

基于球面最小二乘配置的福建省地壳水平形变研究

吴啸龙¹ 杨志强¹ 党永超¹

1 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054

摘要: 利用 GPS 实测数据解算区域地壳应变率分布是现今地壳水平形变研究的一个重要手段。本文研究采用基于球坐标的最小二乘配置应变率计算公式, 结合 GPS 实测速度场解算福建省东南沿海及其邻近区域应变率场。结果显示, 福建东南沿海地壳形变主要受到来自印度板块与菲律宾板块对欧亚大陆的共同作用。区内主压应变率趋势强于主张应变率趋势。以九龙江断裂为界, 以北地区地壳形变特征较为一致, 断裂以南地区, 自北东向西南, 区域地壳形变逐渐变化, 呈现离散化、多样化的特征。

关键词: 球面最小二乘配置; GPS 速率场; 应变率场; 福建省东南沿海; 长乐-南澳断裂带

中图法分类号: P227; P315 文献标志码: A

随着空间大地测量观测技术的迅速发展, 以 GPS 为首的空间技术被广泛应用于在地壳应变率解算中。当前利用 GPS 速率场计算地应变率时存在一个普遍的误区, 即小区域内应变解算可以采用平面直角坐标近似。然而, 应变率本身代表着地面两点之间的距离相对变化量, 而非距离本身。石耀林等的研究认为^[1], 若基于平面坐标系解算地应变率场分布, 模型既无法描述径向位移变化产生的正应变, 也不能有效地改正高纬度地区的球面效应。同时, 在高斯平面上计算应变率, 投影变形势必会造成应变率模型系统误差。因此, 在利用 GPS 速率场计算地应变率分布时, 需要采用球面形式的应变率模型。

本文针对福建省东南沿海地区分布的 GPS 观测点密度过小且较为分散等现状, 采用球面形式最小二乘配置模型对其现今地壳运动应变率场特征进行分析^[2-5], 为进一步揭示福建省东南沿海地壳形变特征及深部动力机制提供参考。

1 基于球坐标的最小二乘配置应变率模型

最小二乘配置是基于最小二乘预估解析逼近已知线性泛函来最终确定一个函数的方法^[6-7]。其一般函数模型为:

$$V_{GPS} = G \Omega + K V_s + n \quad (1)$$

式中, V_{GPS} 为 GPS 水平实测速度 (或位移) 向量; Ω 为欧拉矢量参数; G 为 Ω 的系数矩阵, 是 V_{GPS} 中刚性运动的贡献; V_s 为观测速度扣除刚性旋转之后的剩余速度, 它既包含研究时空域内已观测点的信号, 也包含未观测点的信号; K 为一个长方形矩阵, 由左侧的 n 阶单位矩阵和右侧的 $(m-n)$ 阶零矩阵组成; n 为观测误差噪声向量。

基于区域地壳连续性形变假设, 高斯型函数的单调衰减特征可以较好地描述两点的距离协方差关系。其一般形式为:

$$C(d) = f(0)e^{-k^2 d^2} \quad (2)$$

式中, d 表示空间内任意两点之间距离; k 为模型常数; $f(0)$ 表示测点自身的方差。

应变率场是基于区域各部相对位移求解的。因此, 可直接利用最小二乘配置解的倾向参数部分 \hat{V}_s 来求解研究区域应变率场分布。

设研究区域有 m 个测点, 任意一点处相对位移形变场为 $V_s = [u_\lambda, v_\varphi]^T$ 。信号参数的最优估计量为:

$$\hat{V}_s = C_{u0} \bar{C}^{-1} (V_{GPS} - G\hat{\Omega}) \quad (3)$$

式(3)可以进一步写为:

$$\begin{bmatrix} u_\lambda \\ v_\varphi \end{bmatrix} = C_{u0} (C_{00} + C_m)^{-1} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = C_{u0} P \quad (4)$$

式中, $P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_{2m}]^T$ 。

设 GPS 速率场在同一点上的不同方向速率分量不相关, 则推估点与测点之间的协方差矩阵

收稿日期: 2013-12-02

项目来源: 福建省广义地质基金资助项目 (20100501)。

第一作者: 吴啸龙, 博士生, 主要从事中小尺度地壳形变监测研究。E-mail: 379831927@qq.com

为:

$$C_{u^0} = \begin{bmatrix} C(u, u_i) & 0 \\ 0 & C(v, v_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_\lambda = \sum_{i=1}^m f_{\lambda\lambda}(0) e^{-k^2 d_i^2} P_{2i-1} \\ v_\varphi = \sum_{i=1}^m f_{\varphi\varphi}(0) e^{-k^2 d_i^2} P_{2i} \end{cases} \quad (6)$$

代入式(4)可得:

进一步求解偏微分可得:

$$\frac{\partial u_\lambda}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^m \frac{-2k^2 d_i R \cos\varphi \cos\varphi_i \sin(\lambda - \lambda_i) f_{\lambda\lambda}(0) \cdot P_{2i-1}}{e^{k^2 d_i^2} \sqrt{1 - [\sin\varphi \sin\varphi_i + \cos\varphi \cos\varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i)]^2}}$$

$$\frac{\partial u_\lambda}{\partial \varphi} = \sum_{i=1}^m \frac{2k^2 d_i R \cdot f_{\lambda\lambda}(0) \cdot [\cos\varphi \sin\varphi_i - \sin\varphi \cos\varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i)] \cdot P_{2i-1}}{e^{k^2 d_i^2} \cdot \sqrt{1 - [\sin\varphi \sin\varphi_i + \cos\varphi \cos\varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i)]^2}}$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^m \frac{-2k^2 d_i R \cos\varphi \cos\varphi_i \sin(\lambda - \lambda_i) \cdot f_{\varphi\varphi}(0) \cdot P_{2i}}{e^{k^2 d_i^2} \cdot \sqrt{1 - [\sin\varphi \sin\varphi_i + \cos\varphi \cos\varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i)]^2}}$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} = \sum_{i=1}^m \frac{2k^2 d_i R \cdot f_{\varphi\varphi}(0) \cdot P_{2i} [\cos\varphi \sin\varphi_i - \sin\varphi \cos\varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i)]}{e^{k^2 d_i^2} \cdot \sqrt{1 - [\sin\varphi \sin\varphi_i + \cos\varphi \cos\varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i)]^2}}$$

基于弹性力学几何方程^[8],有:

$$\begin{cases} \epsilon_\varphi = \frac{1}{R+h} \cdot \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{u_h}{R+h} \\ \epsilon_\lambda = \frac{1}{(R+h)\cos\varphi} \cdot \frac{\partial u_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{u_\varphi}{R+h} \cdot \tan\varphi + \frac{u_h}{R+h} \\ \epsilon_{\lambda\varphi} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(R+h)\cos\varphi} \cdot \frac{\partial u_\varphi}{\partial \lambda} - \frac{u_\lambda}{R+h} \cdot \tan\varphi + \frac{1}{(R+h)} \cdot \frac{\partial u_\lambda}{\partial \varphi} \right] \end{cases} \quad (7)$$

由于本文主要研究地壳水平应变率分布,故计算时不考虑 u_h 、 h 对应变率变量的影响。

2 算例与分析

2.1 不同应变率计算方法对比

为了分析“球面效应”对研究区域不同模型应变率解算时产生的影响,在此选取模拟研究范围: $114^\circ\text{E} \sim 124^\circ\text{E}$, $22^\circ\text{N} \sim 28^\circ\text{N}$ 。按照式(8)、式(9)两式计算理论球面 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 相对位移场^[9],并带入式(7)中求解球面应变率的理论分布。分别采用两种模型结果与理论应变率分布的相关性系数,如表1所示。计算结果显示,对于研究区域应用球面形式最小二乘配置解算其应变率场的结果比平面形式更加可靠。

$$u_n = 11.5 \sin(3\lambda) \cos(5\varphi) + 10.5 \sin(5\lambda^2) \cos(4\varphi^2) - 4\lambda^2 + 6\varphi^2 + 2\lambda\varphi + 3\lambda - 5\varphi + \text{rand}() \quad (8)$$

$$u_e = 9.5 \sin(5\lambda) \cos(6\varphi) + 8.5 \sin(7\lambda^2) \cos(6\varphi^2) - 2\lambda^2 + 5\varphi^2 + 3\lambda\varphi + 5\lambda - 4\varphi + \text{rand}() \quad (9)$$

2.2 实际数据计算结果

图1所示为福建全省及其周边区域的1997~2001年间相对于欧亚板块的GPS观测结果^[10-11]。GPS速度场整体倾向东南且一致性较好,说明这一区域以地壳刚性转动为主。图2为研

表1 不同模型相关系数对比

Tab. 1 Comparison on Correlation Coefficients on Different Models

	ϵ_λ	ϵ_φ	$\epsilon_{\lambda\varphi}$
球面形式	0.976 6	0.929 4	0.952 9
平面形式	0.860 3	0.834 9	0.878 8

究区域 GPS 速率协方差函数统计结果。基于分布在研究区域内部的 GPS 实测速率场,利用最小二乘配置球面应变模型计算福建省东南沿海及其邻近海域地壳视应变率场分布,结果如图3~图5所示。

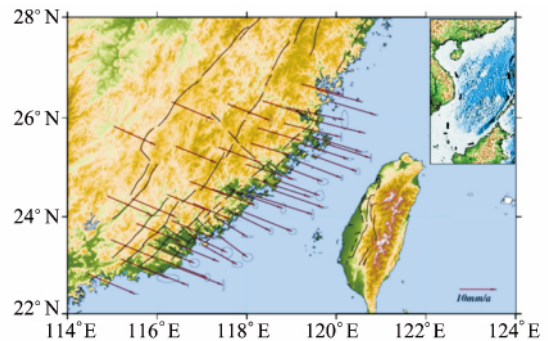


图1 福建东南沿海 GPS 速率场(相对于欧亚板块)
Fig. 1 GPS Velocity in Southeast Coast of Fujian Province

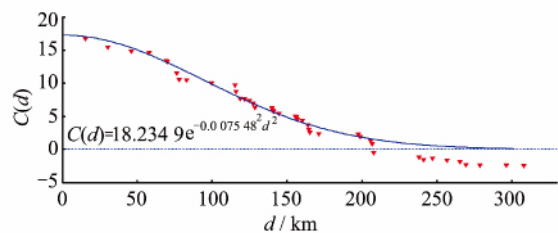


图2 研究区域 GPS 速率协方差函数统计结果
Fig. 2 Covariance Distribution Statistical Result on Study Area

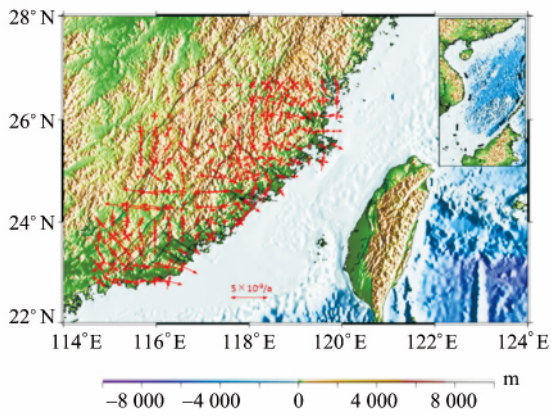


图 3 最大、最小主应变率分布

Fig. 3 Max and Min Strain Rate Distribution

图 3 为最大、最小应变率分布,图中近似平行的三组北西向断裂自北向南依次为闽江断裂、莆田-南日岛断裂以及九龙江中下游断裂。福建地区平均应变值约为 $4.4476 \times 10^{-10} / a$ 。应变率分布受断裂带控制作用显著,总体上应变率分布优势方向为 NWW(NW)-SEE(SE),主压应变强于主张应变。在各北西向断裂带与长乐-南澳断裂带的交汇处,主张应变率均显著增强,且成为区域地壳的主应变趋势。在 NW 与 NE 向断裂的交汇处发育有一系列的断陷盆地、平原及海湾,且各盆地主轴线走向 NW^[12~14],说明这一区的地形变主控构造为 NW 向断裂带,且活动性以拉张为主。

图 4 为地壳面膨胀分布,研究区域地壳引张最为剧烈的区域位于漳州西北侧的九龙江断裂与长乐-南澳断裂带交汇区域,约为 $2.90 \times 10^{-8} / a$ 。在长乐-南澳断裂带的最南段,地壳压缩率达到最大值 $3.89 \times 10^{-8} / a$ 。总体上,研究区域地壳压缩梯度带近北东平行于海岸线呈条带状分布。在长乐-南澳断裂与北西向断裂的交汇区域出现离散化的局部引张。局部扩张作用几乎错断了压缩梯度带。形成了沿海岸线分布的地壳扩张-压缩交替带。这一类地区地壳受力不均且变化较大,应该是中、长期地震预报工作的重点考虑区域。2013 年 1 月 22 日在广东省河源市发生的 4.8 级地震就位于面膨胀值分布的地壳压缩梯度带边缘处(见图中红色十字)。图 5 所示的剪应变率相对较弱,近似呈 NE-SW 的条带状分布。这与长乐-南澳断裂带第四纪呈现出的左旋压扭性特征较为一致^[15]。峰值出现在长乐-南澳断裂带与九龙江断裂带的交汇地区,约为 $8.99 \times 10^{-8} / a$ 。

综上所述,以往对于该区域的地壳形变特征的研究成果认为,区域地壳形变存在东强西弱,南强北弱的总体特征。本文研究以漳州盆地及九龙

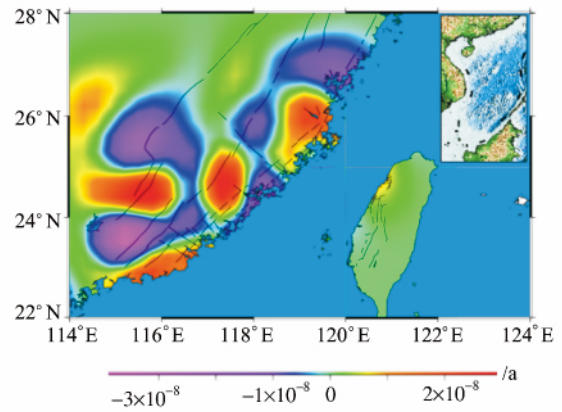


图 4 面膨胀分布

Fig. 4 Surface Inflation Rate

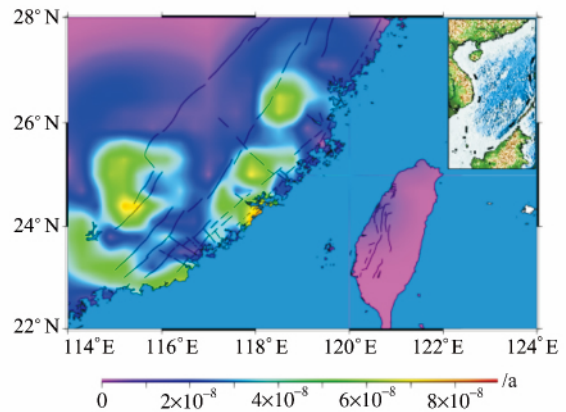


图 5 最大剪应变分布

Fig. 5 Maximum Shear Strain Distribution

江中下游断裂为界,可以将研究区域地壳水平形变分为两个小区。九龙江断裂以北的沿海地区,地壳水平形变特征较为一致,基本符合南强北弱、东强西弱的特点,长乐-南澳断裂带各部分活动性十分相似^[16]。九龙江断裂以南,地壳应力场主方向发生偏转,地壳的挤压状态逐渐占优,地壳形变场梯度带在这里交替出现,且自北东向南西地壳形变特征逐渐复杂化。

3 结 语

本文基于最小二乘配置模型研究采用了球面形式的应变率场计算表达式。以此为基础计算并分析了福建省沿海区域地壳 GPS 应变率状态特征。根据本文所作的工作,可以得出以下几点结论。

- 1) 福建省地壳在印度板块、菲律宾板块的联合作用下地壳整体倾向南东。长乐-南澳断裂带对研究区域地壳形变的控制作用十分显著。以该断裂带为核心的区域地壳构造活动无论在驱动力源还是受力形式上都比较复杂。

2) 最大、最小应变率场显示出研究区域地壳形变主要受到来自菲律宾板块在台湾东侧对欧亚板块俯冲挤压所产生的近北西西向应力场的控制。主应变方向自北向南“扇形”打开,在福建省北部为 N-NW 向,向南逐渐变为 E-W 向。

3) 面膨胀值的空间分布变化趋势可能来自于菲律宾块体和欧亚板块之间 N-W 向推挤和 N-W 向断裂的张性活动共同作用的结果。福建省东南沿海地壳形变总体上具有南强北弱、东强西弱的特征,这与发震构造和地震活动规律一致。研究区域剪应变普遍较小,且近北东向展布。

4) 在利用高斯公式建立经验方差函数进行大范围应变特征计算时,需要综合利用地质-地球物理资料对区域块体不连续边界进行区分,并以此进行分片拟合。

参 考 文 献

- [1] Shi Yaolin, Zhu Shoubiao. Discussion on Method of Calculating Strain With GPS Displacement Data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2006, 26(1):1-8(石耀林, 朱守彪. 用 GPS 位移资料计算应变的方法的讨论[J]. 大地测量学与地球动力学, 2006, 26(1):1-8)
- [2] Huang Qingtuan, Fu Ping, Zheng Shaopeng. Fujian Southeast Coastal Geomorphic Surfaces Under 50 m and Fracture Activity [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(3):578-596 (黄卿团, 付萍, 郑韶鹏. 福建东南沿海 50m 以下的地貌面与断裂活动性 [J]. 地震地质, 2007, 29(3):578-596)
- [3] Lin Jinhua. The Active Features and Inheriting Activity of Changle-Zhaoan Fault Zone [J]. *South China Journal of Seismology*, 1999, 19(2):57-61(林锦华. 长乐-诏安断裂带活动特征与继承性活动 [J]. 华南地震, 1999, 19(2):57-61)
- [4] Zhang Peizhen, Wang Qi, Ma Zongjin. GPS Velocity Field and Active Crustal Blocks of Contemporary Tectonic Deformation in Continental China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2):430-438
- [5] Shen Zhengkang, Zhao Chengkun, Yin An, et al. Contemporary Crustal Deformation in East Asia Constrained by Global Positioning System Measurement [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105:5 721-5 734
- [6] Wang Leyang, Xu Caijun. Progress in Total Least Squares [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 850-856(王乐洋, 许才军. 总体最小二乘研究进展 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(7):850-856)
- [7] Liu Jingnan, Zeng Wenxian, Xu Peiliang. Overview of Total Least Squares Methods [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5):505-512(刘经南, 曾文宪, 徐培亮. 整体最小二乘估计的研究进展 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(5):505-512)
- [8] Xu Caijun, Shen Wenbin, Chao Dingbo. Geophysical Geodesy Principles and Methods [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006(许才军, 申文斌, 晁定波. 地球物理大地测量学原理与方法 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 2006)
- [9] Jiang Zaisen, Liu Jingnan. The Method in Establishing Strain Field and Velocity Field of Crustal Movement Using Least Squares Collocation [J]. *Chinese J Geophys*, 2010, 53(5):1 109-1 117(江在森, 刘经南. 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, 2010, 53(5): 1 109-1 117)
- [10] Liu Zhiping, Zhang Shubi. Variance-covariance Component Estimation Method Based on Generalization Adjustment Factor [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 925-929(刘志平, 张书毕. 方差-协方差分量估计的概括平差因子法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(8):925-929)
- [11] Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, Yang Guohua, et al. The Application and Method of GPS Strain Calculation in Whole Mode Using Collocation in Sphere Surface [J]. *Chinese J Geophys*, 2009, 52(7):1 707-1 714(武艳强, 江在森, 杨国华等. 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 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(7):1 707-1 714)
- [12] Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, Yang Guohua, et al. Research on Method for Entire Calculation of GPS Strain Field by Using Spherical Harmonic Function [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(6): 68-73(武艳强, 江在森, 杨国华, 等. 用球谐函数整体解算 GPS 应变场方法研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(6): 68-73)
- [13] Wang Qi, Zhang Peizhen, Ma Zongjin. GPS Database and Velocity Field of Contemporary Tectonic Deformation in Continental China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 415-429(王琪, 张培震, 马宗晋. 中国大陆现今构造变形 GPS 观测数据与速率场 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2):415-429)
- [14] Lai Xi'an, Huang Liren, Xu Jusheng. Present-Day Crustal Movement in China Constrained [M]. Beijing: Earthquake Press, 2004(赖锡安, 黄立人, 徐菊生. 中国大陆现今地壳运动 [M]. 北京:地震出版社, 2004)
- [15] Savage J C. A Dislocation Model Of Strain Accumulation and Release at a Subduction Zone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88(B6):4 984-4 996

- [16] Wu Shaozu, Ding Xueren, Li Zuning, et al. Present-Day Crustal Movement Characteristics Research of Fujian Area[J]. *South China Journal of Seismology*, 2005, 25(3):87-94(吴绍祖, 丁学仁, 李祖宁, 等. 福建地区现今地壳运动变化特征研究[J]. 华南地震, 2005, 25(3):87-94)
- [17] Shi Linhua. Fujian and Area in the Present-Day Crustal Movement and Deformation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(3):69-74(史琳华. 福建及临区现今地壳运动与形变[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3):69-74)
- [18] Lin Songjian, Ding Xueren, Chen Weiwei, et al. Study of Fujian Focal Mechanism Solution and the Modern Tectonic Stress Field[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(5):27-32(林松建, 丁学仁, 陈为伟, 等. 福建地区震源机制解与现代构造应力场研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(5):27-32)
- [19] Zhou Shuoyu, Wu Yun, Qin Xiaojun, et al. Based on a Variety of GPS Data Research in Fujian Province and Its Adjacent Sea Area During 1994~1997 Horizontal Crust Movement [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(4):471-479(周硕愚, 吴云, 秦小军, 等. 基于多种 GPS 数据研究福建及其邻近海域 1994~1997 年地壳水平运动[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4):471-479)
- [20] Diao Faqi, Xiong Xiong. Interpolation Approach for Velocity Field of Crustal Movement[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(6):627-630(刁法启, 熊熊. 地壳运动速度场插值方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(6):627-630)
- [21] Ding Kaihua, Xu Caijun. Current Crustal Strain Field in the Sichuan-Yunnan Area by Joint Inversion of GPS and Seismic Moment Tensor[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(3):265-268(丁开华, 许才军. 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, 2009, 34(3):265-268)
- [22] Gu Guohua, Wang Wuxing, Meng Guojie, et al. Crustal Movements Before and After the Wenchuan Earthquake as Detected by GPS Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11):1 336-1 339(顾国华, 王武星, 孟国杰, 等. GPS 测得的汶川大地震前后的地壳运动[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11):1 336-1 339)
- [23] Ding Kaihua, Xu Caijun, Zou Rong, et al. Crustal Movement and Strain Model of Active Blocks Analyzed by GPS in Sichuan-Yunnan Region[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7):822-827(丁开华, 许才军, 邹蓉, 等. 利用 GPS 分析川滇地区活动地块运动与应变模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(7):822-827)
- [24] Zeng Anmin, Qin Xianping, Liu Guangming, et al. Hardy Multi-quadric Fitting Model of Chinese Mainland Horizontal Crustal Movement[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4):394-398(曾安敏, 秦显平, 刘光明, 等. 中国大陆水平运动速度场的多面函数模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(4):394-398)

Study on Horizontal Crustal Deformation in Fujian Province Using Spherical Least Square Collocation

WU Xiaolong¹ YANG Zhiqiang¹ DANG Yongchao¹

¹ School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Calculating strain field distribution with GPS measurement data has been an important mean to study the present-day crustal horizontal deformation. A series equations of the strain-field calculation based on spherical standard are deduced in this paper. Then calculate the GPS strain field in Fujian province using the equations. The result shows that the crustal deformation of the study area mainly affect by India plate and Philippine plate. Regional compressive strain rate is stronger than its tensile strain rate. Separated by Jiulong river fault zone, the northern crustal deformation trends have similar characteristics and the southern part of the regional crust has diverse characteristics from N-E to S-W.

Key words: spherical least-squares collocation; GPS velocity; strain field; the southeast coast of Fujian province; chang'le-nan'ao fault zone

First author: WU Xiaolong, PhD candidate, specializes in the GPS monitoring and analysis on crustal deformation of meso-scale and micro-scale. E-mail: 379831927@qq.com

Foundation support: The Generalized Geological Project of Fujian Province, No. 20100501.