

狄樑, 陆德明, 丁建国, 刘冬冬, 钱文杰, 2017. 常熟台倾斜观测资料的异常特征分析. 震灾防御技术, 12 (2): 415—422.  
doi: 10.11899/zzyfy20170219

# 常熟台倾斜观测资料的异常特征分析<sup>1</sup>

狄 樑 陆德明 丁建国 刘冬冬 钱文杰

(江苏省地震局常熟地震台, 江苏常熟 215500)

**摘要** 在研究常熟台水管仪与垂直摆多年倾斜观测资料的基础上, 利用潮汐因子调和分析、Nakai 拟合检验、小波分析等方法对台站周边约 250km 范围内发生的高邮-宝应  $M_S$  4.9 及如东近海  $M_S$  3.8 等地震前的异常信息进行了提取, 对数据异常分析方法进行评判, 旨在为以后地震前及时发现地震提供参考。

**关键词:** 倾斜观测 水管仪 垂直摆 震前异常 分析方法

## 引言

地震是地壳岩石圈内的非线性事件, 震前有很大的不确定性, 这与形变前兆和构造环境有关, 加之干扰和观测误差, 更增加了形变前兆识别的难度。地震前兆需具备 2 个基本条件: ①正常背景上出现异常变化; ②出现与孕震过程相关联的异常现象。倾斜观测能较灵敏地反映地壳物性变化。本文利用 EIS2000 地震前兆信息软件, 采用潮汐因子调和分析、Nakai 拟合检验、小波分析方法对常熟台倾斜观测仪器——水管仪、垂直摆从 2009 年到 2015 年共 7 年连续观测数据进行分析 and 处理, 从中查找、提取观测资料中的非潮汐异常信息, 同时对观测资料异常分析方法进行对比分析。

## 1 观测山洞概况及倾斜观测仪基本情况

常熟地震台形变山洞位于单斜山山体南麓, 山体为北西走向, 长轴 5km, 短轴 2.5km, 岩性为泥盆系五通组石英砂岩, 最高峰海拔 265m, 山体西南陡峻, 东北面为缓坡, 岩层倾角小于  $15^\circ$ 。常熟台形变观测山洞原为军用山洞, 洞室条件较好, 山洞主通道进深 250m, 洞高 2.35m, 宽 2.50m, 混凝土全被覆, 复盖厚 20—30m, 日温差  $<0.01^\circ\text{C}$ , 年温差  $<0.3^\circ\text{C}$ , 常年温度为  $17.3^\circ\text{C}$ , 湿度 100% (狄樑等, 2003)。

常熟台 DSQ 水管仪架设在 1994 年安装的原有 FSQ 水管仪基墩和基线上 (FSQ 水管倾斜仪 1993 年 10 月安装, 2007 年 4 月拆除), 经过 20 多年的观测, 4 个岩石基墩均处于稳定状态。而垂直摆仪及其岩石基墩于 2007 年架设安装。

DSQ 水管仪基墩为花岗岩石, 东西基线长 29.94m, 方位角  $139.5^\circ$ , 南北基线长 43.59m, 方位角  $32.4^\circ$ , 分辨率为  $0.0005''$ , 漂移量  $<0.005''$ , 采样率 1 次/分钟。VS 垂直摆倾斜仪基墩

1 基金项目 中国地震局“三结合”课题 (161004)

[收稿日期] 2016-08-29

[作者简介] 狄樑, 男, 生于 1972 年。工程师。主要从事地震前兆观测与研究。E-mail: jscswyn123456789@163.com

为花岗岩石, 东西方位角  $90^\circ$ , 南北方位角  $0^\circ$ , 分辨率为  $0.0001''$ , 日漂移  $<0.005''$ , 采样率 1 次/分钟。2 台仪器安装在同一山洞内, 水管仪和垂直摆倾斜仪分别安装在距洞口约 210m、190m 的支洞内, 直线距离不到 10m。水管仪与垂直摆安装工作至今, 日观测值记录固体潮清晰, 具有较好的年周期变化, 观测精度达全国倾斜 I 类台站标准。

## 2 震例选取及异常特征简介

地倾斜观测一般在震中距 250km 左右可以接收到一定的前兆信息, 常熟地震台及周边地区属于少震弱震区, 2009 年至 2015 年台站周围 250km 内未发生过震级大于  $M_S$  5.0 级的地震, 仅在 2012 年发生过一次高邮-宝应  $M_S$  4.9 级地震, 中强地震震例较少, 为研究需要, 选取震中距在 250km 左右, 震级大于  $M_S$  3.5 的震例进行分析研究 (表 1)。

表 1 常熟地震台周边 5 次震例目录

Table 1 The records of 5 earthquake examples around Changshu seismic station

发震时间	震级/ $M_S$	震中距/km	发震地点	经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$
20100709	3.8	134	如东近海	121.36	32.30
20100719	3.8	133	如东近海	121.36	32.27
20120720	4.9	207	高邮-宝应	119.34	33.01
20120825	4.3	252	南黄海	121.55	33.11
20140118	3.7	132	如东近海	121.36	32.27

对于表 1 中所列出的震例, 除 2012 年 7 月 20 日高邮-宝应  $M_S$  4.9 级地震在常熟台垂直摆原始形态上未见明显短临异常外, 在 3 次如东地震 (震源位于同一地点)、1 次黄海地震前, 常熟台垂直摆的南北分量均在震前原始形态曲线上检测到了一些短临异常信息。常熟台倾斜仪降雨时, 在山体及位于形变山洞西南 4km、面积约  $6\text{km}^2$ 、水深约 2.5m、与山体大体平行的湖泊的共同作用下, 其日变值干扰形态均表现为东西分量向西倾, 南北分量向南倾 (图 1, 丁建国等, 2011)。但在这几次震例前, 垂直摆南北分量原始形态在降雨时表现为持续数天的向北倾斜加速异常, 与正常的降水干扰向南倾相反, 且在降雨停止后继续急剧北倾, 垂直摆东西分量异常不太明显, 倾斜观测矢量上出现北偏东的加速异常。例如在 2010 年 7 月 9 日如东近海  $M_S$  3.8 和 2012 年 8 月 25 日南黄海  $M_S$  4.3 地震前, 从图 2 (a)、(b) 可以看出降雨时垂直摆南北分量非但没有向南倾, 还出现了向北的拐点, 观测数据叠加了来自北部的构造活动, 说明存在北倾的合力, 应为孕震异常引起的地壳变形, 可理解为“断层运动加速 (倾斜加速)-断层弹性恢复 (地震)”。在同一时段内, 同一洞室的水管仪在原始形态上表现出正常的降雨干扰, 无异常反映。

这几次震前的短临异常与降雨有密切的关系, 说明地震的短期发震过程与环境是密切相关的, 特别是到了应变积累的临界状态, 小的应力扰动都可能加速地震的孕育过程 (王梅等, 2000; 张立等, 2005)。从几次垂直摆南北分量“倾斜加速-数天后地震”的模式来看, 几天的倾斜加速就孕育数次  $M_L$  4 左右的地震是难以想象的, 这说明应力早已积累, 地震前的倾斜加速仅是释放前的标志, 而水管仪及垂直摆南北分量观测数据在震前均未从原始形态上检测到明显的异常反映, 常熟台倾斜仪直接从原始数据发现异常的比例比较低, 因此有必要采用有效的数据处理分析方法来发现和提取异常信息。

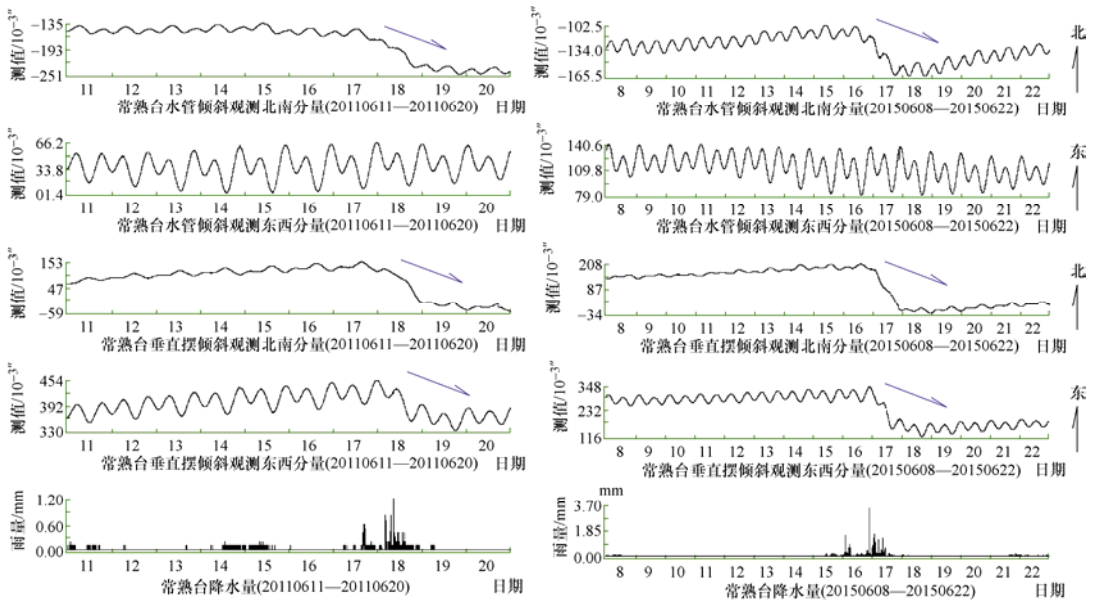


图 1 常熟台水管仪垂直摆降雨干扰图

Fig. 1 Interference diagrams of vertical pendulum and water pipe system from Changshu seismic station

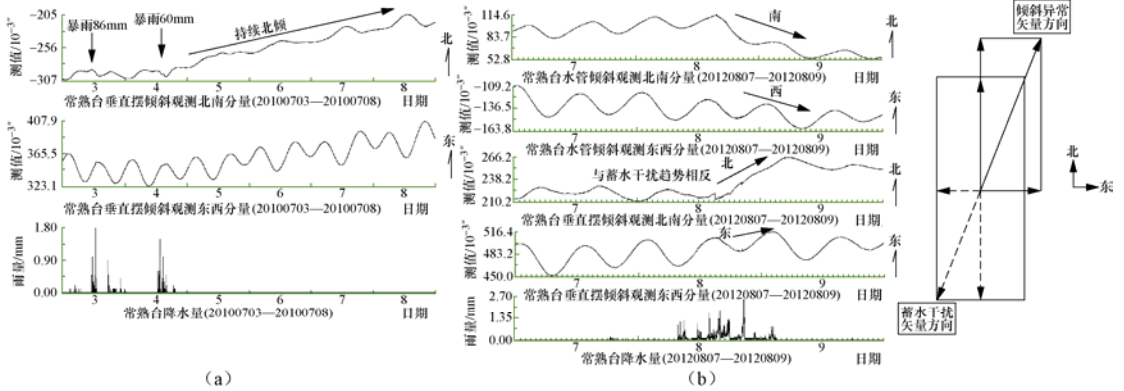


图 2 常熟台垂直摆南北分量倾斜加速异常图 (20100703—20100708 (a)、20120807—20120809 (b))

Fig. 2 Acceleration anomaly of vertical tilt of the north and south from Changshu seismic station

### 3 异常特征识别与提取

本文对观测数据中的人为干扰、影响幅度较大的环境因素（降雨等）、地震造成的突跳、阶跃台阶，以及其它类型干扰明显的非正常观测时间段的观测数据均进行相应的剔除和预处理，以提高观测数据的可信度，进行数据分析时选取合适的计算长度，尽量避开有较大环境因素（降雨等）干扰的时间段。在认定异常时对照辅助观测（如降雨、气温、气压）进行干扰识别，排除环境引起的变化。采用的异常判定的有效时间基本上是以震前半年左右，以超过 2 倍中误差作为异常评价标准。对基于潮汐分析的方法使用整点值，对基于时间序列数据的分析法均使用日均值。

### (1) 潮汐因子调和与分析

倾斜观测信息的优势频率是潮汐信息，其噪声相对较低，并且调和分析法能较为有效地去除潮汐频段中的局部及气象的干扰因素（张雁滨等，2001）。通过计算分析地倾斜仪潮汐因子值的变化，可以得到变化值与地震之间的对应关系和联系特征。潮汐因子半日波  $M_2$  稳定性好、灵敏度高，故以  $M_2$  波的潮汐因子作为实用指标。

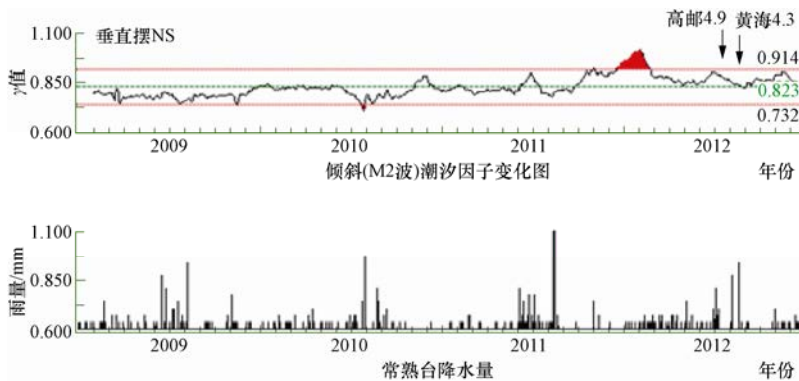


图3 常熟台垂直摆南北分量  $M_2$  波潮汐因子变化图

Fig. 3 Variation of tidal factor of  $M_2$  wave of north-south component in vertical pendulum from Changshu seismic station

2012 年高邮-宝应  $M_S$  4.9 级及南黄海  $M_S$  4.3 级地震之间相隔 35 天，震中地点均位于常熟台近北南方位 250km 范围内（表 1）。从图 3 可以看出垂直摆南北分量  $M_2$  波潮汐因子值从 2011 年 12 月 19 日开始趋势性增大，明显高于正常变化水平，并且超过 2 倍均方差，至 2012 年 2 月 5 日偏离正常背景值 21%，2012 年 3 月 5 日恢复正常，异常持续 3 个月左右。潮汐参数异常一般为在地震前呈趋势性变化或间断性的非稳定扰动变化，它反映了岩石介质应变积累进入非弹性变化的失稳阶段，为震前短期异常信息。

### (2) Nakai 拟合检验分析

Nakai 拟合检验是较为经典的潮汐资料处理方法，建立在潮汐理论上，用固体潮理论值与观测值进行异常检测，有利于对短时间序列资料进行计算分析，突出短期异常变化信息。

采用 Nakai 拟合检验计算了水管仪、垂直摆非潮汐应变加速度，从图 4 可以看出 5 次地震前水管仪、垂直摆上均出现了显著的异常，加速度值多次明显地超出了 2 倍均方差，水管仪出现超差异常的时间段比垂直摆提前 2—3 个月，垂直摆一般在震前 1 个月左右超差异常较为明显，震后恢复到正常水平，说明地震前常熟台附近地壳的非潮汐应力均出现了短时间的异常变化。

### (3) 小波分析

倾斜观测记录到的整时值能记录潮汐成分，也能记录到比地球潮汐频率更低的信号，这些信号可能包含前兆信息。常熟台倾斜观测受洞温影响成分比较稳定且有周期性，一般很容易将其消除。气压影响主要以短周期微动态干扰导致固体潮畸变，对观测数据的趋势性变化影响很小。天气波动、脉冲这类噪声经过 5 阶的分离基本消失。降雨干扰对倾斜观

测数据的日变化及年趋势性变化有较大影响，利用小波分析的频率多层分离方法能有效减弱降雨等自然环境影响，凸显异常信号，同时弱化了干扰信号（刘建明等，2016），随着分离层数的增加，观测数据中包括干扰的高频信息都能够被剔除，使固体潮信号随时间尺度的变化趋势更加明显、直观。本文对常熟台水管仪、垂直摆整点值观测资料采用 db4 小波分析法，对细节部分进行 9 阶分解，第 7，8，9 阶则是频率较低、信度较高的非潮汐变化信息（图 5）。

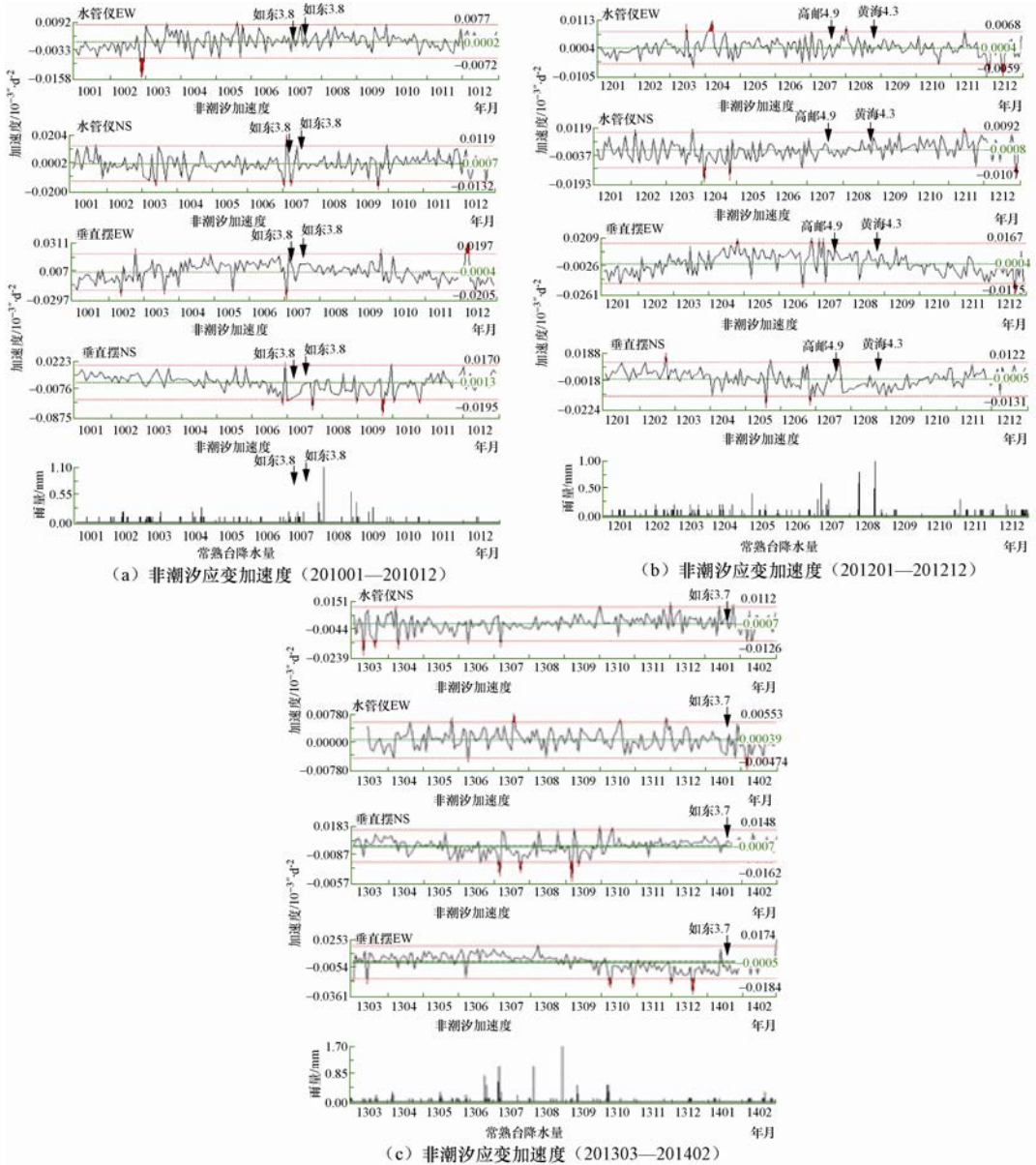


图 4 常熟台水管仪垂直摆非潮汐应变加速度

Fig. 4 Accelerations of non-tidal strain of water tube meter and vertical pendulum from Changshu seismic station

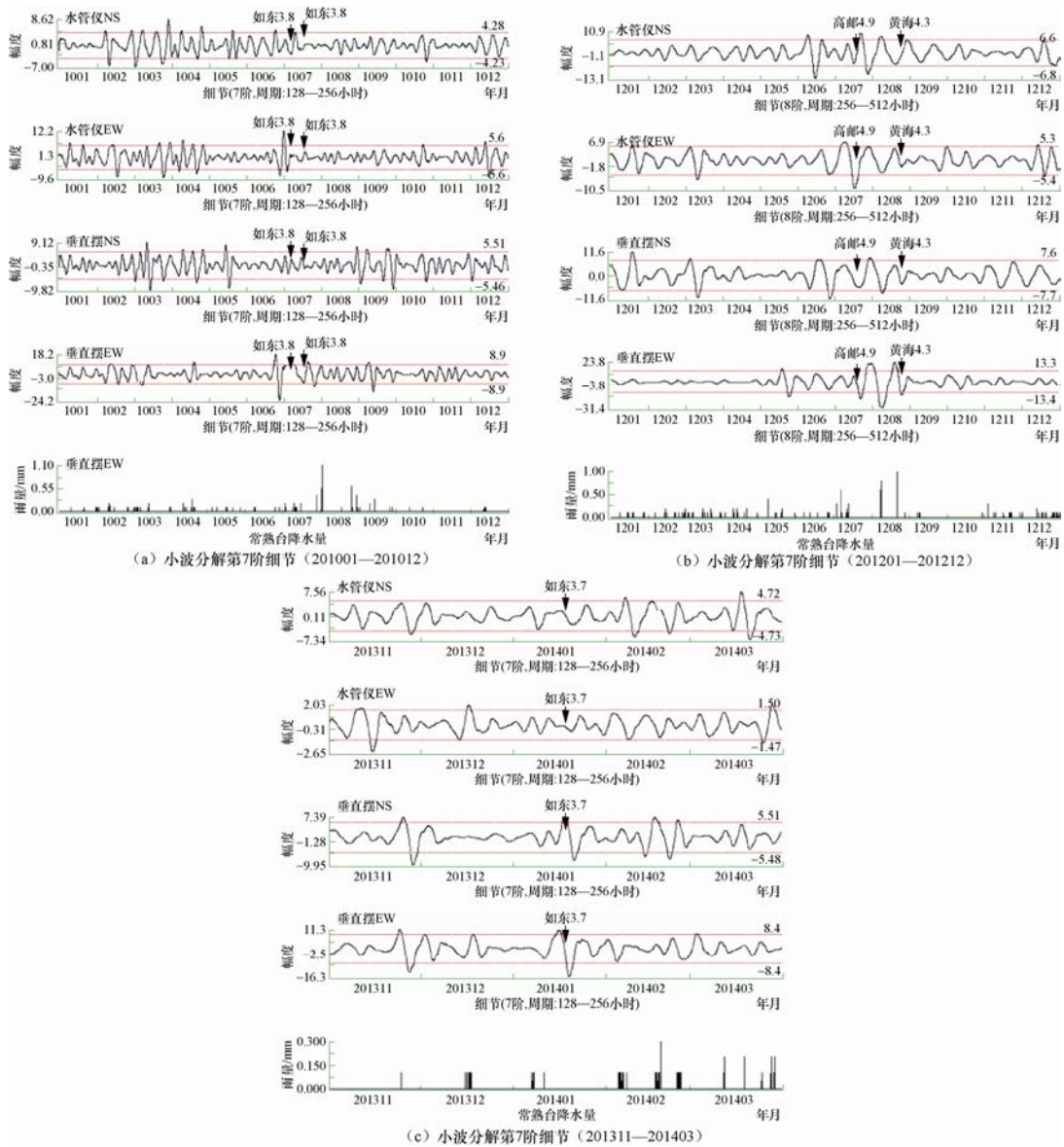


图5 常熟台水管仪垂直摆小波分解第7阶、8阶细节

Fig. 5 The wavelet decomposition result at 7th and 8th level of water tube meter and vertical pendulum from Changshu seismic station

图5(a)是2010年2次地点和震级相同(均为 $M_S$  3.8),时间相差10天的如东近海(表1)小波细节部分第7阶的结果。从图中看出水管仪、垂直摆震前5个月也出现了周期为几天到10多天、幅度明显且超过2倍均方差的明显异常信号。

图5(b)是小波细节部分第8阶的结果,从图中可以看出在高邮-宝应 $M_S$  4.9级地震前水管仪、垂直摆均接收到一个相同频段的较强异常信号,周期约为10到20多天,幅度比其他时间段出现的信号大,超过2倍中误差,出现时间在震前2个月左右。高邮-宝应地震发生

后, 此异常信号并没有消失, 紧接着 35 天后南黄海又发生了  $M_S$  4.3 级地震, 南黄海地震发生 10 天前垂直摆南北分量原始形态上出现过临震异常 (图 2 (b))。

图 5 (c) 是 2014 年如东近海  $M_S$  3.7 地震 (表 1) 小波细节部分第 7 阶的结果, 周期为几天到 10 多天。从图中看出, 与 2010 年如东近海地震震中地点相同, 震级基本相同的此次地震, 在震前 2 个月出现了超 2 倍均方差的现象, 但信号幅度强度不明显。

信号在传播过程中, 无论经过的介质性质如何, 它的频率特性不会改变, 即同一源发出的信号, 在各个接受点上出现的频段是一样的 (张燕等, 2003)。震前 2—6 个月出现周期为几天至 10 多天的同周期异常信号可能是地震前兆, 反映了震前震源区地壳介质在震前出现微变形的过程。

## 4 结论和讨论

(1) 从以上震例看, 运用潮汐因子调和和分析、Nakai 拟合检验、小波分析等方法对工作状态正常、稳定的常熟台 2 套倾斜仪的观测数据进行处理时, 在震前 6 个月左右都能检测到一定数量的异常信息, 对震级稍大或震级虽小但震中距较近的地震都有明显超出 2 倍中误差的超异常, 表明常熟台倾斜仪有较强的映震能力。而水管仪在震前从未在原始形态上检测到异常, 但经过这几种方法处理后显示出了明显的异常, 这表明这几种方法都具有较好的异常识别能力。

(2) Nakai 拟合检验分析处理时发现垂直摆较水管仪在震前 1—2 个月内出现异常的次数较多, 水管仪出现异常的时间段比垂直摆更早一些。运用小波分析法对常熟台倾斜数据进行处理后, 对于  $M_S$  4 及以上的中强地震都能从相同的频段 (7、8、9 阶) 上清晰检测出异常信息, 而通过潮汐因子调和和分析结果发现垂直摆南北分量对高邮-宝应  $M_S$  4.9 地震有明显的异常反映, 可信度高。

(3) 倾斜观测异常判别除原始形态直接判别异常外, 潮汐因子调和及小波分析方法有较强抗自然环境干扰能力, 实用性较高, Nakai 拟合检验则有一定参考价值, 可与其它分析方法结合使用。

(4) 从上述震例表明, 倾斜观测异常出现后并不一定马上发震, 地震发生往往要滞后一些, 一般在异常出现后 1—6 个月左右, 但异常的幅度与震级却无法看出明显的关系, 由于在观测有效范围内样本较少, 特别是缺少强震检验, 还有待进一步积累资料并开展研究。

## 参考文献

- 狄樑, 陈洪军, 冯志生等, 2003. 常熟地震台形变观测仪数字化改造. 地震地磁观测与研究, **24** (4): 92—95.
- 丁建国, 陆德明, 狄樑等, 2011. 常熟台倾斜仪降雨干扰定量分析. 华南地震, **31** (3): 83—88.
- 刘建明, 李志海, 孙甲宁等, 2016. 基于小波分析提取地倾斜异常特征. 地震, **36** (1): 38—48.
- 王梅, 季爱东, 2000. 山东省定点形变倾斜观测异常指标研究. 地震研究, **23** (4): 398—404.
- 张立, 牛安福, 汤曙恩等, 2005. 大姚地震前连续形变短期前兆特征. 地震, **25** (2): 75—82.
- 张燕, 吴云, 刘永启等, 2003. 潮汐形变资料中地震前兆信息的识别与提取. 大地测量与地球动力学, **23** (4): 34—39.
- 张雁滨, 蒋骏, 陈绍绪等, 2001. 连续形变的前兆参量、判别方法及实用化研究. 内陆地震, **15** (1): 1—10.

## **Analysis of Anomaly Characteristics of Tilt Measurement Data from Changshu Seismic Station**

Di Liang, Lu Deming, Ding Jianguo, Liu Dongdong and Qian Wenjie

(Changshu Seismic Station, Earthquake Administration of Jiangsu Province, Changshu 215500, Jiangsu, China)

**Abstract** Based on the year-observation data of vertical pendulum tilt and research of water pipe instrument in Changshu seismic station, we conducted the tide factor of harmonic analysis, Nakai test and wavelet analysis to extract the abnormal information of the range of 250km occurred near the station of the Gaoyou  $M_S$  4.9 and Rudong  $M_S$  3.8 offshore earthquakes. The abnormal data analysis method was evaluated in order to find precursor reference before the earthquake in the future.

**Key words:** Tilt observation; Water Tube meter; Vertical pendulum; Anomalies before earthquake; Analysis method