

李腊月,尹海权,马伶俐,等.2023.丽江与芦山两次 $M_s7.0$ 地震震例回溯研究及亚失稳特征探讨[J].地震研究,46(4):461–472,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2023.0061.

Li L Y, Yin H Q, Ma L L, et al. 2023. A retrospective study of two  $M_s7.0$  earthquakes in Lijiang and Lushan and discussions on the characteristics of meta-instability[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(4):461–472, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2023.0061.

## 丽江与芦山两次 $M_s7.0$ 地震震例回溯研究及亚失稳特征探讨\*

李腊月<sup>1</sup>, 尹海权<sup>1</sup>, 马伶俐<sup>2</sup>, 李智蓉<sup>3</sup>, 张超<sup>1</sup>

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 2. 四川省地震局地壳形变观测中心, 四川 雅安 625000;  
3. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 基于川滇地区的跨断层观测资料, 采用多种形变分析方法, 针对川滇地区监测状况较好的1996年丽江、2013年芦山两次 $M_s7.0$ 地震开展震例回溯研究, 并以亚失稳理论及实验室结果为指导, 归纳总结跨断层观测获得的断层运动在亚失稳阶段的时空变化特征及可能的表现形式, 寻找区域范围内断层运动协同化现象, 探索地震进入亚失稳状态的跨断层识别标志。结果表明: 两次地震前, 震源区在震前数年主要表现为弱变形的状态, 可能是孕震晚期发震断层闭锁、断层近场应力应变积累趋于极限的表现。震源区边缘附近300 km范围内在震前数月至3年出现显著的断层形变异常, 断层活动具有协同化现象, 但仅个别跨断层场地观测到了与实验室岩石破裂失稳过程类似的图像, 大多数场地仅仅观测到了稳态(线性阶段)、亚稳态(偏离线性阶段)特征, 亚失稳态特征并不清晰, 分析可能与跨断层场地所处的构造位置及观测周期有一定关系。

**关键词:** 丽江 $M_s7.0$ 地震; 芦山 $M_s7.0$ 地震; 跨断层观测; 震例回溯; 亚失稳特征; 川滇地区

**中图分类号:** P315.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000–0666(2023)04–0461–12  
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2023.0061

## 0 引言

寻找地震前兆一直是国内外地震预报的重点和难点。在目前地震成因及孕育过程尚不完全清楚的情况下, 在实验室开展岩石变形实验, 观测相关物理量的演化特征和规律, 是地震前兆探索中的重要基础工作, 可为野外地震研究提供指导和思路。自2012年马瑾院士首次提出亚失稳概念以来, 亚失稳的力学机理及其与之相关的物理场演化特征, 如温度场、断层位移场、应变场等受到学者们的广泛关注(马瑾等, 2012; 任雅琼等, 2013; 卓燕群等, 2013; 刘远征等, 2014; 宋春燕等, 2018; 杨海明等, 2020)。近年来, 一些学者

还尝试将实验室观测的亚失稳信息应用到野外的实际震例中, 如刘冠中和马瑾(2012)通过对鲜水河断裂带北西段跨断层蠕变场地的研究, 发现鲜水河断裂带在1997年玛尼地震前一年出现断层活动“协同化”现象, 与构造物理实验中观测到的亚失稳阶段断层不同部位的协同化现象十分类似, 因此, 推断该现象与地震的孕育有关; 张淑亮等(2016, 2021)通过系统的震例总结, 发现2010年1月24日河津 $M_s4.8$ 地震前, 临汾地震台宽频倾斜仪、侯马地震台水管倾斜EW分量、洞体应变等多种地球物理场观测记录到了与亚失稳岩石破裂实验类似的现象; 张希等(2020a)通过震例回溯研究发现2013年岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震前西秦岭构造区的跨断层短水准异常特征符合构造

\* 收稿日期: 2022–12–08.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC150330506); 中国地震局震情跟踪课题(2020010223, 2022010209)。

第一作者简介: 李腊月(1986–), 高级工程师, 主要从事地壳形变、活动构造与地震预测研究。

E-mail: lilayue@126.com.

力学实验的亚稳态 - 亚失稳态特征; 黄雅等 (2021) 通过综合分析滇西北地区的亚失稳密集台阵, 发现 2021 年漾濞  $M_s 6.4$  地震前地震活动特征呈现了较为明显的断层亚失稳演化过程; 郭树松等 (2021) 利用 1996—2007 年龙门山断裂带上的重力观测资料, 分析汶川地震前亚失稳阶段的重力场变化特征, 发现地震前沿龙门山断裂带的时变重力场变化较好地对应了岩石变形实验中由稳态加载阶段到失稳阶段中的线性、偏离线性、亚失稳态的过程; 陈顺云等 (2021) 研究了 2020 年伽师  $M_s 6.4$  地震前后的基岩温度变化, 发现临近地震时, 基岩温度呈现明显的加速上升变化, 这种临震前的加速特征可能与地震亚失稳或成核过程有关。综上所述, 目前将实验室结果应用于野外实际震例已取得一些成果, 但仍处于初期的探索阶段, 还需要进一步寻找野外断层黏滑失稳过程中其它物理量的变化特点和响应特征, 识别与亚失稳态相关联的一些前兆现象, 为野外亚失稳现象的判定识别提供更多的参考依据。

跨断层形变测量是监测断层活动最直接、最有效的方法之一 (薄万举等, 1994; 焦青, 周俊萍, 1998)。自 20 世纪 60 年代跨断层测量工作开展以来, 跨断层形变测量在寻找地震前兆信息、研究强震孕震机理、强震预测预报工作中做出了重要贡献 (江在森等, 1998; 王双绪等, 2001; 苏琴等, 2014; 李玉江等, 2017)。川滇地区是我国强震多发区和重点监视区, 拥有丰富的跨断层测量资料。因此, 本文基于多种形变分析方法, 选取川滇地区监测状况较好、发震构造研究程度较高的 1996 年丽江、2013 年芦山两次  $M_s 7.0$  地震

开展震例回溯研究, 总结跨断层形变观测在断层黏滑失稳过程中的表现形式和响应特征, 通过与实验室亚失稳状态特征的对比分析, 识别与亚失稳态相关联的一些跨断层观测前兆现象, 为野外识别断层亚失稳状态提供参考。

## 1 实验室观测到的亚失稳过程

双轴压力下岩石变形过程的差应力 - 时间变化曲线 (马瑾等, 2012; 马瑾, 郭彦双, 2014) 如图 1a 所示, 变形过程可以分为稳态、亚稳态、亚失稳态和失稳态 4 种状态, 并分别对应断层失稳过程的 4 个阶段, 线性变形阶段 (L - M)、偏离线性阶段 (M - O)、亚失稳阶段 (OAB) 和失稳阶段 (BC), 其中 N - O 为强偏离线性阶段。变形后期阶段的放大图 (图 1b) 显示, O 时刻是应力峰值点, 在 O 时刻差应力由上升转为下降。OAB 是亚失稳阶段, OA 是准静态释放阶段, 称之为“亚失稳阶段 I”, AB 是准动态释放阶段, 称之为“亚失稳阶段 II”; A 时刻之后, 下降速率迅速增加, B 时刻后进入失稳阶段。M 时刻是加载曲线开始偏离线性的位置, 在 M - O 时刻之间应力发生过几次下降, 最大的下降开始于 N 时刻, M - O 偏离线性阶段持续时间稍长于强偏离线性阶段, 应力下降低点在强偏离线性阶段。

目前, 实验室已经可以识别亚失稳阶段并获得了亚失稳阶段不同物理场的演化特征, 为野外识别亚失稳阶段打下了基础 (马瑾等, 2012; 任雅琼等, 2013; 卓燕群等, 2013)。本文研究的思路是对比实验室亚失稳阶段应力 - 应变观测结果,

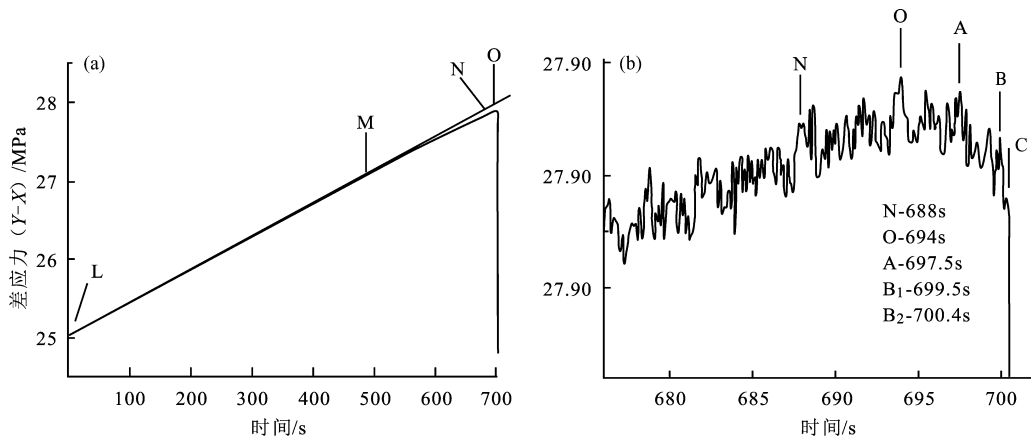


图 1 差应力 - 时间过程 (a) 与变形后期阶段的放大图 (b) (据马瑾, 郭彦双, 2014)

Fig. 1 Differential stress versus time (a) and enlarged meta-instable stage (b) (according to Ma and Guo, 2014)

探索野外大震前断层活动是否有类似现象，首先寻找实际观测中的“偏离线性阶段”和“强偏离线性阶段”，然后进一步寻找亚失稳阶段；同时寻找断层运动的协同化过程，分析单个场地的变形特征以及区域多个场地的群体性变形特征，进而分析整个区域变形场的时空演化特征。

## 2 地震前跨断层观测的亚失稳特征

### 2.1 1996年2月3日丽江 $M_s7.0$ 地震

1996年丽江  $M_s7.0$  地震（震中  $27.08^\circ\text{N}$ ,  $100.27^\circ\text{E}$ ）是过去40年内发生在川滇菱形块体西边界震级最大的一次正断型地震事件，宏观震中位于丽江市城北约25 km的玉龙雪山东麓黑水附近（周光全等，1997；苏有锦，刘祖荫，1997）。震源参数反演、野外地质考察等结果均表明丽江地震的发震断层为东倾的丽江—大具断裂（韩竹军等，2004；Ji *et al.*, 2017）。丽江地震前，震中周边300 km范围内共有11个跨断层观测场地，起始观测日期为1982年，观测周期为每年12期和6期。跨断层场地分布如图2所示。

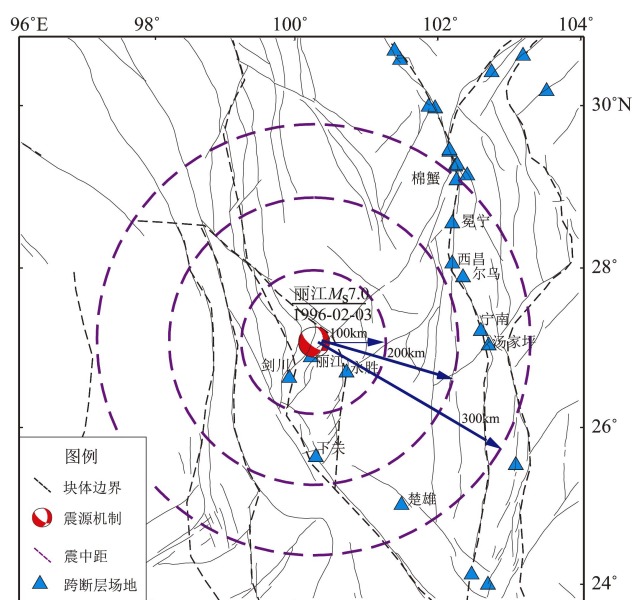


图2 丽江  $M_s7.0$  地震震中周边跨断层场地分布

Fig. 2 Distribution of cross-fault sites around the epicenter of the Lijiang  $M_s7.0$  earthquake

#### 2.1.1 原始观测曲线形态异常特征

某一时段内在区域构造应力场作用下，断层活动往往表现出一定的规律性，断层以近于恒定

的速率和方式运动，跨断层观测曲线往往表现出准线性的趋势性特征；当区域构造应力场或断层附近的局部应力场发生变化，断层活动会偏离原有的背景运动方式，跨断层观测曲线表现出偏离准线性的非线性变化，如加速、转折、突跳及形态、幅度的明显改变等（江在森等，1998；车兆宏，范燕，1999；张希等，2020b）。

根据亚失稳理论及实验结果，笔者发现丽江  $M_s7.0$  地震前震中距300 km范围内下关、剑川、永胜等大多数跨断层场地表现出了稳态（线性阶段）、亚稳态（偏离线性阶段）特征，观测数据长期以准线性变化为主，震前1~3年出现偏离线性的非线性变化，如下关水准2-1和2-3自1992年11月开始出现加速上升变化，最大幅度2 mm，在1995年武定  $M_s6.5$  地震后仍持续（图3a、b）；剑川水准2-1在1994年6月开始出现加速上升变化，上升幅度为2 mm（图3c）。但距丽江地震震中最近的丽江场地（震中距42 km）在震前无显著变化，断层活动量很小，仅水准1-2观测到显著的同震变化（图3d）。

笔者还发现大多数场地观测的亚失稳态特征并不清晰，仅有个别场地的断层形变曲线形态与亚失稳差应力时间变化曲线类似，如永胜基线1-2和3-2自观测以来至1994年5月观测数据以准线性变化为主（图3e、f），显示应变处于持续积累阶段，对应亚失稳实验结果的L-M线性变形阶段；1994年6月开始出现偏离线性的非线性变化，1995年5月达到峰值点O，对应亚失稳实验结果的M-O偏离线性阶段；1995年6月至1996年2月为亚失稳阶段，但从准静态阶段向准动态阶段的转折点A很难识别，其中1995年6—12月变形逐渐恢复，可能对应应变由积累过程转为缓慢下降的准静态释放阶段OA，1996年1月曲线再一次转折下降，表明应变释放进入加速阶段，为准动态释放阶段AB。永胜水准1-2和3-2也同步观测到了与亚失稳过程类似的现象，两条水准测线在1995年1月开始同步出现加速下降变化，3月开始下降幅度增大，6月下降达到最大值，为亚失稳实验过程中的M-O偏离线性阶段，1995年6—12月变形逐渐恢复，为应变由积累过程转为缓慢下降的准静态释放阶段，1996年1月曲线再一次转折下降，表明应变释放进入加速阶段，为准动态释放阶段AB（图3g、h）。

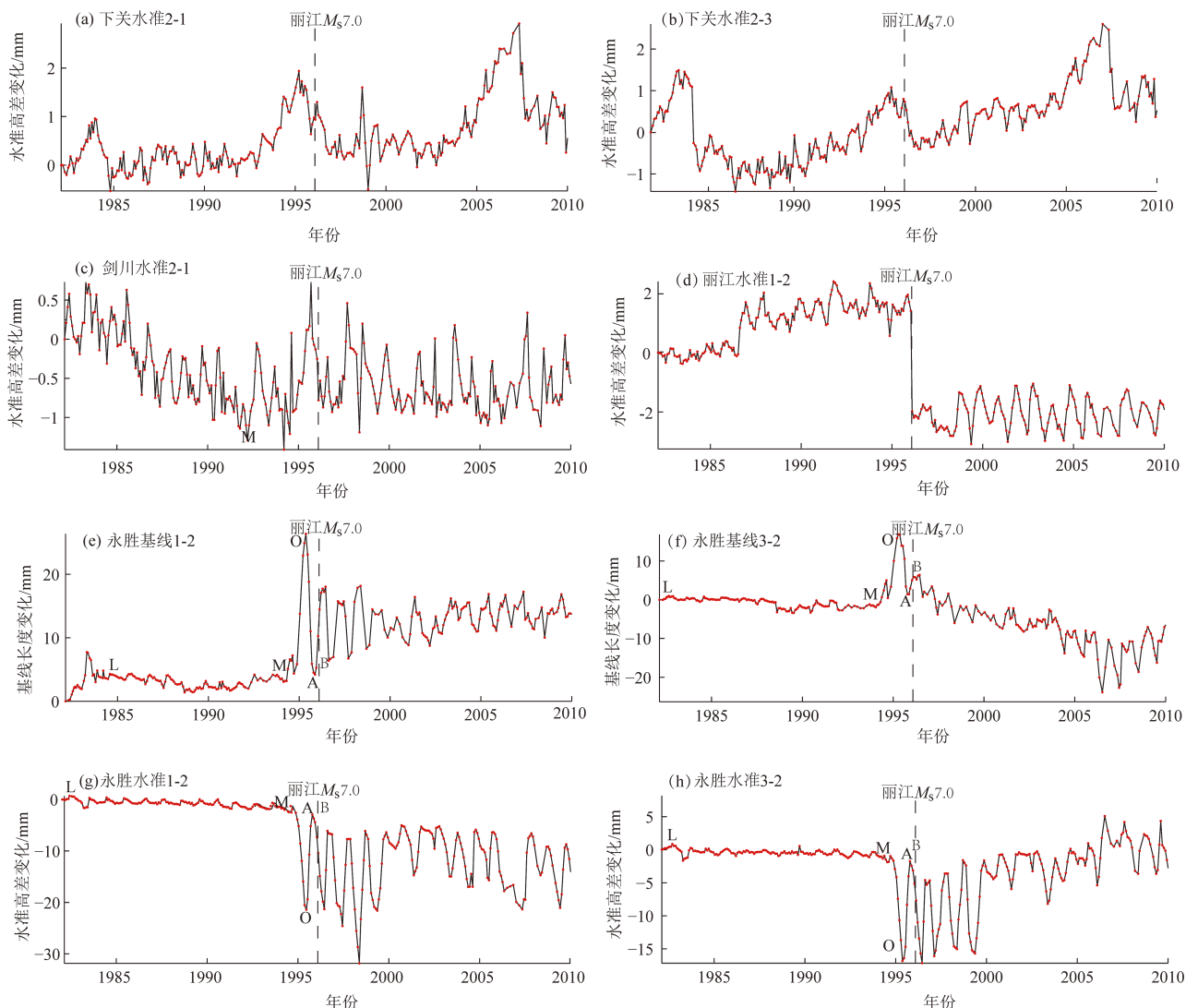


图3 丽江  $M_s7.0$  地震前典型跨断层观测异常曲线

Fig. 3 Typical anomalous curves of the cross-fault baseline and the cross-fault levelling before the Lijiang  $M_s7.0$  earthquake

### 2.1.2 地震前断层运动参数异常特征

断层的活动方式、活动速率等在强震前通常发生中短期变化,具体表现为断层活动性质改变、活动速率快速增大或减小等,通常可通过计算断层三维活动参数来定量地判断断层的活动性质(薄万举等,1998)。考虑到丽江地震前川滇块体东边界上的跨断层场地变化不显著,且大多数为单一的水准观测场地,因此,本文采用薄万举等(1998)和李腊月等(2012)的计算方法,针对震中附近丽江、剑川、永胜和下关场地进行了断层三维活动参数计算,如图4所示,曲线斜率为正分别表示右旋走滑、张性、正断运动。计算结果显示,在丽江  $M_s7.0$  地震前,丽江和永胜两个场地的断层活动性均很弱,表

现为应变积累区域极限的闭锁特征;丽江场地在震前无显著的异常活动,只有垂向运动参数显示了明显的同震变化,而永胜场地在震前1年半左右出现明显加速活动,具体表现为左旋走滑、拉张、逆冲活动加速;丽江  $M_s7.0$  地震后,丽江、永胜两个场地的断层活动性均显著增强。剑川场地在震前1年半左右左旋走滑运动减缓;下关场地在震前3年出现正断活动加速的现象。

### 2.2 2013年4月20日芦山 $M_s7.0$ 地震

2013年4月20日发生在四川省雅安市的芦山  $M_s7.0$  地震(震中  $30.3^\circ\text{N}$ ,  $103.0^\circ\text{E}$ ),是继2008年5月12日汶川  $M_s8.0$  大地震后的又一次破坏性地震。宏观震中位于巴颜喀拉块体与华南块体

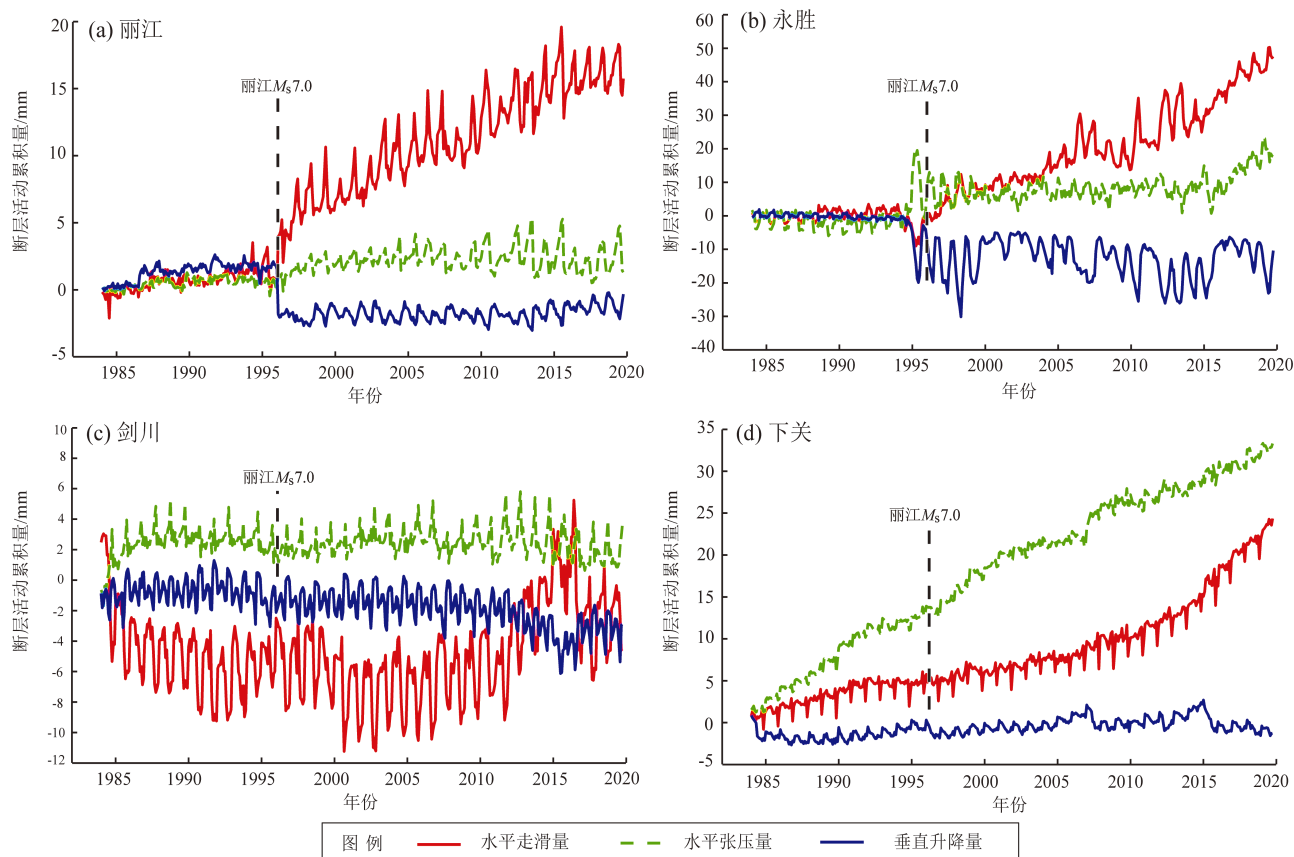


图4 丽江  $M_s 7.0$  地震前丽江、永胜、剑川和下关场地断层三维活动参数变化

Fig. 4 Variation of three-dimensional parameters of the active faults surveyed at sites in Lijiang, Yongsheng, Jianchuan and Xiaguan before the Lijiang  $M_s7.0$  earthquake

之间的龙门山推覆构造带南段,震源机制解结果表明此次地震为逆冲型地震(赵博等,2013)。野外地质科学考察表明,芦山地震在震中区没有形成具有构造地质意义的地震地表破裂带,该地震是一次典型盲逆断层型地震(徐锡伟等,2013)。芦山地震前,震中周边 300 km 范围的跨断层观测场地分布如图 5 所示。

### 2.2.1 原始观测曲线异常特征识别

芦山地震前震中距 300 km 范围内的跨断层场地主要分布在鲜水河—安宁河—则木河断裂带和龙门山断裂带上(图 5)。震中距在 100 km 范围内的宝兴、蒲江、双河、折多塘场地在汶川地震后、芦山地震前表现为强闭锁的特征(图 6a~d), 只有距离汶川地震震中最近的灌县、映秀场地水准表现为趋势拉张(图 6e、f), 笔者分析认为灌县、映秀场地水准的趋势拉张变化可能与汶川地震震中附近断层解锁有关。芦山地震前, 震中距 300 km 范围内位于鲜水河—安宁河—则木河断裂带上的场地出现大量中短期异常, 同样表现出了

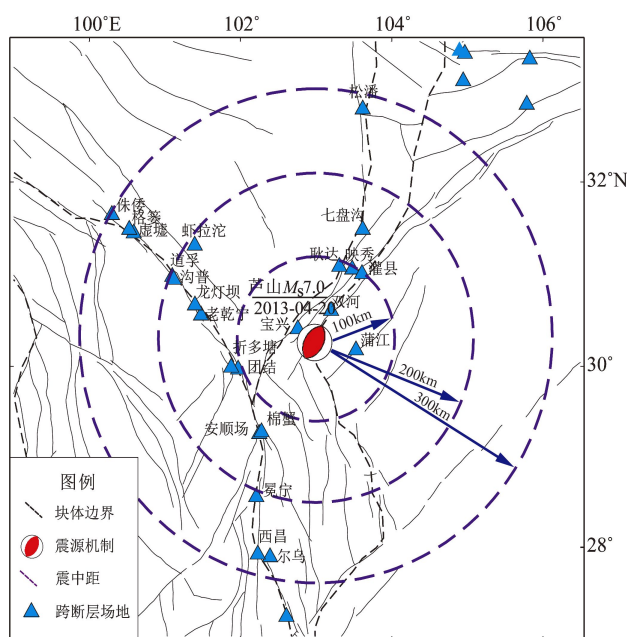


图 5 庐山  $M_s7.0$  地震震中周边跨断层场地分布  
Fig. 5 Distribution of cross-fault sites around the epicenter of the Lushan  $M_s7.0$  earthquake



稳态（线性阶段）、亚稳态（偏离线性阶段）特征（图7）。侏倭场地两条基线A-B、A-C在观测期内表现出显著的线性趋势变化特征，2013年1月同步出现偏离线性的下降变化（图7a、b）；龙灯坝场地基线A-B、A-D在2001年以后表现为线性拉张变化，于2012年7月同步出现加速下降的压性变化（图7c、d）；老乾宁场地基线3-5、3-1（图7e、f）、虚墟基线A-B、A-C（图7g、h）在芦山地震前同样显现出趋势拉张背景下的压性变形特征。此外，位于川滇菱形块体东边界的跨断层水准场地在震前也表现出了稳态到亚稳态的中短期异常特征，虚墟场地水准在震前数月（2012年7月）出现准同步的上升变化（图7i）；则木河断裂带上的尔乌、西昌场地跨断层水准观测分别于震前1年和3年出现加速上升变化（图7j~l）。

芦山 $M_s7.0$ 地震前，跨断层观测的亚失稳态特征并不清晰，仅有个别场地观测的现象与实验室岩石变形过程的差应力-时间变化曲线类似，如位于鲜水河断裂带北西段的虚墟场地A-B基

线于2013年1月开始出现偏离线性的加速下降的变化，3月下降达到最大值，1—3月为偏离线性阶段，其后进入亚失稳阶段（图7g）；虚墟场地A-B水准2012年7月（M点）开始出现偏离线性的加速上升变化，11月达到O点后开始转为下降，2012年11月—2013年4月为亚失稳阶段（OAB）（图7i）。

### 2.2.2 地震前鲜水河断裂带断层活动参数变化

图8为计算的断层三维活动参数结果，鲜水河断裂带的水平走滑量在观测期内呈准线性变化特征，且斜率为负，表明鲜水河断裂带为左旋走滑运动；水平张压量和垂直升降量曲线在观测期内也呈准线性变化，但在2001年以前斜率较小，表明鲜水河断裂带在2001年以前以左旋走滑运动为主，与地质上给出的背景运动方式相一致（Allen *et al.*, 1991；闻学泽等，1989）。但在2001年以后，鲜水河断裂带的张性活动显著增强（水平张压量曲线斜率增大），而在芦山地震前3个月，水平走滑量和水平张压量曲线出现偏离线性的

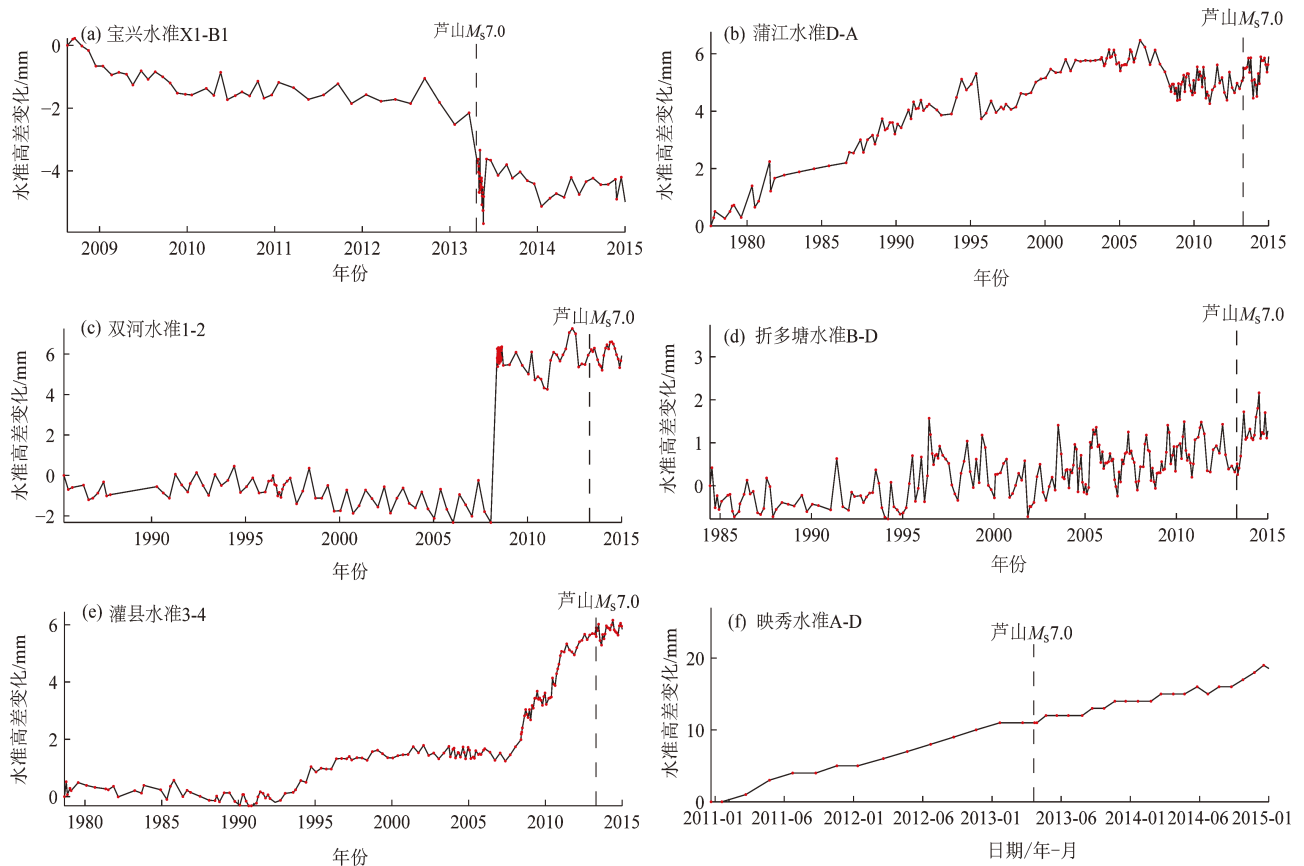
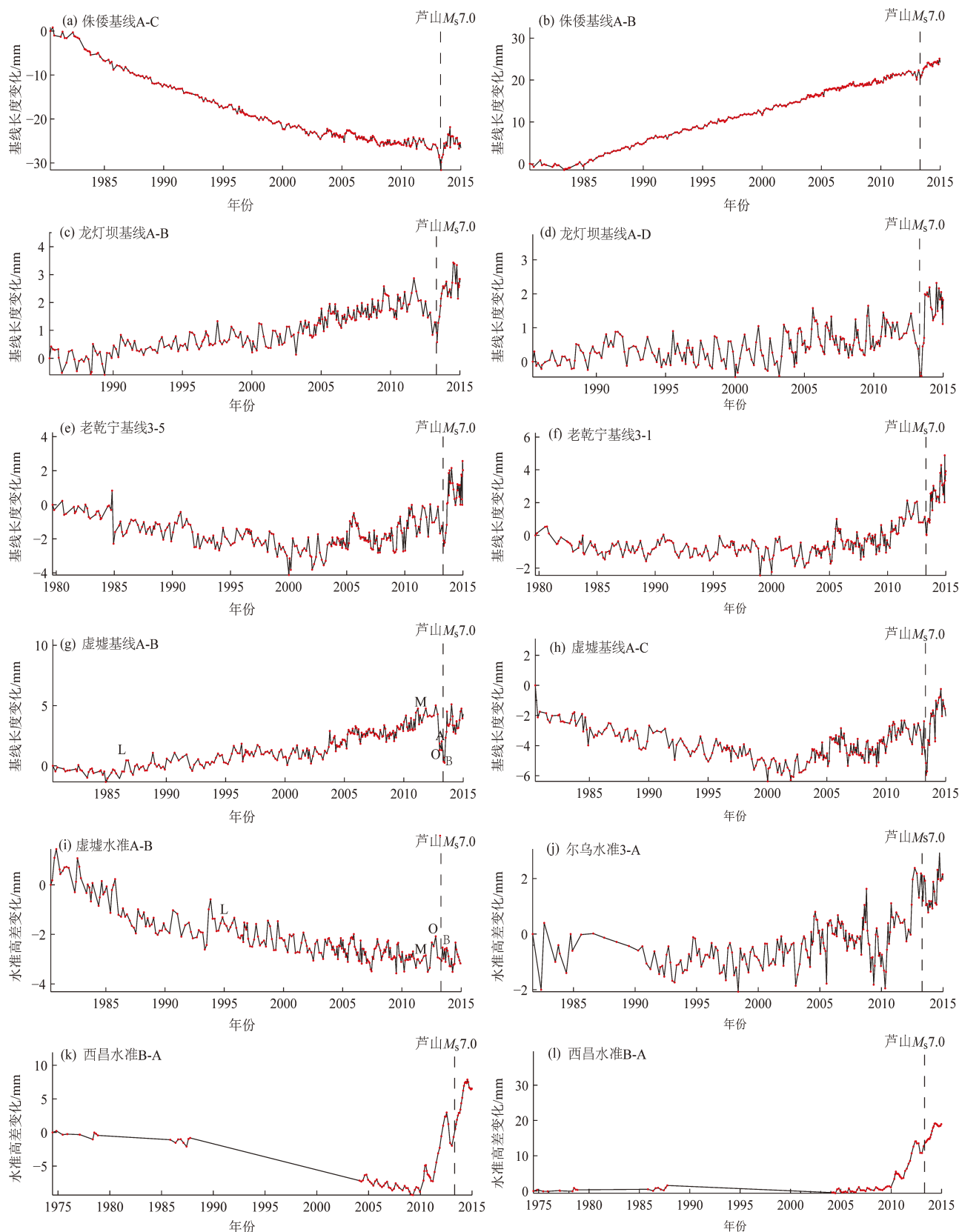


图6 芦山 $M_s7.0$ 地震震中距100 km范围内跨断层观测曲线

Fig. 6 Cross-fault levelling curves within the range of 100 km from the epicenter of the Lushan  $M_s7.0$  earthquake

图7 芦山  $M_s 7.0$  地震震中距 200 ~ 300 km 范围内典型异常曲线Fig. 7 Typical anomalous curves of the cross-fault baseline and the cross-fault levelling in the range of 200 – 300 km of the epicenter of the Lushan  $M_s 7.0$  earthquake

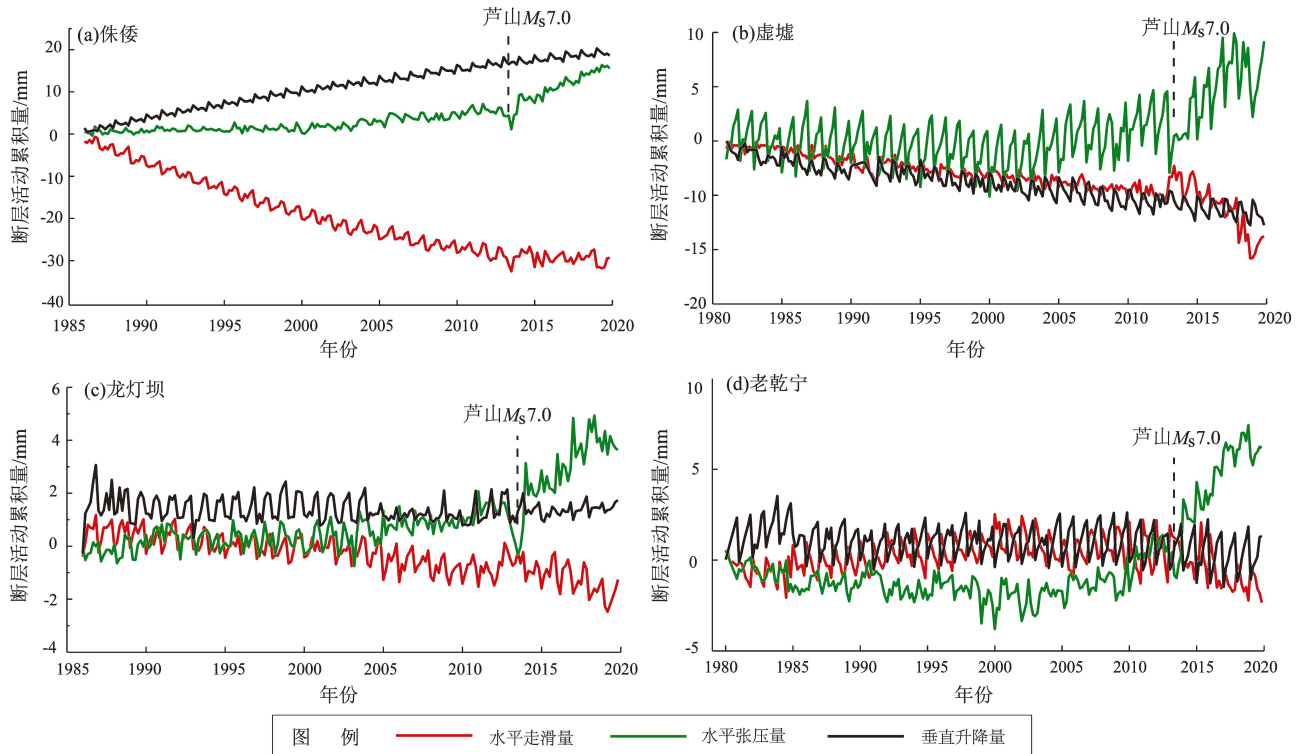


图 8 芦山  $M_57.0$  地震前鲜水河断裂带断层三维活动参数变化

Fig. 8 Variation of three-dimensional parameters of the Xianshuihe fault zone before the Lushan  $M_57.0$  earthquake

非线性变化,表明鲜水河断裂带出现了右旋走滑、压性的逆继承性活动。因此,断层活动的定量指标也显示出鲜水河断裂带在芦山  $M_57.0$  地震前断层活动出现了由稳态到亚稳态的特征。

### 3 跨断层观测揭示的断层异常活动协同化特征

马瑾 (2016) 认为断层不是孤立的,断层是活动块体的边界,块体不同边界断层的相互作用对失稳有一定的影响,因此,断层失稳的“前兆”绝不局限在发震断层上。通过上述震例回溯研究,笔者发现丽江地震前 1~3 年震中 200 km 范围内的断层形变异常随时间逐渐增多,芦山地震前震中 300 km 范围内的跨断层异常测项也随时间逐渐增多,尤其是鲜水河断裂带北西段,短期群体异常显著,表明与发震断层相关构造断层上应力应变发生变化,跨断层观测揭示了断层异常活动协同化特征。为了进一步识别丽江、芦山  $M_57.0$  地震前区域断裂带上的协同化现象,本文采用灰色关联度指标、主成分分析法和断层形变信息合成法进一步提取区域断层活动异常信息,计算了丽江地震前滇

西北地区断层垂向参量指标、鲜水河断裂带的走滑运动与张压运动综合指标、安宁河—则木河断裂带断层垂直活动速率合成指标 (图 9~11)。

#### 3.1 丽江 $M_57.0$ 地震前灰色关联度指标显示的断层活动趋势变化

灰色关联度指标可反映断裂活动总体趋势及其动态演变过程 (张希等, 2014)。利用滇西北地区丽江、永胜、剑川、下关场地的水准观测数据,基于改进的灰色关联度方法 (田晓等, 2021),计算了滇西北地区的灰色关联度垂向指标,该指标显示在丽江  $M_57.0$  地震前 2~3 年左右,震中 200 km 范围内的相邻断层出现了正断加速异常特征,与丽江地震的正断错动特性一致 (图 9)。

#### 3.2 芦山 $M_57.0$ 地震前鲜水河断裂带断层活动综合指标异常提取

主成分分析法 (PCA) 是一种多变量统计分析方法,它能在去除一些相关干扰信息的基础上,最大限度保留原有信息,有助于对前兆观测资料的分析。目前,PCA 方法在 GPS、InSAR、跨断层测量等资料处理中已经得到了一定应用 (田云锋, 沈正康, 2009; 李腊月等, 2013; 方颖等, 2015)。



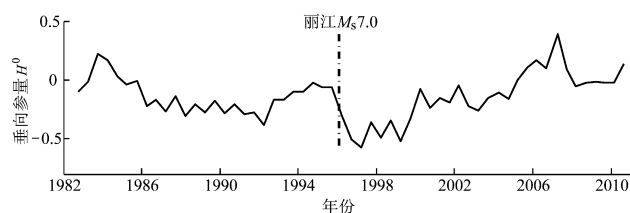


图9 丽江  $M_s7.0$  地震前滇西北跨断层  
灰色关联度垂向指标曲线

Fig. 9 Curve of the vertical index of the cross-fault grey correlation degree in northwest Yunnan before the Lijiang  $M_s7.0$  earthquake

本文应用 PCA 方法提取了鲜水河断裂带北西段断层走滑和张压活动随时间变化量 (图 10)。走滑量综合指标显示, 鲜水河断裂带在观测期内一直以左旋走滑运动为主 (曲线斜率为负), 在芦山  $M_s7.0$  地震前 1 年出现了右旋活动 (图 10a); 张压量综合指标显示, 鲜水河断裂带在昆仑山口西  $M_s8.1$  地震前张压活动速率较弱, 活动性质不明显, 而在昆仑山口西  $M_s8.1$  地震后张性活动开始增强, 汶川地震后张性活动继续增强, 但在芦山地震前 1 年出现显著压性活动, 地震后恢复, 且处于快速拉张的状态 (图 10b)。

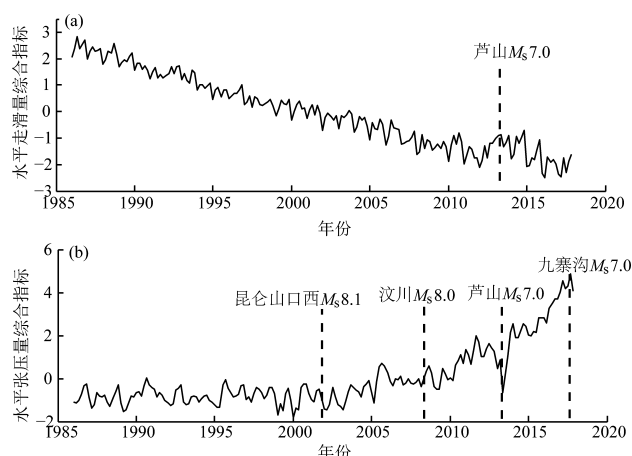


图10 鲜水河断裂带水平走滑量 (a) 和  
水平张压量综合指标 (b)

Fig. 10 Comprehensive index of the horizontal strike-slip (a) and comprehensive index of the horizontal tensor pressure (b) in the Xianshuihe fault zone

### 3.3 芦山 $M_s7.0$ 地震前安宁河—则木河断裂带断层垂直形变速率合成指标

在跨断层数据处理中, 为了削弱干扰噪声,

提高“信噪比”, 可以采用断层形变信息合成的方法, 该方法通过叠加“信号”, 可以使叠加后的噪声在相当大的程度上被抵消或削弱, 提取区域断层活动的动态变化 (张晶等, 2012)。采用该方法, 利用安宁河—则木河断裂带上的棉蟹、冕宁、宁南、尔乌、汤家坪等场地计算了该断裂带的断层垂直形变速率合成指标, 图 11 结果显示在芦山  $M_s7.0$  地震前 1 年安宁河—则木河断裂带垂直活动速率出现显著的高值异常。

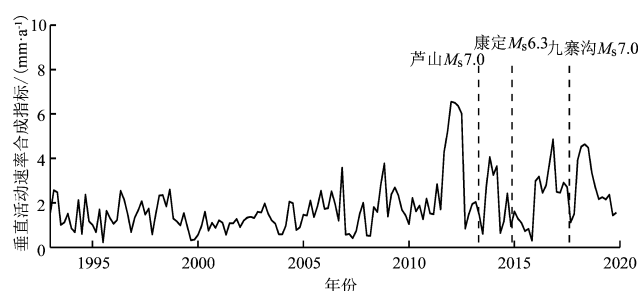


图11 安宁河—则木河断裂带垂直活动速率合成指标

Fig. 11 Composite index of the rate of the vertical movement of the Anninghe-Zemuhe fault zone

因此, 从异常的时间、空间演化特征以及所提取的区域或断裂异常信息综合指标均可以看出跨断层测量观测到了强震前断层活动的协同化及加速协同化特征。

## 4 讨论

构造地震的孕育过程及其前兆机理研究一直是国内外地震学家们关注的重要科学问题。尽管经历了几十年的努力和探索, 但目前仍无法确认观测到的异常与地震的唯一关系。马瑾等 (2012) 认为地震是一个力学过程, 是应力积累到应力快速释放的物理过程, 是有先兆的, 识别地震前断层所处的应力状态是关键。亚失稳应力状态的提出, 把不同时间和空间尺度失稳过程统一到应力状态的框架内。实验室的应力-时间过程在应力积累阶段是线性变化的, 偏离线性阶段代表应力释放的开始, 上述震例研究表明跨断层观测在两次  $M_s7.0$  地震前也表现出了线性-非线性变化, 与实验室应力-时间过程曲线形态相似, 但目前还无法明确这种“非线性变化”的具体力学含义, 非线性代表断层处是应变积累增强还是应变的释

放, 只能说明此处局部应力应变场发生变化, 断层活动偏离了原有的背景活动方式。

实验室给出的摩擦滑动失稳全过程较为短暂, 从稳态到失稳态整个过程约 1 300 s, 其中稳态阶段 (LM) 占全过程的 61.53%, 亚稳态阶段 (MO) 占全过程的 37.36%, 亚失稳态 (OB) 占全过程的 1.1%, 断层的快速失稳过程只占全过程的 0.077% (李世念等, 2021)。自然界一次强震事件的孕育通常需要数十年、甚至上百年至几千年的时间, 远大于实验室给出的摩擦滑动失稳过程。而野外实际地震的孕育环境较为复杂, 一次地震的滑动失稳全过程与该断裂带最近一次地震的离逝时间、强震复发周期有一定的关系。对于一些强震复发周期长、最近一次地震离逝时间也较长的断层, 亚失稳阶段占地震的滑动失稳全过程的时间也较长; 对于一些复发周期短、最近一次地震离逝时间也较短的断层, 亚失稳阶段占地震滑动失稳全过程的时间也较短。因此, 不同地震前观测到的亚稳态 (非线性)、亚失稳态出现的时间节点不同, 这也可能是不同地震前跨断层形变观测到的异常出现时间不同的原因。

断层活动协同化的提出把孤立的点观测联系为时、空、强三维关系, 并拓展到多种物理场的时空演化研究 (马瑾, 郭彦双, 2014)。本文震例回溯研究表明, 丽江和芦山  $M_s7.0$  地震前存在断层异常活动协同化现象, 但也发现一些问题, 如丽江  $M_s7.0$  地震前, 在震中距 200 ~ 500 km 范围内的川滇菱形块体东边界上的跨断层场地并无明显异常; 芦山  $M_s7.0$  地震前, 震中距在 300 ~ 500 km 范围内的西秦岭构造区异常并不显著。笔者分析认为可能与这些场地所在的区域或断裂在构造上与孕震断层的关联性较弱有关, 孕震断层附近应力增强或应力释放会影响相邻断层或同一块体的其它边界应力状态发生变化。因此, 导致与发震断层构造关联性强的这些区域异常较为显著, 如芦山地震前鲜水河断裂带上的异常较显著, 且断层活动具有明显的协同化特征, 这是和鲜水河断裂带和龙门山断裂带分别属于巴颜喀拉块体的东边界和西南边界, 构造上相关联且距离较近相关。而同一断裂带上也不是所有的场地都能观测到异常 (亚稳态和亚失稳态特征), 这主要和场地布设的构造位置有关; 亚失稳实验也指出, 并不是所

有的构造部位均能观测到失稳前的变化, 只有位于特殊构造部位的台站才可能观测到前兆变化, 对于拐折断层, 拐点处温度变化复杂, 所以此处应力的调整和断层活动更容易被观测到 (马瑾等, 2012)。因此, 选择合适的构造部位进行观测也是能否观测到亚失稳前兆的关键。

## 5 结论

本文选取丽江、芦山两次  $M_s7.0$  地震开展震例回溯研究, 研究震前不同阶段震源断层及附近区域跨断层观测的前兆表现, 并通过与亚失稳实验室研究结果类比, 总结野外跨断层观测相关物理参数在亚失稳阶段的表现形式及变化特征, 得到以下结论:

(1) 丽江、芦山两次  $M_s7.0$  地震前, 震源区在震前数年主要表现为弱变形的状态, 发震断层附近的跨断层场地往往观测不到显著的异常变化, 但观测到了显著的同震变化, 可能与孕震晚期发震断层处于闭锁状态有关, 是孕震晚期断层近场应力应变积累趋于极限的表现。

(2) 参照亚失稳理论及实验结果给出的差应力 - 时间过程曲线, 发现丽江、芦山两次  $M_s7.0$  地震前震中距 300 km 范围内的跨断层场地大多数表现出稳态 (线性阶段)、亚稳态 (偏离线性阶段) 特征, 观测数据长期以准线性变化为主, 震前 1 ~ 3 年出现偏离线性的非线性变化, 反映了断层在局部稳定应力场作用下的正常背景活动特征和受到扰动应力场后的异常活动特征。

(3) 丽江、芦山等地震前, 大多数跨断层场地观测的亚失稳态特征并不清晰, 仅有个别场地观测到了与实验室岩石破裂失稳过程类似的图像。本文分析可能与跨断层场地所在的构造位置以及观测周期有一定的关系, 当孕震断层由应变积累阶段转为应变释放阶段、断层协同化作用开始时会导致附近与其构造相关性强的断层上应力应变场的变化, 由于断层几何结构的复杂性以及岩石介质的非均匀性, 所以导致断层不同部位对应力应变场发生改变的响应不同。此外, 由于亚失稳阶段, 特别是亚失稳准动态阶段持续时间较短 (仅占摩擦滑动失稳全过程的 0.4% 左右), 可能需要震源及附近地区变形场的高频观测资料。对于

复发周期较短的断层,目前的观测周期无法获得瞬态高频信息。

寻找野外观测条件下的非应力参数亚失稳特征,有助于亚失稳研究从实验室走向野外。本文基于多种变形分析方法识别野外跨断层观测在“亚失稳”阶段的变形特征和表现形式,对实际地震预测工作具有促进作用,但本工作还处于初期探索阶段,有许多问题还未解释清楚,有待进一步研究。

### 参考文献:

- 薄万举,谢觉民,郭良迁. 1998. 八宝山断裂带形变分析与探讨[J]. 地震,18(1):63-68.
- 薄万举,谢觉民,杨炳顺. 1994. 地壳形变测量用于地震预报的研究[J]. 地壳形变与地震,14(2):13-19.
- 车兆宏,范燕. 1999. 华北地区断层现今活动速率与特征[J]. 地震地质,21(1):69-76.
- 陈顺云,宋春燕,闫玮,等. 2021. 2020年1月19日伽师  $M_s 6.4$  地震前后的基岩温度变化[J]. 地震地质,43(2):447-458.
- 方颖,张晶,江在森,等. 2015. 用跨断层形变资料分析鲜水河断裂西北段的运动特征[J]. 地球物理学报,58(5):1645-1653.
- 郭树松,祝意青,徐云马,等. 2021. 汶川地震前失稳过程的重力场观测证据[J]. 地震地质,43(6):1368-1380.
- 韩竹军,魏顺民,向宏发,等. 2004. 1996年2月3日云南丽江7.0级地震发生的构造环境[J]. 地震学报,26(4):410-418.
- 黄雅,陈佳,金明培,等. 2021. 2021年云南漾濞  $M_s 6.4$  地震亚失稳阶段的地震活动性特征分析[J]. 地震研究,44(3):357-366.
- 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象特征[J]. 地震学报,20(3):41-48.
- 焦青,周俊萍. 1998. 跨断层垂直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. 2012. 首都圈断层活动及其与地震关系探讨[J]. 中国地震,28(2):167-178.
- 李腊月,邢成起,武安绪,等. 2013. 用主成分分析法综合分析首都圈跨断层形变资料[J]. 中国地震,29(2):246-255.
- 李世念,马瑾,汲云涛,等. 2021. 亚失稳准动态及同震过程变形场时空演化特征——实验与分析[J]. 地震地质,43(1):1-19.
- 李玉江,陈连旺,刘少峰,等. 2017. 鲜水河断裂带北西段跨断层基线变化机理探讨[J]. 地球物理学报,60(2):554-563.
- 刘冠中,马瑾. 2012. 鲜水河断裂带断层活动“协同化”的演化特征[J]. 国际地震动态,(6):235.
- 刘远征,马瑾,马文涛. 2014. 探讨紫坪铺水库在汶川地震发生中的作用[J]. 地学前缘,21(1):150-160.
- 马瑾, Sherman S I, 郭彦双. 2012. 地震前亚失稳应力状态的识别:以5°拐折断层变形温度场演化的实验为例[J]. 中国科学:地球科学,42(5):633-645.
- 马瑾,郭彦双. 2014. 失稳前断层加速协同化的实验室证据和地震实例[J]. 地震地质,36(3):547-561.
- 马瑾. 2016. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起[J]. 科学通报,61(S1):409-414.
- 任雅琼,刘培洵,马瑾,等. 2013. 亚失稳阶段雁列断层热场演化的实验研究[J]. 地球物理学报,56(7):2348-2357.
- 宋春燕,马瑾,王海涛,等. 2018. 强震前断裂亚失稳阶段及失稳部位的特征研究——以新疆南天山西段为例[J]. 地球物理学报,61(2):604-615.
- 苏琴,杨永林,郑兵,等. 2014. 4·20芦山7.0级地震预测思路及过程回顾[J]. 地震地质,36(4):1077-1093.
- 苏有锦,刘祖荫. 1997. 丽江7.0级地震震源环境及其破裂过程讨论[J]. 地震研究,20(1):68-73.
- 田晓,郑洪艳,李腊月,等. 2021. 川滇地区主要活动断裂运动特征及地震危险性分析[J]. 大地测量与地球动力学,41(6):561-567.
- 田云锋,沈正康. 2009. GPS坐标时间序列中非构造噪声的剔除方法研究进展[J]. 地震学报,31(1):68-81.
- 王双绪,江在森,陈文胜,等. 2001. 景泰5.9级地震的断层形变异常及中短期预报[J]. 地震学报,23(2):151-158.
- 闻学泽, Allen C R, 罗灼礼,等. 1989. 鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及地震构造意义[J]. 地震学报,11(4):362-372.
- 徐锡伟,闻学泽,韩竹军,等. 2013. 四川芦山7.0级强震:一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报,58(20):1887-1893.
- 杨海明,陈顺云,刘培洵,等. 2020. 岩石加载变形过程中超声尾波与声发射变化的实验[J]. 地震地质,42(3):715-730.
- 张晶,刘峡,方颖,等. 2012. 日本9.0级地震前后华北形变场变化特征与地震趋势分析[J]. 地震,32(2):64-72.
- 张淑亮,李艳,王霞,等. 2016. 亚失稳态野外观测证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版),46(2):603-609.
- 张淑亮,王霞,郭文峰,等. 2021. 多种地球物理场观测数据中亚失稳现象[J]. 吉林大学学报(地球科学版),51(2):571-583.
- 张希,贾鹏,刘峡,等. 2020a. 岷县漳县强震前的跨断层短临异常及亚失稳状态特征[J]. 地震地质,42(5):1205-1207.
- 张希,李心然,唐红涛. 2014. 青藏块体东北缘断层形变综合指标异常与岷县漳县6.6级等强震关系[J]. 地震研究,37(4):572-577.
- 张希,刘峡,秦姝兰,等. 2020b. 芦山  $M_s 7.0$  地震前的跨断层形变亚失稳前兆特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版),45(11):1669-1677.
- 赵博,高原,黄志斌,等. 2013. 四川芦山  $M_s 7.0$  地震余震序列双差定位、震源机制及应力场反演[J]. 地球物理学报,56(10):3385-3395.
- 周光全,张建国,周瑞琦,等. 1997. 丽江7.0级地震的地震地质构造背景分析[J]. 地震研究,20(1):94-102.
- 卓燕群,郭彦双,汲云涛,等. 2013. 平直走滑断层亚失稳状态的位场协同化特征:基于岩石数字图像变形相关分析方法[J]. 中国科学:地球科学,43(10):1643-1650.
- Allen C R, Luo Z L, Qian H, et al. 1991. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe Fault of southwestern China [J]. GSA Bulletin, 103(9):1178-1199.

Ji L Y, Wang Q L, Xu J, *et al.* 2017. The 1996  $M_w$  6.6 Lijiang earthquake: Application of JERS – SAR interferometry on a typical nor-

mal-faulting event in the northwestern Yunnan rift zone, SW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 146: 221 – 232.

## A Retrospective Study of Two $M_s$ 7.0 Earthquakes in Lijiang and Lushan and Discussions on the Characteristics of Meta-instability

LI Layue<sup>1</sup>, YIN Haiquan<sup>1</sup>, MA Lingli<sup>2</sup>, LI Zhirong<sup>3</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>

(1. *The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*)

(2. *Crustal Deformation Observation Center of Sichuan Earthquake Agency, Ya'an 625000, Sichuan, China*)

(3. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

### Abstract

The cross-fault observation had been conducted in the epicentral areas of the Lijiang  $M_s$ 7.0 earthquake and the Lushan  $M_s$ 7.0 earthquake before the two earthquakes occurred. According to the deformation analysis methods, and using the cross-fault observational data, we do a retrospective study of the two earthquakes. Guided by the meta-instability theory and on the basis of the laboratory results, we summarize the characteristics of the fault motion varying in time and space, and fault motion's possible manifestations in the meta-instable stage, to identify the synergy of fault activities in the study area, and to explore the signs obtained by the cross-fault observation which indicates that the potential earthquake has entered a meta-instable state. The results show that before the Lijiang and Lushan  $M_s$ 7.0 strong earthquakes, the epicentral areas were mainly in a weak-deformation state with a small rate of activity. This may suggest that the seismogenic fault was locked in the late seismogenic stage, and the accumulation of the stress and strain of the fault in the near field was reaching limit. Three years before the earthquake, significant anomalies of the fault deformation occurred in the 300 km range of the epicentral area, and the anomalies lasted till several months before the earthquake. The fault activity performed a significant synergy. On some cross-fault sites, images similar to the laboratory rock rupture and instability process have been observed. On some sites only the steady state (linear stage) and meta-stable state (deviation from the linear stage) were observed. The meta-instable characteristics on these sites were not clear. We believe that this may be related with the tectonic position of the cross-fault sites and observational periods.

**Keywords:** the Lijiang  $M_s$ 7.0 earthquake; the Lushan  $M_s$ 7.0 earthquake; cross-fault observation; earthquake-case review; meta-instable characteristics; Sichuan-Yunnan area