

郑洪艳,田晓,2020. 唐山台跨断层形变速率阶段性变化及预报效能评估. 中国地震,36(2):305~316.

唐山台跨断层形变速率阶段性变化 及预报效能评估

郑洪艳 田晓

中国地震局第一监测中心,天津 300180

摘要 采用启发式分割算法(BG 算法)对唐山台跨断层形变观测时间序列进行均值突变检测。以此为基础,通过计算突变前后子序列均值变化量,探讨唐山台跨断层形变的阶段性变化特征。结合台站及其周围典型震例,分层次统计突变距离发震日的时间间隔,计算虚报率、漏报率和 R 值,并对唐山台跨断层形变的预报效能进行定量评估。结果显示,唐山台跨断层形变阶段性变化特征显著;各测项突变后对应发生地震的概率均不低于 50%,突变距发震日的最短时间间隔自当天到 2 个月不等;水准的预报效能整体上略优于基线,而断层垂向分量和张压分量的预报效能整体上优于走滑分量。

关键词: 跨断层形变 断层运动三分量 BG 算法 阶段性变化 预报效能评估

[文章编号] 1001-4683(2020)02-0305-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

跨断层形变数据分析时通常将两期观测值之差超过 3 倍中误差、较长时段出现增值(或减值)、断层活动突破近几年的周期变化等作为断层活动异常信息的确定原则,分别适合于提取突变、趋势转折等短临或中短期异常(龚复华等,1998)。周硕愚(1990)提出建立正常动态基准,以观测值偏离动态基值超过一定限度作为异常定量识别,适用于尖点、台阶等异常识别(陈兵等,2000)。郭良迁等(2004)利用华北地区的断层形变资料求解形变异常参数和应变累计率,提取中期和中长期前兆异常信息和应变信息,研究其区域断层形变对强震的响应能力。这些异常判定指标和方法在分析预报中起到了一定作用,但却具有很强的主观性和经验性,缺乏对方法系统性的评价检验。

跨断层形变观测获得的时间序列具有非线性、非平稳、多层次特征,增加了异常分析和检测的难度。前人在分析非平稳人类心率数据时提出了启发式分割算法(BG 算法),用于处理非线性、非平稳序列的均值异常点,并已在医学、气象和形变等领域得到一定的应用(Bernaola-Galván et al,2001;封国林等,2005;姚宜斌等,2019)。本文采用 BG 算法对唐山台跨断层形变观测时间序列进行均值突变检测,以此为基础讨论唐山台跨断层形变的阶段性变化特征,并进行预报效能评估。

[收稿日期] 2019-05-27; [修定日期] 2020-04-14

[项目类别] 中国地震局“监测、预测、科研”三结合课题(3JH-202001100)、中国地震局震情跟踪课题(20190102)共同资助

[作者简介] 郑洪艳,女,1989 年生,工程师,主要研究方向为大地测量学与数据分析。E-mail:hyzhengzheng@163.com

1 资料概况

唐山地震台被 1976 年唐山 7.8 级地震后留下的 SN 向断裂穿过,地面有明显的水平和垂直错动。台站跨唐山大型断裂带东支断裂中的 V 号断层(唐山断裂),该断裂与其上部地表主破裂带产状一致,上下贯通,近乎直立(谢觉民等,1997),断层倾角约 72° (郝书检等,1998)。台站在大震出露的断裂两侧布设有 5 个水准、基线公用观测墩(图 1)。其中,3(I)号、4(III)号水准(基线)点位于断层上盘,1(IV)号、2(II)号水准(基线)点位于断层下盘。基线和水准测线各 4 条,斜交测线 J I - IV (S3-1)与断层夹角约 6° ,J III - II (S4-2)与断层夹角约 126° 。

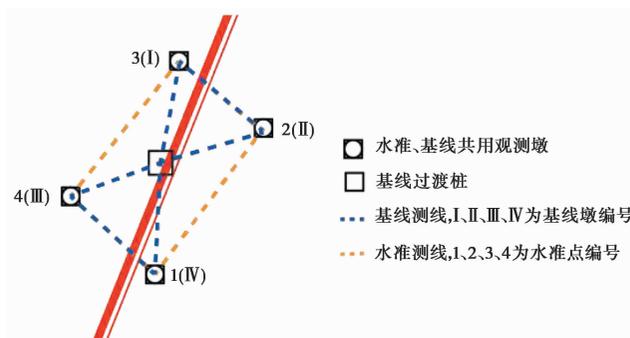


图 1 唐山台测线布置图

本文选取 4 条跨断层短基线测段(J I - II、J I - IV、J III - II、J III - IV)和 4 条跨断层短水准测段(S3-2、S3-1、S4-2、S4-1)1984 年 1 月 1 日~2019 年 2 月 28 日的形变观测资料进行分析。按照距台站 100km 以内 $M_s 2.0 \sim 4.0$ 和 $M_s 4.0 \sim 5.0$, 200km 以内 $M_s 5.0 \sim 6.0$, 300km 以内 $M_s 6.0 \sim 7.0$ 的原则选择地震,并参考相关文献(周海涛等,2009)进行补充。

2 数据处理方法

2.1 资料预处理

对原始观测资料预处理,包括剔除粗差和明显异常干扰项,对观测数据进行合并、线性插值等以获得连续等间隔观测时间序列。考虑到唐山台跨断层形变观测期次为每天一期,将同一天发生的多个小震计为一个发震日期。

2.2 断层运动分量计算

为探究断层运动状态与唐山台及其周围地区典型地震之间的关系,计算断层运动三分量累积参量(周海涛等,2009;张希等,2012;李文静,2014),即走滑分量 a 、张压分量 b 、垂向分量 h 。

2.3 BG 算法

启发式分割算法(BG 算法)是将一个长度为 N 的跨断层形变观测时间序列 $x(t)$,从左到右分别计算每个时刻 i 左右两边的平均值 $\mu_1(i)$ 、 $\mu_2(i)$ 及标准偏差 $s_1(i)$ 、 $s_2(i)$,定义其合并偏差为

$$s_D(i) = \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right) \times \sqrt{\frac{(N_1 - 1) \times s_1(i)^2 + (N_2 - 1) \times s_2(i)^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (1)$$

其中, N_1 、 N_2 分别为 i 左边和右边部分的时间序列长度。

使用 t 检验的统计量 $T(i)$ 量化表示 i 时刻左右两部分均值的差异

$$T(i) = \left| \frac{\mu_1(i) - \mu_2(i)}{s_D(i)} \right| \quad (2)$$

对 $x(t)$ 中每个点重复上述计算过程, 得到检验统计值序列 $T(t)$, T 越大则表示该时刻左右两部分均值相差越大。计算 $T(t)$ 最大值 T_{\max} 的统计显著性

$$P(T_{\max}) = \text{Prob}(T \leq T_{\max}) \quad (3)$$

$P(T_{\max})$ 表示随机过程中取得 T 值小于 T_{\max} 的概率。一般情况下

$$P(T_{\max}) \approx (1 - I_{\frac{v}{v+T_{\max}^2}}(\delta_v, \delta))^\eta \quad (4)$$

由蒙特卡洛模拟得到 $\eta = 4.19 \ln N - 11.54$, $\delta = 0.4$, $v = N - 2$, $I_x(a, b)$ 为不完全 β 函数。

设定一个临界值 P_0 , 如果 $P(T_{\max}) \geq P_0$, 则于该点将 $x(t)$ 分割为两段均值有一定差异的子序列, 否则不分割。对新得到的 2 个子序列分别重复上述步骤, 如果子序列有 $P(T_{\max}) \geq P_0$, 且子序列与其左右相邻的子序列间均值的差异程度满足上述条件, 则对子序列进行分割, 否则不分割。如此重复至所有子序列不可分割为止(子序列长度小于等于最小分割尺度 l_0)。

通过上述步骤, 将原时间序列分割为若干不同均值的子序列, 各子序列分别代表不同层次的信息, 分割点则为均值突变点。通过调整值 P_0 和 l_0 的大小可以改变检测的尺度和精度(封国林等, 2005; 龚志强等, 2006)。

2.4 速率阶段性变化识别

本文将临界值 P_0 设为 95%。为获得不同尺度的检测结果, 经比较选择 10 年($l_0 \approx 3650$)、3 年($l_0 \approx 1095$) 和 1 个月($l_0 \approx 30$) 分别作为最小分割尺度。采用 BG 算法对上述 8 个原始形变观测时间序列和 3 个断层运动分量时间序列(表 1) 分别进行均值突变检测, 将唐山台跨断层形变观测时间序列划分为不等长度的子序列, 计算突变前后子序列均值变化量, 探究唐山台跨断层形变的阶段性变化特征。

2.5 预报效能评估

将检测结果与台站及其周围地区典型震例的对应情况进行统计, 发现当唐山台跨断层形变观测时间序列最小分割尺度设为 10 年、3 年和 1 个月时, 检测到的突变数量分别与 $M_s 5.0$ 及以上、 $M_s 4.0 \sim 5.0$ 和 $M_s 2.0 \sim 4.0$ 地震发震总次数相当, 其对应的最优发震间隔约为 5 年、2 年和 3 周, 故以此作为预报有效时间, 假设突变均为前兆异常, 统计突变距离发震日的时间间隔, 计算虚报率 a 、漏报率 b 和 R 值(罗兰格, 2015), 并据此对唐山台跨断层形变观测时间序列进行预报效能评估(表 1)。计算虚报率 a 、漏报率 b 和 R 值的计算公式分别为

$$a = \frac{n_0^1}{N^1} \quad (5)$$

表 1 唐山台 BC 检测突与台站及其周围典型震例的对应情况统计

对应情况	测项	原始形变观测时间序列								断层运动分量时间序列			
		J I - II	J I - IV	J III - II	J III - IV	S 3-2	S 3-1	S 4-2	S 4-1	走滑分量 a	张压分量 b	垂向分量 h	
突变 (10 年) 与 M _s 5.0 及以上地震 (4 次)	突变总次数	5	4	5	4	6	5	6	6	4	4	6	
	对应总次数	4	3	3	4	3	3	4	4	3	3	4	
	对应间隔/天	73~2274	183~2227	960~1458	393~1409	242~1401	51~600	176~2148	290~1007	766~2274	139~1479	309~759	
	5 年对应次数	3	2	3	4	3	3	3	4	2	3	4	
	a/%	40.0	50.0	40.0	0	50.0	40.0	50.0	33.3	50.0	25.0	33.3	
b/%	16.7	33.3	16.7	0	14.3	16.7	14.3	0	33.3	20.0	0		
R	0.43	0.17	0.43	1.00	0.36	0.43	0.36	0.67	0.17	0.55	0.67		
突变 (3 年) 与 M _s 4.0 ~ 5.0 地震 (20 次)	突变总次数	17	18	20	19	19	19	18	18	19	21	19	
	对应总次数	11	10	10	10	12	10	12	11	10	12	11	
	对应间隔/天	31~767	33~720	64~1048	18~945	8~743	48~504	8~820	53~809	74~767	17~816	32~820	
	2 年对应次数	10	10	8	9	11	10	10	10	9	11	10	
	a/%	41.2	44.4	60.0	52.6	42.1	47.4	44.4	44.4	52.6	47.6	47.4	
b/%	37.0	35.7	37.5	36.7	32.1	34.5	35.7	35.7	36.7	30.0	34.5		
R	0.22	0.20	0.03	0.11	0.26	0.18	0.20	0.20	0.11	0.22	0.18		
突变 (1 个月) 与 M _s 2.0 ~ 4.0 地震 (730 次)	突变总次数	682	701	695	684	696	677	681	667	689	696	674	
	对应总次数	400	390	390	392	406	394	407	389	386	391	396	
	对应间隔/天	0~27	0~24	0~32	0~28	0~25	0~29	0~28	0~26	0~34	0~32	0~28	
	3 周对应次数	380	382	374	377	396	379	398	366	379	380	379	
	a/%	44.3	45.5	46.2	44.9	43.1	44.0	41.6	45.1	45.0	45.4	43.8	
b/%	33.9	33.2	33.9	34.0	32.4	34.1	32.8	35.3	33.8	33.5	34.2		
R	0.22	0.21	0.20	0.21	0.24	0.22	0.26	0.20	0.21	0.21	0.22		

$$b = \frac{n_1^0}{N^1 + n_1^0} \quad (6)$$

$$R = 1 - a - b - p \quad (7)$$

其中, n_1^1 为预报有震而未发生地震次数; n_1^0 为预报无震而发生地震次数; N^1 为预报有震总次数。 p 为 n 次预报均发生地震的自然概率, p 值通常很小, 可以忽略不计。 $R > 0$ 表示预报有效, 且 R 值越大效果越好, 最大值为 1; $R = 0$ 表示预报无意义; $R < 0$ 则预报无效。

3 计算结果分析

由断层运动三分量累积参量(图 2(b))可以看出, 唐山台所跨断层总体呈右旋压性逆断运动; 1996 年断层左旋逆转, 压性逆断活动减弱; 2003 年恢复右旋, 张性转折; 2013 年至今断层呈微弱左旋压性运动, 逆断活动近年来有所加速。

3.1 10 年尺度检测结果

最小分割尺度为 10 年时, 采用 BG 算法检测到的均值突变次数(4~6 次)与唐山台及其周围地区 $M_s 5.0$ 及以上地震发震次数(4 次)相当。从突变前后子序列均值变化情况看, 基线和水准变化幅度相当, 自 0.14mm 至 3.61mm 不等(图 3(a))。基线变化基本可以分为 4 个阶段, 1984~1998 年以伸长为主, 突变前后均值变化量为 0.55~2.20mm; 1999~2008 年以缩短为主, 均值变化量为 0.41~1.18mm, 明显低于上一阶段; 2008~2012 年恢复以伸长为主, 均值变化量略小于第一阶段, 为 0.28~1.95mm; 2012 年至今以更低速率缩短, 均值变化量仅为 0.18~0.33mm。水准曲线自观测以来一直呈下降趋势, 突变前后均值变化量为 0.51~3.61mm; 但 2000~2004 年各测线存在陆续小幅上升(0.14~0.58mm)。结合典型震例来看, 台站及其周围地区 $M_s 5.0$ 及以上地震发生前 5 年内, 唐山台基线和水准一般各出现 2 项或 2 项以上突变。

断层运动三分量突变前后均值变化情况也显示唐山台所跨断层以右旋压性逆断活动为主(图 2(b)、3(b)), 其走滑、张压和垂向运动分量的均值变化区间依次增大, 分别为 0.34~0.8mm、0.23~1.42mm 和 0.58~2.82mm。但是, 2000~2004 年断层左旋张性正断突变, 与水准观测同期的变化相对应。其中, 水平面走滑和张压分量的变化量较大, 分别为 0.97mm 和 0.99mm; 垂向分量变化量较小, 仅为 0.18mm, 趋势近乎水平。说明在此期间唐山断裂周边应力场发生了重大转折(周海涛等, 2009), 可能与 2006 年河北文安 $M_s 5.2$ 地震有关。

定量统计结果(表 1)显示, 各测项突变后发生地震的概率为 50%~100%。突变距发震日的时间间隔自 51 天至 2274 天不等, 最短为水准测线(S3-1)1991 年 4 月 9 日突变后 51 天, 即 1991 年 5 月 30 日, 河北唐山发生 $M_s 5.1$ 地震(图 3(a))。

以 5 年作为预报有效时间, 计算得到各测项的虚报率和漏报率分别在 0~50.0% 和 0~33.3% 之间, R 值评分介于 0.17~1.00 之间。

在基线原始形变观测时间序列中, J III-IV 虚报率和漏报率最低, R 值评分最高; J I-IV 虚报率和漏报率最高, R 值评分最低。在水准原始形变观测时间序列中, S4-1 虚报率和漏报率最低, R 值评分最高; S3-2 和 S4-2 的 R 值评分最低。结合测线布设情况(图 1)可以看出, J III-IV(S4-1)对 $M_s 5.0$ 及以上地震的预报效能最好, J I-IV(S3-1)的预报效能最差。

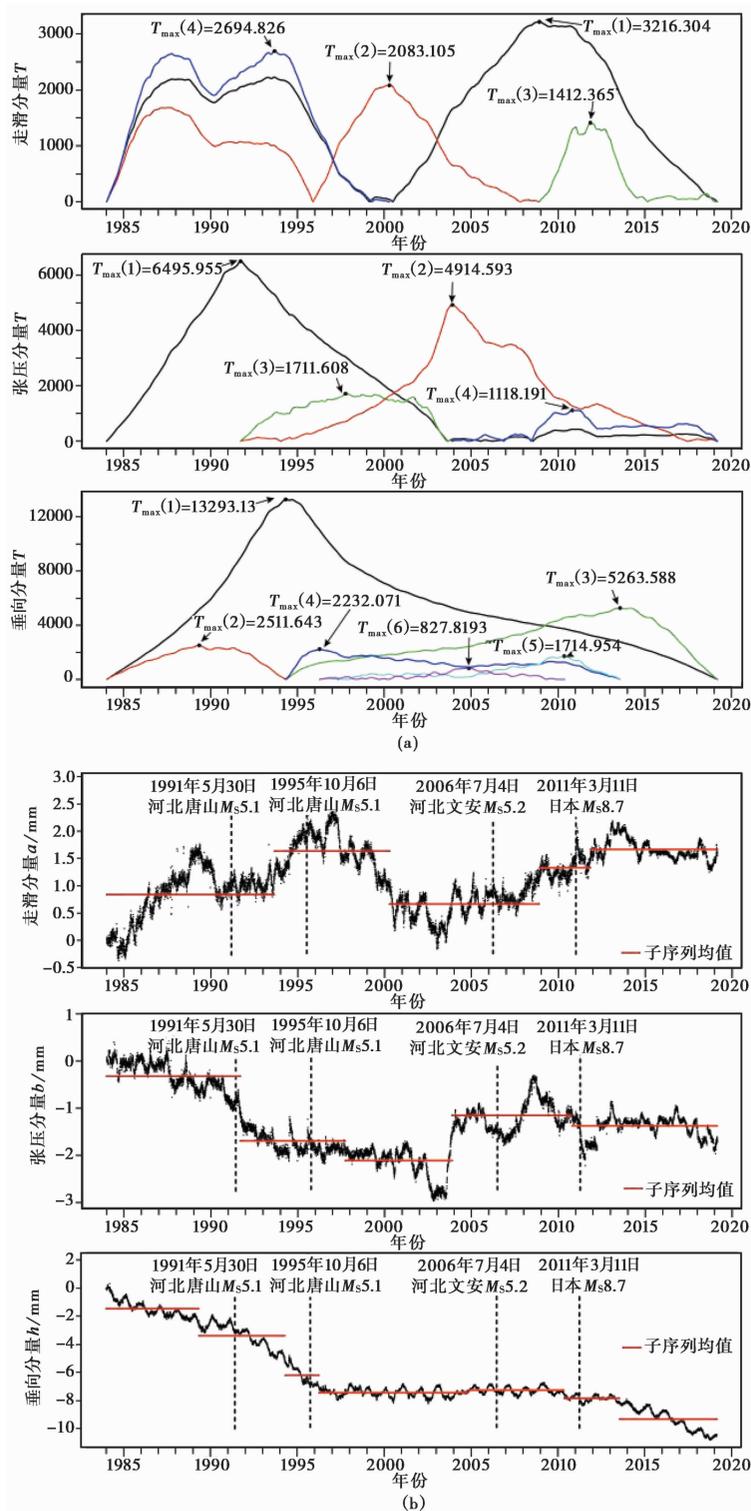


图 2 唐山台断层运动三分量 BG 检测结果 ($l_0 = 10a$)

(a) 断层运动三分量突变检测 T 值; (b) 断层三分量时间序列突变检测结果

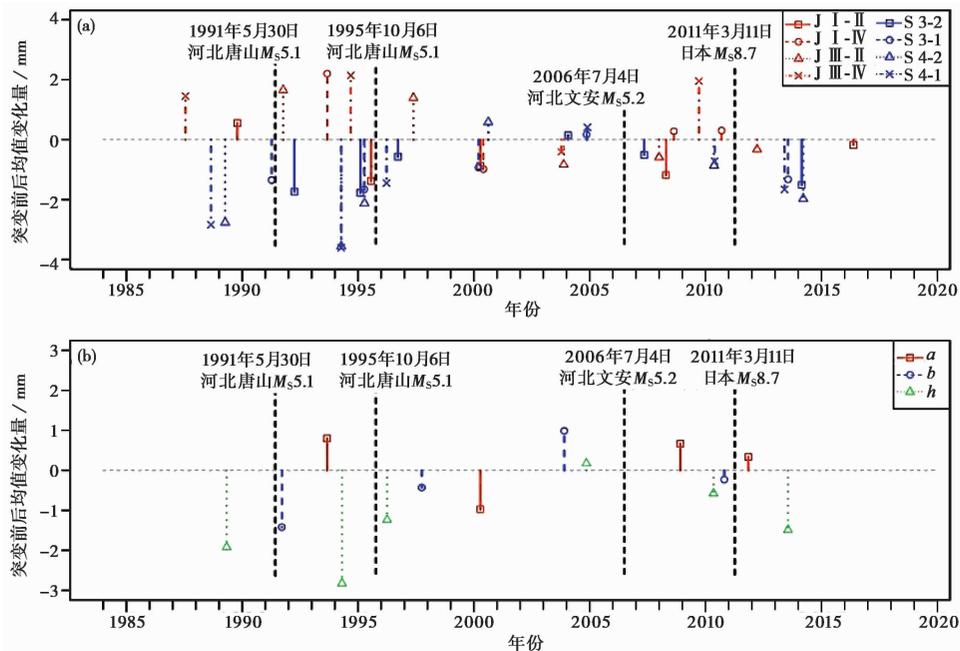


图3 唐山台 BG 突变检测 ($l_0 = 10a$) 与 $M_s 5.0$ 及以上地震对应情况

(a) 基线和水准原始跨断层形变观测时间序列; (b) 断层三分量时间序列

在断层运动三分量中,垂向分量的 R 值评分最高;走滑分量的虚报率和漏报率最高, R 值评分最低。走滑分量对 $M_s 5.0$ 及以上地震的预报效能明显低于垂向分量和张压分量。

3.2 3 年尺度检测结果

最小分割尺度设为 3 年检测到的突变次数 (17~21 次) 与 $M_s 4.0 \sim 5.0$ 地震的发震次数 (20 次) 相当,对应较好 (表 1)。基线和水准原始形变观测时间序列突变检测结果的阶段性特征与 10 年尺度上的结果一致。其中,基线突变前后子序列的均值变化量为 $0.05 \sim 1.49\text{mm}$ (图 4(a)),大致可分为 4 个阶段,1984~1998 年以伸长为主,均值变化量为 $0.1 \sim 1.36\text{mm}$; 1999~2008 年伸缩交替,均值变化量为 $0.13 \sim 1.49\text{mm}$; 2008~2011 年恢复以伸长为主,均值变化量为 $0.23 \sim 0.75\text{mm}$; 2012 年至今伸缩交替,均值变化量为 $0.05 \sim 0.79\text{mm}$,幅度明显减小。水准均值变化量略大于基线,为 $0.07 \sim 2.33\text{mm}$,曲线整体呈下降趋势;但 2000~2004 年各测线曾陆续小幅上升 ($0.41 \sim 0.67\text{mm}$)。结合震例来看,台站及其周围地区 $M_s 4.0 \sim 5.0$ 地震发生前 2 年内,一般先后出现 2 项以上的基线或水准突变。

由断层走滑分量 (图 2(b)、3(b)、4(b)) 可以看出,1984~1996 年断层以右旋运动为主,突变前后均值变化量为 $0.16 \sim 0.78\text{mm}$ 。其中,1990 年前后断层短期内左旋转向,可能与 1990 年唐山 $M_s 4.5$ 地震有关,1991 年恢复右旋后发生唐山 $M_s 4.8$ 和 $M_s 5.1$ 地震;1997~2002 年以左旋为主,均值变化量为 $0.37 \sim 0.81\text{mm}$; 2003~2013 年继续以右旋运动为主,均值变化量为 $0.29 \sim 0.63\text{mm}$ 。但是,2004 年和 2005 年断层曾出现 2 次左旋转向突变,随后 2006 年发生河北文安 $M_s 5.2$ 地震。2013 年以来,均值变化量为 $0.05 \sim 0.18\text{mm}$,左旋走滑运动微弱。

张压分量显示 1984~2002 年断层以压性活动为主,突变前后均值变化量为

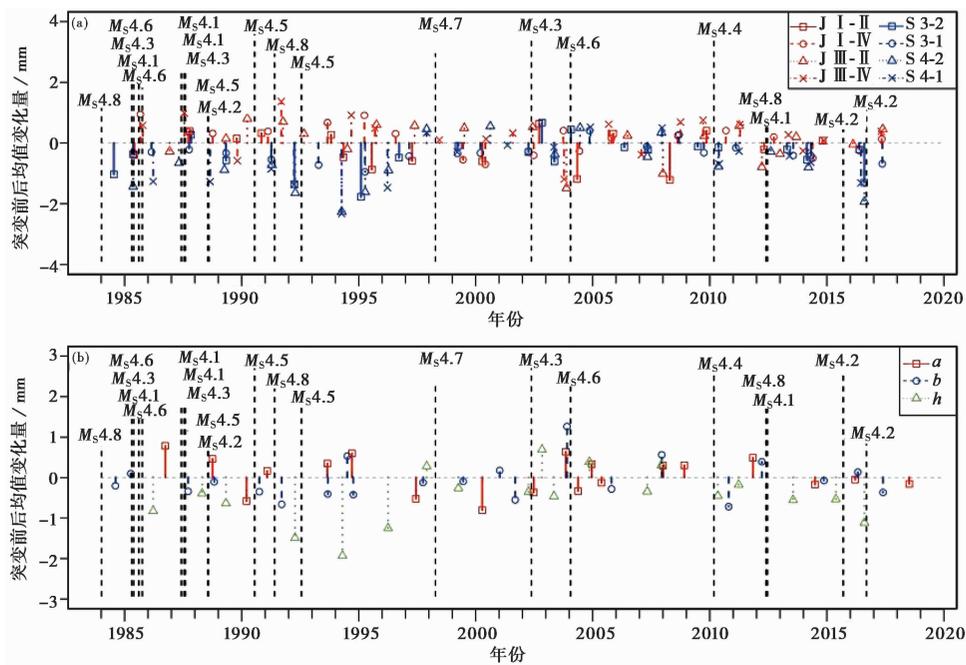


图4 唐山台BG突变检测($l_0 = 3a$)与 $M_s 4.0 \sim 5.0$ 及以上地震的对应情况
(a)基线和水准原始跨断层形变观测时间序列;(b)断层三分量时间序列

0.1~0.67mm。1985年、1994年和2001年出现张性突变,其中1994年突变前后均值变化量为0.52mm,可能与1995年唐山 $M_s 5.1$ 地震有关,另外2次突变均值变化量较小,分别为0.09mm和0.17mm。2002年开始张压交替,断层整体呈弱压性运动。其中,压性突变均值变化量为0.08~0.72mm;张性突变变化量为0.13~1.26mm,且幅值依次递减。另外,统计发现2003~2016年张压交替突变时间间隔约为2年,自17个月至35个月不等,与张跃刚等(2013)对唐山余震区2004年以来 $M_L \geq 4.0$ 地震的准周期性研究结论基本一致。

垂向分量显示1984~2002年断层上盘相对上升,以逆断为主,突变前后均值变化量为0.27~1.94mm。1997年出现1次小幅正断突变,均值变化量为0.28mm,可能与1998年唐山 $M_s 4.7$ 地震有关。2002~2007年垂向分量曲线起伏变化,总体趋势较为平稳。其中,逆断突变均值变化量为0.35~0.47mm,正断突变均值变化量为0.30~0.69mm。2010年恢复逆断,均值变化量为0.18~1.12mm,且近年来活动速率有所增加。整体而言,垂向分量突变检测结果与同时段张压分量显示的断层运动趋势基本一致。

定量统计(表1)发现,各测项突变后发生地震的概率为50%~67%。突变距发震日的时间间隔自8天至1048天不等,最短(S3-2)为1985年5月14日突变后8天,即1985年5月22日,在距唐山台36.7km处发生了 $M_s 4.3$ 地震(图4(a))。

以2年作为有效时间,计算得虚报率和漏报率分别为41.2%~60.0%和30.0%~37.5%, R 值评分介于0.03~0.26之间。在基线原始形变观测时间序列中,J I-II的 R 值评分最高;J III-II虚报率和漏报率最高, R 值评分最低。在水准原始形变观测时间序列中,S3-2虚报率

和漏报率最低, R 值评分最高;S3-1 的 R 值评分最低。结合测线布设情况(图 1)可以看出,JI-Ⅱ(S3-2)对 $M_s4.0\sim 5.0$ 地震的预报效能最好,JIⅢ-Ⅱ(S4-2)的预报效能最差,且水准的预报效能整体上优于基线。

在断层运动三分量中,张压分量的 R 值评分最高;走滑分量的虚报率和漏报率最高, R 值评分最低。因此,可以认为走滑分量的预报效能最差。

3.3 1 个月尺度检测结果

最小分割尺度设为 1 个月检测到的突变次数(667~701 次)与 $M_s2.0\sim 4.0$ 地震的发震次数(730 次)相当。据统计(表 1),各测项突变后发生地震的概率为 55.6%~59.8%。突变距发震日的时间间隔自 0(当天)至 34 天不等。突变当天发震次数占全部对应次数的 6.7%~11.4%,1 周内发震次数占全部对应次数的 51.4%~65%,2 周内发震次数占全部对应次数 80%以上(图 5)。也就是说,在 1 个月尺度上进行突变检测,突变后有 50%以上的概率会在唐山台及其周围 100km 范围内发生 $M_s2.0\sim 4.0$ 小震,但如果突变后 2 周内没有地震发生,基本可以认为这是一次虚报。

以 3 周作为预报有效时间,计算得虚报率和漏报率分别为 41.6%~46.2%和 32.4%~34.2%, R 值评分介于 0.20~0.26 之间。在基线原始形变观测时间序列中,JI-Ⅱ的 R 值评分最高;JIⅢ-Ⅱ的 R 值评分最低。在水准原始形变观测时间序列中,S4-2 的 R 值评分最高;S4-1 的 R 值评分最低。考虑突变距离发震日的时间间隔,结合测线布设情况(图 1),认为 JI-Ⅱ(S3-2)对 $M_s2.0\sim 4.0$ 地震的预报效能最好,水准的预报效能整体优于基线。在断层运动三分量中,垂向分量的 R 值评分最高,预报效能最好。

4 结论与讨论

本文采用 BG 算法对唐山台跨断层形变观测时间序列进行突变检测,减少了跨断层形变异常分析中的主观性和经验性因素的影响。根据检测结果,计算突变前后子序列均值变化情况,探讨唐山台跨断层形变的阶段性变化特征,并结合台站及其周围地震典型地震进行预报效能评估。结果显示:

(1)唐山台跨断层形变阶段性变化特征显著。断层运动三分量表明,唐山台所跨断层 1984 年以来整体呈右旋压性变化趋势;1996 年、2002 年和 2013 年前后断层走滑运动转向;2002 年和 2010 年前后断层张压运动分段特征明显,体现了唐山台所跨断裂及其周边地区应力场在上述时间段的重大变化。

(2)原始形变观测时间序列和断层三分量形变时间序列在最小分割尺度设为 10 年、3 年和 1 个月时,检测到的突变次数分别与 $M_s5.0$ 及以上、 $M_s4.0\sim 5.0$ 和 $M_s2.0\sim 4.0$ 地震发震次数相当,各测项突变后对应发生地震的概率均不低于 50%,突变距发震日的最短时间间隔自当天到 2 个月不等。

(3)原始形变观测时间序列和断层三分量时间序列的预报效能相当。从单条测线角度进行比较,JIⅢ-IV(S4-1)与 $M_s5.0$ 及以上地震的对应情况较好,JI-Ⅱ(S3-2)与 $M_s4.0\sim 5.0$ 和 $M_s2.0\sim 4.0$ 地震的对应情况较好;从观测手段角度进行比较,水准的预报效能整体上优于基线;从断层运动特征角度进行比较,垂向分量和张压分量的预报效能整体上优于走滑分量。

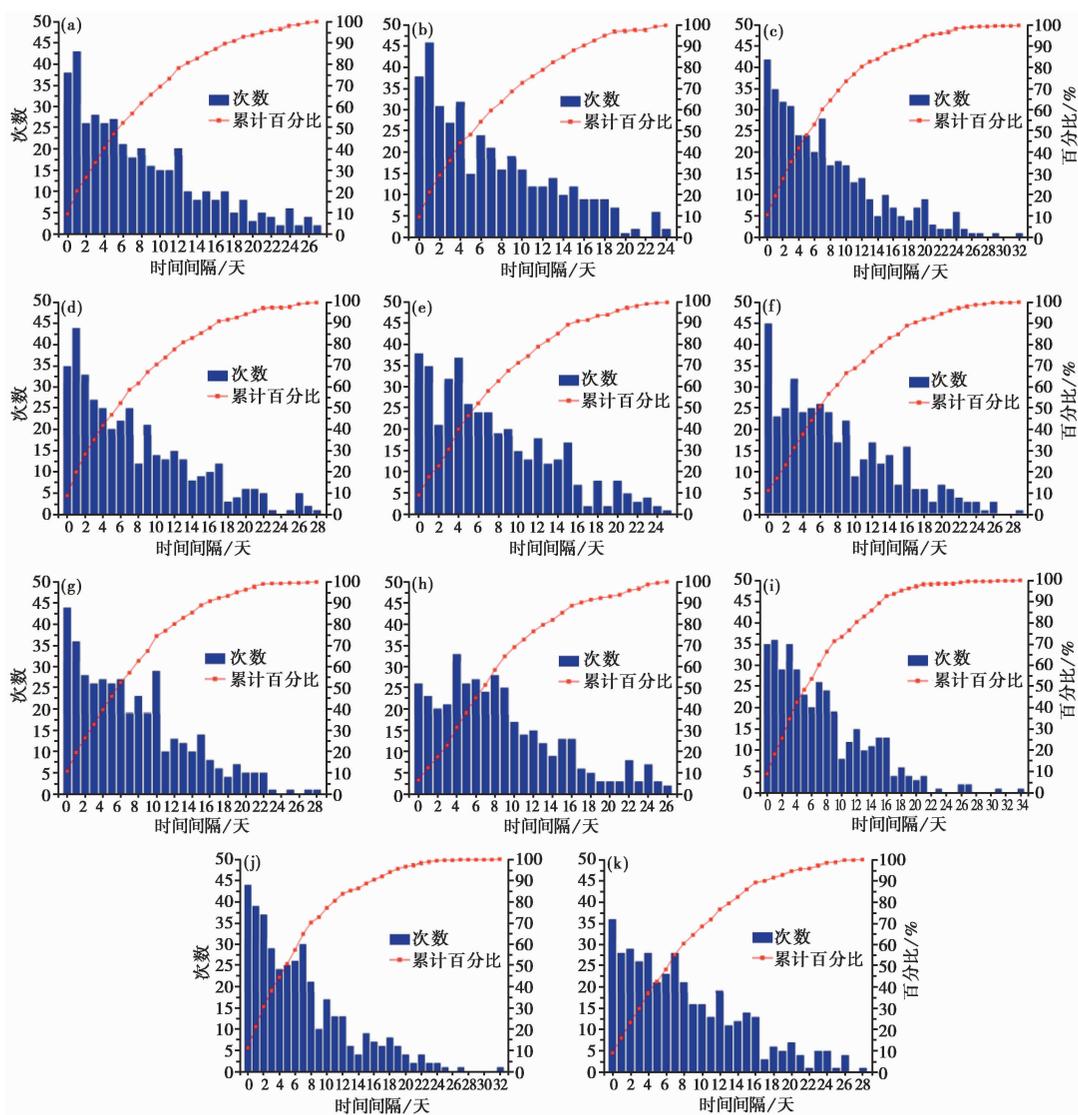


图 5 唐山台突变 ($l_0 = 30d$) 与 $M_s 2.0 \sim 4.0$ 地震对应时间间隔统计

(a)、(b)、(c)、(d) 分别表示唐山 J I-II、J I-IV、J III-II、J III-IV 突变与 $M_s 2.0 \sim 4.0$ 地震对应时间间隔统计；
 (e)(f)(g)(h) 分别表示 S3-2、S3-1、S4-2、S4-1 突变与 $M_s 2.0 \sim 4.0$ 地震对应时间间隔统计；(i)(j)(k) 分别表示走滑分量 a 、张压分量 b 、垂向分量 h 突变与 $M_s 2.0 \sim 4.0$ 地震对应时间间隔统计

本文假设检测到的突变均为前兆异常,是对唐山跨断层形变观测资料进行的回溯性的预报效能评估,结果可供唐山地区后续地震预报研究参考。需要指出的是:①BG 算法基于整个时间序列计算突变,当时间序列积累延长,突变检测结果可能发生改变。且由于唐山台及其附近 $M_s 5.0$ 及以上地震和 $M_s 4.0 \sim 5.0$ 地震数量较少,本文相关的计算结果仅作为参考,不具有统计学意义。②BG 算法可以较好地检测均值变异点,但跨断层形变的突变表现形式复杂多样,因此,可以考虑与窗函数、滤波、距平等方法结合,提高异常检测和识别能力。

③在数据积累充足的情况下,该方法理论上可以应用于任一时间序列的均值突变检测,但存在一定滞后性,要真正做到数据实时处理和前兆异常提取,还有很多问题需要解决。④BG算法基于一定的数学理论基础,应用于实际的跨断层形变时间序列检测,尚缺乏物理机理层面的理论支撑,且地震的孕育发生过程复杂,跨断层形变表现形式多样,如何结合具体情况进行算法的优化改进,仍需进一步研究。

参考文献

- 陈兵,江在森,赵振才,2000. 中国西部断层形变趋势异常特征与地震活动关系研究. 中国地震,16(1):77~85.
- 封国林,龚志强,董文杰,等,2005. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究. 物理学报,54(11):5494~5499.
- 龚复华,王刚军,1998. 张北-尚义 6.2 级地震跨断层形变资料异常特征分析. 见:中国地震局地壳应力研究所. 地壳构造与地壳应力文集. 北京:地震出版社.
- 龚志强,封国林,万仕全,等,2006. 基于启发式分割算法检测华北和全球气候变化的特征. 物理学报,55(1):477~484.
- 郭良迁,薄万举,杜雪松,等,2004. 华北地区断层形变异常与地震活动. 地震,24(3):42~50.
- 郝书检,李建华,于之水,等,1998. 唐山地震发震构造的浅层地震探测. 中国地震,14(4):78~84.
- 李文静,2014. 基于断层形变协调比的断层形变分析. 中国地震,30(3):454~461.
- 罗兰格,2015. 再谈地震预报 R 值评分法. 华北地震科学,33(4):66~68.
- 谢觉民,王若柏,薄万举,等,1997. 唐山地震后发震断层和周围地区的地壳形变. 地震学报,19(5):487~492.
- 姚宜斌,冉启顺,张豹,2019. 改进的启发式分割算法在 GNSS 坐标时间序列阶跃探测中的应用. 武汉大学学报·信息科学版,44(5):648~654.
- 张希,唐红涛,李瑞莎,等,2012. 基于灰色关联度的鲜水河断裂活动特性与大震关系研究. 地震研究,35(4):500~505.
- 张跃刚,王玉珍,尹宝军,等,2013. 2012 年 5 月 28 日河北省唐山 4.8 级地震. 中国地震,29(2):219~229.
- 周海涛,郭良迁,张立成,2009. 唐山断裂现代活动性研究. 华北地震科学,27(3):17~22.
- 周硕愚,1990. 板内地壳形变系统动力学与地震预报. 地壳形变与地震,10(4):1~7.
- Bernaola-Galván P, Ivanov P C, Nunes Amaral L A, et al, 2001. Scale invariance in the nonstationarity of human heart rate. Phys Rev Lett, 87(16):168105.

Evaluation of Earthquake Prediction Ability from Tangshan Cross-fault Deformation Data by Using the Bernaola-Galvan Algorithm

Zheng Hongyan Tian Xiao

First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China

Abstract The Bernaola-Galvan algorithm (BG algorithm) is used to detect the mean mutation of the across-fault movement time series at Tangshan station. Based on this, the characteristics of the stage changes of the cross-fault deformations at Tangshan station are analyzed by calculating the average changes of the subsequences before and after the mutations. Combining with the filtered typical earthquake cases in and around Tangshan station, we quantitatively evaluate the prediction ability on three levels by counting the minimum time interval between the mutations and the earthquakes, and calculating the false alarm rate, the missed alarm rate, and R. The results show that characteristics of the periodic change of the cross-fault deformation at Tangshan station are significant. The probability of an earthquake corresponding to the mutations is 50% or more, and the minimum time interval is from the exact day to two months. In summary, we believe that in terms of earthquake prediction, the leveling measurement is better than the baseline observations slightly, while the lateral and the vertical deformation data is better than axial deformation data in the respect of prediction ability.

Keywords: Cross-fault observation; Fault movement component; BG algorithm; Stage change; Evaluation of prediction ability