

DOI:10.13203/j.whugis20170081



文章编号:1671-8860(2019)02-0240-06

# 欧亚大陆东南缘弧-陆碰撞带现今地壳 水平变形特征研究

吴啸龙<sup>1,2</sup> 杨志强<sup>2</sup> 龚云<sup>1</sup>

1 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西 西安,710054

2 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

**摘要:**在收集中国福建省、台湾省及菲律宾吕宋岛现有 GPS 观测成果的基础上,统一归算了欧亚大陆东南缘弧-陆碰撞带现今地壳水平运动速度场。针对该区域超过 1 000 km 的超长跨度,建立了基于椭球坐标的最小二乘配置模型,计算了弧-陆碰撞带 GPS 应变分布。结果显示,研究区域地壳变形在中国台湾岛最强,菲律宾吕宋次之,中国福建省最弱。菲律宾海板块在中国台湾岛东侧与欧亚大陆被动型大陆边缘的陆缘构造楔强烈碰撞,在台湾岛内通过中央山脉的隆起、逆冲推覆以及西南部地壳的构造逃逸等形式被剧烈消耗。中国台湾地壳变形特征与中国台湾东侧菲律宾海板块的构造形态变化密切相关,而菲律宾吕宋的地壳形变则以菲律宾大断裂及其分支构造的相对滑动为主。

**关键词:**弧-陆碰撞带;欧亚大陆板块;菲律宾海板块;GPS 应变场;吕宋火山弧

**中图分类号:**P223

**文献标志码:**A

汇聚型板块边界的构造演化进程、动力学机理及火山、地震活动是现今地学研究的热点。西太平洋构造域发育着全球最为丰富、规模最为宏大的汇聚型板块边界带。菲律宾海板块毗邻中国大陆东部边缘,属于太平洋板块二级构造单元。菲律宾海板块相对于欧亚大陆板块沿 NW(305°~310°)方向,以 70 km/Ma 的速度推动位于其变形前缘的吕宋火山弧与欧亚大陆板块被动型大陆边缘发生弧-陆碰撞,极大地影响了中国大陆现今的地壳变形进程。特殊的构造位置使得该弧-陆碰撞带成为西太平洋构造域典型的强震多发地带。

本文研究区域是长度超过 1 000 km 的条带状板块边界带,其各处已经建成多个独立的 GPS 监测网,并取得了大量研究成果。文献[1]最早利用 GPS 监测结果定量分析了欧亚大陆板块与吕宋岛弧之间的相对运动,发现二者汇聚速率自北向南由 80 mm/a 增大至 86 mm/a。文献[2]则根据 GPS 观测结果研究了吕宋岛-菲律宾群岛地区现今地壳形变特征,发现菲律宾大断裂的剪切活动具有明显的分段性。尽管中国福建省、台湾省及菲律宾吕宋等地各自建有高精度 GPS 网,但

是目前整个板块边界带仍未有统一的 GPS 联测,缺乏对整个板块边界带地壳形变特征的整体研究。

近年来,利用 GPS 观测数据计算地应变率在大陆动力学研究中发挥着十分重要的作用<sup>[3-4]</sup>。GPS 应变场关注的是测站之间相对变化信息,能够客观、全面地描述区域地壳岩石圈表面相对变形特征及强度分布。由于应变场本身反映的是地面离散点位之间的相对变化信息,因此在应变计算时,不同的几何模型造成对应点位置误差就会不可避免地引入系统误差<sup>[5-6]</sup>。随着空间大地测量技术的不断发展,GPS 观测得到的地壳水平形变速度场的精度在不断提高,相应结构更加严密的 GPS 应变分析模型的推导将有助于构建更加精密的地壳运动模型。尤其是在研究范围广、跨度长的情况下,有必要选取更加逼近真实地球几何形状模型。本文通过收集整理中国福建省、台湾省及菲律宾吕宋岛现有的 GPS 地壳形变监测成果,整体归算并获得了研究区域统一参考基准的 GPS 速度场。考虑到研究区域是跨度超过 1 000 km 的低纬度板块边界带,各处的 GPS 观测站疏密不均,本文基于椭球面坐标的最小二乘配置模型计算了该区域整体 GPS 应变分

收稿日期:2017-11-07

项目资助:国家自然科学基金(51674195);西安科技大学博士(后)启动基金(2016QDJ049)。

第一作者:吴啸龙,博士,讲师,主要从事基于大地测量技术的地壳形变监测分析研究。xlong\_wu@126.com

布,分析了欧亚板块-菲律宾海板块汇聚的强应力环境下,板块边界现今的地壳水平形变特征及动力学机理。

## 1 GPS 速度场参考框架的统一

本文收集的 GPS 观测资料主要来自 3 个方面:①中国陆态网在福建地区 2009、2011、2013 年 3 期的观测成果;②中国台湾地震科学研究中心发布的台湾岛 ITRF2000 参考框架下的 GPS 速度场;③美国加州大学 Peter Bird 给出的吕宋岛-菲律宾群岛地区相对于稳定欧亚板块的 GPS 速度场。首先采用 GAMIT&GLOBK 软件解算福建网 GPS 数据,获得相对于 ITRF2008 参考框架的 GPS 速度场。其次,按以下步骤实现 GPS 速度场的整体归算:

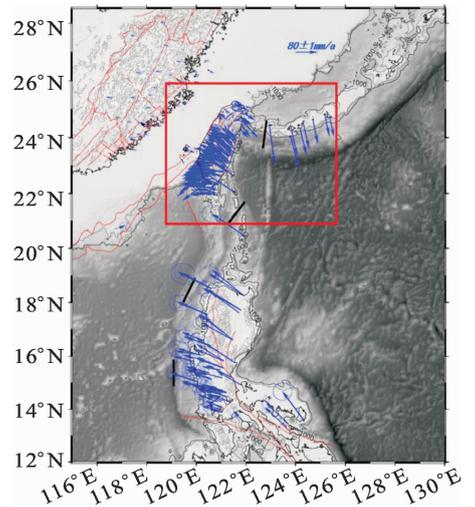
1)统一参考框架<sup>[7]</sup>。在不考虑高程变化的影响时,不同的 GPS 观测网络及其参考框架之间满足欧拉矢量叠加原理。根据不同参考框架的 GPS 速度场之间的一组公共点,本文利用最小二乘法求解欧拉旋转参数,统一各区域 GPS 速度场参考框架:①以福建网 GPS 速度场的 ITRF2008 参考框架为基准,利用文献[7]与福建网(ITRF2008)公共点,将文献[7]的 GPS 速度场归算到基准参考框架;②利用文献[7]与台湾网(ITRF2000)的公共点,将台湾网 GPS 速度场归算到基准参考框架;③按照 NNR-NUVEL1A 模型计算中国福建省与台湾省整体相对于欧亚板块的 GPS 速度场;④不同 GPS 速度场参考框架即便相同,但是由于数据时段不同、数据处理软件及策略不同,其 GPS 速度场仍会带有系统性偏差,需要进行统一归算。利用文献[7]与吕宋 GPS 速度场(相对于欧亚板块)的公共点,将吕宋网 GPS 速度场与③所得 GPS 速度场进行归算,最终获得中国福建省、台湾省及菲律宾吕宋岛三地统一的 GPS 速度场(相对于欧亚板块)。

2)速度场误差再分析。各测站速度的名义误差可能会导致对真实速度误差的低估,其原因在于速度场的统一归算时只考虑了白噪声,而没有考虑与时间相关的噪声。为了保守估计,本文在完成 GPS 速度场的统一归算后,采用文献[8-9]给出的方法重新估算了各测站的误差。

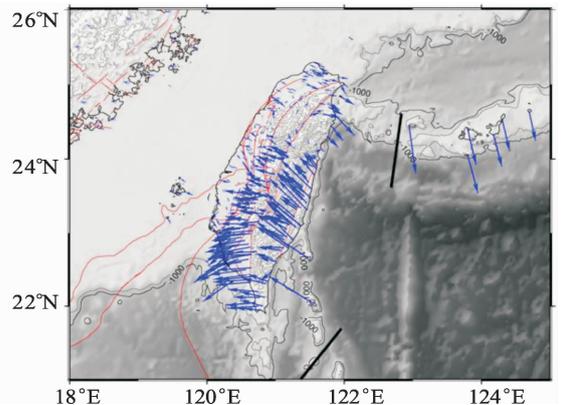
## 2 地壳水平运动速度场分析

图 1 为弧-陆碰撞带相对于稳定欧亚板块的

GPS 速度场。可以看出研究区域 GPS 速度场与板块汇聚方向基本一致。其中,台湾岛是整个弧-陆碰撞带地壳水平形变最复杂的区域。大致以  $24^{\circ}\text{N}$  为界,以北地区 GPS 速度场与福建一致指向东南,自西向东逐渐增强,并在冲绳海槽内发生顺时针旋转,由 SE 方向旋转至  $\text{S}10^{\circ}\text{E}$  方向,速率值增大至  $70\text{ mm/a}$ 。 $24^{\circ}\text{N}$  以南中央山脉隆起区及其东部沿海到本哈姆海台西侧, GPS 速度场整体指向 NW,且自北向南逐渐增强,直至跨过本哈姆海台才发生衰减与逆时针旋转变化的。此外,台湾岛西南部地壳的 GPS 速度场存在明显的逆时针旋转趋势,反映了台湾岛西南部地壳的构造逃逸趋势。东西方向,来自于欧亚板块 SE 向水平运动分量向西跨过台湾海峡一直延伸至台湾岛内西部麓山带,并由 SE 方向转换为 NW 方向。吕宋岛-菲律宾群岛地区的 GPS 速度场并无类似东西向差异变化。



(a)弧-陆碰撞带 GPS 速度场



(b)台湾岛 GPS 速度场

图 1 研究区域相对稳定欧亚板块的 GPS 速度场  
Fig. 1 GPS Velocities Relative to Stable Eurasian Plate

研究区域南北方向跨过  $24^{\circ}\text{N}$ ,GPS 速度矢量存在如此显著变化的原因是菲律宾海板块在台湾

岛东侧的俯冲形态发生了改变。基于在台湾岛东部近海的震源资料研究发现菲律宾海板块北向冲在 24°N 处向地壳深部发生倾折弯曲<sup>[10]</sup>, 导致该板块对欧亚大陆板块 SE 向水平运动的阻碍作用大幅减弱, 造成该区域 GPS 速度场相对于华南板块的运动方向未发生改变。南部的中国南海次级板块沿马尼拉海沟俯冲, 未对菲律宾海板块的 NW 向运动产生强烈的碰撞阻挡作用<sup>[11]</sup>, 因此恒春半岛向南至吕宋岛-菲律宾群岛地区的 GPS 速度场所示的地壳水平形变趋势基本一致, 且空间变化相对连续。吕宋岛内的水平运动方位角约为北向西 290°。自西向东跨过菲律宾大断裂, GPS 速度场由 44~59 mm/a 增大为 59~79 mm/a, 表明菲律宾大断裂现今强烈的左旋走滑活动。吕宋岛内菲律宾大断裂至锡布延断裂之间的 GPS 速度场显著小于菲律宾大断裂以北区域, 表明该区域受菲律宾海板块西向俯冲而产生的逆冲推覆变形过程受阻。本哈姆海台在菲律宾海板块的持续推动下挤压并楔入吕宋岛弧东侧, 并在 15°N~16°N 之间形成了近乎直角的凹陷构造。而岛弧西侧边缘的地貌几何形态近似南北成线性分布, 没有出现明显的弯曲变形。其原因与南海海盆的古洋脊以及巴拉望海脊共同的阻挡作用密切相关。

### 3 地壳应变率场

#### 3.1 GPS 应变率计算模型

最小二乘配置是基于信号向量之间的协方差关系, 采用最小二乘预估公式由已知信号估计未知信号的一种模型:

$$\hat{\mathbf{V}}_{\text{GPS}} = \mathbf{G}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{K}\mathbf{V}_s + \boldsymbol{\Delta} \quad (1)$$

地壳运动除了具有整体趋势外, 还具有十分复杂的局部变化特征, 因此将块体欧拉矢量作为地壳运动的趋势项(倾向  $\boldsymbol{\Omega}$ ), 将局部变化信息作为信号项  $\mathbf{V}_s$ ,  $\boldsymbol{\Delta}$  表示观测误差;  $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{K}$  均为列满秩设计矩阵。采用倾向变化与信号变化相结合的最小二乘配置模型描述区域地壳水平形变速度场/位移矢量具有理论上的严密性<sup>[12]</sup>。

由于应变关注的是任意两点之间距离的相对变化, 因此最小二乘配置模型可以直接用信号向量  $\hat{\mathbf{V}}_s$  来求解应变参数:

$$\hat{\mathbf{V}}_s = \mathbf{C}_w \mathbf{L} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{L} = (\mathbf{C}_w + \mathbf{C}_M)^{-1} (\mathbf{V}_{\text{GPS}} - \mathbf{G}\boldsymbol{\Omega})$ ;  $\mathbf{C}_w$  是观测值向量的互协方差阵;  $\mathbf{C}_M$  是观测误差的自协方差阵;  $\mathbf{C}_w$  是推估点与观测点的信号向量互协方差阵。

设任意一点的 GPS 速度矢量中的信号参数

$\hat{\mathbf{V}}_s$  可以表示为  $(u_\lambda, v_\theta)$ 。若不考虑不同方向分量之间的相关性, 则推估点与观测点信号向量互协方差矩阵可以表示为:

$$\mathbf{C}_w = \begin{bmatrix} C(u, u_1) & 0 & \cdots & C(u, u_m) \\ 0 & C(v, v_1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C(v, v_m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

基于地壳连续性形变假设, 式(4)所需的协方差关系可以通过高斯型函数计算:

$$\mathbf{C}(d) = \mathbf{C}(0) e^{-k^2 d^2} \quad (4)$$

基于白塞尔投影条件, 李庆海推导并给出了具有较高精度的椭球面大地线近似公式<sup>[13]</sup>。设地球椭球的长半轴为  $a$ 、扁率为  $\alpha$ , 则椭球面上任意两点间的大地线长度  $d$  计算式为:

$$d = a\sigma - \frac{1}{4}a\alpha \left( \frac{\sigma - \sin\sigma}{1 + \cos\sigma} F + \frac{\sigma + \sin\sigma}{1 - \cos\sigma} G \right) \quad (5)$$

式中,  $F$ 、 $G$  参数可按式(6)计算得到;  $\sigma$  为白塞尔辅助圆球对应两点之间的球面大圆弧长, 可以按照式(7)计算得到。

$$\begin{cases} F = (\sin u_2 + \sin u_1)^2 \\ G = (\sin u_2 - \sin u_1)^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\cos\sigma = \sin u \sin u_i + \cos u \cos u_i \cos(\lambda - \lambda_i) \quad (7)$$

式中,  $u$  为大地线端点的归化纬度;  $\lambda$  为大地线两端点的大地经度。

$$\tan u = \sqrt{1 - e^2} \tan\beta \quad (8)$$

式中,  $e$  为选用地球随球的第一偏心率;  $\beta$  为大地纬度。

将式(5)代入式(4)计算得到式(3)所示的协方差矩阵, 按照式(2)整理可得:

$$\begin{cases} u_\lambda = \sum_{i=1}^m C_{\lambda\lambda}(0) e^{-k d_i^2} L_{2i-1} \\ v_\theta = \sum_{i=1}^m C_{\theta\theta}(0) e^{-k d_i^2} L_{2i} \end{cases} \quad (9)$$

根据有限单元法形函数的基本理论, 应变率计算需要对不同方向 GPS 速度分量求导。由式(7)可知, 对 GPS 速度分量的求导就是根据式(5)-(8)求解距离的偏导数。

令  $A = \frac{\sigma - \sin\sigma}{1 + \cos\sigma}$ ,  $B = \frac{\sigma + \sin\sigma}{1 - \cos\sigma}$ , 则有:

$$\begin{cases} \frac{\partial d}{\partial \lambda} = a \frac{\partial \sigma}{\partial \lambda} - \frac{1}{4}a\alpha \left( \frac{\partial A}{\partial \lambda} F + \frac{\partial B}{\partial \lambda} G \right) \\ \frac{\partial d}{\partial \varphi} = a \frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} - \frac{1}{4}a\alpha \left( \frac{\partial A}{\partial \lambda} F + \frac{\partial F}{\partial \varphi} A + \frac{\partial B}{\partial \lambda} G + \frac{\partial G}{\partial \varphi} B \right) \end{cases} \quad (10)$$

#### 3.2 应变分析

采用椭球坐标最小二乘配置模型在均匀格网点上解算研究区域 GPS 应变分布, 结果如图 2-4

所示。从图 2(a)中可以看出,中国台湾造山带是菲律宾海板块与欧亚大陆板块之间碰撞作用最强烈的区域,主应变强度高达  $2.4518 \times 10^{-7}/a$ 。自北向南主压应变强度则逐渐减弱,吕宋地区仅有  $9.2387 \times 10^{-8}/a$ 。自东向西跨过台湾海峡的主应变强度快速衰减,中国福建地区仅为  $1.9322 \times 10^{-8}/a$ 。由此可知,板块之间的碰撞汇聚作用主要集中在台湾西部麓山带以东地区,通过中央山脉的隆升、逆冲推覆以及台东纵谷的快速走滑兼逆冲活动、中国台湾西南部地壳构造逃逸等一系列构造变形调节,对海峡西岸的中国福建地区影响有限。

中国台湾造山带应变分布总体表现为东部强、西部弱。在菲律宾海板块的俯冲作用下,琉球海沟分布有近南北向的压应变。自西向东跨过加瓜海脊,主压应变向东偏转。冲绳海槽内部以 EW 向的张应变为主。说明该弧后扩张系统存在

东西向的拉伸趋势,宜兰平原就是海槽横向扩张的产物。中国台湾岛内中、南部地壳以 NW-NNW 方向的压应变为主。自东向西,较强的压应变集中分布在中央山脉隆起区,并在西部麓山带内快速衰减。北港隆起南缘以 N-S 向的强压应变为主,说明北港隆起的强烈楔入作用促进了其南部地壳的侧向挤出,而屏东平原 SWW-SW 的张应变则与该构造逃逸趋势相关。

吕宋岛弧两侧地壳的应变场以 NW 向压应变为主。由于中国南海次板块沿马尼拉海沟的俯冲作用,巴士海峡西侧的应变强度大于东侧。吕宋岛内以菲律宾大断裂为界,应变场表现为北部强、南部弱特点,并在岛内的断裂交汇部位存在应变集中趋势。吕宋岛北部主应变方向自西向东跨过菲律宾群岛大断层存在明显的逆时针旋转,该变化与菲律宾群岛大断裂北向延伸构造的剪切活动有关。

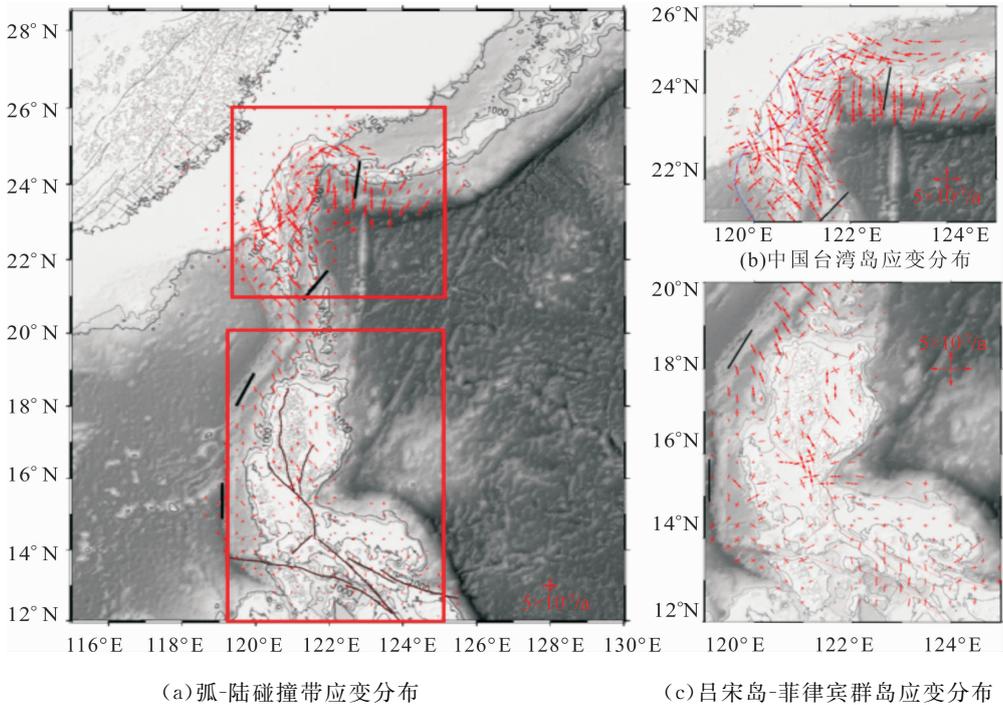


图 2 最大、最小主应变分布  
Fig. 2 Max imum and Min imum Strain Rates Distribution

图 3 为研究区域的最大剪应变。可以看出,纵谷断裂表现出 NNE 向的线性高应变率梯度带,反映了纵谷断裂现今强烈的剪切滑动。中国台湾西南部地壳应变率高值区主要分布在屏东平原一带,表明该区地壳的构造逃逸存在西南方向的增强趋势。吕宋岛内循菲律宾大断裂分布的剪应变梯度带表明该断裂较强的走滑活动。图 4 (a)中,中国台湾岛面膨胀值分布大致可以分为 4 个变形单元:①海岸平原与西部麓山地壳压缩区;

②台东纵谷地壳压缩区;③中央山脉南、北两端地壳引张区;④中国台湾西南构造逃逸地壳压缩区。在欧亚板块与菲律宾海板块的碰撞作用下,北港隆起楔入中国台湾中部,阻止了中央山脉的逆冲推覆,形成 NNE 走向且凹向 NW 的窄条状压缩应变梯度带(埔里凹陷)。而北港隆起内部相对变形微弱,表明该基底隆起刚性特征明显。北港隆起的南缘分布的强压缩应变梯度带与北港隆起楔入中国台湾造山带而对其南部地壳派生的侧向

挤压作用密切相关。图4(a)、图4(b)分别为基于椭球坐标与球坐标的最小二乘配置模型计算得到的GPS应变场。对比可知,椭球模型的细节变形信息更加丰富:①显示出了中央山脉南北两端存在地壳扩张变形;②显示出吕宋岛循断裂分布有微弱压应变。

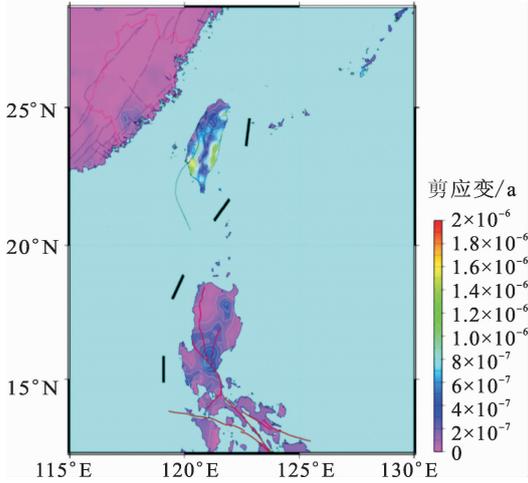


图3 最大剪应变分布

Fig. 3 Maximum Shear Strain Distribution

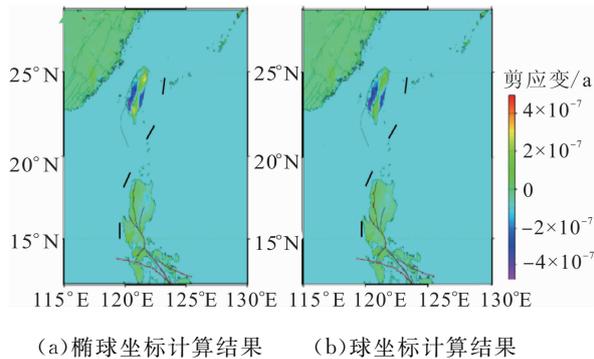


图4 面膨胀值分布

Fig. 4 Surface Inflation Rate

由此可知,GPS应变场的计算结果主要受两方面因素的影响。其一,GPS速度场的观测误差;其二,应变解算的模型误差。前者来自于数据采集以及数据处理过程,而后者则与应变计算选取的数学模型相关。由于应变计算关注的是离散点之间距离的相对变化,因此采用不同的地球几何模型都会造成距离计算出现偏差,进而引起应变解算结果的系统误差。对比球坐标弹性力学几何方程与椭球坐标弹性力学几何方程可知,纬度越低,用球面距离代替椭球面大地线长度而产生的椭球面效应越显著。由于最小二乘配置球坐标与椭球坐标模型的差异仅存在于“计算协方差矩阵时采用的是大地线长度还是球面大圆弧。”从计算结果看来,二者的总体特征基本一致,椭球坐标模型计算结果的局部细节变形信息更加丰富。

中国台湾岛内 $24^{\circ}\text{N}$ 以南的区域自东向西的GPS速度矢量在西部麓山带内大幅衰减,并由SE向转换为NW向运动。西部麓山带内的主应变方向复杂,表明两大板块之间的碰撞作用发生在地壳深处。吕宋岛两侧为马尼拉海沟、菲律宾海沟的双俯冲构造,区内GPS速度场自东向西的变化并不显著,说明该区域两侧的俯冲带的闭锁强度应当较弱。中国台湾岛内 $24^{\circ}\text{N}$ 以北的地壳水平形变特征与南部不同,说明两大板块之间的弧-陆碰撞作用并没有延伸至该区域。中国台湾东北部的GPS速度场向东约在 $122^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 之间发生矢量方向的大幅度顺时针旋转,表明菲律宾海板块在循琉球海沟的俯冲过程中的闭锁强度较弱。

## 4 结 语

本文统一归算并获得了欧亚大陆板块与菲律宾海板块之间弧-陆碰撞带的地壳水平运动图像。利用基于最小二乘配置的椭球面GPS应变分析模型整体解算了研究区域现今的地壳应变场,详细描述了该区域现今地壳水平相对形变特征,可以得出以下几点主要结论:

1)地壳水平运动速度场。弧-陆碰撞带现今地壳水平形变趋势与菲律宾海板块相对欧亚大陆板块的运动方向基本一致。其中,中国台湾地壳水平形变最为复杂,自北向南、自西向东GPS速度场都表现出了不同特征。菲律宾海板块自南向北在 $24^{\circ}\text{N}$ 附近由对欧亚板块的挤压碰撞转变为沿琉球海沟的俯冲,导致 $24^{\circ}\text{N}$ 以北区域对欧亚板块的侧向挤压作用缺失,中国台湾北部地壳水平运动指向东南。而冲绳海槽南缘的GPS速度场以近 $70\text{ mm/a}$ 的速度指向SSE,验证了菲律宾海板块沿琉球海沟的俯冲作用。由于中国南海次级板块沿马尼拉海沟俯冲,没有与吕宋弧发生碰撞。因此台湾东侧 $24^{\circ}\text{N}$ 以南到本哈姆海台西侧,GPS速度场逐渐增强且指向NW。菲律宾大断裂两盘的GPS速度差达到 $15\text{ mm/a}$ ,断裂以南至锡布延岛的GPS速度场存在明显衰减及逆时针旋转趋势。

2)最大、最小主应变。中国台湾岛内东西向地壳形变以西部麓山为界,东部强、西部弱,优势应变方向NW-NNW。琉球海沟以近N-S向的压应变为主,冲绳海槽内部则以W-E向引张变形为主。自西向东跨过加瓜海脊,应变场逐渐减弱且顺时针旋转,表明花东海盆与西菲律宾海盆之间存在刚性旋转差异。中国台湾西南部构造逃逸

则以屏东地块的 SWW-SW 向拉张与北港隆起南缘 NS 向压缩为主要特征,表明北港隆起的楔入作用在中国台湾中部形成封闭的板块边界,强烈的挤压碰撞作用促使中国台湾西南部地壳发生构造逃逸。吕宋岛-菲律宾群岛地区的主应变率强度的空间分布以西强东弱的横向变化为主。

3) 面膨胀与最大剪应变。根据面膨胀值分布特征,本文将中国台湾岛分为 4 个变形单元:①海岸平原带、西部麓山带的地壳压缩区;②中国台湾西南构造逃逸地壳压缩区;③中国台湾东部海岸山脉地壳压缩区;④中央山脉南北两端的地壳膨胀区。中央山脉地区表现出的地壳引张变形则与其现今的快速隆升以及西向的逆冲推覆扩张有关。纵谷断裂以及台湾西南部地壳均表现出明显的剪切变形。前者反映了中国台湾台东纵谷断裂带现今强烈的剪切滑动变形,后者则反映了台湾岛西南部构造逃逸存在西-南方向的增强趋势。菲律宾大断裂相对显著的剪应变以及较弱的面膨胀分布表明该断裂现今仍以剪切走滑为主。

### 参 考 文 献

- [1] Yu S B, Kuo L C, Punongbayan R S, et al. GPS Observation of Crustal Deformation in the Taiwan-Luzon Region [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7):923-926
- [2] Galgana G, Hamburger M, McCaffrey R, et al. Analysis of Crustal Deformation in Luzon, Philippines Using Geodetic Observations and Earthquake Focal Mechanisms [J]. *Tectonophysics*, 2007, 432(432): 63-87
- [3] Jiang Zaisen, Liu Jingnan. The Method in Establishing Strain Field and Velocity Field of Crustal Movement Using Least Squares Collocation [J]. *Chinese J Geophysics*, 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)
- [4] 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 Geophysics*, 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)
- [5] Saffet E, Muhammed Ş, İbrahim T, et al. GPS Velocity and Strain Rate Fields in Southwest Anatolia from Repeated GPS Measurements [J]. *Sensors*, 2009, 9(3):2 017-2 034
- [6] 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]. *大地测量与地球动力学*, 2006, 26(1):1-8)
- [7] Li Yanxing, Hu Xinkang, Li Zhi, et al. Crustal Movement and Deformation in Taiwan and Its Coastal Area [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(5):487-495 (李延兴, 胡新康, 李智, 等. 台海地区的地壳运动与变形 [J]. *地震学报*, 2002, 24(5): 487-495)
- [8] Larson K M, Freymueller J T, Philipsen S. Global Plate Velocities from the Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B5):9 961-9 981
- [9] Argus D F, Gordon R G. Tests of the Rigid-Plate Hypothesis and Bounds on Intraplate Deformation Using Geodetic Data from very Long Baseline Interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101 572(10): 555-513
- [10] Wu Y, Chang C, Zhao L, et al. Seismic Tomography of Taiwan: Improved Constraints from a Dense Network of Strong Motion Stations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(B08312):582-596
- [11] Yu S B, Kuo L C, Punongbayan R S, et al. GPS Observation of Crustal Deformation in the Taiwan-Luzon Region [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7):923-926
- [12] Yang Yuanxi, Zeng Anmin, Wu Fumei. Horizontal Crustal Movement in China Fitted by Adaptive Collocation with Embedded Euler Vector [J]. *Sci China: Earth Sci*, 2011, 41(8):1 116-1 125 (杨元喜, 曾安敏, 吴富梅. 基于欧拉矢量的中国大陆地壳水平运动自适应拟合推估模型 [J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(8):1 116-1 125)
- [13] Li Qinghai. A Formula for Calculating the Length of a Long-distance Geodesic Line with an Error Less than Ten Meters [J]. *Materials of CHXG*, 1979(1):18-23 (李庆海. 误差不大于 10 米的工距离大地线长度的计算公式 [J]. *武测资料*, 1979(1):18-23)

then the free network bundle adjustment experiment is undertaken to verify the positioning accuracy of the system without ground control points; finally, a self calibration bundle adjustment is undertaken to calibrate and compensate the camera distortion, interior elements changes, IMU alignment angle. Experimental results show that the unmanned helicopter has high positioning accuracy. The accuracy of direct geo-reference can meet the requirements of emergency mapping, and can be aided by a few ground control points, the positioning accuracy is much better than that of 1 : 500 mapping requirements, which can be used for conventional surveying and mapping production. After system error compensation, the direct geo-reference accuracy has improved significantly: the planar accuracy has improved by 46.37% and the height accuracy has improved by 62.49%. The flight test of Songshan calibration field shows that the method of calibration and compensation is correct and effective, and the unmanned helicopter has a good prospect for surveying and mapping applications.

**Key words:** unmanned helicopter; positioning on the earth; system error; calibration; compensation

**First author:** XUE Wu, PhD, specializes in UAV photogrammetry and computer vision. E-mail: xuewu\_81@126.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41501482; the Foundation of Military Key Laboratory of Surveying, Mapping and Navigation Engineering; the National Defense Science and Technology Innovation Zone Project.

(上接第 245 页)

## Present-day Crustal Deformation in Arc-Continent Collision Zone of the Southeastern Eurasia Plate

WU Xiaolong<sup>1,2</sup> YANG Zhiqiang<sup>2</sup> GONG Yun<sup>1</sup>

1 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

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

**Abstract:** Based on the systematic collection of the GPS observations in China; Fujian, China; Taiwan and Philippine; Luzon, this paper obtains the current crustal horizontal velocity field of the arc-continent collision zone. Targeting the specific areas whose super-long span is more than 1 000 km, this paper builds the least squares collocation model on the basis of ellipsoidal coordinates, uniformly calculating current GPS strain distribution of this collision zone. The results show that china; Taiwan province has the strongest crustal deformation, followed by Philippine; Luzon and China; Fujian regions respectively. The Philippine sea plate at the east Taiwan, China collides intensively with the Eurasia plate, and the collision is severely consumed through the central mountain's uplifting, the thrust napping and the tectonic escaping. The overall deformation characteristics is closely related to the structural variation of the Philippine sea plate. While the relative deformation in Luzon region is mainly involved with the relative sliding of the Philippine fault.

**Keywords:** arc-continent collision zone; Eurasia plate; the Philippine sea plate; GPS strain field; the Luzon arc volcanic

**First author:** WU Xiaolong, PhD, lecturer, specializes in the crustal deformation monitoring and analysis based on geodetic surveying technologies. E-mail: xlong\_wu@126.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 51674195; the PhD Startup Foundation of Xi'an University of Science and Technology, No. 2016QDJ049.