

红河断裂带中、越现代形变监测对比研究综述*

李西¹, 张建国¹, 郭君²

(1. 云南省地震局, 昆明 650224; 2. 昆明冶金高等专科学校 冶金与矿业学院, 昆明 650033)

摘要: 利用现今大地形变测量资料, 可分析研究得到现今地壳形变特征。大地形变场的建立, 主要以精密水准测量监测大地区域垂直形变, 以地面激光测距监测大地水平形变, 以短基线、短水准测量等方法对断层活动性进行定点观测研究。20世纪90年代以后比较流行用GPS监测场区现代构造运动及断裂的地壳形变。本文主要通过分析对比中、越红河断裂带及其相邻地区的现代形变监测资料, 得出现今红河断裂的形变特征。

关键词: 红河断裂带; 形变监测; 水平形变; 垂直形变

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2009)增刊-0481-07

0 前言

红河断裂是一条活动历史悠久的大型走滑断裂, 是印支半岛与华南地块之间的主位移带, 同时也是云南省最具代表性的活动断层(张清志等, 2006)之一。它北起剑川弯坡塘, 向东南经洱源、大理、弥渡、元江、红河、延至中越边境河口, 进入越南境内。红河断裂带全长约1400 km, 其中, 云南境内长约600 km, 越南境内长约370 km, 海域长度约430 km。

红河断裂带的明显差异特征及独特背景, 吸引众多国内外地学界专家学者在该断裂带上开展了大量的研究工作。相对我国境内而言, 越南境内对红河断裂带的研究程度较低, 致使以往对这类问题的研究认识缺乏完整系统的资料基础。为了方便广大地震工作者能够更加全面的研究该断裂带, 本文将云南省科技厅国际合作计划重点研究课题《中越红河断裂带地震活动性与地震构造特征对比研究》中收集到的中、越双方的现代形变监测资料, 进行整理、总结, 得出红河断裂带现今地壳形变特征, 以供参考。

1 越南境内红河断裂形变监测

红河断裂带在越南境内的部分主要由3个断裂系组成, 从左至右分别是红河断裂(Red River Fault)、斋河断裂(Song Chay Fault)和明河断裂

(Song Lo Fault)(图1)。越南对红河断裂带的形变监测主要由三角测量和GPS测量两部分组成。

1.1 水平形变基本特征

通过结合(1)从1963~1982年的三角测量, (2)1983年的三角测量以及1994、1996、1998和2000年的GPS观测资料, 可以估算越南境内跨红河断裂的水平张力率。

(1) 三角测量

从1963~1994年, 越南国内运用大地测量的方法来估算越南Thac Ba附近跨红河断裂的水平应变率。其中1963~1983年间, 有两期三角测量资料, 三角测量网络分布图如图1所示。

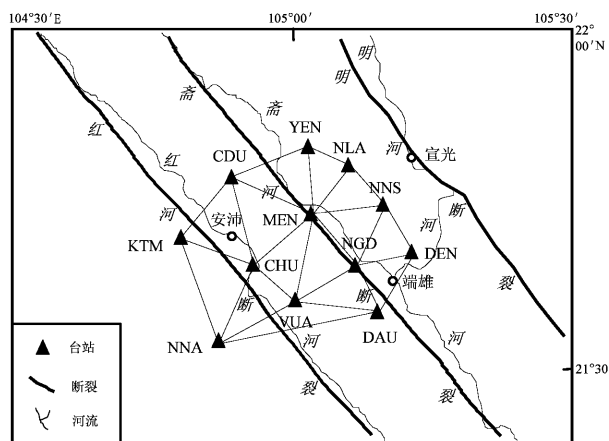


图1 Thac Ba三角测量网络分布图(1963~1983)
(Tran Dinh To, 2003)

Fig. 1 Thac Ba triangulation network (1963-1983)

* 收稿日期: 2009-09-25.

基金项目: 云南省科技厅国际合作计划项目资助(25-4)。

Duong Chi Cong 和 Kurtl Feigl (1999) 通过断裂的活动来阐述观测到的应变率, 他们认为: 剪切应变率 γ_1 在 10 个三角中有 7 个的值为正 (表 1), 结果就与北西走向的红河断裂系是呈右旋简单剪切的情况相符。

表 1 剪切应变率及其不确定性^①

Tab. 1 Shear strain rate and its uncertainty

Triangle	$\gamma_1/\mu\text{rad} \cdot \text{a}^{-1}$	$\gamma_2/\mu\text{rad} \cdot \text{a}^{-1}$
KTM - NNA - CHU	0.284 ± 0.278	0.070 ± 0.283
CHU - NNA - VUA	0.133 ± 0.275	-0.094 ± 0.301
CHU - CDU - KTM	0.033 ± 0.124	-0.023 ± 0.140
MEN - CHU - VUA	-0.161 ± 0.186	-0.150 ± 0.155
CDU - CHU - MEN	-0.057 ± 0.168	-0.128 ± 0.130
NGD - VUA - MEN	0.141 ± 0.169	-0.004 ± 0.136
CDU - MEN - NLA	0.203 ± 0.323	0.204 ± 0.299
NNS - NGD - MEN	-0.118 ± 0.179	-0.168 ± 0.144
DEN - NNS - NGD	0.024 ± 0.149	-0.239 ± 0.226
NLA - MEN - NNS	0.222 ± 0.265	0.628 ± 0.474

(2) GPS 测量

1994 ~ 2000 年, 越方在 Thac Ba 和 Tam Dao-Ba Vi 地区总共进行过 6 期跨红河断裂带的 GPS 形变观测, 观测网络如图 2、图 3 所示。

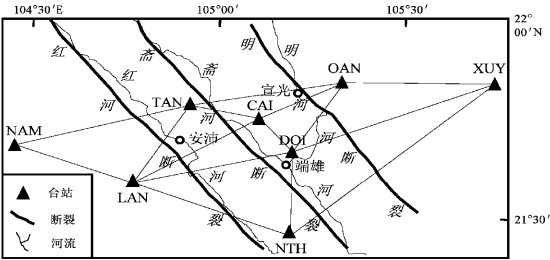


图 2 Thac Ba GPS 观测网分布图 (1963 ~ 1983 年)^①
Fig. 2 Thac Ba GPS network (1963 ~ 1983)

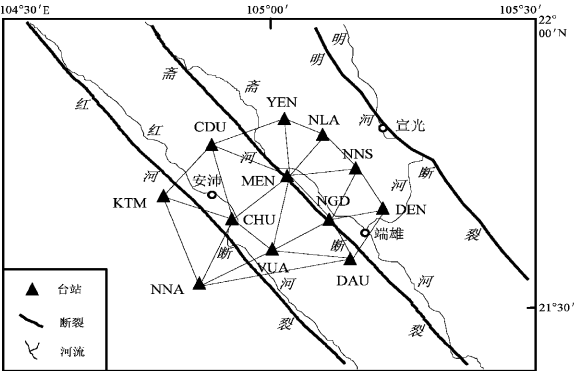


图 3 Tam Dao-Ba Vi GPS 观测网分布图
(Tran Dinh To, 2003)

Fig. 3 Tam Dao-Ba Vi GPS network

在 Thac Ba 地区一共进行过 2 期 GPS 观测。通过对观测资料的计算, 得出各 GPS 观测点的速度场及其不确定性如表 2 所示。他们的平均水平速度是 $(0.3 \pm 0.7) \text{ mm/a}$ 。因此 Tran Dinh To 等 (2003) 认为红河断裂的水平运动速度的上限是 2 mm/a 。

表 2 Thac Ba 各站点水平活动速度及其不确定性 (mm/a)^①

Tab. 2 Pace of activity and level of uncertainty
in each site of Thac Ba (unit: mm/a)

Comp. Velocity, uncertainty	HUN	THA	SOC	LAP	SON	BAV	TAM
N (North)	0.0	-0.7	0.2	0.3	1.9	2.2	1.8
MN	0.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.2
E (East)	0.0	0.4	-0.4	0.6	-0.2	0.1	0.9
ME	0.0	1.0	1.0	1.0	1.7	1.0	1.4
H (Horizontal)	0.0	0.8	0.5	0.6	1.9	2.3	2.0
MH	0.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.8

在 Tam Dao-Ba Vi 地区进行了 4 期 GPS 观测。通过对观测资料的整理、计算, 得出各 GPS 观测站的速度场及其不确定性如表 3 所示。他们的平均水平速度是 $(0.2 \pm 1.4) \text{ mm/a}$ 。认为红河断裂在短期以内的水平运动速度上限为 2 mm/a 。

表 3 Tam Dao-Ba Vi 各站点水平活动速度及其不确定性 (mm/a)^①

Tab. 3 Pace of activity and level of uncertainty in each
site of Tam Dao-Ba Vi (unit: mm/a)

Velocity uncertainty	NTH	CAI	DOI	LAN	NAM	OAN	VUA	XUY
N (North)	0.0	0.4	0.6	-0.4	0.3	0.6	1.6	0.1
MN	0.0	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4
E (East)	0.0	-0.3	0.0	-0.9	0.0	-0.6	2.1	0.3
ME	0.0	± 0.5	± 0.4	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4
H (Horizontal)	0.0	0.5	0.6	1.0	0.3	0.8	2.6	0.3
MH	0.0	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.7	± 0.7	± 0.7	± 0.6

以上研究表明, 1994 ~ 2000 年红河断裂水平运动速度上限为 2 mm/a 。

1.2 垂直形变基本特征

Cao Dinh Trieu (2003) 在重力场—地磁场速度综合平面图上, 详细的描述了新构造期地壳垂直运动速度 (V_v) 和当前地壳垂直运动速度

① Tran Dinh To, Nguyen Trong Yem, Duong Chi Cong, et al. 2003. Geodetic measurements of horizontal movement and deformation across the Red River Fault in Vietnam.

(V_n)， V_t 来源于 Cao Dinh Trieu (2003) 的实验结果， V_n 则是以 1960 ~ 1964 年和 1978 ~ 1979 年两期高精度水平测量数据为基础计算的。红河断裂带及其毗邻区域的新构造期和当前的地壳垂直运动的典型现象表明：

(1) 在新构造期，红河断裂带表现了一种较弱的垂直运动，其运动速度 $V_t = (0.2 \sim 0.3) \text{ mm/a}$ 。

(2) 在新构造期，地壳垂直运动速度在水平方向上的差异是巨大的。根据垂直运动速度 (V_t) 的差异，红河断裂带被分成了 3 个地壳结构块体，它们分别是 Hanoi-Nam Ninh 块体、Nui Con Voi 块体和 Lao Cai-Bac Ha 块体，并伴随着 Hanoi-Viet Tri 和 Yen Bai-Luc Yenz 转换结构的交替。

(3) 红河断裂带上的块体垂直运动是不均等的。当前，受东北方向强烈的水平挤压在红河断裂带的东北边缘空白带上具有较大的垂直运动速度 (V_n)。

2 国内红河断裂现代形变监测

从 20 世纪 60 年代开始，滇西北地区已经布设了垂直形变监测网和水平形变监测网。垂直形变监测的水准路线总设计长度约为 1 944 km，共 7 个水准环线，最大周长约 707 km，最小周长约 144 km。根据不同的要求，水平形变监测已经布设 2 个大网、3 个中网、1 个辐射网和 4 个小网。大网边长在 20 km，中网平均边长约 7 ~ 8 km，小网边长一般小于 1 km。为研究川滇地区现今地壳运动与形变特征，强化地震预测研究。从 20 世纪 70 年代开始，中国地震局地质研究所和川滇两省地震部门在川滇地区的主要断裂带上陆续布设了精密水准测量网、激光测距网、跨断层短基线、短水准和连续蠕变观测点等，并定期进行复测。20 世纪 80 年代末，中国地震局地震研究所等多家单位又在该区相继实验性地布设了不同规模 and 不同复测周期的区域 GPS 观测网。特别是 1998 年国家大型科学工程“中国地壳运动观测网络”的实施，1999 年开始的国家重点基础研究发展规划“大陆强震机理与预测”项目在川滇地区进行了 GPS 加密观测，以及 1988 年和 1991 年中德合作两次用 GPS 监测滇西地震预报实验场场区现代构造运动及红河断裂的地壳形变 (王琪等, 1998)，给出了该

区高精度的地壳形变场。

2.1 水平形变基本特征

从 20 世纪 50 年代开始，国内对跨红河断裂带及其相邻地区进行了大量的形变观测。水平形变监测网主要由三角网和 GPS 观测网组成。

表 4 下关巍山大网重要水平应变参数 (1959 ~ 1981 年)
(国家地震局地质研究所，云南省地震局，1990)

Tab. 4 Large network important parameters of horizontal strain in Weishan of Xiaguan (1959 – 1981)							
组 号	主应变 ε_1 $\times 10^{-6}$ 方位/(°)		主应变 ε_2 $\times 10^{-6}$ 方位/(°)		最大剪切 $\gamma = (\times 10^{-6})$	面膨胀 $\Delta (\times 10^{-6})$	地域
1	-4.8	66°	+0.2	156°	5.0	-4.6	跨红河断裂
2	+0.1	6	+1.7	96	1.6	+1.8	南西侧
3	-0.4	20	+1.7	110	2.1	+1.3	北东侧
4	-0.8	47	+0.8	137	1.6	0	网区

(1) 三角网形变观测及其特征分析
滇西北地区水平形变监测三角网 (1959 ~ 1988) 在该区水平形变数据采集，由于重新平差精度降低，对老边长 (20 世纪 50 年代施测的三角测量成果) 一般采用原整体平差结果；而对新边长 (即激光测距成果)，一般都进行边长投影计算，伪逆平差计算。

由表 4 可看出，第一组以跨红河断裂带测边线应变组合计算，其最大剪切取最高值 (5×10^{-6})，与西部地域 (1.6×10^{-6}) 和东部地域的 (2.1×10^{-6}) 相比较，它是测区内最为明显的活动断裂，而且从平均趋势看以右旋运动为主。根据阳世华等 (1983) 的计算，本网区总应变主张明显大于主压，给出了更加明确的断裂活动特征。剑川—巍山大网布设在本研究区的北部。从测量资料分析，它主要反映了龙蟠—乔后断裂的南段，反映其左旋运动性质。

在剑川—洱源大网中，选用跨红河断裂带 (洱海断裂北段) 测边线应变进行应变参数的组合计算，覆盖洱源的三角形网给出红河断裂带的右旋活动特征；仅用跨红河断裂带的测边计算，最大剪切达 2.1×10^{-5} ，这个量级比龙蟠—乔后断裂的剑川地段还稍大一些。这反映洱源北段比较狭窄的范围内右旋运动性质。

(2) GPS 网形变观测及其特征分析
张培震等 (2003) 研究认为，川滇地区 GPS 观测结果揭示了红河断裂可能具有右旋走滑的运

动方式，但右旋走滑不是沿着红河断裂带发生的，而是沿着楚雄—建水断裂、红河断裂和澜沧—耿马断裂共同发生，形成一条宽达 300 km 的右旋剪切带，其右旋走滑速率可达 (10 ± 3) mm/a (图 5)。就红河断裂带本身而言，右旋走滑速率可能只有 $(3 \sim 4)$ mm/a，与活动断裂研究结果类似。

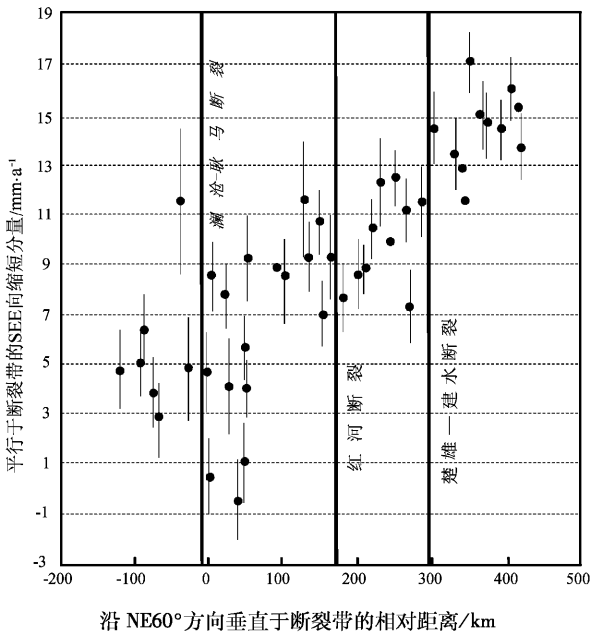


图 4 横跨红河断裂的 GPS 速度剖面
(张培震等, 2003)

Fig. 4 GPS velocity profile across
the Red River Fault Zone

(剖面沿 NE60° 由 SWW 向 NEE 方向延伸)
(纵坐标是平行于断裂的走滑速度分量)

张清志等 (2006) 利用 1999 年和 2003 年红河断裂的 GPS 观测资料，通过数据反演获得在欧亚参考框架下的速度矢量图。结果表明：在欧亚框架下，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。分析表明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高度吻合。

王阎昭等 (2008) 在没有设置红河断裂带断层单元的情况下得到很小的 GPS 速度场残差，说明这些断裂在现今可能不活动或活动性很弱。前人大量研究表明其晚更新世以来有明显的活动。

但我们的反演结果显示红河断裂现今活动不强，其北西段右旋走滑活动和挤压活动分别为 (0.4 ± 1.6) mm/a 和 (1.5 ± 1.3) mm/a，中段右旋走滑活动和拉张活动分别为 (0.3 ± 1.3) mm/a 和 (1.0 ± 1.5) mm/a，南东段左旋走滑活动和挤压活动分别为 (1.5 ± 2.7) mm/a 和 (1.3 ± 2.0) mm/a，与前人研究结果相比基本一致。事实上近些年的地震分布也显示红河断裂现今表现相当平静。

红河断裂是川滇活动地块的西南边界，研究表明其新生代早期的运动以左旋走滑为主，后期转变为右旋走滑。断裂北段由一系列具有很大拉张分量的右旋走滑正断层所组成，晚第四纪到现今构造活动强烈，控制了一系列历史强震的发生，如 1993 年丽江 7.3 级地震。断裂南段结构比较简单，以沿红河河谷发育的走滑断裂为主，有历史记载以来没有强震发生。虢顺民等 (2001) 估计该断裂晚第四纪滑动速率为 1 ~ 3 mm/a。

以上研究表明红河断裂带在中国境内的平均水平运动速率约为 1 ~ 4 mm/a。

2.2 垂直形变基本特征

根据 1981 ~ 1983 年测量资料 (图 5b)，垂直形变场的对称位置表现在洱源、邓川、下关一带。国内地震专家认为这一时段的形变场特征反映了红河断裂带的单一活动性：东侧为北降南升，西侧为南降北升。这种垂直形变的四象限分布特征，使专家们得出两个重要的结论：①红河断裂带发生了东盘向南、西盘向北的推进运动，丽江、鹤庆地区处于拉张下沉部位；②水平运动使断裂后段拉张下沉，前段挤压抬升，洱源以南的邓川地区处在枢纽部位，从而产生垂直应变的积累。

图 5b 可以看出，这种垂直形变特征是有其构造活动背景的。红河断裂带以东的垂直形变显然受程海断裂带以及鹤庆—洱源断裂活动的控制；红河断裂带西侧的垂直形变显示受到了北东向活动断裂的控制。

由 1983 ~ 1985 年测量资料 (图 5c) 可以看出红河断裂带在这一期的活动。其垂直形变的对称部位基本上与图 5b 相同，但运动方向已有转向，对称轴亦有偏转。永胜、宾川地区形变恢复，但丽江、鹤庆地区仍继续下沉，说明本区的活动水平没有减弱。

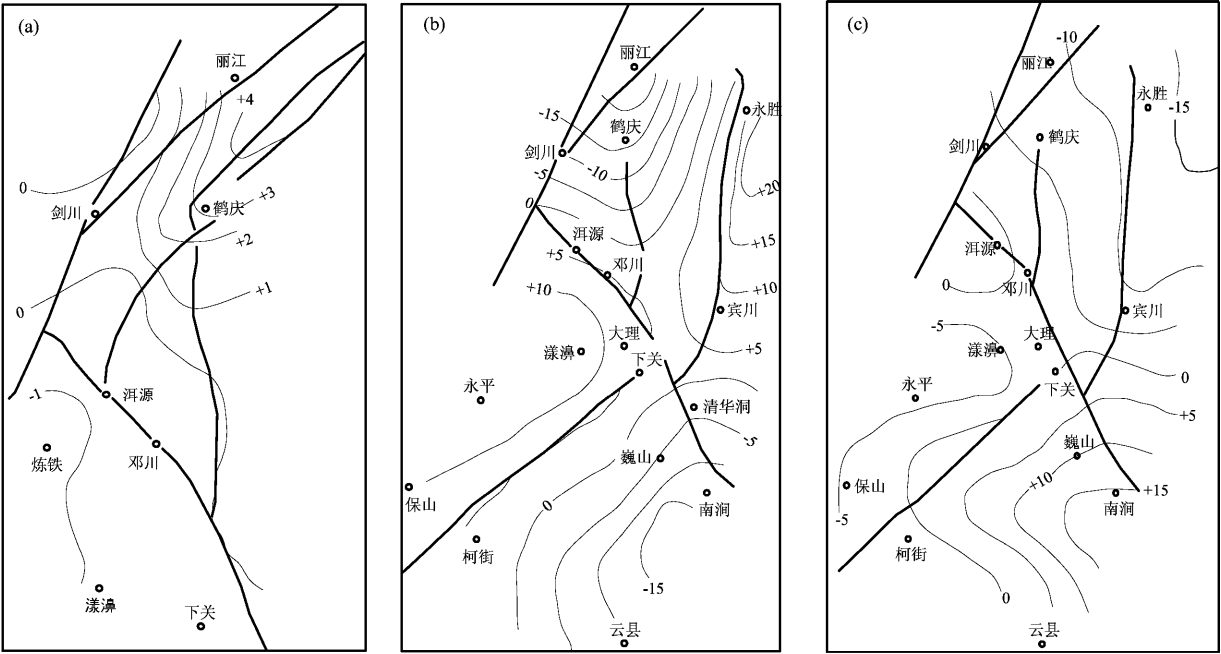


图5 垂直形变演变图（单位：mm/a）（国家地震局地质研究所，云南省地震局，1990）
（a）1969～1981年；（b）1981～1983年；（c）1983～1985年
Fig. 5 Evolution of vertical deformation（unit：mm/a）

如果将图 5b 和图 5c 数值相减，可以明显看出它的形变波动，其总体趋势与图 5a 基本一致。说明滇西北地区龙蟠—乔后断裂带和红河断裂带的活动是连续的，并基本上是定向的（虢顺民等，2001 年）

由表 5 和图 6 可以看出：红河断裂带各场地的形变活动差异较大，石屏、楚雄、下关、丽江、剑川等 5 个场地，一直处于较低活动水平。在测点周围几次强烈地震前后，也未表现出大的形变。而峨山、通海、漾濞等 3 个场地一直处于较高活动水平。

表 5 红河断裂带形变场地运动特征（吕弋培，廖华，2002）
Tab. 5 Red River fault zone deformation characteristics of the venue motion

断裂	场地	垂直运动	
		速率	性质
红河断裂	峨山	2. 19	上盘下降
	通海	1. 12	上盘抬升
	石屏	0. 13	上盘下降
	楚雄	0. 26	上盘抬升
	下关	0. 16	上盘下降
	漾濞	0. 14	上盘抬升
	剑川	0. 09	上盘抬升
	丽江	0. 11	上盘抬升

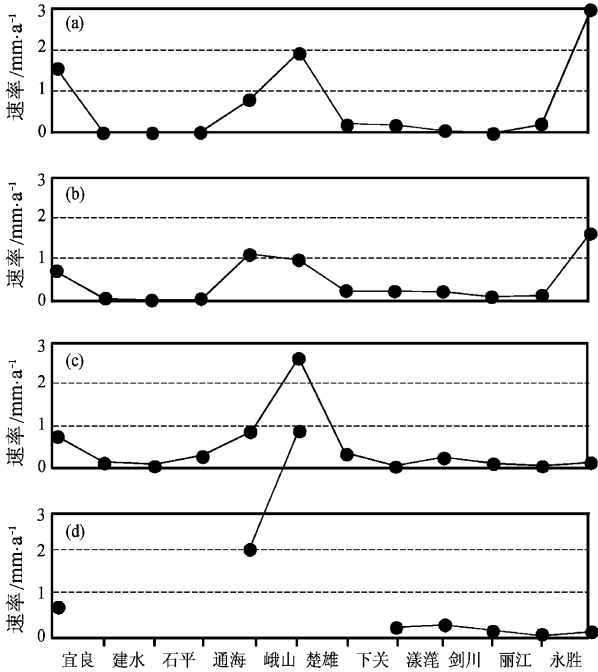


图 6 各测点不同时段垂直运动速率图
（吕弋培，2002）
（a）1995～2000 年；（b）1990～1995 年；
（c）1985～1990 年；（d）1980～1985 年

Fig. 6 Vertical movement rate of different time section in different measuring points

不同时期,表现出不同的运动特征,变化大的场地在 1980~1990 年期间,处于较高活动水平,在 1990~1995 年期间运动速率普遍降低,1995~2000 年期间又恢复较高的活动水平(图 5)。石屏-下关段的垂直运动速率是 $(0.13 \sim 0.26) \text{ mm/a}$,而峨山、通海的垂直运动速率则为 $(1.12 \sim 2.19) \text{ mm/a}$ 。在红河断裂带上,有两段的运动特征异于该断裂的地质运动方向,即下关-剑川段和通海-石屏段,这些异常运动段的出现,表明该区域存在较大的断层闭锁区,也是构造应力积累区,这些区域将是未来地震发生的重点危险区(吕弋培等, 2002)。

苏琴(2005)通过对川滇菱形块体的跨断层形变测点长达 20 年的观测资料进行处理,计算出每一水准测点的年变化速率平均值,并根据垂直形变速率计算结果对断层活动方式进行分析,得出了各测点的垂直形变速率及断层活动方式:

位于块体西南边界的红河断裂带,其垂直形变速率差异很大,该断裂北段的漾濞场地平均速率达 5.46 mm/a ,此处断层长期处于高速蠕滑运动状态。而其余场地除丽江测点的垂直形变年速率大于 0.50 mm/a 外,其他场地年速率均较小。红河断裂带受其地质构造影响,断层活动性较复杂,北段以压性为主,南段(曲江段)则以张性为主。

以上研究表明,红河断裂带在中国境内的垂直形变速率约为 $(0.09 \sim 5.46) \text{ mm/a}$ 。

3 结语

自 20 世纪 60 年代以来,中越双方利用三角网

和 GPS 观测网进行过跨红河断裂带的水准测量和 GPS 测量。测量的水平运动速率:越方的小于 2 mm/a ,中方的介于 $1 \sim 4 \text{ mm/a}$ 之间;垂直运动速率:越方的介于 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm/a}$ 之间,中方的介于 $0.09 \sim 5.46 \text{ mm/a}$ 之间。结论基本符合红河断裂北强南弱的活动性特征。

参考文献:

- 国家地震局地质研究所,云南省地震局. 1990. 滇西北地区活动断裂[M]. 北京:地震出版社.
- 魏顺民,计凤桔,向宏发,等. 2001. 红河活动断裂带[M]. 北京:海洋出版社.
- 吕弋培,廖华等. 2002. 川滇菱形块体边界的现今地壳形变[J]. 中国地震,18(1):28-37.
- 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[J]. 四川地震,(1):43-46.
- 王琪,赖锡安,游新兆,等. 1998. 红河断裂的 GPS 监测与现代构造应力场[J]. 地壳形变与地震,18(2):49-56.
- 王阎昭,王恩宇,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),38(5):582-597.
- 杨国华,王琪,王敏,等. 2003. 云南地区现今地壳水平运动与变形特征[J]. 大地测量与地球动力学,23(2):8-13.
- 张培震,王敏,甘卫军,等. 2003. GPS 观测的活动断裂滑动速率及其对现今大陆动力作用的制约[J]. 地学前缘(中国地质大学),10(S1):81-92.
- 张清志,刘宇平,陈智梁,等. 2006. 红河断裂的 GPS 监测[J]. 地球学报,27(4):367-37.
- Duong Chi Cong, Kurtl Feigl. 1999. geodetic measurement of horizontal strain across the red river fault near thac ba, viet nam, 1963-1994 [J]. Journal of geology, (13-14):9-18.
- Cao Dinh Trieu. 2003. deep structure recent dynamics and seismic activity in red river fault zone in viet nam[J]. Journal of geodesy and geodynamics, 23(1):93-102.

Modern Deformation Monitoring Survey Comparative Study Summary in China and Vietnam of the Red River Fault Zone

LI Xi¹, ZHANG Jian-guo¹, GUO Jun²

(1. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041, Yunnan, China*)

(2. *Kunming metallurgy college, Kunming 650033, Yunnan, China*)

Abstract

Using the current Geodetic deformation measurements information, we can analyze and learn the present crustal deformation features. The establishment of earth deformation field, mainly depend on precision land leveling to monitor regional vertical deformation, laser ranging to monitor the horizontal deformation of the land. Using short-baseline and short-level to conduct a fixed point observation and research on the fault activity.

After the 1990s, GPS monitoring for the field of modern tectonic movement and crustal deformation of the fault becomes popular. In this paper, by analyzing and comparing the modern deformation monitoring datum of the Red River fault zone and its adjacent areas in China and Vietnam, we obtained the deformation characteristics of today's Red River fault.

Key words: the Red River fault Zone, deformation monitoring, horizontal deformation, vertical deformation