

呼图壁 $M_s 6.2$ 与精河 $M_s 6.6$ 地震前的 地形变异异常特征^{*}

张希¹, 方伟², 秦姗兰¹

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 利用 2012—2018 年跨断层流动水准观测资料, 提取北天山地区的断层形变趋势累积率和灰色关联度指标, 结合 2009—2017 年 GPS 速度场数据, 分析呼图壁 $M_s 6.2$ 与精河 $M_s 6.6$ 地震前的地形变异异常特征。结果表明: ① 呼图壁地震位于 GPS 压性变化最高值区边缘, 断层形变趋势累积量较大的测线相对集中在震区附近; 精河地震位于压应变较高值区和增强区, 震区附近也出现巴音沟、伊宁等跨断层高逆断趋势累积背景异常。② 2 次地震中, 震级较大的精河地震前跨断层灰色关联度指标异常较为显著, 震中周边半径 200, 300, 500 km 范围内均出现“逆断加速”中短期—短期异常; 且距震中越近, 异常幅度越大。

关键词: 北天山地区; 呼图壁地震; 精河地震; GPS; 跨断层形变指标; 灰色关联度指标

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)02-0253-09

0 引言

天山位于中亚腹地, 其两侧分别被构造稳定的塔里木地块和准噶尔地块所夹持, 受印度板块与欧亚大陆的碰撞推挤等动力作用, 天山山前和山体内部形成了一系列活动褶皱和以逆冲为主的断裂带, 构造活动强烈, 强震大震频发(张培震等, 2013), 是我国西部一条主要的活动构造与地震带, 一直备受关注(朱爽, 时爽爽, 2018)。其中在北天山地区, 自 20 世纪 70 年代起, 新疆维吾尔自治区地震局地震测绘研究院即开始了对其进行跨断层流动观测, 以水准观测为主, 由于测线改造或场地遭破坏, 连续资料分为 1973—1984 年、1985—2000 年、2001—2011 年、2012—2018 年 4 个阶段。方伟等(2016)分析了 2001—2011 年观测资料, 得到北天山地区构造活动及 6 级以上地震前的趋势性异常特征。北天山地区最近一次测线全面改造完成于 2011 年底, 有跨断层流动水准场地 13 处, 于 2012 年 4 月或 9 月起测(各场地有差异), 但有 1 处场地近 2 年被破坏, 因此余 12 处场地, 跨准噶尔南缘、霍尔果斯、独山子—安集海等活动断裂, 测线长度数百米至一千五百米左右,

常规观测为每年 4 月、9 月 2 期, 2017 年曾加密为 3 月、6 月、9 月、12 月 4 期, 目前已积累了 7 年的连续观测数据, 大多数观测曲线呈现与地质资料一致、有利于强震孕育的逆断特性, 具有研究和地震预测意义。

自 2012 年各场地开始积累新观测资料以来, 测区内发生了 2016 年 12 月 8 日呼图壁 $M_s 6.2$ 和 2017 年 8 月 9 日精河 $M_s 6.6$ 地震(2012 年 6 月新源虽发生了 $M_s 6.6$ 强震, 因只有部分场地的 1 期观测数据, 无法研究震前异常), 朱治国等(2018)利用 GPS 资料给出了 2015—2017 年相对 2013—2015 年精河震区附近地壳水平运动速率增大, 出现张压转换和最大剪应变高梯度带的结论。

本文利用 2012—2018 年跨断层流动水准观测新数据, 借助断层形变趋势累积率和灰色关联度指标进行分析, 结合 2009—2017 年 GPS 速度场数据计算所得面应变分布, 给出呼图壁 $M_s 6.2$ 与精河 $M_s 6.6$ 地震前的背景与中—短期地形变异异常特征。

1 断层形变趋势累积率与孕震背景分析

1.1 跨断层与 GPS 测点分布

呼图壁 $M_s 6.2$ 、精河 $M_s 6.6$ 地震均为以逆断

^{*} 收稿日期: 2019-03-22.

基金项目: 中国地震局地震预测研究所专项“2021—2030 年中国大陆地震重点监视防御区研究”资助。

错动为主的构造地震（刘建明等，2018；朱治国等，2018；王苏等，2018）。构造地震是地壳运动的产物，而 GPS、跨断层水准等地形变观测是获得地壳运动变化信息的直接途径。许多学者研究认为，强烈的构造地震多发生在地壳差异运动显著的区域：①利用 GPS 速度场计算得到的与相关断裂构造活动背景一致的剪切应变或面应变高值区或其边缘、应变差异变化高梯度带，可以反映局部区域强差异运动与应力应变集中特性（江在森等，2006，2009；朱治国等，2018）；②利

用水准观测所得到的与构造活动背景一致的跨断裂显著垂向差异变化区（陈兵等，2000；张希等，2014a）。

图 1 为新疆北天山地区跨断层流动水准场地与地球物理场 GPS 站点分布，跨断层流动水准场地所跨断裂如表 1 所示，各断裂活动性质均为逆断。李杰等（2010）、朱治国等（2018）分别利用 1998—2008 年、2013—2017 年 GPS 速度场资料获得了北天山地区以挤压缩短为主的活动特性结论，与地质资料一致。

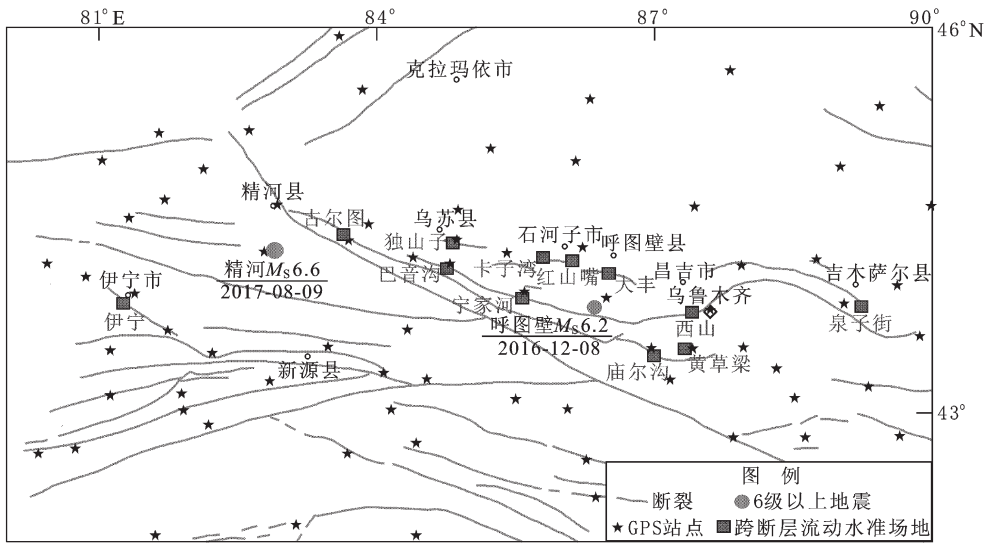


图 1 北天山地区跨断层流动水准场地与 GPS 站点分布

Fig. 1 Distribution of mobile cross – fault leveling sites and GPS points in Northern Tianshan area

表 1 北天山地区断层形变趋势累积率计算结果

Tab. 1 Computed trend accumulation rates for fault deformation in Northern Tianshan area

场地	测线	所跨断裂	2012 年—2016 年 9 月 趋势累积率	2012 年—2017 年 6 月 趋势累积率
黄草梁	2-1	南山山前断裂	0.27	0.30
西山	3-1	西山断裂	0.60	0.47
庙尔沟	4-1	准噶尔南缘断裂	0.16	0.17
泉子街	3-2	博格达弧形断裂	0.30	0.03
大丰	2-1, 2-3	霍尔果斯断裂	-0.75, -0.55	-0.71, -0.52
卡子湾	4-1	霍尔果斯断裂	0.83	0.85
红山嘴	3-2	霍尔果斯断裂	-0.03	-0.15
宁家河	3-1	准噶尔南缘断裂	-0.50	-0.53
独山子	3-1, 3-5	独山子—安集海断裂	-0.15, -0.30	-0.13, -0.17
巴音沟	3-1	准噶尔南缘断裂	-0.06	-0.32
古尔图	4-1	托托阿拉沟断裂	0.15	-0.05
伊宁	3-1	伊宁盆地北缘断裂	-0.52	-0.50

注：趋势累积率负值为逆断、正值为正断特性。

1.2 跨断层观测效能分析与趋势累积率指标提炼

陈兵等(2000)提出了趋势累积率指标,即通过式(1)计算青藏块体东北缘地区某场地某跨断层测线长时间尺度的趋势累积变化,反映一种广义应变的累积强度:

$$\sigma = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} (h_{k+1} - h_k) / (t_{k+1} - t_k)}{\sum_{k=1}^{n-1} |h_{k+1} - h_k| / (t_{k+1} - t_k)} \quad (1)$$

式中: $h_k, t_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 分别为下盘测点相对上盘测点的高差变化观测值和时间序列, 计算所得负值反映逆断、正值反映正断特性。若正逆断特性与地质背景一致且绝对值较大, 说明趋势变化

的有序性好, 反映应变积累时间较长或强度较高(李媛等, 2016; 张希等, 2018)。

本文对2012年至2016年9月(呼图壁地震前)、2012年至2017年6月(精河地震前)北天山地区12处流动水准场地14条跨断层测线(表1)的趋势累积率进行了计算(扣除了2017年3月泉子街3-2测线、宁家河3-1测线出现的与冰冻有关的干扰性突跳, 2013年9月卡子湾4-1测线出现的与水库蓄水有关的巨幅突跳, 通过线性内插或扣除巨幅突跳变化量使资料连续), 结果见表1和图2, 并通过最小二乘配置方法(江在森等, 2006, 2009)将2009—2015年、2015—2017年2个时段的GPS面应变等值线分布绘于图2。

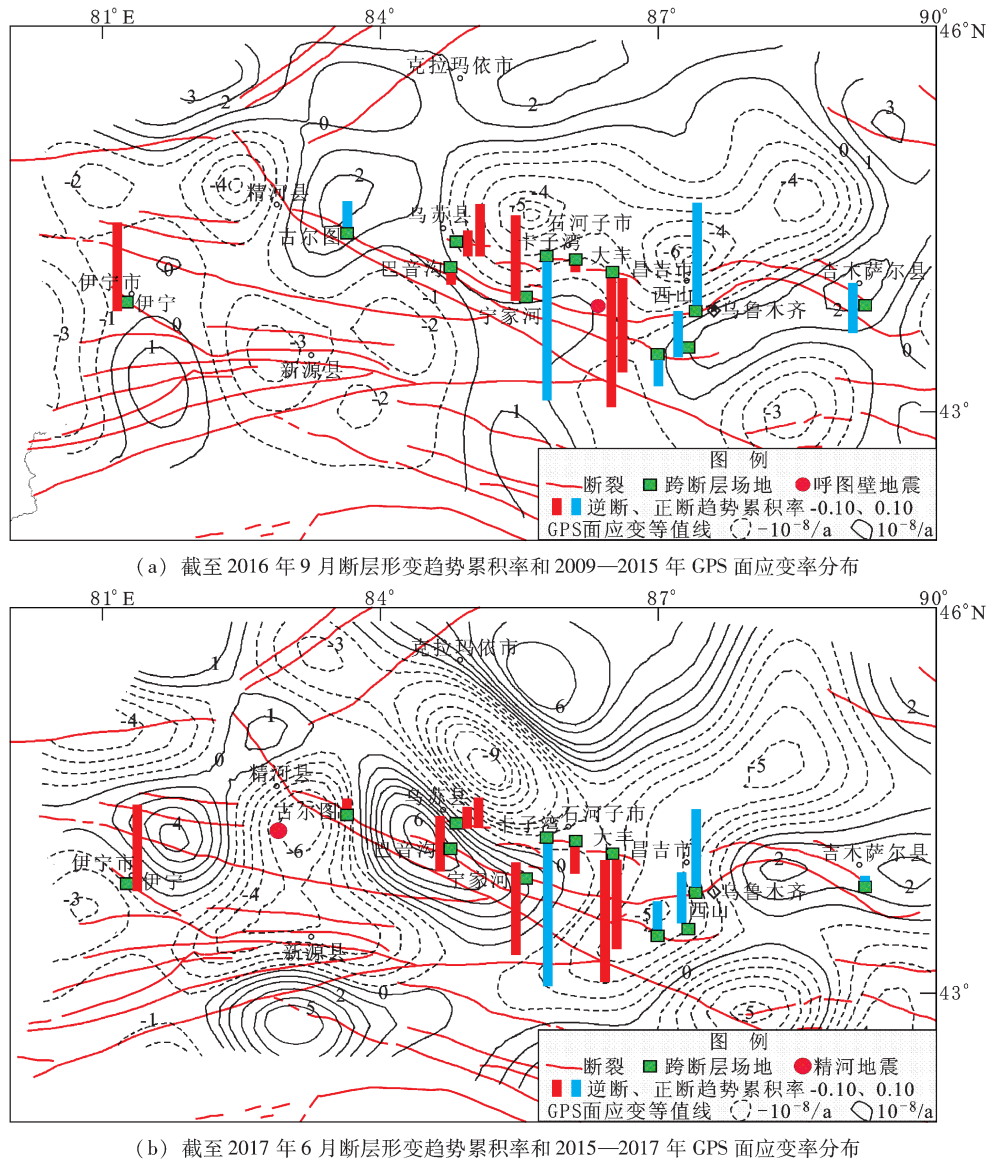


图2 断层形变趋势累积率与GPS面应变率分布

Fig. 2 Trend accumulation rates for fault deformation and distribution of GPS surface expansion strain rate.

由图 2 可以看出, 2 个时段的 GPS 面应变等值线均显示以挤压为主, 断层形变趋势累积率也显示逆断特性占多数的特征 (逆断趋势累积的测线分别占测线总数的 8/14 和 9/14), 这些均与北天山地区以逆断挤压为主的地质背景相符。

表 1 显示同跨准噶尔南缘断裂的庙尔沟、宁家河、巴音沟 3 处场地中有 2 处为逆断特性, 同跨霍尔果斯断裂的大丰、卡子湾、红山嘴 3 处场地中也有 2 处场地呈逆断特性。通过比较跨断层测线趋势累积率正断、逆断特性与长达 6 年的 GPS 面应变张压特性的一致性 (图 2a) 发现一致的测线占 11/14, 只有巴音沟、卡子湾、西山 3 处场地特性相反, 可能与相对稀疏的 GPS 站点密度所造成的解算过程中的低分辨率有关。

事实上, 地质资料所指的逆断, 反映的是断裂的总体、长期活动性质, 但某些场地呈现与总体逆断特性相反的正断变化, 其原因推测如下: ①从空间尺度来看, 断裂本身几何展布复杂, 活动特性可能存在分段差异, 加上跨断层场地测线不长, 且分散布设、独立观测, 每处场地仅能控制断裂的局部小段落, 场地条件也有差异; ②从时间尺度来看, 跨断层观测时间还不到 10 年, 北天山地区地形变观测也才数十年, 仅是地质年代里很小的一个段落, 观测到的“反向正断变化”可能仅表示该时间段逆断活动相对之前一段时间减缓, 且这样的场地只占少数。鉴于上述原因, 北天山地区现阶段的跨断层观测结果符合断裂活动的时空差异性 & 地形变观测实际 (图 2 所示 GPS 面应变分布也存在局部区域或某些时段反向拉张的情况, 不排除站点环境差异、干扰和解算误差等造成的站点间速度差异)。

综合分析认为, 2011 年底测线全面改造后获得的 2012—2018 年跨断层水准观测新数据总体上能反映出北天山地区以逆断挤压为主的构造活动特性, 具有观测效能和研究意义。

1.3 2 次地震前的孕震背景分析

从分析呼图壁与精河地震前孕震背景的角度, 笔者认为:

(1) 由图 2 可见, 2009—2015 年 GPS 面应变率总体上西弱、东强, 石河子市和昌吉市附近为

最高负值区, 高达 $-6 \times 10^{-8}/a$, 反映与地质背景一致的强挤压差异运动和应力应变集中状态, 2016 年呼图壁 $M_s 6.2$ 地震就位于该区边缘; 精河震区显示 $-4 \times 10^{-8}/a$ 较高压应变分布, 也显示一定程度应变积累背景。2015—2017 年 (GPS 观测实施于年中, 精河地震发生在 2017 年 8 月 9 日, 该时段速度场数据可以反映精河震前的水平地壳运动) 面应变率较 2009—2015 年增大, 显示东弱西强, 与上一时段相反, 中西部地壳差异运动增强, 由新源、古尔图至乌苏、乌苏以北出现先挤压、后拉张、再挤压交替变化的高梯度分布, 以挤压变化为主, 精河地震仍位于压性高值区内, 震中位置压应变率高值达到 $-6 \times 10^{-8}/a$, 较上一时段构造运动增强, 显示应变能积累加速特性; 而发生了呼图壁 $M_s 6.2$ 地震的东部区域相对偏弱。即使 2015—2017 年研究区西部应变率增强, 包含呼图壁地震影响因素, 这种影响也是有利于精河地震孕育发生的正影响。因此, GPS 资料对呼图壁和精河地震前孕震背景有所反映, 且与朱治国 (2018) 利用 2013—2017 年 GPS 资料的分析结果相符。

(2) 由图 2a 与表 1 可见, 呼图壁地震前, 多数跨断层测线不仅表现为逆断性趋势累积特征, 且趋势累积率绝对值较大, 可能反映强应变积累的测线相对集中在震区附近, 尤其是距震中 29 km 的大丰场地的 2 条测线、距震中 63 km 的宁家河的 1 条测线, 逆断性趋势累积率高达 $-0.50 \sim -0.75$ 。由图 2b 与表 1 可见, 相对图 2a 跨断层数据截止时间, 仅增加 9 个月的 2 期水准观测, 趋势累积率变化量虽然不大, 但以大丰场地为界, 大丰及其以东的测线趋势累积率总体减弱 (表 1 中前 5 处场地、6 条测线, 趋势累积率绝对值均值由 0.44 减小为 0.36), 以西的测线总体增强 (古尔图 4-1 测线由正断转为与地质资料一致的逆断特性; 而正逆断特性未变的 7 条测线中, 趋势累积率绝对值均值由 0.33 增为 0.38)。距精河地震最近的 3 处场地中, 距震中 63 km 的古尔图场地由正断转为逆断, 距震中 155 km 的巴音沟测线逆断趋势累积率明显增大, 距震中 139 km 的伊宁测线起测以来一直维持高逆断趋势累积特性。

综上可知,趋势累积率指标对呼图壁 $M_s6.2$ 和精河 $M_s6.2$ 地震都有背景异常反映;呼图壁 $M_s6.2$ 震后西部增强、东部减弱的特性也与前述 GPS 面应变变化特征一致。

2 灰色关联度中短期-短期指标异常分析

2.1 灰色关联度指标提取

北天山地区跨断层水准测线长度数百米至一千五百米左右,属近断裂区观测,反映场地所在小区域断层活动或大区域应力加载导致的形变应变。呼图壁 $M_s6.2$ 与精河 $M_s6.6$ 地震发震构造分别是齐古背斜以南深部隐伏断层(刘建明等, 2018)和库松木契克山前断裂(朱治国等, 2018),地震错动以逆断为主。尽管本文所用14条跨断层测线没有布设在发震断层上,但这2次地震及12处跨断层场地均位于以逆断挤压为主要活动特性的北天山构造区,受印度板块与欧亚大陆的碰撞推挤同一动力源作用,构造上存在关联。地震发生前中短期(1年内)至短期(3个月内)阶段,可能出现断层活动加速、应力加载或应力应变状态的改变、甚至断层微破裂或预位移,同一构造系的多条断层也可能相互影响,从而在大的

构造区某些敏感场地观测到异常。

灰色关联度指标可反映断裂活动的总体趋势及其动态演变,突出各场地观测值时序变化的共性特征,其加速或转折异常具有中短期-短期前兆意义(张希等, 2012, 2014a, b),可利用跨断层水准观测数据的归一化计算和灰色关联度加权合成实现。

具体计算方法如下:首先对每处场地形成以4月、9月为时间点的垂向活动时变曲线。一般每年4月、9月施测,但2017年加密为4期观测,3月、6月求高差均值并以4月为时间点,9月、12月求高差均值仍以9月为时间点;每个时间点高差观测或计算均值减去第1时间点高差观测或计算均值,使首次观测为0,突出时间点间相对变化;若跨断层测线不止1条,对相同时间点再求均值。由此可获得该场地跨断层垂向活动时序变化 $h_t(t = 1, 2, \dots, n; h_1 = 0)$, 时变曲线向下表示逆断、向上为正断特性。

由于各场地独立观测,场地条件与活动水平、特性存在差异,为提炼构造活动总体趋势,需将每处场地垂向活动序列除以其本底水平,使各场地间具有可比性。定义本底水平为其绝对值均值与离散度之和,则归一化后的场地 j 某时刻 $t(t = 1, 2, \dots, n)$ 无量纲的活动变化量为:

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

扣除本底水平后提取综合指标时,如果能增加与其它场地相似度较高的场地权重、减轻相似度偏低的场地权重,则有利于突出与构造活动相关的共性特征。设计算区域内有 m 处场地,每处场地垂向活动量为 $u_j^t(t = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 。要计算其中第 j 个场地相对其它 $m-1$ 个场地的灰色关联度 γ_j^0 , 则应以 $\{u_j^t | t = 1, 2, \dots, n\}$ 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,分辨系数 $\rho = 0.5$, u_l^t 与 u_j^t 的关联系数为:

$$\varphi_l(t) = \frac{\min_l \min_t |u_j^t - u_l^t| + \rho \max_l \max_t |u_j^t - u_l^t|}{|u_j^t - u_l^t| + \rho \max_l \max_t |u_j^t - u_l^t|} \quad (3)$$

$$\gamma_j^0 = \frac{1}{m-1} \sum_{l=1, l \neq j}^m \left[\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \varphi_l(t) \right] \quad (4)$$

式(2)计算所得 t 时间点的断层活动变化量为 u_j^t , 则该时间点无量纲的灰色关联度指标为:

$$\alpha^t = \frac{\sum_{j=1}^m \gamma_j^0 u_j^t}{\sum_{j=1}^m \gamma_j^0} \quad (5)$$

2.2 震前中短期-短期异常分析

本文计算北天山地区11处场地13条测线灰色关联度垂向指标(图2和表1显示卡子湾场地与地质背景相反的高正断趋势累积率,观测曲线

显示即使扣除 2013 年 9 月水库蓄水引起的 60.8 mm 的巨幅突跳, 之后每年仍继续上升, 平均变幅较大, 达 4.2 mm, 可能存在问题, 因此未参与计算), 如图 3 所示。从图 3 可以看到, 尽管整个北天山测区有下降、回升的起伏变化 (不排除观测季节的气候、冻土等影响因素), 但其主要的变化趋势仍然是与地质资料一致的逆断下降, 呼图壁地震前无明显异常; 而精河地震前的 2017 年上半年逆断加速显著, 这一现象是与精河地震有关、还是反映呼图壁震后影响, 需进一步分析。

首先, 对呼图壁 $M_s6.2$ 地震震区周边半径 200 km (该范围内有黄草梁、西山、庙尔沟、

大丰、红山嘴、宁家河、独山子、巴音沟 8 处场地)、300 km (增加古尔图 1 处场地)、500 km (再增加泉子街 1 处场地) 内跨断层场地计算灰色关联度垂向指标, 结果见图 4a-1。图 4a-1 显示在 2016 年 9 月出现略超出以往正常年变的正断转折突跳, 但未超出灰色关联度指标值序列的二倍均方差, 故异常并不明显。

对精河 $M_s6.6$ 地震震区周边半径 200 km (有独山子、巴音沟、古尔图、伊宁 4 处场地)、300 km (有红山嘴、宁家河、独山子、巴音沟、古尔图、伊宁 6 处场地)、500 km (除泉子街外 10 处场地) 内跨断层场地计算灰色关联度垂向综合指标, 结果如图 4a-2 所示。图中显示, 2017 年上半年 (有 3 月、6 月 2 期观测, 灰色关联度计算的时间点记为 4 月) 即震前 2~5 个月 3 条曲线均显示逆断加速特性, 尤其震区周边半径 200 km 与 300 km 范围内, 灰色关联度指标的变化幅度更大, 很可能反映震前中短期-短期阶段断层活动加速现象。图 5 为精河地震震区周边半径 200 km 范围内有不同程度逆断加速突跳变化的原始观测曲线 (测量中误差为 ± 0.25 mm/km, 即使最长达 1.5 km 的测线其误差也最多为 ± 0.38 mm, 图 5 所示加速突跳幅度为 1.99~3.27 mm, 未发现干扰问题, 因此异常可靠)。

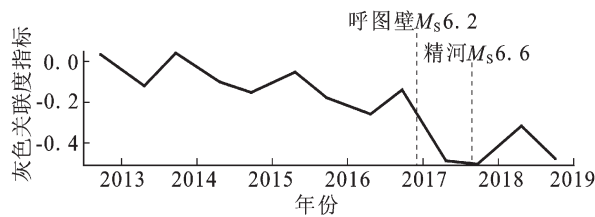


图 3 北天山地区灰色关联度指标曲线
(向下为逆断、向上为正断变化)

Fig. 3 Curves of grey relativity index in Northern Tianshan area (downward and upward variation displays thrust and normal features, respectively)

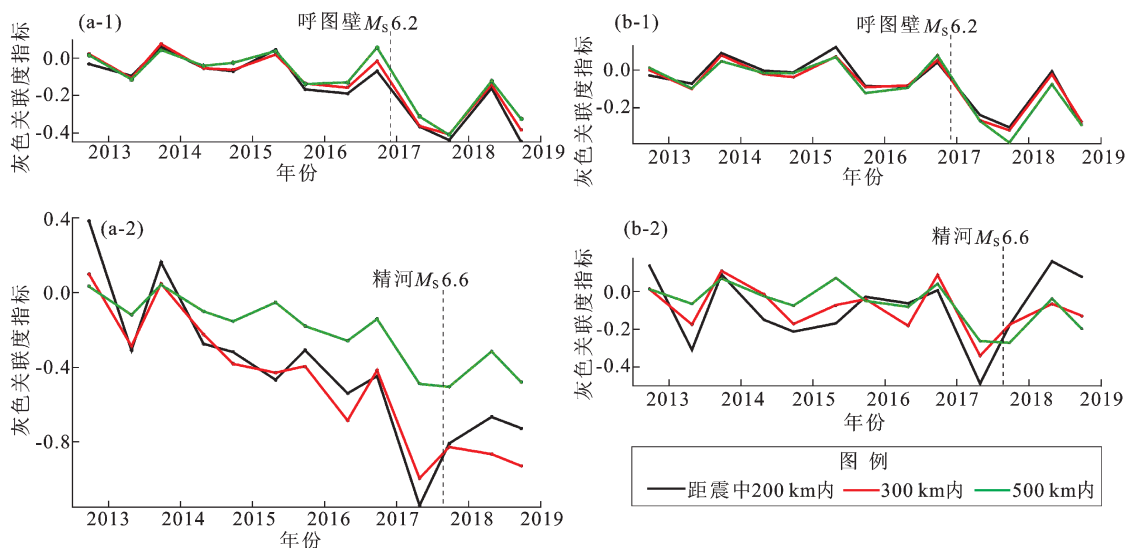


图 4 呼图壁和精河地震震区周边一定范围内的灰色关联度指标曲线 (a)
以及去趋势和基本年变量后灰色关联度指标曲线 (b)

Fig. 4 Curves of grey relativity index in the surrounding region of the Hutubi and Jinghe earthquakes (a)
and relative curves after deducting the trend and basic annual variations (b)

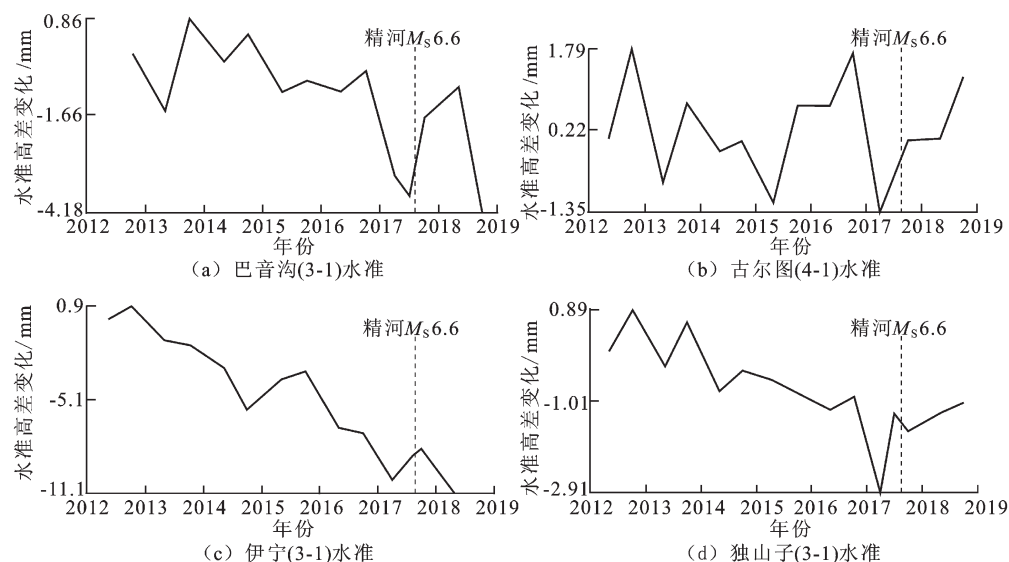


图5 精河地震前周边 200 km 内主要的跨断层异常观测曲线

Fig. 5 Main abnormal observational curves of cross-fault deformation in the range of 200 km from the epicenter before the Jinghe earthquake

图 4a-2 显示从起测至 2016 年 9 月精河地震前这相对稳定的 5 年间, 3 条曲线的逆断下降速度不同。若用直线做趋势线拟合, 震区周边半径 200, 300, 500 km 范围内 3 条曲线的趋势线斜率分别为 -0.18 、 -0.15 、 -0.05 , 距震中越近, 下降速度越快, 揭示能量积累背景也越显著。去掉该趋势, 再扣除基本年变量 (因这 5 年间数据仅 9 期, 用傅立叶公式扣除周期性年变效果不好, 故对该时段内 4 月和 9 月的灰色关联度指标值分别求均值, 再用 2012—2018 年所有 4 月和 9 月灰色关联度指标值分别减去 4 月和 9 月的均值, 以扣除基本年变和削弱季节差异, 突出 2017 年以后的异常变化), 结果见图 4b。由图 4b-2 可以看出, 距精河震中越近, 2017 年上半年的逆断突跳幅度越大 (均超出二倍均方差), 震后恢复趋势也越明显; 图 4b-1 显示呼图壁地震后 2017 年上半年的逆断加速距震中越远, 加速幅度还略增。由于图 4b-1 和 4b-2 所用场地部分重合, 比如呼图壁震区周边半径 200 km 范围内 8 处场地中就有 4 处场地位于精河震区周边 300 km 范围内, 综合图 3~5 分析, 图 4b-1 所示 2017 年上半年逆断加速反映呼图壁同震形变或震后影响的可能性不大, 更可能与精河地震有关。

从图 4b-2 还可以看出, 2013 年 4 月精河地震震区周边半径 200 km 范围内出现明显逆断加速

突跳, 但异常幅度还是小于精河地震前加速异常, 且距震中越远突跳幅度越小, 考虑到 2012 年 6 月新源发生了 $M_s6.6$ 地震, 该地震距精河地震震中仅 100 余千米, 因此该异常也有可能反映的是新源地震的震后影响 (震级高于呼图壁地震)。综合图 3~5 可知, 北天山地区跨断层资料对震级超过 6.5 的精河地震中短期-短期前兆异常、新源地震震后影响有相对明显的反映。

3 结论

本文利用 2012—2018 年跨断层流动水准观测资料, 提取北天山地区的跨断层形变趋势累积率和灰色关联度指标, 结合 2009—2017 年 GPS 速度场数据计算所得面应变分布, 综合分析了呼图壁 $M_s6.2$ 与精河 $M_s6.6$ 地震前的地形变异常特征, 得到以下结论:

(1) 2011 年底测线全面改造后, 获得的 2012 年以来跨断层流动水准观测新数据总体上能反映出北天山地区逆断挤压为主的构造活动特性, 具有观测效能和研究意义。

(2) 2016 年 12 月呼图壁 $M_s6.2$ 震区位于 2009—2015 年 GPS 资料显示的与构造活动背景一致的压性变化最高值区边缘; 跨断层水准表现为以逆断性趋势累积为主, 且累积量较大的测线相

对集中在震区附近,尤其是距震中 29 和 63 km 的大丰、宁家河场地,这些均反映出局部地壳强差异运动与应变能积累状况,揭示强震孕育背景。

精河 $M_s6.6$ 地震震区是 2009—2015 年压应变较高值区,且 2015—2017 年整个北天山地区面应变率增大,由 2009—2015 年的西弱东强转为西强东弱,精河地震震区及其北侧—北东侧出现挤压—拉张—挤压交替变化的高梯度分布,震区压应变率高值达到 $-6 \times 10^{-8}/a$,较上一时段同样表现为以挤压特性的构造运动增强,显示出应变能积累加速特性。而呼图壁地震后,断层形变趋势累积率也显示与 GPS 面应变变化特征一致的西部增强、东部减弱的特性。距精河地震震区较近的 3 处场地中,古尔图场地(距精河震中 63 km)由正断转为逆断,巴音沟场地(距精河震中 155 km)逆断趋势累积率明显上升,伊宁场地(距精河震中 139 km)一直维持高逆断趋势累积特性,这些均反映出精河地震震前应力应变集中与增强的背景信息。

(3) 跨断层灰色关联度指标显示呼图壁和精河 2 次地震中,震级较大、接近 7 级的精河地震前异常特征较为显著,震前数月震区周边半径 200, 300, 500 km 内均出现“逆断加速”前兆性异常,距震中越近,异常幅度越大,很可能反映震前中短期—短期阶段断层活动加速现象;而震前 5 年内,距震区越近,逆断变化的速度也越快,反映中期孕震背景。

新疆维吾尔自治区地震局地震测绘研究院提供了跨断层流动水准观测数据及干扰信息,在此表示感谢!

参考文献:

- 陈兵,江在森,赵振才. 2000. 中国西部断层形变趋势异常特征与地震活动关系研究[J]. 中国地震, 16(1): 77–85.
- 方伟,李杰,陈刚,等. 2016. 北天山地区活动构造形变特征与地震活动研究[J]. 内陆地震, 30(3): 232–242.
- 江在森,武艳强,方颖,等. 2009. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与应变场动态特征[J]. 地震, 29(1): 68–76.
- 江在森,杨国华,王敏,等. 2006. 中国大陆地壳运动与强震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3): 1–9.
- 李杰,王晓强,谭凯,等. 2010. 北天山现今活动构造的运动特征[J]. 大地测量与地球动力学, 30(6): 1–5.
- 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.
- 刘建明,王琼,李金,等. 2018. 2016 年 12 月 8 日呼图壁 $M_s6.2$ 地震序列重定位与发震构造[J]. 地震地质, 40(3): 566–578.
- 王苏,李建有,徐晓雅,等. 2018. 2016 年新疆阿克陶 $M_s6.7$ 地震和呼图壁 $M_s6.2$ 地震的余震触发研究[J]. 地震研究, 41(1): 98–103.
- 张培震,邓起东,张竹琪,等. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学:地球科学, 43(10): 1607–1620.
- 张希,贾鹏,张四新,等. 2018. 鄂尔多斯地块周缘地区构造活动与应变积累特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 38(4): 331–337.
- 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,唐红涛,李瑞莎,等. 2012. 基于灰色关联度的鲜水河断裂活动特性与大震关系研究[J]. 地震研究, 35(4): 500–505.
- 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.
- 朱爽,时爽爽. 2018. 天山地震带近期地壳形变分析及地震危险性评估[J]. 地震研究, 41(3): 423–429.
- 朱治国,秦姗兰,艾力夏提·玉山,等. 2018. 基于 GPS 的精河 $M_s6.6$ 级地震前地壳变形动态特征研究[J]. 中国地震, 34(3): 428–434.

Characteristics of Crustal Deformation Anomalies before the Hutubi $M_s6.2$ and Jinghe $M_s6.6$ Earthquakes

ZHANG Xi¹, FANG Wei², QIN Shanlan¹

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

(2. *Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China*)

Abstract

Using the observational data of mobile cross-fault leveling during 2012 – 2018, the trend accumulation rate and grey relativity index of fault deformation in North Tianshan area are extracted for the first time. Combined with the GPS velocity field result during 2009 – 2017, the characteristics of crustal deformation anomalies before the Hutubi $M_s6.2$ and Jinghe $M_s6.6$ earthquakes are comprehensively analyzed. The results show that: (1) The Hutubi earthquake was located at the edge of the highest value area of GPS compressive variation; observational lines with larger trend accumulation of fault deformation were relatively concentrated near the seismic area. The Jinghe earthquake was located in the higher compressive strain area and the enhancing area, there were also high thrust trend accumulation background abnormalities such as Bayingou and Yining near the seismic area. (2) Among these two earthquakes, the Jinghe earthquake with larger magnitude had relatively obvious medium-short-term and short-term “thrust accelerating” anomalies in the range of 200 km, 300 km and 500 km from the epicenter; and the nearer to the epicenter, the greater the anomaly amplitude.

Keywords: North Tianshan area; the Hutubi earthquake; the Jinghe earthquake; GPS; index of cross-fault deformation; grey relativity index