

邹镇宇, 江在森, 武艳强等. 2015. 基于 GPS 速度场变化结果研究汶川地震前后南北地震带地壳运动动态特征. 地球物理学报, 58(5):1597-1609, doi:10.6038/cjg20150512.

Zou Z Y, Jiang Z S, Wu Y Q, et al. 2015. Dynamic characteristics of crustal movement in north-south seismic belt from GPS velocity field before and after the Wenchuan Earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(5):1597-1609, doi:10.6038/cjg20150512.

基于 GPS 速度场变化结果研究汶川地震前后 南北地震带地壳运动动态特征

邹镇宇^{1,2}, 江在森^{2*}, 武艳强^{2,3}, 魏文薪², 方颖², 刘晓霞²

1 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国地震局地震预测重点实验室(中国地震局地震预测研究所), 北京 100036

3 中国地震局第一监测中心, 天津 300180

摘要 本文针对制约多期 GPS 速度场动态演化特征分析的关键问题, 提出速度场稳定基准选取中顾及基准偏移的影响, 给出了改进拟准检定(QUAD)初选指标的方法, 有效解决多期速度场的基准偏移对粗差剔除的影响. 在此基础上通过对 1999—2013 年南北地震带地区多期 GPS 速度场做以华南地块为统一参考基准的处理、最小二乘配置统一协方差参数估算, 获取了南北带地区多期 GPS 速度场的网格化结果. 结果显示: (1) 汶川地震影响在震后迅速衰减; 震前 2004—2007 年及 2007—2009 年相对于 1999—2004 年南北地震带地区中北部地区存在大范围的北东向运动增强. (2) 2007—2009 年相对于 2004—2007 年的速度场差值变化图像显示, 这期间汶川地震的调整影响范围较大, 鲜水河左旋剪切有所减弱, 龙门山南段应变积累增强. (3) 川滇块体南东向的挤出滑移在 2011—2013 年相对 2009—2011 年有所增强.

关键词 QUAD; GPS 速度场; 速度场差值变化; 汶川地震; 最小二乘配置

doi:10.6038/cjg20150512

中图分类号 P315, P228

收稿日期 2014-10-08, 2015-02-04 收修定稿

Dynamic characteristics of crustal movement in north-south seismic belt from GPS velocity field before and after the Wenchuan Earthquake

ZOU Zhen-Yu^{1,2}, JIANG Zai-Sen^{2*}, WU Yan-Qiang^{2,3}, WEI Wen-Xin², FANG Ying², LIU Xiao-Xia²

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China

3 The First Monitoring Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

Abstract With the implementation of the projects “Crustal Movement Observation Network of China” and “Chinese continental tectonic environment monitoring network”, a large number of GPS time series and velocity fields were produced. Based on above GPS data, many scholars have made a number of important progresses in crustal movement and deformation. Because of the intuitive feature of the GPS velocity fields, they are widely used in crustal movement and deformation analysis. In this paper, we focus on the dynamic characteristics of the crustal

基金项目 国家自然科学基金(41274008, 41474002)资助.

作者简介 邹镇宇, 男, 1984 年生, 中国地震局地质研究所博士生, 主要从事地壳变形和地球动力学研究. E-mail: 407124082@qq.com

* **通讯作者** 江在森, 男, 1956 年生, 中国地震局地震预测研究所研究员, 主要从事大地形变与现今地壳运动、地震预测等方面的研究.
E-mail: jiangzaisen@126.com

deformation based on the multi-periods of GPS velocity fields.

GAMIT/GLOBK and QOCA software were used in GPS data processing. First, GAMIT software was used to calculate the station coordinates and single-day relaxation solution of satellite orbits. Then, QOCA software was used to combine all the single-day relaxation solutions and the velocity on the reference of ITRF2005 was calculated after deducting the coseismic movements. Because the error distribution and points' location may be different in multi-periods of velocity fields, the unified reference must be established before extracting the dynamic deformation characteristics from multi-periods GPS velocity fields. In order to establish the unified benchmarks, an improved method developed from Quasi-Accurate Detection of gross errors (QUAD) was proposed. Firstly the least squares collocation with unified covariance parameters was used to form unified model of GPS velocity fields and calculate the comparable grid velocity fields. Then, improved QUAD method is used to obtain continuous distribution of the velocity field after selection and testing. Thus, the differences of grid values between two periods can be calculated, because the grid velocity fields are on one unified benchmark after above two steps.

Using above methods, the differences in grid velocity fields between 2004—2007/2007—2009/2009—2011/2011—2013 and 1999—2004, between 2007—2009 and 2004—2007, and between 2011—2013 and 2009—2011 were obtained. The results were as follows: 1) the differences between 2004—2007/2007—2009/2009—2011/2011—2013 and 1999—2004 show that the influence of the Wenchuan earthquake is gradually reduced. 2) The differences of grid velocity fields between 2004—2007/2007—2009 and 1999—2004 show that the NE movements in a wide region except for the South China block and Sichuan-Yunnan were enhanced with the rate about $3\sim 5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. 3) The difference of grid velocity fields between 2007—2009 and 2004—2007 show that the impact of the Wenchuan earthquake is still obvious in its northern adjustment region. 4) The difference of grid velocity fields between 2011—2013 and 2009—2011 show that the southeast movement of Sichuan-Yunnan block has been enhanced.

The results showed that 1) The difference of grid velocity fields between 2004—2007/2007—2009 and 1999—2004 in the middle-northern segment of the North-South Seismic Zone show a wide range NE movement enhancement ($3\sim 5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$), which was similar with NE enhanced movement of Qinghai-Tibet plateau after Sumatra earthquake occurred in 2004. 2) The difference of grid velocity fields between 2007—2009 and 2004—2007 reflected that dynamics load enhanced on southern segment of the Longmenshan fault zone after the Wenchuan earthquake. 3) After the Wenchuan earthquake, the SE sliding of Sichuan-Yunnan block was not enhanced until 2011, and then it accelerated to some extent up to 2013.

Keywords QUAD; GPS velocity field; Different velocity field; Wenchuan Earthquake; Least-Squares filtering

1 引言

随着“中国地壳运动观测网络”和“中国大陆构造环境监测网络”的实施,产出了大量的 GPS 时序和速度场结果. 基于上述 GPS 区域网资料,多位学者针对地壳运动与变形的空间分布特征、中国大陆

现今地壳运动与构造变形及其与构造分布、边界动力的关系、地块边界断裂带应变积累状态等方面开展了深入的研究,并取得了大量重要成果(张希等, 2007, 2011; 王卫民等, 2008; 张培震等, 2008, 2009; 许才军等, 2009; 2012; 江在森等, 2009; 杨国华等, 2009; 武艳强等, 2009; Wu et al., 2011, 2013; 江在森和武艳强, 2012; 赵静等, 2012). 利用 GPS 资料获

取地壳运动速度场,因其分布图像最为直观,便于大同行解读,在地壳运动与变形研究中使用最普遍。本文主要基于速度场动态变化信息提取来研究区域地壳运动与变形的多年动态变化特征。

南北地震带是分布于我国中西部的近南北展布的强震分布带,其范围东西跨度大约从 97°E 或 95°E 以东至 107°E (黄圣陆等,2006;张国民等,2006),在南北跨度上南、北端都达到我国边境并延伸到境外,是我国大陆地壳运动较强烈、历史地震频发地区。许多学者利用跨断层、区域 GPS 等形变资料综合分析了南北地震带的变形特征、主要断裂带的应变积累特征及与区域强震孕育的关系。如许才军等(2009)利用 GPS 资料反演了汶川地震的滑动分布。张培震等(2008)利用 GPS 观测资料,地貌断错和年代测定等方法计算了汶川地震之前龙门山断裂带的滑动速率。张培震等(2009)利用 GPS 等资料分析提出汶川地震的多单元组合模型。江在森等(2009,2012)、武艳强等(2012)、Wu 等(2011)利用 GPS 资料,使用最小二乘配置方法计算区域汶川地震前后的速度场、应变场动态变化。张希等(2004;2011)、赵静等(2012)利用 GPS 资料,负位错反演计算得出南北地震带的主要断裂带应变积累特性。上述研究成果为该区域的中长期地震预测提供了重要的依据。南北地震带自 2008 年以来经历了汶川 8.0 级地震、玉树 7.1 级地震及芦山 7.0 级地震多次强震,其中汶川地震的震级大,破坏程度高,影响范围广。然而,在利用 1999 年以来的 7 期观测资料分析研究区域地壳运动与变形的动态变化方面(包括数据处理与分析方法等方面)的讨论较少。因此,本文选择南北地震带作为研究地区,利用适当方法求两期速度场的差值变化图来研究几年尺度的多期 GPS 复测资料所反映的近十多年来南北地震带地壳运动与变形的动态变化特征,尤其是在汶川地震前后的变化、震后影响的衰减等,这些研究可能为南北地震带中长期强震危险性预测提供一定的参考。

2 GPS 资料处理和多期速度场变化分析方法

本文所用 GPS 资料包括中国地壳运动观测网络 1999、2001、2004、2007 年的 4 期复测资料和中国大陆构造环境监测网络 2009、2011、2013 年 3 期复测资料,组成多期速度场。其中,2004—2007、2007—2009、2009—2011 和 2011—2013 均由两期数据得

到速度场。1999、2001、2004 由于数据点较少,又由于 1999 年到 2004 年间南北带,尤其是南段没有发生大震,地壳运动较平稳,2004 年 12 月发生苏门答腊巨震,因此将 1999—2004 作为一期考虑。本文采用 GAMIT/GLOBK(Herring et al., 2010a,2010b)和 QOCA 软件(Dong et al., 1998)解算,首先用 GAMIT 解算测站坐标和卫星轨道的单日松弛解,然后利用 QOCA 解算出 ITRF2005 参考框架下的整体运动,对于昆仑山地震、汶川地震的同震影响,在数据解算过程中对利用震后应急观测得到的同震位移场分布进行扣除。基于上述处理过程,解算得到了不同年份复测结果构成的多期 GPS 速度场结果。

由于不同期 GPS 速度场结果存在测点分布、误差分布等差异,为了研究 GPS 速度场所反映的动态变形特征需考虑参考基准的统一。本文采用最小二乘配置地壳运动速度场统一模型(江在森和刘经南,2010),即

$$\mathbf{V}_o^I = \mathbf{A}^I \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{U} \mathbf{V}_s^I + \mathbf{n}^I, \quad (1)$$

(1)式速度场模型是把观测速度 \mathbf{V}_o (GPS 站水平运动观测速度向量)表示为刚体运动 $\mathbf{A} \boldsymbol{\Omega}$ ($\boldsymbol{\Omega}$ 为欧拉刚性运动模型参数向量, \mathbf{A} 为有 GPS 站坐标信息的系数矩阵)、偏离刚体运动的速度信号 \mathbf{V}_s 和观测误差噪声 \mathbf{n} 三个部分之和。由(1)式模型 GPS 站实测速度解算出扣除刚体运动和通过误差噪声滤波后的连续速度场 \mathbf{V}_s 结果。(1)式中用上标 I 表示不同期的速度场,由 \mathbf{V}_s^I 给出连续分布的速度场便于不同期速度场的分析比较。以下讨论统一速度场基准的具体方法,并就如何获得具有可比性的多期速度场结果进行分析。

2.1 速度场参考基准的选取

按照(1)式速度场模型把研究区所有观测点都纳入计算,得到的是区域整体无旋转基准的速度场。在具体的处理过程中可通过对 $\mathbf{A}^I \boldsymbol{\Omega}$ 设定一个范围进行刚体运动参数的解算,进而给出基准约束,此时只有位于基准区范围内的测站才纳入解算。在多期速度场的处理中对基准的稳定性要求更高。要实现多期资料的稳定基准有两个基本条件:一是要有较多的运动相对稳定测站,二是基准区要有较大的空间尺度。南北地震带毗邻中国大陆内部最大的、相对稳定的华南地块,因此本文选择华南地块为基准区域。

在基准区域选定后要考察基准的稳定性,基本处理是利用基准区华南地块内的 GPS 站点实测速度来计算其刚体运动欧拉参数,再扣除欧拉运动后的残差是否在误差范围之内。为避免含粗差的测点

可能对基准的影响,需对基准区内测站稳定性进行检验和筛选,本文采用剔除粗差的拟准检定法(QUAD法)(欧吉坤,1999;黄立人,2002).初选指标 u_i ,

$$u_i = \frac{|v_i|}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{R_{ii}}}, \hat{\sigma}_0 = \text{med } |v_i|, \quad (2)$$

式中 v_i 是第一次解算参数对各点观测值拟合的残差, $\hat{\sigma}_0$ 是取 v_i 绝对值的中位值, R_{ii} 是由平差因子矩阵计算的投影矩阵的对角元.复选指标为 w_i ,

$$w_i = \frac{|v_i|}{C}, C = \left(\frac{\hat{\Delta}_0^T \mathbf{P}_0 \hat{\Delta}_0}{r-1} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$\hat{\Delta}_0$ 为选出的相对稳定点组求得的真误差估计值, \mathbf{P}_0 为相应观测值的权.按文献(黄立人,2002)给出的11个步骤,先通过初选指标筛选进入复选的点组,进入复选需循环计算直到不再剔除测点为止.实际资料的处理过程显示,对初选指标的选择非常重要,其直接影响最终选定结果.公式(2)式初选指标主要是通过比较拟合残差绝对值 $|v_i|$ 与全部残差绝对值中位值 $\hat{\sigma}_0$ 的相对大小($\sqrt{R_{ii}}$ 起到权比作用).一般情况采用(2)式初选指标给定限差是可行的,但当初算结果存在非稳定点影响的明显基准偏移时,该基准偏移量会影响到 $|v_i|$,从而影响到初选指标的客观性,就可能在初选过程存在该剔除的粗差点无法剔除或剔除掉本不该剔除的测点情况,该情况在复选筛选时通常也无法纠正.出现这种问题最明显的是2007—2009期速度场数据,初算欧拉刚体运动模型的残差中位值 $\text{med}(v_c) = 1.29 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (通常情况应当接近于0值),绘误差直方图显示偏峰分布明显.速度场结果显示在汶川地震震后影响下四川盆地靠近地震破裂带有一个显著北西向快速运动区,另外在华南地块东南边缘也有几个北西向速度较大的站点,导致直接用公式(2)的初选指标进行初选时因分群现象影响了欧拉参数解算,使得应该剔除的点剔除不出去,进入复选循环过程仍不能剔除,因压低指标又导致入选点大幅度减小.经研究本文采取对初选指标做改善的方法,设

$$u_i = \frac{|v_i - \hat{v}_p|}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{R_{ii}}}, \hat{\sigma}_0 = \text{med } |v_i - \hat{v}_p|, \quad (4)$$

公式(4)中 \hat{v}_p 为对基准偏移影响的估计值,可通过 $\sum |p_i v_i - \hat{v}_p| = \min$ 的约束计算出 \hat{v}_p .对2007—2009年的资料计算出东向、北向偏移值 \hat{v}_p 分别为 $1.29 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $-0.54 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,反映基准受到西偏北向运动的非稳定小分群点组的影响.而

2004—2007期速度场在东向、北向偏移值 \hat{v}_p 分别为 $0.40 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $0.21 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,反映基准受西南向运动的一些非稳定点影响(可能与2004年12月26日苏门答腊巨震影响有关),其他期速度场无明显的基准偏移问题.用(4)式代替(2)式进行初选就可对初算结果基准的偏移有明显抑制,对基准偏移明显的2007—2009期速度场明显比直接用(2)式初选指标选得更多合理点.通过处理多期资料,华南地块整体刚性是较为理想的.为了保证基准的稳定性把疑似不稳定的点,即偏离华南地块刚体运动的“不合群”点和粗差点都剔除,采用相对严的复选指标(w_i 选2.2或2.3),而初选指标相对宽(u_i 取3.2或3.3),这样筛选下来除2004—2007年、2007—2009年速度场外,其他各期资料都有85%以上接近90%的站点被判定为稳定的,其刚体模型拟合残差中误差均小于GPS速度场解算的平均中误差,残差绝对值均值则更小,而且选出的稳定点群分布也比较好,若再做网格化后计算欧拉参数就基本保持不变.另外,试算结果表明适当改变指标引起入选站点的变化对结果的影响也很小(速度值小于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$),表明华南地块作为多期速度场的相对稳定基准可取(图1).

2.2 多期速度场协方差衰减参数的统一

前文研究保证了多期速度场结果具有统一参考基准,而建立最小二乘配置连续速度场模型可使测点分布及密度有变化的多期速度场通过拟合推估的网格值进行比较,此时需保证多期速度场的推估模型所反映变形频域具有一致性.在最小二乘配置解算中决定连续分布信号空间分布顾及到不同频域范围,主要是通过构建观测信号的协方差阵的函数模型参数来控制,经过研究采用的高斯型协方差函数(江在森和刘经南,2010),具体表现形式见公式(5).

$$F(d) = C_0 \exp(-k^2 d^2), \quad (5)$$

公式(5)式中 d 为观测点间的距离,通过对研究区测点GPS速度进行统计计算得到待定参数 C_0 和 k .针对南北地震带测点分布南北狭长、东西向较短,而且南、北部边界均不规则,不宜直接用全部观测点做统计.本文选择与南北地震带宽度相当的矩形区域进行GPS站信号距离协方差统计,结果显示不同期的相关尺度有明显变化,其中2007—2009期结果相关尺度明显偏小,其协方差大于1%的相关尺度为439 km,这可能与汶川地震震后影响有关,而其他各期速度场的相关尺度都在650 km以上.为使多期速度场具有可比性,协方差衰减模型需统一.为

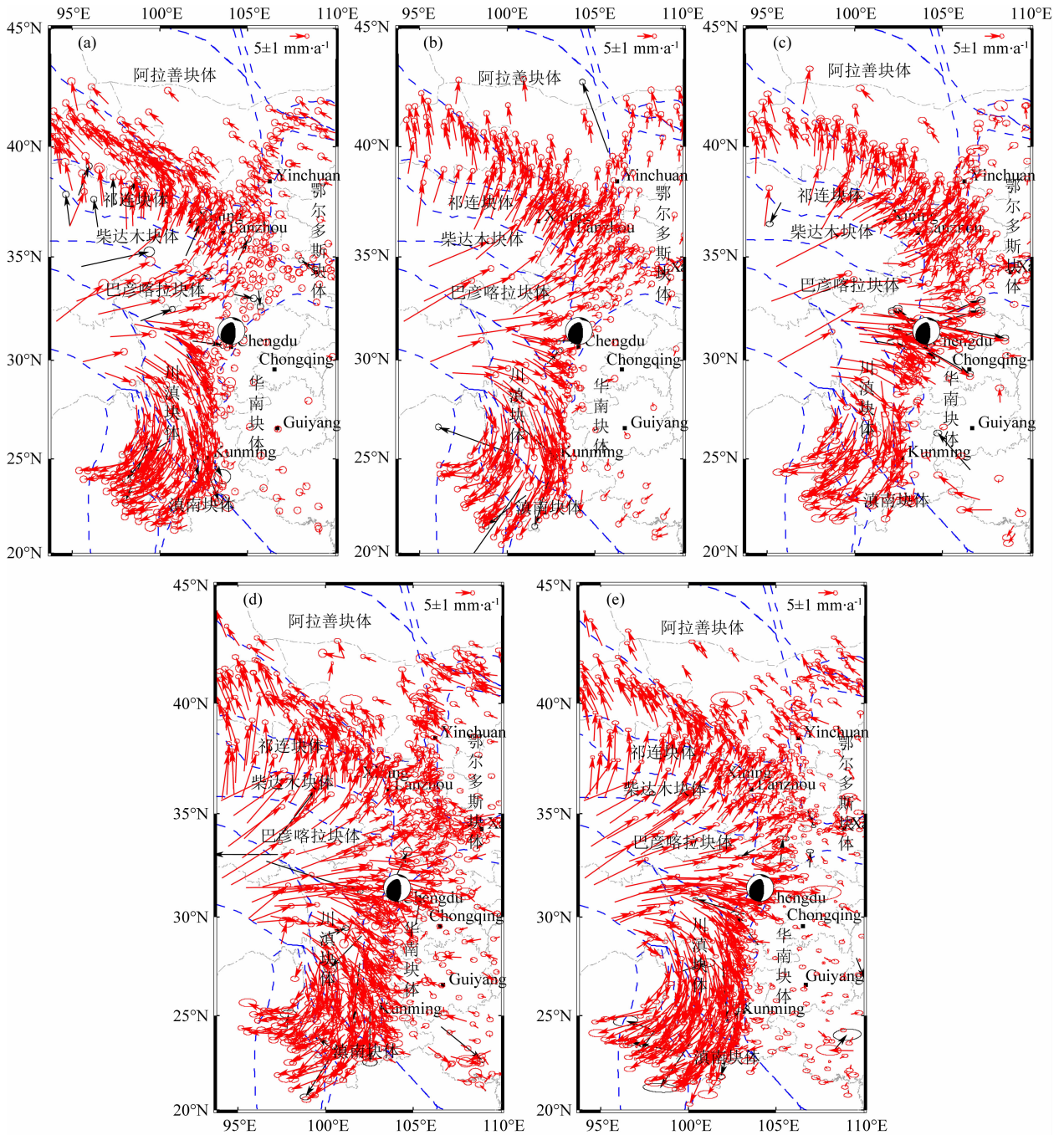


图 1 南北地震带地区相对稳定华南地块的 GPS 速度场

红色箭头表示 GPS 站速度;黑色箭头表示剔除的粗差速度。(a)1999—2004 期;

(b)2004—2007 期;(c)2007—2009 期;(d)2009—2011 期;(e)2011—2013 期。

Fig. 1 GPS velocity field of south-north seismic fault zone relative stable Southern China block

The red arrows indicate the velocity of GPS stations; black arrows indicate the gross error velocity of GPS stations.

(a) 1999—2004; (b) 2004—2007; (c) 2007—2009; (d) 2009—2011; (e) 2011—2013.

了更好表现 GPS 速度分布反映的地壳变形空间差异,本文按 1999—2004 期速度场统计给出统一的协方差参数,由图 2 计算得到 $k=0.003299, C_0=10.143$.

2.3 速度场拟合推估中粗差测点的剔除

把最小二乘配置用于中国大陆大尺度速度场连续分布的拟合推估时,其表现出很好的抗差能力,当

区域缩小情况下用于顾及较高频域变形分布的拟合推估时,特别是在观测点密度较稀疏地区的粗差点对结果会有明显影响,因此粗差点的剔除是需要考虑的问题.剔除粗差点的方法仍然使用上述用于稳定基准选取的拟准检定法(QUAD 法),只是由于用最小二乘配置进行拟合推估只需直接采用复选指标

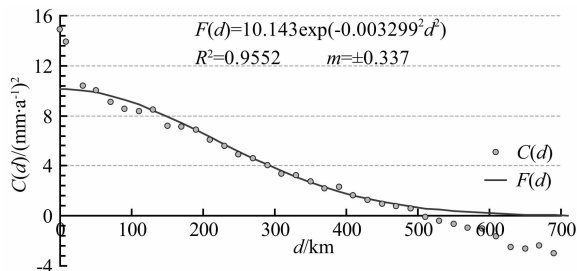


图2 1999—2004期GPS速度场协方差统计
选择南北地震带长宽相当矩形区间统计。

Fig. 2 Covariance statistics of GPS velocity field during the period of 1999—2004

The same width of rectangular area as long as north-south seismic belt was choose.

来剔除粗差点而无需先通过初选指标筛选. 另外, 这里用的复选指标也比基准选取时宽松一些, 本文采用的指标是3.0, 这样就能够把占很少量(约占1%~3%)的粗差点剔除出去.

综上所述, 通过对南北地震带多期速度场统一到以华南地块为基准的转换(包括用拟准检验法对基准区做稳定点组筛选), 并在最小二乘配置做速度场拟合推估时选用统一且合适的协方差衰减参数, 可以保证各期速度场在反映地壳变形的频域范围有一致性. 针对粗差点剔除, 在做最小二乘配置之处理中可采用拟准检定法剔除粗差点, 这样获得的多期连续分布速度场就具有较好的可比性.

3 汶川地震前后南北地震带地壳运动动态特征

利用中国地壳运动观测网络和中国大陆构造环境监测网络GPS区域网1999、2001、2004、2007、2009、2011、2013年复测资料可组成多期次的速度场. 为了对多期资料所反映的地壳变形动态特征进行分析, 首先需要获取反映相对稳定的地壳运动趋势背景期次结果. 本文选取1999—2004期、2004—2007期、2007—2009期、2009—2011期及2011—2013期速度场, 制作了 $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ 的网格速度矢量分布图(图3).

3.1 相对稳定华南地块速度场基本特征及其变化

图3给出的南北地震带多期连续速度场网格值分布图像显示, 宏观上多期速度场结果一致反映了青藏高原物质东流受到东侧稳定的华南地块阻挡, 使得从南北地震带西缘较强烈的相对运动与地壳变形逐步衰减, 且变形止于东缘. 如其中部的东向衰减

到与华南地块边界带即趋于零. 且速度方向变化呈现明显的南北分异, 在其中北部地区呈现北东向地壳缩短与北西向地壳伸展张开的特征. 北部的速度在衰减过程中其方向由北东逐步转向北或北西, 反映北西西向主要块体边界带的挤压与左旋变形特征. 南部在东、南向的速度变化更大, 呈现绕阿萨姆构造结顺时针扭转向外传递与衰减特征. 川滇地块东-南向挤出从北到南一直到滇南地块都保持较高的速度, 与华南地块的边界呈显著左旋变形特征.

从不同期的速度场分辨的差异来看, 不仅跨汶川地震的2007—2009期速度图像显著受汶川地震显著震后效应影响, 2004—2007期速度场在中北部地区的方向和大小与1999—2004期相比也有很明显变化, 主要显示有北东向速度增强特征, 这种与1999—2004期速度场在较大范围出现的明显差异在2007—2009期速度场也有体现. 但在2009—2011期速度场在宏观特征上, 尤其是在北部地区网格点速度方向又与1999—2004期速度场相对接近. 2011—2013期速度场分布特征与2009—2011期速度场较相似, 大致上也与1999—2004期速度场相对接近.

3.2 基于连续速度场的差值变化图像特征

为了更直观地显示不同期速度场的差异, 在解算出相对稳定华南地块各期连续分布速度场基础上, 求两期速度场网格值差值构成了差值动态图像. 图4中从a到d是2004—2007期、2007—2009期、2009—2011期及2011—2013期速度场与1999—2004期速度场的差值变化. 图4e为2007—2009期速度场与2004—2007期速度场的差值变化, 图4f为2011—2013期速度场与2009—2011期速度场的差值变化.

2004—2007期和2007—2009期相对1999—2004期的速度场差值变化显著变化的范围较大. 由于2007—2009期速度场差值变化与汶川地震震后调整有关, 那么震前2004—2007期速度场差值变化(图4a)的变化则是最为显著的, 它显示除华南地块和川滇地块中南部外的大范围有相对1999—2004期的北东向速度增强, 量值在 $3 \sim 5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 这与江在森等(2009)给出利用GPS基准站连续观测资料计算的青藏高原相对华南地块的位移时间序列变化在2005年之后东向、北向运动增强及北东向展布的GPS基线缩短增强在时间上和量值大小上基本一致(江在森等, 2009)(图5). 分析认为可能是苏门答腊 $M_w 9.2$ 巨震后印度板块对青藏高原的大尺度

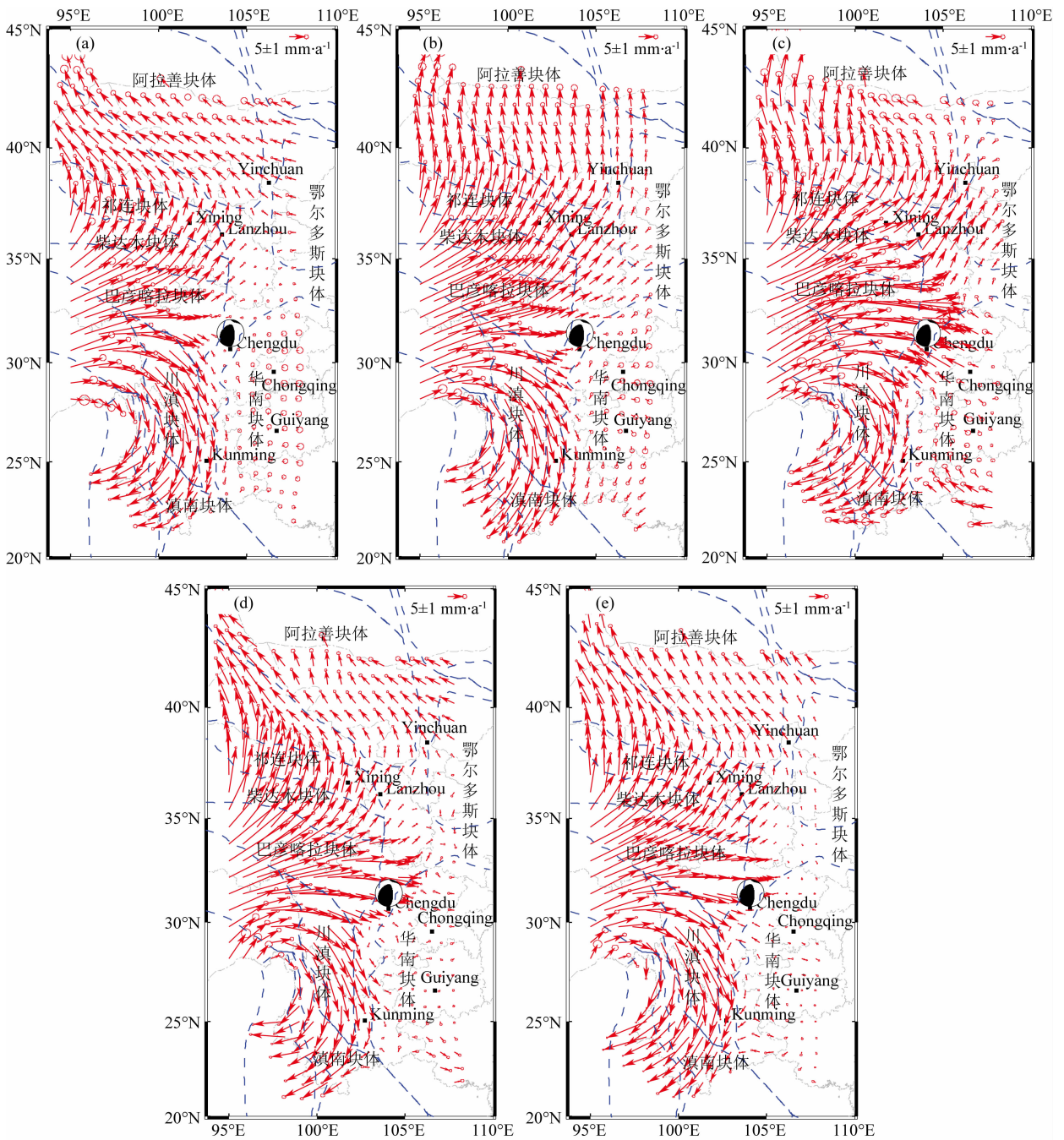


图 3 南北地震带地区相对稳定华南地块的网格 GPS 速度场

(a) 1999—2004 期; (b) 2004—2007 期; (c) 2007—2009 期; (d) 2009—2011 期; (e) 2011—2013 期。

Fig. 3 Grid GPS velocity field of south-north seismic fault zone relative stable Southern China block

(a) 1999—2004; (b) 2004—2007; (c) 2007—2009; (d) 2009—2011; (e) 2011—2013.

推挤有所加强,导致大范围的北东向地壳运动增强. 本文图中的活动地块划分主要按“大陆强震机理与预测”项目给出的划分(张培震等,2003),其中对川滇地块、巴颜喀拉与华南地块的边界按照邓起东等(2014)最新给出的结果做了调整,可以看到在2004—2007年出现北东向地壳运动增强在巴颜喀拉地块东边界与调整后的地块边界更为一致,对发

生汶川地震的龙门山断裂带的影响,主要是增加了平行断裂方向的右旋剪切,这与江在森等(2009)利用 LHAS(拉萨)—YANC(盐池)—LUZH(泸州)等基准站计算应变参数的时间序列变化显示在苏门答腊巨震后北东向主压应变与北东向右旋剪切增强一致(江在森等,2009). GPS 连续站虽然给出了时间过程但只是大空间尺度的相对运动特征,而由

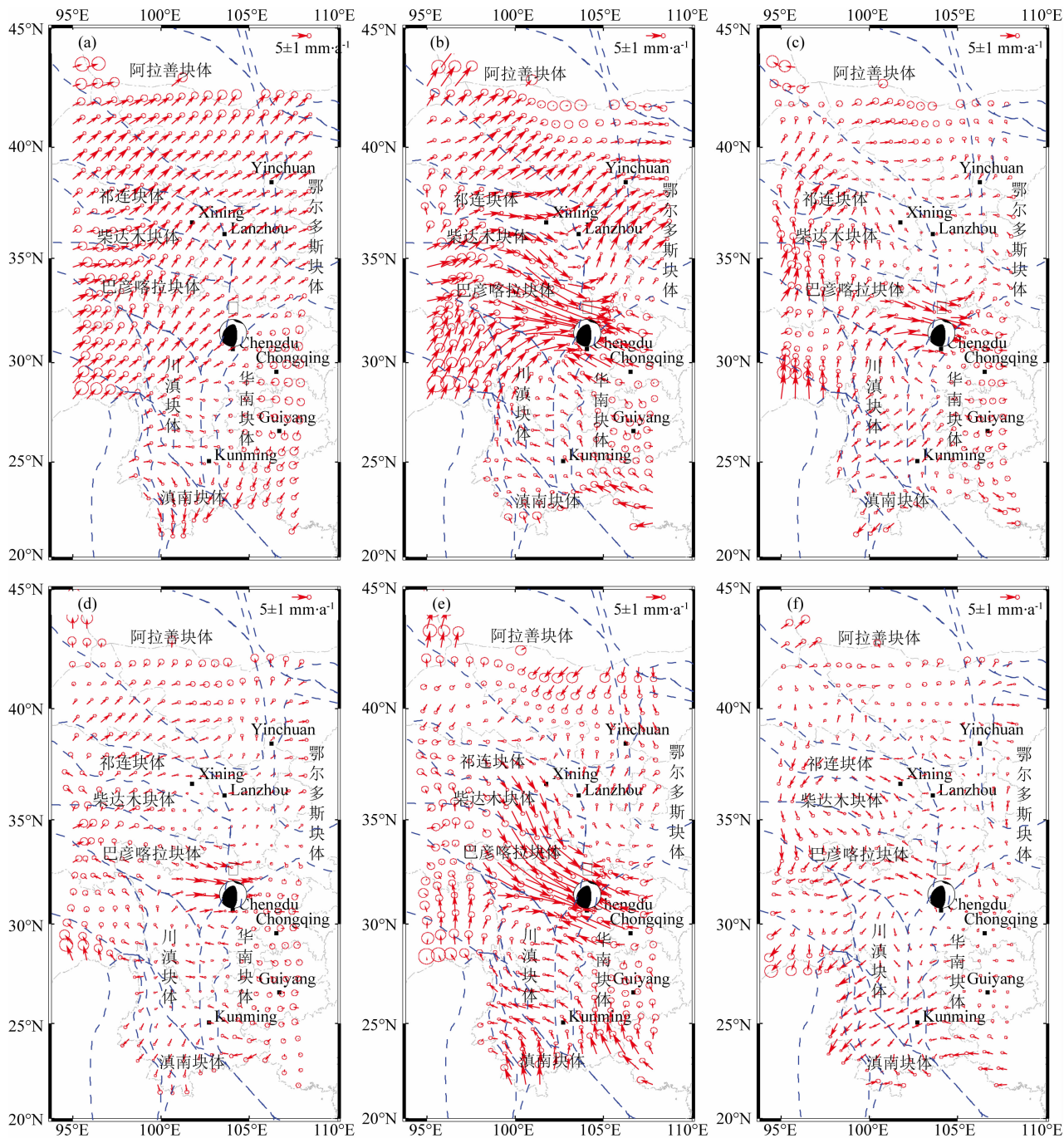


图 4 多期 GPS 速度场的速度差值分布(最小二乘配置结果)

(a) (2004—2007 年)—(1999—2004 年);(b) (2007—2009 年)—(1999—2004 年);(c) (2009—2011 年)—(1999—2004 年);
(d) (2011—2013 年)—(1999—2004 年);(e) (2007—2009 年)—(2004—2007 年);(f) (2013—2011 年)—(2009—2011 年)。

Fig. 4 Difference GPS velocity field distribution in periods

GPS 区域网获得的速度场差值变化的分布则显示龙门山断裂带是北东向运动增强显著衰减的陡变带,更显示出这种右旋剪切增强对龙门山断裂带的影响。分析认为,位于巴颜喀拉地块东边界的龙门山断裂带长期受到挤压(北东段有右旋),应变积累水平已很高,在南东东向构造动力持续作用与积累状态下,大尺度地壳运动上对断裂带加载右旋剪切的

变形,可能对断裂带发生大尺度的破裂错动起到促进作用。另外,在研究区西边缘中部的巴颜喀拉地块还附加东向运动的增强,这可能是昆仑山口西 8.1 级地震的震后效应所致,1999—2004 期速度场已利用 2001 年前后地震资料扣除昆仑山口西 8.1 级地震的位移,该地震(震中 90.9°E,36.2°N,破裂单侧向东扩展)形成 425 km 长的走滑破裂带(最大错动

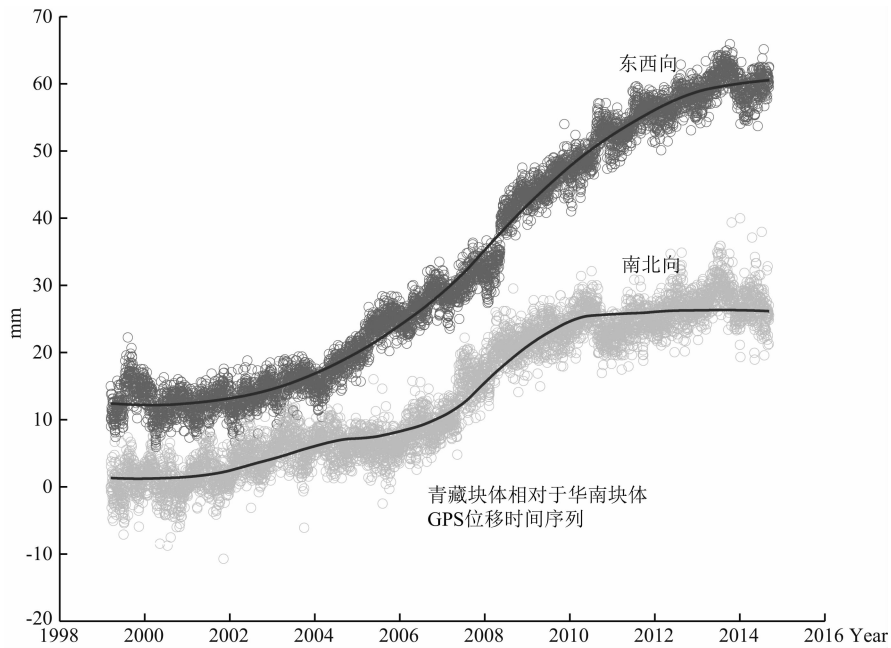


图 5 青藏块体相对于华南块体 GPS 位移时间序列

Fig. 5 GPS displacement time series of Qinghai-Tibet block relative South China block

位移约 6 m),震后断层的愈合可能需要更长时间。

2007—2009 期相对 1999—2004 期的速度场差值变化(图 4b),不仅显示汶川的震后效应显著,且在整个南北地震带(除川滇地块中南部相对 1999—2004 期的速度变化不显著外),大部分地区都有明显的变化,若将此现象看成是汶川地震震后调整的影响,那么北部包括已涉及到阿拉善地块南边缘的显著变化似乎不应都归为汶川地震的影响。经查阅方颖对地壳运动观测网络基准站青藏高原相对华南地块位移时间序列跟踪图(全国 7 级地震与地震形势跟踪组,2013)知,青藏高原在 2005 年后东向、北向运动持续增强,到了 2011 年初南向位移才有显著转平,东向位移也有所衰减。为此,本文计算了 2007—2009 期相对 2004—2007 期速度场差值变化(图 4e),可以看出,与图 4b 相比图 4e 在大范围的差值速度有明显减小,以龙门山断裂带北西侧东东南向运动为主、南东侧北西西向运动为辅的汶川地震震后效应显著区明显减小且区域边缘相对清晰。考虑到龙门山断裂带南段为尚未破裂且闭锁程度较高的断裂带(赵静等,2012),汶川地震震后调整对龙门山断裂带南段的加载十分显著。图 4e 反映汶川地震震后影响的北部调整范围仍然较大(并非个别测站点的影响,处理过程已经对柴达木西部个别检定为粗差点剔除,否则范围更大),包括在柴达木、祁连地块东部有明显调整变化,这使祁连、柴达木和巴颜喀拉地块边界东部都有一定尺度左旋剪切响应。而

在更靠近破裂带的甘东南至甘陕交界地区变化却很小,此地区明显与长期以来 5 级地震震区有关,可能属于本底应力水平高而对汶川地震响应不协调的低响应地带。2013 年 7 月 22 日在该区内发生了甘肃岷县漳县 6.6 级地震(震中 $104.2^{\circ}\text{E}, 34.5^{\circ}\text{N}$),显示该区地震活动开始显著增强。从该期川滇地块的差值速度分布来看,仅在北部很有限的范围受汶川地震震后调整引起东向运动增强及与东边界带呈现近东西向挤压增强,川滇地块北部边界的鲜水河断裂带的差值速度呈现与左旋背景反向的右旋扭动显著,这就可能使鲜水河断裂带的应变积累减缓。川滇地块整体向南偏东挤出运动并没有增强,但东边界左旋与西边界右旋均略有增强。

2009—2011 期与 1999—2004 期速度场差值变化(图 4c)明显比上两期变化小,显示 2009—2011 年期间南北地震带相对华南地块的运动总体上与 1999—2004 年渐趋一致。汶川地震震后效应的区域明显减小,收缩到巴颜喀拉地块东部靠近边界带有限区间,巴颜喀拉地块东边界带东南侧的四川盆地西北向运动响应的衰减更为明显,进一步显示震后效应主要受东偏南向推挤的主构造动力作用控制。受此影响,龙门山断裂带南段地壳应变积累的加载仍然相对于长期背景速度有显著加大,2013 年 4 月 20 日在龙门山断裂带南段发生了四川芦山 7.0 级地震($103.0^{\circ}\text{E}, 30.3^{\circ}\text{N}$)就是在汶川地震后该断裂带应变积累持续加强背景下发生的。巴颜喀拉地块

北边界东段(东昆仑断裂)仍有明显的与断裂带构造变形背景一致的左旋剪切增强的响应. 巴颜喀拉地块南边界东段的鲜水河断裂带附近速度场差值变化继续呈现与背景反向的右旋扭动, 川滇地块北部近东西向挤压的相对运动也较为明显, 但川滇地块整体向南偏东挤出运动也没有增强, 而在其中南部北东向运动有所增强. 另外, 研究区西部出现一定的北向及北北东向运动增强, 到祁连地块北边界带衰减到趋于 0, 表明大尺度相对运动对祁连地块北边界带中西段的加载有增强. 在研究区西边缘中部巴颜喀拉地块北、南边界相对 1999—2004 期速度有一定的左旋扭动, 可能与昆仑山地震震后效应及玉树地震有关.

2011—2013 期与 1999—2004 期速度场差值变化(图 4d)总体显示这期相对于 1999—2004 期速度场差值变化已不显著. 汶川地震震后影响的幅度、范围继续减小, 虽然此期间在龙门山断裂带南段发生了 2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震, 但可能由于芦山地震属于以逆冲为主兼有少量左旋走滑的盲断层错动(徐锡伟等, 2008), 其引起地表变形的规模和范围有限(Wu et al., 2013; Jiang et al., 2014), 并完全基于 GPS 连续站对芦山地震的同震位移做了很好扣除(中国地震局预测研究所在汶川地震后建设的 GPS 连续观测临时站一直坚持运行, 与四川省地震局的 GPS 连续站和陆态网络基准站联合解算), 所以从图 4d 看不出芦山地震对汶川地震破裂后变形衰减的影响. 对汶川地震破裂带西北测的东昆仑断裂带的左旋剪切影响, 以及对破裂带西南侧川滇地块北边界鲜水河断裂带右旋剪切响应仍很明显. 总体上看, 汶川地震对鲜水河断裂带的影响主要是引起右旋剪切的响应, 因而会显著减缓断裂带左旋剪切应变积累而可能降低该断裂带的地震危险性, 而对川滇地块东边界北部东向挤压增强的响应不会减缓其应变积累. 另外, 在研究区西部边缘的巴颜喀拉地块与柴达木地块仍有相对于 1999—2004 期速度场的左旋运动增强变化显示. 祁连地块中西部北东向或北东东向运动相对 1999—2004 期速度场仍有增强影响.

虽然图 4c、d 反映的 2009—2011 期及 2011—2013 期与 1999—2004 期的差值速度在明显变化的范围和幅度上都比前两个时段的小, 但从图像上也可以看到这两个时段的速度场差值变化也有一定不同. 为了把这种差异直观表现出来, 进一步计算了 2011—2013 期与 2009—2011 期的速度场差值变化

(图 4f). 结果显示, 2011—2013 期速度相对 2009—2011 期的差值速度除巴颜喀拉地块东部的变化可能与汶川地震震后效应衰减有关外, 在川滇地块中北部近南向运动有所增强, 量值 $2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右, 南部为南西向运动增强, 量值 $3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右, 对比背景速度场分布(图 3a)反映川滇地块的运动相对上一期在增强, 今年在川滇地块东边界主断裂的小江断裂带东侧发生的鲁甸 6.5 级地震打破了该东边界带长期 6 级以上地震的平静, 显示地震活动的增强. 另外, 祁连、柴达木地块东部南东向运动有增强, 量值在 $2 \sim 3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间.

速度场差值变化图反映两期速度之间的动态变化. 根据这几期的速度场变化图, 对南北地震带在汶川地震之后主要的形变机制做出可能的推断: (1) 汶川地震之后, 由于同震效应导致巴颜喀拉块体上部脆性层突然的近东向加速运动. 由于黏弹性松弛效应使得脆性层的加速运动带动下部黏性物质的加速. 同时, 可能由于脆性层将动能大部分传递给下部黏性物质, 导致汶川地震震后效应迅速衰减. (2) 巴颜喀拉块体到川滇块体下面似乎存在一个软流通道. 被加速的软流物质顺着通道流入川滇块体下部, 又对地壳形成了拖曳作用, 且流动过程存在衰减. 又由于黏弹性松弛的滞后性使得川滇块体地表位移场在汶川地震后的 2011 年才有了一定程度的加速.

4 主要结论与讨论

本文利用中国地壳运动观测网络和中国大陆构造环境监测网络 GPS 区域站 7 期复测资料, 建立了南北地震带地区相对于稳定的华南地块的多期速度场, 并讨论了建立多期具有可比性的速度场的方法问题, 采取两期速度场差值变化的分析方法, 研究了南北地震带地区近十多年来特别是在 2008 年汶川 8.0 级地震前后的动态变化过程, 得到了以下结果和认识:

(1) 为使多期速度场具有可比性, 首先需要严格选择多期速度场具有稳定性较高的统一基准. 对于南北地震带多期速度场的比较分析, 选择与之毗连的华南地块较为理想. 对华南地块解算基准参数的观测点群需剔除不稳定点, 采用拟准检定法(QUAD 法), 在做初选时需要考虑初算结果可能存在基准偏移的问题, 本文提出以 $\sum |p_i v_i - \hat{v}_p| = \min$ 对基准偏移量做出估计来改进初选指标, 可有效抑制初算结果可能出现基准偏移对稳定点筛选的影

响.适当放宽初选指标,而提高复选指标,通过初选后进入复选循环计算,可较有效剔除“不合群”的趋势偏离小群,并避免剔除不该剔除的点.

(2)通过最小二乘配置带误差滤波的模型以 GPS 站点实测速度为观测信号建立空间连续分布速度场,在用于多期速度场比较分析中,需通过多期速度场观测数据分析其速度协方差分布,选择统一且适当的协方差衰减参数,使多期速度场在顾及地壳变形频域范围的一致性,也是速度场可比性的要求.另外,在应用最小二乘配置进行 GPS 速度场连续分布(信号)拟合推估时,剔除粗差点有助于提高速度场分布的可靠性.

(3)通过对十多年来南北地震带相对稳定的华南地块的多期速度场的比较分析表明,区域地壳运动存在显著大于 GPS 观测误差的动态变化,可通过两期速度差值分布直观清晰地显示.在 2004—2007 年及 2007—2009 年相对于 1999—2004 年南北地震带地区中北部地区存在大范围的北东向运动增强(量值在 $3\sim 5\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$)过程,这与基于中国大陆 GPS 基准站给出的在 2004 年苏门答腊巨震后青藏高原北东向运动增强的时序过程相符.而通过有空间分布密度优势区域网复测资料解算的分期速度场差值变化分布可以看到这种北东向运动增强在巴颜喀拉地块东部边界是由大变小到趋于零的陡变带(按邓起东(2014)新发表文献调整后的外边界),对龙门山断裂带有显著的右旋剪切加载,推测认为这可能对汶川地震的发生有促进作用.

(4)2007—2009 年与 2004—2007 年的速度场差值变化等图像显示,在 2007—2009 年间汶川地震的调整影响范围较大,其北部包括祁连、柴达木地块东部都有明显的南东东向运动响应,但距破裂带更近的甘东南至甘陕交界地区响应非常小,可能是背景应力应变积累水平较高的地带.但巴颜喀拉地块北边界带东部的东昆仑断裂带左旋剪切的响应明显.汶川地震震后效应对龙门山断裂带南段为显著的持续加载过程,而对鲜水河断裂带表现为与应变积累背景相反的右旋扭动响应.在汶川地震过程及震后直到 2011 年,对川滇地块主要在北部或中北部及其边界有近东西向挤压增强,但整个川滇地块南东向挤出滑移的运动背景并没有增强,而 2011—2013 年相对 2009—2011 年有所增强(量值为 $2\sim 3\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$).

致谢 感谢中国地震局预测研究所方颖老师提供最新的 GPS 时间序列结果.感谢中国地壳运动观测网

络和中国大陆构造环境检测网络数据中心提供数据.

References

- Deng Q D, Cheng S P, Ma J, et al. 2014. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(7): 2025-2042, doi: 10.6038/cjg20140701.
- Dong D, Hering T A, King R W. 1998. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *Journal of Geodesy*, 72(4): 200-214.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2010a. GAMIT Reference Manual. GPS Analysis at MIT. Release 10. 4. Massachusetts Institute Technology, <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm>.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2010b. GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10. 4. Massachusetts Institute Technology, <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm>.
- Huang L R. 2002. QUAD method used for identifying relatively stable stations. *J. Geodesy Geodyn.* (in Chinese), 22(2): 10-15.
- Huang S M, Dong R Y, Zhang Y Y. 2006. Study on activity of great earthquakes on East Asia SN seismic belt. *J. Seismol. Res.* (in Chinese), 29(3): 304-311.
- Jiang Z S, Fang Y, Wu Y Q, et al. 2009. The dynamic process of regional crustal movement and deformation before Wenchuan $M_{8.0}$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 505-518.
- Jiang Z S, Liu J N. 2010. The method in establishing strain field and velocity field of crustal movement using least squares collocation. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 53(5): 1109-1117, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.011.
- Jiang Z S, Wang M, Wang Y Z, et al. 2014. GPS constrained coseismic source and slip distribution of the 2013 $M_{6.6}$ Lushan, China, earthquake and its tectonic implications. *Geophys. Res. Lett.*, 41(2): 407-413.
- Jiang Z S, Wu Y Q. 2012. Study on the regional crustal deformation field and earthquake preparation characteristics before and after the Wenchuan earthquake. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), (6): 108-108.
- Ou J K. 1999. Quasi-accurate detection of gross errors(QUAD). *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 28(1): 15-20.
- The Tracking Group of Chinese Magnitude 7 Earthquake and Earthquake Situation. 2013. The Tracking of Chinese earthquake Situation and Trend Prediction Research Report. Beijing: Seismological Press.
- Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. 2008. Rupture process of the

- M_s8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(5): 1403-1410, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.05.013.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Wang M, et al. 2013. Preliminary results pertaining to co-seismic displacement and pre-seismic strain accumulation of the Lushan M_s7.0 earthquake reflected by the GPS surveying. *Chin. Sci. Bull.*, 58(28-29), doi: 10.1007/s11434-013-5998-5.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Yang G H, et al. 2009. The application and method of GPS strain calculation in whole mode using least square collocation in sphere surface. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(7): 1707-1714, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.005.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Yang G H, et al. 2011. Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability. *Geophys. J. Int.*, 185(2): 703-717.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Yang G H, et al. 2012. Deformation characteristics of north section of north-south seismic zone in recent period. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 37(9): 1045-1048.
- Xu C J, He P, Wen Y M, et al. 2012. Coseismic deformation and slip distribution for 2011 Tohoku-Oki M_w9.0 Earthquake: Constrained by GPS and InSAR. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 37(12): 1387-1391.
- Xu C J, Liu Y, Wen Y M. 2009. M_w7.9 Wenchuan earthquake slip distribution inversion from GPS measurements. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 38(3): 195-201, 215.
- Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. 2008. The M_s8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 30(3): 597-629.
- Yang G H, Han Y P, Yang B. 2009. Discussion about the evolution characteristics and the mechanism of the crustal horizontal movement and deformation field in Sichuan-Yunnan area. *J. Seismol. Res.* (in Chinese), 32(3): 275-282.
- Zhang G M, Fu Z X, Wang X Q, et al. 2006. Study on determination of the national significant seismic monitoring and protection regions. *Earthquake Res. China* (in Chinese), 22(3): 209-221.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. 2003. Seismic activity and activities of land in mainland China. *Sciences in China (Series D)* (in Chinese), 33(S1): 12-20.
- Zhang P Z, Wen X Z, Xu X W, et al. 2009. Tectonic model of the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 54(7): 944-953.
- Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. 2008. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(4): 1066-1073, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.04.015.
- Zhang X, Jiang F Y, Cui D X, et al. 2011. Analysis of strain accumulation and influence of great earthquake observed by GPS in Sichuan and its adjacent areas. *J. Geodesy Geodyn.* (in Chinese), 31(4): 9-13.
- Zhang X, Jiang Z S, Wang S X, et al. 2007. United inversion of three-dimensional negative dislocation for GPS and leveling observation in northeastern margins of Qinghai-Tibet block. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), (7): 61-66.
- Zhang X, Jiang Z S, Wang S X. 2004. Negative dislocation model for synthetic solution of GPS observation of south-north seismic zone during 1999—2001. *Earthquake Res. Plateau* (in Chinese), 16(1): 26-34.
- Zhao J, Jiang Z S, Wu Y Q, et al. 2012. Study on fault locking and fault slip deficit of the Longmenshan fault zone before the Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(9): 2963-2972, 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.015.

附中文参考文献

- 邓超东, 程绍平, 马冀等. 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. *地球物理学报*, 57(7): 2025-2042, doi: 10.6038/cjg20140701.
- 黄立人. 2002. 用于相对稳定点组判别的 QUAD 法. *大地测量与地球动力学*, 22(2): 10-15.
- 黄圣睦, 董瑞英, 张永久. 2006. 东亚南北地震带大震活动性研究. *地震研究*, 29(3): 304-311.
- 江在森, 方颖, 武艳强等. 2009. 汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程. *地球物理学报*, 52(2): 505-518.
- 江在森, 刘经南. 2010. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与应变场的方法. *地球物理学报*, 53(5): 1109-1117, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.011.
- 江在森, 武艳强. 2012. 汶川地震前后区域地壳形变场及孕震特征研究. *国际地震动态*, (6): 108-108.
- 欧吉坤. 1999. 粗差的拟准检定法(QUAD 法). *测绘学报*, 28(1): 15-20.
- 全国 7 级地震与地震形势跟踪组. 2013. 中国大陆地震大形势跟踪与趋势预测报告. 北京: 地震出版社.
- 王卫民, 赵连锋, 李娟等. 2008. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. *地球物理学报*, 51(5): 1403-1410, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.05.013.
- 武艳强, 江在森, 杨国华等. 2009. 利用最小二乘配置在球面上整体解算 GPS 应变场的方法及应用. *地球物理学报*, 52(7): 1707-1714, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.005.
- 武艳强, 江在森, 杨国华等. 2012. 南北地震带北段近期地壳变形特征研究. *武汉大学学报: 信息科学版*, 37(9): 1045-1048.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 2008. 汶川 M_s8.0 地震地表破裂带及其发震构造. *地震地质*, 30(3): 597-629.
- 许才军, 何平, 温扬茂等. 2012. 日本 2011 Tohoku-Oki M_w9.0 级地震的同震形变及其滑动分布反演: GPS 和 InSAR 约束. *武汉大学学报: 信息科学版*, 37(12): 1387-1391.

- 许才军, 刘洋, 温阳茂. 2009. 利用 GPS 资料反演汶川 M_w 7.9 级地震滑动分布. 测绘学报, 38(3): 195-201, 215.
- 杨国华, 韩月萍, 杨博. 2009. 川滇地区地壳水平运动与变形场的演化特征及其机制讨论. 地震研究, 32(3): 275-282.
- 张国民, 傅征祥, 王晓青等. 2006. 确定全国地震重点监视防御区的研究. 中国地震, 22(3): 209-221.
- 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(S1): 12-20.
- 张培震, 闻学泽, 徐锡伟等. 2009. 2008 年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生的多单元组合模式. 科学通报, 54(7): 944-953.
- 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, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.04.015.
- 张希, 江在森, 王双绪. 2004. 1999—2001 年南北地震带 GPS 综合观测解的负位错模型. 高原地震, 16(1): 26-34.
- 张希, 江在森, 王双绪等. 2007. 青藏块体东北缘 GPS 与水准资料的三维负位错联合反演. 国际地震动态, (7): 61-66.
- 张希, 蒋锋云, 崔笃信等. 2011. 四川及邻区 GPS 观测揭示的应变积累与大震影响分析. 大地测量和地球动力学, 31(4): 9-13.
- 赵静, 江在森, 武艳强等. 2012. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究. 地球物理学报, 55(9): 2963-2972, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.015.

(本文编辑 胡素芳)