

地壳体应变异常及其映震效能分析

杨修信 刘冬英

(国家地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要 本文分析了几个体应变观测台站的资料, 通过数学方法, 提取可能与地震孕育有关的中短期应变趋势变化, 计算了潮汐因子, 然后选取一定的判别标准, 识别其中的异常。通过震例检验表明, 体应变异常变化与地震有一定的相关性。本文的数据处理方法在识别震前异常方面有一定效果, 所提取的异常信息与地震发生在时间上有较好的对应关系。

关键词: 体应变; 潮汐因子; 短临异常

自八十年代开始, 我国自行研制的 TJ-1A 型钻孔式体积应变仪, 已有多台投入野外台站观测, 取得了一批实测资料, 也积累了一些震例。本文拟以首都圈体应变观测台站的资料为例, 探索从中提取震前异常信息的方法, 分析体应变异常与地震发生的关系。

1 测点概况及应变资料的预处理

在首都圈范围(113°.5—120°.0E, 38°.5—41°.0E)内, 已投入地震监测的体应变台站有张家口、怀来和昌平三个台其基本情况如表1所示, 位置分布见图1。

表1 首都圈 TJ-1A 型体应变仪观测台站概况

台站名称	纬度	经度	探头埋深 (m)	井孔岩性	仪器安装 日期
河北省 张家口台	40°50'	114°54'	55	火山岩	1989-05
河北省 怀来台	40°26'	115°31'	61	花岗岩	1988-04
北京 昌平台	40°15'	116°12'	58	白云质灰岩	1987-07

为了确切地了解测区应变状态的变化, 须对实测资料进行预处理。

(1) 定性验证观测数据的变化与测区体应变状态的一致性

按照测量原理, 体应变实测数据的变化应反映被测地区体应变状态的变化。由于耦合状况和条件等局部因素的影响, 各测点数据的变化对测区应变状态的响应情况不尽相同。我们可以把理论固体潮作为测区的一个已知的体应变状态, 将各台站的体应变观测资料, 与相应的体应变固体潮理论值一一作了对比, 纠正了个别台站某些时段内的不协调数据, 并把观测资料归一化, 以测值上升表示测区压应变增强, 以测值下降表示压缩应变相对减弱, 即相对呈现体膨胀。

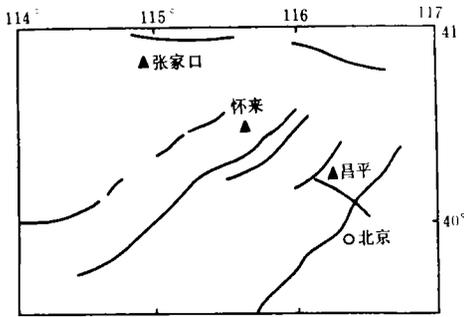


图1 首都圈 TJ-1A 型体积式应变仪台站分布图

Fig.1 Distribution of TJ-1A bulk strainmeter stations in the capital circle.

(2)分析实测数据变化与测区体应变状态的定量关系

前已述及,实测体应变与测区真实的体应变状态会有一些的差异。这种差异的表现形式之一,是实测应变潮幅一般都小于理论潮幅。

对比各台站实测应变固体潮与理论固体潮后我们发现,台站的实测固体潮波幅,基本上都在正常的变化范围以内。对于个别有误的情况,我们通过应变格值的正确标定,得到了测区比较真实的体应变变化。

(3)观测数据的拼接和播补

由于电源故障或仪器检修,观测资料有时会出现断数。在恢复供电之初,其观测曲线

出现畸变,一般表现为测值由低到高快速变化,几个小时后才完全恢复,在此之前的观测结果并不反映测区的应变变化,但其形态有重复性,可用适当的方法予以拼接和播补。

2 趋势性应变异常分析

体应变仪在记录到应变固体潮的同时,其观测值也会出现比较缓慢的趋势性变化。这种变化,是由钻孔的蠕变、耦合介质性质的缓慢变化、地壳构造运动、与震源孕育有关的应变积累,以及某些干扰因素等所引起的。为了提取可能与地震有关的中短期(几天至几个月的)趋势性异常变化,我们对原始资料作了以下处理:

(1)消除地球应变固体潮。日均值法对固体潮的滤波效果不及别尔采夫法,但因其能满足应变趋势分析的要求,且简便易行,故而被广泛采用。本文即是对体应变日均值序列作进一步趋势变化分析。

(2)消除周期小于几天的高频变化成份。对于趋势分析而言,这种高频成份带有一定的随机性,通过滑动予以消除。

(3)消除长周期趋势变化。本文通过多项式拟合得到观测值序列中的长趋势变化,并予以消除。

(4)根据辅助观测资料,进一步作干扰因素排除。主要通过回归分析进行相应的数值改正,以排除或消弱干扰因素的影响。

下面介绍各个台站根据具体情况对资料所作的处理结果。资料时段均为正式投入观测的1990年1月至1992年9月。

2.1 张家口台

张家口台体应变日均值曲线、消除长周期和高频成份后的应变曲线,以及经气压改正后的应变曲线分别示于图2中。由图2可见,1991年4月下旬至8月上旬,出现了明显的张性应变趋势异常:测值先以较大速率下降(张性),6月24日转折反向(压性),接着又以很高的应变速率回升(张性)。异常持续约100天,最大异常幅度为 10^{-7} 应变量级。在图2b和图2c

中,6月中、下旬的异常数值分别超过了相应的3倍标准差 S (样本数 $N=1004, S_1=19.9 \times 10^{-9}, S_2=14.8 \times 10^{-9}$).异常是可信的。

2.2 怀来台

怀来台体应变日均值曲线、消除线性漂移后的曲线、消除长周期和低频成份后的曲线,以及经气压改正后的应变曲线分别示于图3中。由图可见:

(1)怀来台体应变的漂移速率很大,平均月漂移量约为 8.1×10^{-7} 。由仪器系统自身引起的漂移,其主要成份是线性的。从消除线性项后的应变曲线(图3b)看,1990年1月至1991年8月,其漂移速率逐渐减小。之后,其漂移速率大致稳定而略有抬升。图2b所示的应变曲线,仍包含一定的长趋势非线性应变变化。

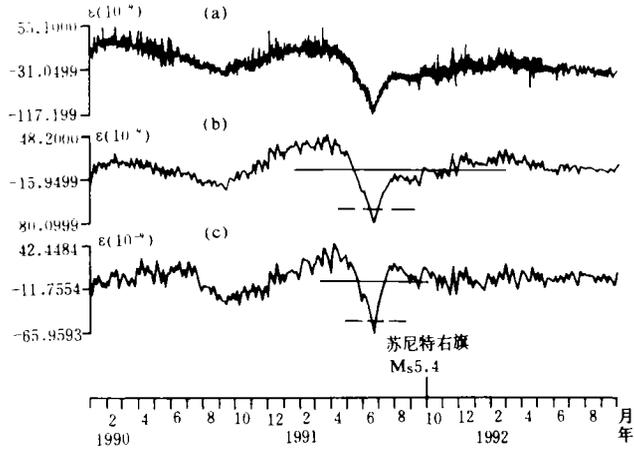


图2 张家口台体应变曲线

- a. 日均值原始曲线; b. 消除长周期和高频成份的曲线;
- c. 气压改正的曲线(向下为张性)

Fig. 2 Curve of bulk strain at Zhangjiakou station.

(2)从显示几天至几个月时间的趋势性应变变化的图3c可见,1991年8月至9月,该测点出现了明显偏离均值基线的张性应变异常,其最大异常幅度为 3.3×10^{-7} 。其中8月下旬至9月上旬的数据超出了 $2S$ ($S=108 \times 10^{-9}$)。

从图3c还可看出,1991年3月中旬的数据也超过了 $2S$,但异常持续时间较短。

(3)在经过气压改正后的应变曲线(图3d)上,同样可以看出图3c所示的趋势异常,只是在1991年4月下旬至5月上旬,又检测出一批超出 $2S$ ($S=90.3 \times 10^{-9}$)的异常数据。

由上述情况可见,怀来台体应变有三个时间段出现了明显的

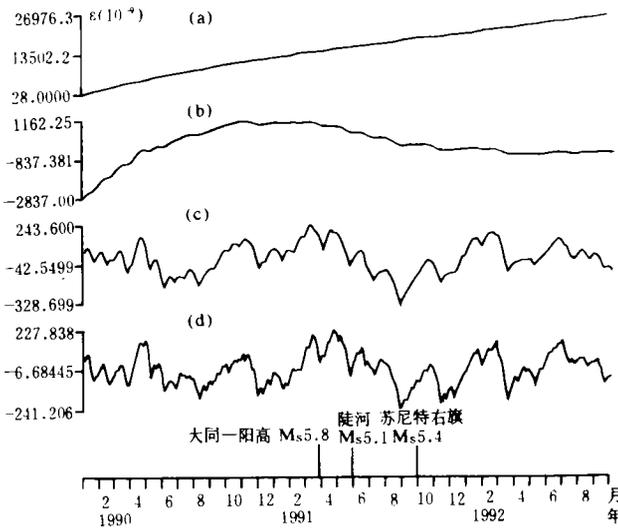


图3 怀来台体应变曲线

- a. 日均值原始曲线; b. 消除线性趋势项的曲线;
- c. 消除长周期和高频成份的曲线;
- d. 气压改正后的应变曲线(向下为张性)

Fig. 3 Curve of bluk strain at Huailai station.

应变异常变化。

2.3 昌平台

体应变、水位和气压观测日均值原始曲线分别示于图4中。消除长周期和低频成份的观测曲线示于图5中。

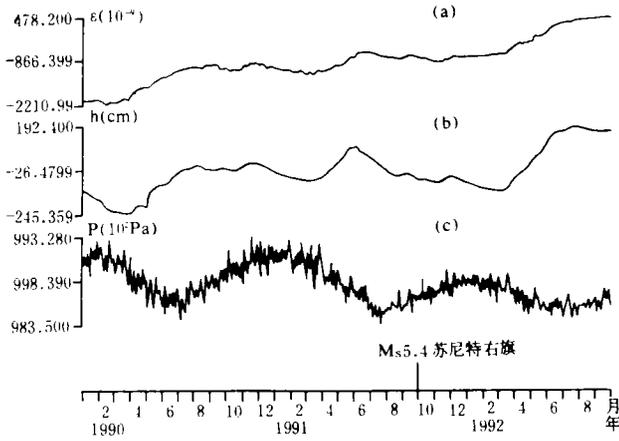


图4 昌平台体应变及辅助观测日均值原始曲线
a. 体应变; b. 水位; c. 气压

Fig. 4 Original curve of daily mean value of bulk strain and auxiliary observation at Changping station.

对比图5a和b易见,体应变曲线与水位曲线的变化形态非常相似。回归分析结果表明,二者的相关系数 $r=0.8737(N=1004)$,是高度显著的。体应变与气压的回归结果表明,二者为负相关。分别经水位和气压改正的体应变曲线示于图5d,e。

体应变同时受到水位和气压变化的影响。为了更好地排除干扰,我们用最小二乘法在体应变与水位、气压观测序列之间配一个线性回归方程。二元回归结果表明,其复相关系数 $R=0.9052$,体应变与水位

和气压的偏相关系数分别为 $r_1=0.8554, r_2=-0.4867$ 。而标准回归系数分别为 $B_1=0.7682, B_2=-0.2592$ 。可见,昌平台体应变与水位、气压存在密切的线性相关关系,而其主要的干扰因素是水位的变化。

同时消除水位和气压影响后的体应变曲线示于图5f。由图可见,在1991年5月,该测点出现了超出 $3S(S=66.7 \times 10^{-9})$ 的异常变化。

综上所述,对三个台站的体应变观测资料作一定的数据处理之后,在近三年的时间内,其体应变大都在正常范围内变化,但也从中识别出了某些时段的发展趋势性异常。这些异常超过了判别指标,是可信的。

3 潮汐因子的计算与分析

理论分析和实测资料表明,TJ-1A型体积式应变仪可以记录到地球的潮汐应变(图6)。而观测系统对固体潮的响应,是与测区岩体的物理力学性质有关的。岩性不同,响应情况不同;岩性改变,其响应程度也会改变。实验和研究表明,当震源孕育到一定阶段后,孕震区的微裂隙出现扩展、串通,介质性质发生变化,固体潮会相应发生畸变。通常只在一定范围内波动的潮汐振幅因子(它等于实测应变潮幅与理论潮汐振幅之比),此时即可能出现偏离变化基值的下降型异常变化。

用维涅第科夫调和分析方法对张家口、怀来、昌平台经别尔采夫滤波后的体应变资料作出的 M_2 波振幅因子变化曲线示于图7中。消除可能由系统漂移引起的线性趋势项后的残

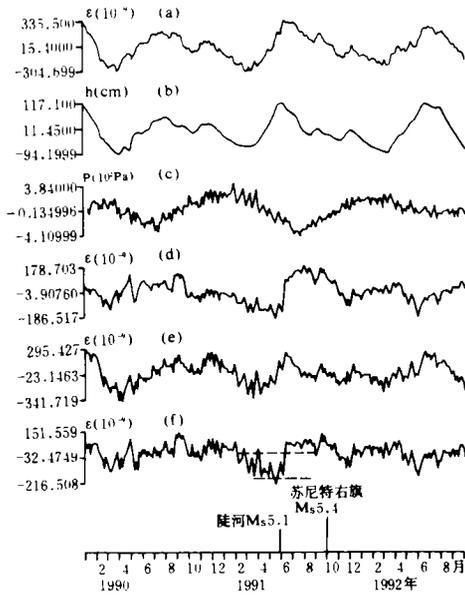


图 5 昌平台观测资料处理结果曲线

a. b. c. 分别为消除长周期和高频成份的体应变、水位、气压日均值曲线; d. e. 分别为经水位和气压改正的应变曲线; f. 为同时经水位和气压改正的应变曲线

Fig. 5 Processed result curve of observation data at changping station.

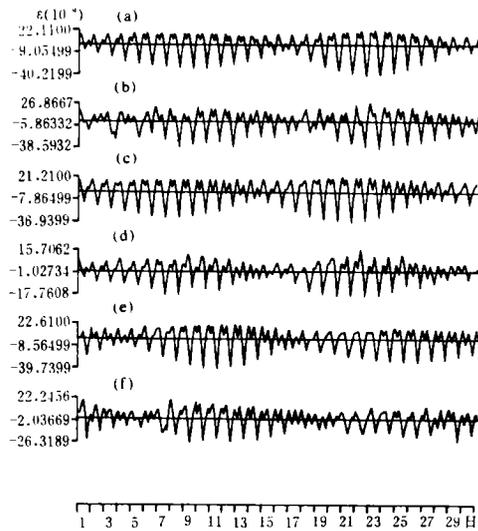


图 6 体应变固体潮理论曲线(a,c,e)与体应变仪实测固体潮曲线(b,d,f)

a. b. 张家口台; c. d. 怀来台; e. f. 昌平台

Fig. 6 Theoretical curve of earth tide of bulk strain.

差曲线分别示于图 7 d, e, f. 可见, 三个台站体应变固体潮 M₂ 波振幅因子的波动范围, 通常均在 ±0.1 之间, 只是在 1990 年 7 月, 1991 年 1、5、7、8、和 9 月和 1992 年 2 月分别或同时出现了超出 2S (标准差 S 依次为 0.045, 0.084, 0.056) 的异常变化. 异常形式绝大多数为振幅因子的数值下降, 这与其它的固体潮观测方法振幅因子的异常形式相同, 且可以用振幅因子异常的形成机制作出解释. 1992 年 2 月张家口台出现的上升型异常, 从机理上难以解释, 可能是某种干扰因素引 S10 起的。

4 体应变异常与地震关系的探讨

经数据处理和相应改正后, 张家口、怀来、昌平台 1990 年 1 月至 1992 年 9 月的体应变, 在正常变化的背景上, 某些时段出现了几天至几个月的趋势性异常变化. 潮汐振幅因子也在某些月份呈现明显的异常显示. 为了分析所提取的异常变化信息与周围地震活动的关系, 我们将达到判别标准的异常时段和地震(表 2)一并示于图 8. 地震的选取原则是, 在相应时间段中, 首都圈内的 Ms4.5 级以上地震及其邻区所有震中距小于 450km 的 Ms5.0 级以上地震。

由前文及图 8 可见:

(1) 对于张家口、怀来和昌平三个台站近三年的体应变资料, 用本文的数学处理方法共

识别、提取出异常段 13 处,除了 1992 年 2 月所出现的信度不高的异常外,其它 12 个异常均对应了地震(以异常出现后 4 个月内发生地震为限)。

(2)在表 2 所列的 6 次地震前,都有体应变异常出现。至少有一个异常与之对应,有的是几个台站、不同类型的多个异常同时或相继出现。

我们以一个月为一个单位时段,在 1990 年 1 月至 1992 年 9 月共 33 个时段中,有异常的时段数 10 个,无异常的时段数 23 个,对应了地震的异常时段数 9 个,未对应地震的异常时段数 1 个。说明本文所提取出的异常信息与地震之间有显著的连带关系。

(3)用几种数学方法均未从上述三个台站 1991 年 10 月至 1992 年 9 月的体应变资料中识别出明显而可信的异常变化,说明该时段内测区的地壳应变状态相对稳定,而相应时段内首都圈及邻区也未发生符合上述选取原则的地震。

(4)从异常出现与地震发生的时间来看,最长的时间间隔为 4 个月,部分异常出现在震前一个月之内。因此,本文所提取的体应变异常属中短期趋势异常和临震异常。

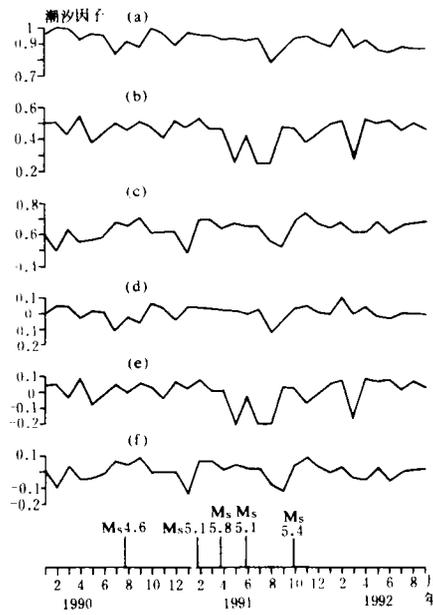


图 7 体变 M_2 波振幅因子变化曲线

a. b. c 分别是张家口、怀来、昌平台振幅因子变化曲线;d. e. f 分别为上述三个台消除线性项后的残差曲线

Fig. 7 Curve of M_2 wave amplitude factor of bulk strain.

表 2 首都圈 $M_s > 4.5$ 及邻区 $M_s > 5.0$ 级地震 (1990 年 1 月—1992 年 9 月)

序号	发震时间	纬度	经度	地点	震级
1	1990-07-21	40° 35'	115° 50'	大海坨山	4.6
2	1991-01-29	38° 28'	112° 32'	忻州	5.1
3	1991-03-26	39° 58'	113° 51'	大同一阳高	5.8
4	1991-05-29	39° 43'	118° 18'	陡河	4.8
5	1991-05-30	39° 41'	118° 16'	陡河	5.1
6	1991-09-30	43° 04'	112° 35'	苏尼特右旗	5.4

需要指出的是,1991 年 9 月 30 日苏尼特右旗 5.4 级地震的震中,距三个台站相对较远(震中距依次为 310km,380km 和 420km)。然而在此次地震之前,三个体应变台站均先后或同时出现了潮汐振幅因子的下降异常,张家口、怀来台还有明显的趋势异常显示。与此同时,距怀来台几公里的小水峪 DSJ 断层活动测量仪资料,在 1991 年 8 月中旬至 9 月中旬,出现了偏离正常年周期变化轨迹的明显异常。张家口地区阳原县三马坊精密地温观测点,9 月下旬出现了极为明显的地热异常。根据上述诸多异常的同步显示,地壳应力研究所曾于 9 月

27 日正式提出了地震短临预报意见。多种不同的前兆观测方法、多个观测点在同期都出现了明显的异常变化,并且较好的对应了地震,说明体应变异常具有较高的可信度,体应变异常与地震事件具有较好的对应关系。

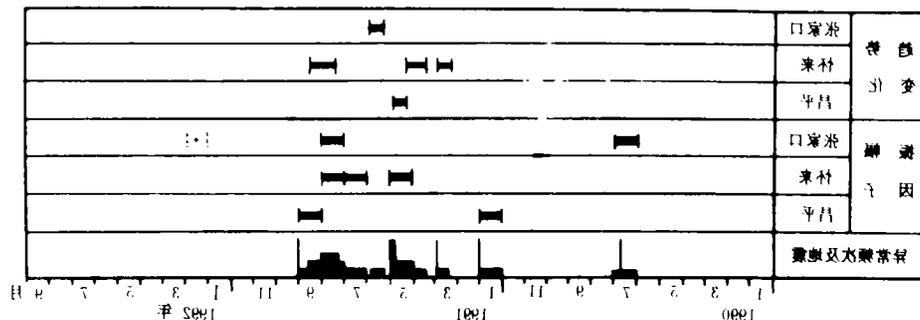


图 8 首都圈体应变趋势异常和潮汐振幅因子异常与地震的对应关系

Fig. 8 Correlation of anomalies of bulk strain trend and tide amplitude factor with earthquakes in the Capital Circle.

5 结语

综上所述,可以得到以下几点初步认识:

(1) 本文所用的提取中短期应变趋势变化的方法和干扰排除的方法比较简便,但在识别地震前兆异常方面有一定效果,所提取的异常信息与地震发生有着较好的对应关系。

(2) 震前潮汐振幅因子发生变化,有一定的实验和理论研究基础,物理意义比较明确。从体应变实际观测资料中计算得到的 M_2 波振幅因子下降型异常变化,与地震的发生有明显的相关关系。

(3) 地壳体应变观测是地震短临监测预报的一种新方法。资料中的信息含量丰富,在捕捉地震中短期和临震异常方面有一定优势,具有较好的映震效能。

本文所说的异常与地震发生的关系,目前仅限于它们在时间上的相关性。至于它们在本质上的联系,尚有待深入研究。

在工作中得到苏恺之研究员、刘瑞民高级工程师的支持,姚宝树、邵进曾参与过一些计算工作,张家口、怀来、昌平地震台提供了体应变观测资料,在此一并致谢。

(本文 1992 年 12 月 10 日收到)

(下转 61 页)

WAVEFORM ANOMALY PRIOR TO THE SONGPAN EARTHQUAKE AND ITS VALUE TO SHORT—IMMINENT PREDICTION OF STRONG EARTHQUAKES

Yao Tongfu, Fu Yinfa, Hou Kangming, Wang Xian
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

This paper deals with the morphological features of waveform anomaly recorded at several stations before the M7.2 Songpan earthquake of 1976, and the space—time distribution features. The anomalous waveforms can be divided into four types; the anomalous waveforms were recorded in varying degrees at all stations (epicenter distance within 80 km); the numbers of the waveforms were increased during the approaching of the earthquake; the amplitude was enlarged; the waveforms were densified ten days before the earthquake with obvious skipping changes. Finally, according to the features of the waveform anomaly, the physical mechanism of the anomalous waveforms was studied preliminarily. It shows that the appearance of the waveform anomaly results from the rock microfracturing in seismogenic area before the earthquake.

Key Words: Songpan earthquake; Seismic waveform anomaly; Microfracture

(上接 56 页)

BULK STRAIN ANOMALIES OF CRUST AND ITS INFLUENCE ON REFLECTING CAPACITY OF EARTHQUAKE

Yang Xiuxin, Liu Dongying
(*Institute of Crustal Dynamics, SSB, Beijing 100085*)

Abstract

Firstly, this paper analyzed the data of bulk strain observed from various stations. By the mathematic method, it extracted the mid-short term strain trend variations, which probably relate to the preparedness and occurrence of earthquakes, and calculated the tide factor. Then, the anomalous variations are identified by selecting a certain discrimination criterion. By verifying some earthquake cases, it showed that the data processing method proposed by this paper is quite efficient in extracting anomaly information which is of some correlation with earthquake in time sequence.

Key Words: Bulk strain; Tide factor; Short-impending anomaly