

# 云南地区近期地壳活动特征<sup>\*</sup>

洪敏, 张勇, 邵德盛, 王伶俐, 王岩

(云南省地震局, 云南昆明 650224)

**摘要:** 基于云南省的 GNSS 连续观测资料, 通过最小二乘、克里金插值等方法进行速度场、应变参数的求解, 获得了自 2010 年起至今云南地区的地壳活动特征。结果表明, 云南地区最大剪应变变化速率存在西强东弱, 北强南弱的特征, 目前滇西北地区最大剪应变增强最快, 滇南至滇西南等区域挤压应变积累最明显, 且 2011 年缅甸 7.2 级地震的发生未改变这一地区的应变积累趋势。

**关键词:** 地壳活动; 速度场; 应变场; 克里金插值; 云南地区

**中图分类号:** P315.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)03-0367-06

## 0 引言

中国大陆构造环境监测网络建成并顺利运行, 使得云南省的形变观测手段得到了明显加强, 基于 28 个 GNSS 连续观测站资料, 通过一定的处理方法, 可获取区域内的应变特征。段维波等 (2011), 武艳强等 (2009) 曾用各种不同的方法计算区域应变场, 并取得了一些成果, 也有许多学者针对云南地区地壳形变、断层活动等做了大量工作, 如杨国华等 (2003) 将云南地区划分为 4 个运动单元, 李玉江等 (2009) 认为云南地区最大主应变具有明显的西高东低、北强南弱等特征, 这些研究对了解云南地区地壳活动特征起着积极作用。云南地区地壳运动剧烈, 地质结构复杂, 为了分析云南地区地壳活动特征, 本文基于云南省 28 个 GNSS 测站 2011 年 1 月至 2014 年 3 月的观测数据, 引入克里金插值方法, 基于位移与应变关系求取区域应变场, 同时通过最小二乘等方法, 获取了云南地区近几年的速度场, 在此基础上分析了云南地区近期地壳活动特征, 为下一步震情分析等工作提供参考。

## 1 数据处理方法

本文涉及到的处理结果包含速度场和应变场两

类, 其中速度场的处理相对容易, 主要基于 GNSS 观测获得的测站坐标时间序列。以文山测点为基准, 通过最小二乘法, 获取区域内各个测点相对于文山测点的点位运动速率, 相比扣除华南块体的欧拉矢量该方法虽然有信息损失, 但对于分析云南地区的差异运动信息影响不大。应变场的求解主要用到位移场时间序列, 通过截取任意起止时间, 可获取该时间段内的累计应变量, 通过滑动结束时间, 可进一步获取应变场变化的时间序列。因位移场时间序列为球面坐标, 平面求解应变存在一定的信息损失, 但云南处于低纬度地区, 假设正东西向两个间隔  $1^\circ$  的测点同时向南移动 1 cm, 平面上求解两点间应变为零, 而在球面上则会造成的东西向应变变化达  $10^{-9}$  的量级, 但这与云南地区应变年变化  $10^{-8}$  相比差一个量级。因此, 对于研究区域应变场的趋势变化并用于地震预测预报工作来说, 这种因球面坐标引起的误差在云南地区基本可以忽略, 不影响对区域应变场积累趋势的判定与识别。本文就是通过平面应变理论公式求解以获取区域应变场特征。

应变参数的求解引入了克里金插值方法, 实践证明, 该方法理论基础严密, 在地质采矿等领域得到了广泛的应用 (侯景儒等, 1998)。克里金插值是一种线性、无偏、最优的内插估计算法, 利用该方法进行应变场的求解, 其插值的优越性已经得到了充分的认可 (朱守彪等, 2005; 陈小

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014-04-09.

**基金项目:** 云南省青年基金项目“基于 GNSS 站连续观测数据分析云南主要活动块体运动状况”(201206) 与云南强震临震预警技术专项“云南 6 级以上地震短临异常指标总结”联合资助。

斌, 2007)。本文基于 GAMIT/GLOBK 软件获取的各个测点坐标时间序列求取应变场, 由于局部直接求应变的过程中, 无论是应变花方法、还是 Savage 方法, 先求应变值再作光滑, 结果都会有很大的局部起伏, 不如先对位移值光滑后再求应变 (石耀霖, 朱守彪, 2006)。因此, 本文把云南地区划分为  $1^\circ \times 1^\circ$  的网格, 通过利用克里金插值对各个测点的位移分量分别进行插值, 获取了分布均匀的位移场, 再通过位移场求取区域应变场。

在二维空间中, 假设某个测点的位移为  $u, v$ , 该点的应变状态分量为  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ , 那么与它无限接近的一点的位移分量可表示为 (陈健, 陶本藻, 1987)

$$\begin{cases} u' = u + \varepsilon_x d_x + \varepsilon_{xy} d_y - \omega d_y, \\ v' = v + \varepsilon_{xy} d_x + \varepsilon_y d_y + \omega d_x. \end{cases} \quad (1)$$

对 (1) 式进行等价变换后, 两边同除以两点间距离, 可得 (陆远忠等, 2001)

$$\begin{cases} \frac{\Delta u}{d} = \varepsilon_x \cos \alpha + \varepsilon_{xy} \sin \alpha - \omega \sin \alpha, \\ \frac{\Delta v}{d} = \varepsilon_{xy} \cos \alpha + \varepsilon_y \sin \alpha + \omega \cos \alpha. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy}$ ,  $\alpha$  为两格网点间的坐标方位角。

每个格网点通过 (2) 式联立与其他各个相邻格网点的方程组, 便可通过最小二乘法求解得到其应变状态分量  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ 。并进一步通过 (3) 式求解得到格网点的最大剪应变  $R_{\max}$ , 主应变  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ , 面膨胀  $\Delta$ , 应变主轴方位角  $\varphi$  等参数:

$$\begin{cases} R_{\max} = [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2]^{\frac{1}{2}}, \\ \varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2]^{\frac{1}{2}}, \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2]^{\frac{1}{2}}, \\ \Delta = (\varepsilon_x + \varepsilon_y), \\ \varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\gamma_{xy}}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \right). \end{cases} \quad (3)$$

通过以上步骤, 可以获取区域内任意时间段内的应变场参数, 并绘制相应的应变场图。

## 2 云南地区地壳运动特征

### 2.1 速度场结果

2010 年, 中国大陆构造环境监测网络工程开始试运行, 截至 2014 年 1 月, 已经积累了近 4 年的 GNSS 连续观测数据, 通过单点位移基准扣除以及最小二乘法进行速度拟合, 获得了云南地区单点基准的地壳运动速率图。由于在此期间曾发生了缅甸孟帕亚 7.2 级地震, 该地震发生在龙陵—澜沧地震带上, 与云南地区强震活动构造相连、动力同源 (皇甫岗等, 2014), 因此, 该地震对云南地区影响较为深远。为了解该地震的发生对云南地区应变状态的影响, 本文选取了不同时间段的数据进行速度求取, 获得了两张基于不同样本的速度图 (图 1)。

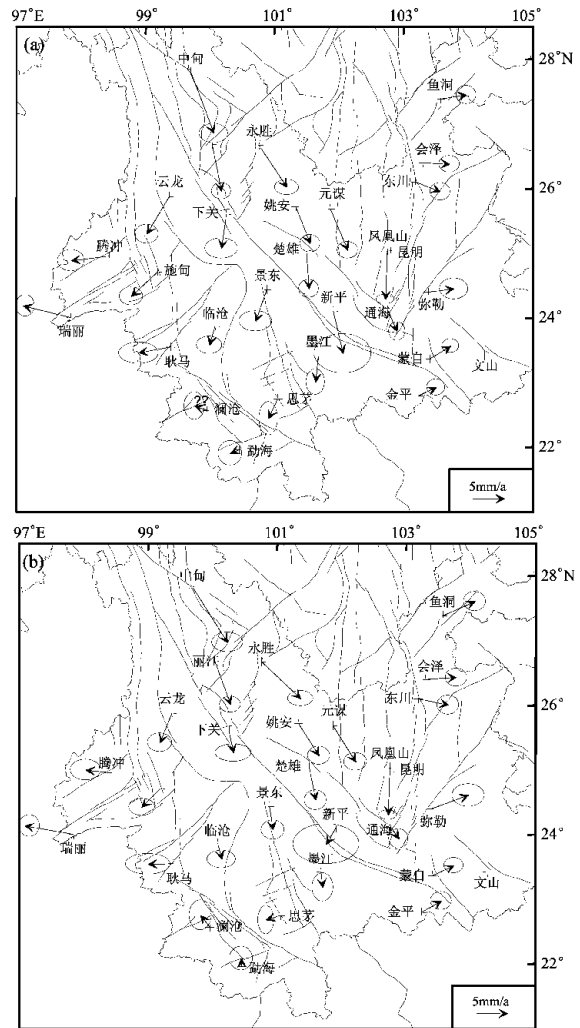


图 1 云南地区速度场图

(a) 2010-06 ~ 2014-03; (b) 2012-01 ~ 2014-01

Fig. 1 The velocity field of Yunnan region

图1显示的速率图结果基于文山单点基准得出(赖锡安等, 2004), 即假设文山测点不动, 求解ITRF框架下其他点位相对于文山测点的运动速率。由于文山点位于相对稳定的华南块体, 因此, 得到的结果基本能够反映出云南地区相对于华南块体的运动特征(王伶俐等, 2012)。从图中可以看出, 其他测点相对于文山测点的运动速率存在明显差异性, 测点运动方向围绕阿萨姆结旋转的特征明显。从川滇菱形块体两侧点位运动速度差异可以直观看出, 小江断裂带的左旋走滑趋势仍然比较明显, 而川滇菱形块体东南向运动发生转向主要是受到了华南块体的阻挡, 该转向过程可能导致小江断裂带上受到较强的侧向挤压。另外, 滇西南的思茅、勐海等区域在缅甸7.2级地震前后运动速率均比较小, 特别是震后, 原有的顺时针转动速率在这一地区表现不明显, 可能表明缅甸7.2级地震的发生, 并未对这一地区的应变积累趋势形成解锁效应, 应变积累仍然在持续发展。

## 2.2 应变场结果

图2为累计3年的最大剪应变和面膨胀等值线图。从图2a中可以看到, 中甸—耿马一带为明显的最大剪应变增强区, 其中中甸一带是云南省内增强最快的区域, 累积应变达  $15.3 \times 10^{-8}$ , 按照目前3年累计量计算, 假设该累计过程均匀, 则该区域最大剪应变率达到了约  $5.1 \times 10^{-8}/a$  的量级, 施甸—耿马一带也达到了  $4.5 \times 10^{-8}/a$ , 该结果与李延兴等(2003)计算得到的川滇西南最大剪应变率结果比较一致。另外一个活动最为突出的区域为昆明—通海一线, 最大剪应变率

达到了  $4.2 \times 10^{-8}/a$ 。川滇菱形块体中部的姚安、元谋、楚雄等地区剪应变比较弱, 表明这些区域变形较为微弱。

从图2b可以看到, 面膨胀所反映的特征与速度场的结果比较吻合, 云南地区存在3个主要的面积收缩区, 其中面积收缩最为突出的区域是在小江断裂带与红河断裂带的交汇地带, 3年累计面积收缩最大达  $-8.1 \times 10^{-8}$ , 这表明该区域受到了明显的挤压, 对比速度场图结果, 川滇菱形块体内部以东南向运动为主, 受到稳定的华南块体的阻挡, 在滇南地区存在明显的减速显现, 这是导致该区域出现持续面收缩的主要原因。第二个面积收缩的区域为滇西南地区, 即思茅、普洱一带, 该区域累计面积收缩达  $-2.5 \times 10^{-8}$ 。速度图显示, 滇南至滇西南区域运动速率存在由北向南速率逐渐递减的现象, 可能表明川滇菱形块体东部物质流的南向迁移受阻, 滇南至滇西南区域为主要的应变积累区, 应力作用主要通过变形吸收。最后一个面积收缩区域为小滇西以西地区, 由于该区域并无实际测点, 因此, 该变化主要由于腾冲、瑞丽等测点的西向运动造成, 其可信度较低, 不作重点考虑。

本文采用  $1^\circ \times 1^\circ$  的格网, 为进一步了解这两个主要的面积收缩区的面积变化特征, 笔者选取2011年1月4日为起点, 以1个月为窗长, 15天为步长, 滑动计算了这两个区域内的两个主要格网的面膨胀时间序列(图3), 其中20号格网反映了思茅、普洱一带区域的面膨胀变化特征, 23号格网反映了文山地区的面膨胀变化特征。

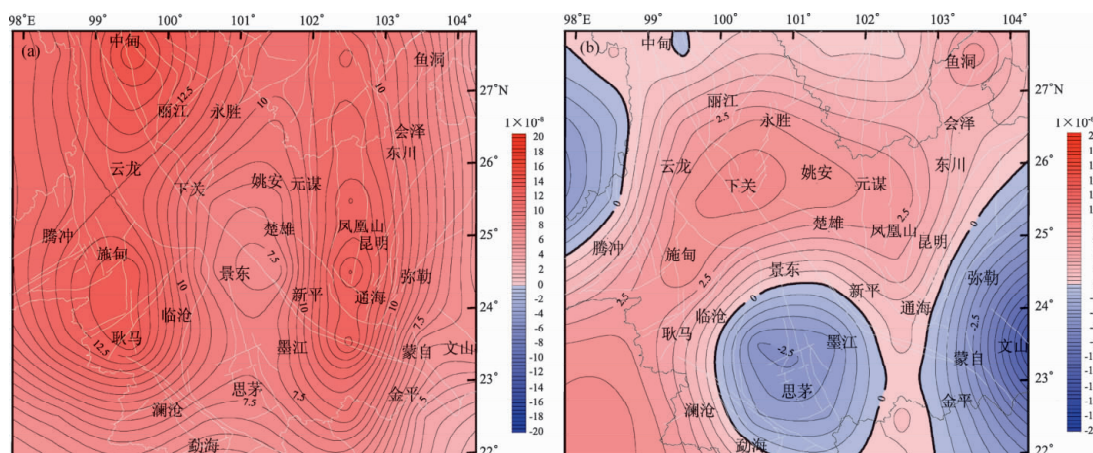


图2 云南地区最大剪应变 (a)、面膨胀 (b) 累计变化图 (2011-01 ~ 2014-01)

Fig. 2 The accumulated variation of maximum shear strain (a) and surface expansion (b) in Yunnan area (2011-01 ~ 2014-01)

从图3可以看到,云南地区出现面膨胀明显波动变化主要有3个时间点:缅甸7.2级地震前后曾出现明显波动,且主要影响区域为思茅、普洱一带,充分说明了该地震与云南地区强震活动构造相连、动力同源(皇甫岗等,2014),但该波动此后恢复,表明该地震并未实质性的改变云南地区的区域应变状态;第二次大幅波动发生在宁蒗、彝良地震前后,波动过程最为显著,曾造成较大区域内大幅度的面收缩变化,由于该现象在不同格网中均有表现,在此不一一列举,该现象表明这两次地震的发生是由同一应力异常过程所诱发(洪敏等,2012);最后一个时

间点位于德钦地震前后,该时间段内出现明显压缩加速特征,文山一带区域反映更加明显,结合速度场图,可能表明该时段内川滇菱形块体的运动速率有所加强,导致了中甸、文山一线变形加速,这种较强的地壳活动增强过程是德钦5.9级地震发生的主要原因。从面膨胀趋势特征看,文山一带的面膨胀存在一定的趋势性,面积收缩率达 $3.1 \times 10^{-8}/a$ 。而思茅一带区域近期出现膨胀特征,可能表明区域应变积累短期内得到一定的释放。

如果不经过程克里金插值,得到的文山地区的面膨胀特征如图4所示。

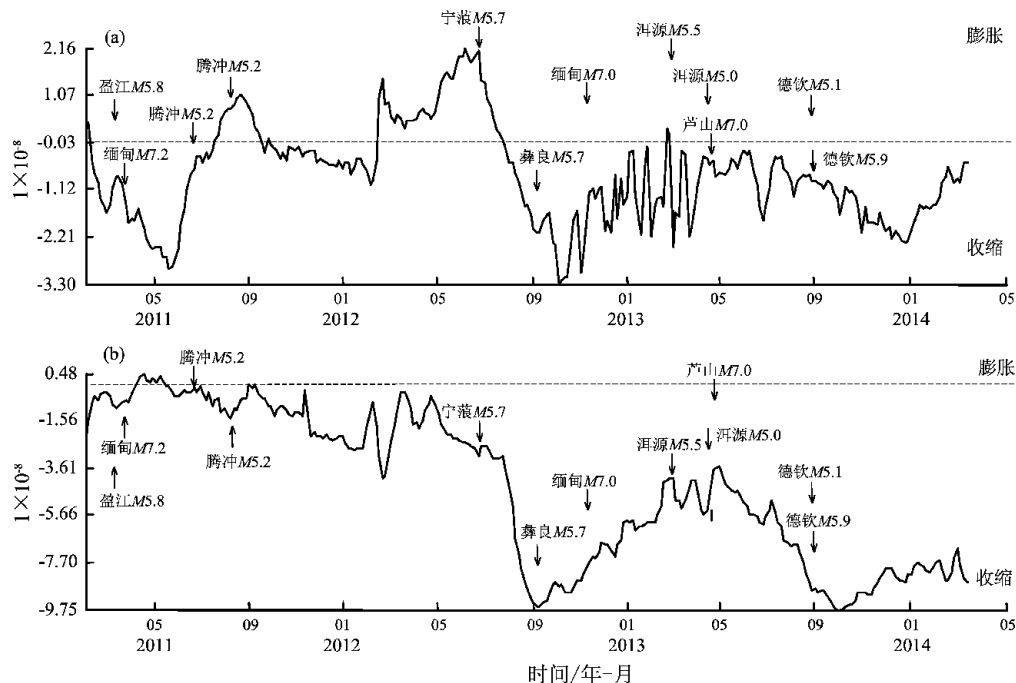


图3 20号格网(思茅、普洱一带)(a)、23号格网(文山地区)(b)区域面膨胀时间序列

Fig. 3 Surface expansion time series of Simao-Pu'er area in grid 20 (a) and Wenshan area in grid 23 (b)

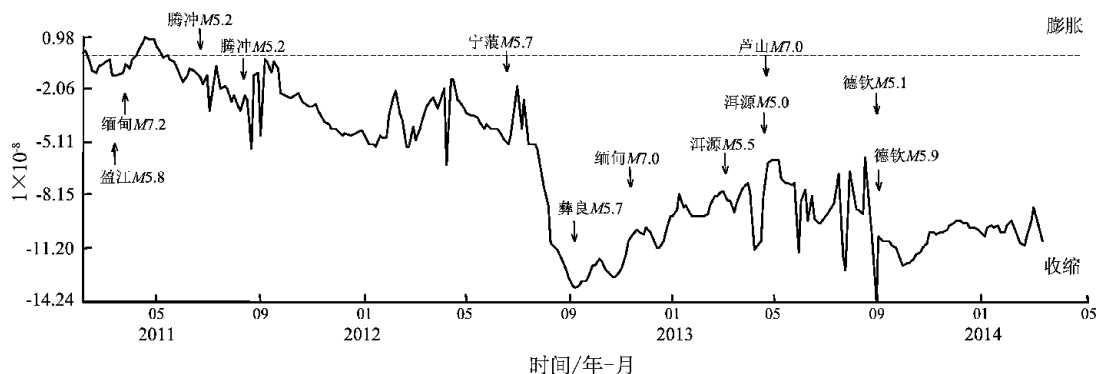


图4 未经克里金插值处理文山面膨胀时间序列

Fig. 4 The surface expansion time series in Wenshan area without Kriging interpolation method processing

从图中可以看出,该结果与图3中23号格网(文山地区)的结果总体趋势基本一致,但存在较多毛刺,主要由于参与计算的部分测点数据短期缺失造成。量值大小也存在一定差异,主要是后一处理方法中测点选取的主观性较强,测点选取不同也会造成结果出现差异。因此,克里金插值结果未造成原始形变信息的损失与失真,由于采用了线性无偏估计,使得计算结果更加合理,且减少了曲线毛刺,增加了异常识别能力。

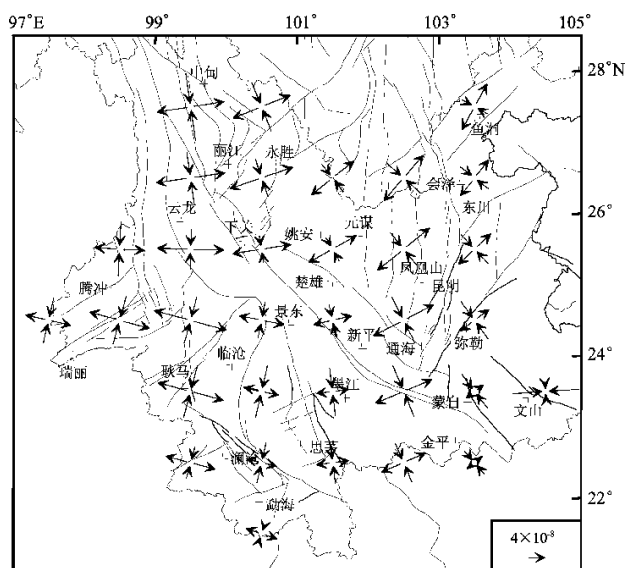


图5 云南地区主应变场(2011-01~2014-01)

Fig. 5 The main strain field of Yunnan area

图5中的主应变场结果与速度场(图1)显示的结果吻合,川滇菱形块体内部挤压方向主要为南东向,主压应变轴自北向南存在沿着阿萨姆结顺时针旋转的特征。近几年,云南地区的应变活动以东西向的张性活动为主,拉张比较剧烈的地区与最大剪应变活动最强的区域一致,中甸—耿马拉张区为近两年来地震活动的主体地区,2013年发生的洱源5.5级地震以及德钦的5.9级地震均为拉张型地震(据中国地震台网中心发布结果),其震源机制与该区域的形变活动特征存在较强的一致性。凤凰山—通海一带的拉张变化可能主要因小江断裂带的走滑运动造成,第一主应变率与第二主应变率与小江断裂呈45°夹角,且张应变明显大于挤压应变,显示断层活动以左旋剪切为主,该结果与沈正康等(2003)结果基本一致。区域内除滇南的文山蒙自一带以及思茅一带区域以压应变为主导外,其他区域主体表现为拉张主导,

可能表明来自青藏高原的推挤应力目前主要依靠东西向的物质迁移来吸收,南北向的迁移可能受到了阻碍,这与速度场及其他应变场参数所反映的结果一致。

### 3 结论与讨论

本文通过克里金插值求解应变场,使得应变场结果满足了协调性,且空间分布均匀,通过选取一定的时间窗长和步长,获得区域内高时空分辨率的应变场动态变化信息,可逐步应用于地震中短期预报的实践中。本文计算结果与部分其他学者所得到的结果具有较好的一致性,表明该计算结果比较可靠。通过对应变场图像的分析,认为云南地区区域地壳活动有如下特征:

(1) 云南地区最大剪应变变化速率存在西强东弱,北强南弱的特征,滇西北东条带活动强于滇东地区,活动最弱的为川滇菱形块体内部的滇中一带区域以及滇西南地区。

(2) 云南地区除滇南至滇西南一带区域外,其他区域主体活动以拉张为主,而挤压应变积累比张性活动弱,从面积变化特征看,滇南至滇西南地区以面积收缩为主,且在缅甸7.2级地震后仍然在持续。该现象可能两种原因:一是地震事件发生造成局部介质强度弱化,在区域应力作用下形成面收缩,对周边应变积累形成释放效应;二是由于能量释放通道受阻,存在明显应变积累。通过分析目前的形变特征,认为更加符合第二点,其主要理由是:缅甸7.2级地震震中距离最近的勐海测点超过100 km,且面收缩区距离震中较远,如果是介质松弛造成影响,面收缩区应主要位于震源区附近;从速度场图分析,澜沧、耿马测点的运动速率远低于其他测点,运动速率减速区主要位于滇南至滇西南地区,因此,认为该区域目前可能存在明显应变积累。

(3) 川滇菱形块体内部测点以东南向运动为主,且存在自北西向南东逐渐减速的特征,该运动方式可能是造成小江断裂带受到明显的挤压,滇西北东条带以张性活动为主的主要原因。同时,川滇菱形块体东边界自北向南运动速率也存在递减现象,可能表明目前东部地区物质流南向迁移运动受阻。

## 参考文献:

- 陈健,陶本藻. 1987. 大地形变测量学[M]. 北京:地震出版社.
- 陈小斌. 2007. 中国陆地现今水平形变状况及其驱动机制[J]. 中国科学,37(8):1056-1064.
- 段维波,吴云,陈慧杰. 2011. 利用 GPS 资料求解中国大陆应变场的新方法[J]. 大地测量与地球动力学, 31(增刊):72-76.
- 洪敏,邵德盛,李春光,等. 2012. 云南 GNSS 基准站连续观测资料应用研究[J]. 地震研究,35(4):535-539.
- 侯景儒,尹镇南,李维明,等. 1998. 实用地质统计学[M]. 北京:地质出版社.
- 皇甫岗,苏有锦,张建国,等. 2014. 新世纪滇缅交界大震活动研究[M]. 昆明:云南科技出版社.
- 赖锡安,黄立人,徐菊生. 2004. 中国大陆现今地壳运动[M]. 北京:地震出版社.
- 李延兴,杨国华,李智,等. 2003. 中国大陆活动地块的运动与应变状态[J]. 中国科学,33(增刊):65-81.
- 李玉江,陈连旺,李红,等. 2009. 云南地区构造应力应变场年变化特征的数值模拟[J]. 大地测量与地球动力学,29(2):13-18.
- 陆远忠,吴云,王伟,等. 2001. 地震中短期预报的动态图像方法[M]. 北京:地震出版社.
- 石耀霖,朱守彪. 2006. 用 GPS 位移资料计算应变方法的讨论[J]. 大地测量与地球动力学,26(1):1-8.
- 王伶俐,邵德盛,洪敏,等. 2012. 云南省 GNSS 基准站数据处理不同参考基准研究[J]. 地震研究,35(4):449-454.
- 武艳强,江在森,杨国华,等. 2009. 利用多面函数整体求解 GPS 应变场的方法及应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),34(9):1085-1089.
- 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):7-14.
- 朱守彪,蔡永恩,石耀霖. 2005. 青藏高原及邻区现今地应变率场的计算及其结果的地球动力学意义[J]. 地球物理学报,48(5):1053-1061.
- 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(Z1):93-100.

## Recent Tectonic Activity Features of Yunnan Region

HONG Min, ZHANG Yong, SHAO De-sheng, WANG Ling-li, WANG Yan

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

## Abstract

Based on the GNSS continuous observation data in Yunnan, we get the velocity field and strain parameters by the least square and Kriging interpolation methods etc. and obtain the characteristics of crustal movement in Yunnan since 2010. The result shows that the maximum rate of shear strain in north Yunnan is stronger than that in the south, and stronger in west Yunnan than that in the east. The maximum shear strain increased rapidly in Northwest Yunnan. The regional compressive strain accumulation is obvious in South and Southwest area, and the trend of it is not affected by the Myanmar  $M7.2$  earthquake in 2011.

**Key words:** crustal movement; velocity field; strain field; Kriging interpolation; Yunnan region