

基于跨断层形变资料的川滇菱形块体西侧主要活动断裂近场活动特征分析*

张勇, 洪敏*, 郭慧文, 金云华

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 利用2010—2017年跨断层近场形变观测资料, 采用最小二乘法求解川滇菱形块体西侧主要活动断裂近场区域的应变参数, 分析各断裂带上最大剪应变、应变率、面应变、面应变率的近场结果。结果显示: ①程海断裂剪切活动北段强于南段, 张压活动在2013年前后出现转折变化, 具有分段特征, 北段由压性转为趋势张性、南段由张压不明显转为压性变化; ②红河断裂剪切活动中段最强、北段次之、南段最弱, 面应变结果显示北、中段长期处于压性活动状态, 南段目前张压活动不明显; ③曲江断裂表现为弱剪切压性累积增强的活动特征; ④石屏—建水断裂显示出弱剪切压性活动特征。综合分析认为研究区断裂活动特征表现为压性增强且剪切活动强或长期处于压性状态下的弱剪切活动的断裂存在应变积累, 因此程海断裂南段、红河断裂北段、曲江、石屏—建水断裂地震危险性值得关注。

关键词: 主要活动断裂; 最小二乘法; 近场活动; 应变分析; 川滇菱形块体

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)01-0057-07

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(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。川滇菱形块体西侧主要活动断裂有程海断裂、红河断裂、曲江断裂、石屏—建水断裂, 程海断裂为川滇菱形块体滇中块体区域内的主要断裂带之一(乔学军等, 2004), 红河断裂和南华—楚雄—通海—建水断裂构成其西—西南边界(邓启东等, 2002; 张培震等, 2003; 皇甫岗等, 2010), 其中建水断裂和曲江断裂被认为是川滇菱形块体东南端部应力释放的重要构造(闻学泽等, 2011; Wang *et al.*, 2014), 许多学者利用GPS远场形变资料对这些断裂的活动特征做了大量研究(张清志等, 2007; 王阎昭等, 2008; 施发奇等, 2012; 王洋等, 2015; 王伶俐等, 2016; 岳彩亚等, 2017; 朱爽等, 2017), 但由于

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, 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始于20世纪70年代, 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, 具有精度高、观测周期短的优点, 但由于观测基线短, 导致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了可能, 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)的条件下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, 云南省人民政府实施“全面加强预防和处置地震灾害能力建设”, 在上述断裂带上建设了水平形变场地, 加强监测。本文利用2010—2017年上述断裂带的形变场地的水平形变观测资料, 计算所监视区域的应变信息, 从而较全面地分析各断裂带的应变

* 收稿日期: 2018-07-26.

基金项目: 云南省地震局科技专项(2017ZX02)和李建成院士工作站(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.

特征及同一断裂带上不同区段的应变差异性, 获取各断裂带近场区域最新的活动信息。

1 场地分布及资料概况

川滇菱形块体西侧主要活动断裂带上共布设有 8 个水平形变观测场地, 其中程海断裂上 2 个, 红河断裂上 4 个, 石屏—建水断裂和曲江断裂上各 1 个, 分布如图 1 所示。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, 基线长度为 300~1 500 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范》相关要求, 即观测误差小于 ± 1.42 mm/km, 相对精度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见表 1。

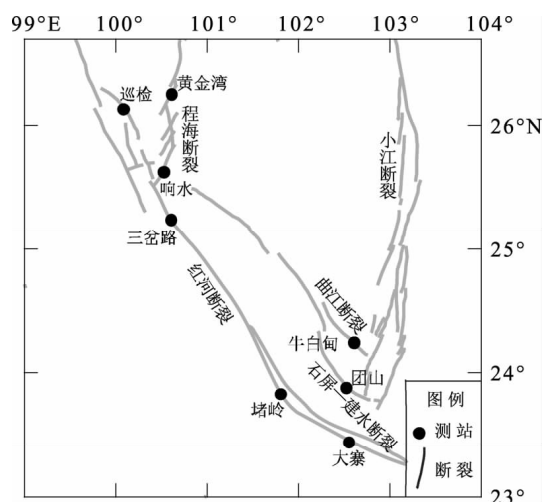


图 1 形变场地分布图

Fig. 1 Distribution of deformation monitoring sites

表 1 形变场地概况与资料情况

Tab. 1 Information of deformation monitoring sites and observation data

场地名称	资料时段	期数	观测精度 范围/mm	场地监视的 断裂
黄金湾	2010—2017 年	13	0.19~0.68	程海断裂北段
响水	2010—2017 年	13	0.19~0.56	程海断裂南段
巡检	2010—2017 年	13	0.17~0.58	红河断裂北段
三岔路	2010—2017 年	13	0.14~0.49	红河断裂中段
堵岭	2010—2016 年	11	0.20~0.58	红河断裂南段
大寨	2010—2017 年	13	0.15~0.50	红河断裂南段
牛白甸	2010—2017 年	13	0.17~0.51	曲江断裂
团山	2010—2017 年	13	0.17~0.47	石屏—建水断裂

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两个方面。首先对 2010—2017 年所有观测数据, 按《DI2002 测距仪距离测量技术规范》中外业数据处理方法进行处理: ①气象改正; ②加常数及频率偏差改正; ③计算两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。再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 (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。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} , 任意方向上的线应变计算公式为:

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

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) 与其他基线联合方程组, 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):

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

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

通过对研究区域内活动断裂上场地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 应变特征分析

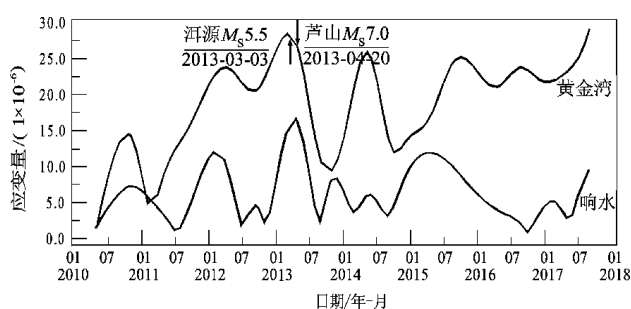
最大剪应变是应变参量中反映综合变形强度的参量, 面应变的正负值反映了局部地区的挤压—拉伸作用的相对大小。本文通过计算 2010—2017 年研究区活动断裂上近场形变资料, 获取内各场地附近区域的最大剪应变和面应变的累积变化时序图和年速率图, 对各断裂带及断裂不同区段的应变进行对

比分析, 进一步获取各断裂及不同区段活动的差异性和近场区域的最新应变活动特征。

3.1 最大剪应变特征

3.1.1 程海断裂

图2a为程海断裂北段黄金湾场地和南段响水场地最大剪应变累积变化时序图。黄金湾场地显示该断裂北段最大剪应变变化具有时间上的分段性, 2010—2013年表现为剪切活动持续增强, 之后减弱。总体上呈现出一定累积增强的长趋势, 累积变化量值为 29.12×10^{-6} 。响水场地反映了该断裂南段在2013年前剪切活动有累积增强的趋势, 但相比北段活动偏弱, 之后表现为弱剪切活动, 2017年开始有增强的现象, 与北段变化同步, 整体上无累积增强的长趋势, 多呈现波动变化特征, 累积变化量仅为 9.31×10^{-6} 。



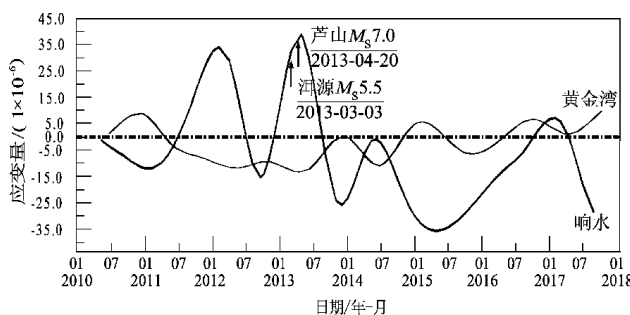
(a) 程海断裂形变场地最大剪应变

3.1.2 红河断裂

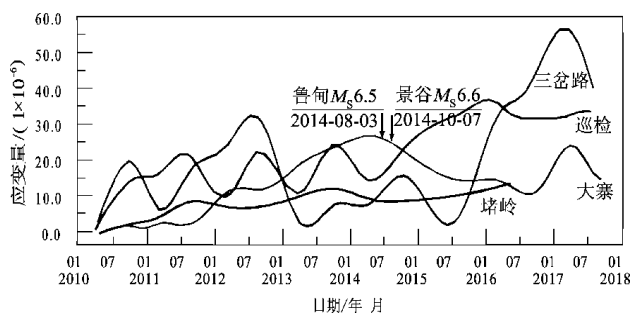
图2c为红河断裂带不同区段(虢顺民等, 2001)上4个形变场地最大剪应变累积变化时序图。巡检场地显示2010—2015年红河断裂北段为弱剪切活动, 之后表现为累积增强, 累积变化量为 33.03×10^{-6} ; 三岔路场地显示红河断裂中段剪切活动强于北段, 累积变化量为 40.06×10^{-6} ; 堵岭和大寨场地反映了红河断裂南段自2010年以来的弱剪切活动, 累积量较小, 分别为 11.34×10^{-6} 和 13.15×10^{-6} ; 大寨场地显示2010—2014年红河断裂南段存在剪切活动持续增强的趋势性, 之后表现为弱剪切活动。

3.1.3 曲江断裂

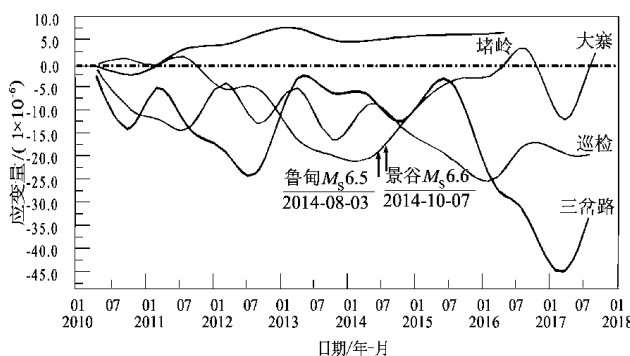
图2e中牛白甸场地最大剪应变累积变化时序图显示2010—2015年曲江断裂为弱剪切活动,



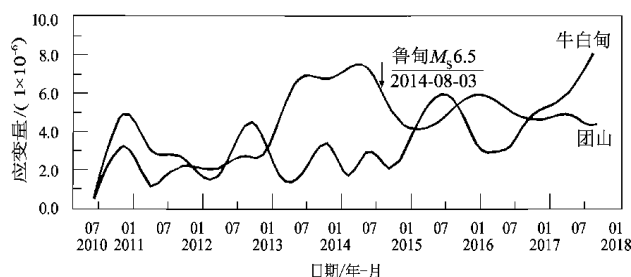
(b) 程海断裂形变场地地面应变



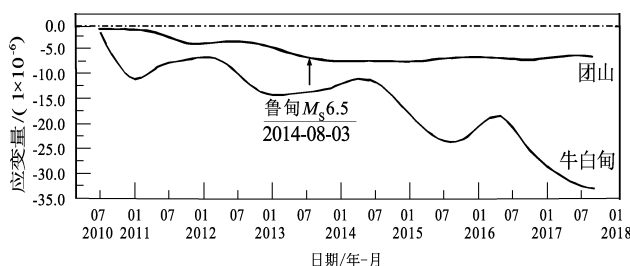
(c) 红河断裂形变场地最大剪应变



(d) 红河断裂形变场地地面应变



(e) 曲江断裂和石屏—建水断裂形变场地最大剪应变



(f) 曲江断裂和石屏—建水断裂形变场地地面应变

图2 形变场地最大剪应变和面应变时序图

Fig. 2 Time series of maximum shear strain and surface strain of deformation monitoring sites

之后虽有一定剪切活动增强,但剪切总体累积量较小,仅为 8.19×10^{-6} 。

3.1.4 石屏—建水断裂

从图 2e 中团山场地最大剪应变累积变化时序图可看出,石屏—建水断裂在 2010—06—2014—07 表现为剪切活动累积增强的趋势性变化,之后转为剪切弱活动,但剪切活动累积量较小,仅有 4.22×10^{-6} 。

综上,程海断裂北段具有长趋势剪切活动增强,南段呈现剪切弱活动现象,2013 年以后南段剪切活动出现显著减弱现象,断裂整体剪切活动不强,量值较小,但是北段最大剪应变累积量大于南段。红河断裂中段剪切活动最强,北段次之,而南段活动最弱,剪切量范围为 $(11.34 \sim 40.60) \times 10^{-6}$,其剪切活动特征与朱爽等(2017)利用 GPS 资料计算结果较一致。自 2015 年以后红河断裂北段剪切活动增强,南段减弱,且断裂南段呈现出剪切累积增强的弱活动状态,反映出红河断裂作为川滇菱形块体的西边界仍然具有一定弱边界的作用,且与张清志等(2006)的 GPS 监测结果也较一致。曲江断裂和石屏—建水断裂整体均呈现弱剪切活动特征。

3.2 面应变特征

3.2.1 程海断裂

通过对图 2b 中形变场地面应变累积变化时序图分析,可获取程海断裂南、北段的挤压—拉张的应变积累特征。黄金湾场地显示 2010—2013 年程海断裂北段为压性累积增强趋势,之后转为趋势性拉张弱活动,累积变化量为 10.15×10^{-6} ;2010—2014 年响水场地反映南段张、压活动不明显,在零值线上下波动,之后为压性活动状态,累积变化量达到 -28.72×10^{-6} 。

3.2.2 红河断裂

通过对图 2d 中各场地面应变累积变化时序图分析,可获取红河断裂带各区段挤压—拉张的应变积累特征。

北段:巡检场地时序图显示自有观测资料以来面应变线一直处于零值线以下,反映红河断裂北段长期压性活动,累积变化量为 -18.54×10^{-6} 。

中段:三岔路场地面应变时序图显示红河中段长期压性活动特征与其北段极为相似,但

不同区段不同近场区域有其自身的变化特点,该场地显示 2010—2016 年监测区域呈弱压性状态,之后转为趋势显著的压性增强变化,累积量为 -32.83×10^{-6} ,压性活动强于北段。

南段:堵岭和大寨两个形变场地显示红河断裂南段近期总体表象为弱张性活动特征,累计变化量值较小,分别为 7.29×10^{-6} 和 2.74×10^{-6} 。2012—2016 年这两个场地均出现了不同幅度的压、张波动现象,且大寨场地表现较为明显,可能与 2014 年云南地区发生的一系列 6 级以上地震之间存在一定关系,特别是 2014 年鲁甸 6.5 级地震。

3.2.3 曲江断裂

图 2f 中牛白甸场地面应变累积变化时序图显示 2010—2017 年曲江断裂处于持续压性增强活动状态,压性变化呈现出线性增强特征,累积变化量值为 -34.41×10^{-6} 。

3.2.4 石屏—建水断裂

图 2f 显示团山场地面应变自有观测资料以来一直处于零值线以下,反映该区域长期压性活动状态,这与方颖等(2014)基于 GPS 连续资料的非线性回归法所获得断裂的面应变结果一致。2010—2014 年表现为线性增强的压性活动,该活动过程与红河断裂南段的活动特征极为相似(图 2d 中大寨场地),之后压性趋势消失,累积变化量为 -5.46×10^{-6} 。

综上所述,2010—2017 年川滇菱形块体西侧主要活动断裂的拉张—挤压变化具有以下特征:程海断裂北段为张性累积增强的变化特征,南段表现为压性活动状态。红河断裂北段和中段整体表现为长期压性趋势活动特征,2015 年后中段出现压性活动明显增强,而整个时段内南段累积变化张压不明显,量值很小,在零值线附近。曲江断裂长期处于压性增强的活动状态,压性变化具有很好的线性增强特征,累积变化量达 -34.41×10^{-6} 。石屏—建水断裂为压性活动特征,2014 年前存在趋势压性变化,此后压性活动减弱,总体来说石屏—建水断裂的压性活动要弱于曲江断裂,挤压应变累积量较小,仅为 -5.46×10^{-6} 。

3.3 应变率及强度特征

为了更加直观地反映川滇菱形块体西侧主要活动断裂的应变活动特征,本文进一步计算不同场地的最大剪应变和面应变的年速率(图 3)。

最大剪应变是应变参量中反映综合变形强度的参量,而应变率是应变变化快慢的表征,反映了构造活动的强烈程度。从图3a可见,程海断裂北段剪切活动呈现出强于南段的特征,最大剪应变率分别为:黄金湾场地附近为 $8.45 \times 10^{-6}/a$,响水场地附近 $3.22 \times 10^{-6}/a$ 。红河断裂剪切活动中段最强,北段次之,南段最弱,最大剪应变率变化范围为 $(3.07 \sim 9.53) \times 10^{-6}/a$;曲江和石屏—建水断裂均表现为弱剪切活动特征,最大剪应变年速率分别为: $2.17 \times 10^{-6}/a$ 和 $1.80 \times 10^{-6}/a$ 。

图3b反映了各断裂带的张、压活动状态,程海断裂北段表现为张性的弱活动,而南段为压性活动,面应变率分别为 $0.36 \times 10^{-6}/a$ 和 $-2.05 \times 10^{-6}/a$ 。红河断裂北、中段为压性,南段累积略显张性的分段活动特征与王阎昭等(2008)利用GPS资料的拟合结果北西段活动特征基本一致;面应变率变化范围为 $(-6.84 \sim 0.92) \times 10^{-6}/a$ 。对比图3a, b可以看到,弱剪切区呈现挤压特征的断裂为曲江断裂和石屏—建水断裂,可能表明川滇菱形块体东南端应力释放受阻,能量在逐步积累。

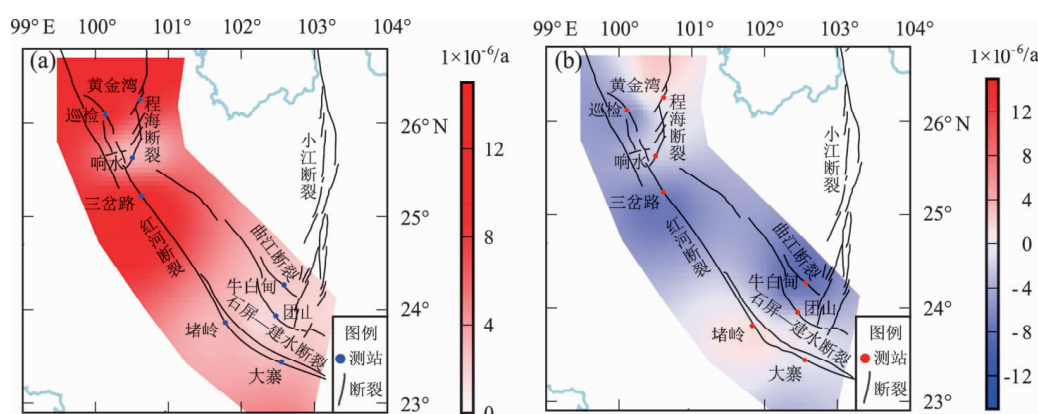


图3 研究区最大剪应变率 (a) 与面应变率 (b) 年速率图

Fig. 3 The annual velocity rate maps of maximum shear strain rate (a) and surface strain rate (b) in the study area

4 结论与讨论

本文对川滇菱形块体西侧主要活动断裂上的8个近场形变资料进行了处理,分析了各断裂带近场活动特征,得到如下结论:

(1) 程海断裂北段呈现强剪切活动特征,张性活动特征与李熠航等(2014)研究结果较一致。2013年前剪切活动较强,且压性活动较为突出,之后剪切活动明显减弱,同时压性活动转为张性趋势。程海断裂北部有丽江—小金河断裂,该断裂进入四川境内后与龙门山断裂相交,2013年该区域发生了芦山7.0级地震,芦山地震发生前,云南滇西北地区曾经发生了洱源5.5级地震,该区域的构造运动可能与芦山7.0级地震存在联系,因此,该转折变化可能与芦山7.0级地震的发生存在一定关系。南段总体呈现弱剪切压性活动特征,2013年前剪切活动也相对较强,之后减弱。

(2) 红河断裂带中段剪切活动强于北段,南段最弱,2015—2016年中段剪切活动和挤压活动均出现明显增强后减弱的现象;2014年以前,南段剪切活动存在累积增强的趋势,其中大寨场地剪切活动累积增强较为突出,且面应变增强也较为明显,该过程可能与2014年鲁甸6.5级地震之间存在一定的关系,2014年以后剪切活动减弱,趋势压性活动也出现转折现象。

(3) 曲江断裂总体表现为强挤压、弱剪切的的活动特征。2015年之后断层剪切活动出现显著增强特征,与红河断裂北段剪切活动增强相呼应。

(4) 石屏—建水断裂呈现弱剪切、弱挤压特征。该断裂在2014年之前呈现剪切、挤压活动趋势增强特征,鲁甸地震后,该特征逐渐消失。

(5) 最大剪应变和面应变高值区具备一定的孕震条件(戴永强等,2004),川滇菱形块体西侧的主要活动断裂中,程海断裂南段、红河断裂北段、曲江断裂和石屏—建水断裂的应变特征,与

之相近,这些区域的地震危险性值得重点关注。

因为地震震中均距离目前观测场地较远,其影响均为地震造成的间接影响,且关系尚不明确,所以本文中只对可能存在的相关性进行了讨论。另外,由于观测周期较长(每年1~2期),扣除同震效应影响较为困难,因此讨论场地近场应变特征过程中未考虑同震效应的影响,这方面的研究工作需要在积累一定的观测数据和地震事件后再进行进一步讨论。由于GPS站点总体偏少,尤其是红河断裂、石屏—建水断裂和曲江断裂区域,有限的站点观测结果不能完全体现断裂整体的应变特征,不能全面反应断裂应变特征,建议未来加大投入尤其是在年度重点危险区中的跨断层监测。

参考文献:

- 戴永强,赵小茂,任隽,等. 2004. 鄂尔多斯块体南缘现今水平应变特征分析[J]. 地震研究,27(1):57-60.
- 邓启东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学,32(12):1020-1030.
- 方颖,江在森,邵志刚,等. 2014. 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,37(2):204-209.
- 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.
- 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.
- 虢顺民,季凤桔,向宏发,等. 2001. 红河活动断裂带[M]. 北京:海洋出版社.
- 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.
- 李熠航,郝明,季灵运,等. 2014. 青藏高原东缘中南部主要活动断裂华东速率及其地震局亏损[J]. 地球物理学报,57(4):1062-1078.
- 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.
- 乔学军,王琪,杜瑞林. 2004. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征[J]. 地球物理学报,47(5):805-811.
- 施发奇,付云文,汪志民. 2012. GNSS基准站基线时间序列反映红河断裂带运动特征研究[J]. 地震研究,35(4):529-534.
- 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.
- 王闯昭,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):283-597.
- 王洋,张波,侯建军,等. 2015. 曲江断裂晚第四纪活动特征及滑动速率分析[J]. 地震地质,37(4):1177-1192.
- 闻学泽,杜方,龙锋,等. 2011. 小江和曲江—石屏两断裂系统的构造动力学与强震序列的关联性[J]. 中国科学:地球科学,41(5):713-724.
- 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.
- 张培震,邓启东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学,33(增刊1):12-20.
- 张清志,刘宇平,陈志梁,等. 2006. 红河断裂的GPS监测[J]. 地球学报,27(4):367-372.
- 张清志,刘宇平,陈智梁,等. 2007. 红河断裂带的GPS观测数据反演[J]. 地球物理学进展,22(2):418-421.
- 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.
- Wang Y, Zhang B, Hou J J, et al. 2014. Structure and tectonic geomorphology of the Qujiang Fault at the intersection of the Ailao Shan-Red River Fault and the xianshuihe-Xiaojiang fault system, China[J]. Tectonophysics, 634:156-170.

Analysis of Near Field Activities of the Major Active Faults at the West Side of the Sichuan-Yunnan Rhombic Block Based on Cross-faults Deformation Data

ZHANG Yong, HONG Min, GUO Huiwen, JIN Yunhua
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Making use of observation data of cross-fault near-field deformation monitoring from 2010 to 2017 at the west side of Sichuan-Yunnan rhombic block, we use the least square method to solve and analyze the near field parameters such as the maximum shear strain and the shear strain rate, the surface strain and the surface strain rate. The results show that: ① Shearing activity of the northern section of the Chenghai fault is stronger than that of the southern section, and tension-squeezing activity has a segmental characteristics before and after 2013. The north section of the Chenghai fault changes from compressive activity to tensional activity, and the southern segment changed from weak activity to compressive activity. ② The shearing activity of the Honghe fault is the strongest in the middle part, with the northern part weaker, and the southern part is the weakest. The surface strain results show that the northern and middle segments is compressive for a long time, while the current tension-squeezing of southern segment is not obvious. ③ The active characteristics of the Qujiang fault appears weak shear and cumulative accumulation pressure. ④ The active characteristics shows weak shear and pressure in the Shiping-Jianshui fault. In summary, it is considered that the fault activity is characterized by the existence of strain accumulation in the faults with enhanced pressure and strong shear activity and weak shear activity under long-term compressive state. Therefore, the seismic hazard is worthy of attention in faults of the southern section of the Chenghai fault, the northern section of the Honghe fault, the Qujiang fault and Shiping-Jianshui.

Keywords: main active faults; least square method; near-field activity; strain analysis; Sichuan-Yunnan rhombic block