

闫伟、武艳强、牛安福等, 2013, 基于择优的块体模型解算南北地震带中南段主要断层滑动速率, 中国地震, 29(1), 81~90。

基于择优的块体模型解算南北地震带 中南段主要断层滑动速率

闫伟¹⁾ 武艳强²⁾ 牛安福¹⁾ 李晓帆¹⁾ 张凌空¹⁾ 吉平¹⁾

1) 中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要 利用 1999~2007 期 GPS 速度场数据, 通过块体模型择优得到了南北地震带中南段主要块体边界带变形的适用模型, 并给出了块体边界主要断层的滑动速率。结果表明, 龙门山断裂带宝兴-汶川段张压速率较小, 为 $0.5 \sim 1.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 汶川-茂县压性相对显著, 速率达 $1.8 \sim 3.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 鲜水河断裂带张压及走滑速率存在一定的空间差异性特征, 即炉霍以北张性滑动速率 ($8.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$) 比左旋走滑速率 ($4.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$) 大, 炉霍-道孚段张压速率与走滑速率基本相同, 道孚-康定段呈现出左旋走滑速率减小、张性速率增大的变化趋势, 康定-石棉段表现出较明显的左旋走滑性质; 小江断裂带走滑速率明显大于张压速率; 红河断裂带空间分段性较为明显, 北西段滑动量较小, 但存在一定的张压分量 (景东段速率 $4.7 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$), 南东段 (个旧以西) 以走滑为主 (速率 $4.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)。

关键词: 块体模型 滑动速率 南北地震带 模型适用性评价

[文章编号] 1001-4683(2013)01-0081-10

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

“活动块体”是脆性地壳在最新构造变动期间变形局部化的产物, 指受晚第四纪活动构造切割、围限且至今仍活动着的构造单元, 具有运动的整体性、边界类型的多样性、多种构造变形的相互协调性等基本特征, 与现今地表破裂型地震的发生密切相关 (徐锡伟等, 2003)。自从丁国瑜等 (1989, 1991) 基于地质学方面的研究将中国大陆分为 6 大亚板块以来, 许多研究运用 GPS 资料对活动块体的划分作了一系列有益的尝试 (周硕愚等, 1998; 张强等, 2000; 黄立人等, 2000; 张培震等, 2002; 王小亚等, 2002)。随着 GPS 观测资料的大量产出, 描述活动地块运动的块体模型也有了很大的发展。许多学者 (马杏垣, 1989; 丁国瑜等, 1989; 李延兴等, 1998、2000; 黄立人等, 1999; 杨国华等, 2001; Wang et al, 2001) 利用描述块体三维运动的欧拉模型研究了块体的运动状态。由于每个块体在周围板块或块体的作用下

[收稿日期] 2012-09-14; **[修定日期]** 2012-12-27

[项目类别] 国家“十二五”科技支撑计划 (2012BAK19B02)、地震行业专项 (201108009)、震情跟踪青年课题 (2012020212) 共同资助

[作者简介] 闫伟, 男, 1982 年生, 助理研究员, 研究方向为形变资料处理与分析。E-mail: ywpro@163.com

不仅会产生平移和旋转,同时块体内部将会发生塑性变形,因此李延兴等(2001)提出了统一描述块体欧拉运动和内部变形的均匀变形模型及线性变形模型,并比较了3种模型的优缺点(李延兴等,2004)。在此基础上,其他学者利用不同的块体模型刻画了中国大陆各个 I、II 级地块的运动、变形参数(乔学军等,2004;郭良迁等,2008;李延兴等,2006a、2006b;吕江宁,2003;方颖,2005)。

由于活动地块边界带变形结果会受模型的影响,因此模型的适用性研究就显得尤为重要。本文利用南北地震带中南段 GPS 资料,对刚体模型、均匀变形模型和线性变形模型在块体边界主要断层滑动速率研究中的适用性进行了分析,择优后选用适合模型计算了该区块体边界主要断层的滑动速率,并分析了其变形特点。

1 观测数据及块体模型

1.1 研究区域块体划分及观测数据

本文的研究区域为南北带中南段($20^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ} \sim 110^{\circ}\text{E}$),涉及的 I、II 级块体(张培震等,2003)为巴彦喀拉块体、华南块体、羌塘块体、川滇块体、滇西块体及滇南块体等。研究的块体边界为龙门山断裂带、鲜水河断裂带、则木河-小江断裂带及红河断裂带等(图1)。

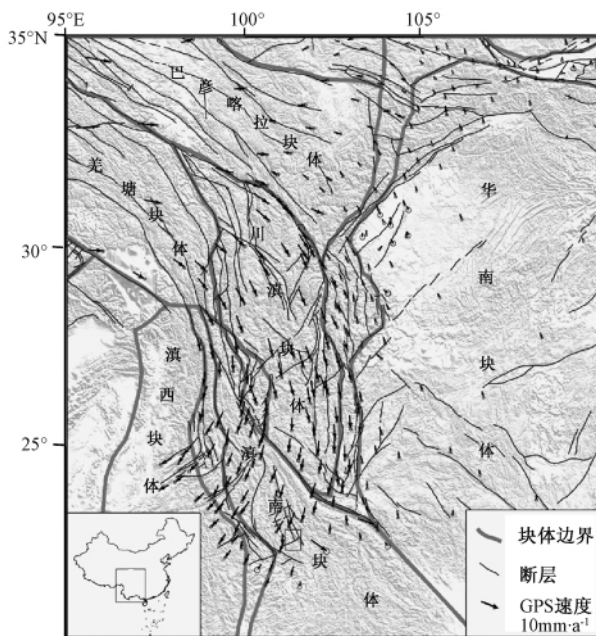


图1 研究区域的 GPS 速度场结果

本文 GPS 速度场的解算分3步进行,首先采用 MIT 的 GAMIT 软件解算(Herring et al, 2006a)每期区域网观测数据的测站坐标和卫星轨道的单日松弛解;然后利用 GLOBK 软件(Herring et al, 2006b)融合 IGS 连续站、中国大陆基准站和中国大陆多期 GPS 区域站的单日松弛解,平差得到 ITRF 参考框架下的 GPS 速度场;最后通过基准变换扣除整体运动,得到中国大陆参考基准的速度场(图1)。

1.2 块体模型理论

块体模型可分为刚体运动模型、均匀变形模型及线性变形模型(李延兴等, 2001、2004)。其中刚体运动模型假定块体内只发生包括平移与旋转的刚体运动, 可将此类运动等效成绕某一点(欧拉极)的三维转动(式 1)。均匀变形模型为在刚体运动模型的基础上考虑到了块体内部变形, 且将内部变形假定为空间均匀分布(式 2)。线性变形模型则考虑到了内部变形的空间非均匀性, 假定变形分布与距某一点的距离成线性关系(式 3)。

$$\begin{bmatrix} v_E \\ v_N \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin\phi\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi \\ \sin\lambda & -\cos\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_E \\ v_N \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin\phi\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi \\ \sin\lambda & -\cos\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_E & \varepsilon_{EN} \\ \varepsilon_{EN} & \varepsilon_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_E \\ v_N \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin\phi\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi \\ \sin\lambda & -\cos\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ B_0 & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ B_1 & C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_2 + B_1 \\ B_2 + C_1 \end{bmatrix} xy \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} \varepsilon_E = A_0 + A_1x + A_2y \\ \varepsilon_{EN} = B_0 + B_1x + B_2y \\ \varepsilon_N = C_0 + C_1x + C_2y \end{cases}, \quad \begin{cases} x = (\lambda - \lambda_0) r \cos\phi \\ y = (\phi - \phi_0) r \end{cases}$$

式(1)、(2)、(3)中 v_E 、 v_N 是块体上任一点 (λ, ϕ) 的东向速度与北向速度, r 为地球半径, ω_x 、 ω_y 、 ω_z 为块体的欧拉矢量中的 3 个分量, ε_E 、 ε_N 、 ε_{EN} 分别为块体 EW 向线应变、NS 向线应变以及 EW 向与 NS 向之间的剪应变, 其余为中间变量。

2 模型择优结果

由于每个块体都可用前面 3 种模型进行参数计算和分析, 但不同模型结果会表现出差异, 因此进行具体应用之前需要进行模型择优工作。对于每个块体整体而言, 线性变形模型优于均匀变形模型, 均匀变形模型优于刚体运动模型(李延兴等, 2004)。考虑到本文的研究对象为块体边界, 对于多解择优问题来讲, 整体最优解(即整个块体最适用的模型)并不一定代表边界最优解。因此, 要确定描述块体边界的最优模型可基于该边界处的速度残差和模型速度误差给出, 即在保证块体边界数据拟合残差的情况下, 选用误差最小的模型进行择优。

从式(1)~(3)可以看出, 3 种模型的主要区别为拟合参数的多少, 其中均匀变形模型为在刚体运动模型的基础上增加了 3 个应变参数, 线性变形模型为在均匀变形的基础上增加 6 个应变参数。理论上说, 上述模型均可用下式的误差方程描述

$$V = B\hat{x} - l \quad (4)$$

由测量平差原理,可得

$$D_{\hat{V}\hat{V}} = B D_{\hat{X}\hat{X}} B^T \tag{5}$$

$$D_{\hat{X}\hat{X}} = \sigma_0^2 Q_{\hat{X}\hat{X}} = \sigma_0^2 N b b^{-1} = \sigma_0^2 (B^T P B)^{-1} \tag{6}$$

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{n - t}} \tag{7}$$

当误差方程系数 B 、观测值权矩阵 P 、观测总数 n 一定时,单位权中误差的大小取决于误差估计值 V 和必要观测数 t ;当拟合参数个数增加时, V 减小, t 增大,式(7)中分子分母同时减小,单位权中误差 $\hat{\sigma}_0$ 的变化情况需要具体计算分析。

图2表示川滇菱形块体东边界内GPS观测点3种模型的误差及残差分布情况。由图2可以看出,在保证3种模型解算的残差(图2(c)、(d))基本相同的情况下,以选取误差(图2(a)、(b))最小的刚体运动模型为准则进行计算断层滑动速率。

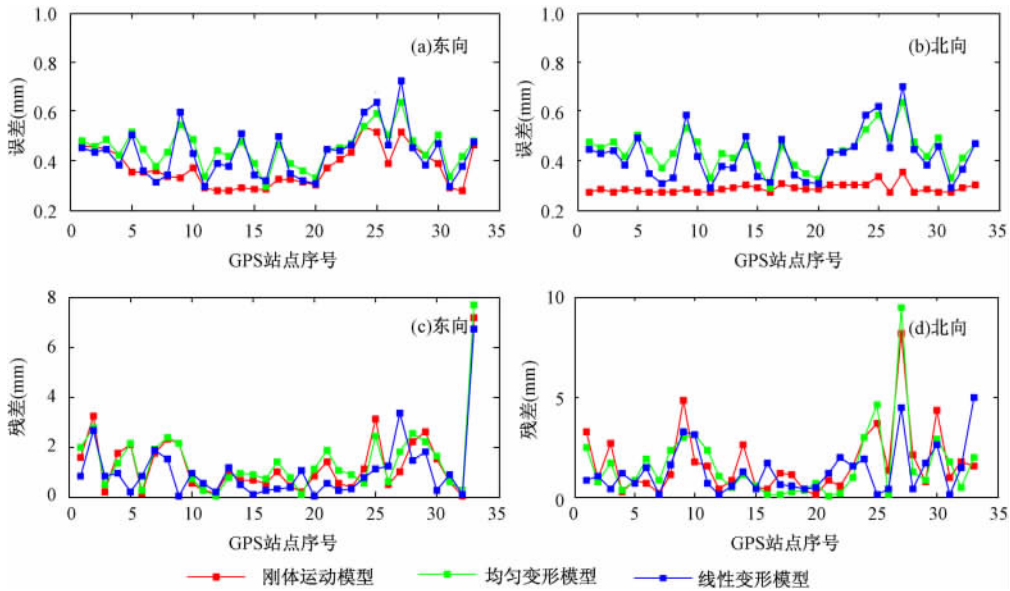


图2 川滇菱形块体东边界内GPS观测点3种模型的误差及残差分布

根据同样的规则,可以计算研究区域内的各块体边界的模型适用性(表1)。
表1 南北带中南段块体边界模型适用性结果

块体	边界	模型		
		刚体运动(RRM)	均匀变形(REHSM)	线性变形(RELSM)
川滇块体	东边界	✓		
	西边界			✓
华南块体	龙门山	✓		
	则木河、小江	✓		
滇南块体	东边界		✓	
	西边界		✓	
滇西块体	西边界			✓
巴彦喀拉块体	东侧			✓

注:✓表示块体边界模型择优选取结果

由块体边界模型择优结果(表 1)来看,不同块体边界的模型适用情况不同,相同块体不同边界的模型适用情况也不同。如川滇块体的东西边界,东边界适用于刚体运动模型,西边界则适用于线性变形模型。该结果同样说明,运用块体模型理论解算断层滑动速率时模型择优问题的重要性。

3 滑动速率解算方法及结果分析

在模型择优结果的基础上,利用解算出的模型参数(欧拉参数或应变参数)可以计算出块体上任一点的运动速度。对于块体边界上某一点来说,分别采用其两侧块体的 GPS 点作为约束可计算出两个速度(v_I, v_{II}),二者的矢量差即可表示为断层运动的相对速度。将相对速度进行断层方向投影即可得到垂直于断层走向的张压速率 v_1 和沿断层走向的走滑速率 v_2 (图 3)。

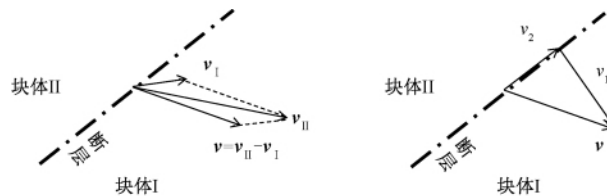


图 3 基于块体理论的滑动速率解算示意图

左图 v_I, v_{II} 分别代表以块体 I、II 内 GPS 点速率作为约束计算得到的滑动速度, v 为相对速度;右图 v_1 为垂直于块体边界的张压速率, v_2 为平行于块体边界的走滑速率

将断裂带上每点均作以上计算,就可以得出各断裂带上的张压速率及走滑速率的空间分布情况(表 2)。

表 2 南北地震带中南段主要断层分段滑动速率

断裂带	分段	滑动性质	本文结果($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)				前人结果($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	
			张压速率	误差	走滑速率	误差	断裂带整体速率	文献
龙门山中南段	宝兴-汶川	R + N	0.5 ~ 1.8	1.0	0.5 ~ 1.1	1.0	≤ 2	张培震等,2008
	汶川-茂县	N	1.8 ~ 3.8	1.1	0.5 ~ 1.7	1.1	≤ 3	傅征祥等,2010
鲜水河断裂带	炉霍以北	N + LL	8.1	1.9	4.8	1.5	8 ~ 10	Shen et al,2000
		N + LL	6.2	1.7	6.2	1.7	10.9	孙建中等,1994
	炉霍-道孚	N + LL	4.2 ~ 8.0	1.8	6.11 ~ 8.5	1.8	8.9 ~ 17.1	王阎昭等,2008
	道孚-康定	N + LL	2.2 ~ 4.1	1.4	9.0 ~ 11.1	2.0	8 ~ 10	邓启东等,2002
	康定-石棉	LL					10 ~ 20	Allen et al,1991
							10 ~ 14	徐锡伟等,2003
小江	巧家-东川	LL	1.8	1.1	9.5	2.0	10 ~ 15	闻学泽等,2003
	东川-宜良	LL	1.3	1.1	10	2.0	10	宋方敏等,1998
红河断裂带	北西段	N	4.7	1.0	0.5	0.8	9.4	王阎昭等,2008
	南东段	RL	0.3	1.4	4.5	1.3	3.3 ~ 3.5	虢顺民等,2001
							0.4 ~ 1.5	王阎昭等,2008

注:LL 左旋走滑;RL 右旋走滑;R 逆倾滑;N 正断倾滑

3.1 龙门山断裂带中南段

计算结果表明,龙门山断裂带中南段张压速率存在一定的空间分段性特征,即宝兴县至

2008 年汶川地震主震位置张压速率较小,为 $0.5 \sim 1.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右;汶川地震主震位置至茂县压性相对显著,达 $1.8 \sim 3.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 4)。走滑速率的分段性相对不明显,整体滑动速率基本小于 $1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,主震北部茂县附近右旋走滑速率稍大,为 $1.7 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从汶川地震主震位置的张压速率及走滑速率结果来看,汶川地震的发震背景以压性为主 ($1.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$),且存在一定的右旋分量 ($0.9 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)。此结果与张培震等 (2008) 及傅征祥等 (2010) 研究结果较为一致。

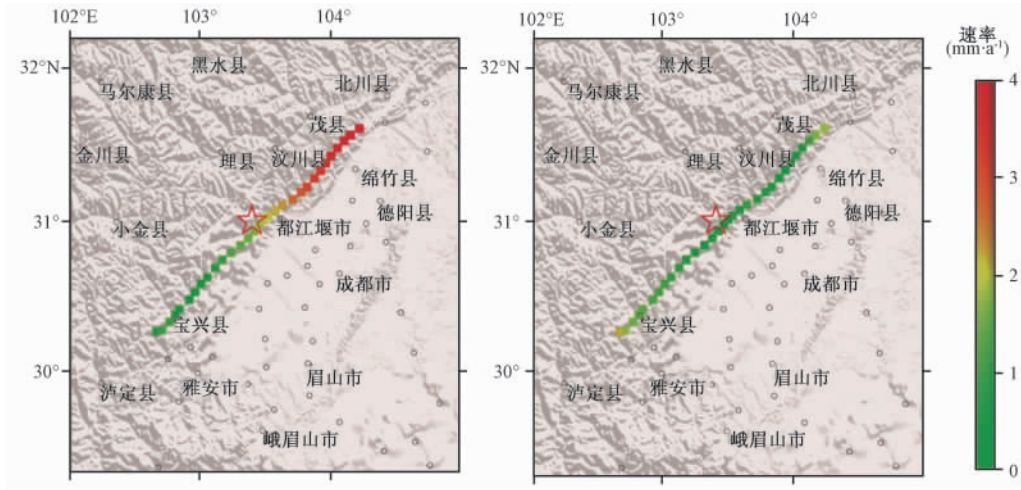


图 4 龙门山断裂带中南段断层张压速率(左)及走滑速率(右)
红色五角星表示汶川地震主震震中位置;灰色圆圈表示行政市县(下同)

3.2 鲜水河断裂带

对于以左旋走滑为主的鲜水河断裂带,一些学者通过不同的方法给出了不同的断层滑动速率。Shen 等 (2000) 利用 GPS 数据给出鲜水河断裂带的左旋走滑速率为 $8 \sim 10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;孙建中等 (1994) 利用地震矩反演得到断裂带剪切形变速率为 $10.9 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;王阎昭等 (2008) 利用 GPS 资料连接断层元模型反演得到滑动速率为 $8.9 \sim 17.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,且存在 NW-SE 速率先增大后减小的趋势;邓启东等 (2002) 根据少量 GPS 资料得出鲜水河-玉树-玛尼断裂西段左旋滑动速率为 $4 \sim 5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,川西一带滑动速率为 $8 \sim 10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;Allen 等 (1991) 利用地质资料得到鲜水河北西段滑动速率为 $10 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,南东段为 $5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;徐锡伟等 (2003) 利用地质资料给出鲜水河北西段滑动速率为 $14 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,南东段为 $10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;Wen 等 (1988)、闻学泽等 (2003) 指出鲜水河滑动速率为 $10 \sim 15 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

从本文计算结果来看(图 5),鲜水河断裂带张压速率及走滑速率存在一定的空间差异性特征,即炉霍县以北地区张性滑动速率 ($8.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$) 比左旋走滑速率 ($4.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$) 大;炉霍-道孚段张压速率与走滑速率基本相同,为 $6.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;道孚-康定段又呈现出左旋走滑速率减小,张性速率增大的变化趋势;康定-石棉段表现出较明显的左旋走滑性质,张压速率为 $2 \sim 4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,走滑速率已增加至 $9 \sim 11 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从总体滑动速率(张压速率与走滑速率平方和的开方)可以看出,鲜水河断裂带的滑动速率为 $8.7 \sim 11.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,与前人研究结果基本一致,但相对 Allen 等 (1991) 及徐锡伟等 (2003) 给出的结果偏小,主要原因可能是使用

资料的不同。

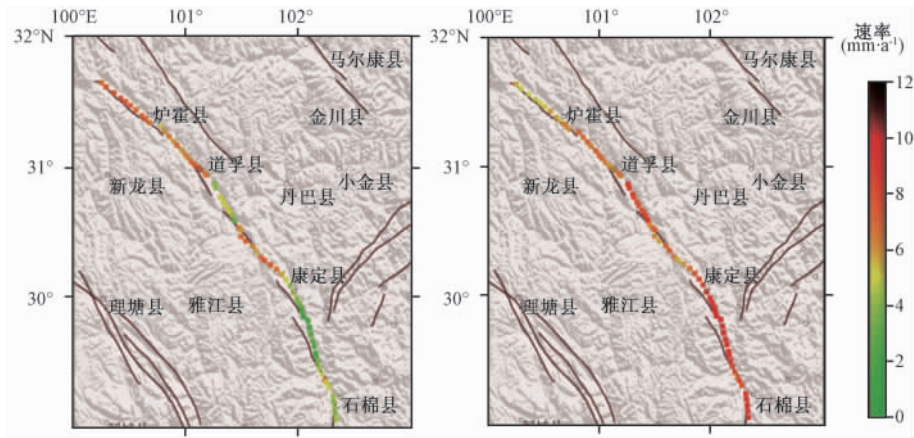


图5 鲜水河断裂带断层张压速率(左)及走滑速率(右)

3.3 小江断裂带

小江断裂带的张压速率除宜良南段达到 $5.2\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 以外,其余地区张压速率基本小于 $3\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$;走滑速率结果显示巧家-东川段为 $9.5\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、东川-宜良段为 $10\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、宜良南段为 $10\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (图6)。此结果与宋方敏等(1998)给出的左旋滑动速率为 $10\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 及王阎昭等(2008)计算的左旋滑动速率为 $9.4\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 基本一致。

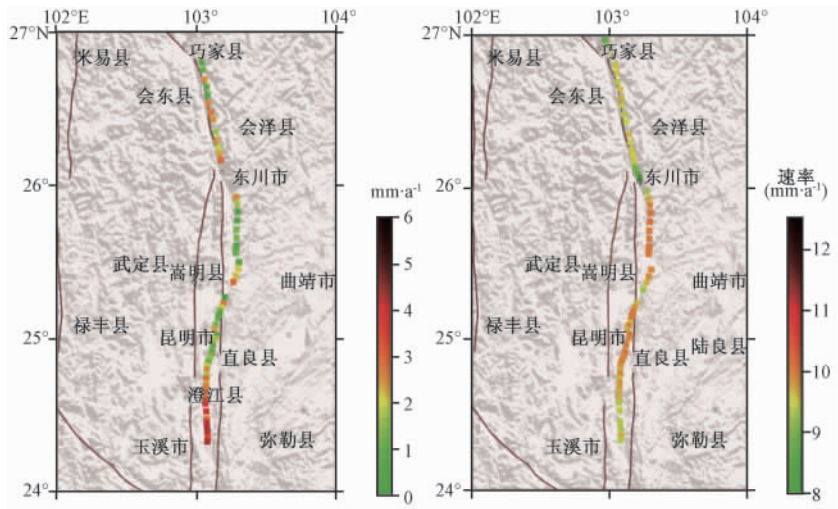


图6 则木河-小江断裂带断层张压速率(左)及走滑速率(右)

3.4 红河断裂带

红河断裂带空间分段性较为明显。北西段滑动量较小,但存在一定的张压分量(景东段速率 $4.7\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$),南东段(个旧以西)以走滑为主(速率 $4.5\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) (图7),该结果与骞顺民等(2001)结果基本一致,与王阎昭等(2008)给出的 $0.4\sim1.5\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 相差较大,主要原因可能为选用了不同的模型计算。由于红河断裂带南东端 GPS 点位稀疏,加之处于块体的

交叉部位,初步认为南东端(个旧-屏边)滑动速率偏大的现象主要由模型误差偏大引起,实际分析中应不予考虑。

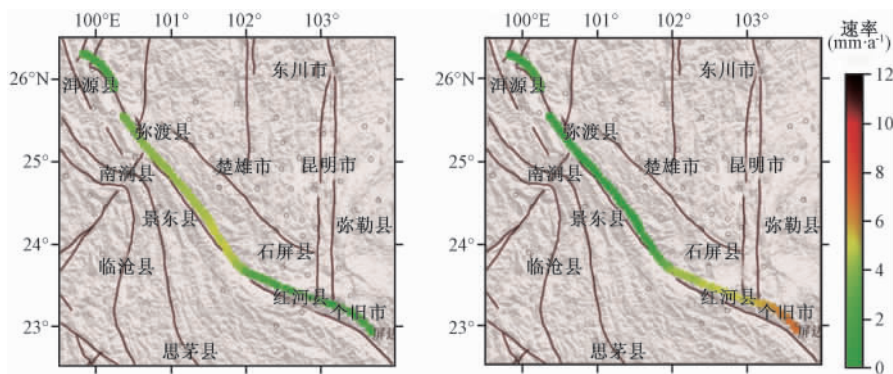


图7 红河断裂带断层张压速率(左)及走滑速率(右)

4 结论与讨论

通过本文研究,对南北地震带中南段块体边界带主要断层滑动速率的模型适用性进行了分析,并给出了滑动速率研究结果,得出了如下认识。

(1) 不同的块体模型会产生不同的边界效应,在实际分析时,既要使拟合模型满足块体内部各观测点的要求,同时也要满足边界拟合残差的要求。从1999~2007期GPS速度场数据来看,川滇块体东边界、华南块体西边界适用于刚体运动模型;滇南块体东西边界适用于均匀变形模型;川滇块体西边界、滇西块体、巴彦喀拉块体东边界等适用于线性变形模型。

(2) 将各块体边界主要断层的滑动速率计算结果与前人结果进行比较后发现,利用块体模型理论,通过模型择优进而得到滑动速率的方法基本可行。从张压及走滑速率的空间分布情况来看,龙门山断裂带宝兴县至2008年汶川主震位置张压速率较小,为 $0.5 \sim 1.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右;汶川主震位置至茂县段的压性相对显著,速率达 $1.8 \sim 3.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;鲜水河断裂带炉霍县以北地区张性滑动速率与左旋走滑速率相比较;炉霍-道孚段张压速率与走滑速率基本相同;道孚-康定段又呈现出左旋走滑速率减小,张性速率增大的变化趋势;康定-石棉段表现出较明显的左旋走滑性质;小江断裂带走滑速率明显大于张压速率;红河断裂带空间分段性较为明显,北西段滑动量较小,但存在一定的张压分量(景东段速率 $4.7 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$),南东段(个旧以西)以走滑为主(速率 $4.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)。

(3) 利用块体模型解算滑动速率考虑到了块体运动、变形的整体性,具有较明确的物理意义。但也存在着一些缺点,比如只能计算相对较大的断层(块体边界)、对块体运动整体性要求较高以及多块体交叉部位解算精度不高等。

(4) 由于块体模型的整体性和块体边界滑动速率的分段局部性存在一定的矛盾,因此利用块体模型对断层滑动速率精细刻画存在一定的困难,但对于描述断层的大范围分段速率结果具有一定的参考意义。

致谢:GPS数据来源于“中国地壳运动观测网络”,在此表示感谢;感谢匿名审稿人提出的意见和建议。

参考文献

- 邓启东、张培震、冉永康等,2002,中国活动构造基本特征,中国科学, **32**(12),1020~1028。
- 丁国瑜、卢演传,1989,板内块体的现代运动,见:马杏垣,中国岩石圈动力学地图集,北京:中国地图出版社。
- 丁国瑜、卢演传,1991 活动亚板块、构造块体的相对运动,见:丁国瑜,中国岩石圈动力学概论,142~153,北京:地震出版社。
- 方颖,2005,川滇菱形块体东边界地壳变形研究,大地测量与地球动力学, **25**(3),81~85。
- 傅征祥、吕晓健、金学申等,2010,汶川 8 级大地震活动断裂滑动速率异常低的比较讨论,地震, **30**(2),1~8。
- 郭良迁、李延兴、杨国华等,2008,中国大陆现今应变场动态,地震学报, **30**(6),560~569。
- 虢顺民、计凤洁、向红发等,2001,红河活动断裂带,1~172,北京:地震出版社。
- 黄立人、马青,1999,GPS 测站所处构造位置的统计检验,地壳变形与地震, **19**(4),27~31。
- 黄立人、王敏,2000,中国大陆现今地壳水平运动,地震学报, **22**(3),257~262。
- 李延兴、胡新康、赵承坤等,1998,GPS 跟踪站观测的初步结果所揭示的板内及板缘地壳水平运动,地壳变形与地震, **18**(2),28~34。
- 李延兴、黄斌、胡新康,2000,中国太陆地壳水平运动的特征与块体划分,见:香港理工太学会议秘书处,第三届两岸测绘发最研讨会论文集,123~127,香港:香港理工大学。
- 李延兴、李智、张静华等,2001,版内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态,地震学报, **23**(6),565~572。
- 李延兴、李智、张静华等,2004,中国大陆及周边地区的水平应变场,地球物理学报, **47**(2),222~231。
- 李延兴、张静华、何建坤等,2006a,菲律宾海板块的整体旋转线性应变模型与板内形变-应变场,地球物理学报, **49**(5),1339~1346。
- 李延兴、张静华、李智等,2006b,太平洋板块俯冲对中国大陆的影响,测绘学报, **35**(2),99~105。
- 吕江宁,2003,川滇地区现代地壳运动速度场和活动块体模型研究,地震地质, **25**(4),543~552。
- 马杏垣,1989,中国岩石圈动力学地图集,2~68,北京:中国地图出版社。
- 乔学军、王琪、杜瑞林,2004,川滇地区活动地块现今地壳变形特征,地球物理学报, **47**(5),805~811。
- 宋方敏、汪一鹏、俞维贤等,1998,小江活动断裂带,188~196,北京:地震出版社。
- 孙建中、施顺英,1994,利用地震矩张量反演鲜水河断裂带现今运动学特征,地壳变形与地震, **14**(4),9~15。
- 王小亚、朱文耀、符养等,2002,GPS 监测的中国及其周边现时地壳变形,地球物理学报, **45**(2),198~209。
- 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,中国科学(D 辑), **38**(5),582~597。
- 闻学泽、徐锡伟、郑荣章等,2003,甘孜-玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破裂,中国科学(D 辑), **33**(增刊),199~208。
- 徐锡伟、闻学泽、郑荣章等,2003,川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源,中国科学(D 辑), **33**(增刊),151~162。
- 杨国华、韩月萍、张凤兰,2001,利用 GPS 复测结果确定华北不同运动性质单元及活动方式,地震学报, **23**(1),1~29。
- 张培震、邓起东、张国民等,2003,中国大陆的强震活动与活动地块,中国科学(D 辑), **33**(增刊),12~20。
- 张培震、王琪、马宗晋等,2002,中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块,地学前缘, **9**(2),430~441。
- 张培震、徐锡伟、闻学泽等,2008,2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因,地球物理学报, **51**(4),1066~1073。
- 张强、朱文耀,2000,中国地壳各构造块体运动模型的初建,科学通报, **45**(9),967~974。
- 周硕愚、张跃刚、丁国瑜等,1998,依据 GPS 数据建立中国大陆板内块体现时运动模型的初步研究,地震学报, **20**(4),348~355。
- Allen C R, Luo Z L, Hong Q, et al, 1991, Field study of a highly active fault zone: the Xianshuihe fault of southwestern China, Geol Soc Amer Bull, 1991, **103**,1178~1199。
- Herring T A, King R W, McClusky S C, 2006a, GAMIT Reference Manual, Release 10.3, Massachusetts Institute Technology,

- <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm>.
- Herring T A, King R W, McClusky S C, 2006b, GLOBK Reference Manual, Release 10.3, Massachusetts Institute Technology, <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm>.
- Shen Z K, Zhao C, Yin A, et al, 2000, Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Positioning System measurements, *J Geophys Res*, **105**, 5721 ~ 5734.
- Wang Q, Zhang P, Jeffrey T, et al, 2001, Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements, *Science*, **294**, 574 ~ 577.
- Wen X Z, Jia J K, Pan M, et al, 1988, Recent slip rates, earthquake recurrence intervals and strong seismic hazards on the northwestern segment of the Xianshuihe fault zone, *Earthquake Research in China*, **2** (4), 432 ~ 451.

The fault's slip rate results in the mid-southern section of the north-south seismic belt calculated from the block theory

Yan Wei¹⁾ Wu Yanqiang²⁾ Niu Anfu¹⁾ Li Xiaofan¹⁾ Zhang Lingkong¹⁾ Ji Ping¹⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract In this paper, using the 1999 ~ 2007 GPS velocity field data and choosing the block model, we researched the applicability of each block and gave the slip rate of each block boundary. The results show that the Baoxing-Wenchuan compression rate in the Longmenshan fault zone is smaller, about $0.5 \sim 1.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; the Wenchuan-Maoxian pressure rate is relatively obvious, at $1.8 \sim 3.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; the Xianshuihe fault belt tension pressure rate and slip rate has some spatial difference characteristics: the slip rate of north of Luhuo region ($8.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$) is bigger than the sinistral strike-slip rate ($4.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$); Luhuo-Dawu paragraph pressure characteristics and slip rate is basically the same; Dawu-Kangding section presents a decrease of the strike-slip rate, but there is a trend of rate increase; the Kangding-Shimian segment showed strike-slip nature; the Xiaojiang fault slip rate is significantly greater than pressure rate; the Red River fault zone spatial segmentation is more obvious: north west slip amount is smaller, but there are some tension pressure components ($4.7 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ at Jingdong). The rate at south-east paragraph (west to Gejiu) is basically of strike-slip type ($4.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$).

Key words: Block model Slip rate North-south Seismic Belt Model applicability evaluation