

李文静, 尹宝军. 2020. 多因素形变异常诊断方法及其动力学来源分析. 地震学报, 42(6): 707-718. doi: 10.11939/jass.20200018.
Li W J, Yin B J. 2020. Identification of multifactor deformation anomaly and analysis of its dynamic sources. *Acta Seismologica Sinica*, 42(6): 707-718. doi: 10.11939/jass.20200018.

多因素形变异常诊断方法及其 动力学来源分析^{*}

李文静^{1), †} 尹宝军²⁾

1) 中国北京 100085 应急管理部国家自然灾害防治研究院
2) 中国河北唐山 063000 河北省唐山市应急管理局

摘要 气温的升降会造成介质的热胀冷缩, 含水量的补充蒸发会导致介质的膨胀收缩, 在将这两种因素同时考虑的情况下, 提出了基于跨断层短基线测量的形变异常诊断方法, 并将其实践于唐山地震台 4 个测段的短基线观测。研究结果表明, 基于短基线观测的形变响应比序列在保持总体趋势稳定变化的同时, 在不同的时间出现了显著的幅度变化。经过进一步分析, 观察到: ①对于同一测段, 形变响应比变化与温度-降雨的变换系数 γ 有关, 当 γ 过小或者过大时, 序列会保持稳定, 失去观测分析价值; ②形变响应比幅度变化的动力学来源可能是台站周边的地震, 而且是台站东北方向 50 km 以内的 $M \geq 4.0$ 地震。对于不同测段, 形变响应比幅值变化与地震的相关性有所差异, 其中垂直于断层测量方向的两个测段得到的形变相应比与地震的相关性最好, 与断层斜交但近乎平行断层走向的测段次之, 与断层斜交的测段相关性最差。

关键词 多因素 形变 诊断 动力学 应用

doi: 10.11939/jass.20200018 中图分类号: P315.72[†] 文献标识码: A

Identification of multifactor deformation anomaly and analysis of its dynamic sources

Li Wenjing^{1), †} Yin Baojun²⁾

1) National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China
2) Tangshan Emergency Management Agency, Hebei Tangshan 063000, China

Abstract: The rise or fall of air temperature will lead to medium bilge or shrink, so does the supplement or evaporation of the moisture content. Here taking into the two factors, the identification method of deformation abnormality based on short baseline measurements across faults is brought out and is applied to 4 segments of cross-fault short baseline observation in Tangshan station. The result shows that the series of the deformation response ratio always keep constant, with some markable amplitude variations at different time. From the detailed work, we found that: ① For the same segment, the deformation response ratios are related with the transition coefficient γ of the temperature and rain, and the series will keep stable if γ is enough small

* 基金项目 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项(ZDJ2018-19)资助。

收稿日期 2020-02-06 收到初稿, 2020-06-08 决定采用修改稿。

† 通信作者 e-mail: wenjing410@126.com



or large, which means the useless of this parameter analysis; ② The dynamic source of the amplitude variation of deformation response ratio is possibly related to the $M \geq 4.0$ earthquakes within 50 km northeast to the station. For different segments, the correlations between the amplitude of deformation response ratio and the earthquakes are some different. In the four segments, correlations for the two segments perpendicular to the fault are high, while the segment that is oblique to and in the same time nearly parallel to the fault, and that for the cross-fault segment is the worst.

Key words: multi-factors; deformation; identification; dynamics; application

引言

岩石对外力之所以能表现出相当不同的性状取决于温度和压力。几乎所有的固体材料，基本上包括较低温度、较低压力下的所有岩石，在加载不太大时，均表现为弹性行为，即加载时变形，卸载时恢复原来的形状。对于许多固体，通过弹性定律建立应力与应变的关系是适宜的，目前很多针对地壳运动特征、断层受力状态等的研究都是将介质假定为弹性来计算区域应变特征(王敏等, 2003; 刘峡等, 2010; 吴晶等, 2011)。

加卸载响应比理论就是利用系统的非线弹性变形本质，实现定量化刻画系统的损伤，已被广泛应用于地震学、地磁、体应变等领域开展地震前兆特征研究。忽略方向差异，用加卸载响应比参数的变化与台站周围地震相对应，在地震预测实践中也取得了一定的效果(Avouac, Tapponnier, 1993; Yin et al., 1995; Wang et al., 2004; 余怀忠等, 2010; 李伟等, 2014)，尤其是加卸载响应比异常区与地震发生的位置有较好的对应性，但是预测效果仍不够理想，其原因主要是在实际预测中对当地的地球物理情况考虑得不够(尹祥础等, 1987; Yin et al., 2004)。

通常情况下，对于给定的载荷作用，很难判断系统是处于非线弹性阶段还是线弹性阶段，尤其是在较小的载荷作用下，例如气温温差变化(黄建平等, 2012)或降雨变化(程海琴等, 2014)。对于地壳形变测量，除了卫星观测(邓琳等, 2016)外，在我国还存在一定量的地面人工观测(王文利等, 2019)。这些地表测量手段，特别是在一些非基岩类测量位置(楼关寿等, 2010)，更多地受到地面温度变化的影响，在没有其它因素作用的情况下，反映短距离变化的短基线、短水准在地面温度的高低变化下发生了线弹性变化，即同样的温度变化产生同样的“距离”变化，这种弹性变化会保持在一个稳定状态。此时，当有外来因素“入侵”时，这种稳定状态就会被打破，对于跨断层形变测量来说，即为场地的形变量在已有因素造成的形变量的基础上发生了改变，达到了一种新的状态，此时就可以利用该状态的前后变化，结合其它信息来搜寻“入侵”的外来因素。

本文拟将降雨和气温作为控制跨断层形变监测的常规因素，借鉴加卸载响应比理论的思想，以唐山地震台跨断层短基线观测数据为例，寻找断层形变异常变化。进而考虑唐山地震台短基线不同测段方向的差异，结合周边地震，总结该台站各个测段对不同方向地震的响应能力，挖掘引起断层形变异常的动力学来源，提出基于多方向观测手段判断台站受力状态的新思路。

1 数据处理方法

之前有很多数据处理方法试图分离观测资料中的各种干扰因素，试图逐个剔除或定量

估计这些影响因素产生的效果, 找出与地震相关的前兆信息(Matsumoto *et al.*, 2003; Matsumoto, Roeloffs, 2003). 但实践证明, 干扰和地震前兆信息有时难以区分, 这给前兆信息的提取带来很大困难, 因此, 从一定程度上来说, 并不需要把每个影响因素都单独分离出来, 可以根据其特征进行综合分析. 对于跨断层形变测量, 尽管气温和降雨是两个独立的因素, 但都具有显著的年变周期特征, 而且气温变化对地表(或浅层地表)的热应变效应会对地面形变观测产生影响(黄建平等, 2012), 降雨所带来的浅层地表的孔隙压变化也会影响地面形变观测的结果(郑海刚等, 2014), 那么基于一些简单的假设, 可以将气温和降雨“统一”到一个因素进行处理.

设某一周的气温序列为 T , 降雨序列为 P , 短基线序列为 B , 设日气温加卸载参数序列为 σ_T , 日降雨加卸载参数序列为 σ_P , 日短基线加卸载参数序列为 σ_B , 计算三个序列的周均值(T, P, B)及相应各参量的残差序列($\Delta T, \Delta P, \Delta B$).

1.1 降雨和气温的统一处理

由于气温和降雨量的绝对幅值相对较小, 且二者相对独立, 本文将气温和降雨对跨断层形变造成的形变变化简化为线性的, 即

短基线对气温的响应关系为

$$\Delta B_T = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1)$$

短基线对降雨的响应关系为

$$\Delta B_P = \beta \cdot \Delta P, \quad (2)$$

进而, 假定这两个因素的作用效果是可以线性叠加的, 即

$$\Delta B = \Delta B_P + \Delta B_T = \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta P = \alpha \cdot \left(\Delta T + \frac{\Delta P}{\gamma} \right) = \alpha \cdot \Delta A, \quad (3)$$

这里定义系统载荷参数为

$$\Delta A = \Delta T + \frac{\Delta P}{\gamma}, \quad (4)$$

式中 $\gamma = \alpha/\beta$, 从而实现降雨和气温的“统一”处理.

1.2 形变响应比计算

借鉴加卸载响应比思想, 作如下规定: 当 $\Delta A > 0$ 时, 选择该部分数据定义为加载参数序列, 将其均值 $\bar{\sigma}_{A+}$ 定义为加载参数统计量, 相应地, 将 $\Delta B > 0$ 部分的序列定义为加载响应参数序列, 将其均值 $\bar{\sigma}_{B+}$ 定义为加载响应统计量; 同理, 可以得到卸载参数统计量 $\bar{\sigma}_{A-}$ 和卸载响应统计量 $\bar{\sigma}_{B-}$. 最终可以得到形变响应比为

$$F = \frac{\bar{\sigma}_{B+}/\bar{\sigma}_{A+}}{\bar{\sigma}_{B-}/\bar{\sigma}_{A-}}. \quad (5)$$

2 场地及周边条件概况

2.1 台站背景

唐山地震台始建于 1978 年, 并于该年下半年开始观测, 主要测量手段有跨断层短基线和短水准测量, 以及辅助的大气温度和降雨观测. 图 1 给出了其测线方位示意图, 数据观测信息列于表 1(李文静等, 2013). 从图 1 中可以看到, 短基线的 1-2 和 3-4 测段是近乎垂直于

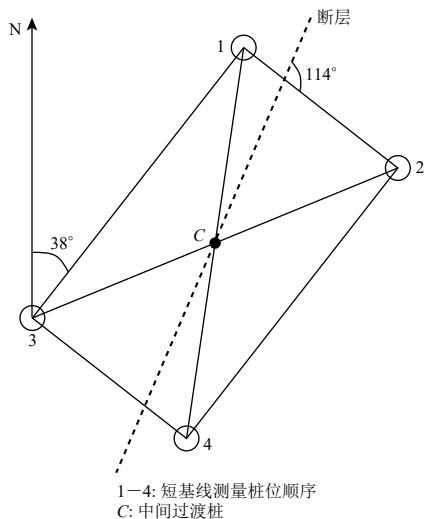


图 1 唐山地震台短基线测量方位示意图

Fig. 1 Scheme of the short baseline observation
compass at the Tangshan seismic station

出 1 mm 的长度变化对应需要 4.17 °C 的温度变化，则 α 取值为 0.24 mm/°C.

表 1 唐山地震台观测项目及仪器情况一览表

Table 1 Observation items and instruments list at the Tangshan seismic station

| 观测项目 | 仪器名称 | 仪器精度 | 测量方法 |
|------|----------------------|---------|-----------------|
| 气温 | 干湿仪 | 0.2 °C | 记录基线和水准各自观测时的温度 |
| 降雨 | 量筒 | 0.1 ml | 每日记录一次 |
| 短水准 | Ni007, Ni002, DiNi11 | 0.01 mm | 上午往测、下午返测，求平均 |
| 短基线 | 钢瓦基线尺 | 0.01 mm | 往测和返测中间不间断，求平均 |

对于参数 β , 其物理意义为介质的土力学系数, 即膨胀率和收缩率. 经研究认为, 同一土样的膨胀和收缩是可逆的过程, 但增减等量的含水量其膨胀和收缩量不等, 其量值的大小与起始含水量有关, 只有强降雨或持续降雨才能对形变监测产生显著影响, 因此在本研究中, 日降雨量低于 10 mm 被认为是无雨. 本文中 β 可取值为 4.13×10^{-3} .

根据 γ 的定义, 可得到其值为 58.11 mm/°C. 考虑到唐山地震台的实际情况, 该数值只作为初始参考值, 在后续分析中, 则同时考虑了 γ 取其它数值时对计算结果的影响.

2.3 台站降雨与唐山市降雨记录的对比

台站的降雨记录是用量筒测量连续两天早 8 点的累积值, 并未纳入常规的数据库系统中, 早期的纸质记录结果已经归档入库, 因此台站目前只提供 2003 年之后的降雨记录. 而从唐山市气象局可得到时间较长的市降雨记录, 可以考虑用唐山市气象局的降雨数据来代替台站记录的降雨数据. 为了验证这种方法的可行性, 本文对比了 2003 年与 2004 年两套降雨数据, 图 2 给出了具体的对比结果.

从图 2 可以明显地看出, 唐山地震台记录的降雨量与气象局提供的降雨量有显著的差异. 在唐山地震台未记录到降雨的情况下(670 次), 唐山市气象局记录到 131 次, 占

断层走向的, 2-3 和 4-1 测段是与断层方向近乎平行但斜交.

由之前的研究(黄建平, 李文静, 2011)可以看出, 短基线变化具有明显的趋势特征和年变特征. 由于其自身观测方式的限制, 不能反映出昼夜变化. 这种趋势特征变化前后与区域的中强地震的孕育发生有比较清晰的关系.

2.2 温度与降雨关系参数 γ 的设置

基于前述理论, 通过设置不同的参数 γ , 即可得到各个测段周形变响应比序列.

对于参数 α , 其物理意义为介质的热膨胀系数, 对应短基线测量, 即为观测场地介质的线性热膨胀系数. 根据之前的研究(姚武, 郑欣, 2007), 这里设置线膨胀系数为 $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$, 结合唐山地震台短基线长度为 24 m, 可计算

19.55%，显示有显著降雨。在唐山市气象局没有记录到降雨的情况下(544次)，台站记录有5次显示有降雨。同时，在有显著降雨的时候，二者的记录差异也比较显著，但未表现出统计规律特征。因此，为避免引入更多的误差，本文未采用唐山市气象局的降雨记录，而直接采用了唐山地震台的降雨记录进行分析。

2.4 地震分布特征

为判断形变响应比幅度异常是否由区域地震引起，本文选择以台站为中心($118^{\circ}11.844'E, 39^{\circ}36.420'N$)，分析其周围不同距离内地震与台站方位角的关系。地震目录来自地震数据共享网“中国台网地震目录”，选取2003年1月1日至2008年12月31日华北地区 $M \geq 3.0$ 地震。

首先统计地震到台站的距离(简称震-台距)的分布情况(图3a)，从图中可以看出：地震主要分布在距离台站两个距离范围内的地方，一个是在100 km以内，一个是在400—700 km范围之间，其中400—600 km是发震最多的区域；其次，结合震级和震-台距，考虑震级较小的地震其影响范围较小的实际情况，进一步对地震进行了筛选：选取距离台站50 km内的 $M \geq 3.0$ 地震，距离台站100 km以内的 $M \geq 4.0$ 地震，以及距离台站200 km范围内的 $M \geq 5.0$ 地震，研究时段内无 $M \geq 6.0$ 地震发生。其周边地震与唐山台的震中距离分布见图3b，对比得出分布在距离台站400 km之外的很多地震都是 $M < 4.0$ 的小震。之后，分析所选地震与台站之间的方位角(以台站为中心，指向每次地震的向量，以东向为 0° ，逆时针旋转的角度)分布(图4)。从图4可以看出，方位角分布存在优势方向。当震-台距在50 km以内，或者 $M < 4.0$ 时，地震主要分布在台站东偏北 0° — 50° ， 70° — 120° ， 210° — 250° 的方向范围；当震-台距在50—100 km之间，或者 $4.0 \leq M \leq 5.0$ 时，地震主要分布在 0° — 50° ， 170° — 230° 的方向

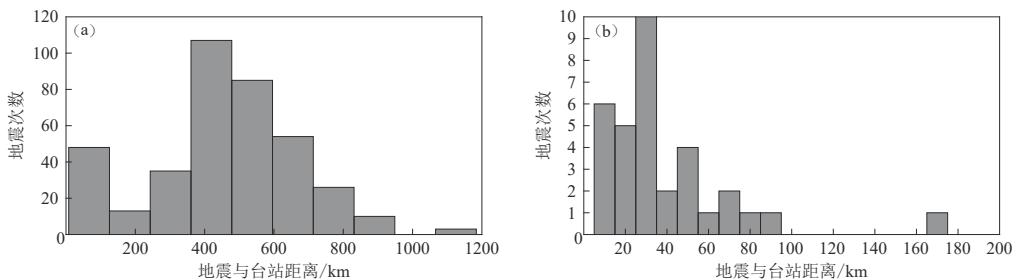


图3 地震与台站距离直方图

(a) 基于全部目录的统计；(b) 基于选择目录的统计

Fig. 3 Histogram of the earthquake-station distance

(a) Based on the whole catalogue; (b) Based on the chosen catalogue

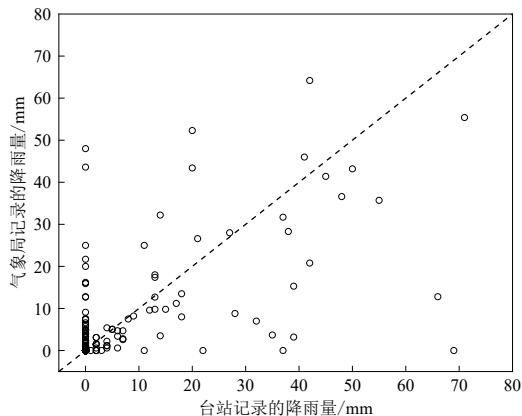


图2 同时段唐山地震台与唐山市气象局记录的降雨量对比

Fig. 2 Precipitation record comparison between the Tangshan Municipality Meteorological Administration and Tangshan seismic station at the same time

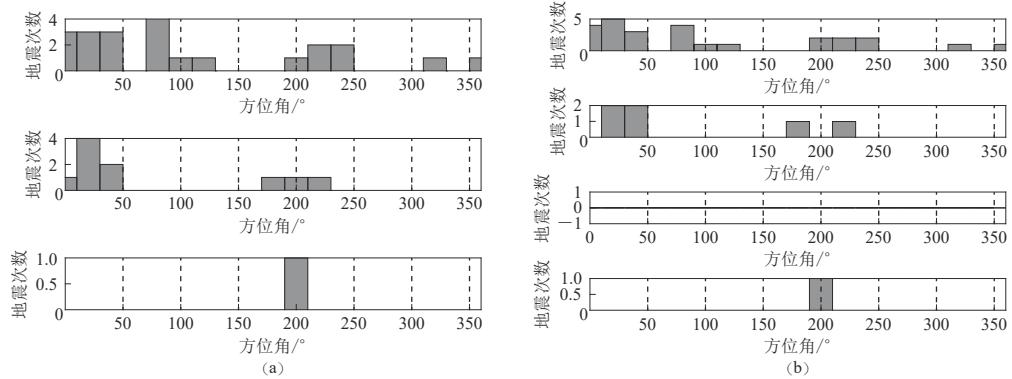


图 4 台站-地震的方位角分布

(a) 按照不同震级统计; (b) 按照不同距离统计

Fig. 4 Azimuth angle histogram of the station-earthquake

(a) Based on magnitude; (b) Based on distance

范围; 当震-台距更远, 或震级更高时, 由于样本量有限, 仅有两次地震, 其分布在 190° — 210° 的范围内。综上, 地震相对于唐山台的分布主要有三个方位角范围: 0° — 50° , 70° — 120° , 170° — 230° 。

3 结果分析

基于唐山地震台短基线各测段观测数据(李文静等, 2009)及前文选择的 γ 参数结果, 得到各测段形变响应比序列(图 5)。从图 5 可以看出, 大部分时间内, 4 个序列的形变响应比序列基本保持在正常的稳定水平(数值为 1), 同时也可观察到一些显著的变化“脉冲”, 其中,

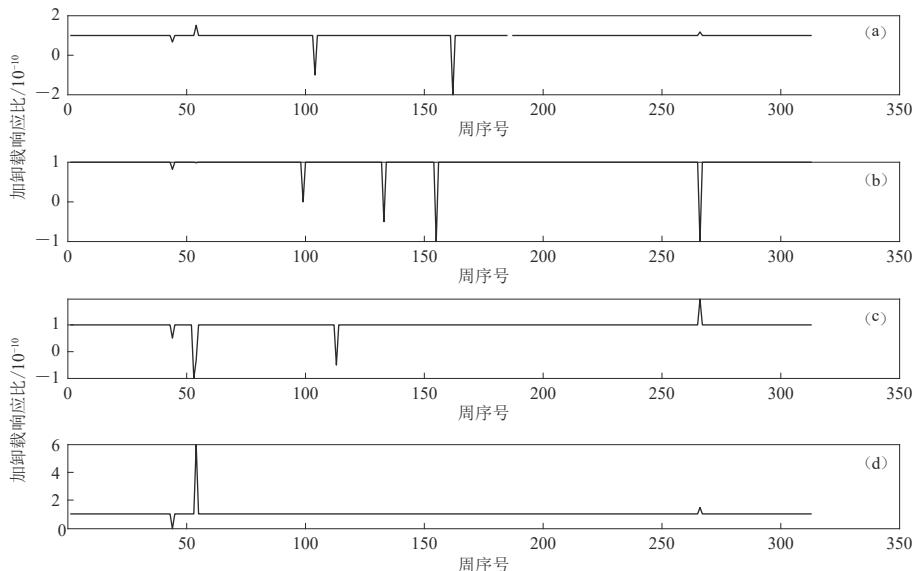


图 5 短基线 1-2 测段(a)、2-3 测段(b)、3-4 测段(c)和 4-1 测段(d)所对应的形变响应比序列

Fig. 5 Deformation response ratio series corresponding to segments 1-2 (a), 2-3 (b), 3-4 (c) and 4-1 (d)

基线 1-2 测段共出现了 6 次幅值变化, 基线 2-3 测段和 3-4 测段分别出现了 5 次幅值变化, 基线 4-1 测段共出现了 3 次幅值异常变化。在这些异常时间点上, 有两次是 4 个测段同时出现, 1 次是 3 个测段同时出现; 在同时出现幅值异常时, 各个序列的幅值变化大小也有显著的差异。表 2 给出了这些幅值异常点对应的具体时间。

表 2 短基线 4 个测段的形变响应比幅值异常时间点

Table 2 Time of the amplitude abnormality from the deformation response ratio for the 4 short baseline segments

| 基线测段 | 形变响应比序列 | 形变响应比序列异常日期 |
|------|---------|--|
| 1-2 | F_1 | 2003-11-05, 2004-01-14, 2004-12-29, 2006-02-08, 2006-07-26, 2008-02-06 |
| 2-3 | F_2 | 2003-11-05, 2004-11-24, 2005-07-20, 2005-12-21, 2008-02-06 |
| 3-4 | F_3 | 2003-11-05, 2004-01-07, 2004-01-14, 2005-02-02, 2008-02-06 |
| 4-1 | F_4 | 2003-11-05, 2004-01-14, 2008-02-06 |

注: 因为计算的是周形变响应比序列, 表中给出的时间是以 2003 年 1 月 1 日为一周的起始时间, 各个形变响应比异常所在周的第一天的日期。

分析形变响应比序列与台站所在区域的小震活动之间的关联性。根据各个测段的走向, 结合台站周边小震的震-台方位角, 从时间相关角度寻找各个测段序列形变响应比幅值异常与区域地震发生的相关性(图 6)。

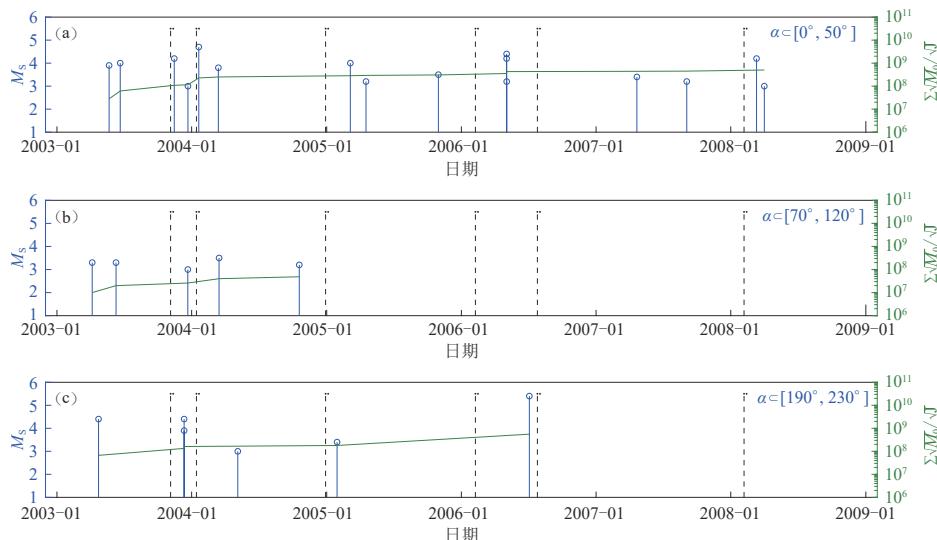
图 6 按地震与台站之间的方位角显示的 $M-t$ 图

Fig. 6 Magnitude-time plot based on angle between epicenters and Tangshan station

对短基线 1-2 测段 F_1 的形变响应比序列(图 6)而言, 在台站东北向的 5 次(其中一次为同一天发生两次地震) $M \geq 4.0$ 地震前均出现了幅值异常, 时间间隔基本在 3 个月以内(10 天, 8 天, 67 天, 89 天, 21 天, 33 天); 2006 年 7 月 26 日这周的形变响应比幅值异常后未发生 $M \geq 4.0$ 地震, 但之前于 2006 年 7 月 4 日在台站的西南方向发生了一次 $M 5.4$ 地震, 表现出较好的映震特征。同样的, 对其它各测段作相同的分析, 可得到如下的认识: 在台站东北向的 5 次(其中有两次地震发生在同一天) $M \geq 4.0$ 地震发震前, 反映 2-3 测段 F_2 的形变响应

比序列出现了两次幅值异常, 3-4 测段 F_3 的形变响应比序列出现了 4 次幅值异常, 4-1 测段 F_4 的形变响应比序列出现了 3 次幅值异常; 时间间隔基本在 1 个月以内(10 天, 33 天居多); 几个测段的形变响应比幅值异常仅仅与台站东北向的地震有关联, 与其它方向的地震没有表现出关联性.

概括起来, 4 个测段的形变响应比序列幅值异常均与台站东偏北 $0\text{--}50^\circ$ 范围内的 $M \geq 4.0$ 地震有关联, 而与其它两个优势方向内的地震相关性很低, 其原因可能是: 对于 $70^\circ\text{--}120^\circ$ 范围内的地震, 其震级都在 $M4.0$ 以下, 能量较弱, 辐射影响范围受限; 对于 $190^\circ\text{--}230^\circ$ 范围内的地震, 是在 $0\text{--}50^\circ$ 的对角方向上, 正常情况下应该可以影响台站观测, 这可能与区域构造环境有关. 实际上, 通过台站的 5 号断层属于唐山—古冶断裂的一部分, 而唐山—古冶断裂和都和断裂、唐山—蔚山—长山南坡断裂合称为唐山断裂带, 这三个断裂带向西南延伸后, 在丰南附近合并成为一条, 延伸到磨坊桥附近消失. 因此, 有可能在此区域发生的 $4.0 \leq M \leq 5.0$ 之间的地震能量被分散到其它断裂上, 弱化了对唐山地震台的形变观测的影响; 而当震级足够大, 例如 $M \geq 5.0$, 就可能产生影响, 例如短基线 1-2 测段.

4 讨论

4.1 γ 取值对形变响应比序列的影响

式(4)显示出, ΔA 的正负, 在 ΔT 和 ΔP 均为正或均为负时能够正常反映加载或卸载作用, 但当 ΔT 和 ΔP 表现为不一致变化时, 形变响应比的结果在很大程度上取决于 γ 值的大小. 根据 γ 的定义来看, γ 取值的大小反映了在系统分析过程中对降雨因素的“重视”程度, 当 γ 取值趋向于 ∞ 时, 即为忽略了降雨的作用; 当 γ 取值趋向于 0 时, 即为单独考虑降雨因素. 这里设 γ 分别取 0.01, 1, 30, 120, 1 000 和 10 000, 对比 γ 取值对加卸载结果的影响情况, 图 7 给出了基线 1-2 测段的对比结果.

从图 7 中可以看出, 当 γ 足够小或足够大时, 系统的响应比序列均保持稳定, 不再发生改变. 这种情况可能类似于物理学中的“共振”现象, 即介质震动的频率远低于或高于其固有频率时, 介质都不会发生共振; 只有当介质震动的频率达到某个临界程度时, 介质才会发生共振, 才表现出显著的物理特征. 对于降雨对台站的影响而言, 这种影响受到降雨强度、干旱程度、降雨持续时间等多个因素的制约, 因此即使对于相同测段, γ 也是一个变化的量, 或者在一个范围内变化, 同时也说明这个测段会受到降雨因素的影响. 同样, 本文也观察到基线 3-4 的形变响应比序列不受 γ 变化的影响, 说明该测段不受降雨因素的影响. 同时之前的分析也表明, 尽管短基线最大只有不到 50 m 的距离, 相同的 γ 对台站短基线各测段观测的影响是有差异的, 这表明降雨对不同测段的影响作用不同, 反映了台站四个短基线桩并不完全在基岩上导致形变差异.

4.2 时间尺度对形变响应比的影响

本文将气温和降雨同时作为加卸载载荷, 但气温和降雨对场地形变的影响时间尺度不同, 特别是降雨因素, 其对场地形变的影响甚至可达 1 月之久. 本研究同时给出了月尺度的加卸载响应比序列(图 8). 从图中可以看出, 各测段的月加卸载响应比序列变化幅值在 10^{-10} 甚至更小的量级, 即相比较于周加卸载响应比序列, 月加卸载响应比序列基本没有变化.

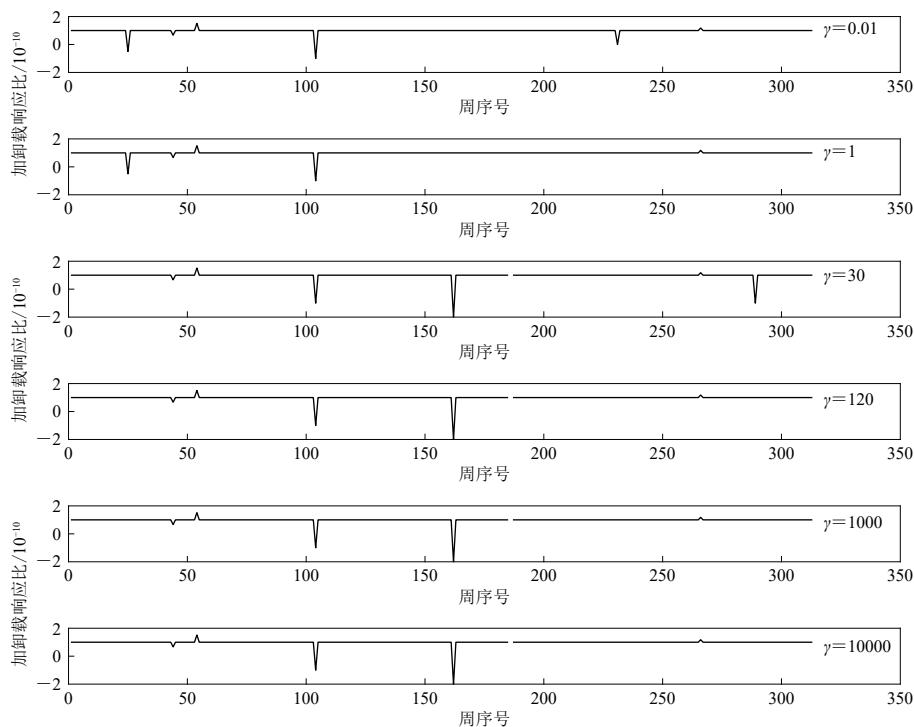
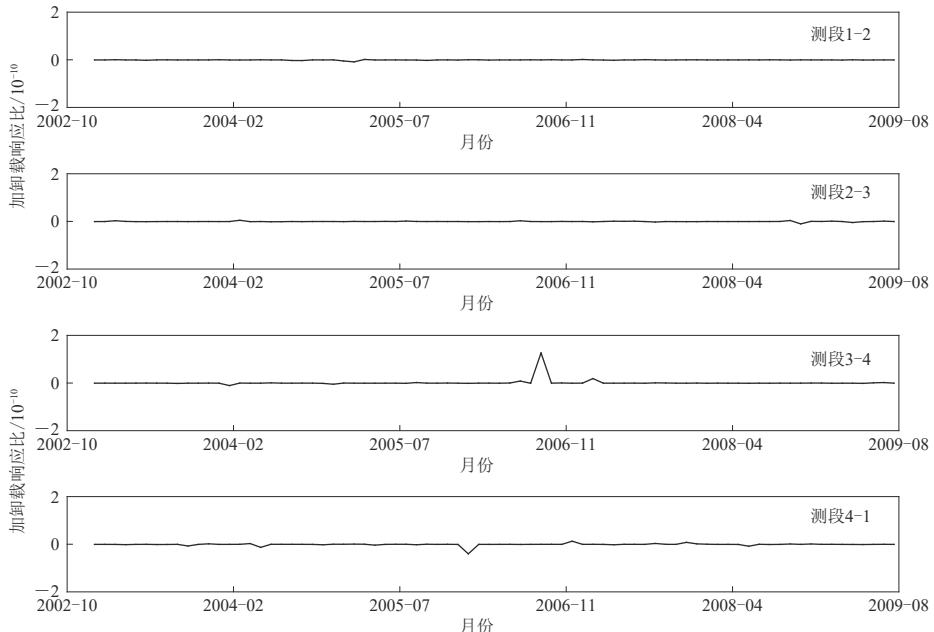
图 7 不同 γ 值对基线 1-2 测段加卸载响应比结果的影响对比Fig. 7 Compare of the ratios with different γ values

图 8 各测段的形变响应比序列

Fig. 8 Monthly series of the deformation response ratio for different segments

4.3 系统动力学的复杂来源分析

尽管唐山地震台的观测范围很小，但其观测区域内不同位置或测段受到的动力学作用仍然很复杂，在日常观测中仍需细致分析。根据室内岩石破裂试验的结果可知，岩石破裂具有方向性。对于有断裂穿过的唐山地震台来说，更是有显著裂缝的大岩石。在仅考虑温度和降雨的条件下，以一年为周期进行分析，温度的作用是时刻持续的，降雨的作用是间断且集中在夏秋两个季节的，因此二者的作用体现在观测上虽然可以看作是弹性的，但从时间序列上 γ 应该是变化的。其次，断层两侧对气温的响应可以认为是相同的，但降雨作用实际受地面高低、周围建筑遮挡等影响导致地下渗透差异进而对不同测段作用程度不同。同时，本文中假设的气温和降雨对形变造成的弹性变形，在一定程度上是作了简化近似的。以降雨为例，降雨量很小的条件下，落地即蒸发，对台站观测基本没有影响；当瞬时降雨量非常大时，由于场地硬化等环境作用，会有一定量的雨水形成了地表径流而不是渗透到地下，也会降低强降雨量的作用；即使在满足弹性条件下，场地的渗透系数也影响了因雨水导致的形变的显现时间，渗透系数越大，滞后时间越短，渗透系数越小，时间滞后越长。

5 结论

本文基于加卸载响应比思想，考虑在低应力条件下的线弹性变形阶段，将气温和降雨两个通常被认为是干扰的气象因素作为形变观测的常规影响因素，选择合理参数降维转化，找到了影响台站形变观测的其它动力学来源。结果表明：

1) 降雨到气温的转换参数 γ 的大小，会对某些测段的形变响应比结果产生影响，尽管台站场地面积不大，这仍表明降雨对台站短基线各测段观测的影响是有差异的。同时，不同来源的降雨资料的对比表明，在考虑使用不同来源的数据时，要充分考虑其匹配程度；

2) 只有足够能量的外界动力(例如距离台站50 km以内，或者 $M \geq 4.0$ 地震)才能对台站短基线观测产生影响；而对于相同的孕震动力作用，各个测段的形变响应比的响应特征也并不相同，与断层走向垂直的测段响应效果最好，近乎平行断层的测段次之，与断层斜交的测段最差。

唐山市气象局提供了唐山市降雨资料，地震目录来自国家地震科学数据中心，审稿专家在本文的撰写过程中给予了指导，作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 程海琴, 陈强, 刘国祥, 杨莹辉. 2014. 短基线 InSAR 探测龙门山主断裂带两侧震后雨期的滑坡空间分布特征 [J]. 测绘学报, 43(9): 931–938.
- Cheng H Q, Chen Q, Liu G X, Yang Y H. 2014. Post-earthquake landslides distribution along Longmenshan major fault during rainy season with short-baseline InSAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 43(9): 931–938 (in Chinese).
- 邓琳, 刘国祥, 张瑞, 王晓文, 于冰, 唐嘉, 张亨. 2016. 多平台 MC-SBAS 长时序建模与形变提取方法 [J]. *测绘学报*, 45(2): 213–223.
- Deng L, Liu G X, Zhang R, Wang X W, Yu B, Tang J, Zhang H. 2016. A multi-platform MC-SBAS method for extracting long-term ground deformation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(2): 213–223 (in Chinese).
- 黄建平, 李文静. 2011. 唐山地震台短水准、短基线数据的分段特征 [J]. *地震*, 31(2): 50–58.
- Huang J P, Li W J. 2011. Segmentary characteristics of short-baseline and short-leveling data at Tangshan station[J]. *Earthquake*, 31(2): 50–58 (in Chinese).

- 黄建平,石耀霖,孙玉军,李文静.2012.气温变化对唐山地震台跨断层形变观测的影响[J].*中国地震*,**28**(2):222–230.
- Huang J P, Shi Y L, Sun Y J, Li W J. 2012. Effect of air temperature variation on the cross-fault deformation observations at the Tangshan seismic station[J]. *Earthquake Research in China*, **28**(2): 222–230 (in Chinese).
- 李伟,龚耀,赵文舟,陈军.2014.地磁加卸载响应比方法在上海及其邻区地震研究中的应用[J].*地震*,**34**(1):125–133.
- Li W, Gong Y, Zhao W Z, Chen J. 2014. Application of geomagnetic LURR method in seismic studies in Shanghai and its adjacent areas[J]. *Earthquake*, **34**(1): 125–133 (in Chinese).
- 李文静,杨国华,武艳强.2009.地震前后唐山地震台地形变数据频谱特征分析[J].*地震*,**29**(2):141–146.
- Li W J, Yang G H, Wu Y Q. 2009. Autoregression and spectrum analysis of Tangshan deformation data before and after earthquakes[J]. *Earthquake*, **29**(2): 141–146 (in Chinese).
- 李文静,杨国华,贺建明,褚秋然,郭胜军,尹宝军.2013.唐山地震台短水准观测中复测数据特征分析[J].*华北地震科学*,**31**(2):67–72.
- Li W J, Yang G H, He J M, Chu Q R, Guo S J, Yin B J. 2013. Characteristics of repeated measurement data of short-line leveling in Tangshan station[J]. *North China Earthquake Sciences*, **31**(2): 67–72 (in Chinese).
- 刘峡,马瑾,傅容珊,杨国华,绍志刚,郑智江.2010.华北地区现今地壳运动动力学初步研究[J].*地球物理学报*,**53**(6):1418–1427.
- Liu X, Ma J, Fu R S, Yang G H, Shao Z G, Zheng Z J. 2010. Primary study on the dynamics of the present-day crustal motion in North China region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(6): 1418–1427 (in Chinese).
- 楼关寿,周伟,金鹏,刘文义,李杰.2010.跨断层形变观测干扰因素的调查[J].*大地测量与地球动力学*,**30**(增刊):68–74.
- Lou G S, Zhou W, Jin P, Liu W Y, Li J. 2010. Investigation on interference factors of cross-fault deformation observation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **30**(S2): 68–74 (in Chinese).
- 王敏,沈正康,牛之俊,张祖胜,孙汉荣,甘卫军,王琪,任群.2003.现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J].*中国科学:地球科学*,**33**(增刊):21–32.
- Wang M, Shen Z K, Niu Z J, Zhang Z S, Sun H R, Gan W J, Wang Q, Ren Q. 2003. Contemporary crustal deformation of the Chinese continent and tectonic block model[J]. *Science China Earth Science*, **46**(2): 25–40.
- 王文利,郭春喜,丁黎,赵红.2019.全国一等水准点高程近20年变化分析[J].*测绘学报*,**48**(1):1–8.
- Wang W L, Guo C X, Ding L, Zhao H. 2019. Elevation change analysis of the national first order leveling points in recent 20 years[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, **48**(1): 1–8 (in Chinese).
- 吴晶,王辉,曹建玲,高原,王琼.2011.地壳介质非均匀性对华北地区强震活动的影响[J].*地球物理学报*,**54**(8):2023–2033.
- Wu J, Wang H, Cao J L, Gao Y, Wang Q. 2011. Influence of crustal inhomogeneity on seismicity in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(8): 2023–2033 (in Chinese).
- 姚武,郑欣.2007.配合比参数对混凝土热膨胀系数的影响[J].*同济大学学报(自然科学版)*,**35**(1):77–81.
- Yao W, Zheng X. 2007. Effect of mix proportion on coefficient of thermal expansion of concrete[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, **35**(1): 77–81 (in Chinese).
- 尹祥瑞,李世愚,李红,王敏.1987.从断裂力学观点探讨b值的物理实质[J].*地震学报*,**9**(4):364–374.
- Yin X C, Li S Y, Li H, Wang M. 1987. On the physical essence of b value for AE of rock tests and natural earthquakes in terms of fracture mechanics[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **9**(4): 364–374 (in Chinese).
- 余怀忠,程佳,万永革.2010.加卸载响应比与震前应力积累模式研究[J].*地震学报*,**32**(5):517–528.
- Yu H Z, Cheng J, Wan Y G. 2010. Load/unload response ratio and stress accumulation model before large earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(5): 517–528 (in Chinese).
- 郑海刚,王雪莹,何康,李军辉,方震.2014.安徽肥东形变台短水准降雨干扰特征分析[J].*内陆地震*,**28**(1):92–96.
- Zheng H G, Wang X Y, He K, Li J H, Fang Z. 2014. Analysis on interference characteristic of rainfall for short leveling in Feidong deformation station[J]. *Inland Earthquake*, **28**(1): 92–96 (in Chinese).
- Avouac J P, Tapponnier P. 1993. Kinematic model of active deformation in Central Asia[J]. *Geophys Res Lett*, **20**(10): 895–898.

- Matsumoto N, Kitagawa G, Roeloffs E A. 2003. Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan: I. Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric pressure, rainfall and tidal responses[J]. *Geophys J Int*, **155**(3): 885–898.
- Matsumoto N, Roeloffs E A. 2003. Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan: II. Possible mechanism inferred from time-varying hydraulic properties[J]. *Geophys J Int*, **155**(3): 899–913.
- Wang Y C, Mora P, Yin C, Place D. 2004. Statistical tests of load-unload response ratio signals by lattice solid model: Implication to tidal triggering and earthquake prediction[J]. *Pure Appl Geophys*, **161**(9): 1829–1839.
- Yin X C, Cheng X Z, Song Z P, Yin C. 1995. A new approach to earthquake prediction: The load/unload response ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl Geophys*, **145**(3): 701–715.
- Yin X C, Yu H Z, Kukshenko V, Xu Z Y, Wu Z S, Li M, Peng K Y, Elizarov S, Li Q. 2004. Load-unload response ratio (LURR), accelerating moment/energy release (AM/ER) and state vector saltation as precursors to failure of rock specimens[J]. *Pure Appl Geophys*, **161**(11): 2405–2416.