

唐红涛、张学刚、高子让等,2019,基于合成速率法的青藏块体东北缘断裂活动分析,中国地震,35(2),319~326.

基于合成速率法的青藏块体 东北缘断裂活动分析

唐红涛¹⁾ 张学刚²⁾ 高子让³⁾ 丁国丽⁴⁾ 李瑞莎¹⁾

1) 中国地震局第二监测中心,西安 710054

2) 青海省测绘质量监督检验中心,西宁 810001

3) 湖南省第二测绘院,长沙 410118

4) 国家测绘地理信息局第一航测遥感院,西安 710054

摘要 基于合成速率法、趋势累积率法与跨断层资料等的结合,从时空的不同角度分析了青藏块体东北缘主要断裂应变积累的运动特征。结果显示:①2010~2016年,祁连山断裂带呈微弱拉张的运动态势,海原断裂带由张转压,六盘山断裂带在门源地震前显示张性运动,震后发生转折;②长期来看,基于趋势累积率 D_c 的计算结果显示了祁连山断裂带中、西段累积应变略高于东段,从量值上看整个青藏块体东北缘 D_c 高值区位于六盘山断裂带附近。

关键词: 合成速率 趋势累积率 跨断层 青藏块体东北缘 断裂

[文章编号] 1001-4683(2019)02-0319-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

我国大陆地壳运动的主要动力源自印度板块北推,当遇到坚硬的阿拉善、鄂尔多斯地块,地壳物质便由鄂尔多斯地块西南缘向南运移,从而构成了我国中西部地震多发的南北地震带这一地壳活动的重要组成部分(张培震等,2013;王双绪等,2005、2012;张希等,2004;李瑞莎等,2012;苏琴,2005)。该构造过程中的青藏块体东北缘处于青藏高原、阿拉善地块以及鄂尔多斯地块等相互碰撞、挤压的物质迁移交汇区,对该地区地壳运动的监测有助于分析研究我国地壳整体运动特征。2008年汶川8.0级地震后,南北地震带进入了地震高发期,断层活动频繁,2017年该地区发生了门源6.4级地震,因此,对青藏块体东北缘的观测研究显得尤为重要。

中国地震局第二监测中心自20世纪80年代起,通过跨断层水准、基线等手段对该地区进行了断层活动性监测,至今已累积了长达30多年的观测资料。本文综合运用合成速率法与趋势累积率,对祁连山、海原、六盘山断裂带跨断层水准资料进行了处理分析,进而揭示了门源地震前及邻近期内青藏块体东北缘的地壳运动特征与断层活动情况。

[收稿日期] 2017-03-19; [修定日期] 2018-11-23

[项目类别] 中国综合地球物理场观测大华北地区项目(201508009)、中国地震局地震科技星火计划项目(XH17062Y)共同资助

[作者简介] 唐红涛,男,1980年生,高级工程师,主要从事地壳形变测量与地震活动研究。E-mail:649585393@qq.com

1 区域构造运动特征

青藏块体东北缘内部自北向南发育着 NWW-NW 向的新构造时期以来的活动断裂带,主要包括:祁连山北缘断裂带、昌马-俄博断裂、冷龙岭断裂、阴凹槽断裂、香山-天景山断裂、海原断裂及六盘山断裂等(图 1)。受印度板块北推碰撞欧亚大陆的主动力量驱动,加之受到相对稳定的阿拉善地块、鄂尔多斯地块相当力度的阻挡(丁国瑜,1991;虢顺民等,2000;李清河等,1999;张国民等,2004;鲁如魁等,2008;吴满路等,2008;张先康等,2008,方颖等,2009;姜卫平等,2008;吴云等,2002;朱文耀等,1999;张强等,2000;国家地震局地质研究所等,1993),青藏块体东北缘活动断裂带地质构造活动以 NE 向挤压-逆冲和走滑-旋转(左旋走滑)为主要特征。

整个青藏块体东北缘地区布设了 40 个跨断层监测点(图 1),监测场地自西向东分布较为均匀,每年观测 3 个周期(分别在 3、7、11 月)。图 1 中数据的截止时间为 2016 年 11 月,红色标注的跨断层场地为中-长期异常监测点,蓝色场地为无异常监测点。

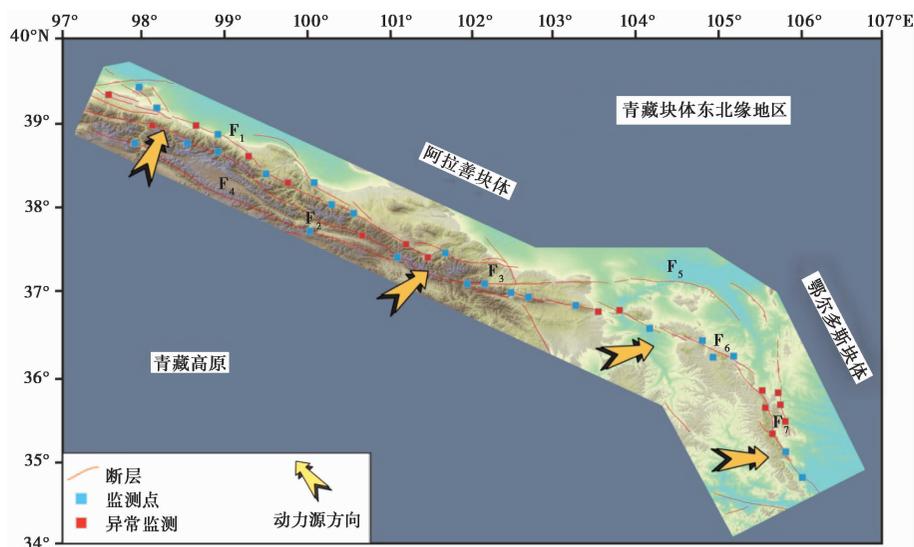


图 1 青藏块体东北缘监测点分布

F_1 : 祁连山北缘断裂带; F_2 : 昌马-俄博断裂; F_3 : 冷龙岭断裂; F_4 : 阴凹槽断裂;
 F_5 : 香山-天景山断裂; F_6 : 海原断裂; F_7 : 六盘山断裂

2 方法与处理分析

2.1 合成速率法

本文使用的合成速率法是将同一断裂带上的异常监测点进行对比,从整体上分析该断裂活动的总体特征,把多个场地数据经该方法处理后绘制在同一个图上,观察其活动性质是否具有-致性,从而获取断裂带附近区域应变积累状况。若研究区域再扩大,可将多条断裂进行速率合成以对比分析。监测点第 j 年的平均年变化速率为(孙军等,2014;陈兵等,2000;王永安等,2011)

$$v_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^j - h_i^{j-1}), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, h_i^j 为第 j 年的第 i 个观测值; n 为 1 年观测总期数。当 $v_j > 0$ 时, 表示断层上盘上升; 当 $v_j < 0$ 时, 表示断层上盘下降; 当 $v_j = 0$ 时, 表示断层上、下盘相对稳定, 无相对运动。

把同一断裂上的跨断层监测点的年平均速率的均值视为该断裂运动的合成速率, 则断裂第 j 年合成速率 \bar{v}_j 为

$$\bar{v}_j = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^m v_{jh} \quad (2)$$

2.2 解算分析

根据合成速率理论, 本文对青藏块体东北缘地区祁连山断裂带、海原断裂带及六盘山断裂带进行了合成速率解算分析, 并绘制了每个测点的年变化速率(图 2~5)及每个断裂的合成速率时序图(图 6), 以研究同一断层不同时段与不同断层之间的运动差异特征。为了较好地反映断层的活动特性, 本文所选资料均为以往观测稳定的跨断层短水准数据。

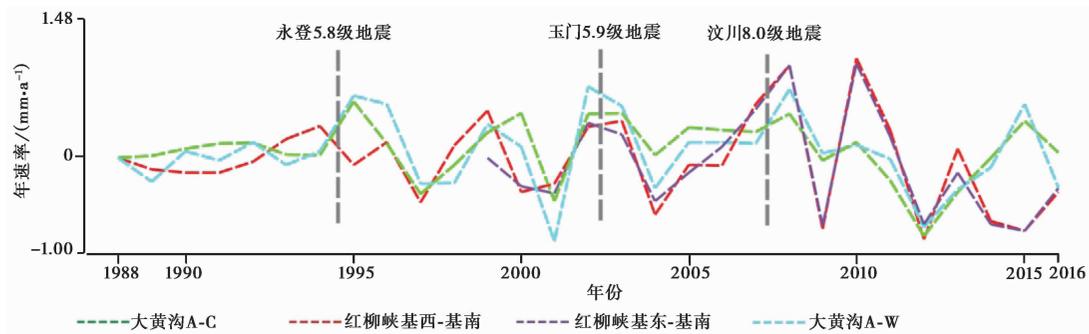


图 2 祁连山断裂带西段测点年平均活动速率

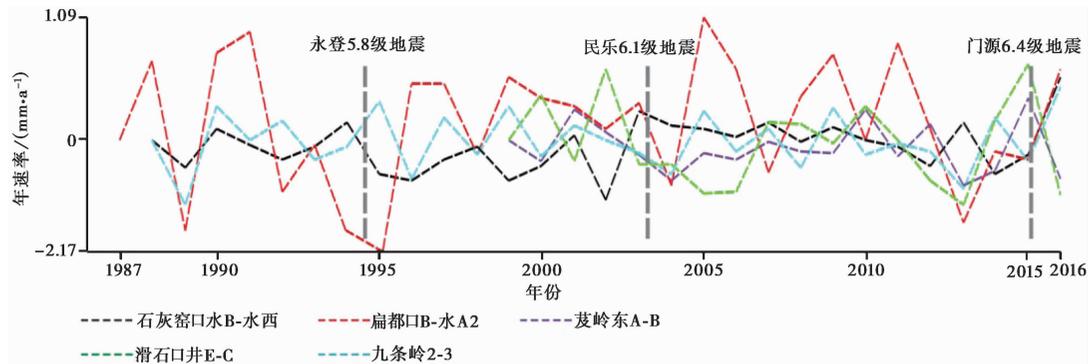


图 3 祁连山断裂带东段测点年平均活动速率

2.2.1 祁连山断裂带西段

由于祁连山断裂带 EW 向空间跨度较大, 本文计算与分析时将其分为祁连山断裂带西段与东段。由图 2 可知, 红柳峡场地开始观测时间较晚, 4 个场地年平均活动速率在时间轴上表现较为一致(1997、2001、2004、2008、2012 年等时间节点变化规律明显一致), 玉门 5.9 级、汶川 8.0 级地震前, 曲线显示了断裂由张一压的活动特征, 2010~2016 年间, 多个测点呈

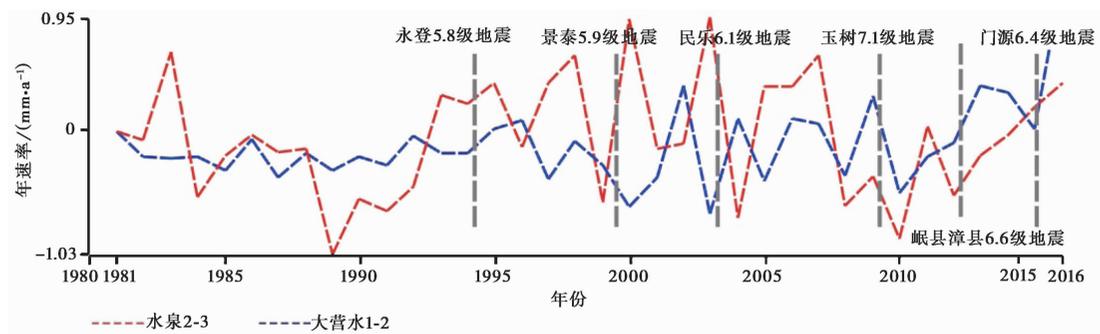


图4 海原断裂带测点年平均活动速率

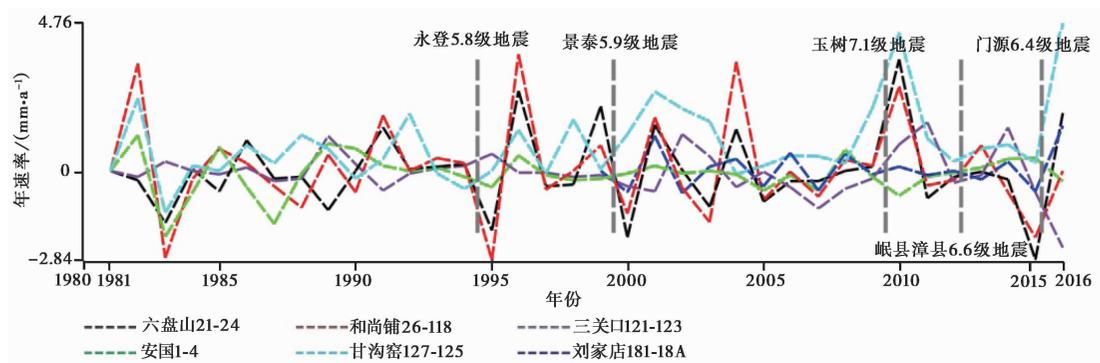


图5 六盘山断裂带测点年平均活动速率

现张性运动状态。

2.2.2 祁连山断裂带东段

祁连山断裂带东段扁都口场地 B-水 A2 测段表现为运动速率起伏较大,但其起伏态势与其他测段有多点的时间一致性(图3)。从该5处场地曲线整体来看,在2010~2016年间,多表现为断裂由负转正的变化规律,尤其从2016年门源6.4级地震前2年开始,统一呈现断裂张一压的活动特征。

2.2.3 海原断裂带

由图4可知,该断裂带活动在时间上有显著的分段性变化规律,1981~1999年断层活动较弱,1999~2005年断层活动较为活跃,其间发生了景泰5.9级、民乐6.1级地震,2010~2016年,异常测段均表现为由张一压的运动态势,曲线线性趋势走向显著,此区间发生了岷县漳县6.6级、门源6.4级地震,目前海原断裂带仍趋向压性活动变化。

2.2.4 六盘山断裂带

该断裂带中长期异常监测点分布相对集中(图1),其年平均活动速率时序曲线有显著的一致性(图5)。自1981年开始观测至2016年,该断裂带多处监测点在许多时点呈现断裂活动特征的明显一致性(如1982、1983、1995、1996、2000、2001、2004、2010年等)。从图5可知,永登5.8级、景泰5.9级、玉树7.1级地震同震反应较大,均出现了震后张、拉交替变化现象。但在2016年1月门源6.4级地震前,多数测段出现了压一张的运动特征。门源地震后,六盘山断裂带大多数异常测段年平均活动速率转折回升,这可能是此次地震同震反应的

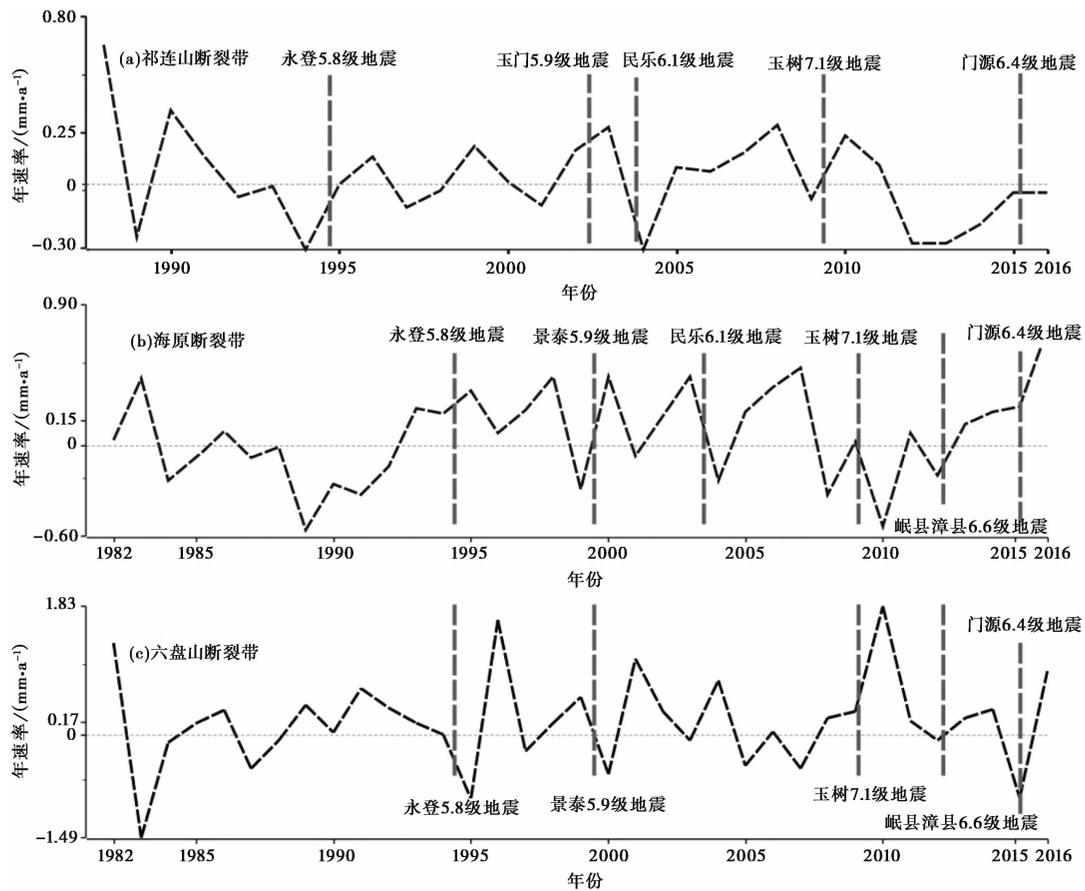


图 6 各断裂带合成速率

结果。从量值上可以看出,六盘山断裂带监测点年平均活动速率变化幅值大于另外 2 条断裂,压性最大约 4.8mm/a,张性最大约 2.8mm/a。

由多个监测点运动速率合成为同一条断裂的速率时序图(图 6),从图 6 可知,2000~2010 年是祁连山断裂带、海原断裂带、六盘山断裂带,亦即整个青藏块体东北缘地区的断层活跃期。2010~2016 年,祁连山断裂带整体偏向微弱的张性运动;海原断裂带由负转正,张性变压性;六盘山断裂带在门源地震前显示张性运动,震后转折。

2.3 趋势累积率

趋势累积率可用以分析断裂的活动能量和应变的聚集状况,它反映了自有资料记录以后监测点的趋势形变累积情况以及趋势累积量归一化后的整个研究区域地壳应变强度比。大范围的断层形变趋势累积率的时空演化过程可以代表区域地壳形变的分布状况,它实际上反映的是一种广义应变的累积速率趋势强度比(李媛等,2016),其计算公式为

$$D_c = \frac{\sum_i \left(\frac{h_{i+1} - h_i}{t_{i+1} - t_i} \right)}{\sum_i \left| \frac{h_{i+1} - h_i}{t_{i+1} - t_i} \right|}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, h_i 为断层两盘测点之间的相对高差观测值; n 为观测期数。根据定义, D_e 绝对值为 0~1, 当 D_e 绝对值为 0 时, 形变不存在趋势性变化; 当 D_e 绝对值为 1 时, 形变记录的趋势性最强。 D_e 绝对值具有自然归一性, 这为建立不同演化程度的数据序列之间的可比性标度提供了基础。

2.4 数据处理与分析

利用中长期趋势性异常的跨断层资料(自有观测以来的全部数据), 计算了各场地的 D_e 值, 并绘制了祁连山断裂带与海原-六盘山断裂带的 D_e 等值线图(图 7)。由图 7 可见, 祁连

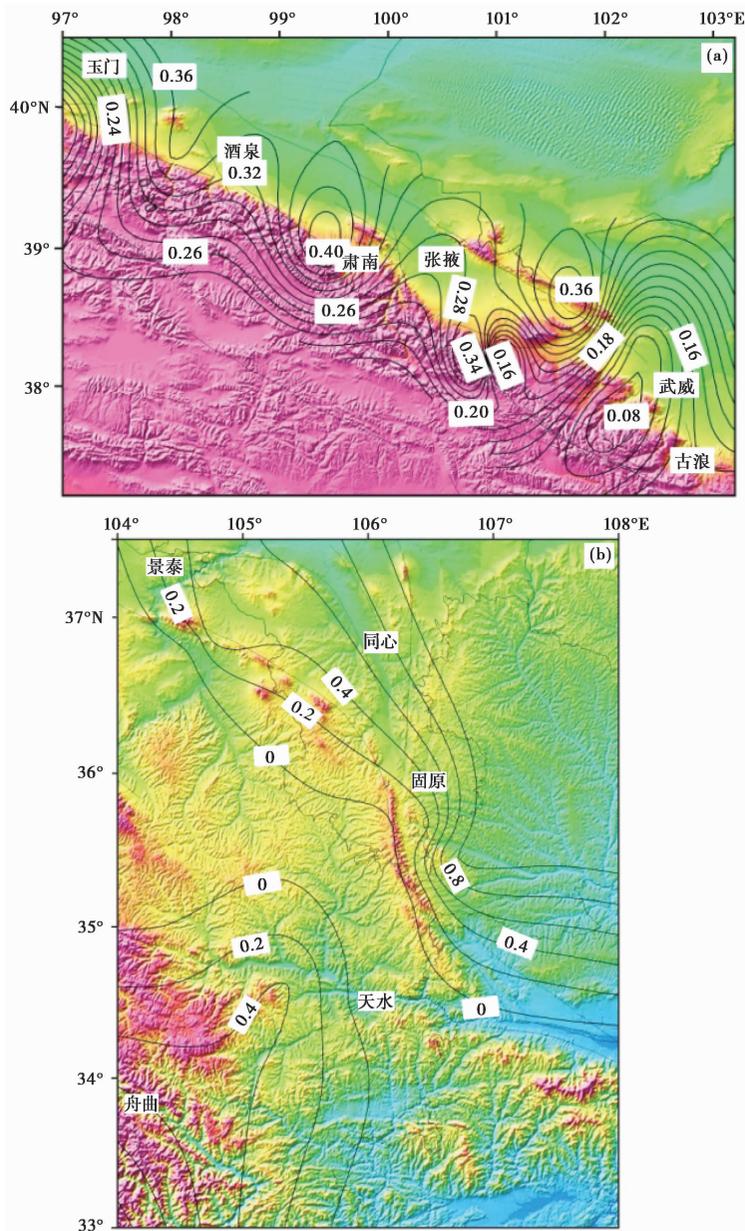


图 7 祁连山断裂带(a)和海原-六盘山断裂带(b)跨断层水准形变趋势累积率等值线分布

山断裂带(图 7(a))垂直形变累积率高值区与高梯度带主要分布在中、西段,东段相对较稳定;海原-六盘山断裂带(图 7(b)) D_e 值高梯度带主要分布于六盘山地区,整体来看,海原-六盘山断裂带 NE 方向应力积累效应明显强于其 WS 方向。这是长期地壳应力积累的结果,其间必然经历了多次地震能量的释放与再累积的交替过程。

3 结语

通过将速率合成、趋势累积率等方法与青藏块体东北缘跨断层短水准资料相结合,可获得以下初步结论:

(1)由单个断裂多个异常监测点的年平均活动速率时序曲线可以获知,用速率合成方法分析跨断层的监测数据,可以较好地找到某一条断裂在时空分布上的具体活动规律(活跃期、张、拉等变化过程);而由多个断裂集中对比分析与跨断层形变趋势累积率,则可获得更长时间与空间的地壳形变运动特征。

(2)从合成速率结果可知,2010~2016 年,祁连山断裂带呈微弱拉张的运动态势;海原断裂带由张转压;六盘山断裂带在门源地震前显示张性运动,震后发生转折。趋势累积率则从长期观测数据的角度显示了祁连山断裂带中、西段累积应变略高于东段,从量值上看整个青藏块体东北缘 D_e 高值区位于六盘山断裂带附近。

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,中国地震,16(1),77~85.
- 丁国瑜,1991,中国岩石圈动力学概论,142~153,北京:地震出版社.
- 方颖、江在森、张晶等,2009,青藏高原现今高分辨率地壳运动特征,地球科学(中国地质大学学报),34(3),399~404.
- 国家地震局地质研究所、国家地震局兰州地震研究所,1993,祁连山-河西走廊活动断裂系,北京:地震出版社.
- 魏顺民、江在森、张崇立,2000,青藏高原东北缘晚第四纪块体划分与运动态势研究,地震地质,22(3),219~231.
- 姜卫平、周晓慧、刘经南等,2008,青藏高原地壳运动与应变的 GPS 监测研究,测绘学报,37(3),285~292.
- 李清河、郭守年、吕德徽,1999,鄂尔多斯西缘与西南缘深部结构与构造,北京:地震出版社.
- 李瑞莎、张希、唐红涛等,2012,玉门、民乐等地震前跨断层形变异常及与定点前兆观测的相互印证,西北地震学报,34(4),388~392.
- 鲁如魁、张国伟、钟华明等,2008,阿尔金断裂带西段磁组构特征及其构造意义,地球物理学报,51(3),752~761.
- 李媛、刘峡、刘希康等,2016,2016 年门源 M_s 6.4 地震前祁连山周边断层活动分析,大地测量与地球动力学,36(4),288~293.
- 王双绪、张希、张四新等,2005,青藏高原东北缘现今构造变动与地震活动特征,地球学报,26(3),209~216.
- 王双绪、张希、祝意青等,2012,南北地震带北段强震形变异常特征与预测指标研究,西北地震学报,34(2),105~113.
- 王永安、李琼、刘强,2011,跨断层形变累积率的变化特征与云南地区强震,地震研究,34(2),136~142.
- 吴满路、马寅生、张春山等,2008,兰州至玛曲地区地应力测量与现今构造应力场特征研究,地球物理学报,51(5),1468~1474.
- 吴云、申重阳、乔学军等,2002,现今地壳运动与地震前兆研究,大地测量与地球动力学,22(1),22~28.
- 孙军、葛计划、曹志磊等,2014,跨断层水准数据处理方法在苏鲁皖地区的应用,防灾科技学院学报,16(3),32~37.
- 苏琴,2005,川滇菱形块体各边界垂直形变速率与断层活动特性,四川地震,(1),43~46,38.
- 张国民、马宏生、王辉等,2004,中国大陆活动地块与强震活动关系,中国科学:D 辑,34(7),591~599.
- 张培震、邓起东、张竹琪,2013,中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程,中国科学:地球科学,43(10),1607~1620.
- 张强、朱文耀、熊永清,2000,关于 ITRF96 参考架整体旋转性的探讨,地球物理学报,43(5),598~606.
- 张希、薛富平、王双绪,2004,大姚、民乐-山丹地震前的中短期前兆,大地测量与地球动力学,24(4),57~63.

张先康、嘉世旭、赵金仁等,2008,西秦岭-东昆仑及邻近地区地壳结构——深地震宽角反射/折射剖面结果,地球物理学报,51(2),439~450.

朱文耀、程宗颐、王小亚等,1999,中国大陆地壳运动的背景场,科学通报,44(14),1537~1539.

The Fracture Activity Analysis of the Northeast Margin of Qinghai-Tibetan Block Based on the Synthetic Rate Method

*Tang Hongtao*¹⁾ *Zhang Xuegang*²⁾ *Gao Zirang*³⁾ *Ding Guoli*⁴⁾ *Li Ruisha*¹⁾

1) The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China

2) Qinghai Surveying and Mapping Quality Supervision and Inspection Center, Xining 810001, China

3) Hunan Second Surveying and Mapping Institute, Changsha 410118, China

4) The First Institute of Aerial Surveying and Remote Sensing, National Bureau of Surveying, Mapping and Geographic Information, Xi'an 710054, China

Abstract Based on the combination of the synthetic rate, the trend accumulation rate method and the cross-fault data, this paper analyzes the movement characteristics of the main fault strain accumulation in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Block from different angles of time and space. The result shows that: (1) In the short term, the movement situation of the Qilianshan fault zone is weak. The movement characteristics of the Haiyuan fault is from extension to extrusion. Before the Menyuan earthquake, the movement characteristics of the Liupanshan fault is extension, and has a turning point. (2) In the long run, the calculation results based on trend accumulation rate show that the cumulative strain of the middle west of Qilianshan Fault zone is slightly higher than the East. From the numerical value about the northeast margin of Qinghai-Tibetan Block, the D_c high value region is near the Liupanshan faults.

Key words: Synthetic rate; Trend accumulation rate; Cross-fault; Northeast Margin of Qinghai-Tibetan Block; Fault