

小江断裂带近场活动特征分析*

张勇, 洪敏*, 崔兴平, 郭慧文, 邵德盛

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 采用2009—2018年小江断裂带跨断层近场形变观测资料, 通过应变参数最小二乘法求解该时间段内小江断裂带上不同区段最大剪应变率和面应变率近场结果并进行对比分析。结果显示小江断裂带上的最大剪应变率和面应变率在各区段存在较大差异性, 最大剪应变率变化范围为 $(1.03 \sim 4.10) \times 10^{-6}/a$, 面应变率变化范围为 $(-1.18 \sim 0.33) \times 10^{-6}/a$ 。该断裂呈现出北段强剪切张性、中段弱剪切强挤压、南段强剪切兼挤压活动的分段活动特征, 进一步分析得到该断裂中南段为应变积累区段, 地震危险性高于其他区段。

关键词: 小江断裂带; 应变分析; 近场活动; 分段特征

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)03-0375-06

0 引言

云南地区是我国地震活动最为显著的地区之一, 也是我国地壳运动与形变最为突出的地区之一(王琪等, 1998, 杨国华等, 2003), 其中川滇菱形块体(阚荣举等, 1977)各边界断裂的活动特征在该区域扮演着重要的角色, 其东边界由鲜水河—小江断裂带构成, 而小江断裂带又是川滇菱形块体东南边界主干断裂(宋方敏等, 1998), 它的活动特征是众多学者所关心的问题。许多学者利用GPS远场形变资料对其做了大量研究, 给出了小江断裂带滑动速率等活动特征(王闯昭等, 2008, 施发奇等, 2012, 王伶俐等, 2016, 岳彩亚等, 2017; 贾鹏等, 2018), 近场的活动受观测资料限制, 研究相对较少。

跨断层形变监测是大地形变监测的一种重要方法, 它主要用于监测现代断层活动断裂构造近场的运动特征(江在森等, 2001)。云南跨断层监测项目自20世纪70年代就已经开展, 一直持续至今, 2009年以前, 云南地区的跨断层场地主要以短基线观测为主, 基线长度为24~144 m, 该观测手段有着精度高、观测周期短的优点, 但是, 由于观测基线短, 很多测线无法完全跨越断层破碎带, 给断层活动性的分析带来困难, 随着高精度红外测距的出现, 大幅提高了中短程测距

精度, 建设大型跨断层场地成为可能, 基线距离可达1 km, 在观测精度满足提取形变信息要求(陆明勇等, 2011)的同时, 能够很好地跨越断层破碎带, 在监测断层近场背景性活动特征方面有着显著优势。2009年之后, “云南省人民政府全面加强预防和处置地震灾害能力建设”十项重大措施和地震行业科研专项等项目的实施, 在小江断裂带不同区段上建设了水平形变场地, 加强了对该断层的监测。本文利用该断裂带上形变场地自2009年以来的观测资料, 计算小江断裂带上各形变场地所监视区域的应变信息, 从而较全面地分析该断裂带不同区段应变特征和各区段间的应变差异性, 获取小江断裂带近场区域近年来最新的活动信息。

1 场地分布及资料概况

小江断裂带上共布设有6个水平形变观测场地, 分布于该断裂的不同区段(图1)。每个形变场地都由5个基线观测墩构成, 跨越断层的基线有4~5条, 基线长160~1200 m。观测采用的仪器为瑞士徕卡TCA2003全站仪, 观测方法为上、下午2个光段对向观测, 观测精度满足《DI2002测距仪距离测量技术规定》的相关要求, 即每千米观测中误差相对精度均不低于七十万分之一, 能够满足提取断层形变信息。形变场地概况与资料情况如表1所示。

* 收稿日期: 2018-07-16.

基金项目: 云南省地震局科技专项(2017ZX02)及李建成院士工作站(2015IC015)联合资助。

✉ 通讯作者: 洪敏(1982-), 高级工程师, 主要从事形变数据分析与预测预报研究工作. E-mail: hmqr@qq.com.

表 1 形变场地概况与资料情况

Tab. 1 The general situation of deformation sites and observation data

场地名称	资料时段/年-月	期数	每千米观测中误差 观测精度范围/mm	每千米观测中误差 精度限差/mm	场地监视的断裂区段
樊家坪子	2009-09—2018-06	19	0.16~0.45	±1.42	小江断裂北段的蒙姑—东川段
松茅棚	2009-09—2018-06	19	0.14~0.58	±1.42	小江断裂中北段西支
金源	2009-09—2018-06	19	0.19~0.47	±1.42	小江断裂中北段西支
蒲草塘	2009-09—2018-06	19	0.16~0.54	±1.42	小江中段东支
大革勒	2009-09—2018-06	19	0.19~0.55	±1.42	小江断裂南段
平寨	2010-06—2018-06	17	0.21~0.47	±1.42	小江断裂南段

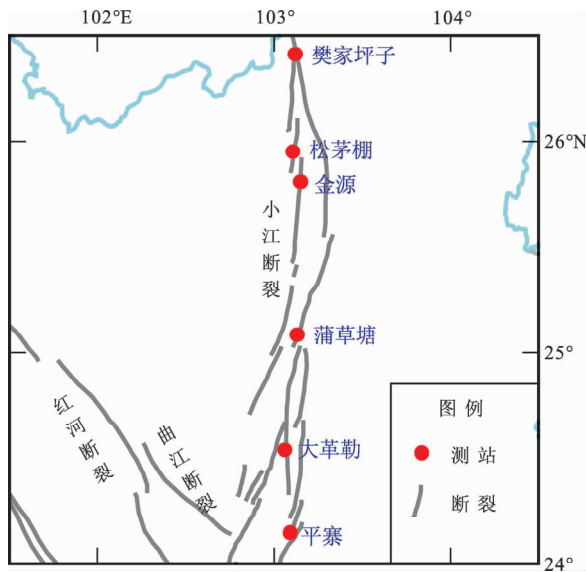


图 1 形变场地分布图

Fig. 1 Distribution of deformation sites

2 断层应变特征分析方法

本文涉及到的数据处理包含原始观测数据预处理和应变场参数计算 2 个方面。首先对 2009—2018 年获得的所有观测数据,按《DI2002 测距仪距离测量技术规范》中外业数据处理方法,步骤为:①气象改正;②加常数及频率偏差改正;③计算 2 标志中心间斜距获取观测标志间的基线距离,基线观测精度如表 1 所示。最后通过对每条基线的时间序列联合解算来获取每个形变场地应变参数的时间序列,具体计算方法如下(黄建平等, 2010; Hong *et al.*, 2018)。

假定断裂带周边在一定宽度的范围内为连续变形,且变形在测网范围内是均匀的,即断裂带周边及断裂带内的应变可以近似为均匀应变场,

那么,在直角坐标系中(Y轴指北),假设X和Y轴方向的应变为 ε_x 、 ε_y ,2个方向上的剪切应变为 γ_{xy} ,那么,任意方向上的线应变可用以下公式计算:

$$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon_x \cos^2 \alpha + \gamma_{xy} \sin \alpha \cos \alpha + \varepsilon_y \sin^2 \alpha \quad (1)$$

式中: ΔL 为基线长度相对于第1个观测时间的变化值; L 为第1个观测时间的基线值; α 为基线的坐标方位角。每条基线通过式(1)联立与其他基线的方程组,通过最小二乘法求解得到其应变状态分量 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} ,进一步可以计算出形变场地的最大剪应变(R_{\max})和面应变(Δ):

$$R_{\max} = [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (3)$$

通过对区域最大剪应变和面应变参数的计算和分析,可获取区域断层剪切活动强弱以及区域内能量积累信息。

3 断层应变特征分析

基于跨断层近场形变观测资料解算获得了2009-09—2018-06小江断裂带上不同区段最大剪应变率和面应变率,对该断裂不同区段的应变进行对比分析,进一步获取该断裂不同区段活动的差异性及近场区域的最新活动特征。

3.1 最大剪应变特征

图2为小江断裂带6个形变场地最大剪应变变化时序图。其中,图2a显示小江断裂北段南端最大剪应变自有观测资料以来一直呈线性累积增强

的变化特征, 累积变化量达到 28.99×10^{-6} , 该区域强剪切变形应主要由小江断裂带的左旋走滑运动引起; 图 2b 反映了小江断裂中北段西支最大剪应变变化具有分段特征, 2009—2013 年表现为弱剪切活动特征, 无显著趋势, 从 2013 年下半年开始, 剪切活动出现逐渐增强的趋势, 整体呈现出一定累积增强的长趋势特征, 但累积变化量不大, 仅有 12.52×10^{-6} ; 图 2c 和 d 表明小江断裂中北段西支与东支 2009—2013 年最大剪应变均呈线性累积增强的变化特征, 中北段西支累积变化量略大于东支中段, 2 个场地在 2014—2015 年曾出现剪

切活动的大幅波动现象, 累积变化时序图的形态具有一定的相似性, 目前总体趋势仍呈现增强特征, 最大剪应变累积变化量金源场地为 14.45×10^{-6} 、蒲草塘场地为 9.02×10^{-6} , 显示小江断裂中段东、西 2 支断裂剪切活动累积变化量相近, 可能表明 2 条分支断裂断层活动速率大致相同; 图 2e 显现出小江断裂南段北端 2009—2012 年的剪切活动较强, 之后表现为弱剪切活动状态, 最大剪应变累积变化量为 10.83×10^{-6} ; 平寨场地最大剪应变自 2010 年下半年开始呈线性累积增强的变化特征, 累积计变化量达到 36×10^{-6} 。

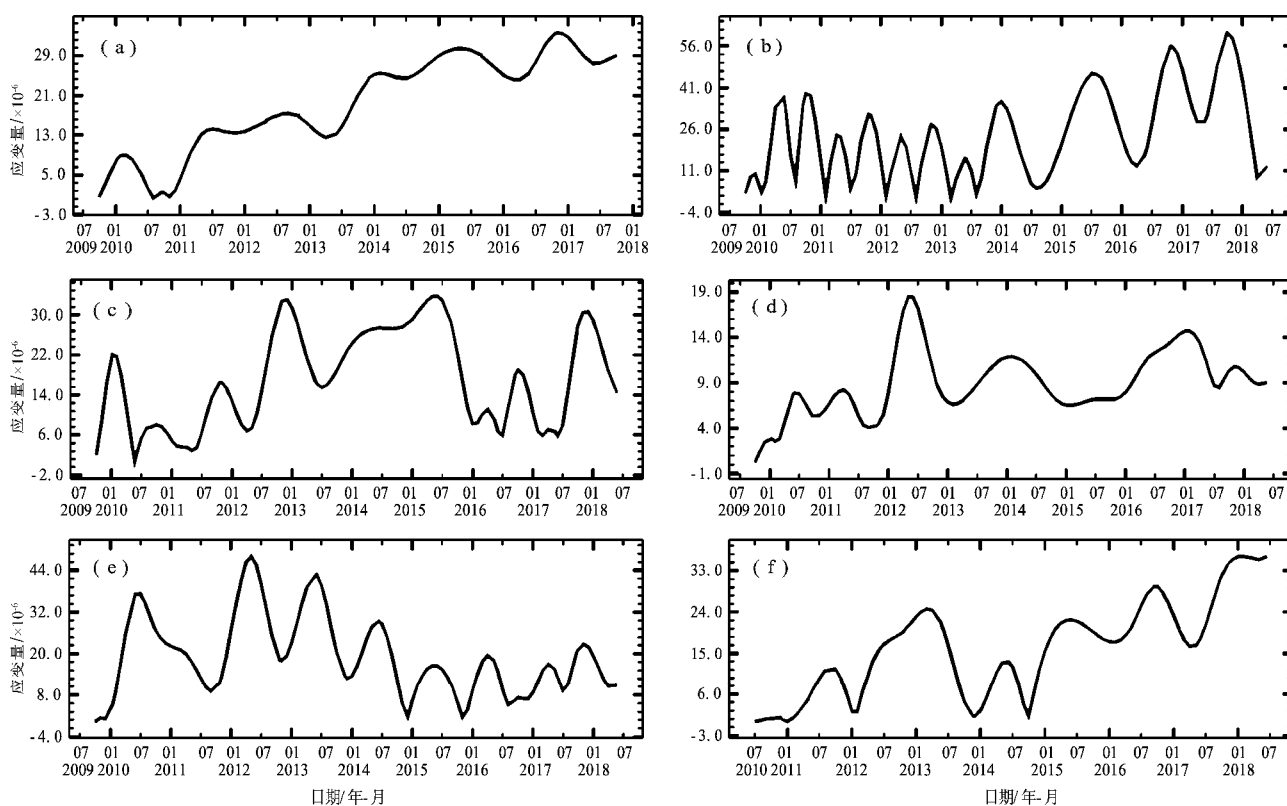


图2 樊家坪子 (a)、松茅棚 (b)、金源 (c)、蒲草塘 (d)、大草勒 (e)、平寨 (f) 形变场地最大剪应变累积变化时序图

Fig. 2 Time series of maximal shear strain of Fanjiapingzi (a), Songmaopeng (b), Jinyuan (c), Pucaotang (d), Dagele (e) and Pingzhai (f) deformed sites

综上所述, 小江断裂带北段和中北段剪切应变表现出一定的累积增强趋势, 中段东支与南段北端最大剪应变累积变化形态具有一定的相似性, 反映出同一断裂不同区段的变化特征具有一定的渐变性和继承性; 从最大剪应变累积变化量可知, 整个小江断裂带南段和北段呈现出较强线性累积剪切活动, 而中段呈现出弱剪切的特征。

3.2 面应变特征

通过对图 3 中各场地面应变累积变化时序图的分析, 获取了小江断裂带各区段挤压—拉张应变积累特征。图 3a 显示北段有持续拉张变化趋势性特征, 累积变化量为 3.14×10^{-6} ; 图 3b 显示小江断裂中北段西支 2009—2018 年面应变累积变化呈有缓慢的趋势性拉张转快速挤压变化特征, 趋势转折主要从 2018 年开始, 但累积变化量值较小,

仅为 -2.18×10^{-6} ; 图 3c 表明小江断裂北段西支总体呈现压性活动特征, 2016—07—2017—07 时段有短期张性活动, 该段累积变化量为 -7.55×10^{-6} ; 图 3d 显示小江断裂中段东支前期表现为张压不明显, 零值线附近波动的特征, 2013 年以后转为趋势性压性增强的变化特征, 累积变化量达

-10.32×10^{-6} ; 图 3e 中零值线反映了小江断裂南段北端 2009—2015 年区域张压不明显, 之后有压性活动增强特征, 累积变化量值为 -3.60×10^{-6} ; 从图 3f 中看出, 小江断裂南段挤压活动呈现“加速拉张—加速挤压—挤压缓慢”的累积变化特征, 累积变化量为 -4.7×10^{-6} 。

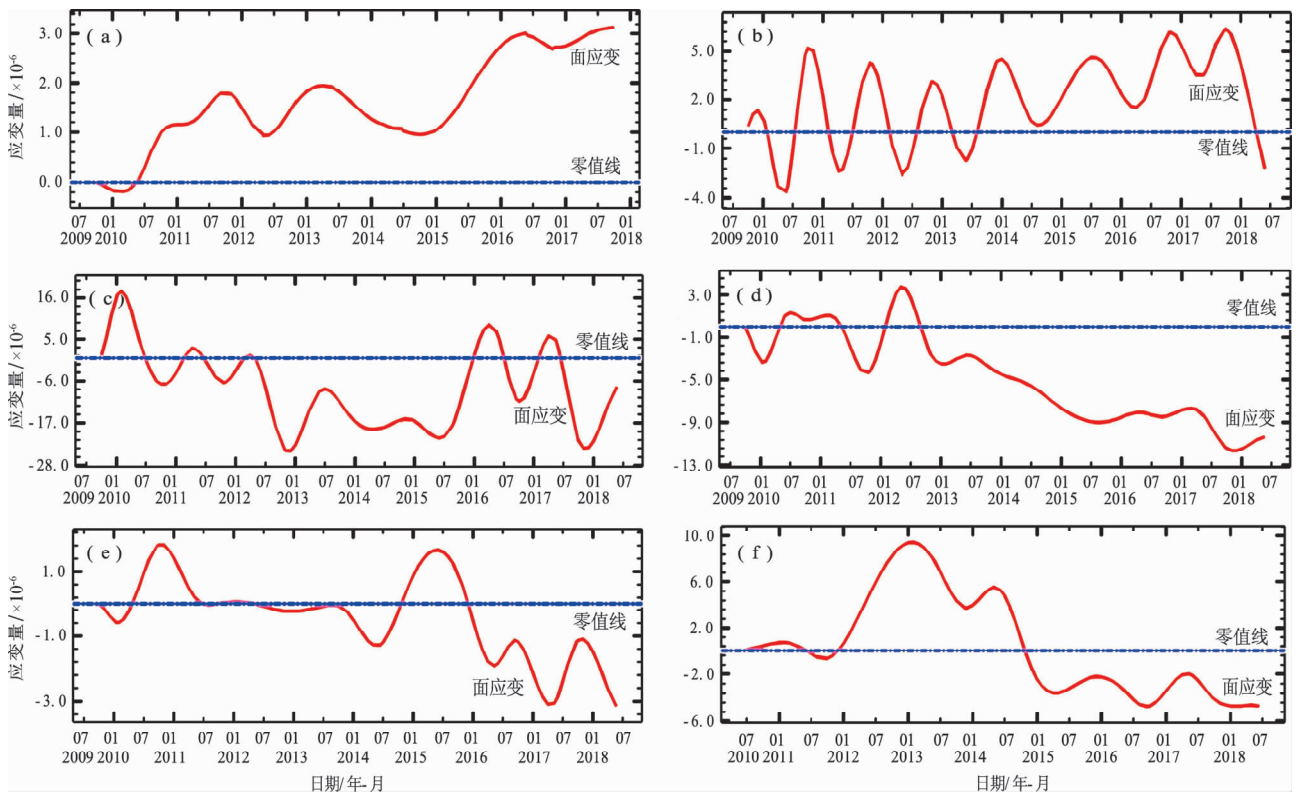


图3 樊家坪子 (a)、松茅棚 (b)、金源 (c)、蒲草塘 (d)、大革勒 (e)、平寨 (f) 形变场地面应变累积变化时序图

Fig. 3 Time series of surface strain of Fanjiapingzi (a), Songmaopeng (b), Jinyuan (c), Pucaotang (d), Dagele (e) and Pingzhai (f) deformation sites

综上所述, 2009—2018 年小江断裂各区段的面应变累积变化特征表现为北段纯张性、中北段弱挤压、中段—南段压性活动特征; 2013 年以后中段压性活动增强较为突出, 且压性活动区域有逐渐向北扩展的趋势, 2017 年中北段也开始出现压性活动增强特征。

3.3 应变率及强度特征

为了更加直观地反映小江断裂带的应变活动特征, 进一步计算了 2009—2018 年不同场地的最大剪应变率和面应变率, 并绘制等值线年速率图 (图 4), 可以更加清晰地认识其活动特征。

最大剪应变率的大小反映了构造活动的强烈程度, 图 4a 为最大剪应变率等值线年速率图, 从

图 4a 中可看出, 小江断裂带各区段的剪切活动速率呈现为北段强剪切过渡为中北段的剪切, 再到中段至南段北端的弱剪切, 最后转为南段的强剪切活动特征, 最大剪应变率变化范围为 $(1.03 \sim 4.10) \times 10^{-6}/a$, 中段及中南段呈现一定的闭锁特征, 特别是中南段的蒲草塘至大革勒一带; 图 4b 面应变年速率反映了该断裂北段为张性活动, 中北段西支压性活动, 再由东支中段至中南段挤压活动特征, 面应变率变化范围为 $(-1.18 \sim 0.33) \times 10^{-6}/a$ 。对比图 4a, b 可以看到, 图中的弱剪切区以北区域呈现挤压增强的趋势特征, 可能表明小江断裂带中南段存在一定闭锁, 导致物质流南向运动受阻, 能量在中段逐步积累。

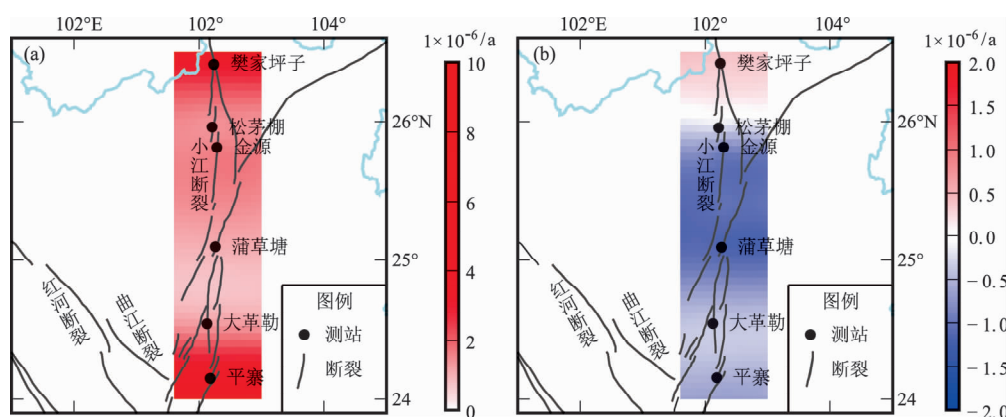


图4 研究区最大剪应变率 (a) 与面应变率 (b) 年速率图

Fig.4 The annual velocity rate maps of maximum shear Strain rate (a) and surface strain rate (b) in this study

4 结论与讨论

本文对小江断裂带上6个近场形变资料进行处理,得到该断裂带不同区段最大剪应变率和面应变率,分析了小江断裂带北、中和南3个区段近场活动特征,得到如下认识:

(1) 小江断裂带上的最大剪应变和面应变累积变化在各区段存在较大差异性,反映出断裂带上的应变积累和释放不同及受力作用的强弱变化。

(2) 通过对小江断裂带上形变场地最大剪应变的分析,发现小江断裂带南段和北段呈现出较强线性累积剪切活动,而中段呈现出弱剪切的的活动特征,同一断裂不同区段差异明显,中段的弱剪切活动值得重点关注。

(3) 从面应变空间分布特征来看,断裂北段为强剪切张性、中段为弱剪切强挤压、南段为强剪切的挤压活动,断裂北段和中段张压活动特征与利用远场GPS方法获得的结果具有一定的一致性(魏文薪等,2012),但是在活动强度上和断裂南段压性活动特征存在一定的差别。

(4) 最大剪应变变化相对较大,而面应变变化相对较弱时,说明断裂的活动相对较强,易于能量释放(郭良迁等,2010),而目前看到的变化正与之相反,最大剪应变率图像显示小江断裂带中段特别是中南段呈现弱活动特征,可能存在闭锁特征,闭锁区可能位于小江断裂带中南段,这与宋剑(2016)和朱爽(2017)利用远场的GPS资料的计算获取断层闭锁区段的结果较一致,同

时该段呈现出弱剪切活动,而其北面为强挤压活动区,因此,该段地震危险性高于其他区段,值得重点关注。

参考文献:

- 郭良迁,薄万举,胡新康.2010.天津地区的水平应变场特征[J].大地测量与地球动力学,30(5):8-14.
- 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——唐山台地形变数据为例[J].地球物理学报,53(5):1118-1126.
- 贾鹏,唐红涛,李瑞莎,等.2018.川滇地区近期断层运动特征分析[J].地震研究,41(1):73-81.
- 江在森,丁平,王双绪,等.2001.中国西部大地形变监测与地震预测[M].北京:地震出版社,5-6.
- 阚荣举,张四昌,晏风桐.1977.我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J].地球物理学报,20(2):96-109.
- 陆明勇,刘天海,黄宝森,等.2011.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,31(5):141-144.
- 施发奇,尤伟,付云文.2012.GPS资料揭示的小江断裂近期运动特征[J].地震研究,35(2):207-212.
- 宋方敏,汪一鹏,俞维贤.1998.中国活断层研究专辑——小江活动断裂带[M].北京:地震出版社.
- 宋剑,杨少敏,王伟,等.2016.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,36(6):490-494.
- 王伶俐,王青华,张勇,等.2016.基于GPS的云南地区主要断裂带现今运动特征分析[J].防灾科技学院学报,18(1):1-8.
- 王琪,赖锡安,游新兆,等.1998.红河断裂的GPS监测与现代构造应力场[J].地壳形变与地震,18(2):49-56.
- 王阎昭,王恩宁,沈正康,等.2008.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:地球科学,38(5):283-297.
- 魏文薪,江在森,武艳强,等.2012.小江断裂带的运动及应变累积特征研究[J].大地测量与地球动力学,32(2):11-15.
- 杨国华,王琪,王敏,等.2003.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, 23(2): 7-14.
- 岳彩亚, 党亚民, 杨强, 等. 2017. 川滇地区次级地块及其主要断裂带现今活动研究[J]. 大地测量与地球动力学, 37(2): 176-181.
- 朱爽, 杨国华, 刘辛中, 等. 2017. 川滇地区近期地壳变形动态特征研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 42(12): 1765-1772.

- Hong M, Shao D S, Wu T F, *et al.* 2018. Short - Impending Earthquake Anomaly Index Extracting of GNSS Continuous Observation Data in Yunnan, Southwestern China [J]. Journal of Earth Science, 29(1): 230-236.

Evaluation of Near Field Activity in Xiaojiang Fault Zone

ZHANG Yong, HONG Min, CUI Xingping, GUO Huiwen, SHAO Desheng
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

The near - field deformation data of the faults from 2009 to 2018 were used to solve the results of maximum shear strain rate and surface strain rate of near - field in different sections in Xiaojiang fault zone by the least squares method of strain parameters. The results show that the maximum shear strain rate and surface strain rate on the belt in Xiaojiang fault are different from each segment. In a whole, the maximum shear strain rate ranges from $1.03 \times 10^{-6}/a$ to $4.10 \times 10^{-6}/a$ as well as the surface strain rate are $(-1.18 \sim 0.33) \times 10^{-6}/a$. The fault exhibits the segmental activity characteristics of the strong shearing ductility in the northern section, weak shearing in the middle section, strong shearing and squeezing activities in the southern section. Further analysis shows that the mid - south section of the fault is a strain accumulation section. The seismic hazard of the segment is higher than that of the other segments.

Keywords: Xiaojiang fault zone; strain analysis; near - field activity; segmentation characteristics