. \quad (4)$$

其中 $D_{m,n}$ 为小波系数。目的是以此识别出所计算时间序列的主尺度或主模 (敬少群等, 2002)。

1.3 获取主尺度的主频率信息

对识别出的主尺度信号, 进行傅里叶频谱分析, 获取主尺度的主频率 $f_{\text{主}}$ 。

1.4 消除主频率信息

按 (3) 式对原始观测序列进行三角拟合

$$y_{\text{主}} = A \sin(2\pi \cdot f_{\text{主}} \cdot t + \varphi), \quad (5)$$

并从原始序列中消除主频率的影响

$$y_{\text{残差}} = y_{\text{原}} - y_{\text{主}}. \quad (6)$$

2 算例

2.1 湖南省安乡市安乡井水位

安乡井位于洞庭盆地北部的湖南省安乡市，井点坐标 (29°24'N, 112°10'E)，井深 767.32 m。该井揭露的地层较为简单，观测层是井下 300 ~ 680 m 间的中生代白垩系和新生代第三系沅江组一段石英（粉）砂岩多层层隙承压水。该井水位年动态平稳，水位潮汐现象不明显，自记曲线光滑，具有一定的映震能力（刘德宽等，1994）。

本文选取 1993 年 1 月至 1999 年 12 月安乡井水位日均值序列进行小波多尺度分析。分解结果见图 2，由图可以看出，安乡水位日均值时间序列

存在多种频率成分。当分解尺度分别为 7 和 8 时，分解后的细节部分有半年和年周期变化，且原始信号的能量主要集中在这部分。由于 1996 年进行洗井，干扰了 $2^{-5} \sim 2^{-7}$ 分辨率间连续细节的变化规律，半年后才恢复。

由式 (4) 计算的小波谱可知， 2^{-8} 分辨率下的连续细节为水位日均值序列的主要信息，傅里叶分析显示其主要成分为约 365 天的周期变化。

同时选取 1993 年 1 月至 1999 年 12 月安乡井气压日均值序列，进行小波多尺度分析。并对分解后同一尺度信息的气压、水位进行一元回归分析，计算相关系数。结果表明尺度 8 的水位与气压的相关系数最高，且该尺度的气压系数为 7 mm/hPa。

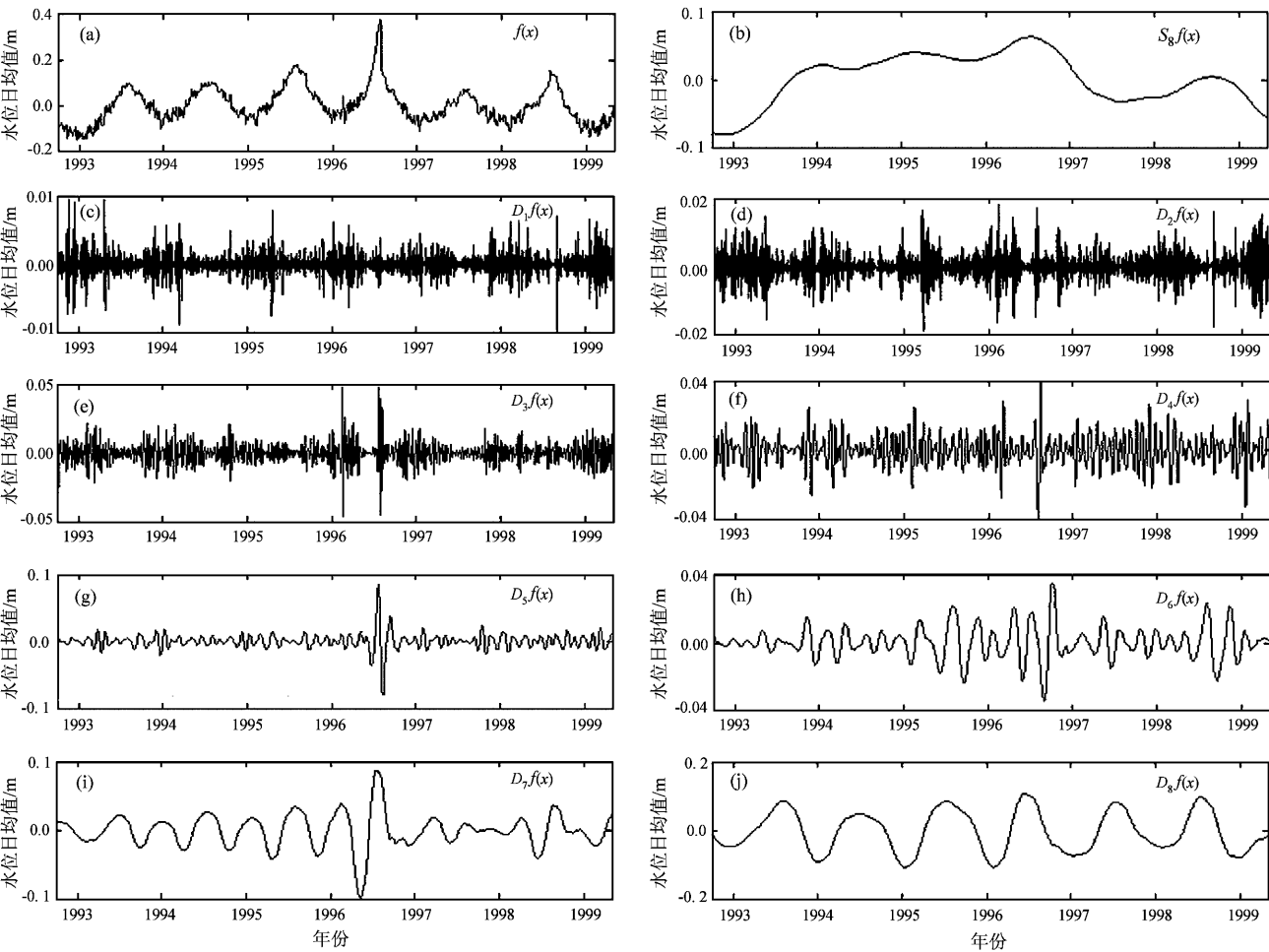


图2 安乡井水位日均值序列的多尺度特征
(a) 水位日均值；(b) 尺度 2^{-j} 分辨率下的连续逼近；(c) ~ (j) 尺度 2^{-j} 分辨率下的连续细节

Fig. 2 Multi-scale characteristic of the daily mean value of water level in Anxiang Well
(a) Daily mean value of water level; (b) Continuous approximation on the resolution of scale 2^{-j} ;
(c) ~ (j) Continuous details on the resolution of scale 2^{-j}

分别对水位、气压日均值序列按(5)式进行拟和去除年变。水位与气压的年变振幅比为8 mm/hPa,与所计算的尺度8的气压系数相当。消除年变化后的结果见图3。

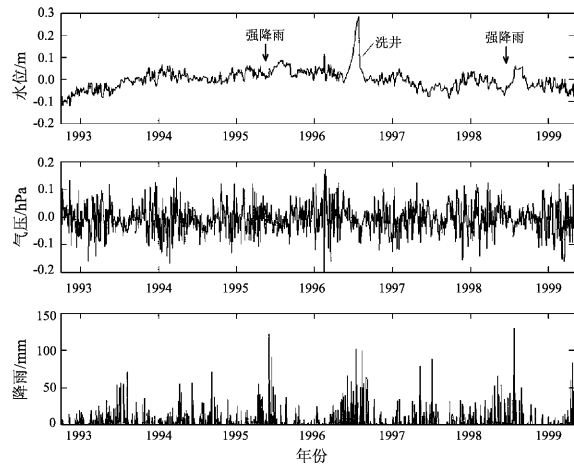


图3 安乡井去除主频信息后的水位、气压与日降雨总量分布图

Fig. 3 Water level, pressure and the sum of daily rainfall after removing dominant frequency in Anxiang Well

对消除年变化后的气压、水位日均值与日累计降雨总量进行比较,笔者注意到,所研究时间段共发生过两次日降雨强度大于100 mm的强降雨,且在强降雨发生之后,在消除年变的水位日均值系列图上,均迭加有明显的方波。而且,这两个方波形态相似,起点均为倒“V”形,终点为垂直下降形,只是变化幅度随当日降雨强度增大而增加,持续天数随累计强降雨的天数增加而延长。由此表明,安乡井水位对当日降雨强度大于100 mm的强降雨引起的雨荷效应反映明显(图3)。

2.2 河北省永清县浅牛6井水位

浅牛6井位于河北省永清县龙虎庄乡,井点坐标(39.220°N, 116.421°E)。该井1996年以前为自流热水井,1996年断流后改为静水位观测井。井孔位于牛驼镇凸起北端的南侧,井深1 274 m,观测层顶板埋深1 065.3 m,观测层为震旦亚界迷雾山组白云岩岩溶裂隙承压含水层。该井水位年动态平稳,水位潮汐现象不明显,具有较强的映震能力(张宝民,肖爱华,1990;刘喜兰等,1990)。

为了避开观测方式变更和缺数对分析结果产生的影响,取1997年8月至2007年4月的数据进

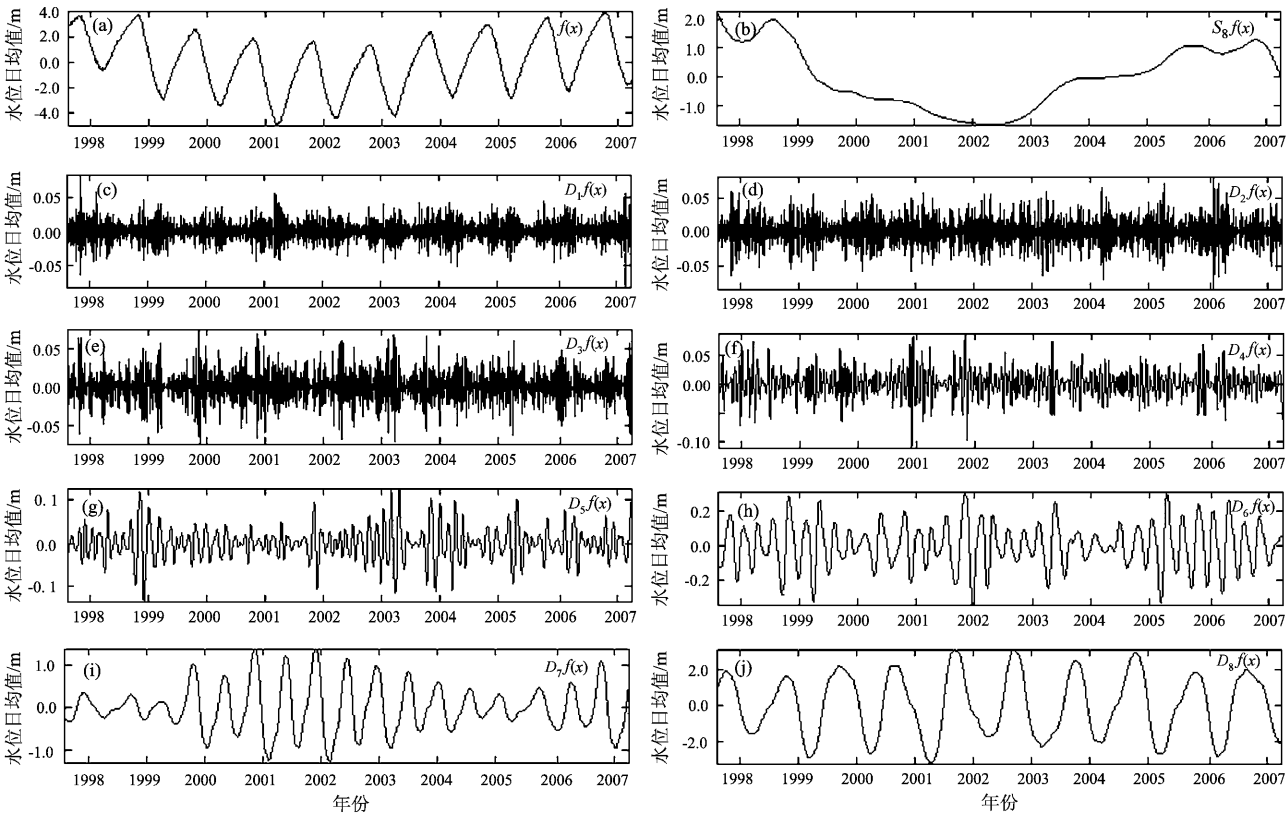


图4 浅牛6井水位日均值序列的多尺度特征

Fig. 4 Multi-scale characteristic of the daily mean value in Qianniu No. 6 Well

行分析。多尺度分解结果见图4,由图可以看出,浅牛6井水位日均值时间序列存在多种频率成分,且能量主要集中在低频部分(尺度7和8)。由式(4)计算的小波谱可知,尺度不超过分辨率 2^{-8} 的成分为水位日均值序列的主要信息,傅里叶分析显示其主要成分为约365天的周期变化。

对水位日均值序列按(5)式拟和去除主频信息,结果见图5。由图中可以看出,消除主频后的时间序列存在明显的半年左右的周期变化。通过仔细对比图中各周期的形态特征,可以发现在1997年12月初至1998年2月中旬、2002年底至2003年3月初、2003年11月底至2004年3月中旬3个时间段内,在各周期的谷底迭加有其它的周期成分(图中阴影部分),表明这期间的井孔—含水层系统迭加有附加应力,从而导致在去除主频后的井孔水位不下降反而上升的情况发生。

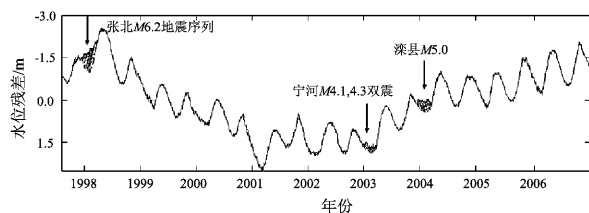


图5 浅牛6井去除主频信息后的时序图

Fig. 5 Sequence diagram of daily mean value of water level after removing dominant frequency in Qianniu No. 6 Well

那么是什么因素产生的附加应力作用于这期间的井孔—含水层系统呢?对比井区周围300 km范围内发生的地震可以看到:在距该井278 km处,1998年1月10日发生了张北尚义 $M_L6.2$ 地震序列;距该井105 km处,2003年4月23日、24日发生了天津宁河 $M_L4.1$ 、4.3双震序列;距该井211 km处,2004年1月20日发生了河北滦县 $M_L5.0$ 地震序列。由此推断,浅牛6井去除主频后的异常变化,可能是地震发生前后区域应力场变化的反映,从图4看,异常持续时间及幅度也与所反映的地震序列的持续时间及幅度有关。

3 结论与讨论

(1) 水位观测值是多种因素影响下的综合物理量,这些因素具有不同的周期,对水位的影响

也表现出不同的形态,如何从水位观测结果中辨识出一些来自特定因素(如降雨、地震等)的影响,一直是地震地下流体观测要解决的关键问题。本文利用小波多尺度分解算法,通过小波谱的计算,识别出所研究时间序列的主尺度;然后采用正弦拟合对主尺度的主频信息进行消除。通过对湖南省安乡井和河北省浅牛6井水位日均值序列的分析处理,达到了预期的目的。较好的识别出安乡井水位对当日降雨强度大于100 mm时的雨荷效应,及浅牛6井对距井孔一定范围、一定强度地震的孕育发生及震后调整过程的响应,其均表现为在去除主频(年变化)信息后的水位残差曲线上迭加有明显的异常频率的附加信息。但对距井孔40 km的2006年7月4日文安 $M_L5.5$ 地震反映不明显,具体原因还有待深入研究。

(2) 本文采用的数据处理方法,与其它数据处理方法相比,物理意义明确。即通过对井孔—含水层系统主频率的识别,消除主频率信息,提取叠加在主频率信息上的干扰信息。本文所选择的两口井,主频率信息均为年变化。对其它具有一个或多个主频率信息的井,该方法能否取得令人满意的效果,还有待于更多实践的检验。另外,本文在确定主频信息时采用傅里叶变换,而傅里叶变换确定的周期受所计算的时间序列的长度影响,因此对所确定的主频周期在使用时做了取整处理。

(3) 本研究所选择的两口井,均为静水位观测深井,这一方面避免了动水位观测中因流量变化对观测结果产生的影响,另一方面也无需讨论浅层地表水对观测结果的影响。

参考文献:

- 车用太,鱼金子. 2006. 地震地下流体学[M]. 北京:气象出版社,299-354.
- 顾申宜,李志雄,张慧. 2010. 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,33(1):35-42.
- 敬少群,王佳卫,童迎世. 2002. 小波变换在少震、弱震区地下水数值分析中的应用[J]. 华南地震,22(2):9-15.
- 刘德宽,车斌武,林秋练. 1994. 邵阳地震前后安乡井水位异常变化[J]. 华南地震,14(1):56-59.
- 刘喜兰,秦清娟,董守玉,等. 1990. 浅牛6井水位异常的计算机识别及其映震能力评定[J]. 地震,10(3):20-24.
- 汪成民,车用太,万迪垫,等. 1988. 地下水微动态研究[M]. 北京:地震出版社,1-47.
- 王卫光,张仁铎. 2008. 小波分析在地下水位序列多时间尺度分析中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版),41(2):1-9.

吴立辛,卫定军,李国斌,等. 2007. 小波分析方法在宁夏短水准资料分析中的应用[J]. 地震研究,30(1):49-53.

晏锐,黄辅琼,陈融. 2007. 小波分析在井水位的气压和潮汐改正中的应用[J]. 中国地震,23(2):204-210.

张宝民,肖爱华. 1990. 浅牛6井地震前的异常特征[J]. 华北地震科学,8(3):89-96.

张子广,盛艳蕊,张素欣,等. 2010. 井水位对气压扰动的响应[J]. 地

震研究,33(2):170-175.

郑治真,沈萍,杨选辉,等. 2001. 小波变换及其 MATLAB 工具的应用[M]. 北京:地震出版社.

Daubechies I. 1988. Orthonormal bases of compactly supported wavelets [J]. Common Pure Appl Math XLI,41(7):909-996.

Meneveau C. 1991. Analysis of turbulence in the orthonormal wavelet representation[J]. J Fluid Mech,232:469-520.

Application of Wavelet Multi-scaling Decomposition in Identifying Water Level Anomaly of Deep Well

JING Shao-qun¹, LIU Chun-ping², WANG Jia-wei¹, CHE-Wei³, ZHANG Zi-guang⁴

(1. *Earthquake Administration of Hunan Province, Changsha 410004, Hunan, China*)

(2. *Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065204, Hebei, China*)

(3. *Earthquake Administration of Changde Municipality, Anxiang 410000, Hunan, China*)

(4. *Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China*)

Abstract

Basing on the wavelet multi-scaling decomposition, we make use of wavelet spectrum to identify the main scale of the studied time sequence, and then eliminate the main frequency information of the main scale by sine function fitting to identify water level anomaly covered by main frequency information. We analyze daily mean value sequences of water level of Anxiang well in Hunan and Qianniu well in Hebei by wavelet multi-scaling decomposition. The results show that the method is useful to identify water level abnormal information covered by dominant frequency information.

Key words: water level in deep well; wavelet transform; multi-scale analysis; main scale; main frequency