

# 河北形变观测资料映震能力浅析<sup>①</sup>

赵慧琴<sup>1</sup>, 马 栋<sup>2</sup>, 王 艳<sup>1</sup>, 王会芳<sup>1</sup>

(1.河北省地震局保定中心台,河北 保定 071000; 2.河北省地震局,河北 石家庄 050021)

**摘要:**采取 Nakai 拟合、振幅因子、调和分析和相对均方差等方法,对河北省数字化形变台站的形变观测进行计算和分析。结果表明,河北省形变观测资料中,怀来、易县和宽城的 VS 垂直摆倾斜仪、DSQ 水管倾斜仪和 SS-Y 伸缩仪观测资料对河北范围内的中强以上地震有中、短期映震能力。

**关键词:**形变观测; 前兆异常; 异常形态; 映震能力

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)增刊 2-0282-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.Supp.2.0282

## Analysis of Earthquake Reflection Based on the Hebei Deformation Observation Data

ZHAO Hui-qin<sup>1</sup>, MA Dong<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, WANG Hui-fang<sup>1</sup>

(1. Baoding Central Seismic Station, Earthquake Administration of Hebei Province, Baoding 071000, Hebei, China;

2. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

**Abstract:** This paper calculates and analyses the deformation observation data observed at Hebei province. The moderate and strong earthquakes in Hebei area are analyzed adopting the methods of Nakai fitting, amplitude factor, harmonic analysis and relative mean square deviation. The results show that the deformation data of vertical pendulum tilmeter, water tube tiltmeter and strain tide of Huailai, Yixian and Kuancheng in Hebei province have medium and short term reflecting earthquake ability for moderate strong earthquakes of the scope of Hebei.

**Key words:** deformation observation; precursor anomaly; abnormal shape; earthquake reflecting ability

## 0 引言

随着“九五”和“十五”数字地震前兆台网项目、“十五”并网项目等一系列项目的完成,全国大部分台站已实现数字化、网络化,整体上跨入了“第三代台网”,大大提高了资料的观测精度。

形变观测与研究是地震监测预报三大学科之一,也是直接物理量的观测。多年的观测资料表明,形变观测在震前有较明显的异常变化,并取得了较好的地震预报效果<sup>[1]</sup>。河北省是比较早进行形变数字化观测的省份,其中的五大形变台站资料产出连续、可靠。对其产出的形变观测资料进行系统分析

和研究,有效提取其综合震兆异常信号,对实现地震短临预报和年度震情跟踪具有重要意义。

本文对河北省近 10 年数字化形变观测资料进行系统整理,在分析排除各类干扰的基础上,结合周边台站地质条件,对形变观测资料中存在的各类不明干扰源的异常图像,对照中国地震台网地震目录、河北地震台网目录,结合统计时间段内在 E32°~43°,N105°~125°范围内发生的典型地震进行系统分析研究,查找形变观测中可能存在的地震前兆异常信息,并给出统计意义上的异常指标特征。

① 收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 河北省地震局监测、预测、科研三结合项目资助课题(2015123104)

作者简介: 赵慧琴(1982-),女(汉族),河北张家口人,工程师,硕士研究生,主要从事地震形变观测与流动地磁等相关工作。

E-mail: zhaohuiqinzhjk@163.com。

# 1 河北形变台站概况

河北省数字化形变台共有 5 个,分别是保定易县台、张家口大形变中心台、怀来台、承德宽城台和邯郸涉县台。五台站有相同型号的形变观测仪器,分别是 DSQ 型水管倾斜仪、VS 型垂直摆倾斜仪、SS-Y 型伸缩仪、TJ-1 型体积应变仪。数字化形变观测开始于 2001 年,本文选取其中 4 个台站(因张家口数字化入库的资料年度有限,所以未选用该台的数据)2005 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日的形变资料进行分析研究。各台站观测手段见表 1,所选用的地震目录如下表 2 所列。

表 1 河北形变台站形变资料使用情况表

台站	纬度/(°)	经度/(°)	手段	测向	资料起止时间
易县	39.14	115.37	垂直摆	NS,EW	2005-01-01—2014-12-31
			水管仪	NS,EW	
			伸缩仪	NS,EW	
			体应变		
			垂直摆	NS,EW	
宽城	40.59	118.48	水管仪	NS,EW	2005-01-01—2014-12-31
			伸缩仪	NS,EW	
			垂直摆	NS,EW	
怀来	40.44	115.52	水管仪	NS,EW	2005-01-01—2014-12-31
			伸缩仪	NS,EW	
涉县	36.54	113.68	垂直摆	NS,EW	2005-01-01—2014-12-31

表 2 2005—2014 年 (E32°~43°,N105°~125°) 大于 3.5 级以上典型震例

发震时间	北纬/(°)	东经/(°)	震级	发震地点
2006-07-04	38.90	116.25	5.1	河北文安
2008-03-11	39.90	118.90	3.9	河北卢龙
2010-03-06	39.70	118.50	4.2	河北唐山
2012-05-28	39.70	118.50	4.8	河北唐山
2014-09-06	40.30	115.40	4.3	河北涿鹿

本文选取的形变台站构造及地震分布情况见图 1。

# 2 地震与形变异常关系分析

对河北省形变观测资料中的人为干扰、年接头、环境因素、地震造成的突跳及其他类型异常进行了相应的预处理,同时采取 Nakai 拟合检验、振幅因子、采用调和分析和相对均方差等多种方法对预处理后的形变观测数据进行分析,并与地震目录相结合,对 2005 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日河北形变台站数字化形变数据资料以年为单位进行作图处理,以系统偏离背景为异常评价标准,从中提取出异常连续形变前兆异常的基本形态。

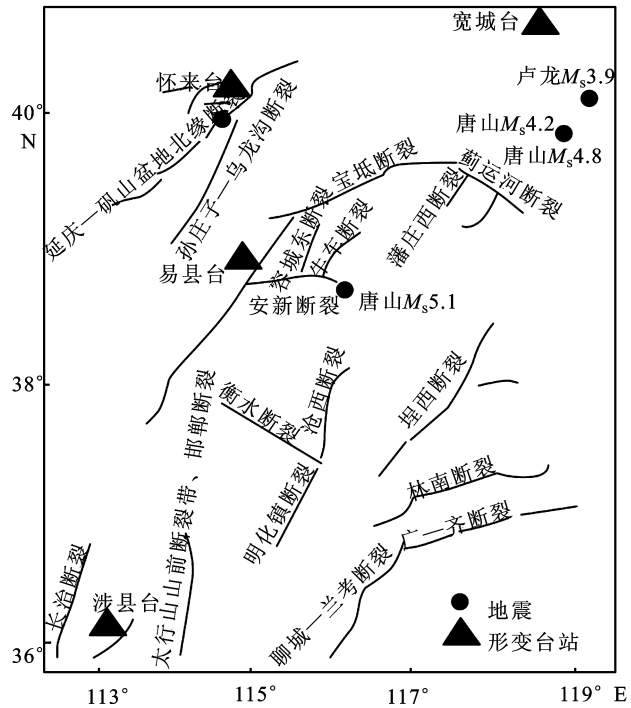


图 1 昌黎台及周边断层分布图

## 2.1 Nakai 拟合分析

图 2 是对怀来垂直摆、水管仪,涉县垂直摆,易县伸缩仪和体应变进行 Nakai 拟合分析与地震的对应关系。根据图 2 可见,怀来垂直摆 NS 向在 2008 年 3 月 11 日卢龙  $M_s3.9$  地震和 2012 年 5 月 28 日唐山  $M_s4.8$  地震前,Nakai 拟合方差值出现了异常变化,表现为明显的偏离背景值,超 2 倍方差。怀来水管仪 EW 向在 2014 年 9 月 6 日涿鹿  $M_s4.3$  地震前,Nakai 拟合方差值出现了异常变化,对于其他的地震没有明显的震前异常反应,该异常表现为明显的偏离背景值。涉县垂直摆 NS 向在 2006 年 7 月 4 日文安  $M_s5.1$  地震、2012 年 5 月 28 日唐山  $M_s4.8$  地震(以下简称唐山 4.8 级地震,其他地震类推)前,Nakai 拟合方差值均有异常变化。在唐山 4.8 级地震前,涉县垂直摆 NS 向的异常反应时间比文安 5.1 级地震前的异常变化持续短。易县伸缩仪 NS 向只有在 2012 年 5 月 28 日唐山 4.8 级地震前出现了明显的异常变化,且异常反应幅度大,持续时间长,具体详见统计表 3。

## 2.2 振幅因子分析

振幅因子分析是以怀来垂直摆、水管,宽城水管和易县伸缩为例进行与地震的对应研究(图 3)。如 2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级地震、2012 年 5 月 28 日唐山 4.8 级地震和 2014 年 9 月 6 日涿鹿 4.3 级地震,在地震前相应的时段怀来垂直摆和水管 EW 向

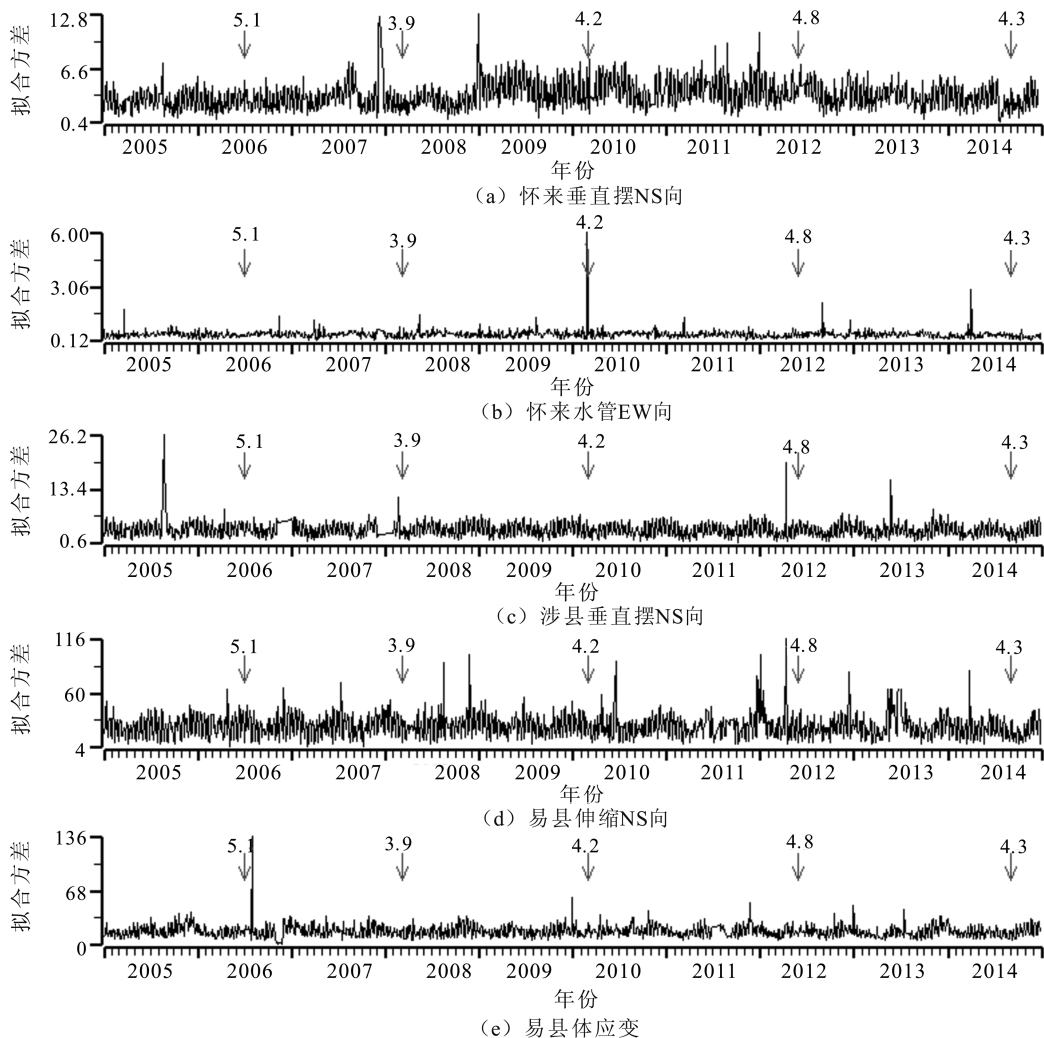


图2 2005—2014年 Nakai 拟合分析曲线与地震对应关系

均出现异常。2006年7月4日文安5.1级地震和2012年5月28日唐山4.8级地震前相应的时段宽城水管EW向、易县伸缩EW向也均有异常出现。以上异常均表现为上升、下降突跳，即出现高值、低值变化。

从图2、3可以看出，Nakai拟合方法和振幅因子分析法在震前都检测到了一定程度的前兆异常，这说明该方法有一定的映震能力。从预报角度看，上述震例表明，异常出现后并不一定马上发震，往往要滞后一段时间，一般在异常出现2~3个月左右。在监测台站较为密集的地区，异常台站的分布对发震地点也有一定的提示，但异常的幅度与震级却看不出存在明显的数量关系。当然，这些前兆与地震的关系是确实的还是巧合，还有待进一步研究，但大多数异常还是可信的<sup>[6]</sup>。

### 2.3 Venedikov 调和分析

怀来台伸缩仪与水管仪NS、EW向 $M_2$ 波潮汐

因子时序变化见图4。从图4可见，在2006年7月4日文安5.1级地震、2008年3月11日卢龙3.9级地震、2012年5月28日唐山4.8级地震前，怀来台伸缩仪EW向 $M_2$ 波潮汐因子均有不同程度的异常出现，均表现为潮汐因子高值异常；文安5.1级地震、唐山4.8级地震前，怀来台水管仪NS向 $M_2$ 波潮汐因子表现为低值异常；水管仪EW向 $M_2$ 波潮汐因子，文安5.1级地震和唐山4.8级地震前，分别出现了低值异常和高值异常。

从图5可见，在2006年7月4日文安5.1级地震、2012年5月28日唐山4.8级地震前，宽城台伸缩仪NS向和EW向 $M_2$ 波潮汐因子均有不同程度的异常出现，均表现为 $M_2$ 波潮汐因子高值异常；易县台水管仪EW向 $M_2$ 波潮汐因子，文安5.1级地震、卢龙3.9级地震、唐山4.2级地震和2012年5月28日唐山4.8级地震前均出现了异常，表现为 $M_2$ 波潮汐因子的上升、下降扰动，其异常明显，异常幅

度较大;易县台体应变  $M_2$  波潮汐因子,在 2012 年 5 月 28 日唐山 4.8 级地震前出现低值异常情况,在

2014 年 9 月 6 日涿鹿 4.3 级地震前出现了小幅度的扰动情况<sup>[2]</sup>。

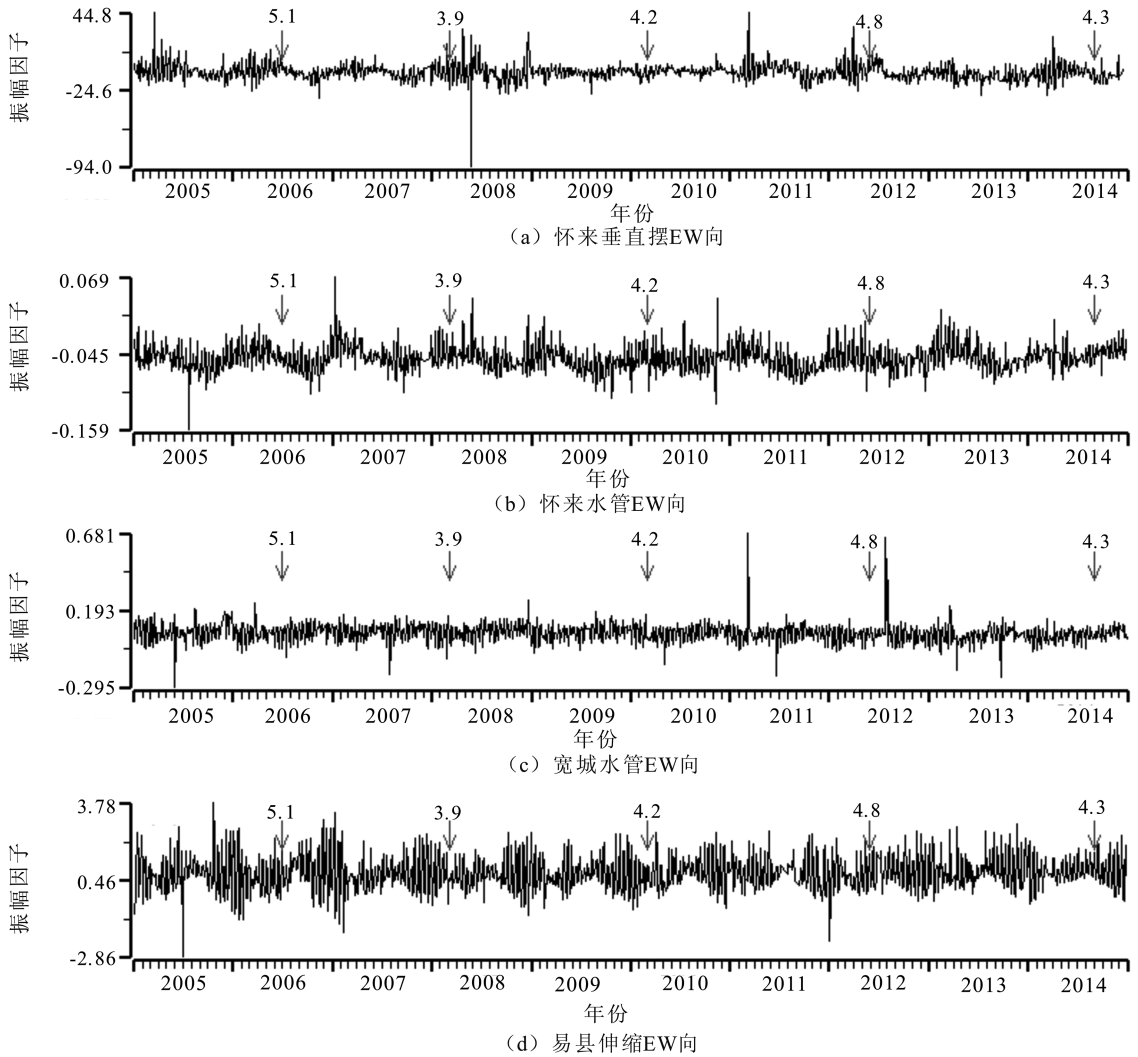


图 3 2005—2014 年振幅因子分析曲线与地震对应关系

### 2.4 相对均方差分析

均方差是衡量一个样本波动大小的量,样本方差越大,样本数据的波动就越大。相对均方差是指均方差相对于均值的变化程度,即衡量的是样本与样本均值的偏离程度。

图 6 是易县台垂直摆 NS 和 EW 向、伸缩仪 NS 向、水管仪 EW 向相对均方差分析的时序曲线图。从图 6 可以看出,在文安 5.1 级地震、卢龙 3.9 级地震和唐山 4.8 级地震前,垂直摆 NS 和 EW 向、伸缩仪 NS 向、水管仪 EW 向四个测项的相对均方差时序曲线均出现了显著的异常,相对均方差的异常形式呈现为偏离背景值的连续高值异常。另外,除了水管仪 EW 向之外,其他三个测项在涿鹿 4.3 级地震前也有异常出现,其异常形式均表现为偏离背景

值的异常变化。

### 2.5 震例异常统计

河北形变资料震例异常统计见表 3。

## 3 分析与汇总

### 3.1 水管倾斜仪资料震例分析

DSQ 型水管仪,观测精度均优于  $10^{-9}$ ,自正式记录以来,资料稳定可靠,固体潮形态记录清晰。本文选取 2005—2014 年河北省形变台站的资料对  $E32^{\circ}\sim 43^{\circ}, N105^{\circ}\sim 125^{\circ}$  范围内,震级大于 3.5 级以上的典型地震进行异常分析。

据表 3 的统计表明,水管仪两个方向的拟合方差、振幅因子、 $M_2$  波潮汐因子和相对均方差都出现了不同程度的偏离正常值变化,除去可信度偏低

表3 形变资料震例参量统计表

震例	分析方法	异常项	异常时间	异常形式	异常幅度
2006-07-04 文安 M5.1	拟合方差	怀来垂直 NS	2005-08-06—08-21	高值	单方向扰动
		涉县垂直 NS	2005-08-20—09-01	高值	超2倍方差
	振幅因子	怀来垂直 EW	2005-03-03—07-18	高值	连续高值
		怀来水管 EW	2005-07-11—07-27	低值	超2倍方差
		宽城水管 EW	2005-05-15—2006-03-24	低值	超2倍方差
		易县伸缩 EW	2005-06-19—07-03	低值	超2倍方差
			2005-10-03—2006-02-03		
	潮汐因子	宽城伸缩 NS	2005-08-18—2006-01-25	高值	连续高值
		宽城伸缩 EW	2005-12-24—2006-01-23	高值	连续高值
		易县水管 EW	2006-01-29—03-10	高值	连续高值
怀来伸缩 EW		2005-12-20—2006-01-29	高值	连续高值	
怀来水管 NS、EW		2005-12-24—2006-01-23	低值	连续低值	
相对均方差	易县垂直 EW	2005-12-23—2006-02-02	扰动	连续扰动	
	易县水管 EW	2005-12-26—2006-04-24	扰动	连续扰动	
2008-03-11 卢龙 M3.9	拟合方差	怀来垂直 NS	2007-12-07—25	高值	超2倍方差
		涉县垂直 NS	2008-02-04—03-10	高值	单点扰动
	潮汐因子	易县水管 EW	2007-10-06—2008-01-31	扰动	超2倍方差
相对均方差	易县垂直 EW	2007-05-31—2008-03-11	扰动	连续扰动	
	易县水管 EW	2008-01-02—03-11	扰动	连续扰动	
2010-03-06 唐山 M4.2	潮汐因子	易县水管 EW	2009-07-23—09-17	扰动	超2倍方差
2012-05-28 唐山 M4.8	拟合方差	怀来垂直 NS	2011-07-10—12-31	高值	连续高值
		涉县垂直 NS	2012-04-08—24	高值	连续高值
		易县伸缩 NS	2011-12-12—2012-04-16	高值	连续高值
	振幅因子	怀来垂直 EW	2011-02-12—06-04, 2012-02-13—04-04	高值	连续高值
		宽城水管 EW	2011-02-21—10-16	高值	连续高值
		易县伸缩 EW	2011-12-14—2012-01-09	低值	单方向扰动
		宽城伸缩 NS	2011-07-16—08-25	高值	超2倍方差
	潮汐因子	宽城伸缩 EW	2011-07-20—09-18	高值	连续高值
		易县水管 EW	2011-09-14—10-18	低值	单点扰动
		易县体应变	2011-08-01—09-25, 2012-04-04—05-14	低值	单方向扰动
怀来伸缩 EW		2011-12-24—2012-01-29	高值	单方向扰动	
怀来水管 NS		2012-04-04—05-05	低值	超2倍方差	
相对均方差	怀来水管 EW	2011-12-13—2012-05-14	高值	超2倍方差	
	易县垂直 EW	2011-07-29—2012-02-07	扰动	连续扰动	
	易县伸缩 NS	2011-06-03—2012-05-28	高值	连续高值	
	易县水管 EW	2011-12-21—2012-04-24	扰动	连续扰动	
	易县垂直 EW	2014-03-16—04-12	高值	连续高值	
2014-09-06 涿鹿 M4.3	振幅因子	怀来水管 EW	2014-03-26—05-30	高值	连续高值
		易县体应变	2013-12-03—2014-02-08	扰动	连续扰动
	相对均方差	易县垂直 EW	2014-04-26—06-05	扰动	连续扰动
易县伸缩 NS		2014-06-24—08-11	扰动	连续扰动	

的单点突跳,几次地震前均有计算指标出现持续异常(图2~图6)。

2006年7月4日文安5.1级地震前,怀来、宽城水管仪EW向振幅因子出现超2倍方差的低值短临异常,其他拟合方差、相对均方差异常信息不明显,易县水管EW向大约2个月的M<sub>2</sub>波潮汐因子连续高值异常;怀来水管NS、EW向大约1个月的M<sub>2</sub>波潮汐因子连续低值异常;易县水管EW向有3个月

的相对均方差连续扰动异常出现。2008年3月11日卢龙3.9级地震前,易县水管EW向约有3个月的M<sub>2</sub>波潮汐因子连续扰动异常,约2个月的相对均方差连续扰动,在异常的过程中发震,拟合方差和振幅因子无明显的异常出现。2012年5月28日唐山4.8级地震前,怀来水管NS向在震前1个月M<sub>2</sub>波潮汐因子出现超2倍方差的低值异常,异常后23天发震,EW向大约5个月的M<sub>2</sub>波潮汐因子超2倍方

差的连续高值异常,异常结束后 14 天发震。易县水管 EW 向相对均方差在唐山 4.8 级地震前出现 3 个

月的连续扰动情况,在异常结束大约 1 个月后发震<sup>[4]</sup>。

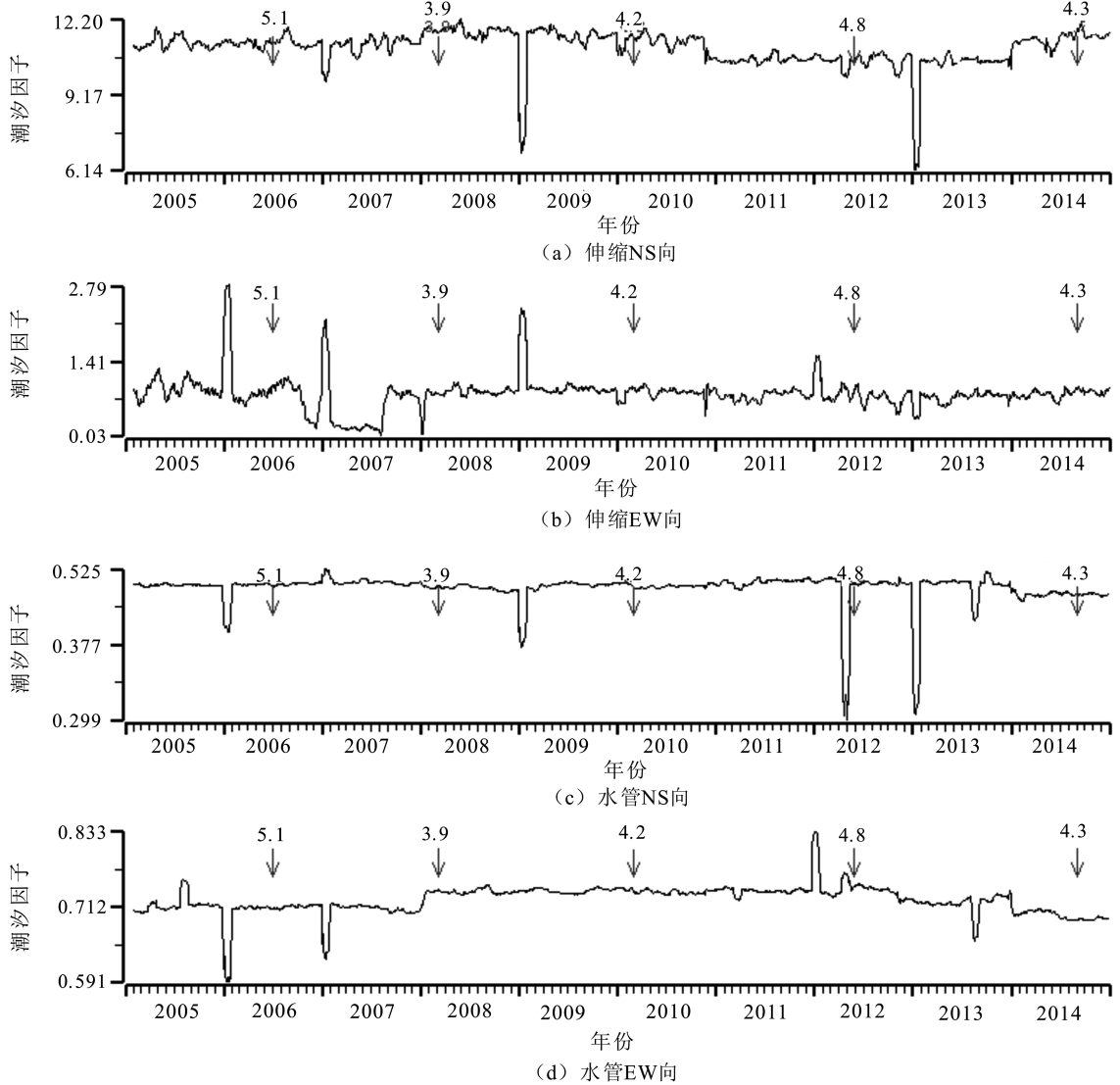


图 4 2005—2014 年怀来伸缩仪与水管仪 M<sub>2</sub> 波潮汐因子曲线与地震对应关系

由此可见,对于我们选用的四种方法中基于振幅因子、M<sub>2</sub> 波潮汐因子以及相对均方差这三种方法,河北水管倾斜仪资料体现出较好的映震效果,对该省范围内的中强地震有很好的映震能力<sup>[3]</sup>。据不完全统计,河北水管仪资料的异常形态可以归纳为:(1)振幅因子和 M<sub>2</sub> 波潮汐因子超 2 倍均方差的低值、高值;(2)相对均方差超 2 倍方差扰动或连续扰动。

### 3.2 SS-Y 伸缩应变仪观测资料震例分析

SS-Y 型伸缩应变仪自正式记录以来,资料稳定可靠,固体潮形态记录清晰。图 2~图 6 中有关于河北形变台站伸缩仪 NS 向和 EW 向的拟合方差、振幅因子、M<sub>2</sub> 波潮汐因子和相对均方差时序变化

曲线,表 3 是 5 次震例的异常统计结果。据表 3 的统计表明,易县、宽城伸缩两分向、怀来伸缩 EW 向的振幅因子、M<sub>2</sub> 波潮汐因子和相对均方差均出现了不同程度的偏离正常值变化,除去可信度偏低的单点突跳,几次地震前均有计算指标出现持续异常。

2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级地震前,易县伸缩 EW 向振幅因子出现超 2 倍方差的低值短临异常,宽城伸缩两分向和怀来伸缩 EW 向也出现超 2 倍方差的连续高值异常,其他拟合方差、相对均方差异常信息不明显。2012 年 5 月 28 日唐山 4.8 级地震前,易县伸缩 EW 向约 1 个月的振幅因子出现单方向低值异常,宽城伸缩两分向和怀来伸缩 EW 向约 1 个月的 M<sub>2</sub> 波潮汐因子出现连续高值情况,易县

伸缩 NS 向相对均方差时序曲线在大约半年前出现连续高值异常,在异常的持续过程中发生地震,震后时序曲线趋于平静。2014 年 9 月 6 日涿鹿 4.3 级地

震前,易县伸缩 NS 向大约 1 个半月的相对均方差出现连续扰动的情況,在异常平静后的 25 天发震<sup>[5]</sup>。

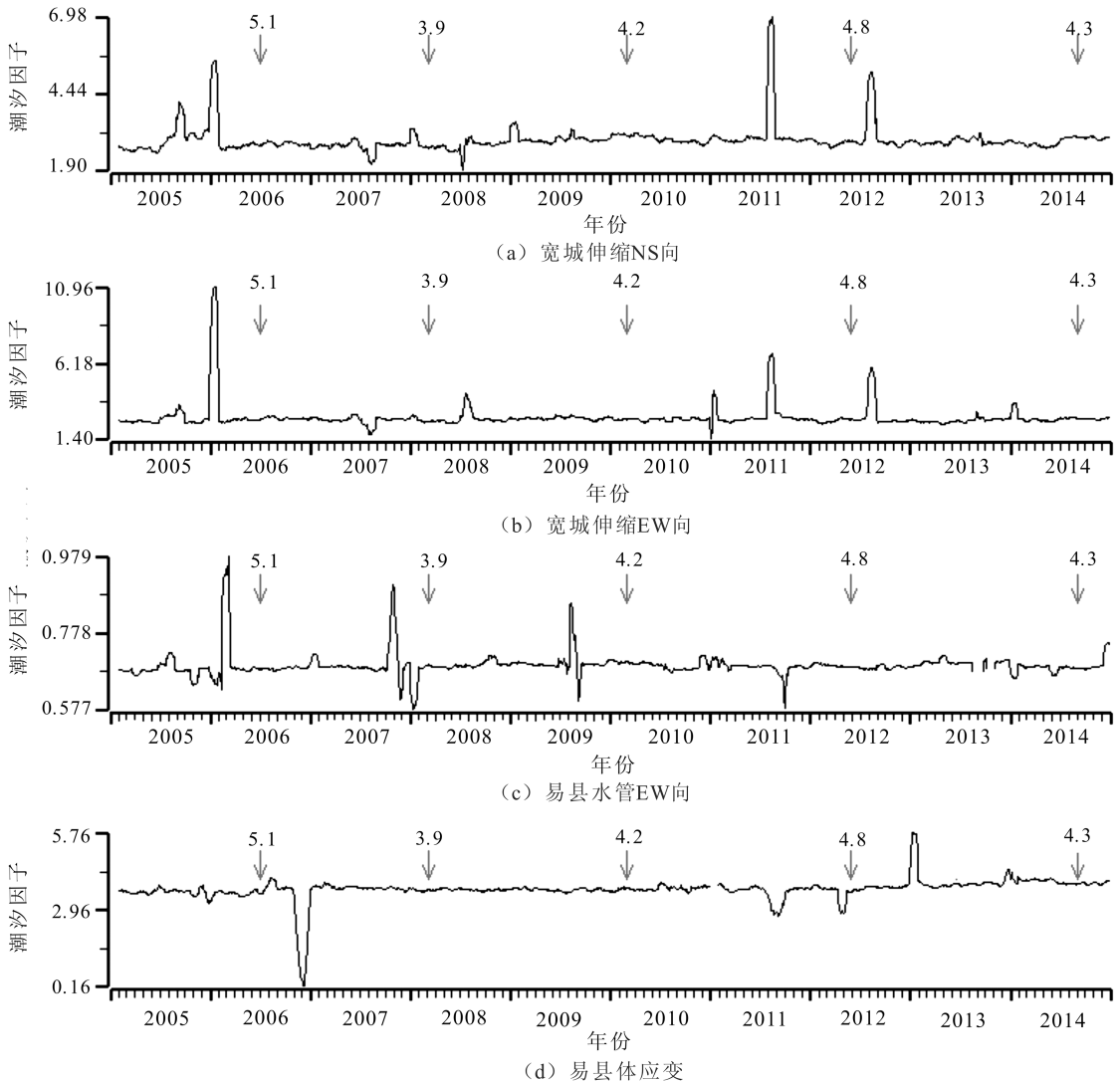


图 5 2005—2014 年宽城伸缩仪与易县水管仪、体应变  $M_2$  波潮汐因子曲线与地震对应关系

由此可见,对于我们选用的四种方法中基于振幅因子、 $M_2$  波潮汐因子以及相对均方差这三种方法,河北伸缩应变仪观测资料体现出较好的映震效果,对该省范围内的中强地震有很好的映震能力。据不完全统计,河北伸缩应变仪资料的异常形态可以归纳为以下几种类型:(1)振幅因子和  $M_2$  波潮汐因子超 2 倍均方差的低值、高值;(2)相对均方差超 2 倍方差连续高值或连续扰动。

### 3.3 VS 垂直摆倾斜仪震例分析

VS 型垂直摆倾斜仪两个方向的观测资料年变周期比较规律,并且趋势变化基本上不受抽水、降雨等干扰。图 2~图 6 中有关于河北形变台站垂直摆 NS 向和 EW 向的拟合方差、振幅因子、 $M_2$  波潮汐

因子和相对均方差时序变化曲线,表 3 是 5 次震例的异常统计结果。据表 3 的统计表明,怀来、涉县垂直 NS 向的拟合方差,在其中 4 次地震前均出现了不同程度的偏离正常值的变化;怀来垂直 EW 向的振幅因子,在其中的 3 次地震前出现了不同程度的偏离正常值的变化;易县垂直 EW 向的相对均方差时序曲线,在 5 次地震前均出现了不同程度的偏离正常值变化,除去可信度偏低的单点突跳,均有计算指标出现持续异常。

2006 年 7 月 4 日文安 5.1、2008 年 3 月 11 日卢龙 3.9、2012 年 5 月 28 日唐山 4.8 地震前,怀来、涉县垂直 NS 向的拟合方差均出现了不同程度的持续高值异常;怀来垂直 EW 向振幅因子时序曲线,在

2006年7月4日文安5.1、2012年5月28日唐山4.8和2014年9月6日涿鹿4.3级地震前均出现了连续的高值异常;易县垂直EW向的相对均方差的

时序曲线,对于除2010年3月6日唐山4.2级地震以外的地震前均表现为连续扰动变化,之后在异常平静后不同的时段发震。

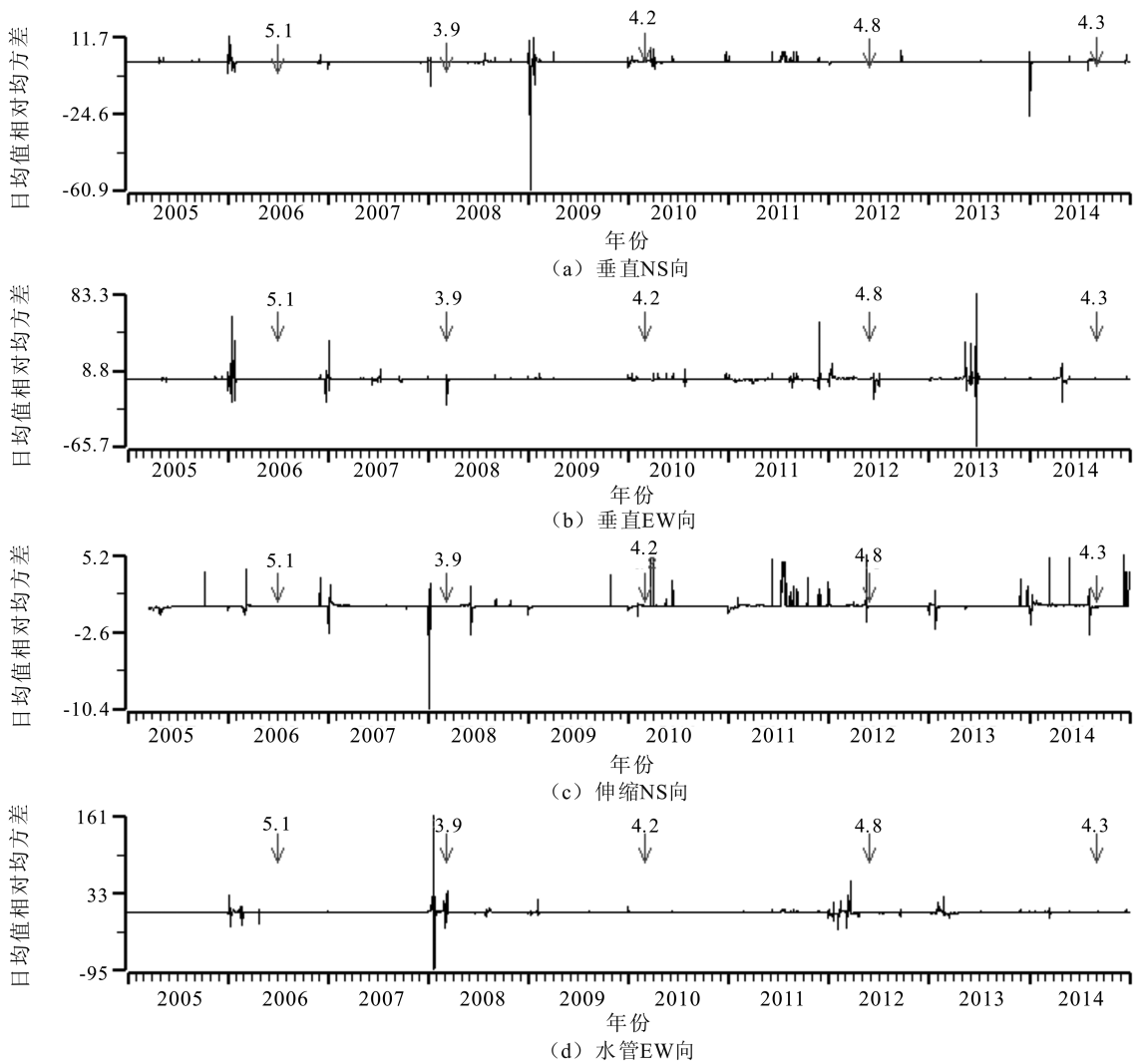


图 6 2005—2014 年易县台垂直摆、伸缩仪与水管仪相对均方差分析曲线与地震对应关系

由此可见,对于我们选用的四种方法中基于拟合方差、振幅因子、以及相对均方差这三种方法,河北垂直摆倾斜仪观测资料体现出较好的映震效果,对该省范围内的中强地震有较好的映震能力。据不完全统计,河北垂直摆倾斜仪观测资料的异常形态可以归纳为以下几种类型:(1)拟合方差和振幅因子表现出持续的高值异常;(2)相对均方差超 2 倍方差连续扰动。

### 4 结论与讨论

(1) 河北省形变台站的观测资料中,水管倾斜仪观测资料对河北省范围内地震有中、短期预测能力。水管倾斜仪在 2006 年 7 月 4 日河北文安 5.1

级、2008 年 3 月 11 日河北卢龙 3.9 级和 2012 年 5 月 28 日河北唐山 4.8 级地震前表现出多指标异常,其中唐山 4.8 级地震前异常幅度和时间要比文安 5.1 级地震前异常幅度大、持续时间长。唐山地震、文安地震前易县、怀来和宽城的水管均表现为形态突变的短临异常,而地震则发生在易县水管 EW 向趋势异常过程中。

(2) SS-Y 型伸缩仪在 2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级、2012 年 5 月 28 日唐山 4.8 级和 2014 年 9 月 6 日涿鹿 4.3 级地震前表现出多指标的异常特征,其中文安 5.1 级地震前异常时间和幅度要比唐山 4.8 级地震前异常持续时间长、幅度大,并且易县伸缩 NS 向的相对均方差时序曲线在涿鹿 4.3 级地震前



出现连续扰动的异常。以上均表现为形态突变的短临异常。

(3) 河北垂直摆倾斜仪在2006年7月4日文安5.1级、2008年3月11日卢龙3.9级、2012年5月28日唐山4.8级和2014年9月6日涿鹿4.3级地震前表现出较好的短临异常。易县垂直摆在基于相对均方差的时序曲线中,在河北范围内大于3.5级的5次地震,地震前均出现了明显的异常变化,其异常形态表现为连续的扰动异常。而怀来垂直EW向振幅因子时序曲线,在文安5.1级、唐山4.8级和涿鹿4.3级地震前均发生了异常变化,其异常形态表现为连续的高值异常。

(4) 河北省形变台站的观测资料中,怀来、易县和宽城的VS垂直摆倾斜仪、DSQ水管倾斜仪和SS-Y伸缩仪观测资料体现出很好的映震能力,对河北范围内的中强以上地震有中、短期映震能力,据不完全归纳,其异常形态可以归纳为:形态和趋势,其中形态异常可归纳为超2倍均方差的连续高值、低值的异常,趋势异常体现为超2倍方差或连续扰动异常。

(5) 数字化采样的实现,使得记录数据信息更加丰富,河北省形变观测仪稳定性好,观测精度高,因此利用形变观测分钟值提取短临或临震异常信息是可行的;水管倾斜仪和伸缩仪记录的分钟值曲线因受到爆破、雷电、大风、气压等干扰较多,而且又不易排除干扰,目前要想从这些测项中提取临震异常

信息还存在比较大的困难<sup>[7]</sup>。

最后需要说明一点,异常与地震并不是一一对应关系,异常出现也并不意味着立刻地震,需要经过一段时间才可能发生地震。通过分析可以看出形变异常具有较好的映震能力,但提高数据的映震能力要进一步研究。目前形变资料分析需要进一步拓展,从仪器自身条件、地质地形条件及其他理论方面提高形变数据映震能力,为日后地震监测预报工作提供理论依据。

致谢:感谢马栋和王长江老师在论文的撰写和修改过程中给予的帮助和指导。

## 参考文献

- [1] 陈德福, 聂磊. 液体静力水准仪及其应用[M]. 北京: 地震出版社, 2002.
- [2] 赵慧琴, 李均良, 张跃刚, 等. 河北易县台形变异常映震能力分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37(增刊1): 91-94.
- [3] 赵慧琴, 李均良, 张肖, 等. 唐山4.8级地震前地应变异常特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(6): 73-79.
- [4] 郭安宁, 郭志宇, 赵乘程, 等. 2013年甘肃岷县漳县M<sub>s</sub>6.6地震及短临前兆的显现[J]. 地震工程学报, 2015, 37(1): 981-985.
- [5] 王兰民, 吴志坚. 岷县漳县6.6级地震震害特征及其启示[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 401-412.
- [6] 张晶, 牛安福, 高福旺, 等. 固体潮汐参数变化与地震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 86-90.
- [7] 王曰风, 等. 地应变震兆异常信息提取方法研究[J]. 地震地磁观测与研究, 1993, 15(4): 8-15.