

2016年门源 M_s 6.4 地震前跨断层短水准

短期异常的机理探讨*

张希¹, 白卓立¹, 刘峡²

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要: 2016年门源 M_s 6.4 地震发生前6个月, 祁连山断裂带上距震中200 km内的跨断层流动短水准场地异常增长; 震前2个月观测到以正断为主的协同性群体异常变化。通过分析跨断层短水准异常的时空演变与提炼灰色关联度指标, 结合定点连续形变与小震活动等辅助信息, 探讨其异常机理。结果显示: 祁连山断裂带跨断层短水准在门源地震前短期阶段至少呈现出偏离线性阶段的亚稳态特征, 应力释放与断层协同活动已经开始; 同时也存在显示亚失稳状态特征的可能。

关键词: 门源地震; 跨断层形变; 短期前兆; 亚稳态—亚失稳态

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)04-0644-07

0 引言

地震预报要取得防震减灾实效, 关键在于短-临预报。亚失稳是断层失稳前应力由积累为主转变为释放为主的最后阶段(马瑾等, 2012, 2014; 马瑾, 2016), 马瑾等(2012)以5°拐折断层一次粘滑实验中不同变形阶段温度场的演化为例, 总结失稳错动是由断层各个部位独立活动向协同化活动的转化过程, 偏离线性即亚稳态阶段是应力释放、协同作用的开始, 亚失稳阶段应力释放已占据优势; 卓燕群等(2013)、任雅琼等(2013, 2016)以平直与雁列断层的粘滑事件为实验对象, 分析了断层进入亚失稳阶段的位移协同化与热场演化特征。将亚失稳实验结果应用于野外观测与实际震例研究更有意义, 刘冠中和马瑾(2012)发现鲜水河断裂北西段跨断层蠕变场地在1997年玛尼 M_s 7.5 大震前出现断层活动协同化特征; 刘远征等(2014)认为紫坪铺水库蓄水在汶川 M_s 8.0 大震发生中起到了断层协同化强化作用。然而截至目前, 野外实际观测获得的亚失稳证据仍很有限。

跨断层形变测量是一种监视断层运动直接而有效的方法, 具有短测线跨活动断层、复测周期短、精度高的特点。在我国西部多数6级以上强震前的中短期或短期阶段, 观测到跨断层形变出现“加速”“转折”“先加速后转折”等异常变化(江在森等, 2001), 震前短-临阶段表现为“转折”异常形态的情况占一定比例。“加速”可能揭示断层活动加速甚至临震预滑; 而若出现与构造活动总体特征相反的“转折”变化, 如何解释却见仁见智。2016年1月21日青海门源发生了以逆冲为主、兼微弱左旋走滑的 M_s 6.4 地震, 发震构造为冷龙岭断裂北侧的次级断层(郑博文等, 2018), 该地震是继2003年10月25日民乐—山丹 M_s 6.1 地震后16年来, 在祁连山断裂带上发生的唯一一次6级以上强震, 震前2个月该断裂带中东段以逆断变化为主的跨断层流动短水准场地出现以正断为主的异常变化, 距震中87~177 km。已有研究(李媛等, 2016; 张希等, 2016)仅描述了异常特征, 并没有从机理上深入探讨。本文对祁连山断裂带跨断层资料进行分析和指标提炼, 结合定点连续形变与小震活动等辅助信息, 对照亚失稳实验结果, 给出上述“转折”性异常的一种机理解释。

* 收稿日期: 2020-02-24.

基金项目: 国家自然科学基金(41874024)和国家重点研发计划(2018YFC150330506)联合资助.

1 资料介绍与高应力背景

2016年门源 $M_s6.4$ 地震发生于青藏高原北缘祁连山断裂带的中东段, 中国地震局在该断裂带布设有24处跨断层流动短水准场地(图1), 每年3, 7, 11月实施3期观测, 测线长度一般为数百米, 测量精度为 $\pm(0.2 \sim 0.3)$ mm/km。本文将祁连山断裂带作为研究区, 嘉峪关场地的点位破坏已无跨断层测段, 在2017年实地调查后发现大口子场地未跨断层, 冰沟、童子坝、大梁1和大梁2场地因气候寒冷每年仅7月观测, 数据连续性较差, 舍去这些场地, 最后共选用18处场地(图1)。由于印度板块对欧亚板块的近N-NE向碰撞推挤外部动力作用, 祁连山断裂带构造活动以逆断、左旋为主(邓起东等, 2003), 大多数跨断层场地以垂向逆断为主(逆断占优势、或逆断变化的时间相对更久)的变化趋势与其一致。

GPS剖面变化分析与负位错反演表明(张希等, 2019), 祁连山断裂带中东段与门源地震相关的冷龙岭断裂及与其相连的陶莱山断裂中东段在震前十几年长期处于闭锁状态, 且于门源地震前6年多闭锁程度还明显增大; 流动重力观测显示震前一两年, 震区及其附近有显著的重力场异常变化(郭树松等, 2016); 跨断层资料的趋势累积率计算结果也显示祁连山断裂带中东段长期的应变积累背景(李媛等, 2016), 故其具有发生强震的高应力条件。

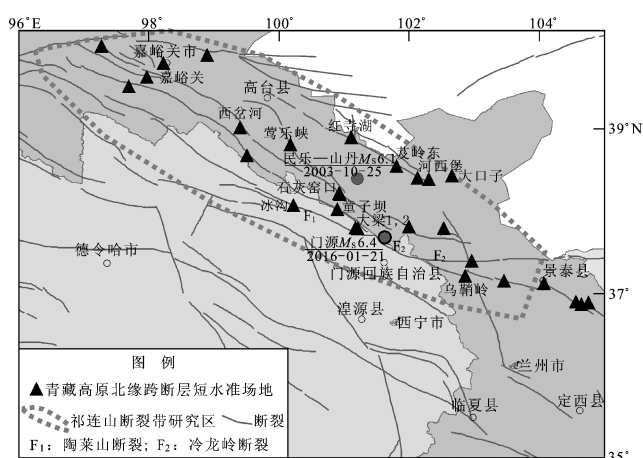


图1 研究区跨断层场地、断裂与地震分布

Fig. 1 Distribution of cross-fault sites, faults and earthquakes in the study area

2 跨断层短水准观测揭示的断层活动协同化特征

亚失稳意味着区域应力由积累转为释放, 其状态识别不应局限于发震断层和单个台站(马瑾, 2016)。本文针对2016年门源 $M_s6.4$ 地震, 回溯祁连山断裂带跨断层观测反映的断层活动演化特征, 图2为震前4期跨断层形变观测的正断、逆断变化和正断性、逆断性异常分布。根据某期相对上一期水准高差变化, 得到4个月间场地的正/逆断变化特性; 异常指场地活动异于“常态”, 通过定性定量综合判定(张希等, 2018)。定性判定看观测曲线的加速、转折、尖点突跳等形态特征, 定量判定需满足以下情况之一: 对第 i 期高差值 g^i , 将其之前的高差值序列 $\{g^k | k=1, 2, \dots, i-1\}$ 作为参考序列, 一是计算相邻两期差分值的均方差, 即

$$\sqrt{\frac{1}{i-2} \sum_{k=2}^{i-1} \left[g^k - g^{k-1} - \frac{1}{i-2} \sum_{k=2}^{i-1} (g^k - g^{k-1}) \right]^2},$$

看本期相对上一期差分值绝对值是否超出2倍左右均方差, 反映超出正常变幅的异常; 二是借助最小二乘配置获得拟合趋势曲线在观测时间的值 $\{f^k | k=1, 2, \dots, i-1\}$, 计算扣除本底趋势后的均方差, 即

$$\sqrt{\frac{1}{i-1} \sum_{k=1}^{i-1} \left[g^k - f^k - \frac{1}{i-1} \sum_{k=1}^{i-1} (g^k - f^k) \right]^2},$$

看本期扣除本底趋势后的绝对值是否超出2倍左右均方差, 凸显趋势改变和扰动性异常; 三是若观测曲线在一定范围内平稳振荡, 计算高差值序列的均方差, 即

$$\sqrt{\frac{1}{i-1} \sum_{k=1}^{i-1} \left[g^k - \frac{1}{i-1} \sum_{k=1}^{i-1} g^k \right]^2},$$

看本期高差的绝对值是否超出2倍左右均方差, 显示超出正常范围的异常, 并用方块区别本期相对上一期4个月间的正/逆断变化特性, 主要的异常观测曲线见张希等(2016)。

由图2可知: ①2014年11月逆断变化场地(逆断性异常场地也算逆断变化场地)占10/18(石灰窑口、扁都口2场地距离很近、特性一致), 只有1处逆断性异常, 逆断特性明显占优势; 2015年3月和7月逆断场地虽减少到8/18和7/18, 但异常场地变幅更大, 其中“逆断”仍占多数, 在异常场地中分别占2/3和4/6; 2015年11月逆断

场地进一步减少 (6/18), 逆断异常场地首次减少到 2/6, 即少数。②震前半年, 正/逆断变化异常明显增多, 2015 年 7 月和 11 月从前两期的 1 处、3 处剧增为 6 处, 达 2 倍以上; 且相对集中分布于

100°E 以东, 即祁连山断裂带的中东段 (有莺乐峡至松山 12 处场地、距门源地震震中 36 ~ 177 km), 占异常总数的 5/6, 也较前两期的 0 ~ 2 处明显增多, 达 2.5 倍以上。

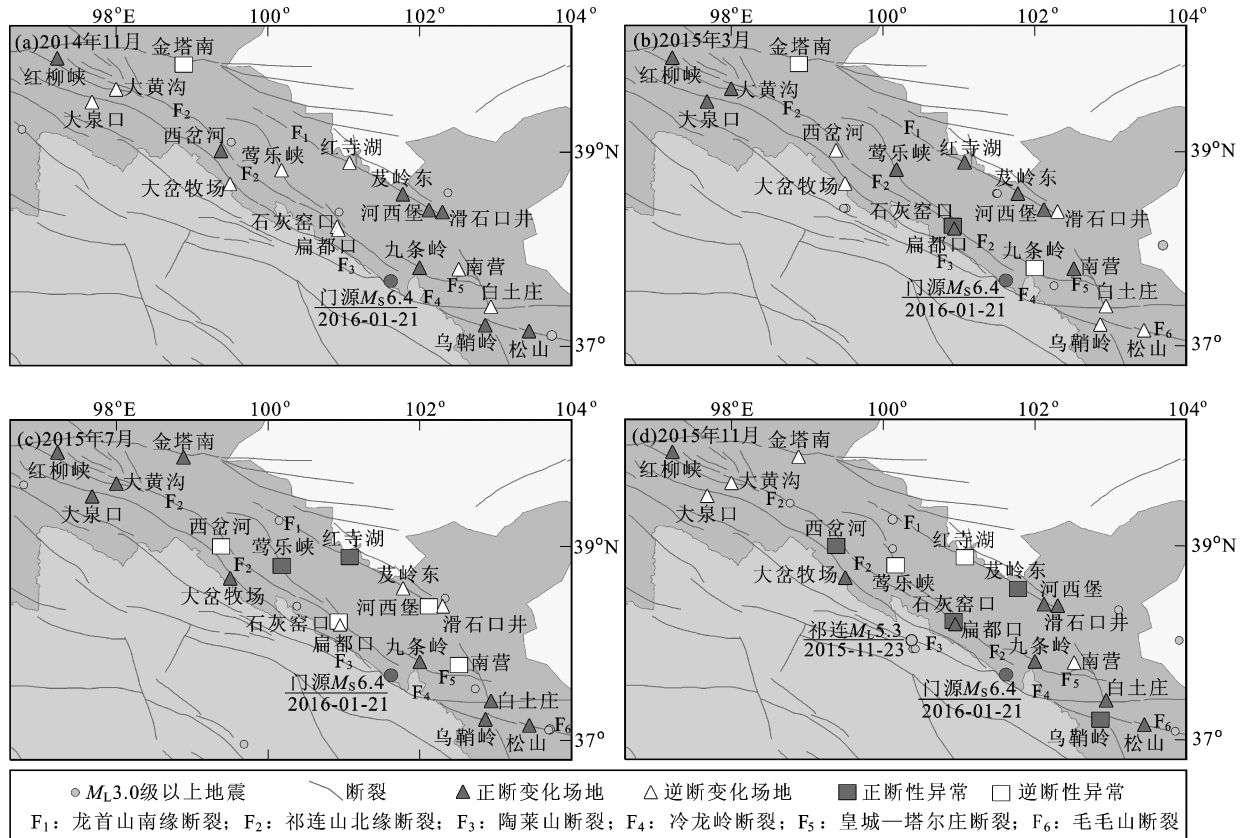


图 2 门源 $M_s 6.4$ 地震前跨断层形变异常动态分布

Fig. 2 Dynamic distribution of cross-fault deformation anomalies before the Menyuan $M_s 6.4$ earthquake

综上所述, 在门源地震前半年祁连山断裂带的异常开始增多且集中; 于震前 2 个月正断性异常增多, 由之前显示的有利于应力积累的逆断“继承性”为主转为正断“逆继承性”为主, 且主要体现在震区周边半径 200 km 范围内, 显示出震区附近的断层活动“变化”及协同化特征。

3 断裂活动趋势及其动态演变特征

灰色关联度指标反映断裂活动总体趋势及其

动态演变 (张希等, 2014a, b)。设计算区有 m 处场地, 首先提取各场地垂向时序高差变化 (每期高差减去首期高差值, 突出时间点之间的相对变化; 若某场地跨断层测段超过 1 条需求各测段的高差均值), 设为 $h_j^t (t = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$, 其中, t, j 分别为时间与场地序号。鉴于各场地独立观测、条件各异, 为使场地间有可比性, 需扣除其本底活动水平, 定义为上述时序高差变化的绝对值均值与相邻两期变化的均方差 (以兼顾观测数据的稳定性) 之和, 所得 t 时刻 j 场地除以该本底活动水平后无量纲的变化量为:

$$u_j^t = \frac{h_j^t}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |h_j^k| + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \left[(h_j^{k+1} - h_j^k) - \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} (h_j^{k+1} - h_j^k) \right]^2}} \quad (1)$$

进而通过灰色关联度加权平均获得。要计算第 j 个场地相对其它 $m-1$ 个场地的灰色关联度 $\gamma_j^0 (j=1, 2, \dots, m)$, $\{u_j^t | t=1, 2, \dots, n\}$ 为参考序

列, $\{u_l^t | t=1, 2, \dots, n\} (l=1, \dots, j-1, j+1, \dots, m)$ 为比较序列, 则:

$$\gamma_j^0 = \frac{1}{m-1} \sum_{l=1, l \neq j}^m \left[\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{\min_l \min_t |u_j^t - u_l^t| + 0.5 \max_l \max_t |u_j^t - u_l^t|}{|u_j^t - u_l^t| + 0.5 \max_l \max_t |u_j^t - u_l^t|} \right] \quad (2)$$

那么时刻 t 的灰色关联度指标值为:

$$\alpha^t = \frac{\sum_{j=1}^m \gamma_j^0 u_j^t}{\sum_{j=1}^m \gamma_j^0} \quad (3)$$

本文绘制了祁连山断裂带 18 处场地及其中东段 (12 处场地) 的灰色关联度垂向指标曲线, 并截取 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震后至今 16 年的时序变化 (这 16 年间研究区及其附近地区除门源地震外, 无 $M_s \geq 5.5$ 地震发生), 如图 3 所示, 图中曲线向下、向上分别表示逆断、正断变化。门源地震前 2 个月出现明显的、偏离正常波动范围的

正断转折, 于震后 10 个月恢复, 具体分析如下:

(1) 祁连山断裂带及其中东段主要变化趋势为逆断下降, 与地质资料一致, 这有利于应力积累与强震孕育。

(2) 2015 年 11 月即门源地震前 2 个月, 出现与长期逆断下降总趋势相反的明显正断转折 (图 3 虚线框内), 其变化幅度不仅较之前 4 期明显增大, 且震区周边半径 200 km 内要比整个断裂带幅度稍大。震后至 2016 年 11 月整条断裂带显示恢复, 而震区附近未完全恢复至震前水平, 门源地震后调整或影响过程可能稍长; 近两年整个断裂带逆断变化略微减缓, 而断裂带中东段逆断变化却持续加速。

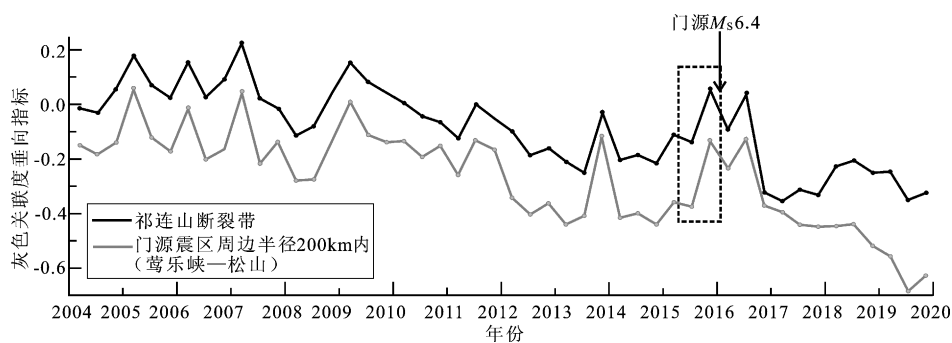


图3 祁连山断裂带跨断层灰色关联度垂向指标曲线

Fig. 3 Curve of vertical index of gray relativity for cross-fault deformation in the Qilianshan Mountain fracture zone

(3) 对 2004—2014 年的灰色关联度时序曲线求线性拟合趋势线 $a + bt$, 其中 t 为时间, 其余为拟合参数 (图 4 中间的虚线), 并延伸至 2019 年底; 再计算这 11 年 (共 33 期观测) 中灰色关联度指标相对该趋势线的均方差 $\sqrt{\frac{1}{33} \sum_i (\alpha^t - a - bt)^2}$, 再用正、负 2 倍均方差作出上、下 2 条阈值线, 同样延伸至 2019 年底, 这样就形成了一个逆断下降变化的相对“正常”范围, 即将 2003 年民乐—山丹 $M_s6.1$ 地震后至 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震前一年的 11 年作为基准, 考察

2015 年 3 期观测的异常情况。

从图 4 可以看出: ①2004—2014 年, 整条祁连山断裂带在 2007 年 3 月和 2009 年 3 月、祁连山断裂带中东段在 2009 年 3 月和 2013 年 11 月灰色关联度指标略微超出阈值, 可能与 2008 年 5 月 12 日距本研究区最近场地 688 km 的汶川 $M_s8.0$ 大震孕震应力场扰动影响和震后影响、2013 年 7 月 22 日距本研究区最近场地 302 km 的岷县漳县 $M_s6.6$ 强震的震后影响有关, 但影响时间短、异常程度都偏弱, 断裂带及其中东段显示基本稳定的、与构造活动背景一致的逆断下降“线性变化”特征,

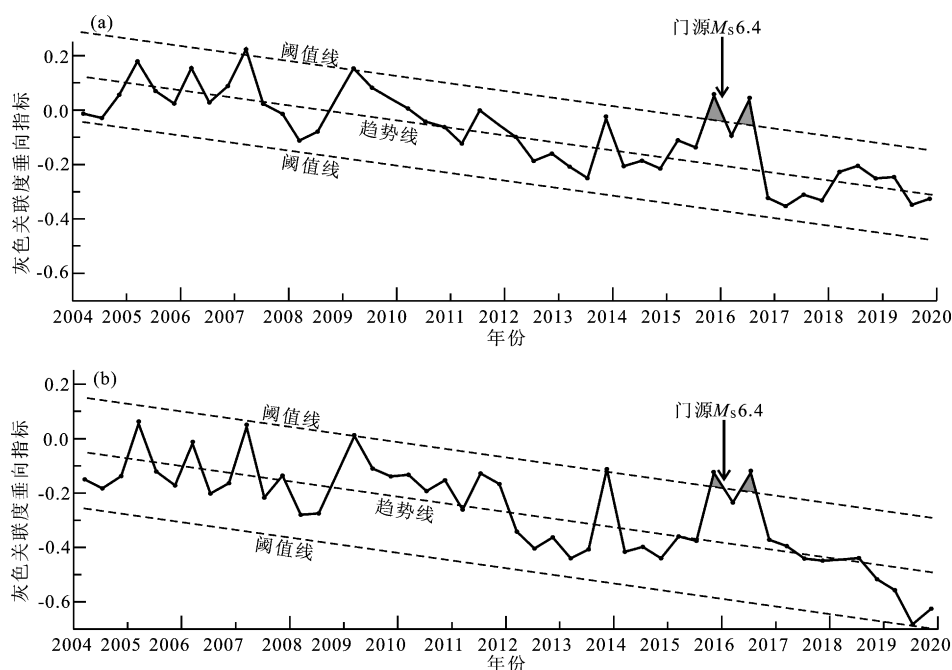


图4 祁连山断裂带 (a) 及门源震区周边半径 200 km 内 (b) 灰色关联度指标超限异常 (灰色块)
Fig. 4 Oversize anomalies (gray fields) of gray relativity index in the Qilianshan Mountain fracture zone (a) and within a radius of 200 km from the epicenter of the Menyuan earthquake (b)

揭示区域应力逐渐积累。②2015 年 3 月和 7 月未超出阈值, 2015 年 11 月整条祁连山断裂带和门源震区周边半径 200 km 内均出现自 2004 年以来最大的、超出阈值较多即明显的偏离“线性变化”的正断异常, 2 个月后发现 6 级多强震, 震后的 2016 年 7 月仍超出阈值, 反映震后调整或影响; 11 月回返。尽管门源震区附近未恢复至震前水平, 直到 2018 年 11 月才开始出现持续、显著的逆断加速变化, 与整条断裂带表现不同 (说明震区附近跨断层场地对震后调整及其影响过程的反映更为明显), 但无论是整条断裂带还是震区附近于 2016 年 11 月至 2019 年底均恢复至阈值线内正常状态。

这里还需说明的是, 祁连山断裂带及其中东段灰色关联度指标相对趋势线的均方差分别为 0.08 和 0.10, 震区附近更大, 显示继 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震后至 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震前的 11 年里, 祁连山断裂带中东段仍是断层活动水平偏高的区域, 能量继续积累; 而图 4 所示 2015 年 11 月整条断裂带超出阈值的程度比震区周边半径 200 km 范围内还略高, 原因在于整条断裂带以往活动水平偏低, 是 2015 年 11 月西岔河场地正断突跳、红柳峡场地正断趋势变幅略增 (场地位置见图 2, 观测曲线图略) 的综合作用结果。

4 结合其它资料的综合性分析

马瑾 (2016) 认为地震前兆是有的, 关键在于能否被观测到和被识别。构造力学实验所得应力—时间变化曲线显示震前变形过程存在稳态—亚稳态—亚失稳态 3 个阶段, 稳态阶段应力变化保持线性特征, 亚稳态阶段开始偏离线性, 显示应力释放、协同作用开始, 亚失稳态则是断层失稳前的最后阶段, 应力释放占据优势, 这一阶段应是震兆最丰富或变化最激烈的阶段。

以逆冲为主兼左旋走滑的 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震发生在以逆断左旋为主的祁连山断裂带中东段, 跨断层短水准观测显示震前存在长期且基本稳定的逆断性应力积累背景特性; 震前半年异常剧增; 震前 2 个月观测到以正断为主的协同性群体异常, 且主要体现在震区周边半径 200 km 范围内, 明显偏离了之前长达 11 年零 7 个月的逆断下降“线性变化”正常范围, 震时及震后维持数月又逐渐恢复。考虑到跨断层观测累积时间最多数十年、每期间隔 4 个月, 相对地质年代是“微动态”变化, 在 4 个月间隔期内, 与逆断背景相反的“正断”变化既可能表示断层活动特性“改变”, 更可

能仅反映逆断活动“减缓”。距门源地震震中 30 km、120 km 的门源台和湟源台分别在震前的 2015 年 8—9 月和 11 月开始出现定点连续倾斜观测的趋势转折异常(马震, 苏维刚, 2016), 其转折特性与跨断层资料一致、时间上也比较接近(跨断层观测每年 3, 7, 11 月 3 期, 2015 年 11 月所测异常是相对 7 月的差异变化)。

图 2 分别给出 2014 年 8—11 月、2014 年 12 月—2015 年 3 月、2015 年 4—7 月、2015 年 8—11 月 $M_L3.0$ 以上地震分布。从小震活动来看, $M_L \geq 3.0$ 小震主要分布在祁连山断裂带中东段, 龙首山南缘、祁连山北缘、皇城—塔尔庄、老虎山等断裂区域及其附近, 距震区不远, 在 2014 年 11 月, 2015 年 3 月、7 月 3 个观测期的地震震级不大、数量也不多(图 2a~c); 图 2d 所示 2015 年 8—11 月小震数量不仅增多, 2015 年 11 月 23 日与门源发震断层主断裂冷龙岭断裂相连的陶莱山断裂还发生了研究区内首次 $M_L \geq 5$ 中等地震, 加上其附近的数次小震, 震级、数量均明显提升, 门源 $M_s6.4$ 地震就发生于陶莱山断裂与冷龙岭断裂交会区, 构造关联。2015 年 11 月 23 日的地震其发震时间点与 2015 年 11 月的跨断层观测时间接近, 震中距门源 $M_s6.4$ 地震震中较近(115 km), 很可能是门源地震前相关断裂的部分能量预释放。另外, 距震中 246 km 的高台于震前数天观测到重力扰动性异常(刘芳等, 2019), 距西岔河跨断层异常场地较近, 说明门源地震前短期和临震异常都存在、最远可以达到 200 km 以外。这些情况至少满足构造力学实验所得亚失稳出现前偏离线性阶段的亚稳态特征。

震区周边半径 200 km 范围内跨断层异常增多, 且表现为与长期逆断下降趋势相反以正断为主的协同性变化, 定点连续倾斜观测和小震活动也有一定佐证, 可能揭示区域应力变化和“局部化增强”特性, 这也符合断层亚失稳过程的特点, 故有反映亚失稳状态特征的可能。由于跨断层观测周期较长、震前最后 1 期观测距震尚有 2 个月时间、场地条件也可能不够理想等原因, 加上研究区及其附近连续形变台站太少, 异常变幅还不是很剧烈, 亚失稳状态特征尚不够显著和明确。

5 结论

2016 年门源 $M_s6.4$ 地震前 2 个月, 祁连山断裂带尤其在其中东段跨断层流动短水准场地观测到以正断为主的协同性群体异常, 本文分析了跨断层异常时空演变特征、提炼了灰色关联度指标, 参考定点连续形变、小震活动等辅助资料, 对其异常机理进行探讨, 得到的结论如下:

(1) 观测曲线异常时空演变可能揭示区域应力变化与“局部化增强”。震前半年异常剧增; 震前 2 个月出现以正断为主的协同性群体异常, 断层逆断活动明显减缓或特性改变, 且相对集中于震区附近。

(2) 反映断裂活动趋势动态变化的灰色关联度指标显示“偏离线性”特征。震前 2 个月明显偏离了民乐—山丹 $M_s6.1$ 地震后长达 11 年零 7 个月的逆断下降“线性变化”正常范围, 出现正断转折性超限异常, 震时及震后维持数月后又显示恢复。

上述异常特征至少符合构造力学实验显示的偏离线性阶段的亚稳态特征, 震前 2 个月应力释放、断层协同活动已经开始; 同时也存在显示亚失稳状态特征的可能。

参考文献:

- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2003. 中国活动构造与地震活动[J]. 地学前缘, 10(增刊 1): 66-73.
- 郭树松, 祝意青, 赵云峰. 2016. 青海门源 $M_6.4$ 地震前重力场变化特征及其动力机制分析[J]. 大地测量与地球动力学, 36(4): 294-297.
- 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, 87-110.
- 李媛, 刘峡, 刘希康, 等. 2016. 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震前祁连山周边断层活动分析[J]. 大地测量与地球动力学, 36(4): 288-293.
- 刘芳, 祝意青, 赵云峰. 2019. 2016 年门源 6.4 级地震前连续重力频率特征分析[J]. 地震工程学报, 41(2): 469-475.
- 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, Si S, 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): 548–561.
- 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(4–5): 409–414.
- 马震,苏维刚. 2016. 2016年青海门源6.4级地震前青海定点形变异常[J]. 地震研究, 39(增刊1): 112–116.
- 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.
- 任雅琼,马瑾,刘培洵,等. 2016. 平直断层粘滑过程热场演化及失稳部位识别的实验研究[J]. 地震地质, 38(1): 65–76.
- 张希,贾鹏,李瑞莎,等. 2018. 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前跨断层水准前兆异常与震后变化[J]. 大地测量与地球动力学, 38(11): 1101–1106.
- 张希,贾鹏,唐红涛,等. 2016. 门源6.4级地震前跨断层水准前兆性指标异常与震后变化[J]. 大地测量与地球动力学, 36(4): 283–287.
- 张希,李心然,唐红涛. 2014a. 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,秦姗兰,贾鹏,等. 2019. 2016年门源 $M_s 6.4$ 地震孕育–发生的地形变特征[J]. 地震, 39(4): 27–38.
- 张希,唐红涛,李瑞莎,等. 2014b. 芦山地震前断层形变的中短期异常及同震影响[J]. 大地测量与地球动力学, 34(2): 1–5.
- 郑博文,龚文瑜,温少妍,等. 2018. 基于 Sentinel-1A 的青海门源 $M_s 5.9$ 级地震发震构造特征[J]. 地震地质, 40(4): 872–882.
- 卓燕群,郭彦双,汲云涛,等. 2013. 平直走滑断层亚失稳状态的位移场协同化特征: 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.

Discussion on the Mechanism of Short-term Anomalies for Cross-fault Short-leveling before the 2016 Menyuan $M_s 6.4$ Earthquake

ZHANG Xi¹, BAI Zhuoli¹, LIU Xia²

(1. The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

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

Abstract

In six months before the 2016 Menyuan $M_s 6.4$ earthquake, there were quite more anomalies of mobile cross-fault short-leveling sites within 200 km from the epicenter of the Qilianshan Mountain fracture zone, and collaborative group anomalies dominated by normal features were observed in two months before the earthquake. In this paper, based on the analysis of temporal and spatial evolution of cross-fault deformation and the extraction of the grey relativity index, combined with the auxiliary information of fixed-point continuous deformation and small earthquake activities, we discussed the anomaly mechanism. The results show that the short-leveling observation of cross-fault of Qilianshan Mountain fracture zone at least displayed a meta-stable feature in the short-term stage before Menyuan strong earthquake, deviating from the linear stage, which already had reflected the beginning of stress release and fault synergy, and did exist the possibility of reflecting the characteristics of meta-unstable state.

Keywords: the Menyuan earthquake; cross-fault deformation; short-term precursors; meta stable-meta unstable state