

刘辛中, 刘志广, 朱爽, 李腊月, 2015. 安宁河-则木河断裂带断层活动特征及其与地震活动的关系. 震灾防御技术, 10 (2): 253—261. doi: 10.11899/zzyf20150205

安宁河-则木河断裂带断层活动特征及其 与地震活动的关系¹

刘辛中 刘志广 朱爽 李腊月

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

摘要 利用安宁河-则木河断裂带上的跨断层流动形变资料, 计算了断层活动累积量, 定量研究了断层在不同时间段内的活动特征, 然后采用断层活动总体状态参量 $R(t)$ 值对断层总体活动特征进行了综合分析, 探讨了其与地震活动的关系。结果表明: 安宁河-则木河断裂带在观测期内以左旋走滑活动为主, 兼具逆冲活动; 断层总体活动状态参量 $R(t)$ 显示, 断层整体活动的不稳定性与强震有关, 断层活动不稳定时, 地震活动也较强烈。

关键词: 安宁河-则木河断裂带 跨断层测量 断层活动性 $R(t)$ 值 地震活动

引言

安宁河-则木河断裂带位于川滇菱形块体东边界的中部, 它北接鲜水河断裂带, 南接小江断裂带, 东邻大凉山断裂, 是组成川滇菱形块体东边界断裂带上的一条重要活动断裂。其中: 安宁河断裂走向近南北, 向南经石棉到冕宁, 终止在西昌一带(图 1); 则木河断裂总体走向 330° , 与鲜水河断裂近于平行, 其北端与安宁河断裂相连, 南端与大凉山断裂相交(张培震, 2008)。历史上在安宁河-则木河断裂带上曾发生过多次数强震, 其中, 1952 年发生的冕宁 $M6.4$ 级地震是该断裂带上距今最近的 1 次强震(闻学泽, 2000; Wen 等, 2008)。震源机制解、GPS 等相关研究表明, 安宁河-则木河断裂带以左旋走滑为主要运动特征, 并兼具挤压活动特征(杜平山, 2000; 龙思胜等, 2003)。前人利用不同资料对该断裂带的地壳变形特征、构造活动和地震破裂等进行了研究, 如: 程建武等(2010)通过影像解译并结合野外地质调查, 利用第四纪地貌填图、样品采集和差分 GPS 地貌面测量等手段, 对安宁河断裂带及其附近地区第四纪地貌特征及强震危险性进行了研究; 程佳等(2011)在收集和整理川滇菱形块体东边界断裂带的断裂分段、特征地震和古地震资料的基础上, 对该断裂带的地震破裂、强震复发周期等进行了研究; 魏文薪等(2012)利用 1999—2007 年的 GPS 速度场, 研究了安宁河-则木河断裂带的运动特征, 其结果表明安宁河断裂具有左旋走滑兼挤压的运动特征, 则木河断裂具有左旋走滑兼拉张的运动特征。

1 基金项目 中国地震局监测、预测、科研三结合课题(153304)、中国地震局第一监测中心科技创新主任基金(2014006)联合资助

[收稿日期] 2014-07-04

[作者简介] 刘辛中, 男, 生于 1986 年。硕士研究生。主要从事地壳形变数据处理与分析。E-mail: guiwucanjan@163.com

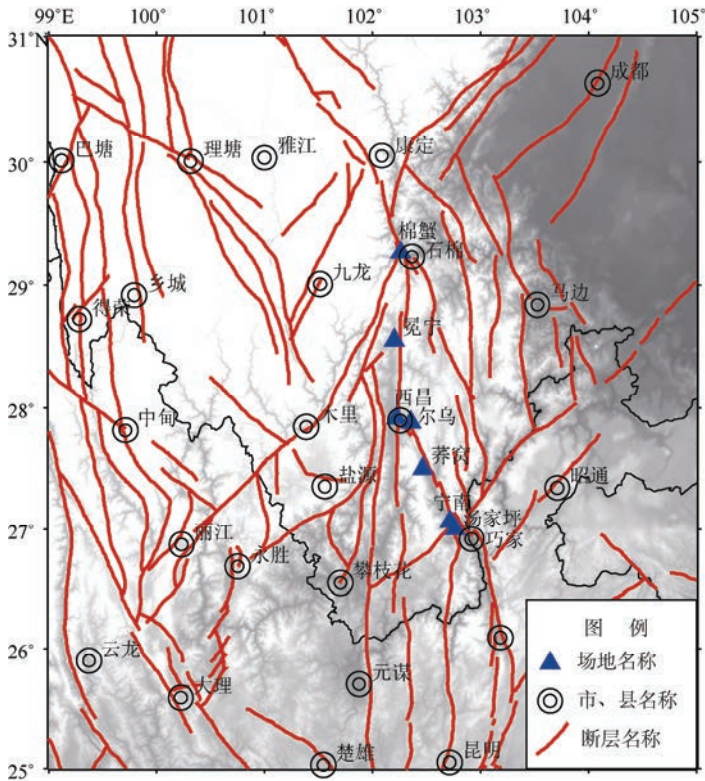
跨断层形变测量作为一种重要的地壳形变监测手段，在空间上能够给出断层近场的构造形变信息，是监测断层活动最直接和最有效的方法之一。多年来，我国学者应用跨断层形变资料开展了大量研究工作并取得了很多有意义的结果（焦青等，1998；曹建玲等，2011；张希等，2013；李腊月等，2013）。本文利用安宁河-则木河断裂带上最新积累的跨断层形变观测资料，首先对断层的活动特征进行了定量分析，然后采用断层总体状态参量 $R(t)$ 法对断层活动的总体特征及其与地震活动的关系进行了探讨和分析。

1 安宁河-则木河断裂带流动短水准测点及观测资料状况

在安宁河-则木河断裂带上共布设了 7 处跨断层形变测量场地，其中，棉蟹、冕宁场地布设在安宁河断裂上，尔乌、莽窝、宁南、西昌、汤家坪场地布设在则木河断裂上，在这些测量场地中只有汤家坪测量场地为水准和基线综合观测场地，其他均为水准观测场地。场地分布和场地布设情况如图 1 所示。这里需要说明的是：

(1) 棉蟹场地、冕宁场地所跨断层是安宁河次级断层，尔乌场地所跨断层为则木河次级断层，汤家坪场地所跨断层为则木河次级分支断层，在地质构造上为则木河断裂带紧靠南东的尾端地段，此地段断裂走向略向东偏转，多组断裂和次级分支断裂发育（杜方等，2011；苏琴等，2012）。

(2) 西昌场地自 1974 年开始观测以来，由于受当时条件的限制，出现多期停测，资料连续性不好；莽窝场地观测时间较短，到目前为止只有 4 期观测资料。因此，这 2 个场地的数据在下面的计算分析中未予采用。



(a) 安宁河-则木河断裂带跨断层测量场地分布图

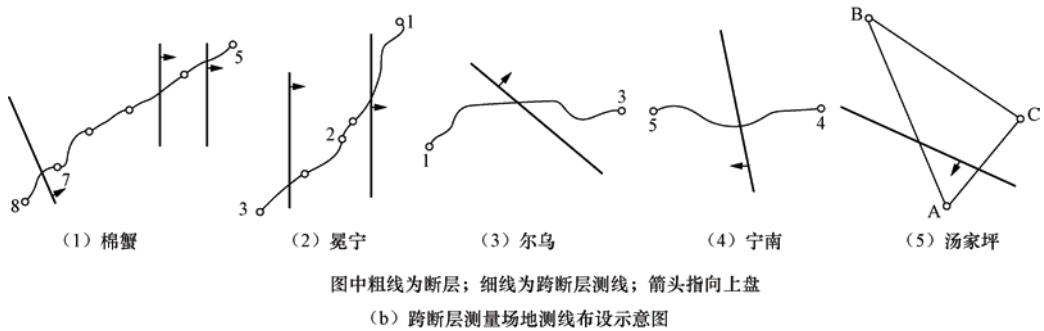


图 1 跨断层测量场地分布图与测量场地测线布设示意图

Fig. 1 Location of cross-fault sites and sketch of cross-fault measuring line layout

2 数据处理方法

2.1 计算断层活动参数

根据跨断层形变测量的短水准、短基线可得到断层两盘测点的相对位移, 进而分析断层两盘相对活动与地表两盘点位相对位移的关系。在小变形情况下, 可以将断层两盘作为不变形的刚体来处理, 通过几何关系推导可得到断层水平扭错量 ΔS 、水平张压量 ΔR 和垂直升降量 ΔH 。其中: 断层水平扭错量用来描述沿断层走向的水平运动量; 水平张压量用来描述垂直于断层走向的水平运动量; 垂直升降量用来描述断层在垂线方向上的升降量。

对于布设 2 条基线的场地, 本文分别采用以下 3 个公式来计算断层活动的 3 个分量 (薄万举等, 1998):

$$\Delta S = \frac{\Delta L_1 \sin \alpha_2 - \Delta L_2 \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (1)$$

$$\Delta R = \frac{\Delta S \cos \alpha_1 - \Delta L_1}{\sin \alpha_1} \quad (2)$$

$$\Delta H = \frac{1}{2}(\Delta H_1 + \Delta H_2) \quad (3)$$

式中, ΔL_1 、 ΔL_2 为基线变化量 (以伸长为正); α_1 、 α_2 是由断层走向逆时针转动至两基线方向的角度; ΔS 为断层水平扭错量 (以两盘作顺时针方向的扭动为正); ΔR 为水平张压量; ΔH 为水准变化量 (以上盘相对下盘的下降为正)。

当 $\Delta S > 0$ 时表示右旋; 当 $\Delta R > 0$ 时表示压性; 当 $\Delta H > 0$ 时表示正断层活动。若符号相反则表示断层活动性质相反。

由于在该断裂带上布设基线观测的只有唐家坪场地, 因此本文仅对唐家坪场地进行了断层水平扭错量和水平张压量的计算, 其他场地只进行了断层垂直升降量的计算。笔者在计算时采用累积变化的研究思路, 选用起始年的观测数据作为参考基准年, 计算每年在基准年基础上的累积变化量。对于汤家坪场地, 采用公式 (1)、(2)、(3) 分别计算断层活动的 3 个分量, 其他场地采用公式 (3) 计算断层垂直升降量。

2.2 计算断层活动性总体状态参量 $R(t)$

一般而言, 从各跨断层形变测点数据的时间变化特征中分析各自变化特点是比较困难

的,也是比较随机和零乱的。因为当各测点同步性较差时,对断层活动的自身演化特征和趋势预测,以及断层与地震活动的关系都难以分析和综合决策,其原因是每次地震前各个测点的异常特征(预测因子)并不是一致的。

鉴于上述原因,王林瑛等(2006)提出了地震活动性多参数总体状态参量 $R(t)$,以其作为综合分析地震活动性的一种方法。该方法仅利用一个相关参量就可以较客观地把握地震活动的总体综合异常特征,可用来定量描述某区域地震活动所处的总体状态。考虑到地震前兆异常时空分布的复杂性和前兆观测能力的不均匀性,为了能更加客观地得到某区域断层活动的总体特征,本文将这种方法引用到跨断层形变资料的分析中,试图定量得到研究区断层活动的总体特征。

以描述断层活动的总体状态为主,笔者将断层活动的总体状态作为预测量,并称之为断层活动总体状态参量 $R(t)$ 。同时选用以监测断层活动为主的跨断层形变资料,将各测点多年观测值的平均值(或称背景值)作为分析的背景依据,并将背景值作为平稳或动态的背景参量,将不同分析时段的多项参数值视为随时间变化的状态参量,根据背景参量与状态参量的相关性分析,可得出总体状态参量 $R(t)$ 。当 $R(t)$ 接近 1 时,视断层活动处于平稳状态;反之,断层活动处于活跃状态。以此完成对断层活动总体趋势和活动状态的预测判断。

笔者首先选取资料中跨断层且高差变化有规律的 9 条水准测线,计算了断层垂直活动速率,然后将其作为预测因子。具体计算方法是:①设 $x_{ij}(i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n)$, 当 $i=1$ 到 9 时分别表示不同的预测因子;当 $j=1$ 至 n 时分别表示 t_1 至 t_n 各个时段。②为计算相关系数,每个预测因子的时间变化量用相应时间序列的最大值进行归一化处理,其中每个时间段的 $R_j(t)$ 值由下式计算:

$$R_j = S_{0j} / \sqrt{S_0^2 \cdot \sqrt{S_j^2}}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

在公式(4)中:

$$S_{0j} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 (\bar{x}_i - \bar{X})(x_{ij} - \bar{x}_j), \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

$$S_0^2 = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 (\bar{x}_i - \bar{X})^2 \quad (6)$$

$$S_j^2 = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 (x_{ij} - \bar{x}_j)^2, \quad j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

其中:

$$\bar{X} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \bar{x}_i \quad (8)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad i=1,2,\dots,9 \quad (9)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 x_{ij}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (10)$$

3 处理结果与分析

3.1 断层现今活动性分析

汤家坪测量场地是 7 处场地中唯一一处具有基线观测的综合场地。利用 2.1 节给出的计算方法, 可得到断层水平扭错累积量和水平张压累积量随时间变化的曲线, 如图 2 所示。从图中可以看出: 则木河断裂的水平扭错累积量曲线在 1990—1998 年表现为左旋活动, 1999—2006 年转为右旋活动, 2007—2013 年再次转为左旋活动, 自 2010 年以来活动量有大幅增加; 而则木河断裂的水平张压累积量曲线在观测期内主要表现为以张性活动为主, 1999—2002 年出现短暂的压性活动, 然后又恢复原来的张性活动, 自 2010 年起活动量有所增加。此外, 从则木河断裂的水平扭错量值和水平张压量值来看, 水平扭错活动量大于水平张压活动量。

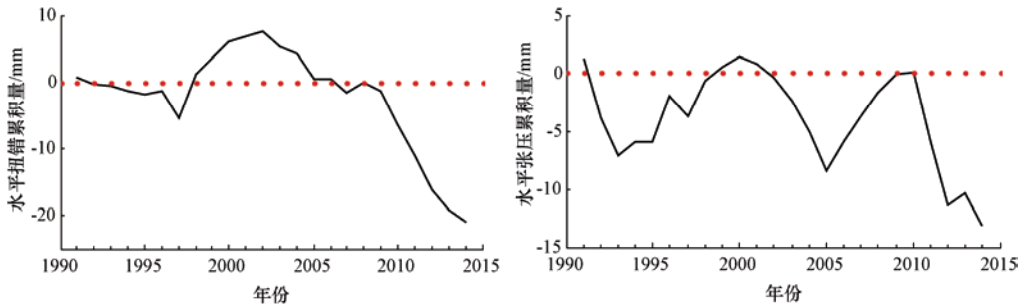


图 2 汤家坪测量场地水平扭错累积量和水平张压累积量曲线

Fig. 2 Cumulative amount of horizontal twisting and horizontal tension-compression at Tangjiaping site

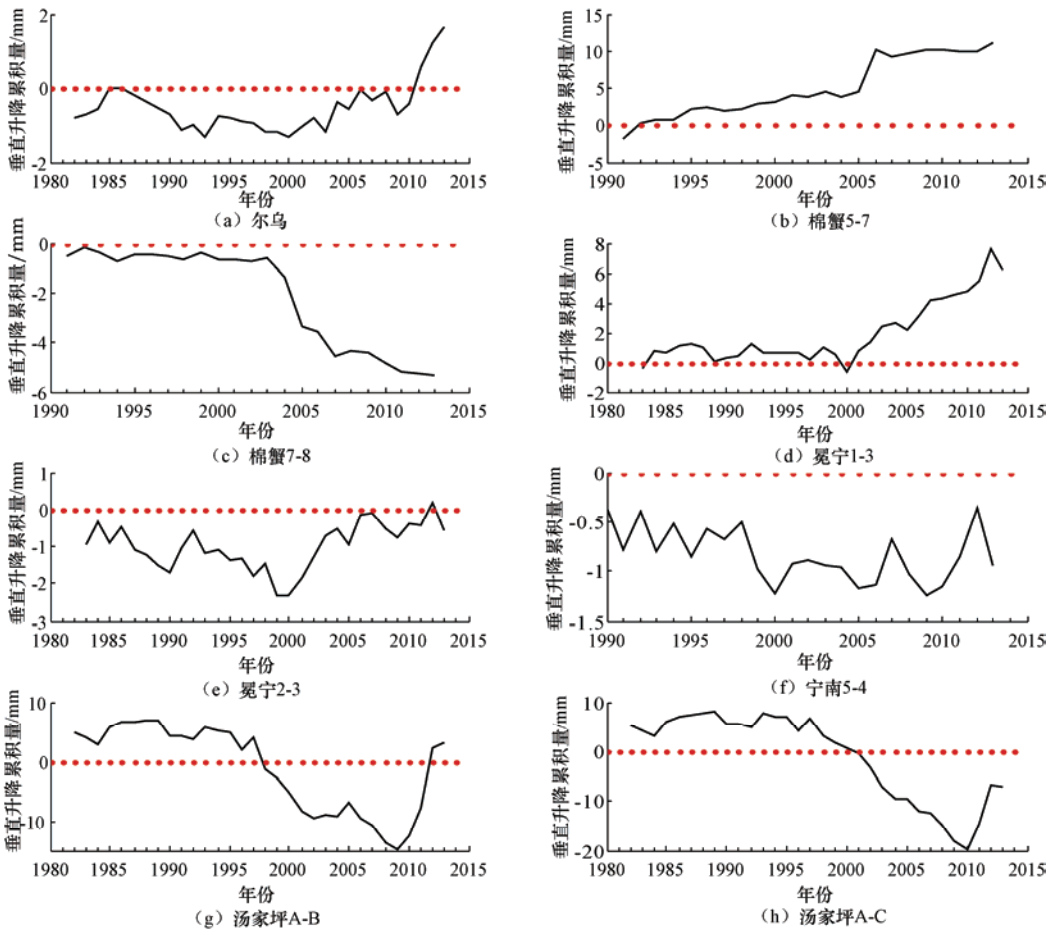
棉蟹测量场地位于安宁河的次级断裂上, 可以监测近于平行的 3 条断裂。其中: 测线 5—7 跨越东侧的 2 条断裂; 测线 7—8 跨越西侧的 1 条断裂 (见图 1)。图 3 是断层垂直升降累积量随时间变化的曲线, 从图中可以看出, 在观测期内测线 5—7 表现出断裂活动为张性, 且活动量逐年增加, 并在 2005—2006 年出现加速活动; 在观测期内测线 7—8 表现出断裂活动保持为压性, 在 1990—2003 年活动量较小, 活动相对稳定, 而在 2004—2005 年活动量出现加速, 然后逐渐趋于稳定。

冕宁测量场地位于安宁河断裂中北段, 测线 1—2、2—3 分别跨越安宁河的次级断裂 (见图 1)。从图 3 可以看出, 在观测期内测线 1—2 表现出断裂活动为张性, 在 2000—2013 年活动量显著增加; 而在观测期内测线 2—3 表现出断裂活动主要为压性, 活动量较弱。

尔乌测量场地位于安宁河断裂与则木河断裂的交汇部位 (见图 1)。从图 3 可以看出, 总体上断裂活动比较微弱, 累积活动量较小, 在 1982—2011 年断裂活动主要为压性, 2012 年转为张性, 现在仍保持张性。

宁南测量场地跨越则木河断裂的主断裂面 (见图 1)。从图 3 可以看出, 在观测期内断裂活动一直为压性且活动微弱。

汤家坪测量场地位于则木河断裂尾端分支断层上 (见图 1)。从图 3 可以看出, 2 条测线的变化形态基本一致, 在 1982—1997 年断裂活动均表现为张性, 1998—2010 年断裂活动转为压性, 然后断裂活动发生过一次转折, 目前断裂活动有转为张性的趋势。



大于 0 代表张性；小于 0 代表压性

图 3 垂直升降累积量随时间变化曲线

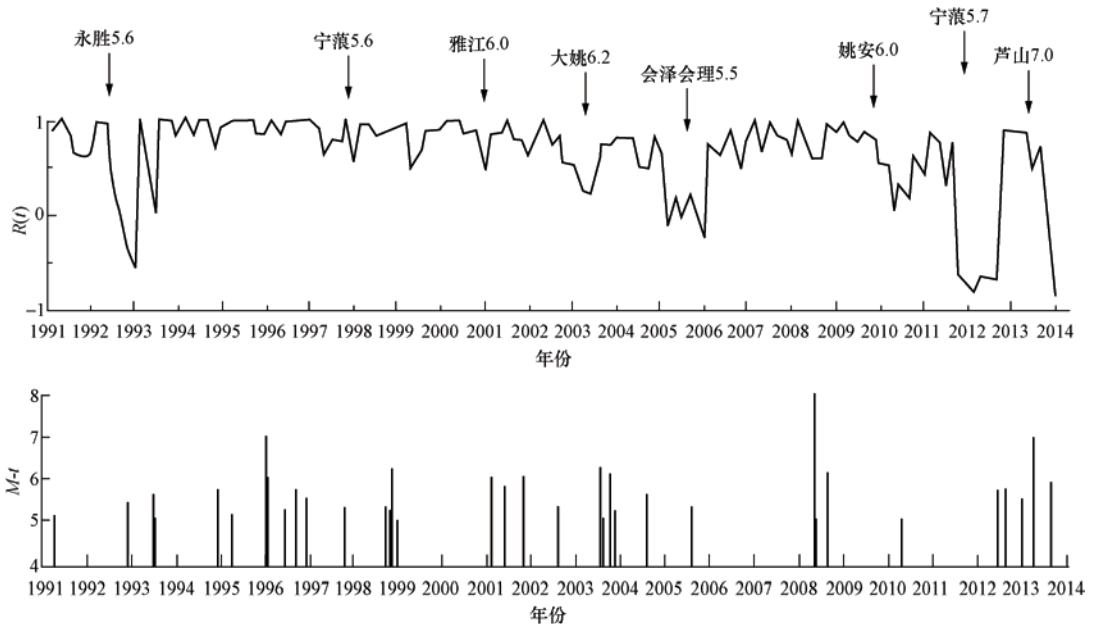
Fig. 3 Time series of cumulative amount of vertical lift

3.2 断层总体活动与地震活动的关系

一般而言，从各个跨断层形变测点数据的时间变化特征分析各自的变化特点，一是比较困难，二是不够系统和完整。因为每次地震前各个测点的异常特征（预测因子）并不是一致的。为了研究断层活动的总体特征，笔者采用前面 2.2 节的计算方法和思路，计算了安宁河-则木河断裂带断层活动的总体状态参量 $R(t)$ ，如图 4 所示。同时，为了探讨断层总体活动与地震活动的关系，笔者还采用中国地震台网中心提供的地震月报目录，给出了研究区 5.0 级以上地震的 $M-t$ 图，如图 4 所示。从图中可以看出， $R(t)$ 值在 1992—1993 年、2003 年、2005—2006 年和 2009—2010 年、2012 年、2013 年出现了 6 次大幅度的低值异常，表现为 $R(t)$ 值低于 0.5，特别是在 1992—1993 年、2005—2006 年、2012 年、2013 年达到了负值，这表明其与背景值偏离程度巨大，呈现负相关性，断层活动不稳定性显著增强；此外， $R(t)$ 值还在 1998 年、1999 年、2001 年出现相对小幅度的低值变化。同时，从 $M \geq 5.0$ 级以上地震的 $M-t$ 图也可以看出，研究区及邻近地区在相应的时间段地震活动也较活跃。例如：在 1992

年发生了云南永胜 5.4 级地震; 在 1993 年发生了云南大姚 5.3 级地震、姚安 5.5 级地震; 在 2001 年前后发生了四川雅江 6.0 级地震、盐源 5.8 级地震、永胜 6.0 级地震; 在 2003 年发生了云南大姚 6.2 级地震、盐源 5.0 级地震; 在 2005—2006 年分别发生了会泽会理 5.3 级地震和云南盐津 5.1 级地震; 在 2009 年发生了云南姚安 6.3 级地震; 在 2012 年发生了宁蒗 5.7 级地震、云南彝良 5.7 级地震; 在 2013 年发生了洱源 5.5 级地震、芦山 7.0 级地震等。

经统计在 1991—2013 年研究区内共发生 5.0 级以上地震 (去除余震) 36 次, 其中, 有 23 次地震发生在 $R(t)$ 值低于 0.5 的区间内。这说明反映断层活动的总体状态参量 $R(t)$, 一方面能够有效描述该区域断层活动的总体活动水平; 另一方面也能够看出总体状态参量 $R(t)$ 值序列与该区域的地震活动整体起伏有一定的相关性, 地震往往发生在偏离的低值区间。



注: $R(t)$ 值曲线上 5.0 级以上地震未全部标出

图 4 安宁河-则木河断层活动性总体状态参量 $R(t)$ 随时间变化曲线及研究区 5.0 级以上地震 $M-t$ 图

Fig. 4 Time series of integrated parameter $R(t)$ of Anninghe-Zemuhe fault activity and $M-t$ plot of $M \geq 5.0$ earthquakes in study area

4 结论

综合安宁河-则木河断裂带跨断层形变资料的分析结果, 笔者得到了以下结论。

(1) 汤家坪测量场地的基线测量结果显示, 在观测期内则木河断裂曾出现过短暂的右旋、压性活动, 但以左旋、张性活动为主; 水准测量结果显示在 1982—1997 年则木河断裂带表现为张性活动, 1998—2010 年转为压性活动, 目前有转为张性活动的趋势。而位于安宁河断裂上的棉蟹、冕宁测量场地, 不同测线的观测结果不一致。其中, 一条测线显示在观测期内断层表现为压性活动, 另一条测线显示在观测期内断层表现为张性活动。笔者分析后认为, 这可能与棉蟹、冕宁测量场地所在的位置有关, 测线并没有跨过安宁河的主断裂, 监测的是安

宁河的几条次级断裂,因此所反映的主要是次级断层的活动。位于则木河断裂上的尔乌、宁南、汤家坪测量场地的水准观测显示,则木河断裂在观测期内表现为以压性活动为主,但目前有转为张性活动的趋势。

(2) 安宁河-则木河断裂带的断层整体活动的不稳定性与强震的发生可能具有一定的相关性,当断层活动和地壳不稳定时,地震活动也较活跃。同时,采取总体状态参量 $R(t)$ 值描述断层活动的总体稳定性具有一定的可行性,可根据断层活动总体状态参量 $R(t)$ 的偏离程度和变化特征,来判定研究区域断层活动的稳定性,从而判定地震活动的强弱。因此,断层活动状态的分析结果可为判断区域断层活动性总体状态是否由稳定平静进入不稳定活跃的临界状态提供综合分析的参考依据。

由于安宁河-则木河断裂带上的资料较少,本文得到的结果可能具有一定的局限性,更深层次的探讨将随着研究工作的进一步开展而深入。

参考文献

- 薄万举, 谢觉民等, 1998. 八宝山断裂带形变分析与探讨. 地震, **18** (1): 63—68.
- 曹建玲, 张晶等, 2011. 首都圈跨断层形变反映的断层活动方式及其成因探讨. 地震, **31** (4): 77—85.
- 程建武, 郭桂红等, 2010. 安宁河断裂带晚第四纪活动的基本特征及强震危险性分析. 地震研究, **33** (3): 265—272.
- 程佳, 刘杰等, 2011. 川滇菱形块体东边界各断层段强震演化特征研究. 中国科学: 地球科学, **41** (9): 1311—1326.
- 杜方, 龙德雄等, 2011. 川滇交界东部地区汤家坪跨断层形变异常调查. 四川地震, (4): 8—12.
- 杜平山, 2000. 则木河断裂带的走滑位移及滑动速率. 四川地震, (1-2): 50—64.
- 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. 地震, **18** (3): 265—273.
- 李腊月, 邢成起等, 2013. 用主成分分析方法综合分析首都圈跨断层形变资料. 中国地震, **29** (2): 246—255.
- 龙思胜, 陈银, 2003. 安宁河-则木河断裂带近期 7 次地震的震源机制解. 四川地震, (2): 21—25.
- 苏琴, 杨永林等, 2012. 则木河断裂带断层活动特征与中强震关系浅析. 地震研究, **35** (1): 18—23.
- 王林瑛, 陈学忠等, 2006. 地震活动性总体参量 $R(t)$ 及其在地震预测中应用的研究. 地震, **26** (2): 54—60.
- 闻学泽, 2000. 四川西部鲜水河-安宁河-则木河断裂带的地震破裂分段特征. 地震地质, **22** (3): 239—249.
- 魏文新, 江在森等, 2012. 利用 GPS 数据研究川滇块体东边界主要断裂带运动学特性. 武汉大学学报信息科学版, **37** (9): 1041—1044.
- 张培震, 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. 中国科学 (D 辑), **38** (9): 1041—1056.
- 张希, 唐红涛等, 2013. 跨断层形变的慢时变结构分析与异常识别初探. 武汉大学学报信息科学版, **38** (6): 710—715.
- Wen X.Z., Ma S.L. et al., 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan Yunan faulted-block, southwestern China. Phys. Earth Planet Int., **168**: 16—36.

Research on Seismic Activity Feature of Anninghe-Zemuhe Fault

Liu Xinzhong, Liu Zhiguang, Zhu Shuang and Li Layue

(First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

Abstract By using the observation data of fault-crossing mobile sites in Anninghe-Zemuhe fault, we calculated the cumulative amount of vertical lifts, analyzed the current faulting characteristics in different time quantitatively, and then used $R(t)$ to describe the overall faults activity level quantitatively. Our results show that Anninghe-Zemuhe fault is left-lateral strike slip with thrusting activity; integrated parameter $R(t)$ of fault activity show that instability of the overall faults activity has a relatively close relationship with the occurrence of strong earthquakes, and when the fault activity is unstable, seismic activity is more intense than before.

Key word: Anninghe-Zemuhe faults; Fault-crossing measurement; Fault activity characteristics; $R(t)$; Earthquake activity