

# 南北地震带北段近期地壳变形特征研究

武艳强<sup>1</sup> 江在森<sup>1</sup> 杨国华<sup>2</sup> 赵 静<sup>1</sup>

(1 中国地震局地震预测研究所,北京市复兴路 63 号,100036)  
(2 中国地震局第一监测中心,天津市耐火路 7 号,300180)

**摘 要:**利用 1999~2007 期和 2007~2009 期 GPS 速度场、应变率场、断层滑动速率和 GPS 速度剖面等数据,识别出了南北地震带北段主要断裂带及其邻近地区的显著变形差异。结果表明,庄浪河断裂带左旋剪切变形明显增强,祁连地块北边界左旋剪切变形明显增强;2007~2009 期六盘山断裂和海原断裂带挤压变形也有所增强,但量值不大。上述特征表明,庄浪河以东地区存在较高的应变积累背景。  
**关键词:**残差分析;GPS 应变率场;断层滑动速率;GPS 速度剖面  
**中图法分类号:**P228.42; P227

南北地震带北段是我国大陆构造活动比较强烈的地区,2008 年 5 月 12 日发生的汶川 8.0 级地震是否对该区的变形特征造成影响需要进行研究。本文利用 1999 年以来的 GPS 区域网资料(包括汶川地震前的 1999~2007 期结果和跨汶川地震的 2007~2009 期结果),对南北地震带北段近期的变形特征进行了速度场分析和应变率场分析,并利用块体模型和 GPS 剖面结果分析了祁连地块北边界、庄浪河断裂带、海原断裂带、六盘山断裂带的变形特征。研究过程中借鉴了前人对变形场分析取得的成果及方法<sup>[1,2]</sup>,并充分考虑了变形参数与误差的关系,以确保识别出的变形差异信息的可靠性。

## 1 GPS 变形场分析

GPS 速度场采用 MIT 的 GAMIT/GLOBK 软件解算。首先,用 GAMIT 解算每期区域网观测结果的测站坐标和卫星轨道的单日松弛解;然后,利用 GLOBK 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 ITRF2005 框架下的 GPS 速度场;最后,通过基准变换获取稳定的华南基准速度场<sup>[3]</sup>。由于本文主要关注汶川地震前后南北地震带北段的地壳变形差异,因此,在解算 GPS 速度场时以

2007 期区域网观测为界分为两段进行解算。1999~2007 期速度场结果用到了 1999、2001、2004、2007 期等 4 期观测资料(每期约有 1 000 测站,每个测站每期观测 3 d 以上);2007~2009 期速度场结果用到了 2007、2009 期观测资料。通过分析同震位移数据发现研究区域存在一定的同震位移<sup>[4]</sup>,平均同震位移结果均小于 2 倍误差,因此,从误差与同震位移的对比关系角度分析,认为汶川地震在研究区域内引起的同震影响有限。考虑到本文的主要研究区域位于 35°N 以北,汶川同震对该区的影响较小(将 34°N~38°N 范围内同震位移折算到 2007~2009 期速度中量值约为东向 1.4 mm·a<sup>-1</sup>、北向 2.6 mm·a<sup>-1</sup>),并且在处理 2007~2009 期数据时扣除了研究区域南部地区的同震位移(利用了文献<sup>[4]</sup>提供的同震结果,在解算 GPS 速度场时对有同震位移数据的站点进行了扣除),因此,研究区域 2007~2009 期速度结果既包含汶川地震前稳态的变形,也包含汶川地震后的变形,还包含一部分未扣除干净的同震位移。插页 I 彩图 1 给出了上述两期速度场结果。

根据插页 I 彩图 1 结果的误差椭圆分布,可以发现 1999~2007 期结果的误差明显小于 2007~2009 期,其原因在于前者的时间跨度为 8 a 且包含 4 期观测数据,后者的时间跨度为 2 a,只包

含 2 期观测数据,因此,前者有更多的多余观测可以提高速度场解算精度。插页 I 彩图 1 结果表明两期速度场存在显著差异,主要表现为祁连地块东向运动的显著增强和鄂尔多斯地块西边界-祁连地块东边界地区 GPS 北东向运动的显著增强,前者在庄浪河断裂带两侧表现出明显的差异运动特征,祁连地块北边界的剪切变形也明显增强;后者表现为六盘山断裂带和海原断裂挤压变形的增强。

本文利用最小二乘配置球面应变率计算方法对研究区域的应变率场特征进行分析<sup>[3]</sup>。通过统计计算得到了研究区域经验协方差函数  $f(d) = Ae^{-k^2d^2}$  的参数  $A=4.32, k=0.0046$ ,具体方法参见文献<sup>[5]</sup>。由于最小二乘配置应变率计算方法是否有效取决于该方法对 GPS 速度结果的拟合程度,因此,对两期速度结果的拟合残差进行了分析。1999~2007 期速度场的拟合残差均方差为  $\pm 0.8\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,2007~2009 期的拟合残差均方差为  $\pm 1.6\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,该均方差结果与两期速度场结果的误差相当,均表现为 1999~2007 期速度结果的精度优于 2007~2009 期。两期速度场残差均具有较好的正态分布特征,其中,1999~2007 期的正态性要好于 2007~2009 期。另外,残差的矢量图同样表现出随机特性。因此,可以对本文研究区域进行最小二乘配置球面方法应变率计算。插页 I 彩图 2 给出了研究区域的应变率计算结果,在对应变率平均误差(1999~2007 期为  $0.39\times 10^{-8}\cdot\text{a}^{-1}$ ,2007~2009 期为  $0.64\times 10^{-8}\cdot\text{a}^{-1}$ )进行分析的基础上,认为该应变率计算结果可以反映研究区域的变形信息,计算误差不足以改变等值线的空间展布。插页 I 彩图 2 结果表明,研究区域的应变率场分布存在动态调整,其中,祁连地块东部面应变率表现出近南北向拉张特征,并且形成的面应变拉张区基本被封闭在祁连地块内部,鄂尔多斯西边缘及西南地区挤压变形也有所增强。最大剪应变率结果表明,2007~2009 年研究区域的剪切变形较震前有所增强,其中,以祁连地块北边界最为明显,祁连地块东边界也有所增强。

## 2 主要断裂带滑动速率分析

由于插页 I 彩图 2 给出的 GPS 应变率场结果基于连续变形假设,主要反映了研究区域相对平滑的变形信息。本文利用块体模型对研究区域主要断裂带的滑动速率进行分析,具体流程为:

① 根据研究区域的主要断裂带及二级活动地块边界带分布,将研究区域划分为 5 个部分(祁连地块东部、鄂尔多斯地块西部、西秦岭北缘断裂-六盘山断裂-海原断裂和祁连地块东边界围成的区域、海原断裂及祁连地块北边界以北地区、西秦岭北缘断裂以南地区);② 利用欧拉模型、均匀应变模型<sup>[6]</sup>和线性应变模型<sup>[7]</sup>,以 GPS 速度为输入计算每个模型的待定参数并获得协方差阵;③ 在两单元相邻的边界上取部分计算点,并利用前一步解算得到的两单元待定参数及协方差阵分别计算速度和速度差矢量;④ 根据断裂带的走向对前面的速度差矢量进行投影,得到断裂带滑动速率。在计算过程中,利用协方差传播定律估计计算结果的误差。由于一些断裂带的滑动结果具有分段特征,本文采取计算断裂带上 3 个采样点的平均滑动速率作为断裂带滑动速率的估值。如果断裂带滑动速率具有线性特征,则该结果相当于断裂带中段的滑动速率。经过对欧拉模型、均匀应变模型和线性应变模型各采样点误差的分析(欧拉模型结果的平均误差为  $\pm 0.3\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,均匀应变模型结果的平均误差为  $\pm 0.4\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,线性应变模型结果的平均误差为  $\pm 0.6\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ),误差分布具有上述特征的原因在于本文所划分的计算单元较小,并且计算单元包含的 GPS 测点较少(部分单元仅有二十几个测点)。因此,本文采用平均误差最小的欧拉模型。表 1 给出了利用该模型得到的断层滑动计算结果。

表 1 主要断裂带滑动结果  
Tab. 1 Slip Rate of Principle Faults

断裂带 名称	1999~2007 期 (左旋为正,拉张为正)		2007~2009 期 (左旋为正,拉张为正)	
	走滑速 率/(mm · a <sup>-1</sup> )	拉张/挤 压速率/ (mm · a <sup>-1</sup> )	走滑 速率/ (mm · a <sup>-1</sup> )	拉张/挤 压速率/ (mm · a <sup>-1</sup> )
祁连地块北边界	2.5±0.2	-3.7±0.2	7.0±0.4	-1.3±0.3
西秦岭北缘断裂	2.1±0.2	-1.3±0.2	2.8±0.4	-0.4±0.4
庄浪河断裂	-1.5±0.3	-1.0±0.2	5.3±0.4	-0.4±0.4
六盘山断裂	1.2±0.2	-0.5±0.2	0.0±0.3	-2.3±0.3
海原断裂	4.6±0.2	-1.1±0.2	3.8±0.3	-3.4±0.3

表 1 结果与插页 I 彩图 2 应变率场结果在断裂带附近表现出相似的变形特征,其中,滑动速率变化最显著的为祁连地块北边界和庄浪河断裂带左旋剪切运动的增强,同时,海原断裂带和六盘山断裂带的挤压变形也有所增强。另外,表 1 结果表明,1999~2007 期的断层滑动速率结果误差( $\pm 0.2\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ )明显小于 2007~2009 期( $\pm 0.4\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ )。

3 GPS 速度剖面分析

为了研究跨越断层的 GPS 速度所表现出的空间变形特性,有必要对断层及其附近地区进行 GPS 剖面分析,插页 I 彩图 3 给出了 GPS 剖面的范围及测点分布情况。考虑到前面分析得到的断层滑动速率结果以及实际的 GPS 点位分布特征,剖面 1 主要跨越祁连地块北边界,剖面 2 跨越了西秦岭北缘断裂和海原断裂等两条近似平行的断裂,剖面 3 跨越了庄浪河断裂和六盘山断裂两条近似平行的断裂带。图 1 给出了 3 条剖面的结果,每条剖面包括平行于断层结果和垂直于断层结果。

图 1(a)结果表明,祁连地块北边界南北两侧存在显著变形差异,表现为左旋剪切变形的显著增强,该增强现象以断裂带附近最为明显;图 1(b)结果表明,跨断裂带两侧挤压变形有所减弱,其中,断裂带以北地区挤压变形幅度维持一致,断裂带以南地区的挤压变形有所减弱。图 1(c)结果表明,西秦岭北缘断裂和海原断裂维持较稳定的左旋剪切变形特征,其中,海原断裂带在 2007~2009 期的左旋剪切变形有所减弱。图 1(d)结果与图 1(c)类似,两条断裂带附近均表现出稳定的挤压变形特征,其中,海原断裂南侧在 2007~2009 期的挤压变形有所增强。3 条剖面中变化最显著的为剖面 3,图 1(e)结果表明六盘山断裂在两个时段内的剪切变形均不明显,而庄浪河断裂带在 1999~2007 期表现为缓慢右旋剪切变形特征,2007~2009 期庄浪河断裂带西侧表现为快速左旋剪切变形特征,而庄浪河断裂带东侧依然表现为稳定的右旋剪切变形特征。图 1(f)结果表明,庄浪河断裂带的挤压变形特征维持稳定,而六盘山断裂带西侧的挤压变形有所增强。

4 讨论与结论

汶川地震的震后影响可能与祁连地块东部及其以东地区的变形差异有关,但也不排除震前变形及同震位移残余的影响,由于本区缺乏连续 GPS 资料,因此,无法对上述因素进行准确区分。

1) 1999~2007 期 GPS 结果用到了 4 期区域网观测数据,而 2007~2009 期结果只用到了 2 期区域网观测数据,因此,前者的速度场解算精度明显高于后者。该差异不仅表现在速度场误差椭圆的大小上,同时在应变率参数、断层滑动参数及

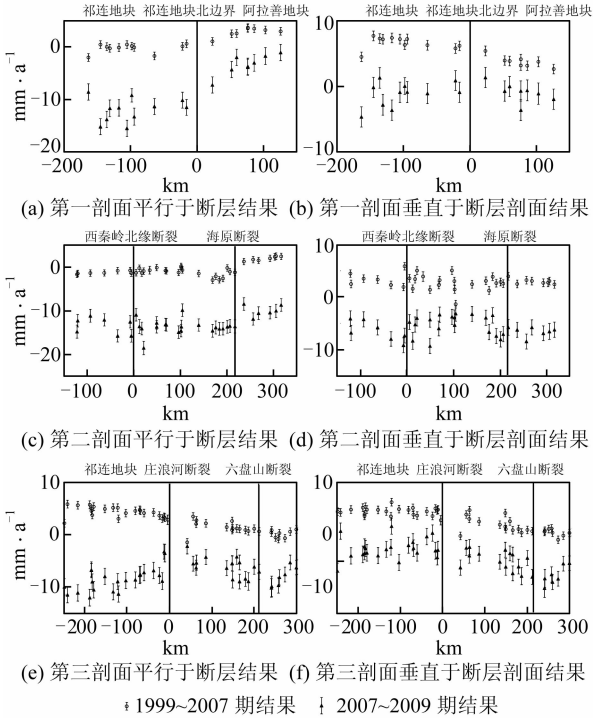


图 1 GPS 速度剖面结果

Fig. 1 Results of GPS Velocity Profiles

GPS 剖面结果的离散度等方面均有所差异,1999~2007 期各种参数的精度指标均高于 2007~2009 期。该结果表明,在 GPS 原始数据解算方案中采用的约束和先验误差等是合理的,不存在约束过紧或过松现象。

2) GPS 应变率场结果、块体模型结果和 GPS 剖面结果均表明,汶川地震前后南北地震带北段存在地壳变形调整,其中,以祁连地块东部最为显著,表现为庄浪河断裂带震后左旋剪切变形的增强和祁连地块北边界左旋剪切变形的增强。由于研究区域南部同震位移的扣除并未影响上述两条断层滑动速率的计算,因此,上述演化特征可能与汶川同震和震后调整有关。另外,六盘山断裂和海原断裂带汶川地震后挤压变形有所增强,但量值不大。由于本文对研究区域南部的同震位移进行了扣除,因此,西秦岭北缘断裂带与六盘山断裂带的变形演化特征主要反映了震后调整过程,上述两条断裂带变形幅度明显小于文献[7]结果的原因也在于此。

3) 本文结果表明,庄浪河断裂带和祁连地块北边界在汶川地震前后存在显著的差异变形特征,而庄浪河断裂带东侧和祁连地块北边界以北地区的变形特征则表现出很好的继承性,特别是西秦岭北缘断裂带和六盘山断裂带变形差异不大(扣除同震影响条件下)。上述特征表明,庄浪河以东地区

存在较高的应变积累背景,其中,西秦岭北缘断裂和六盘山断裂的断层变形闭锁程度可能较高。

致谢:感谢中国大陆地壳运动观测网络中心提供GPS观测数据。

参 考 文 献

[1] 刘经南,施闯,姚宜斌,等. 多面函数拟合法及其在建立中国地壳平面运动速度场模型中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 500-503

[2] 刘经南,姚宜斌,施闯. 中国地壳运动整体速度场模型的建立方法研究.[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(4): 331-336

[3] 江在森,方颖,武艳强,等. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 505-518

[4] “中国地壳运动观测网络”项目组. GPS 测定的 2008 年汶川 Ms 8.0 级地震的同震位移场[J]. 中国科学 D 辑, 2008, 38(10): 195-106

[5] 江在森,丁平,王双绪,等. 中国西部大地形变监测与地震预测[M]. 北京:地震出版社, 2001

[6] 李延兴,李智,张静华,等. 中国大陆及周边地区的水平应变场[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 222-231

[7] 张希,张晓亮,张四新,等. 青藏块体东北缘近期 GPS 水平运动特征与汶川大震影响[J]. 地震研究, 2010, 33(4): 265-268

第一作者简介:武艳强,副研究员,主要从事大地测量数据处理与分析工作。  
E-mail:jiangzaisen@126.com

Deformation Characteristics of North Section of North-South Seismic Zone in Recent Period

WU Yanqiang<sup>1</sup> JIANG Zaisen<sup>1</sup> YANG Guohua<sup>2</sup> ZHAO Jing<sup>1</sup>

(1 Institute of Earthquake Science, CEA, 63 Fuxing Road, Beijing 100036, China)  
(2 First Crust Deformation Monitoring and Application Center, CEA, 7 Naihuo Road, Tianjin 300180, China)

**Abstract:** Based on the analysis of fitting residual errors of GPS velocity, the errors of deformation parameters, and the applicability of block model, we use GPS velocity fields, strain rate fields, slipping rate of faults and GPS profile results from 1999-2007 and from 2007-2009 to identify the deformation difference of principle faults on the north section of North-South Seismic Zone. The results show that the laevorotation deformation of Zhuanglanghe Fault has increased, which the dextrorotation deformation rate calculated from Eulerian model is about  $1.5 \pm 0.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  in the period 1999-2007, and the laevorotation deformation rate is about  $5.3 \pm 0.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  in the period 2007-2009. On the other hand, the laevorotation slipping rate of north boundary of Qilian block has increased from  $2.5 \pm 0.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  to  $7.0 \pm 0.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  in these two periods. Otherwise, the extrusion deformation of Lipanshan and Haiyuan Faults has strengthened too, but the deformation magnitude is not big. These above deformation characteristics illustrate that the region of east side of Zhuanglanghe Fault has accumulated high strain energy.

**Key words:** residual analysis; GPS strain rate fields; slip rate of fault; GPS velocity profile

About the first author: WU Yanqiang, associate researcher, majors in geodesy data processing and analyzing.  
E-mail: jiangzaisen@126.com