

利用 GPS 连续资料分析川滇地区的地壳变形特征^{*}

方 颖, 江在森, 邵志刚, 王武星, 张 晶

(中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要: 利用最小二乘配置、主成分分析、非线性回归等方法, 对 2010 年 5 月至 2013 年 5 月川滇地区 GPS 连续资料进行分析。结果表明, 川滇地区的地壳变形在此时间段呈整体比较稳定的准线性变化趋势, 没有出现明显的趋势转折现象; 川滇地区的变形速率分布很不均匀, 受活动断裂走向、倾向、活动性质的影响, 变形速率高值区主要集中在滑动速率比较大的断裂带两侧, 这些活动性断裂形成地壳变形速率的梯度带; 在小金河断裂南侧、石屏—建水断裂与小江带南段的西北侧、红河断裂与澜沧江断裂的西北段一带分布着一个典型的变形速率低值区, 且呈 NE/SW 走向的低速条带状分布。

关键词: 川滇地区; 变形速率; 地壳运动; 主成分分析

中图分类号: P315.725 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)02-0204-06

0 引言

川滇地区位于青藏高原东南缘, 构造活动非常剧烈, 一直是地学界研究的热点地区。近年来, 地质工作者在该区域开展大量研究工作。有学者利用 GPS 资料研究川滇地区重点断裂地壳运动的差异性及涡旋运动 (马宗晋等, 2001; 陈智梁等, 2006)。同时也开展了利用多种大地测量资料联合反演川滇地区地壳运动的研究 (丁开华, 许才军, 2009; 温扬茂, 许才军, 2009; 许才军等, 2010)。另一方面, 也开展了利用 GPS 资料做约束反演断层活动特性的一系列研究 (王阎昭等, 2008; 程佳等, 2011; 郭晓虎等, 2013), 以及川西地区垂直地壳运动的研究 (王庆良等, 2008)。也有学者利用 GPS 区域网资料研究了该区分的高分辨率地壳运动特征, 定量分析了该地区地壳运动强度和涡旋运动的特征 (方颖等, 2009)。但是, 迄今为止, 得到的川滇地区地壳运动与变形的认识, 大多是基于 GPS 区域网资料 (定期观测) 的研究, 而用 GPS 连续观测资料对川滇地区变形特征的研究方面, 仍缺乏较为详尽的描述。本文利用连续的 GPS 资料, 从时间序列和年变形率的角度, 分析滇中地区现时段的变形特征。

1 观测资料与分析方法

1.1 观测资料介绍

GPS 陆态网络 (李强等, 2012) 在川滇地区布设了较密集的 GPS 站点。本研究解算所得数据均是在 ITRF2005 (International Terrestrial Reference System 2005) 构架下的单日解, 坐标为武汉 01 包解算的 NEU 坐标系列。全国共有 253 个站点参与计算。选用从 2010 年 5 月至 2013 年 5 月, 共 3 年的陆态网 GPS 连续观测资料。本文在滇中地区选取了 23 个陆态网 GPS 连续站资料, 为了研究该区的变形特征, 在川滇地区共组成了 70 个三角形单元, 并计算了各个三角形的形状因子 (伍吉仓等, 2003), 形状因子的阈值取为: 0.1~0.36, 剔除不合格的三角形。值得注意的是: 鲜水河断裂带由于点位较少, 组成的三角形的形状因子不是很理想。分析剩余的 62 个三角形变形单元随时间的演化特征及空间的变形特征 (图 1)。为了减弱时间序列中受参考框架不稳定的影响, 本文首先对研究区内的站点进行了华南基准的转换 (江在森等, 2009)。

1.2 主成分分析法

主成分分析是保持尽可能多的信息变化量的

^{*} 收稿日期: 2013-09-02.

基金项目: GPS 连续观测研究中国大陆构造运动与变形 (201208006-03) 与“十二五”国家科技计划支撑项目 (2012BAK19B01-02, 2012BAK19B01-06) 联合资助。

情况下,对相互之间存在相关性的变量所组成的数集进行降维,从而得到互不相关的特征信号(主成分信号),即用较少维的主成分信号表征矩阵的动态变化。对于给定的时间序列: x_1, x_2, \dots, x_n , 选取嵌入维 m 和时间滞后 τ 对其进行时间空间重构,重构后的相空间中由点: $y_j = (x_j, x_{j+\tau}, x_{j+2\tau}, \dots, x_{j+(m-1)\tau})$ 所构成,由这些点向量构成了该时间序列的轨线矩阵 $X_{l \times m}$ 如下:

$$X_{l \times m} = \frac{1}{l^2} \begin{bmatrix} x_1 & x_{1+\tau} & \cdots & x_{1+(m-1)\tau} \\ x_2 & x_{2+\tau} & \cdots & x_{2+(m-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_l & x_{l+\tau} & \cdots & x_N \end{bmatrix}$$

其中, $l = N - (m-1)\tau$ 为相空间中点的个数。然后计算矩阵的协方差阵 A , $A_{m \times m} = \frac{1}{l} X^T X$, 计算 A 的特征值 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, m)$, 将这些特征值按从大到小排列, 即: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$; 将相应的特征向量排序, 得到最大方差贡献率的主成分。在已经导出的第 1 至第 m 个主成分, 只要满足: $\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m} \geq 85\% \sim 90\%$, 只需选头 m 个主成分, 就能反映全部变量 85% ~ 90% 以上的信息。

GPS 资料中包含了非常复杂的地球物理场信

息, 不仅含有构造运动信息, 也含有非构造运动信息, 如: 参考框架的影响、固体潮、海潮、大气负荷等地球物理效应带来的影响。在构造运动强烈(如大地震)的背景下, 地壳变形信息是 GPS 观测资料中的主要因素, 而其他的非构造信息是次要因素。把主成分分析方法应用于大范围地壳变形分析, 从 GPS 位移时间序列中提取地壳变形信息, 并把时空场进行分离, 为我们深入研究地壳变形的异常场(如: 昆仑山大地震对川滇地区的影响)及其时间变化过程提供新的技术途径。

首先, 由于仪器及其它因素的影响, 数据中存在奇异点, 为了剔除这些奇异点, 同时对数据序列中个别中断点进行推估插值, 本文采用最小二乘配置方法(江在森, 刘经南, 2010; 方颖等, 2010)对各个 GPS 站点的位移时间序列进行滤波和推估。其次, GPS 资料中包含了非常复杂的地球物理场信息, 不仅含有构造运动信息, 也含有非构造运动信息。而川滇地区强烈的构造运动, 使其地壳变形信息成为 GPS 观测资料中的主要因素。为此, 我们采用主成分分析方法(方颖等, 2008)对 GPS 时间序列进行分析, 分别把 GPS 时间序列

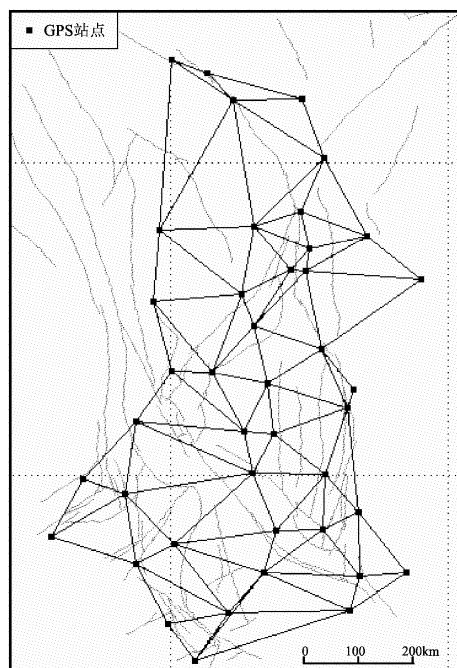


图1 三角形变形单元

Fig. 1 Triangle deformation unit

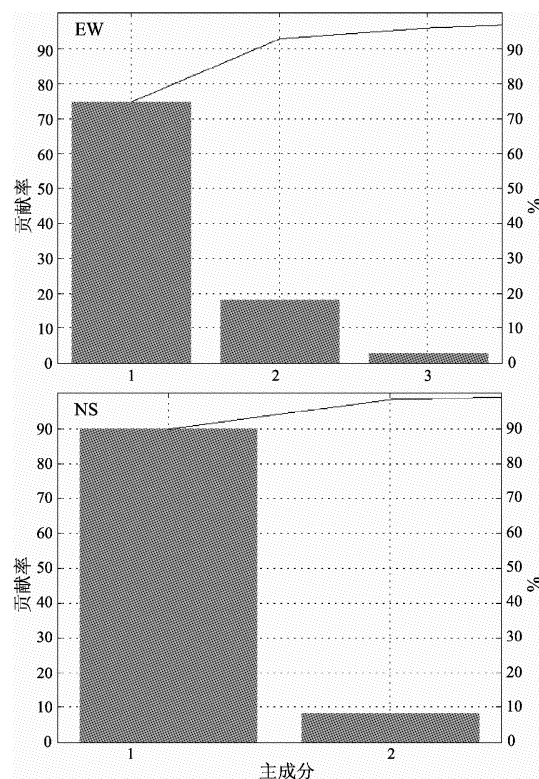


图2 时间序列主成分的方差贡献率

Fig. 2 The variance contribution rates of the principal component of time series

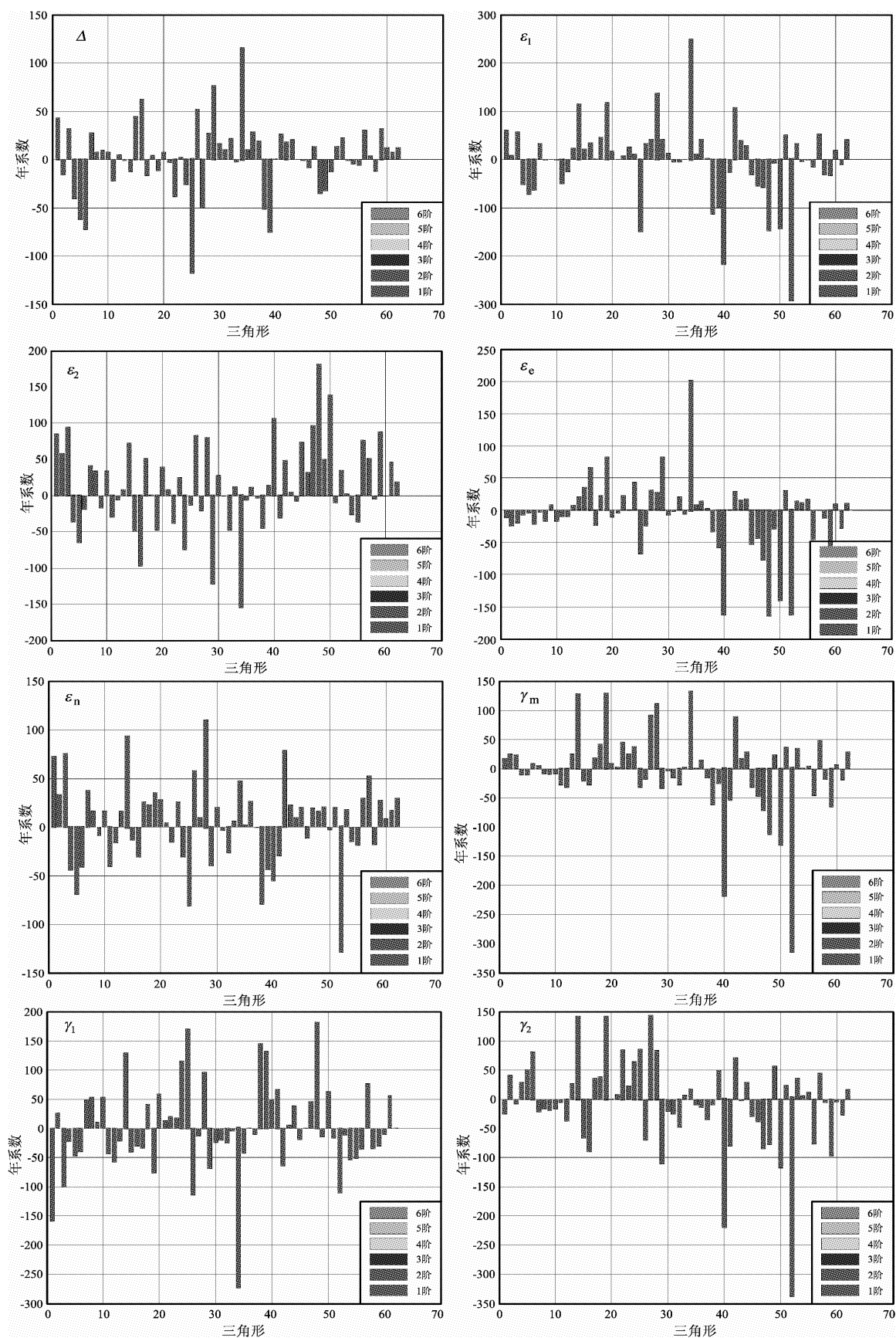


图3 三角形变形单元的回归系数

Fig. 3 The regression coefficients of triangular deformation unit

的东西分量、南北分量组成轨线矩阵 X , 然后计算矩阵的协方差阵 A , 计算矩阵 A 的特征值和累积方差贡献率。GPS 东西向位移时间序列第 1、第 2、第 3 主成分的方差贡献率为 97% 以上, 南北向位移时间序列第 1、第 2 主成分的方差贡献率为 99% 以上 (图 2)。

2 川滇地区变形特征的时间演化分析

通过上述分析, 我们用东西向分量的前 3 个主成分进行时间序列重构, 用南北分量的前 2 个主成分进行时间序列重构。用重构的时间序列计算各三角形单元的变形参数。共解算 8 个应变参数: 第一主应变 ε_1 、第二主应变 ε_2 、EW 向主应变 ε_e 、NS 向主应变 ε_n 、最大剪应变 γ_m 、第一剪应变 γ_1 、第二剪应变 γ_2 、面应变 Δ 。

为了分析各三角形应变参数的时间演化特点, 以时间 t (每年: /a) 为自变量, 以各应变参数为变量 ξ , 进行 6 次幂函数的非线性回归分析:

$$\xi = C_i + p_{i1}t + p_{i2}t^2 + p_{i3}t^3 + p_{i4}t^4 + p_{i5}t^5 + p_{i6}t^6. \quad (4)$$

其中, C_i 为三角形 i 的常数项, p_{i1} 、 p_{i2} 、 p_{i3} 、 p_{i4} 、 p_{i5} 、 p_{i6} 分别为三角形 i 的幂函数各阶系数。

1~6 阶系数的回归结果表明, 在 62 个三角形变形单元中, 8 个应变参数时间序列中, 1 阶系数 p_{i1} 是最大的, 而 2 阶系数 p_{i2} 很小, 通过分析统计得出: $p_{i1} \geq 100p_{i2}$ 。另外, p_{i3} 、 p_{i4} 、 p_{i5} 、 p_{i6} 都非常小 (≤ 0.0001) (图 3)。研究区所有三角形单元的 8 个应变参数时间序列都满足

$$\xi \approx C_i + p_{i1}t. \quad (5)$$

因此, 准线性变化过程反应了所有三角形单元变形随时间的变化特征。而 p_{i1} 反应了第 i 个三角形变形的年变化率。上述分析表明, 川滇地区 62 个三角形单元在 2010 年 5 月至 2013 年 5 月时间段的变形呈准线性变化是其主要特征。

3 川滇地区空间变形特征分析

提取各三角形的准线性变化系数 p_{i1} , 以各三角形的几何重心为基点, 以 p_{i1} 为长度单元, 画出川滇地区的年变形率, 其空间展布见图 4。

由于用三角形计算应变参数时, 没有剔除断

层滑动的影响, 因此在滑动速率较大的断裂带, 如: 小金河断裂、小江断裂、鲜水河断裂西北段、石屏—建水断裂、澜沧江断裂西南侧的南宁河西支断裂一带, 都表现出各自应变参数的高值区。

面应变的高值区分布在小金河断裂的东北段, 表现为挤压状态, 年速率达 $-13 \times 10^{-8}/a$, 与小金河断裂的左旋正断层性质有关; 小江断裂带中段处于持续膨胀的状态, 年速率达 $11 \times 10^{-8}/a$, 主要由小江断裂左旋走滑运动引起; 石屏—建水断裂也处于挤压高值区 ($-11 \times 10^{-8}/a$), 与其右旋逆走滑的活动性质密切相关。

剪应变的高值区分布与断裂带的剪切走滑性质有关。最大剪应变 γ_m 持续增强高值区主要集中在小金河断裂 ($20 \times 10^{-8}/a$)、小江断裂带的中北段 ($15 \times 10^{-8}/a$)、石屏—建水断裂 ($13 \times 10^{-8}/a$)、鲜水河断裂西北段 ($12 \times 10^{-8}/a$) 以及南宁河西支断裂一带 ($12 \times 10^{-8}/a$)。小金河北段 ($-13 \times 10^{-8}/a$) 为 γ_1 持续减弱高值区, 小江断裂带中段 ($11 \times 10^{-8}/a$) 为 γ_1 持续增强高值区。小江断裂带北段 ($19 \times 10^{-8}/a$)、石屏—建水断裂 ($15 \times 10^{-8}/a$)、小金河北段 ($15 \times 10^{-8}/a$) 为 γ_2 持续增强高值区。

主应变的高值区分布与断裂带的走向、滑动性质密切相关。鲜水河西北段 ($8 \times 10^{-8}/a$)、小江断裂带北段 ($10 \times 10^{-8}/a$)、小金河西南段 ($10 \times 10^{-8}/a$)、南宁河西支断裂 ($9 \times 10^{-8}/a$) 表现为 ε_1 的持续增强高值区。小金河断裂 ($-19 \times 10^{-8}/a$)、石屏—建水断裂 ($-14 \times 10^{-8}/a$) 表现为 ε_2 的持续减弱高值区。石屏—建水断裂与澜沧江断裂东南段之间的地区 ($-7 \times 10^{-8}/a$) 为 ε_n 的持续减弱的高值区, 鲜水河西北段 ($6 \times 10^{-8}/a$) 为 ε_n 的持续增强的高值区。小金河断裂北段 ($-15 \times 10^{-8}/a$) 为 ε_e 持续减弱的高值区, 小江带中段 ($9 \times 10^{-8}/a$) 为 ε_e 持续增强的高值区。

4 讨论与结论

(1) 本文研究只基于连续 3 年的 GPS 资料, 不能反映长期的地壳变形特征。但是在 2010 年 5 月至 2013 年 5 月时间段, 川滇地区的地壳变形呈整体比较稳定的准线性变化趋势, 没有出现明显的趋势转折现象。此现象表明在该时间段内, 该地区的运动变形相比之前的运动变形, 呈继承性

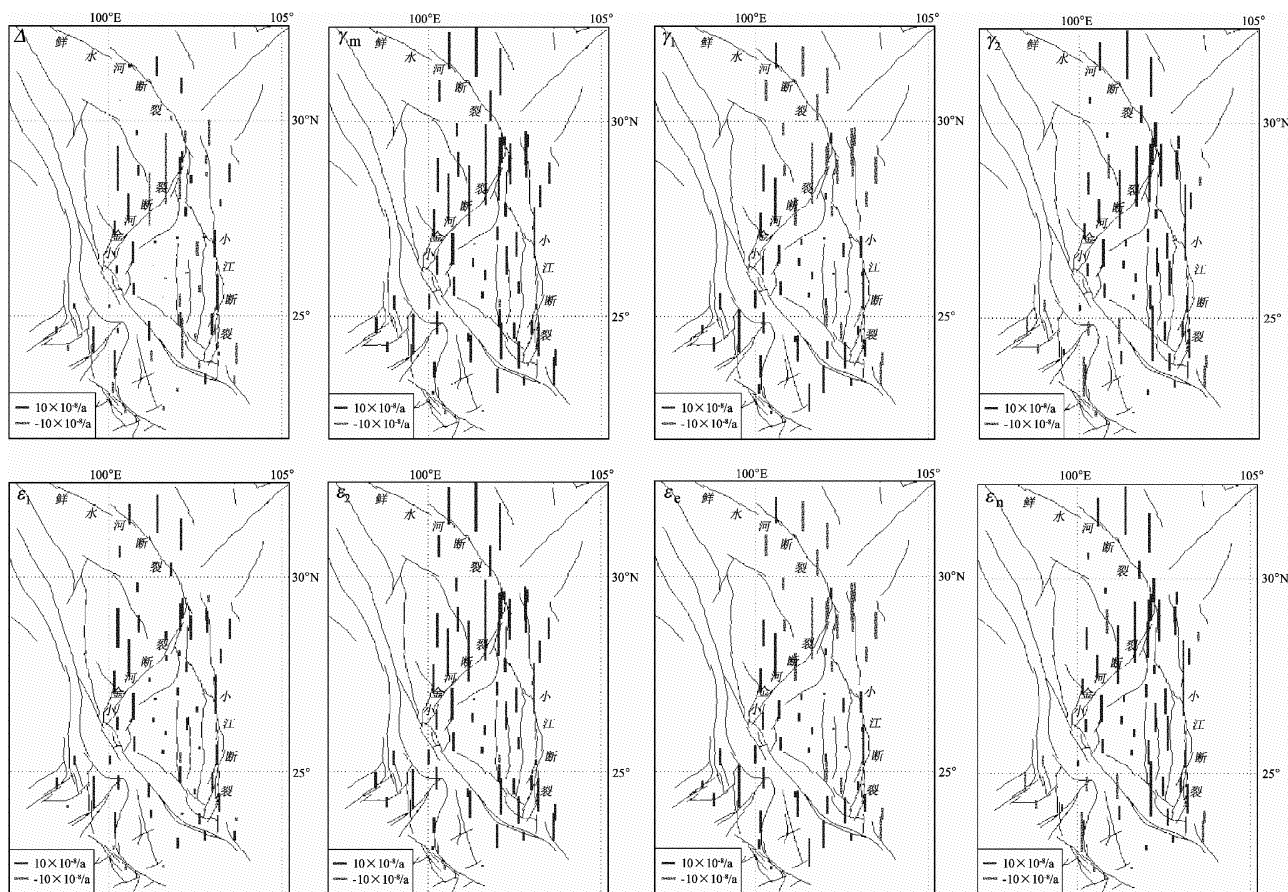


图4 川滇地区地壳变形的年变化率

Fig. 4 Annual variation rate of crustal deformation in Sichuan-Yunnan area

发展的特征,从趋势上没有出现新的变化。

(2) 川滇地区的年变形速率很不均匀,由于该地区分布着多条规模较大的走滑型断裂,从空间变形特征看,受活动断裂走向、倾向、活动性质的影响,年变形速率高值区主要集中在滑动速率比较大的断裂带两侧,如:小金河断裂、小江断裂、鲜水河断裂西北段、石屏—建水断裂、澜沧江断裂西南侧的南宁河西支断裂一带。这些活动性断裂形成地壳变形速率的梯度带。

(3) 从年变形速率的空间分布上看,无论是面应变、剪切变形还是主应变,都存在一个共同的特征:在小金河断裂南侧、石屏—建水断裂与小江断裂带南段的西北侧、红河断裂与澜沧江断裂的西北段分布着一个典型的变形速率低值区,一个呈 NE/SW 走向的低速条带。这个条带不仅包括块体内部,同时也包括多个断裂,如:安宁河断裂、则木河断裂、金河—箐河断裂、永胜—宾川断裂、南华—楚雄断裂、大庆—塔甸断裂、红河断裂西北段、澜沧江断裂西北段。该条带在此

时间段内的变形速率很小,保持平稳特征。

(4) 由于缺乏之前的 GPS 连续观测资料,我们无法判断 NE/SW 低变形速率条带在 2010 年以前是否存在?但是这个条带与川滇地区低 Q_{Lg} 区分布图像结果存在较好的一致性(马宏生等, 2007; 周连庆等, 2008)。这种地壳变形速率的空间分布格局可能与该区的地质构造环境、大地热流分布等密切相关。

参考文献:

- 陈智梁,刘宇平,唐文清,等. 2006. 青藏高原东北缘大陆岩石圈现今变形和位移[J]. 地质通报, 25(1): 20-28.
- 程佳,刘杰,甘卫军,等. 2011. 川滇菱形块体东边界各断层段强震演化特征研究[J]. 中国科学(D 辑), 41(9): 1311-1326.
- 丁开华,许才军. 2009. 川滇地区地壳应变场的 GPS 与地震矩张量联合反演研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 34(3): 265-268.
- 方颖,江在森,顾国华. 2008. 昆仑山 $M_s 8.1$ 地震对川滇地区地壳运动影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 28(4): 25-30.
- 方颖,江在森,顾国华. 2010. 汶川大地震前 GPS 时间序列的振荡分析[J]. 地震研究, 33(2): 125-130.

- 方颖,江在森,张晶,等.2009.青藏高原现今高分辨率地壳运动特征[J].地球科学:中国地质大学学报,3(3):399-404.
- 郭晓虎,魏东平,张克亮.2013.GPS约束下川滇地区主要断裂现今活动速率的估算方法[J].中国科学院研究生院学报,30(1):74-82.
- 江在森,方颖,武艳强.2009.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,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[J].地球物理学报,53(5):1109-1117.
- 李强,宁百齐,赵必强,等.2012.基于陆态网络GPS数据的电离层空间天气监测与研究[J].地球物理学报,55(7):2193-2202.
- 马宏生,汪素云,裴顺平,等.2007.川滇及周边地区地壳横波衰减的成像研究[J].地球物理学报,50(2):465-471.
- 马宗晋,陈鑫连,叶叔华,等.2001.中国大陆区现今地壳运动的GPS研究[J].科学通报,46(13):1118-1120.
- 王庆良,崔笃信,王文萍,等.2008.川西地区现今垂直地壳运动研究[J].中国科学(D辑),38(5):598-610.
- 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[J].中国科学(D辑),38(5):582-597.
- 温扬茂,许才军.2009.联合GPS与重力资料反演分析川滇地区现今地壳形变[J].武汉大学学报:信息科学版,34(5):568-572.
- 伍吉仓,邓康伟,陈永奇.2003.三角形形状因子对地壳形变计算精度的影响[J].大地测量与地球动力学,23(3):26-30.
- 许才军,林敦灵,温扬茂.2010.利用InSAR数据的汶川地震形变场提取及分析[J].武汉大学学报:信息科学版,35(10):1138-1142.
- 周连庆,赵翠萍,修济刚,等.2008.川滇地区Lg波Q值层析成像[J].地球物理学报,51(6):1745-1752.

Analysis on Crustal Deformation Characteristics in Sichuan-Yunnan Region with GPS Continuous Data

FANG Ying, JIANG Zai-sen, SHAO Zhi-gang, WANG Wu-xing, ZHANG Jing
(Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract

The GPS continuous data from May, 2010 to May, 2013 in Sichuan-Yunnan are analyzed by the least square configuration, principal component analysis and nonlinear regression methods. The result shows that the crustal deformation appeared the relative stable quasi linear variation trend and had no obvious trend turning change in Sichuan-Yunnan area. The distribution of deformation rate was uniform, which was affected by strikes, dips, and active characters of the active fault. The high values of deformation rate mainly focused on two sides of the fault with bigger slip rate, and the active faults formed the gradient belt of crustal deformation rate. A NE/SW strip of lower deformation rate was surrounded by south side of Xiaojinhe Fault, northeast side of Shiping-Jianshui Fault and south segment of Xiaojiang Fault and northwest segments of Honghe and Lancangjiang Faults.

Key words: Sichuan-Yunnan region; deformation rate; crustal movement; principal component analysis