

徐声鑫,王岩,汪志民,等. 云南跨断层场地特征强度指标分析[J]. 华南地震, 2022, 42(2): 17–24. [XU Shengxin, WANG Yan, WANG Zhimin, et al. Characteristic Strength Index Analysis of Cross-fault Site in Yunnan [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(2): 17–24]

## 云南跨断层场地特征强度指标分析

徐声鑫<sup>1</sup>, 王 岩<sup>1</sup>, 汪志民<sup>1</sup>, 黎志军<sup>2</sup>

(1. 云南省地震局, 昆明 65004; 2. 桂林理工大学, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为探索使用跨断层特征强度指标的方法对地震前兆异常进行识别和判定, 利用1982—2019年云南地区5个跨断层场地(楚雄、丽江、永胜、寻甸、建水)的所有观测数据, 通过计算跨断层特征强度指标, 根据不同窗长提取可能的地震前兆异常信息, 并结合历史震例, 探讨云南及周边地区6.5级以上地震与跨断层特征强度指标之间的关系。结果显示: 跨断层特征强度指标在5个跨断层场地的应用中总体是有效的, 能够捕获到云南地区震前异常信息, 可在实际跟踪分析中进行使用。

**关键词:** 特征强度指标; 跨断层; 前兆异常; 云南地区;  $M \geq 6.5$ 地震

中图分类号: P315.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)02-0017-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.02.03

## Characteristic Strength Index Analysis of Cross-fault Site in Yunnan

XU Shengxin<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, WANG Zhimin<sup>1</sup>, LI Zhijun<sup>2</sup>

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China; 2. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to explore the identification and determination of earthquake precursor anomalies by using the method of cross-fault characteristic intensity index, all the observation data of five cross-fault sites (Chuxiong, Lijiang, Yongsheng, Xundian, Jianshui) in Yunnan from 1982 to 2019 are used to calculate the cross-fault characteristic intensity index, and extract possible earthquake precursor anomaly information according to different window lengths. Combined with historical earthquake cases, this paper discusses the relationship between earthquakes with  $M \geq 6.5$  and cross-fault characteristic strength indexes in Yunnan and its surrounding areas. The results show that the cross-fault characteristic strength index is generally effective in the application of 5 cross fault sites, which can capture the abnormal information before earthquakes in Yunnan area and can be used in the actual earthquake tracking analysis.

**Keywords:** Characteristic strength index; Cross fault; Precursor anomaly; Yunnan area; Earthquakes with  $M \geq 6.5$

收稿日期: 2021-10-10

基金项目: 2018年国家重点研发计划综合利用空间观测技术的大地震孕育发生变形时空特征研究课题“中国大陆主要活动构造断裂带的分段运动特征研究”(2018YFC1503604)

作者简介: 徐声鑫(1984-), 男, 工程师, 主要从事GNSS野外观测与数据处理分析工作。

通信作者: 王岩(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事GNSS数据分析研究工作。

E-mail: 278579207@qq.com

## 0 引言

云南地区地处青藏高原东南缘地区,是我国地震活动最为显著的地区之一,该区域活动构造丰富且复杂,虽然有学者对区域变形开展了相关研究<sup>[1]</sup>,但也仅能给出大区域尺度的地壳变形信息,而跨断层测量可精细地测定活动断层的现今运动方式、运动速率以及它们随时间而演变的过程,为断层运动学、地壳动力学、地震研究提供参考。国际上,多年的观测及研究结果表明,跨断层形变观测在地震研究中有着不可替代的作用<sup>[2]</sup>。美国地质调查局70年代在圣安德烈斯断层开展长期的大地测量和地震观测,寻找与震源区地震活动相关的前兆变化<sup>[3]</sup>。美国的圣安德烈斯断层开展了蠕滑事件观

测,并且认为是断层应变释放的一种机制<sup>[4]</sup>。除了蠕滑事件,个别地震前曾记录到断层的加速活动<sup>[5]</sup>,而有些地震前出现断层蠕滑速率的减小,或没有任何前兆性的预滑<sup>[6]</sup>。从更长的时间尺度上看,断层长期滑动的变化模式与区域中强震在时间上有一定的相关性<sup>[7]</sup>。

目前云南共有11个跨断层场地(图1),分别为楚雄场地、下关场地、剑川场地、丽江场地、永胜场地、寻甸场地、宜良场地、峨山场地、通海场地、建水场地、石屏场地,根据各个场地的数据完整性及稳定性,本文主要选取了5个场地进行了自1982年有观测数据以来的数据进行研究,分析提取可能的地震前兆异常信息,为中长期地震预测提供一定的参考<sup>[8]</sup>。

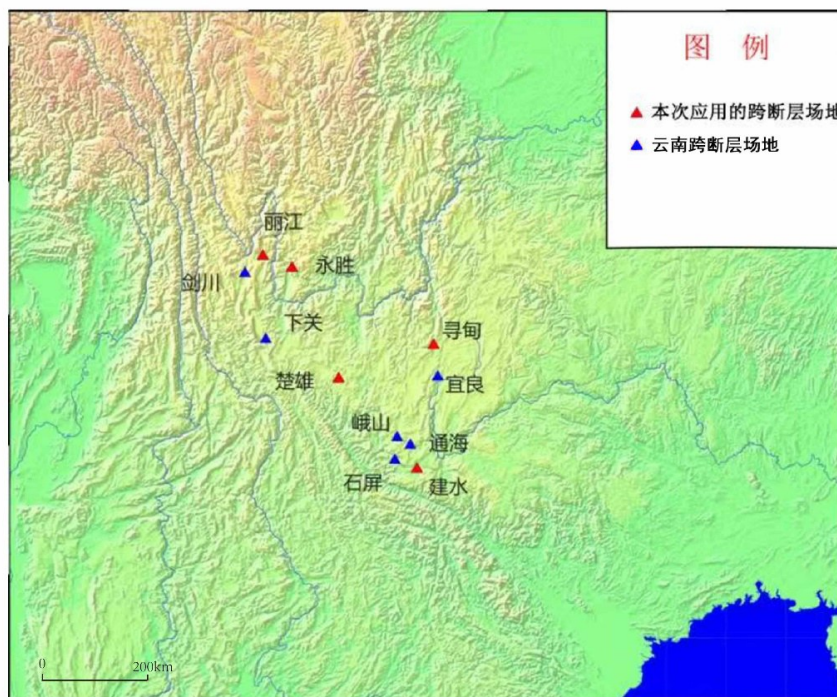


图1 云南地区跨断层场地分布图

Fig.1 Distribution of cross-fault sits in Yunnan area

## 1 断层形变特征强度计算方法

首先,断层形变特征强度指标的提取是建立在统一所有曲线下盘相对上盘变化的前提之下的。设某个断裂段上有 $m$ 个场地,每个场地统一上下盘后跨断层测段观测值序列为 $h_i^k$ ,  $i=1, \dots, n$ ;  $k=1, \dots, m$ ,  $n$ 为总观测期数。则对每个场地,定义其单期观测相对上期观测变化量与平均变化幅度的比

率即

$$S_i^k = \frac{h_i^k - h_{i-1}^k}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |h_i^k - h_{i-1}^k|} \quad (1)$$

无量纲指标,若此场地有不只1条跨断层测段,便可以获得不止1个结果,去掉干扰较大或周期性变化显著的测段,剩下的取均值,计算结果为负则反应逆断变化、为正则反应正断变化。

其次,为反应观测曲线的趋势性(与构造活动背景一致的趋势性变化越明显,可能反映应变积累

的时间尺度越长、或强度越高)和稳定性,计算各

场地趋势因子  $\sigma_k = \frac{|\sum_{i=2}^n (h_i^k - h_{i-1}^k)|}{\sum_{i=2}^n |h_i^k - h_{i-1}^k|}$  和稳定因子

$$\varepsilon_k = \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum_{i=2}^n (|h_i^k - h_{i-1}^k| - \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |h_i^k - h_{i-1}^k|)^2}$$

(即均方差值,其量值越小,稳定性可能越好)。

最后,将  $\frac{\sigma_k}{\varepsilon_k}$  作为每个场地断层形变特征强度指标的

权值,计算该断裂段断层形变特征强度值  $SR_E =$

$$\frac{\sum_{k=1}^m \frac{\sigma_k}{\varepsilon_k} S_i^k}{\sum_{k=1}^m \frac{\sigma_k}{\varepsilon_k}} \quad [9]$$

本文在原有公式上进行了改进,南北带北段的观测周期为三到四个月一期,而云南地区一般为一到两个月一期,由于观测周期短,变化量较小,单期差分信噪比低,容易造成断层活动信息丢失比较严重,因此在上述公式中采用更长尺度窗长的数据进行差分。

## 2 云南跨断层场地地质资料简介

本文共列取了5个跨断层场地,现将5个场地的地质资料背景进行简要分析。

### 2.1 楚雄场地

该场地位于楚雄市西南3 km左右的山梁上,该地1974年已建有一点,1981年原地改建。所建点跨楚雄断裂,断裂走向北30°西,倾向东,倾角58°,东盘浅黄色粉砂岩,西盘为紫红色泥质页岩与砂岩。基岩受挤压强烈,东西两盘中粉砂岩产状55°/45°/65°,页岩产状90°/50°/60°,页岩中折曲发育,岩石层理清楚,挤压面有白色高岭土充填;该场地老点资料一般认为较好,特别是对龙陵震后反映较好,近年来趋势变化和年变化较为有规律。

### 2.2 丽江场地

本场地位于丽江市城北2 km左右的山坡上,为1981年新建点。所跨断层出露于第三系地层(丽江角砾岩)中,断层规模小,与北东走向的丽江断裂横向斜交,走向北10°西,倾向南西,倾角70°左右。

### 2.3 永胜场地

该场地位于永胜县城西北4 km左右的关平村,

所跨断层属程海大断裂,该地断层走向北5°西,倾向西,倾角30°~40°,上盘(西盘)为泥盆纪灰岩,下盘(东盘)为三叠纪页岩。

### 2.4 寻甸场地

该场地点是在原老点位置上改建的,所跨断裂属小江断裂之西支,走向N25°E,倾向南东,倾角73°。南东盘为石灰岩,点位附近灰岩受挤压强烈,节理裂隙发育,北西盘为灰岩受压成粉末和碎角砾石。

### 2.5 建水场地

该场地位置在建水县碗窑村西北2 km左右。断层走向S81°W,倾向南,倾角70°,属压扭性断层,左旋。北盘为石灰岩,灰白色,质地较松、节理发育,节理面被乳白色半透明方解石所充填,从方解石网脉与石灰岩已形成一体说明节理形成较早,近期发育的节理裂隙相对较少,说明断裂近期活动不太激烈。南盘未见到基岩。

## 3 云南跨断层场地特征强度计算分析

本文利用断裂形变特征强度计算方法,对云南11个跨断层场地分别进行计算分析(由于篇幅限制现仅列取5个场地进行说明),其计算策略是针对每个跨断层场地分别计算断层特征强度,并计算分析预测效能指标,设置窗长为半年、一年,主要涉及区域为东经94°~106°,北纬20°~33°(涵盖整个云南及周边部分区域),震级选择6.5级以上,时间跨度为1982—2019年。

### 3.1 半年窗长跨断层场地特征强度计算

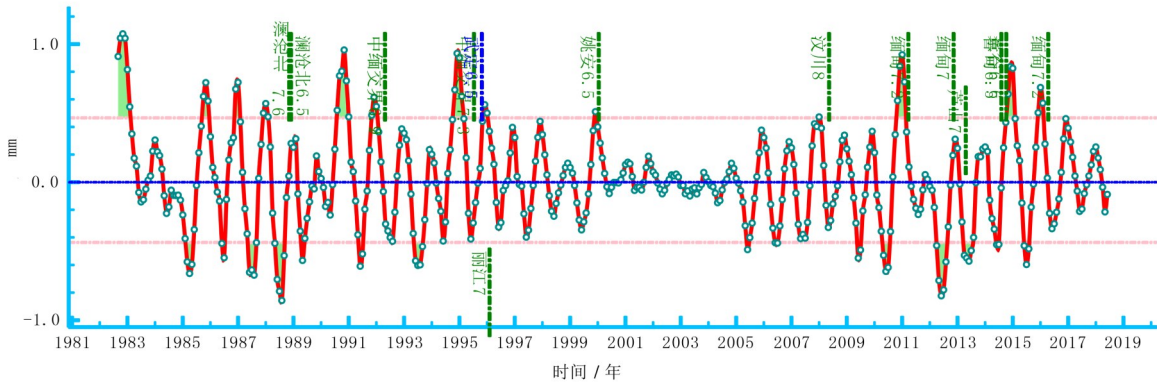
图2为半年窗长的跨断层场地特征强度计算图,表1为半年窗长跨断层场地特征强度R值评分结果。其中,图2a、2b特征强度时序可用于跟踪分析工作中,从预测检验结果看,该指标通过了预报效能评估,且R值评分较高,具有很好的预测意义且在逆断加速和正断加速活动后均可能发生地震,经统计得知正断加速后发生地震的概率更高,且震前断层均表现出了不同程度的断层活动加速特征,从对应地震来看,在芦山7.0、缅甸7.2、丽江7.0中缅交界6.9级地震前均有明显异常<sup>[10]</sup>。

图2c特征强度时序指标通过了R值评分检验,从断层活动特征看,逆断加速和正断加速活动后

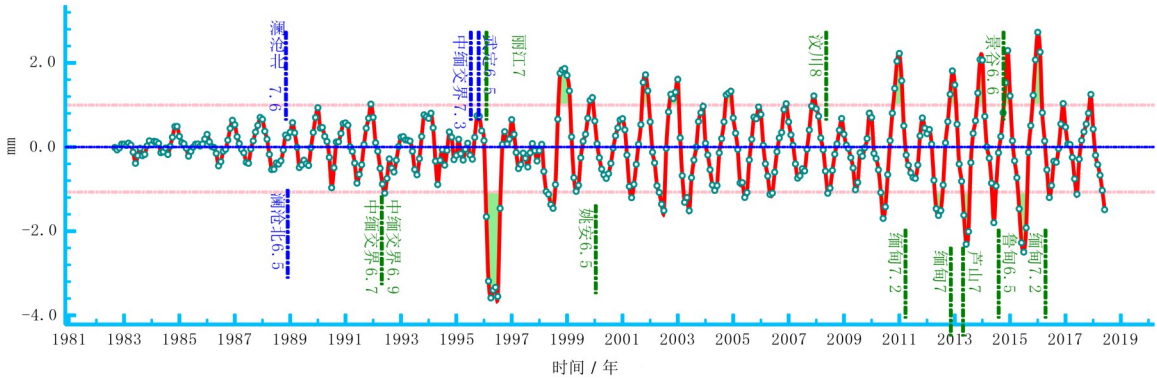


均可能发生地震,另该场地值得注意之处是在量值变化幅度较大后往往会出现强震,云南武定 $M_s6.5$ 地震、云南丽江 $M_s7.0$ 地震、四川汶川 $M_s8.0$ 、缅甸 $7.2M_s$ 地震、云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震均是在场地出现较大变化后在反向时期发生大震,震前断层均表现出了不同程度的断层活动加速特征,具有良好的前兆意义。与此同时,2015年后该断层活动幅度逐渐减弱,与2015年后云南地区地震弱活动现象具有一致性。目前,曲线无较大异常变化。图2d特征强度时序通过了预报效能评估,

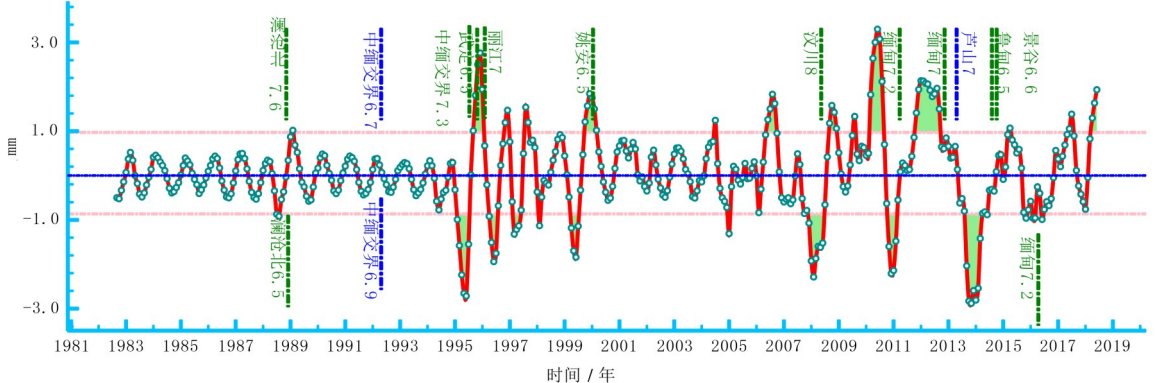
且 $R$ 值评分较高,从断层活动特征看,正断加速活动后发生可能地震的可能性较高,震前断层均表现出了不同程度的断层活动加速特征。从历史地震对应情况看,寻甸场地出现异常较大时均能对应相应的地震,而半年尺度的特征强度看2018年该场地出现了大幅变化,但还未发生较大地震,所以未来需注意发生较大地震的可能性。图2e特征强度时序计算 $R$ 值未通过检验,主要原因是虚报率过高,达到21次<sup>[11]</sup>。



a. 楚雄场地



b. 丽江场地



c. 永胜场地

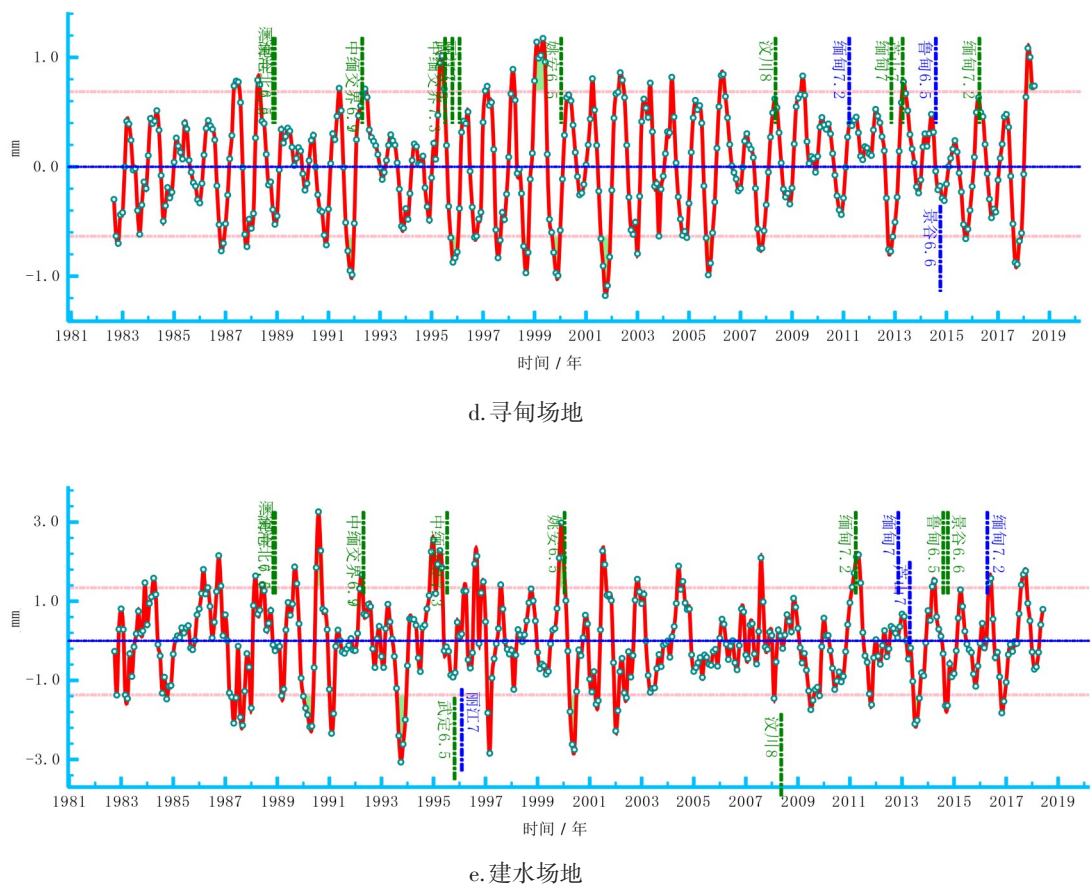


图2 半年窗长跨断层场地特征强度计算图

Fig.2 Calculation diagram of characteristic strength of cross-fault site with half-year window

表1 半年窗长跨断层场地特征强度  $R$  值评分结果

Table 1 Score results of characteristic strength  $R$ -value of cross-fault site with half-year window

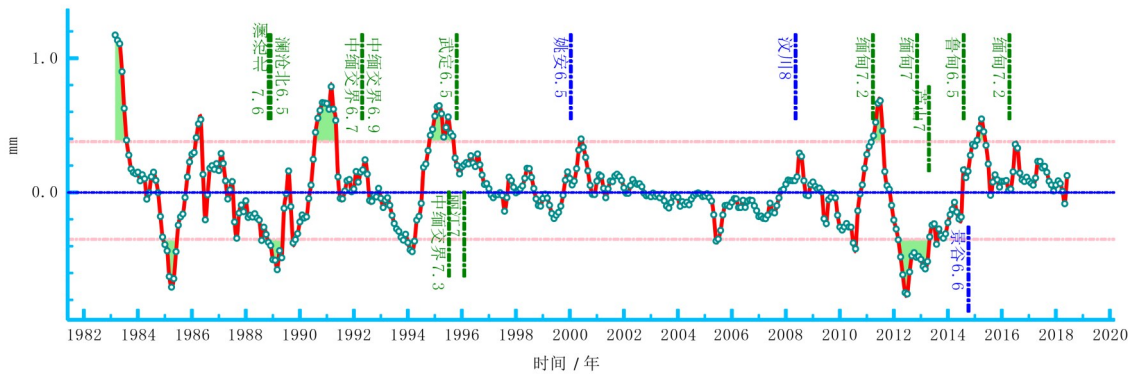
场地名称	$R$ 值	$R_0$	阈值倍率/(%)	准确率/(%)	虚报率/(%)	漏报率/(%)
楚雄	0.52	0.25	1.3	0.54	0.46	0.07
丽江	0.3	0.28	1.2	0.42	0.58	0.27
永胜	0.388	0.28	1.0	0.52	0.48	0.2
寻甸	0.3	0.28	1.4	0.44	0.56	0.2
建水	0.18	0.28	1.3	0.34	0.66	0.27

3.2 一年窗长跨断层场地特征强度计算

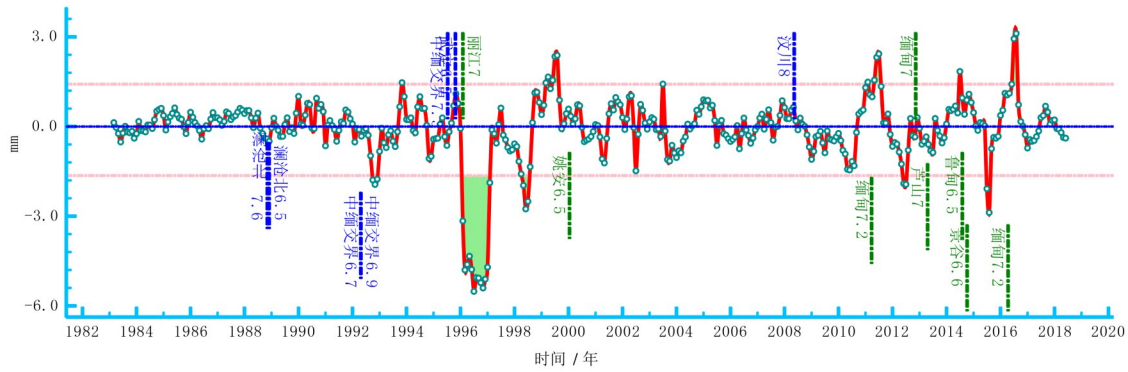
图3为一年窗长的跨断层场地特征强度计算图,表2为一年窗长跨断层场地特征强度  $R$  值评分结果。特征强度时序指标均通过了预报效能评估,在逆断加速和正断加速活动后均可能发生地震,震前断层均表现出了不同程度的断层活动加速特征,与此同时,2015年后该断层的弱活动与2015年后云南地区地震弱活动现象具有一致性。

4 不同尺度窗长指标的对比分析

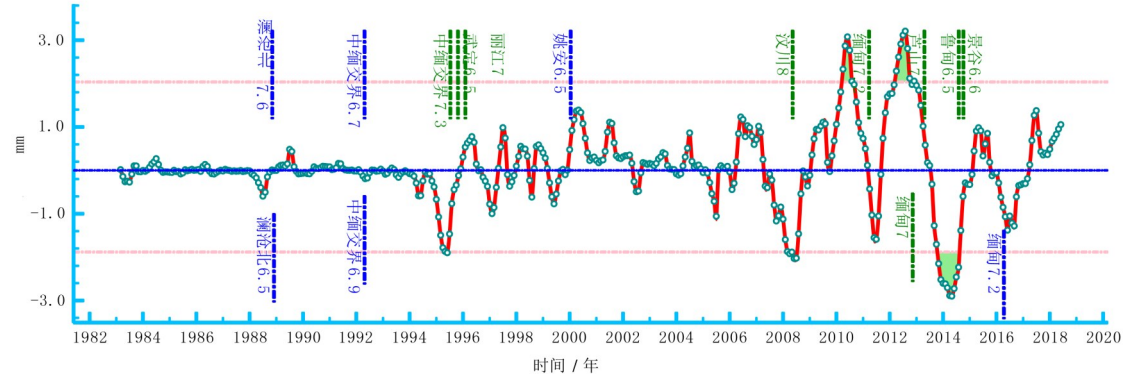
本文主要计算了半年窗长与一年窗长的特征强度指标,由  $R$  值评分表可以看出,一年窗长计算的准确率较高,虚报率低,主要原因是可以消除年度的趋势变化,而半年窗长计算的则无法消除,会出现锯齿性波动。



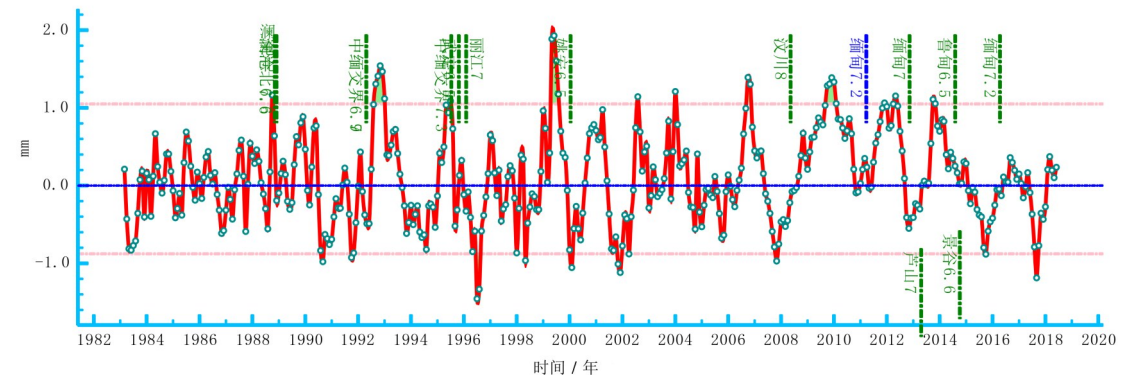
a. 楚雄场地



b. 丽江场地



c. 永胜场地



d. 寻甸场地



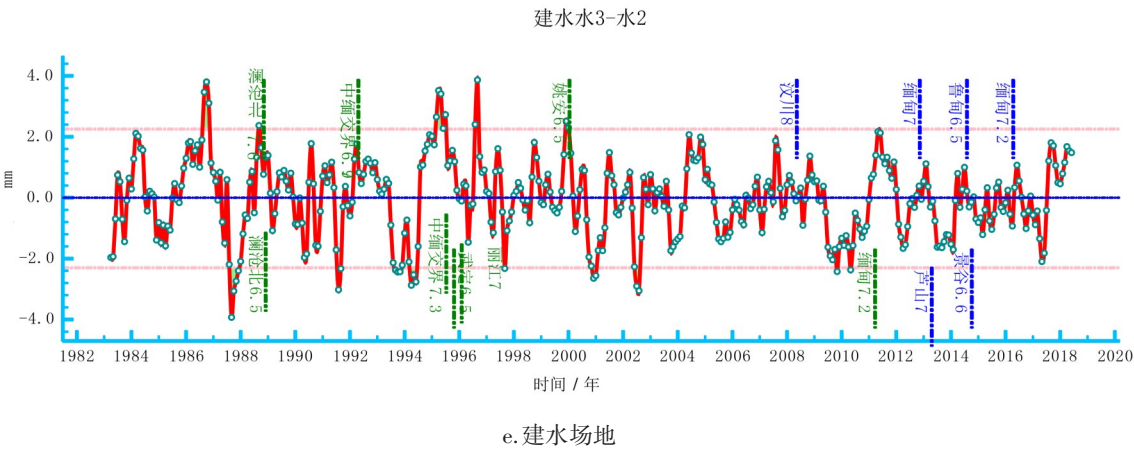


图3 一年窗长跨断层场地特征强度计算图

Fig.3 Calculation diagram of characteristic strength of cross-fault site with one-year window

表2 一年窗长跨断层场地特征强度R值评分结果

Table 2 Score results of characteristic strength R-value of cross-fault site with one-year window

场地名称	R 值	$R_0$	阈值倍率/(%)	准确率/(%)	虚报率/(%)	漏报率/(%)
楚雄	0.33	0.28	1.3	0.67	0.33	0.2
丽江	0.29	0.26	1.4	0.73	0.27	0.47
永胜	0.49	0.27	2.2	1.0	0.0	0.4
寻甸	0.45	0.25	1.7	0.64	0.36	0.06
建水	0.29	0.27	1.8	0.69	0.31	0.4

整体来看半年窗长的特征强度指标漏报率低，而丽江场地则相对较高，主要原因是丽江地震后改变了断层正断加速的特性，也就是地震之后断层处于调整期，所以对漏报率产生了影响<sup>[12]</sup>。

5 结论

本文对5个跨断层场地的特征强度指标进行了资料处理，并分别对半年窗长与一年窗长进行计算，得出了以下结论。

(1)通过对每个跨断层场地计算分析可以看出，楚雄场地、丽江场地、永胜场地、寻甸场地、的半年尺度及一年尺度均通过了R值检验，具有很好的预测意义。而建水场地只通过了一年尺度的特征强度计算，半年尺度的特征强度计算未能通过。

(2)半年尺度和年尺度由于捕获的异常尺度不同，预报效能上存在差异，对于震级较强的地震来说，其异常积累周期较长，地震发生前异常持续时间可能也较长，即可能以趋势异常为主，因

此，在进行强震预测时建议多选取较长尺度的窗长进行预测，当然，半年等尺度的窗长也可以结合使用，以提高预测准确率。

(3)特征强度指标在5个场地的应用中总体是有效的，能够捕获到云南地区震前异常信息，而各个场地独立观测环境不同，即使排除非构造性影响单个场地的异常仍具有随机性，若多个场地均出现异常特性相似则有一定的前兆意义，可在实际跟踪分析中进行使用。

(4)由于本次计算是基于6.5级以上地震进行分析的，下一步可以扩展到5.5级以上地震进行计算，检验特征强度指标在震级略小的情况下的具体反应。

(5)从云南地区跨断层场地分布来看，主要位于滇西北拉张构造体系及小江断裂带与红河断裂带交汇部位；从动力学过程来看，两个区域也是地壳变形大且较为复杂的区域，因此，利用近场的跨断层资料对主要断裂带的运动特征分析，可为捕捉前兆异常，研判区域的强震危险性提供重要的依据<sup>[13]</sup>。

## 参考文献

- [1] 杨国华,王琪,王敏,等. 云南地区现今地壳水平运动与变形特征[J]. 大地测量学与地球动力学,2003,23(2):7-14.
- [2] Abdrakhmatov K, Aldazhanov S, Hager B, et al. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates[J]. Nature, 1996(384): 450-453.
- [3] Shen Z K, Lü J, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. J. Geophys. Res., 2005, 110(B11):409. DOI: 10.1029/2004JB003421.
- [4] McCaffrey, R. DEFNOD Eusers' guide[M]. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 1995.
- [5] 王阎昭,王恩宁,沈正康,等. 基于GPS资料约束反演穿点地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2008,38(5):283-297.
- [6] 方颖,江在森,邵志刚,等. 利用GPS连续资料分析川滇地区的地壳变形特征[J]. 地震研究,2014,37(2):204-209.
- [7] 魏文薪,江在森,武艳强,等. 小江断裂带的运动及应变积累特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2012, 32(2):11-15.
- [8] 张勇,洪敏,崔兴平,等. 小江断裂带近场活动特征分析[J]. 地震研究,2018, 41(3):376-380.
- [9] 张希,薛富平,贾鹏. 甘肃及其边邻地区断层形变特征强度时序变化与强震关系[J]. 国际地震动态,2010,382(10): 43-48.
- [10] 宋剑,杨少敏,王伟,等. 安宁河—则木河—小江断裂带闭锁特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2016,36(6): 490-494.
- [11] 江在森,丁平,王双绪,等. 中国西部大地形变监测与地震预测[M]. 北京:地震出版社,2001:5-6.
- [12] 陆明勇,刘天海,黄宝森,等. 跨断层流动形变监测环境及监测技术探讨[J]. 大地测量与地球动力学, 2011,31(5):141-144.
- [13] 王岩,洪敏,邵德胜,等. 基于GPS资料研究云南地区地壳形变动态特征[J]. 地震研究,2018,41(3):368-374.