

基于多参数的滇东南地区跨断层异常分析*

苑争一, 牛安福, 赵静, 闫伟

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 2018年8月13, 14日, 云南省通海县连续发生2次5.0级地震, 打破了云南省境内504天的5级地震平静。为研究滇东南地区的强震背景, 基于云南地区的跨断层水准数据, 计算了断层形变异常参数, 结果显示该区域异常频次较高; 详细梳理了滇东南地区多个场地的水准、基线数据, 计算了断层运动年滑动速率变化、区域运动主成分信息合成、改进的断层运动协调比参数。结合震例分析认为, 滇东南地区的断层运动异常幅度较大、持续时间较长, 2次通海5.0级地震震级较小, 该区域仍存在发生强震的危险性。

关键词: 滇东南地区; 断层形变异常参数; 主成分分析; 断层运动协调比; 强震危险性

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)04-0517-08

0 引言

云南地处印度板块与欧亚板块中国大陆碰撞带东缘, 地震活动频度高、震级大、分布广(皇甫岗等, 2010), 是研究地壳运动与应变积累及其与强震关系的热点区域(魏文薪等, 2012; 周海涛等, 2017)。1982年初以来, 先后在川滇菱形块体西南、东南边界带上建立了多个跨断层形变监测场地, 用于监测大地形变, 分析强震孕育过程中断层形变的发展演变过程。随着观测数据的不断积累, 对跨断层数据的处理与分析研究也逐步深入。张超等(1981, 1987)详细推导了利用跨断层基线、水准数据计算断层运动走滑、张压、垂直升降三分量的计算公式, 在此基础上, 多位学者分析了断层运动时间演化特征及其与地震活动的关系。薄万举等(1997)利用信息合成的方法提取了断层的趋势及短期变化信息; 李腊月等(2013, 2014)利用主成分分析的方法综合分析了首都圈跨断层形变资料; 焦青和周俊萍(1998)利用跨断层资料分析了断层位移速率的动态演化特征与强震的关系; 李瑞莎等(2009)论证了川滇地区断层活动与地震的关系。另外, 对预测指标的构建和应用研究也越来越多元和系统化, 张晶等(2011)采用断层三维立体模型计算了断层

三维运动参数, 进而提出了断层活动协调比的概念; 李瑞莎等(2013)根据断层协调比的概念, 讨论了起点变化对协调比计算结果的影响, 提出了移动窗计算断层活动协调比的方法以及离散度评定指标; 张希等(2012)基于灰色关联度指标, 研究了鲜水河断裂活动特性与大震的关系。

以往的研究大都基于单个指标进行单一尺度的区域地震危险性分析, 本文对前人提出的多种跨断层异常分析方法进行了整合, 并重点对反应断层应变状态变化的断层活动协调比指标进行了改进研究, 在此基础上梳理了云南地区最新的跨断层数据, 首先利用断层活动异常频次(刘强等, 2010)分析整个云南地区的强震背景; 并重点计算了滇东南区域的断层运动年速率变化、断层运动主成分信息合成、断层运动协调比指标, 并结合震例对该区域的强震危险性进行了综合分析。

1 云南地区断层活动异常频次分析

近年来, 云南地区多个跨断层场地先后出现了大幅度的拉张、压缩变化, 断层活动加剧, 异常变化显著。针对多个场地异常发展变化的群体性、同步性特征与强震孕育的关系, 刘强等(2010)提出了断层形变异常参数, 其计算公式如下:

* 收稿日期: 2018-08-24.

基金项目: 中国地震局2018年度青年震情跟踪课题(2018010215)资助.

$$R_{i,j} = \frac{\frac{m_{i,j} - m_{i-1,j}}{t_{i,j} - t_{i-1,j}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{m_{i,j} - m_{i-1,j}}{t_{i,j} - t_{i-1,j}} \right| + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{m_{i,j} - m_{i-1,j}}{t_{i,j} - t_{i-1,j}} \right| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{m_{i,j} - m_{i-1,j}}{t_{i,j} - t_{i-1,j}} \right| \right)^2}} \quad (1)$$

式中: n 为所用资料的总年数减去 1; i 表示年 ($i = 1, 2, \dots, n$); j 表示月 ($j = 1, 2, \dots, 12$); $m_{i-1,j}$ 和 $m_{i,j}$ 分别为第 $i-1$ 年和第 i 年的第 j 个月的观测值; $t_{i-1,j}$ 和 $t_{i,j}$ 为第 $i-1$ 年和第 i 年的第 j 月观测时间值; $R_{i,j}$ 为第 i 年第 j 个月的异常参数值。

笔者选取了持续时间较长、观测较为完整的 10 个场地的水准观测数据 (表 1), 计算了各测项的异常参数值, 并以 $|R_{i,j}| > 1$ 作为异常阈值统计了断层活动异常频次变化 (图 1)。从图 1 可以看出: 自 1982 年观测以来, 云南及周边地区有 4 组 6.5 级以上强震发生, 均发生在异常频次较高的时段后 (5 组高频异常后 2 年左右有 4 组对应了该区域的成组强震), 目前异常频次较高且持续时间较长, 整个云南地区的强震危险性背景较强。

表 1 云南地区跨断层场地概况 (据刘强等, 2010)

Tab. 1 The overview of cross fault sites in Yunnan (based on Liu *et al.*, 2010)

测站	高程/m	断裂	断层走向/倾向	参与计算测段
剑川	2 345	剑川断裂	N10°E/NW75°	k2-1/k3-1
丽江	2 640	丽江断裂	N10°W/SW70°	k1x-2x/k4-3
永胜	2 160	程海断裂	N5°W/SW35°	k1-2x/k3-2x
下关	1 980	洱海断裂	N40°E/NE60°	k1-2/k3-2
楚雄	1 880	楚雄断裂	N30°W/NE58°	k1x-2/k3-2/ k3-5
峨山	1 630	曲江断裂	N55°W/SW60°	k1-2/k3-4
通海	1 480	曲江断裂	N65°W/NE68°	k1-2/k3-4
石屏	1 400	楚雄—建水断裂	N50°W/NE70°	k2-3
建水	1 410	楚雄—建水断裂	S81°W/ES70°	k2-1/k2x-3
寻甸	2 350	小江断裂西支	N25°E/SE73°	k1-5

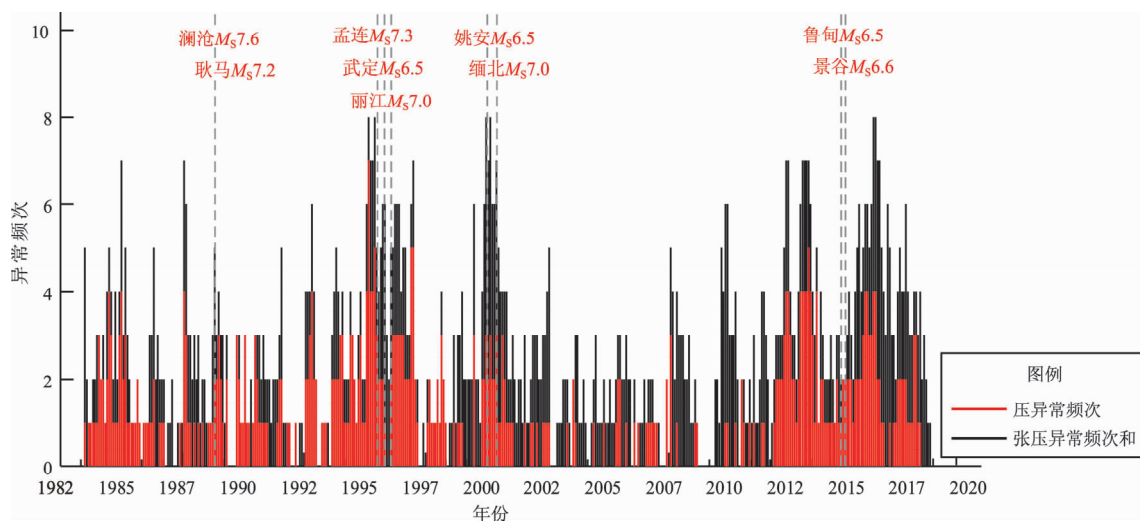


图 1 1982 年 2 月—2018 年 8 月云南地区断层活动异常频次与 $M_s \geq 6.5$ 强震对应关系

Fig. 1 The relationship between the anomaly frequency of fault activity and $M_s \geq 6.5$ strong earthquakes from Feb. , 1982 to Aug. , 2018

2 滇东南地区显著跨断层异常及滑动速率变化分析

如图 2 所示, 滇东南地区存在多项显著的跨断层观测异常, 例如石屏基线 2-1、2-3 自 2010 年起呈现持续拉张变化, 目前转平且伴有短期压缩变化; 石屏水准 2-1、2-3 自 2013 年起出现持续正断活动, 目前速率变缓且伴有短期逆断活动变化; 建水基线 2-1 在大幅拉张后出现回复趋势; 宜良基

线 1-2 出现趋势压性异常并在低位震荡变化; 峨山水准 1-2 在正断背景下出现显著的逆断变化。

为了消除年变的影响, 进一步分析各场地速率变化异常特征, 计算上述异常项的年滑动速率 (每个月一个值) 及年平均滑动速率 (每年一个值), 如图 3 所示。从图中可见, 建水基线 2-1 拉张年平均速率, 以及石屏基线 2-3 压缩年平均速率持续增大, 表明楚雄—建水断裂应变积累不断增强, 其他场地变化不明显。

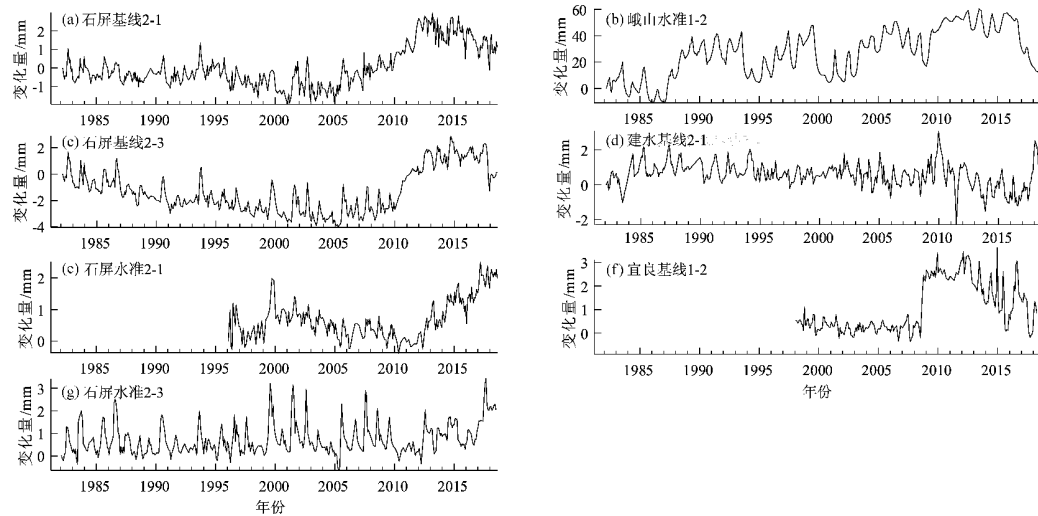


图2 滇东南地区显著跨断层形变异常

Fig. 2 The significant fault deformation anomalies in Southeast Yunnan

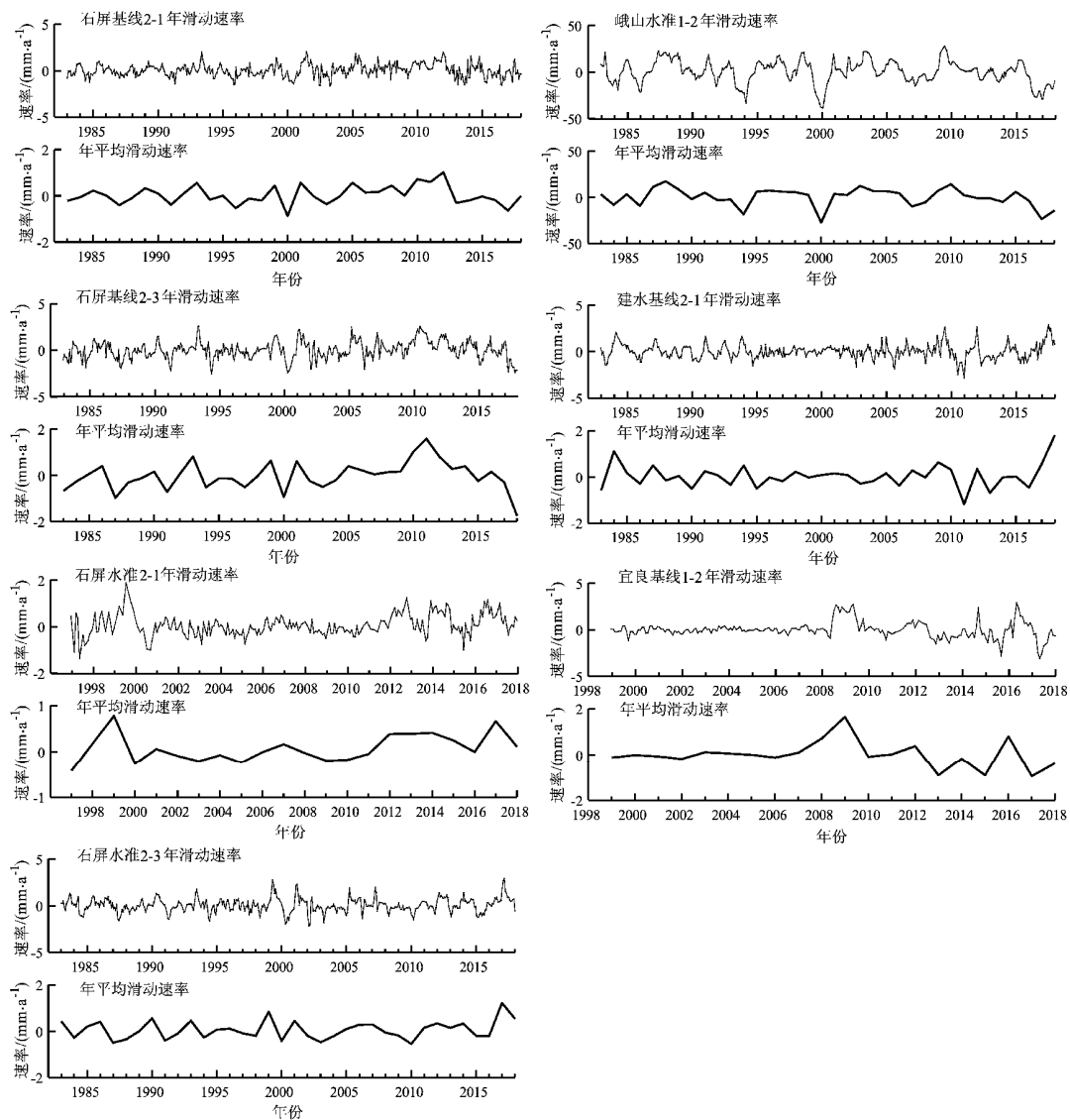


图3 滇东南地区显著跨断层异常场地运动速率

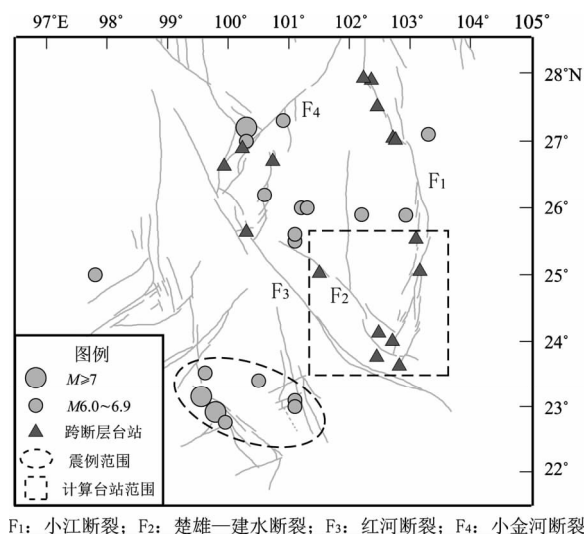
Fig. 3 The fault movement rates of significant across fault sites in Southeast Yunnan

3 滇东南区域断层运动主成分信息合成

跨断层观测数据既包含断层活动的构造信息,又包含季节、气象和地下水资料等非构造的干扰信息,而这些干扰信息往往具有一定的相关性。主成分分析方法(PCA)能将多个具有相关性的指标(对应于多个观测台站数据),分解成几个相互独立的综合指标(信息不重叠,每个主成分可以单独分析),进而通过贡献率加权重组,得到能够反映区域构造运动特征的时间序列,在此基础上更客观地分析其变化和地震的关系。

在使用 PCA 对断层运动数据进行信息合成之前,首先利用同台的水准、基线数据及其与断层的夹角信息计算断层运动三分量,即走滑 ΔS 、张压 ΔP 和垂直升降量 ΔH (张超, 1981)。选取图 4 矩形框中的楚雄、峨山、建水、石屏、通海、寻甸、宜良 7 个台站,分别计算其三维运动分量。图 5 结果显示,整个研究区域的运动具有较好的一致性,以右旋张性运动为主,正断运动显著。

分别将垂直升降、走滑、张压分量代入 PCA 模型,计算了断层运动沿 3 个正交方向上的 PCA 运动合成,其中垂直升降量的 PCA 信息合成结果与云南地区的强震对应结果较好。如图 6 所示,



F1: 小江断裂; F2: 楚雄—建水断裂; F3: 红河断裂; F4: 小金河断裂

图 4 滇东南地区断层运动 PCA 合成台站及震例选取范围

Fig. 4 The station and range of earthquake selection used for PCA in Southeast Yunnan

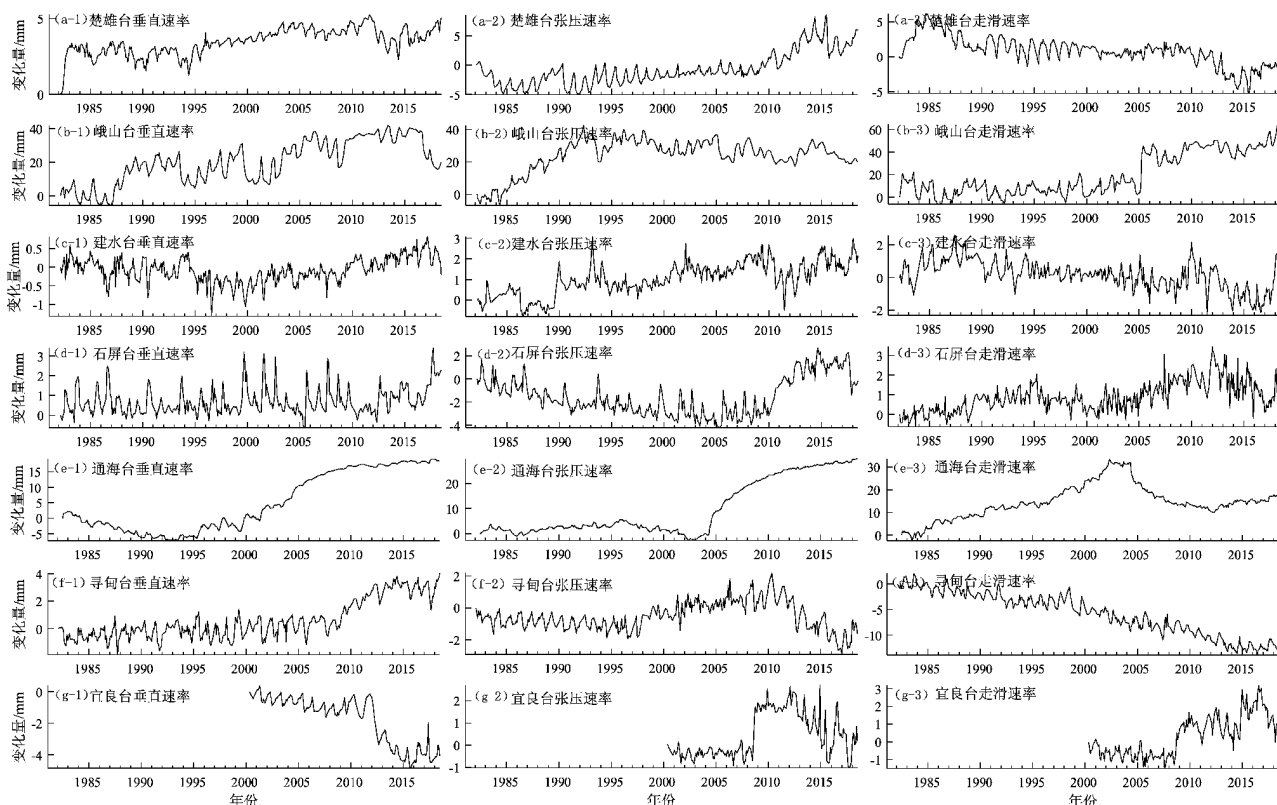


图 5 滇东南地区 7 个场地断层运动分解结果

Fig. 5 The result of fault movement decomposition of seven sites in Southeast Yunnan

2007年6月3日云南宁洱6.4级地震、2014年10月7日云南景谷6.6级地震前，综合指标出现明显的台阶，具体表现为“正断活动加剧—趋于平稳

一发震”的形态演化特征，目前的计算结果显示该类变化不突出，该区域断层正断活动加剧异常正在演化过程中。

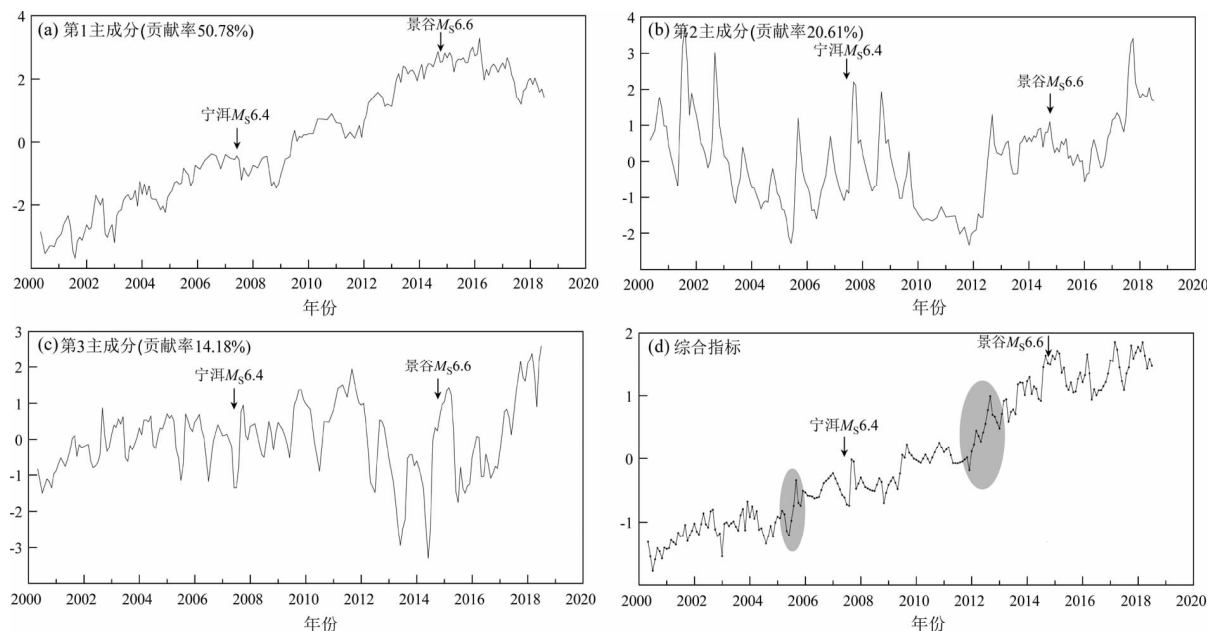


图6 滇东南地区垂向运动 PCA 合成

Fig. 6 The PCA synthesis of vertical movement in Southeastern Yunnan

4 改进断层运动协调比计算结果

张晶等(2011)从系统论的观点出发,推导出能够反应孕震及震后调整阶段断层运动相互协调程度和应变积累状态不同的参数——断层运动协调比,其计算公式如下:

$$f_1 = \frac{\Delta P}{\Delta S}, f_2 = \frac{\Delta H}{\Delta S}, f_3 = \frac{\Delta H}{\Delta P} \quad (2)$$

式中: f_1, f_2, f_3 为断层运动协调比; ΔP 为张压运动分量; ΔS 为走滑运动分量; ΔH 为垂直升降量。当断层处于自由蠕动阶段时, $\Delta S, \Delta P, \Delta H$ 应为稳定值,协调比应为常数;当地壳应力状态发生改变,断层有显著应变积累或断层闭锁时,断层运动参数 $\Delta S, \Delta P, \Delta H$ 发生改变,偏离稳定值,协调比参数将会偏离常数,此时断层活动的协调性较差。从以往的震例研究结果来看,该指标能够及时捕获断层运动的突变信息,具有较好的映震效能。

但是该指标存在2个主要的问题:其一,计算三维运动分量的过程中,由于起点选择的不同,

结果将产生较大差异;其二,协调比比值方向的不同,在分子分母相差较大的情况下,会造成“零值线”附近的异常判读,使得“正反比”的图像差别较大。李瑞莎等(2013)对第一个问题进行了论证和改进,本文针对第二个问题提出了改进方案,在此基础上计算了滇东南各个跨断层场地的断层运动协调比参数。

4.1 改进断层运动协调比计算方法

断层运动协调比是利用断层运动的张压、走滑、垂直升降量两两做比得到的参数,比值的大小反应了断层应变状态的变化,与比值的方向无关。利用式(2)计算得到的3个断层运动协调比得到一个结果,我们把它称为“正算”结果(图7a),并将比值方向倒置计算得到的计算结果称之为“反算”结果(图7b),“正、反算”仅代表了比值的方向,理论上二者的结果应该相同。然而计算结果显示,两种图像在震前的形态差别较大,图7a显示在震前具有显著的“离散化”现象,而图7b显示不显著。这是由于当分子和分母相差较大时,比值的方向对于异常的提取产生较大的影响,零值线附近的离散信息被压制,隐藏在背景变化里,异常信息被“压缩”。

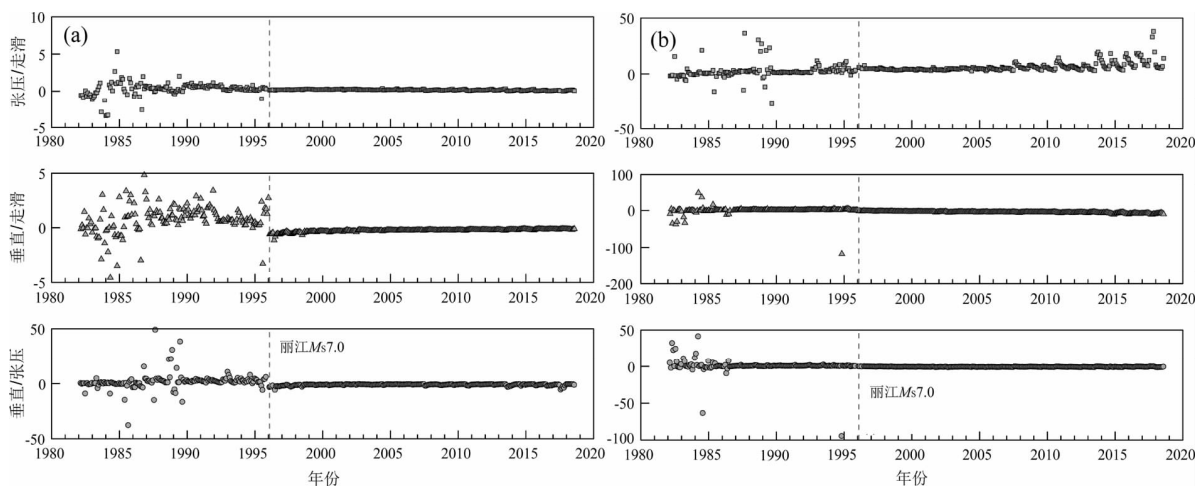


图7 丽江台断层运动协调比正算 (a)、反算 (b) 计算结果

Fig. 7 The results of the forward (a) and reverse calculations (b) of the FCR in Lijiang station

为了避免上述的“比值方向性”问题，我们对计算结果进行“对数变换”，计算公式如下：

$$Y = \lg \Delta[f - (f_0 - 1)] = \lg(f - f_0 + 1) \quad (3)$$

式中： f 为利用原始公式求得的断层运动协调比； f_0 为稳定蠕滑状态下的断层运动协调比。

令 $F = f - f_0 + 1$ ，则

$$\lg(F) = -\lg(1/F) \quad (4)$$

变换完成后的断层运动协调比沿“稳定蠕滑协调比 f_0 ”对称分布，计算结果与比值方向无关，以丽江台为例，试算结果显示（图8）：丽江地震前具有显著的“离散化现象”。

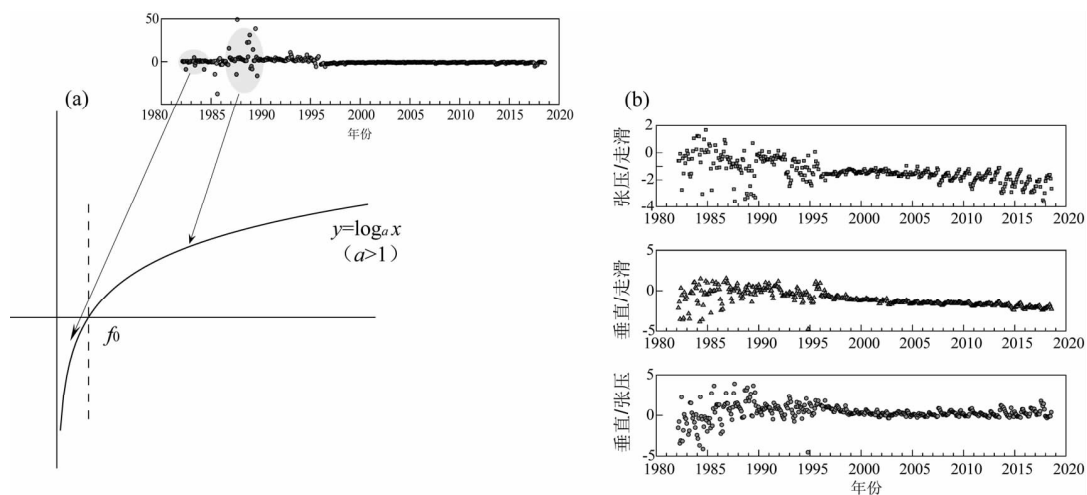


图8 改进断层运动协调比原理 (a) 及丽江台断层活动协调比正算结果 (b)

Fig. 8 The principle of improved FCR (a) and forward calculation of the FCR in Lijiang station (b)

4.2 滇东南地区断层运动协调比异常分析

为了定量评价断层运动协调比的离散化程度及随时间的演化规律，我们定义累积离散度 SD_i （见式（4）），其计算公式如下：

$$SD_i = \sqrt{\frac{1}{i} \sum_{j=1}^i (Y_j - \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i Y_k)^2} \quad (5)$$

式中： Y_j 为式（3）计算得到的 j 时刻的断层运动协调比； SD_i 为 i 时刻的断层运动协调比的累积标准差，当断层运动偏离稳定蠕滑趋于“非协调”变化时，断层运动协调比快速离散化，累积离散度呈现“断差似变化”。

应用上述指标对云南地区的跨断层观测数据进行扫描计算，计算数据截至2018年7月。计

算结果显示, 2018 年 8 月 13, 14 日通海 2 次 5.0 级地震前, 滇东南地区的石屏和宜良台的断层运动协调比近期出现明显的“离散化”异常, 同时累积离散度也出现了显著的“断差”异常 (图 9), 表明该区域断层运动出现非稳态变化,

发震紧迫性增大, 虽然异常过程中发生了 2018 年 8 月 13, 14 日的通海 5.0 级地震, 但从异常的幅度和以往震例来看, 目标地震的震级较小, 强震背景显著, 该区域仍存在发生 6 级以上地震的可能。

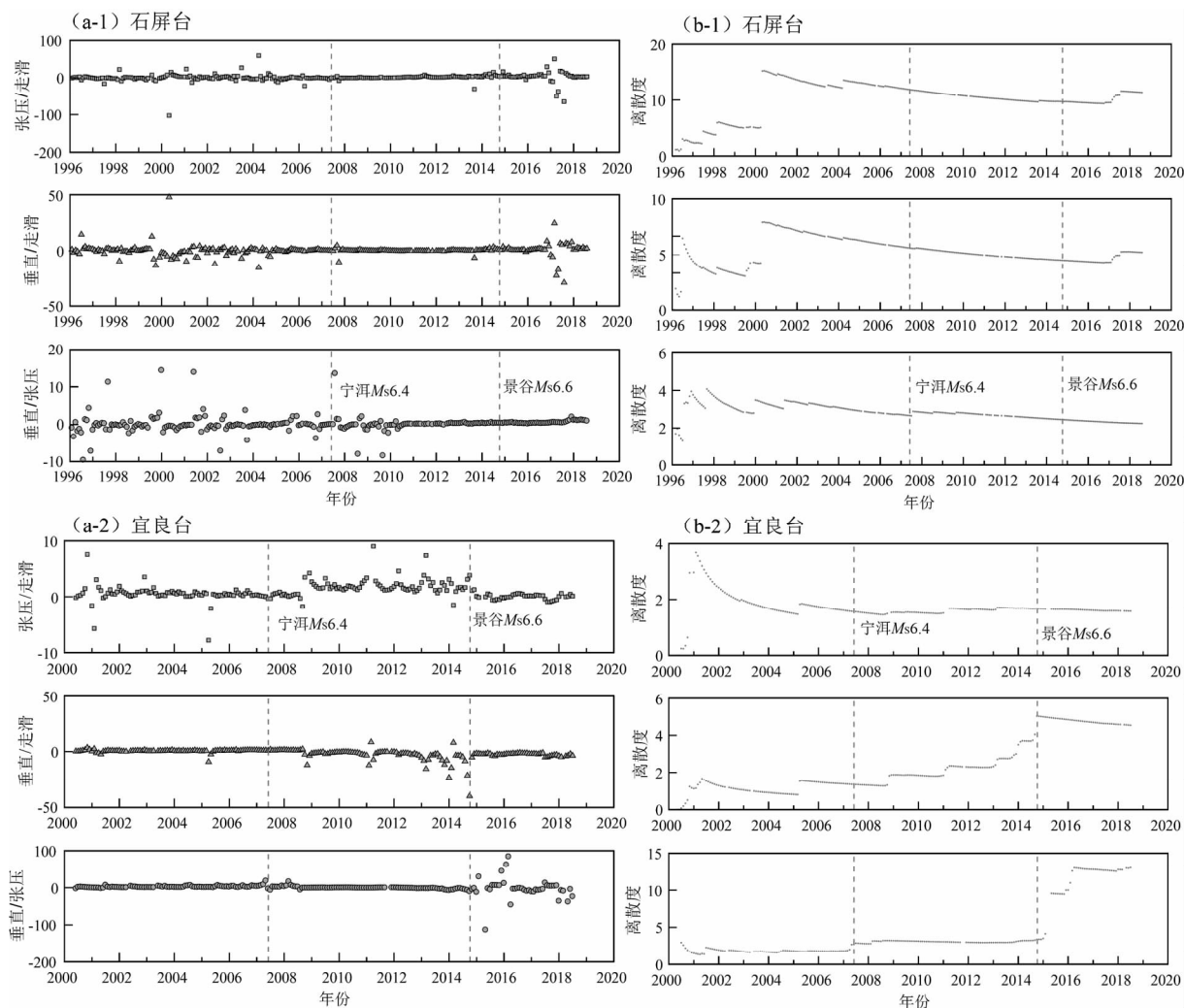


图 9 云南地区改进断层运动协调比 (a) 及累积离散度 (b) 异常

Fig. 9 The anomalies of improved FCR (a) and cumulative dispersion (b) in Yunnan

5 结论与讨论

云南地区的断层活动异常频次计算结果表明, 频次高值与本地及周边强震 ($M \geq 6.5$) 具有较好的对应关系, 近年来该区域断层运动异常显著, 具有较强的强震发震背景。2018 年 8 月 13, 14 日通海 5.0 级地震发生后, 通过对滇东南各个场地的跨断层观测进行三维运动分解、PCA 信息合成, 笔者发现其计算结果与原始曲线变化具有较好一

致性, 均表明该区域自 2012 年以来, 多个场地均出现显著的拉张变化, 区域正断运动背景显著; 在此背景下, 各异常台站的运动速率的不同, 显示出同一构造区内不同断层段的运动差异, 这种运动差异有利于应变积累, 可能对地震具有一定的触发作用。此外, 改进断层运动协调比的计算结果显示, 石屏、宜良台出现了显著的应变状态变化。

2018 年 8 月 13, 14 日通海 5.0 级地震前, 滇东南地区存在多项显著的跨断层观测趋势异常,

短期变化不显著, 尽管震前距离震中较近的石屏台、宜良台出现了显著的断层运动协调比异常变化, 但结合以往震例分析结果表明, 各项异常仍在演化过程中, 且尚未达到以往 6 级以上地震前的异常幅度和持续时间。综上, 滇东南地区的断层运动异常幅度较大、持续时间较长, 2 次通海 5.0 级地震震级较小, 不能完全对应给该区域的多项异常, 滇东南地区的应变积累还在持续, 区域地震危险性仍在增强。

参考文献:

- 薄万举, 谢觉民, 楼关寿. 1997. 非稳态断层形变及其信息合成[J]. 地震学报, 19(2): 181–191.
- 皇甫岗, 陈颢, 秦嘉政, 等. 2010. 云南地震活动性[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 焦青, 周俊萍. 1998. 跨断层位移速率的动态演化特征与强震的关系[J]. 地震, 18(3): 265–273.
- 李腊月, 邢成起, 武安绪, 等. 2014. 用主成分分析方法综合分析首都圈跨断层形变资料[J]. 中国地震, 29(2): 246–255.
- 李腊月. 2013. 北京及邻区现代地壳形变特征及其与地震活动关系的研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.
- 李瑞莎, 张希, 贾晓东, 等. 2013. 断层活动协调比计算方法的改进及震例分析[J]. 中国地震, 29(1): 75–80.
- 李瑞莎, 张希, 王双绪, 等. 2009. 川滇地区断层活动与地震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 29(增刊 1): 20–24.
- 刘强, 陈燕, 王永安. 2010. 云南断层形变强震异常特征[J]. 地震研究, 33(4): 301–307.
- 魏文薪, 江在森, 武艳强, 等. 2012. 利用 GPS 数据研究川滇块体东边界主要断裂带运动特性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 37(9): 1041–1044.
- 张超, 过家元, 谢新生, 等. 1987. 应用短水准短基线测量监测断层现今活动的原理和方法[C]//中国地震局地壳应力研究所. 地壳构造与地壳应力文集(1). 北京: 地震出版社: 54–69.
- 张超. 1981. 跨断层位移测量与局部断层活动[J]. 地震, 1(5): 24–25.
- 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[J]. 地震, 31(3): 19–26.
- 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[J]. 地震研究, 35(4): 500–505.
- 周海涛, 陈兆辉, 朱爽, 等. 2017. 川滇地区部分连续 GPS 测点形变异常分析[J]. 地震研究, 40(1): 94–100.

Analysis of Cross Fault Anomalies in Southeast Yunnan Based on Multi-parameters

YUAN Zhengyi, NIU Anfu, ZHAO Jing, YAN Wei
(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract

On Aug. 13 and 14, 2018, two $M_s 5.0$ earthquakes successively occurred in Tonghai Country, Yunnan Province, which has broken the 504 days of $M_s \geq 5.0$ seismic quiescence. In order to study the strong earthquake background in southeast Yunnan, we calculated anomaly parameters of fault deformation based on the short cross-fault level data in Yunnan, and the results showed that the anomaly frequency is high. Then, the level and baseline data of several sites in southeast Yunnan were analyzed in detail. The annual slip rate, the synthesis of regional principal component information, and the improved coordination ratio parameters of fault movement were calculated. According to the analysis of earthquake examples, the fault movement in the southeast Yunnan is larger in amplitude, longer in duration, and the magnitude of two Tonghai $M_s 5.0$ earthquakes is small, so the danger of a strong earthquake still exists in the study area.

Keywords: southeast Yunnan; anomaly parameter of fault deformation; principal component analysis; fault motion coordination ration; strong earthquake risk