

GNSS 基准站基线时间序列反映 红河断裂带运动特征研究*

施发奇, 付云文, 汪志民

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 通过对红河断裂带附近的 GNSS 基准站间基线长度和方向变化特征的分析, 发现红河断裂带各段的基线长度均为缩短变化, 其原因可能是青藏高原东缘向东南方向的挤出受到了红河断裂带的阻挡, 基线缩短量被其吸收了一部分; 且在某些部位基线的长度变化在一定时间段内还出现了反向和加急的趋势, 这说明红河断裂带的边界断裂作用仍然存在, 但其作用在逐渐减弱。

关键词: 红河断裂带; GNSS 基准站; 基线时间序列; 运动特征

中图分类号: P315.730.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)04-0529-06

0 引言

红河断裂带是一条斜贯云南地区的超壳断裂带, 走向北西转北北西, 略向西南突出, 呈弧形。它北起洱源附近, 向南经沅江、红河县, 过河口进入越南境内(虢顺民等, 1996; 江娃利, 1997), 在云南省境内长达 600 km。从几何结构和活动性上看, 红河断裂带由北、中、南 3 段组成(张建国等, 2001), 是一条巨大的断裂带。与郯庐断裂带一样, 红河断裂带因为其特殊的地质意义而成为地震地质学者认识板块相互运动、深部过程乃至大陆动力学的重要窗口(郝天珅等, 2005)。张建国等(2009)、韩键等(1990)、虢顺民等(1984, 1996)已对红河断裂带的地质构造特征、地壳活动性、应力活动特征等进行了大量的考察研究。但对于我国境内整条红河断裂带的研究相对较少, 特别是利用大地形变测量进行整体研究的更少。笔者使用大地形变测量方法, 利用红河断裂带附近两年多的 GNSS 基准站间基线时间序列数据对红河断裂带云南境内分段运动状态进行分析, 来获取该断裂带近期的活动特征, 以期对未来云南地区的地震活动性的分析研究提供参考。

近二三十年出现的 GPS 空间对地观测系统, 为大范围研究地壳水平运动提供了强有力的工具。

近十多年来, 国内学者利用 GPS 观测资料研究中国大陆和主要活动断裂带的活动方式做出许多开创性的工作, 取得了与地质模型基本一致的 GPS 地壳运动结果(王阎昭等, 2008; 王庆良等, 2002; 王恩宁等, 2008; 申重阳等, 2002)。于 20 世纪末建成的国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”(简称网络工程), 在云南境内布设具有较高密度的 GPS 区域点, 且进行了 6 期联测。利用这些观测资料, 王阎昭等(2008)得出红河断裂带活动性不强的结论。张清志等(1998)获得在欧亚参考框架下的速度矢量图, 其结果表明, 在欧亚框架下, 各测站的东向分量平均速度为 3.726 mm/a, 北向分量平均速度为 -9.013 mm/a; 由北向南, 各测站的北向分量速率值逐渐减小, 由西向东, 各测站的东向分量速率值逐渐减小; 测区内呈现明显的右旋拉张走滑运动, 即云南红河地区地壳水平运动的特征以及断裂活动性质与构造地质相当一致。申重阳等(2002)则采用稳健贝叶斯最小二乘算法与多断裂位错模型, 分析研究了云南地区主要断层运动的定量模型, 结果也显示了红河断裂带活动以北段为最强烈, 中段次之, 南段最小。因观测条件所限, 之前对红河断裂带的研究仅限于使用几期 GPS 流动观测的数据, 且只侧重于红河断裂的中、北段。笔者利用 GNSS 基准站之间基线的时间序列, 结合前人的分析结果, 使用大地测量方法进一步对红河断裂云

南境内部分在这一时期内的运动特征进行更细致的分析。

1 站点分布

随着我国 GPS 观测技术的不断发展应用, 国家重大基础设施建设项目“中国大陆构造环境监测网络”(简称陆态网络)从 2007 年开始建设, 于 2010 年建成并投入试运行, 至今已积累近两年的连续观测资料。全国共有“陆态网络”GNSS 基准站 260 个, 云南境内有 27 个, 且沿主要构造分布, 其中有 10 个基准站位于红河断裂带附近(图 1), 这些基准站大部分为基岩点, 点位稳定性较好, 观测条件也很好, 观测数据的质量较高。

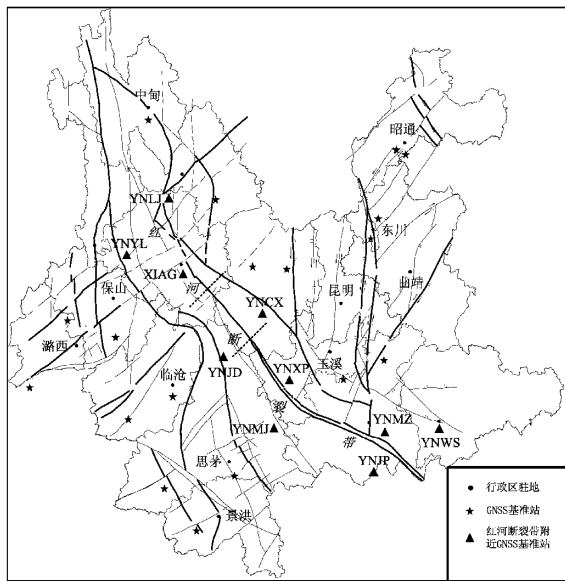


图 1 红河断裂带附近 GNSS 基准站分布图

Fig. 1 Layout of GNSS reference stations nearby the Honghe Fault Belt

2 GNSS 数据处理

笔者利用“陆态网络”2010 年初至 2012 年 4 月的 GNSS 观测资料, 采用 GAMIT/GLOBK 软件完成数据处理。数据处理的基本流程是利用 GAMIT 软件获得“陆态网络”云南境内 27 个基准站及中国大陆周围 15 个 IGS 测站的区域单日松弛解。GAMIT 计算中加入中国大陆及周边地区的 15 个 IGS 站 (BAN2、IRKT、KIT3、USUD、KUNM、BJFS、TSKB、TWTF、LHAZ、KHAJ、IISC、

PIMO、URUM、SELE、WUHN) 在相应时间段内的数据一并进行处理。计算中 IGS 站 X 、 Y 、 Z 坐标约束精度取 0.05 m、0.05 m、0.05 m, “陆态网络”基准站经反复迭代计算求得精确的近似坐标后, X 、 Y 、 Z 统一给定 1.0 m、1.0 m、1.0 m 的坐标约束, 卫星轨道约束取 10^{-8} 。完成 GAMIT 的计算之后, 利用 GLOBK 软件将 SOPAC (Scripps Orbital and Permanent Array Center) 给出的全球单日松弛解和计算所得的“陆态网络”区域单日松弛解进行联合平差计算, 为消除 IGS 站强约束对区域基准站点位移可能带来的扭曲变形问题, 笔者采用拟自由网无基准松弛约束方案, 即对 IGS 站和区域基准站坐标和速度速率采用较为宽松的约束, 其中, IGS 站南北、东西坐标分量约束取值约 0.050 m, 垂直分量约束取值约 0.100 m, IGS 位移约束取值约为 0.100 m。

3 基线长度与基线方向计算方法

地球椭球面上两点之间的距离可以分为直线距离和弧长距离(闫伟等, 2007)。由于本文主要研究 GNSS 基准站间基线长度和方向的变化情况, 所以采用赤道投影的计算方法来计算基线长度, 即:

$$l = \sqrt{(x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2)}. \quad (1)$$

式中, l 代表基线长度; (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 分别代表两点的地心坐标。

同理, 采用基线水平投影的方向来表示基线方向:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right). \quad (2)$$

式中, α 代表基线方向。

4 红河断裂带各段基线长度与方向变化特征

笔者利用位于红河断裂带附近的“陆态网络”GNSS 基准站间近两年来的基线时间序列长度和方向变化情况来分析该断裂带各段的运动特征。

4.1 红河断裂带北段基线长度与方向变化特征

在红河断裂带北段附近共有 3 个“陆态网络”

GNSS 基准站，分别是丽江、云龙和下关，它们之间形成两条跨过红河断裂带的基线，分别是丽江—云龙和丽江—下关。下面分别讨论其基线长度和方向的变化情况。

丽江—云龙（YNLJ—YNYL）基线方向和红河断裂带走向近似垂直，其基线长度和方向的变化特征情况如图 2 所示。由图可知，从 2010 年以来的近两年时间里，基线长度变化的量值较小，总体趋势表现为缩短，表明该段存在一定的挤压；基线的方向变化也相对稳定。

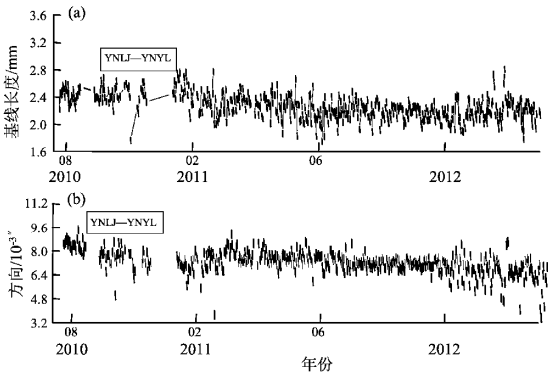


图 2 丽江—云龙基线长度变化 (a) 及方向变化 (b)

Fig. 2 Variety of length (a) and direction (b) of Lijiang – Yunlong baseline

丽江—下关（YNLJ—XIAG）基线方向和红河断裂带走向斜交，其夹角约 30°，其基线长度和方向变化特征情况如图 3 所示。由图可知：从 2010

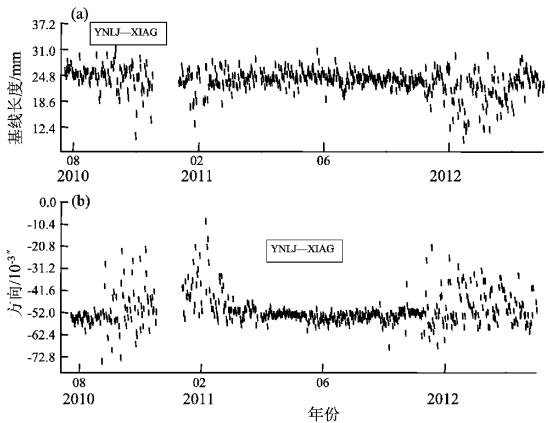


图 3 丽江—下关基线长度变化 (a) 及方向变化 (b)

Fig. 3 Variety of length (a) and direction (b) of Lijiang – Xiaguan baseline

年以来的近两年时间里，基线的长度变化也相对较小，总体表现为缩短，表明具有一定的走滑特征，基线的方向变化也相对稳定。但在 2011 年初期两三个月内，基线和方向的变化幅度较大，且显得比较凌乱，至 2 月份以后又恢复正常，在 2012 年的 2 月前后又出现了同样的现象，而在此期间丽江—下关附近并未发生地震事件，其原因有待进一步分析。

比较 2 条基线的变化特征可知，在这段时期里，红河断裂带北段的基线主要为缩短，表明具有一定的走滑特征，但总体地壳活动水平不强。

4.2 红河断裂带中段基线长度与方向变化特征

在红河断裂带中段附近仅有两个 GNSS 基准站，分别为楚雄和景东，它们之间形成的基线方向和红河断裂带走向近似垂直，该基线的长度和方向变化特征如图 4 所示。

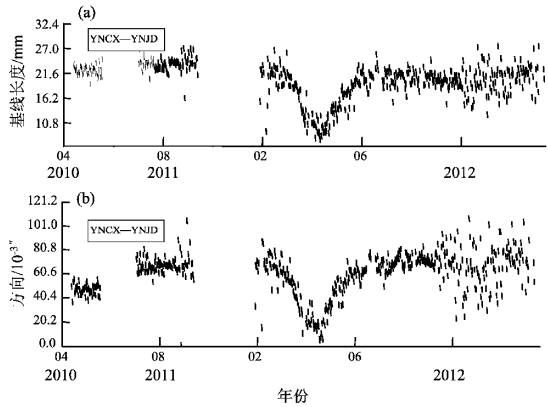


图 4 楚雄—景东基线长度变化 (a) 及方向变化 (b)

Fig. 4 Variety of length (a) and direction (b) of Chuxiong – Jingdong baseline

由图 4 可知：在 2011 年 3 月 24 日缅甸 7.2 级地震震前短时间内出现了不稳定的变化，基线的缩短表现出该方向为一定的压性，基线变化达十几毫米；地震后该基线长度和方向均出现了较大的变化，表现为震后的调整过程，至 6 月份左右基本又恢复到了震前水平。这也说明，红河断裂带的中段对附近北东东向断裂的活动性影响比较敏感。

4.3 红河断裂带南段基线长度与方向变化特征

在红河断裂带的南段附近共有 5 个 GNSS 基准站，分别是新平、墨江、蒙自、金平和文山台，它们之间共形成 3 条横跨红河断裂带南段的基线，

分别是新平—墨江、蒙自—金平和文山—金平。下面分别讨论其基线长度和方向的变化情况。

新平—墨江（YNXP—YNMJ）基线方向和红河断裂带近似成 60° 的夹角，该基线的长度和方向变化特征如图 5 所示。由图可知：在 2011 年 6 月前基线出现了一个跳跃式的变化，缩短 5 mm 以上，之后 2~3 个月又恢复到原来的水平，并一直延续缓慢伸长的态势，但量级比较小；基线方向的变化具有和长度相同的趋势。

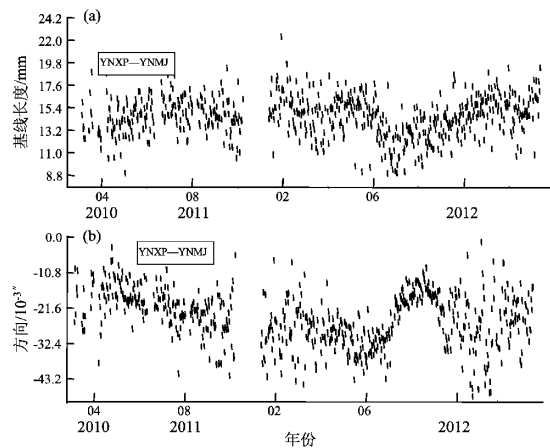


图 5 新平—墨江基线长度变化 (a)
及方向变化 (b)

Fig. 5 Variety of length (a) and direction (b)
of Xinping - Mojiang baseline

蒙自—金平（YNMZ—YNJP）基线方向和红河断裂带近似正交，该基线的长度和方向变化特征如图 6 所示。由图可知：该基线呈缓慢伸长的状态，表明在红河断裂带的该部位存在一定的拉张，在 2011 年 6 月后出现了一定的转折，且这种转折的趋势还在继续；该基线方向的变化一直比较稳定。从 2012 年以来，蒙自—金平基线长度和方向的变化显得十分凌乱，可能受到了某种干扰，通过对这一时期这两个基准站的观测环境和近期地震情况的调查，并未发现异常的情况，这种变化可能是由于该地区处于红河断裂与小江断裂的交汇处，地壳活动比较复杂所致，也可能是该地区地壳活动性有所增强的一个信号。

文山—金平（YNWS—YNJP）基线的方向和红河断裂带走向斜交，其夹角约为 60° ，该基线的长度和方向变化特征如图 7 所示。由图可知：该基线总体表现为缩短，表明断裂带具有一定的压性。在 2011 年 6 月前后，这种压性有加强的趋势，至 2012

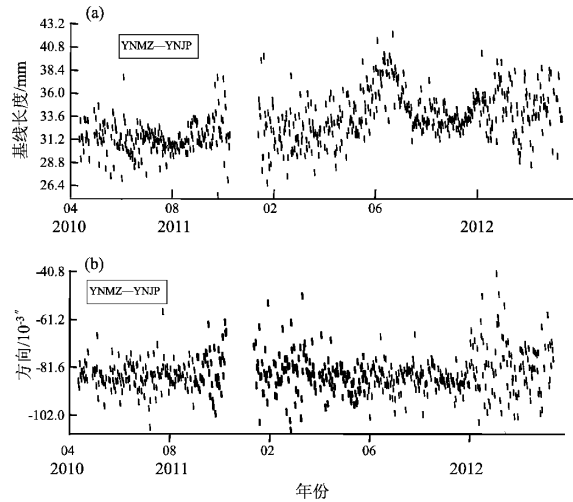


图 6 蒙自—金平基线长度变化 (a)
及方向变化 (b)

Fig. 6 Variety of length (a) and direction (b)
of Mengzi - Jinping baseline

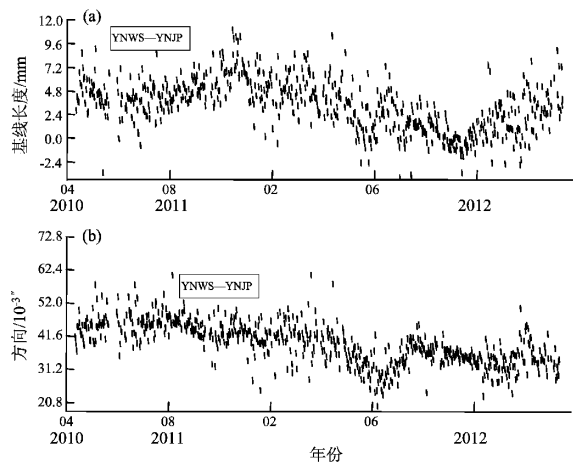


图 7 文山—金平基线长度变化 (a)
及方向变化 (b)

Fig. 7 Variety of length (a) and direction (b)
of Wenshan - Jinping baseline

年出现了反向变化。其方向变化一直持续变小。

比较 3 条基线的近期变化特征可知，红河断裂带的南段不同位置的变化比较复杂，其两端均表现为压性，而在与小江断裂带交汇处，却表现为张性，这可能主要由小江断裂的活动性所引起。红河断裂带南段总体为压性，从 2012 年以来出现了一定程度的反向变化，是否表示红河断裂带的南段活动性开始增强，这需要对以后的资料进行跟踪分析，以印证这种变化的持续性和查找引起这种变化的原因。

5 结论

通过对红河断裂带附近的 GNSS 基准站间基线长度和方向变化特征的分析,我们可以初步得出结论:

(1) 红河断裂带北段的基线主要表现为缩短,表明该段具有一定的走滑特性,这可能是由于青藏高原东缘向东南方向的挤出受到了红河断裂带的阻挡,基线缩短量被吸收了一部分。

(2) 红河断裂带中段的基线总体表现为缩短,表明该段具有一定的压性。在2011年3月24日缅甸7.2级地震震前短时间内基线出现了不稳定的变化,缩短变化达十几毫米;地震后该基线长度和方向均出现了较大的变化,表现为震后的调整过程,至6月份左右基本又恢复到了震前水平。这也说明,红河断裂带的中段对附近北东东向断裂的活动性影响比较敏感。

(3) 红河断裂带南段不同位置的变化显得比较复杂,其两端均表现为压性,而在与小江断裂带交汇处,却表现为张性,这可能是由小江断裂的活动性所引起。红河断裂带南段总体为压性,从2012年以来出现了一定程度的反向变化,是否也表示红河断裂带的南段活动性开始增强,这需要对以后的资料进行跟踪分析,以印证这种变化的持续性和查找引起这种变化的原因。

总之,青藏高原东缘向东南方向的挤出受到了红河断裂带的阻挡,并被其吸收了一部分;红河断裂带各段的 GNSS 基准站间基线长度和方向均

出现了不同程度的变化,在一定时间段内还出现了反向和加急的趋势,这充分说明红河断裂带的边界断裂作用仍然存在,但其作用在逐渐减弱。

参考文献:

- 邬顺民,向宏发,计凤桔,等.1996.红河断裂带第四纪右旋走滑与尾端拉张转换关系研究[J].地震地质,18(4):301-309.
- 邬顺民,张靖,邬顺民,等.1984.云南红河断裂带北段断裂位错与地震重复发生的时间间隔[J].地震地质,6(1):1-11.
- 韩健,周硕恩,宋永厚,等.1990.红河断裂带的分段特性及构造网络蕴震观[J].大地测量与地球动力学,(2):74-83.
- 郝天兆,江为为,胥颐,等.2005.红河断裂带研究区深部结构特点的地球物理研究[J].地球物理学进展,20(3):584-593.
- 江娃利.1997.红河活动断裂中南段航片变位地形判读及野外检验[A]//地壳构造与地壳应力文集.北京:地震出版社.
- 申重阳,吴云,王琪,等.2002.云南地区主要断层运动模型的GPS数据反演[J].大地测量与地球动力学,22(3):46-51.
- 王恩宁,沈正康,王敏,等.2008.基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J].中国科学(D辑:地球科学),38(5):582-595.
- 王庆良,王文萍,崔笃信,等.2002.青藏块体东北缘现今地壳运动[J].大地测量与地球动力学,22(4):12-16.
- 王阎昭,王恩宁,沈正康,等.2008.基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J].中国科学(D辑:地球科学),38(5):582-597.
- 闫伟,牛安福,江在森,等.2007.昆仑山地震前后基线变化特征研究[J].大地测量与地球动力学,27(S1):8-11.
- 张建国,秦嘉政,乔森,等.2001.云南永胜6.0级地震观测与研究[M].昆明:云南科技出版社.
- 张建国,谢英情,金明培,等.2009.中越红河断裂活动性研究[M].昆明:云南科学技术出版社.
- 张清志,刘宇平,陈智梁,等.1998.红河断裂的GPS监测[J].地球学报,27(4):367-372.

**Motion Characteristic of Honghe Fault Belt based on Baseline Time-series
Recorded at GNSS Reference Station**

SHI Fa-qi, FU Yun-wen, WANG Zhi-min

(*Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

We analyze the length and direction variation characteristics of baseline recorded at GNSS Reference Stations around the Honghe Fault Belt. The results show that the length of baselines in different segment of Honghe Fault Belt become short, its reason is sortheastward extrusion of eastern margin in Tibetan Plateau is blocked by the Honghe Fault Belt and a portion of baseline shorten amount is absorbed. The length of baseline in several segments of Honghe Fault Belt shows the tendency of reversing and intensifying in a certain period, which describes that there exits the boundary faulting of Honghe Fault Belt, however its effects become less obvious.

Key words: Honghe Fault Belt; GNSS Reference Station; baseline time-series; motion characteristics