

川滇地区地壳块体运动特征研究*

蒋锋云, 朱良玉, 王双绪, 张晓亮, 张希, 黄智, 郑申宝

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过对川滇地区块体细划, 借助均匀弹性块体应变模型, 利用 1999 ~ 2007 年和 2009 ~ 2011 年两个时段 GPS 观测地壳水平运动场, 计算了这两个时间段该区块体应变状态、块体内部均匀弹性变形场及相邻块体边界带的相对运动。考虑汶川地震、玉树地震对该区域的地壳运动的影响, 分析计算结果认为: (1) 计算结果较好地反映了该区域构造运动特征; (2) 川滇地区块体东边界运动主要以走滑为主, 安宁河断裂和则木河断裂的交汇部位表现为明显的左旋走滑运动受阻, 且其两侧块体应变率积累显著, 是未来可能的强震孕育区; (3) 2009 ~ 2011 年与 2007 ~ 2009 年相比, 整个区域块体边界运动空间差异增强, 可能反映了汶川、玉树地震对该区域地壳运动的影响。

关键词: 均匀弹性块体应变模型; GPS; 地壳运动; 川滇地区

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)03-0263-06

0 引言

强烈地震大多是地壳块体边界带应变能积累到一定程度, 导致断层发生错动, 能量急剧释放的结果。因此, 研究主要块体边界上应变积累的时空变化特点对该区域地震活动形势的把握至关重要。对于块体边界带运动的研究, 一般采用对实测 GPS 水平运动速度场进行剖面分析获得 (Shen *et al.*, 2005; 赵静等, 2011), 或者利用位错理论反演获得 (申重阳等, 2002; 张希等, 2011)。用剖面分析方法能够比较实际客观的反映块体边界的真实运动, 但其存在两个局限: (1) 一般认为, 弹性变形是地壳变形的的主要方式。用剖面分析获得的块体边界运动可能包含了太过丰富的形变信息, 而干扰了弹性变形信息的提取。(2) 由于实际 GPS 观测点位的分布不均匀, 对体边界带空间运动特征的把握不是很精细、准确, 无法获得块体边界带空间上连续变化的运动。用位错方法具有明确的物理意义, 但反演参数过多, 未知假设对结果影响较大, 且一般通过分段反演获得边界运动, 不具有空间上的连续性。

因此, 我们有必要对实际观测速度场进行滤波, 获得其弹性变形分量。利用分离得到弹性变形场来进一步计算块体边界的倾滑运动, 从而获得具有块体变形意义的边界运动特征。笔者引入李延兴等 (2001) 的均匀弹性块体变形模型, 借助实际观测速度场, 通过对每个块体运动参数和应变参数的反演来模拟块体的均匀弹性变形场, 利用此变形场进一步计算块体边界的相对运动特征。通过对不同时段 GPS 资料的计算结果, 分析块体内部应变状态的变化和块体边界运动特征的改变与强震孕育之间的关系, 从而进一步探讨区域未来强震活动形势。

川滇区域构造复杂, 强震活动频繁, 是我国地震研究的天然试验场 (徐锡伟等, 2005), 也是中国地震局强震危险性重点监测区域之一。该区域积累有多期 GPS 观测资料, 许多学者利用 GPS 资料对该区域块体边界运动进行了研究 (Shen *et al.*, 2005; 赵静等, 2011; 申重阳等, 2002; 王阎昭等, 2008; 张希等, 2011), 但这些研究成果由于其所使用的模型方法的差异, 存在不一致性。本文主要基于平面均匀弹性块体模型, 对该区域地壳块体应变状态及其边界运动随时间变化特征进行研究。

* 收稿日期: 2012-07-11.

基金项目: 中国综合地球物理场观测—鄂尔多斯地块周缘地区 (201208009) 和中国地震局星火计划项目 (XH12072) 联合资助。

比较两个时段速度场可以发现，汶川地震震后龙门山断裂西侧，巴彦喀拉东部块体内部地壳缩短消失，龙门山断层闭锁已经解体。由于受玉树地震同震、汶川地震震后影响，巴彦喀拉块体

向东运动增强，使得鲜水河断裂左旋运动明显减弱。此外，我们无法得到更多的信息，为此下面我们依据上述原理进行块体内部弹性变形和边界错动量的计算。

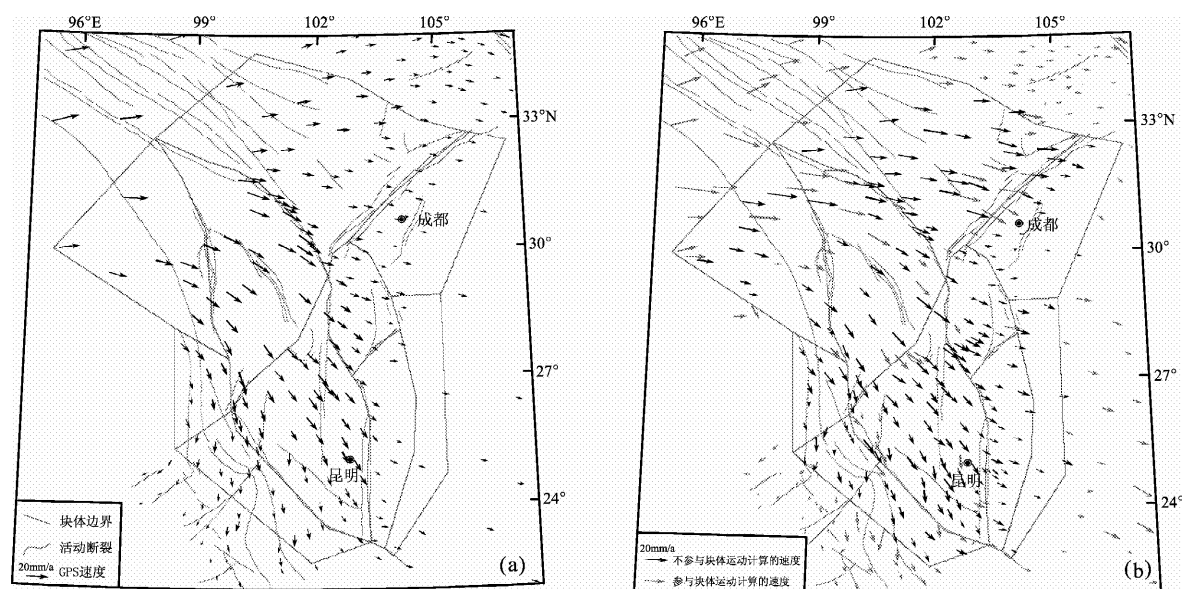


图2 1999~2007年(a)、2009~2011年(b) GPS速度场

Fig. 2 GPS velocity fields from 1999 to 2007 (a), and from 2009 to 2011 (b)

4 计算结果及分析

为了突出块体内部的弹性变形，笔者利用反演得到的块体的运动参数和应变参数，计算各个块体均匀分布的运动场，并扣除以块体为基准的其刚性运动成分，从而得到以块体自身为基准的弹性变形场（图3），这一速度场更好的显示了块体内部的弹性变形。1999~2007年巴彦喀拉地块内部差异运动显著，主要以东西向挤压运动为主，反映了汶川地震孕震变形。川滇北部块体表现为以理塘—德巫断裂为界，呈左旋拉张的形态。川滇南部块体表现为近东西向的拉张为主。2009~2011年相比上一时间段，其变化主要表现在：由于汶川地震的发生，巴彦喀拉地块内部弹性变形显著减弱。川滇北部块体内的理塘—德巫断裂左旋趋势有所减弱，而张性运动增强。川滇南部块体由之前明显的近东西向拉张转变为以块体内部安宁河断裂中南段为界的左旋运动特征。

图4为根据两期资料计算得到的块体边界垂直于断裂走向的倾滑运动分量及每个块体的应变

特征。从图4a可以看出，计算较好的反映了该区域的构造特征：在印度板块的推挤作用下，川滇地区的主压应变围绕喜马拉雅东构造结呈顺时针方向运动，这和该区域地壳沿东南方向挤出的构造背景是一致的，青藏高原物质的向东挤出与阿萨姆角NEE方向的持续楔入造成川滇地区东移，在东部相对稳定的四川盆地和华南块体的阻挡下，整个川滇地区沿鲜水河—小江断裂带由向东转为向南运动（张希等，2007；方颖等，2006）。巴彦喀拉块体东部近东西向的压应变明显，表明该块体内部存在显著的应变积累特征。川滇块体南部主应变表现为以近东西向的拉张为主，面应变也显示该块体以张性为主。这种变形方式的机理需要我们进一步从动力学方面去认识。2009~2011年资料解算结果和1999~2007年相比，川滇块体北部、巴彦喀拉地块近东西向的主压应变明显减弱，川滇南部块体近东西向张应变方向转为北东向，且量值明显减弱，可能是玉树地震同震及震后、汶川地震震后地壳应力松弛调整影响所致。但两期资料均显示，滇东北块体呈现高应变积累状态。

块体边界相对运动的计算，根据边界两侧利用上述方法反演得到的块体运动参数和应变参数，反算获得边界点分属两个块体的运动速度，并对速度进行垂直于边界和平行于边界的投影，对投影结果进行直接相减，即可得到块体边界走滑和倾滑运动分量。

使用 1999 ~ 2007 年资料计算获得的块体边界垂直断层方向的倾滑运动显示：金沙江断裂、

鲜水河断裂南段—安宁河断裂—则木河—小江断裂北段、红河断裂表现为压性运动，但量值不大，基本在 2 mm/a 以内。比较两期资料计算结果可以看出，鲜水河断裂南段受到汶川地震及玉树地震的影响，由之前的压性转变为张性。龙门山断裂可以明显看出地震发生后，断层闭锁解体，表现出上盘相对于下盘的逆向错动。金沙江断裂压性显著增强，丽江—小金河断裂南段由之

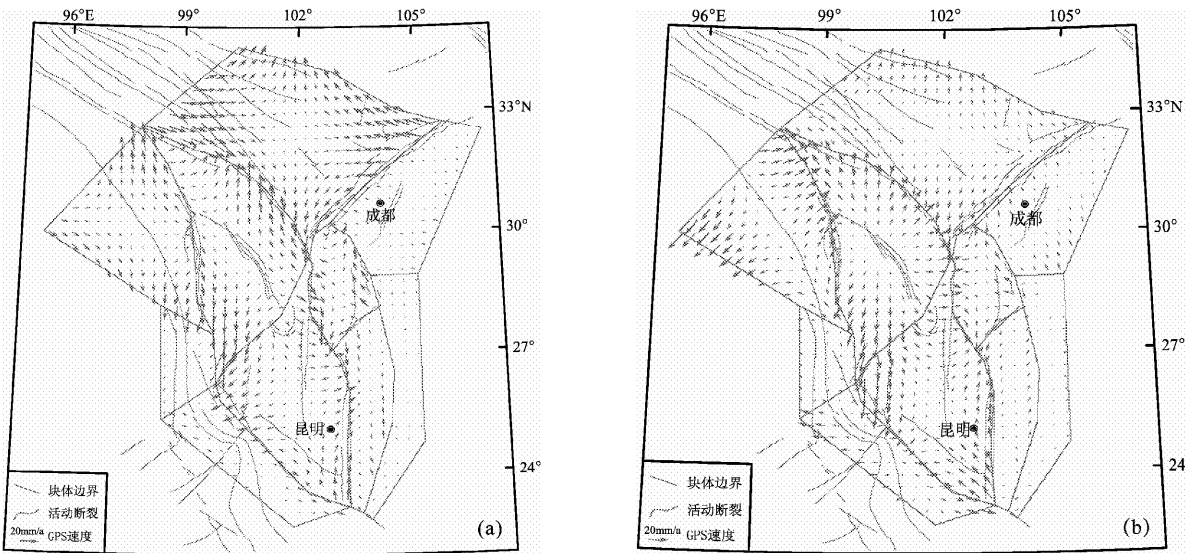


图 3 1999 ~ 2007 年 (a)、2009 ~ 2011 年 (b) 川滇地区块体内部变形

Fig. 4 Internal deformation of the block in Sichuan-Yunnan area from 1999 to 2007 (a), and from 2009 to 2011 (b)

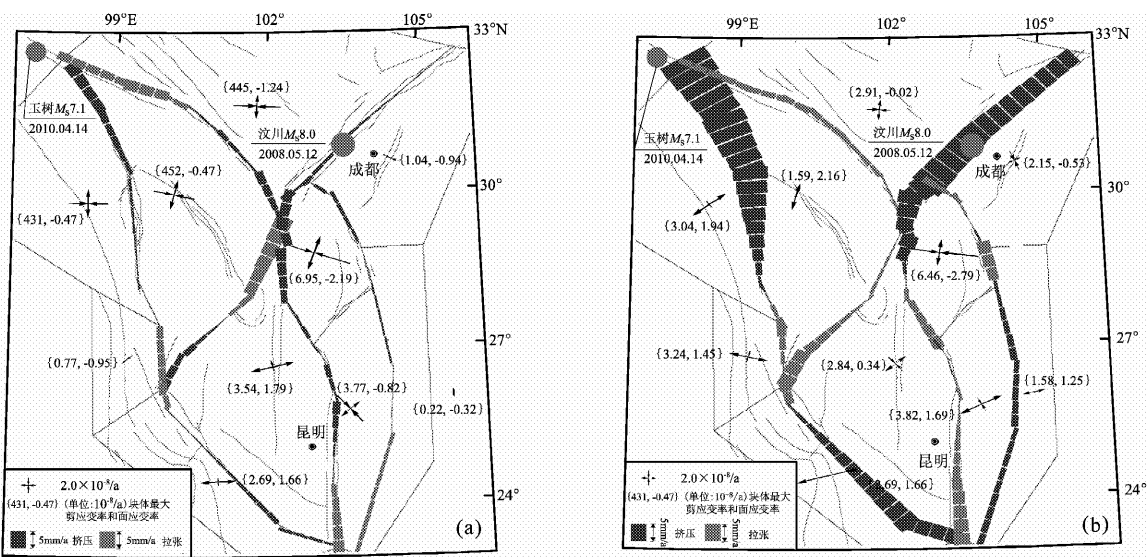


图 4 1999 ~ 2007 年 (a)、2009 ~ 2011 年 (b) 块体边界倾滑分量和块体主应变率

Fig. 4 The dip-slip component of boundary between the adjacent blocks and the main strain rate in blocks from 1999 to 2007 (a), and from 2009 to 2011 (b)

前的轻微压性转变为张性。则木河断裂—小江断裂北段由之前的压性转为张性，而位于则木河断裂和安宁河断裂交汇处的西昌跨断层短水准场，自 2009 年以来出现跨断裂两侧垂直形变差异异常增大。

图 5 是两期资料计算得到的平行于块体边界的相对走滑运动。从较长时间段可以看出：整个区域块体边界走滑运动特征和地质上的描述基本一致，川滇菱形地块的东边界鲜水河—安宁河—则木河断裂—小江断裂表现为明显的左旋走滑，其走滑量为 $5 \sim 10 \text{ mm/a}$ ，为地质构造上获得的全新世以来滑动速率的三分之二（徐锡伟等，2005），和利用剖面分析（赵静等，2011；吕江宁等，2003；沈正康等，2003）、利用位错模型反演得到的结果基本一致（张希等，2007，2011）。川滇块体北部和南部的边界，丽江—小金河断裂基本上也是以左旋走滑为主，其量值为 2 mm/a 左右。金沙江断裂基本以右旋走滑为主，但走滑量不大，为 $1 \sim 2 \text{ mm/a}$ 。红河断裂基本表现为右旋走滑，量值为 1 mm/a 左右。整个区域从地表块体边

界走滑运动来看，川滇菱形块体的东边界是构造活动最为强烈的区域，这和该区 $M_s 7.0$ 以上地震活动的空间分布较为一致。2009 ~ 2011 年最新观测资料计算结果显示，整个区域块体边界走滑运动特征和前一时间段基本一致。差别主要体现在：（1）相比前一个时间段，该时间段川滇菱形块体的东边界左旋走滑速率明显减弱，特别是安宁河断裂和则木河断裂的交汇部位其走滑速基本上可以忽略；（2）金沙江断裂北段由之前的轻微右旋转为明显的左旋，红河断裂整体右旋增强。这些差异与该区域发生的几次中强地震紧密相关，特别是汶川地震和玉树地震。对该区域的变形特征，需要我们进一步结合孕震机理从运动学原理和动力学机制上去解释。此外，两期资料均显示，在川滇菱形块体东边界的安宁河—则木河断裂处，断层左旋滑动速率明显要低于东边界上其他位置，这可能揭示了该区域处于相对走滑受阻区域，有益于能量的积累。同时，两期资料计算结果均显示，其东侧的滇东北块体呈现高应变积累状态。因此该区域具备发生中强地震的形变背景。

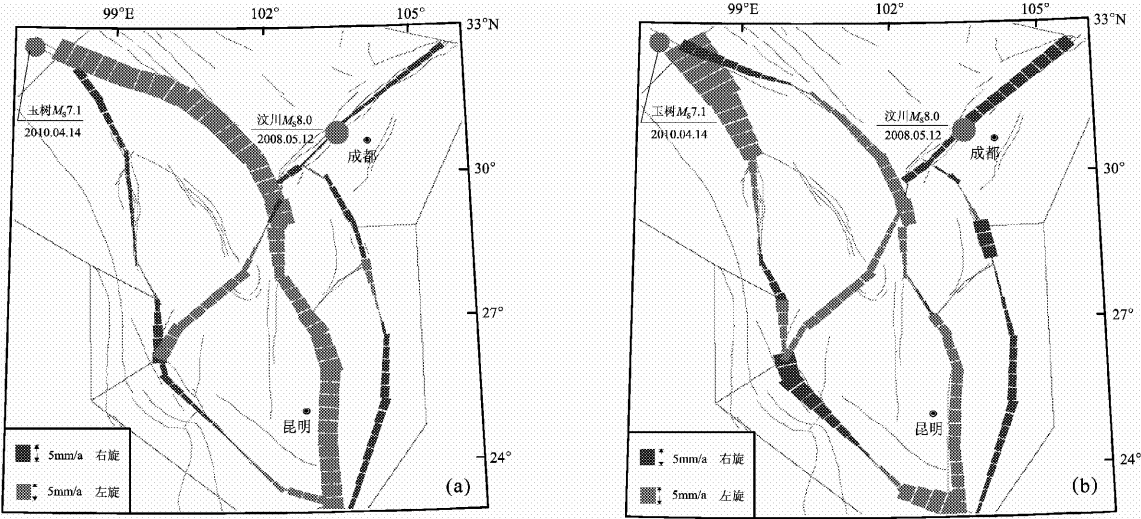


图 5 1999 ~ 2007 年 (a)、2009 - 2011 年 (b) 块体边界走滑分量
Fig. 8 The strike-slip component of boundary between the adjacent blocks from 1999 to 2007 (a), and from 2009 to 2011 (b)

5 结论及讨论

本文主要将均匀弹性块体模型进一步发展，用于计算相邻块体边界运动。该方法和基于位错

模型的断层运动的反演、模拟相比较，仅仅考虑地壳的平面弹性块体运动，并没有涉及三维断层参数的反演，具有一定的局限性，但实际观测的 GPS 速度场仅仅是地表的运动，用该方法具有反演参数较少、操作简单易行、能够获得连续变形的

边界运动状况的优点。本文用此方法对川滇地区块体边界运动进行计算,和其他专家对该区域用剖面方法计算断层运动结果大体一致,说明这种方法具有一定的可行性。另外用于计算块体弹性变形的模型有很多种,每种方法都有各自的优缺点,如何选择最优的模型来进行弹性变形场的计算,也是需要进一步探索的问题。

参考文献:

- Shen Z K, Lu J N, Wang M, *et al.* 2005. Contemporary Crustal Deformation Around the Southeast Border land of the Tibetan Plateau[J]. *J Geophys Res*, 110(B11): 110–117.
- 方颖, 江在森, 张晶, 等. 2006. 川滇地区断层形变模型与应变积累分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 26(2): 48–52.
- 李延兴, 黄城, 胡新康, 等. 2001. 板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[J]. *地震学报*, 23(6): 565–572.
- 吕江宁, 沈正康, 王敏. 2003. 川滇地区现代地壳运动速度场和活动

- 块体模型研究[J]. *地震地质*, 25(4): 543–554.
- 申重阳, 王琪, 吴云, 等. 2002. 川滇菱形块体主要边界运动模型的GPS数据反演分析[J]. *地球物理学报*, 45(3): 352–361.
- 沈正康, 王敏, 甘卫军, 等. 2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究[J]. *地学前缘*, 10(特刊): 93–100.
- 王阆昭, 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.
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. *地震地质*, 27(3): 448–461.
- 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[J]. *大地测量与地球动力学*, 31(5): 9–13.
- 张希, 张四新, 王双绪, 等. 2007. 川滇地区近期地壳运动的应变积累[J]. *大地测量与地球动力学*, 27(4): 8–15.
- 赵静, 江在森, 武艳强, 等. 2011. 汶川地震前后川滇块体应变与断裂变形特征研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 31(5): 30–34.
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等. 2009. GPS观测及断裂第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形[J]. *地球物理学报*, 52(10): 2491–2580.

Research on the Characteristics of Crustal Block Movement in Sichuan-Yunnan Area

JIANG Feng-yun, ZHU Liang-yu, WANG Shuang-xu, ZHANG Xiao-liang,
ZHANG Xi, HUANG Zhi, ZHEN Shen-bao
(The Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China)

Abstract

Based on the division of Sichuan-Yunnan area, using the horizontal crustal movement velocity field by GPS measurements during 1999 to 2007 and 2009 to 2011, we calculated the state of block strain, the homogeneous elastic deformation of the internal blocks and relative motion of the boundary between the adjacent blocks by the homogeneous elastic strain block model. Considering the impact of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake and Yushu $M_s7.1$ earthquake on crustal movement of Sichuan-Yunnan area, the calculation analysis results showed that: (1) The calculation results reflected the better characteristics of tectonic movement in the region; (2) The movement of the east boundary on Sichuan-yunnan block mainly was strike-slip. The intersections of An'ninghe and Zemuhe Faults showed that the left-lateral strike-slip movement was blocked apparently, and there were significant strain accumulation in the block on both sides of this site, which indicated it maybe the area of possible strong earthquakes preparation in the future; (3) The spatial differences of the blocks boundary movement were enhanced in 2009 ~ 2011 than that in 2007 ~ 2009, which reflects the impact of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake and Yushu $M_s7.1$ earthquake on the regional crustal movement in the whole area.

Key words: homogeneous elastic strain block model; GPS; crustal movement; Sichuan-Yunnan region