

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*

张希¹, 李心然², 唐红涛¹

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 复旦大学, 上海 200433)

摘要: 采用截至 2013 年底青藏块体东北缘的跨断层短水准流动观测资料, 基于灰色关联度计算, 提炼了祁连山—海原—六盘山、西秦岭主要构造断裂及分段的正逆断垂向活动综合指标, 对强震尤其是 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级震前中短期异常, 及与周边大震孕育一发生或影响的可能关系进行了研究。结果表明: (1) 6 级左右地震前相关构造及其附近中短期异常明显; 综合指标对与周边 8 级特大地震孕育一发生可能存在一定关联、大尺度区域构造应力场的变化也有一定程度反映。(2) 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级震前西秦岭构造北—西部至六盘山断裂综合指标异常显著且集中, 发震的西秦岭构造短期变化幅度较大。

关键词: 跨断层形变; 灰色关联度; 综合指标; 强震关系; 岷县漳县 6.6 级地震

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0572-06

0 引言

青藏块体东北缘跨断层短水准流动观测值时序变化及各场地在空间上形成的断层网络, 可在一定程度上获取祁连山—海原—六盘山、西秦岭等主要构造断裂的正逆断时空动态变化。该测线自 20 世纪 80 年代末起测, 长度多为数百米, 基本上在每年的 3、7、11 月观测, 具有强震前中短期即数月至 1 年左右前兆意义(车兆宏等, 1996; 江在森等, 2001)。以往的研究以观测曲线异常识别, 寻找加速、转折、突跳等异常(江在森等, 2001; 王双绪等, 2001)或异常指标提取(张希等, 2001, 2004)为主。由于场地分散, 对所在断裂带构造活动总体趋势特征及其动态变化、不同断裂间或区段间共性特征的提炼及差异性对比不够。

2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县 6.6 级地震发生在该区域跨断层短水准监测范围内, 是 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震后 10 年来首发 6 级以上地震。震前数月甚至数天、震后数月均有观测资料;

监测区内历史上还发生过永登 5.8 级、景泰 5.9 级等地震。测区外围、与其相邻且同受印度板块 NE 向推挤动力影响的巴颜喀拉地块近 10 余年连发昆仑山口西 8.1 级、汶川 8.0 级、玉树 7.1 级、芦山 7.0 级等大震。本文选取资料较连续、观测质量较好的 48 处跨断层形变观测场地, 通过对灰色关联度综合指标的改进、提炼(相对张希等(2012)对四川鲜水河断裂初步探索), 突出祁连山—海原—六盘山、西秦岭构造正逆断的共性与分段差异特征、量值水平及其动态演化过程, 寻找以往强震尤其是岷县漳县 6.6 级震前中短期异常, 探讨其与周边 7、8 级大震孕育一发生或影响的可能关系。

1 断层形变综合指标提取方法

对每个场地, 只用跨断层测段(下盘测点相对上盘测点)的高差观测值, 首先形成以 3、7、11 月为时间点的垂向活动时变曲线。计算步骤为: ①一般每年 3、7、11 月施测, 若有个别时段加密, 1~4 月求高差均值并以 3 月为时间点(以此类推, 5~8 月以 7 月、9~12 月以 11 月为时间

* 收稿日期: 2014-02-11.

基金项目: 中国地震局 2014 年度震情跟踪专项“南北带断层形变异常有效识别与地震预测研究”(2014010202)与地震行业专项《2016-2025 年我国地震危险性预测研究》01-03 子专题“大地形变在未来十年地震预测中的应用研究”联合资助。

点)。② 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,使首次观测值为零,突出时间点间相对变化。③ 若跨断层测段不止 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随时间变化序列 $h_t (t=1,2,\dots,n; h_1=0)$, 其时变曲线向下表示逆断、向上为正断特性。

由于跨断层场地分散,场地条件与活动水平、特性存在差异,为提炼断裂(段)活动总体趋势、共性特征,需对每个时间点观测或计算值,除以该场地本底活动水平。张希等(2012)定义本底水平为经上述 3 个步骤计算后所有时间点垂向活动量的绝对值均值。考虑到各场地时变曲线稳定性也不同,本文将改进为上述绝对值均值与离散度之和(相邻两时间点变化与起测以来变化均值之差的平方和均值、再计算平方根,稳定性越好、离散度越低),即场地 j 某时刻 $t (t=1,2,\dots,n)$ 除以该场地本底活动水平、无量纲的垂向活动变化量为

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

这样获得的断层垂向活动时序变化更为合理。

扣除本底水平后提炼综合指标时,各场地曲线仍不能简单地求均值合成。若增加与其它场地相似度相对较高的场地权重、减轻与其它场地相似度偏低的场地权重,有利于突出与该断裂或断裂段构造活动相关的共性特征。而灰色关联分析方法,是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近,以分析和确定因子间影响程度或因子对主行为的贡献测度而进行的一种分析方法,它根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间的关联程度(彭立国,陆明勇,2004;张希等,2012)。

设某断裂或断裂区段上有 m_0 个场地,每个场地垂向活动变化量为通过(1)式计算获得的 $u_j^t (t=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m_0)$ 。本文要计算其中第 j 个场地相对其它 m_0-1 个场地的灰色关联度 $\gamma_j^0, j=1,2,\dots,m_0$, 则 $\{u_j^t | t=1,2,\dots,n\}$ 为参考序列, $\{u_l^t | t=1,2,\dots,n\} (l=1,\dots,j-1,j+1,\dots,$

$m_0)$ 为比较序列, u_l^t 与 u_j^t 关联系数为

$$\xi_l(t) = \frac{\min_l \min_t |u_j^t - u_l^t| + \rho \max_l \max_t |u_j^t - u_l^t|}{|u_j^t - u_l^t| + \rho \max_l \max_t |u_j^t - u_l^t|} \quad (2)$$

分辨系数 $\rho=0.5$, 而

$$\gamma_j^0 = \frac{1}{m_0 - 1} \sum_{l=1, l \neq j}^{m_0} \left[\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \xi_l(t) \right] \quad (3)$$

式(1)计算所得时间 t 点的断层垂向活动变化量为 u_j^t , 则该时间点垂向综合指标定义为

$$\alpha^t = \frac{\sum_{j=1}^{m_0} \gamma_j^0 u_j^t}{\sum_{j=1}^{m_0} \gamma_j^0} \quad (4)$$

计算(2)式时,如果各场地垂向活动变化量起始时间点不同,取公共时间点计算。

2 青藏块体东北缘断层形变综合指标与强震关系分析

将本文短水准监测区主要断裂分成祁连带西段(图1中榆木山断裂及以西的6场地)、祁连带中东段(榆木山断裂以东至祁连山断裂带东端13场地)、海原断裂(5场地)、六盘山断裂(8场地)、西秦岭构造区北部(即西秦岭北缘断裂6场地)、西秦岭构造区西部(岷县—宕昌断裂4场地与礼县—罗家堡断裂1场地)、西秦岭构造区东部(成县盆地北缘断裂及其附近5场地),计算所得灰色关联度分别为祁连带西段 0.58~0.71、祁连带中东段 0.65~0.77、海原断裂 0.58~0.69、六盘山断裂 0.66~0.74、西秦岭构造北部 0.74~0.82、西秦岭构造西部 0.58~0.74、西秦岭构造东部 0.64~0.75,各断裂段场地间最大差异 0.16、平均 0.11。所得正逆断垂向活动综合指标时序变化见图2(各断裂观测初期资料不稳定、起始时间也不完全一致,对测区以外 1990 年共和 7 级地震无显著反映。为方便对比,图2截取 1989 年以后变化曲线来统一展示)。

地质信息上(邓起东等,2002),各断裂构造存在不同程度关联,尤其是祁连山—海原—六盘山断裂,垂向方向以逆断为主,但西秦岭构造东

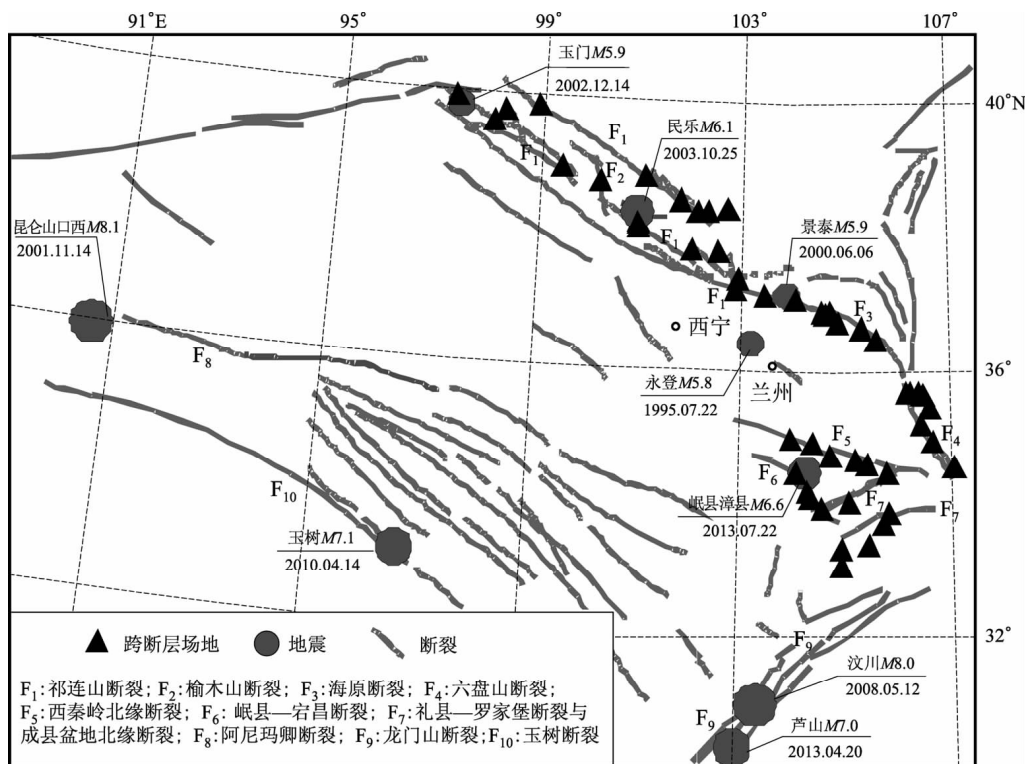


图1 青藏块体东北缘及其外围构造断裂与所选跨断层场地分布

Fig. 1 Distribution of tectonic faults and the selected cross-fault sites in and around the northeastern margin of Qinghai-Tibet block

部成县盆地北缘断裂未查到确定性特征描述、六盘山断裂历史上均有正断与逆断形迹。图2中逆断特性相对明显、稳定的有海原断裂、祁连带中东段、西秦岭构造尤其北部与东部,总体上曲线下下降即逆断为主,仅在部分时段转平甚至出现正断性的上升(持续时间比逆断下降的时间明显要短);祁连带西段2002年以前基本显示先逆断下降数年、之后短期(仅一、两期观测)反向正断突跳、再恢复下降的趋势特征,逆断下降的时间更长,2002年以后才出现正断上升为主的趋势变化;六盘山断裂逆断特性不突出。地质特征是长期、概括性的,跨断层观测仅数十年、测线短,反映与地震孕育—发生—调整、场地环境等多因素有关的微动态变化,从图2所示7条断裂段整体变化来看,逆断特性还是较正断特性略微明显,与地质背景在一定程度上具有一致性。

(1) 1995年7月22日永登5.8级地震发生在祁连带东端南侧数十千米处、监测区中部,周围断裂多且存在不同程度关联。距祁连山—海原断裂、西秦岭构造北部最近的场地仅100多千米,距

其它断裂最近的场地不过二、三百千米。故震前数月至1年多时间内异常相对明显,较近的祁连带中东段、西秦岭构造区北部逆断加速显著,海原断裂反向正断突跳;稍远的六盘山断裂尖点突跳,西秦岭构造区东部逆断加速相对短暂、祁连带西段反向正断突跳,较海原断裂弱。异常范围虽大,但其程度总体上近强、远弱;震后基本显示,曾逆断加速的段落下降减缓、反向正断突跳的逐渐恢复逆断。

(2) 2000年6月6日景泰5.9级地震发生在构造关联的祁连山—海原—六盘山断裂带的偏中间位置、祁连带中东段与海原断裂交汇区,距西秦岭北缘断裂最近场地不到300 km。震前中短期阶段异常也比较明显,祁连带正断反向尤其中东段、海原断裂逆断加速—转折,西秦岭构造北—西部尤其是北部出现过逆断加速,近强远弱的大体趋势。

但与永登5.8级地震前不同的是,1999年前后直至景泰5.9级震后的2001年,即昆仑山口西(距跨断层场地最近700多千米、最远约1500 km)

8.1 级大震前, 图 2 中短水准监测区过半断裂段出现明显趋势转向、且多维持数年(正断转折为主, 如祁连带两段尤其中东段, 其上升趋势持续到 2002 年, 海原断裂持续到 2003 年, 西秦岭构造西部由正断上升转为弱逆断、西秦岭构造北部正断转向持续到 2002 年), 即玉门 5.9 级或民乐—山丹 6.1 级地震前。反映大范围区域、一定程度上相似或者说相对一致的变化, 鉴于测点分布于青藏块体东北部的构造断裂, 不排除挤压减弱可能, 即与其边缘 8.1 级大震孕育一发生的一定程度关联。图 2 显示该次大震对祁连带尤其西段调整影响(祁连带西段 2002 年前每次正断突跳上升后总会逐渐恢复逆断下降, 2002 年至今总体上却呈正断上升趋势; 祁连带中东段 1999 年正断转折后也维持了较长时间), 玉门 5.9 级地震前 1 月内祁连带

西段正断突跳、民乐—山丹 6.1 级地震前 1 年祁连带中东段出现正断突跳尖点, 昆仑山口西 8.1 级地震后调整影响对这两次地震发生有利(1999 年及以后站点较密集的大空间尺度 GPS 速度场结果显示, 1999~2001 年祁连带中—西段存在能量积累背景; 2001~2004 年反映与图 2 一致的大震调整影响, 可能促使潜在危险区失稳, 张希等(2010))。

(3) 2004~2005 年前后, 图 2 中短水准监测区 7 条断裂段中有 6 条明显趋势转向, 6 条趋势转向段落中又有 5 条反映与地质背景、长期形变趋势方向一致、不同程度的逆断特性(祁连带两段、海原与六盘山断裂、西秦岭构造北部逆断下降, 只有西秦岭构造西部正断上升), 与昆仑山口西 8.1 级地震前正断转折的特性相反, 且持续数年至 2008 年 5 月 8 日汶川 8 级地震前(发震构造为测

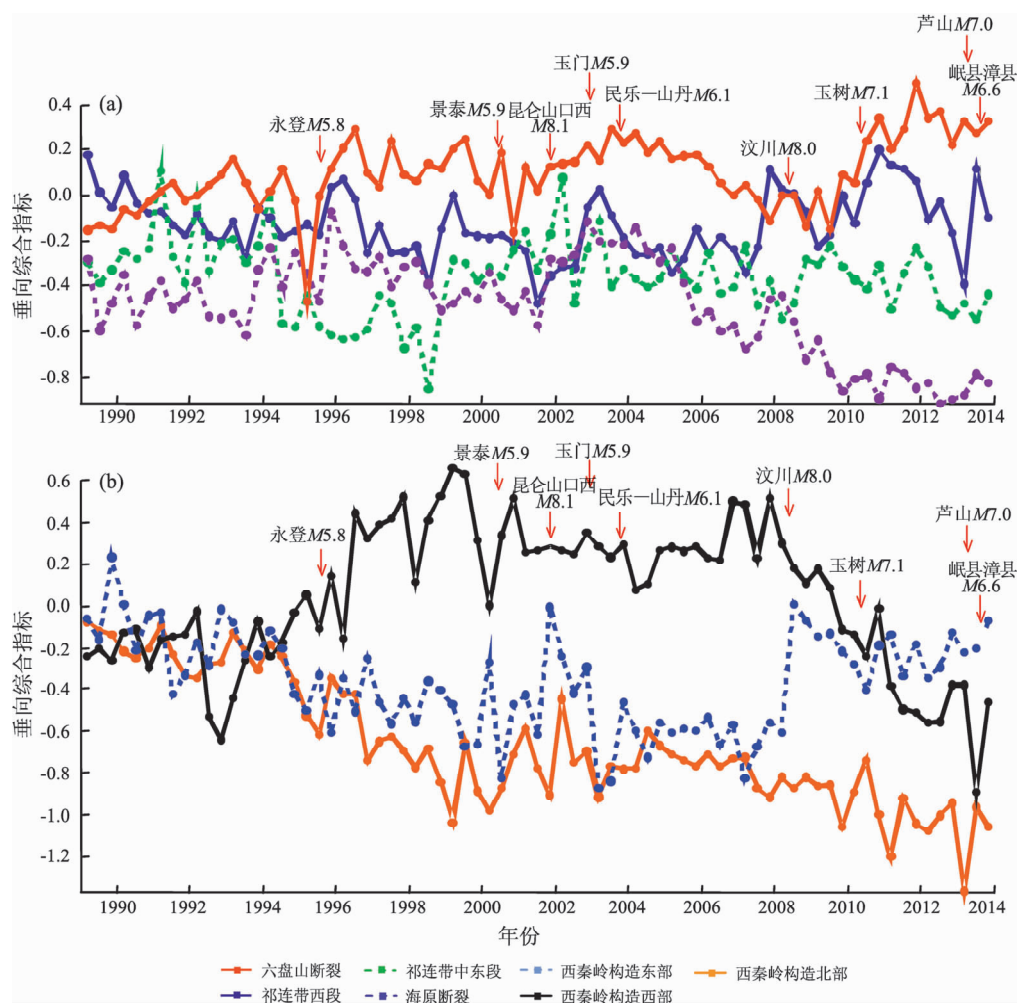


图 2 青藏块体东北缘主要构造断裂及分段断层形变垂向综合指标时序变化

Fig. 2 Time-variation of vertical synthetic norm for fault deformation of main faults and their segments in the northeastern margin of Qinghai-Tibet block

区以南的龙门山断裂,震中距离本文的短水准监测区最近场地 200 多千米、最远约 1 200 km)。若对空间尺度更大的 GPS 水平运动资料计算断裂两侧各延伸 100 km 范围内相对运动,结果显示 2004 ~ 2007 年相对 2001 ~ 2004 年祁连带(2001 ~ 2004 年祁连带西段挤压分量为 0.3 mm/a、中东段为 1.9 mm/a,2004 ~ 2007 年分别增为 2.5 mm/a、2.3 mm/a)与西秦岭构造北—西部(2001 ~ 2004 年北部挤压分量为 0.3 mm/a、西部 0.6 mm/a,2004 ~ 2007 年分别增为 0.8 mm/a、2.8 mm/a))挤压增速,海原断裂西段也由 2001 ~ 2004 年的弱拉张转为弱挤压。综合来看,可能反映短水准监测区在外围昆仑山口西 8.1 级地震、内部玉门 5.9 级与民乐—山丹 6.1 级地震后经一段时间调整,构造应力场恢复—增强趋势;结合 2004 年前后地球自转转折即减速变化(陈学忠等,2013),对测区外围、与其相邻且同受印度板块 NE 向推挤动力影响的巴颜喀拉地块汶川大震及随后的 2010 年玉树 7.1 级地震发生有利(7、8 级大震的孕震应力场范围相对较大)。汶川震前数月祁连带西段、海原断裂、西秦岭构造北部出现新的正断突跳或逆断加速;本测区内跨断层形变反映的汶川同震影响在西秦岭构造东部相对显著。

(4) 汶川震后至 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级震前(汶川以西 600 多千米玉树断裂),综合指标曲线多继续汶川震前趋势特征,只有西秦岭构造西部、祁连带中东段明显改变,震前异常不很显著。玉树震后 1 年多,震区 NEE 方向的西秦岭构造西—北部在延续汶川震后趋势的基础上逆断加速、六盘山断裂明显正断加速,基本与其长期趋势方向一致,不排除玉树震后影响(促进断层活动的影响可能为主),对 2013 年 7 月该区内岷县漳县 6.6 级强震的发生有利。

(5) 2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级(位于龙门山断裂南段,距本测区最近场地近 400 km)、7 月岷县漳县 6.6 级(位于测区内西秦岭构造区西部)震前中短期阶段,图 2 中过半断裂(祁连带西段、六盘山断裂、西秦岭构造区北—西部)出现新的显著加速或转折变化,与构造背景一致的逆断下降为主(对 GPS 水平运动资料计算断裂两侧各延伸 100 km 范围内相对运动,2011 ~ 2013 年相对 2009 ~ 2011 年祁连带、六盘山断裂、西秦岭构造

西部挤压增速,分别由 1.0 mm/a、0.9 mm/a、1.2 mm/a 增为 2.3 mm/a、1.5 mm/a、2.6 mm/a)。其中,测区东部西秦岭构造北—西部至六盘山断裂异常显著且最集中,可能反映 6.6 级震前异常;震前数天至 4 个月(即 2013 年 3 ~ 7 月,2013 年 7 月观测于岷县漳县 6.6 级地震前完成,尤其西秦岭构造区实施于震前数天;震后数天震区附近若干场地复测,本文将其值与 11 月观测值平均,以反映震后变化),震区及附近的西秦岭构造西部明显加速、北部加速—转折形成尖点,六盘山断裂也出现转折(发震的西秦岭构造区变幅较大,震后呈转折恢复迹象),更有短期意义。测区西端的祁连带西段则是另一个异常较明显、但尚未发震的构造区域。

3 结论

(1) 本监测区 6 级左右震前发震及相邻存在构造关联的断裂段中短期综合指标异常相对明显,逆断加速或反向突跳为主。发生在测区中部、多断裂交汇区及其附近的永登与景泰震前异常数量更多、异常程度也更为显著;玉门 5.9 级、民乐 6.1 级地震连发与昆仑山口西 8.1 级地震调整影响有关。

(2) 测区外围稍远的玉树地震和芦山地震前,本监测区中短期异常不很显著或前兆意义不很明确;但昆仑山口西、汶川地震,尤其汶川 8 级特大地震前数年,过半断裂其综合指标曲线出现明显趋势转向、且持续性好,参考大空间尺度 GPS 速度场结果与地球自转变化,笔者认为对与特大地震孕育—发生可能存在一定关联、震区周围大尺度区域构造应力场的变化有一定程度反映。

(3) 2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级震前西秦岭构造北—西部至六盘山断裂综合指标异常显著且集中,发震的西秦岭构造短期变化幅度较大。

参考文献:

- 车兆宏,刘善华,刘天海,等. 1996. 用流动形变观测判定强震地点的研究[J]. 地壳形变与地震,16(1):46-51.
- 陈学忠,李艳娥,王恒信,等. 2013. 2004 年印尼苏门达腊 M_w 9.0 地震前地震活动增强现象及其与地球自转的关系[J]. 地球物理学报,56(1):79-90.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国

- 科学(D 辑), 32(12): 1020–1030.
- 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, 44–46, 87–105.
- 彭立国, 陆明勇. 2004. 灰色系统理论在地震预报中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 24(2): 120–123.
- 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.
- 张希, 江在森, 王双绪, 等. 2001. 我国西部近期应变强度比动态演化特征[J]. 地震研究, 24(2): 115–120.
- 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, 王双绪, 张晓亮, 等. 2010. 昆仑山与汶川强烈地震对青藏块体东北缘地壳运动及应变积累的影响[J]. 地球学报, 31(1): 32–42.
- 张希, 薛富平, 王双绪. 2004. 大姚、民乐—山丹地震前的中短期前兆[J]. 大地测量与地球动力学, 24(4): 57–63.

Abnormities of Synthetic Norms for Fault Deformation in the Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Block and their Relationship with Strong Earthquakes Containing Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake

ZHANG Xi¹, LI Xin-ran², TANG Hong-tao¹

(1. *The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shannxi, China*)

(2. *Fudan University, Shanghai 200433, China*)

Abstract

Based on computation of grey relation degree, using mobile observation data of cross-fault short-leveling up to the end of 2013, we refine the synthetic norms for normal-thrust vertical activity of main fractures and their segments in Qilian Mountain-Haiyuan-Liupan Mountain and Western Qinling Mountains, and studied the middle-short-term abnormities before the strong earthquakes especially the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake in 2013, and their possible relationship with preparation, occurrence and influence of strong earthquake in the surrounding area. The results show that: (1) There existed obvious medium-short-term abnormities before the earthquake of magnitude about $M_s6.0$ in the related tectonic region and its nearby. The synthetic norms are related to the preparation and occurrence of $M_s8.0$ earthquakes, and could reflect the variation of large-scope regional tectonic strain field. (2) Before the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake, the abnormities of synthetic norm were remarkable and concentrated from the north and west of Western Qinling Mountains Faults to Liupan Mountain Fault, and the short-term variation range was relatively obvious at the seismogenic structure of Western Qinling Mountains Fault.

Key words: fault deformation; grey relation degree; synthetic norms; relation to strong earthquakes; Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake