

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。

# 基于断层形变协调比的断层形变分析

李文静

中国地震局第一监测中心唐山台, 河北省唐山市复兴路老十中院内 063001

**摘要** 基于唐山台跨断层短基线和短水准观测结果, 综合应用不同测段的数据组合, 分析断层运动状态和测段组合之间的关系, 进而计算断层形变协调比参数序列, 分析其与区域中等以上地震之间的动力学关系, 最后获得两点认识: (1) 与断层走向呈不同夹角的测段组合会对认识断层活动特征状态产生影响, 因此在台站资料许可的情况下, 要尽可能选择不同的组合进行对比分析; 同时也表明在建立跨断层观测时, 要布置和断层走向呈不同夹角的测段, 以便对断层状态做准确的判断。对唐山台的资料而言, 据与断层走向夹角较小的两个测段所得结果相对更好, 这可能和该断层以走滑为主、该区域应力状态以水平运动为主相关。(2) 4个序列断层形变协调比的变化幅度虽然有较大差异, 但其趋势特征基本一致, 与正常背景有显著偏离的变化, 且这种变化和唐山区域中等以上( $M \geq 4.5$ )地震活动交替出现, 且其间隔时间在2000年后逐渐加长。这可能反映了在20世纪80~90年代区域应力场还处于1976年唐山大地震后的恢复阶段, 局部应力场状态在不断地调整和变化之中, 而在2000年之后, 区域应力状态逐步稳定。

**关键词:** 断层形变协调比 唐山 形变 基线 水准

[文章编号] 1001-4683(2014)03-0454-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

近40年的跨断层形变监测用于地震预测的研究实践表明, 在强地震发生前后距震中一定范围内的断层活动会出现不同程度的变化, 表现为断层运动速率和受力方式发生变化等。断层的异常形变是对地震孕育、发生过程中地壳的受力状态异常变化的重要提示。跨断层形变观测作为一种重要的地震前兆观测手段在我国的地震预测实践中发挥了重要作用, 积累了丰富的观测资料和地震形变前兆异常实例, 主要体现在用跨断层测量结果分析研究某一区域或断裂带的断层运动速率(车兆宏等, 1999; 吕戈培等, 2002)、地震前兆异常(车兆宏等, 2004; 范燕等, 2001; 江在森等, 1998; 李杰等, 2010b)及其与地质构造之间的关系(李杰等, 2010a; 薄万举等, 1997、2001)。

应用断层形变资料处理并提取地震前兆信息的方法很多, 如动态灰箱、概率合成、卡尔曼滤波等方法在分析预测中都起到一定的作用(周硕愚, 1994; 施顺英等, 2007; 游丽兰等,

[收稿日期] 2013-06-17; [修定日期] 2014-06-10

[项目类别] 中国地震局三结合项目“基于多源前兆观测的唐山地区应力应变状态分析”、中国地震局地震预测研究所“芦山地震前后电磁变化特征研究”和“川滇及华北强震危险区电离层参量的扰动特征研究”共同资助

[作者简介] 李文静, 女, 1982年生, 天津人, 工程师, 主要从事大地测量和数据分析工作。

E-mail: wenjing410@sina.com

1992)。郭良迁(2008)利用华北地区跨断层水准资料系统地研究了断层形变异常强度,认为断层形变的异常强度可视为中时间尺度的地震前兆。葛计划等(2011)基于垂直变化速率提出断层形变异常强度可作为区域中强地震的中期异常指标。这些方法一般使用的是单一水准或基线观测,对发挥多测项、多测段的综合作用的研究还有待进一步探索。

本文拟在此前研究的基础上基于唐山地震台跨断层观测数据,将不同测段的短基线和短水准测量进行组合,用断层形变协调比参数(张晶等,2011;M7 专项工作组,2012;薄万举等,1998)分析断层活动特征,并试图分析该组参数的变化与唐山区域地震活动的关系。

## 1 基本原理

当同一测点的测线长数十米时,可将断层两盘在台站测量范围内的相对运动近似看成两块刚性块体间的相对运动,并分解成水平扭动、水平相向(或背向)运动及垂直方向上的相对运动,共 3 个分量。设测线与断层夹角为  $\alpha$  (定义为测线顺时针转动到与断层线重合时所转过的角度),测线伸长量为  $\Delta L$  (缩短为负),设上盘逆时针相对下盘的扭错量为  $a$ ,水平拉张量为  $b$ ,垂直上升量为  $c$ ,水准变化量为  $\Delta h$  (由上盘到下盘为往测方向),则在 2 条  $\alpha$  不同的测线上,同时实施水准和基线测量,可唯一确定断层运动参数(薄万举等,1998)。

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{\Delta L_1 \sin \alpha_2 - \Delta L_2 \sin \alpha_1}{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 - \cos \alpha_1 \sin \alpha_2} \quad (1) \\ b = \frac{\Delta L_1 + a \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1} \quad (2) \\ c = \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2} \quad (3) \end{array} \right.$$

当断层活动处于刚性无障碍蠕滑时,如果造成断层活动的动力学环境绝对保持不变,其蠕滑的方向保持不变时,其运动应满足以下条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 = \frac{b}{a} = C_1 (\text{常数}) \\ f_2 = \frac{c}{a} = C_2 (\text{常数}) \\ f_3 = \frac{c}{b} = C_3 (\text{常数}) \\ f_4 = \frac{d}{a} = C_4 (\text{常数}) \end{array} \right. \quad (4)$$

其中  $d$  为断层面倾滑分量,有  $d = \sqrt{b^2 + c^2}$ ,称  $f_1, f_2, f_3, f_4$  为断层形变协调比(张晶等,2011)。考虑存在观测误差、小幅度的外部扰动和地壳运动的正常波动性变化的影响,在  $\Delta t$  时间内的断层走滑、拉张、垂直运动分量中任意两个分量之比也会有一定的波动,但应该是围绕协调比常数在一定范围内的波动,正常情况下可将其作为近似常数看待。当其偏离这一常数过大时,则可能意味着地壳应力场的活动出现了异常,应注意加强监测与研究。

## 2 唐山地震台及资料介绍

1976 年唐山大震之后,国家地震局第一监测中心在震地地表破裂显著的唐山市老十中

院内建立了跨断层短水准和短基线测量场地,迄今已积累了30余年的数据,包括4条短水准和4条短基线测量及其它辅助气象测量(李文静等,2009;黄建平等,2010),其测量场地及测线布设如图1。已有资料显示(国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组,1982),唐山地震在唐山地震台附近造成的地裂缝沿唐山矿5号逆断层(断面倾向NW,走向NE30°,倾角70°~80°,如图1所示)密集成带分布,在台站地区呈张性地裂缝、右旋扭动特征,该裂缝的西北侧上升,东南侧下降。

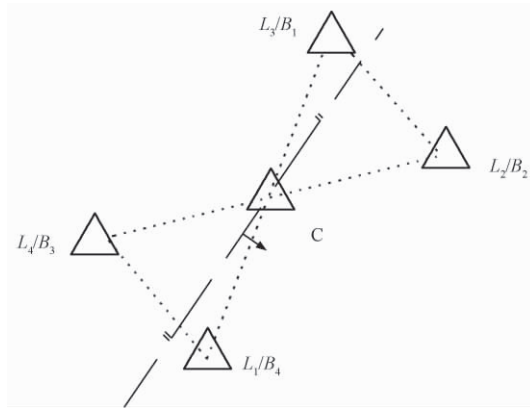


图1 唐山台测量场地及测线布设示意图

L 水准; B 基线; C 过渡桩; ..... 测线; —— 唐山5号断层

黄建平等(2011)的研究认为,2009年之前的数据可以分为1984~1989、1990~1998和1999~2008年3个时段。为观察断裂的趋势变化,消除其高频成分和随机波动,对原始数据采用年均值方法进行了处理(图2),计算了不同时间段的断层形变协调比。

### 3 分析与讨论

根据唐山台4个测段的实际测量,则由公式(2)可以得到方程组为

$$\begin{cases} \Delta L_1 = b \sin(\alpha_1) - a \cos \alpha_1 \\ \Delta L_2 = b \sin(\alpha_2) - a \cos \alpha_2 \\ \Delta L_3 = b \sin(\alpha_3) - a \cos \alpha_3 \\ \Delta L_4 = b \sin(\alpha_4) - a \cos \alpha_4 \end{cases} \quad (5)$$

即

$$\begin{pmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \\ \Delta L_3 \\ \Delta L_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha_1) & \sin(\alpha_1) \\ -\cos(\alpha_2) & \sin(\alpha_2) \\ -\cos(\alpha_3) & \sin(\alpha_3) \\ -\cos(\alpha_4) & \sin(\alpha_4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (6)$$

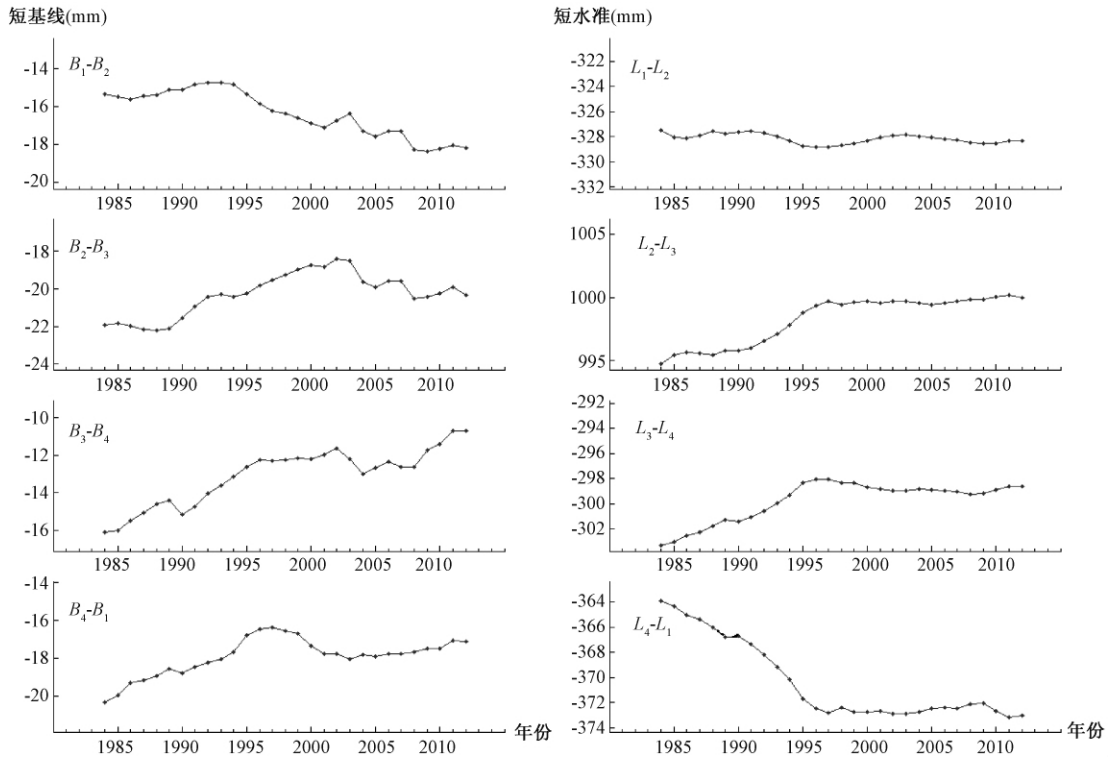


图 2 1985 ~ 2010 年唐山台短基线、短水准年均值变化曲线

$$\text{令 } A = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha_1) & \sin(\alpha_1) \\ -\cos(\alpha_2) & \sin(\alpha_2) \\ -\cos(\alpha_3) & \sin(\alpha_3) \\ -\cos(\alpha_4) & \sin(\alpha_4) \end{pmatrix},$$

$$\text{则有 } (A^T A)^{-1} A^T \begin{pmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \\ \Delta L_3 \\ \Delta L_4 \end{pmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T A \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix},$$

从而可得(1)式中的  $a$  和(2)式中的  $b$ 。对公式(3)中的  $c$ ,可以由各段平均得到。所得结果见表 1。

表 1 不同时期的断层参数及状态表

时段	1984 ~ 1989 年	1990 ~ 1998 年	1999 ~ 2008 年	2009 ~ 至今
$a$	-1.5165	-0.6393	0.2729	-0.3894
$b$	0.5261	1.4407	-1.3588	0.4547
$c$	1.9642	4.6805	-0.2139	0.5502
$d$	2.4815	4.7239	0.3467	0.6740
断层状态	右旋拉张上盘上升	右旋拉张上盘上升	左旋压缩上盘下降	右旋拉张上盘上升

根据式(1)~(4)及图1可知,在同一测段同时具备水准和基线测量,则可以有4个测段,即

$S_1$ :使用  $B_{1-2}, L_{2-3}$  的数据,其与断层夹角  $\alpha = 66^\circ$ ;

$S_2$ :使用  $B_{2-3}, L_{2-3}$  和  $L_{3-4}$  的数据,其与断层夹角  $\alpha = 126^\circ$ ;

$S_3$ :使用  $B_{3-4}, L_{4-1}$  的数据,其与断层夹角  $\alpha = 66^\circ$ ;

$S_4$ :使用  $B_{4-1}, L_{1-2}$  和  $L_{2-3}$  的数据,其与断层夹角  $\alpha = 6^\circ$ ;

根据夹角的不同,可以得到如下5种组合模式:模式一( $M_1$ )包括  $S_1$  和  $S_2$ ;模式二( $M_2$ )包括  $S_1$  和  $S_4$ ;模式三( $M_3$ )包括  $S_3$  和  $S_2$ ;模式四( $M_4$ )包括  $S_3$  和  $S_4$ ;模式五( $M_5$ )包括  $S_2$  和  $S_4$ 。

根据式(1)~(3),可以分别计算判断不同时期的断层活动状态,见表2。

表2 不同基线和水准组合计算得到的断层形变协调比

时段		1984年~1989年	1990年~1998年	1999年~2008年	2009年~至今
$M_1$	a	-0.489	3.586	-0.067	-0.098
	b	0.085	0.214	-1.834	0.156
	c	2.098	5.206	-0.246	0.457
	d	2.100	5.210	1.850	0.483
断层状态		右旋拉张上盘上升	左旋拉张上盘上升	右旋压缩上盘下降	右旋拉张上盘上升
$M_2$	a	-1.876	-2.555	0.8531	-0.3625
	b	-0.533	-2.520	-1.424	0.038
	c	0.921	3.120	0.2168	0.263
	d	1.064	4.010	1.440	0.266
断层状态		右旋压缩上盘上升	右旋压缩上盘上升	左旋压缩上盘上升	左旋拉张上盘上升
$M_3$	a	-1.793	-0.325	-1.164	-0.895
	b	1.032	3.056	-1.036	0.735
	c	3.007	6.241	-0.644	0.837
	d	3.179	6.949	1.220	1.114
断层状态		右旋拉张上盘上升	右旋拉张上盘上升	右旋压缩上盘下降	右旋拉张上盘上升
$M_4$	a	-1.708	-2.050	0.9949	-0.230
	b	1.070	2.289	-0.0747	1.018
	c	1.830	4.154	-0.182	0.643
	d	2.120	4.743	0.1966	1.204
断层状态		右旋拉张上盘上升	右旋拉张上盘上升	左旋压缩上盘下降	右旋拉张上盘上升
$M_5$	a	-1.7173	-1.853	0.7478	-0.332
	b	0.977	4.166	-2.425	0.326
	c	1.964	4.680	-0.214	0.549
	d	2.194	6.266	2.435	0.638
断层状态		右旋拉张上盘上升	右旋拉张上盘上升	左旋压缩上盘下降	右旋拉张上盘上升
综合判断		右旋拉张上盘上升	右旋拉张上盘上升	左旋压缩上盘下降	右旋拉张上盘上升

注:表中加框的文字表示该判断和综合判断不相符。

由表2看出,唐山5号断裂在台站所处地区活动相对强烈,活动性质多变,可以总结出如下几个特点:①右旋活动时间长,左旋活动时间短;②上盘上升时间长,下降时间短;③水平拉张时间长,压缩时间短。特点①说明该断裂呈右旋活动趋势,但存在反向变化;特点②反应该断层以逆断层活动为主;特点③与②相矛盾,可能与该断裂走向、倾向复杂多变有关。

同时,表 2 也显示出综合判断的结果和表 1 中联合方程组的判断结果完全一致,不同组合模式的计算结果中只有  $M_4$  和  $M_5$  组合完全和综合判断结果一致,即这两个组合应该是反映断层活动状态的最佳组合。同样,据  $M_2$  组合得到的判断结果在各个时间段都没有和综合判断结果取得一致,可能与台站观测桩为土层测桩有关。表 3 给出了不同测段组合所使用的测点。从表中可以看出,计算效果较差的都同时涉及了  $B_1$  和  $B_2$  两个测点。与  $B_3$  和  $B_4$  搭配时, $B_2$  点造成的计算结果相对较差。由此可以推断, $B_2$  点造成了涉及该测段的数据误差增大。而  $B_2$  点并不是靠近断层最近的点,故不容易受到断层畸变的影响,因此需要更深入地了解该点场地条件再进行讨论。

表 3 不同组合使用的测点一览表

组合类别	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$
组合计算效果	较差(2个不符合)	最差(4段不符合)	较好(1个不符合)	好(0个不符合)	好(0个不符合)
测点号	$B_1, B_2, B_3$	$B_1, B_2, B_4$	$B_2, B_3, B_4$	$B_1, B_3, B_4$	$B_1, B_2, B_3, B_4$

进一步,根据  $M_5$  组合,利用公式(4),可以得到断层形变协调比序列(图 3)。由图 3 可以看出,断层形变协调比  $f_1, f_2, f_3, f_4$  这 4 个序列发生了一些显著的偏离正常背景的变化。对比这 4 个参数序列,其中  $f_1$  序列变化范围最小, $f_2$  和  $f_4$  稍大, $f_3$  变化范围最大。结合唐山市地震目录,可以将这些显著偏离正常背景的变化分为若干个阶段,在  $f_1, f_2, f_3, f_4$  每一个显著偏离正常背景的阶段之后,都出现了 1 次或一群 4.5 级以上局部地震活动。可以这样解释:这 4 个序列大部分时间表现为一个常数,表明断层活动接近于正常蠕动;当变量协调比偏离

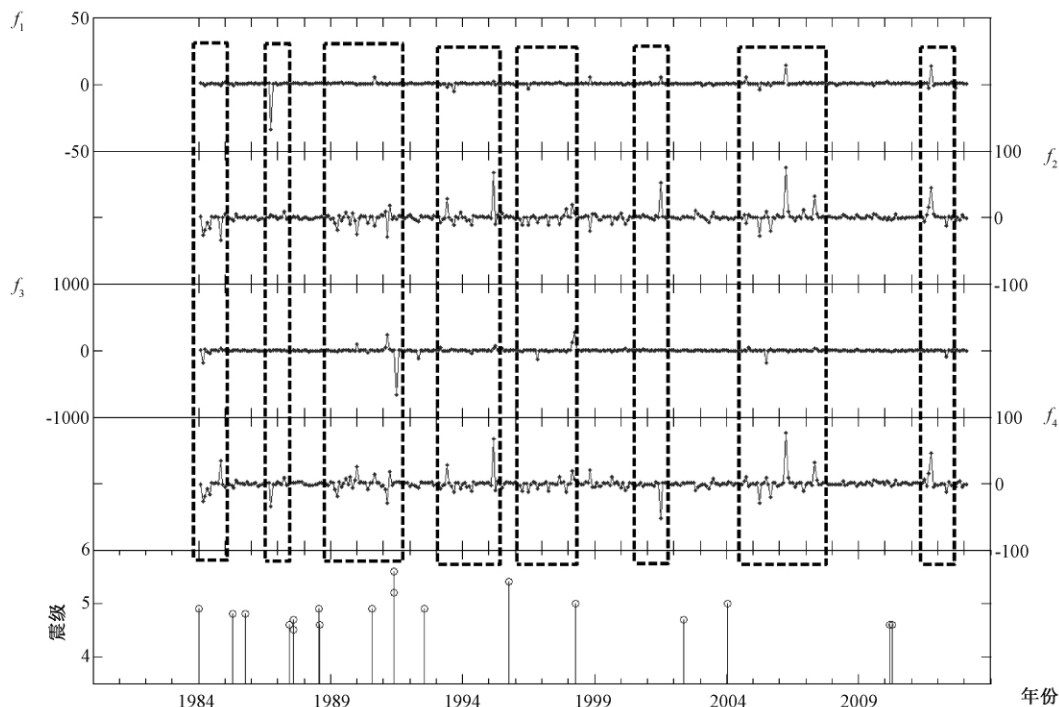


图 3 月均值计算得到的断层形变协调比序列

原来正常值很大时,断层活动趋向于不稳定或已产生闭锁;即协调比的改变预示着断层存在应变积累。当断层失稳发生地震,并伴随高应变释放后,断层活动又趋于正常状态,断层形变协调比再次趋于正常。而且,这种断层形变协调比参数的大幅度变化时间和后续4.5级以上地震的时间间隔也呈现逐渐拉长的趋势(最后3次的时间间隔分别达到1个月,6个月,24个月)。如果按照这种模式来解释,根据最后一次断层形变协调比的大幅变化时间(2012年年中),那么唐山地区的地震活动背景是在未来2~3年内可能发生4.5级以上地震。

## 4 结论

本文通过对唐山台短基线和短水准资料的综合运用,初步分析了唐山5号断层的基本运动状态,计算得到了该断层的形变协调比序列,得到如下认识:

(1) 对与断层走向呈不同夹角的测段组合会产生不同的断层活动特征状态认识。对唐山台的资料而言,与断层走向夹角较小的两个测段获得的认识相对更好,可能和该断层以走滑为主、该区域应力状态以水平运动为主相关。

(2) 断层形变协调比序列有显著的偏离正常背景的变化,且和唐山区域中等以上地震活动呈现交替出现的态势,可能反映了区域的应力场状态在不断地调整 and 变化之中。

致谢:感谢唐山市地震局提供的区域地震目录。感谢审稿老师的中肯建议和和武艳强博士的指导。

## 参考文献

- 薄万举、郭良迁、谢觉民, 1997, 苏鲁皖断层形变显示的区域地壳活动特征, 地震地质, **19**(2), 148~154。
- 薄万举、郭良迁、周伟, 2001, 据断层垂直形变确定华北活动块体边界, 地壳形变与地震, **21**(1), 64~71。
- 薄万举、谢觉民、郭良迁, 1998, 八宝山断裂带形变分析与探讨, 地震, **18**(1), 63~68。
- 车兆宏、范燕, 1999, 华北地区断层现今活动速率与特征, 地震地质, **21**(1), 68~75。
- 车兆宏、范燕, 2004, 华北地区震前断层异常活动方式, 地震, **24**(2), 109~118。
- 范燕、车兆宏, 2001, 南北地震带北段及其两侧断层现今活动性, 地震, **21**(2), 86~93。
- 葛计划、宁斌、孙军等, 2011, 断层形变异常强度在跨断层水准测量中的应用——以安徽及临近地区为例, 防灾科技学院学报, **13**(4), 19~24。
- 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982, 一九七六年唐山地震, 1~459, 北京:地震出版社。
- 郭良迁, 2008, 华北地区断层形变异常强度与地震的关系, 灾害学, **28**(4), 11~16。
- 黄建平、石耀霖、李文静, 2010, 从跨断层短基线观测计算地应变的方法探讨——以唐山台地形变数据为例, 地球物理学报, **53**(5), 1118~1126。
- 黄建平、李文静, 2011, 唐山台短水准、短基线数据分段特征, 地震, **31**(2), 50~58。
- 江在森、祝意青、王庆良等, 1998, 永登5.8级地震孕育发生过程中的断层形变与重力场动态图像特征, 地震学报, **20**(3), 264~271。
- 李杰、唐廷梅、荆强等, 2010b, 跨断层形变测量异常特征分析, 地震, **30**(2), 100~111。
- 李杰、刘文义、楼关寿等, 2010a, 跨断层形变观测显示的断裂活动特征分析研究, 中国地震, **26**(1), 46~59。
- 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, 地震, **29**(2), 141~146。
- 吕弋培、廖华、苏琴, 2002, 川滇菱形块体边界的现今地壳形变, 中国地震, **18**(1), 28~37。
- M7 专项工作组, 2012, 中国大陆大地震中~长期危险性研究, 北京:地震出版社。
- 施顺英、张燕、吴云等, 2007, 基于跨断层形变异常预测云南地震的试验, 大地测量与地球动力学, **27**(5), 82~87。

游丽兰、刘大杰、黄加纳等, 1992, 跨断层测量资料的卡尔曼滤波数学模型, 中国地震, **8**(3), 44 ~ 52。

张晶、黎凯武、武艳强等, 2011, 断层活动协调比在地震预测中的应用, 地震, **31**(3), 19 ~ 26。

周硕恩, 1994, 断层形变测量与地震预报, 地壳形变与地震, **14**(4), 90 ~ 97。

## Analysis of the fault deformation based on the fault deformation coordination ratio

*Li Wenjing*

Tangshan Seismic Station of the First Crust Monitoring Center, CEA, Tangshan 063001, Hebei, China

**Abstract** Based on the short-leveling and short-baseline observation in Tangshan seismic station, the relationship between different combination of segments and the fault movement is discussed. And then the fault deformation coordination ratios are calculated and used to analyze the relation between their sharp deviation and the local med-strong earthquakes. The results show that: (1) The view on the fault movement would be different because of the different measurement-angle segments with the fault. So it is necessary to calculate and compare the different combinations if the data are suitable. At the same time it is proved that different segments along the same fault are essential to study the fault movement. For the Tangshan seismic station, the combination with two small angle segments data is better than others, which may be the result of the strike-slip fault and horizontal local strain. (2) The four fault deformation coordination ratio series have similar trends although their amplitudes vary greatly. The sharp deviation to the normal level appeared alternately with the Tangshan med-strong earthquakes ( $M \geq 4.5$ ), and the time intervals last longer gradually as time goes after 2000. That may reflect that the local strain in the 1980s ~ 1990s was in their modification period of the great Tangshan earthquake, and after 2000, the regional strain becomes steady.

**Key words:** Fault deformation coordination ratio Tangshan Deformation Base line Leveling