

李延兴,张静华,何建坤等.由空间大地测量得到的太平洋板块现今构造运动与板内形变应变场.地球物理学报,2007,50(2):437~447

Li Y X,Zhang J H,He J K,et al. Current day tectonic motion and intraplate deformation strain field obtained from space geodesy in the Pacific Plate. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),2007,50(2):437~447

由空间大地测量得到的太平洋板块现今 构造运动与板内形变应变场

李延兴¹,张静华¹,何建坤²,李金岭³,李智⁴,郭良迁¹,张中伏¹,杜雪松¹

1 中国地震局第一监测中心,天津 300180

2 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

3 中国科学院上海天文台,上海 200030

4 装备技术指挥学院,北京 101416

摘要 推导了板块的弹性运动方程.根据太平洋板块(PCFC)上空间大地测量的观测结果,建立了PCFC的弹性运动模型,该模型与板块实际运动状态的符合程度明显地优于刚体运动模型.研究表明:PCFC现今旋转的角速度比过去3Ma的平均值大 $0.037\text{ }^\circ/\text{Ma}$;在PCFC内部存在明显的水平形变,在 15°S 以北和 204.5°E 以西地区存在一致的向西形变,北西与南西方向的形变速率分别为 $0.8\sim 3.5\text{ mm/a}$ 与 $1.0\sim 3.4\text{ mm/a}$;在板块的东南区存在一致的向东形变,北东与南东方向的形变速率分别为 $1.5\sim 1.8\text{ mm/a}$ 与 $2.8\sim 9.1\text{ mm/a}$.PCFC内部水平应变场的空间变化是有规律的,在PCFC的西北部,主压应变轴为NW-SE方向,主压应变率大于主张应变率;在PCFC的东南部,主压应变轴为NE-SW方向,主张应变率大于主压应变率;PCFC的东南边界是扩张边界,边界附近的主张应变率最大(平均为 $1.51\times 10^{-9}/\text{a}$),主张应变轴基本上与洋中脊的扩张方向一致;PCFC的西北边界是俯冲边界,边界附近的主压应变率最大(平均为 $0.75\times 10^{-9}/\text{a}$),主压应变轴基本上与太平洋板块的俯冲方向一致.

关键词 太平洋板块,弹性运动方程,两种模型,板内形变,应变场

文章编号 0001-5733(2007)02-0437-11 **中图分类号** P227,P553 **收稿日期** 2005-12-02,2006-10-20 收修定稿

Current-day tectonic motion and intraplate deformation-strain field obtained from space geodesy in the Pacific Plate

LI Yan-Xing¹, ZHANG Jing-Hua¹, HE Jian-Kun², LI Jin-Ling³, LI Zhi⁴, GUO Liang-Qian¹,
ZHANG Zhong-Fu¹, DU Xue-Song¹

1 First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

4 Institute of Equipment Technology and Command, Beijing 101416, China

Abstract In this paper we present a plate elastic motion equation, and based on the space geodetic data of the Pacific plate (PCFC), create an elastic motion model for the PCFC. The coincidence of this model with the plate real motion status is obviously better than that of the rigid motion model. Our research indicates that the angular velocity of the current-day rotation of the PCFC is $0.037\text{ }^\circ/\text{Ma}$ larger than the average in the past 3 Ma.

基金项目 国家自然科学基金项目(40474036,40474039)资助.

作者简介 李延兴,男,1942年生,研究员,博士生导师,主要从事大地测量学、地壳运动与地球动力学研究. E-mail:LiYX9777@VIP.sina.com

The horizontal deformation within the PCFC is evident. In the region to the north of 15°S and to the west of 204.5°E, there exists a consistent west-trending deformation with the rates of 0.8 ~ 3.5 mm/a and 1.0 ~ 3.4 mm/a in the NW and SW directions, respectively. In the southeastern region of the plate, there exists a coincident east-trending deformation with the rates of 1.5 ~ 1.8 mm/a and 2.8 ~ 9.1 mm/a in the NE and SE directions, respectively. The spatial variation of horizontal strain field within the PCFC is regular. In the northwestern part of the PCFC, the principal compressive strain axis is NW - SE and the principal compressive strain rate is larger than the principal tensile strain rate; while in the southeastern part of the PCFC, the principal compressive strain axis is NE - SW and the principal tensile strain rate is larger than the principal compressive strain rate. The southeast boundary of the PCFC is a spreading one. The principal tensile strain rate near the boundary is the largest (average: $1.51 \times 10^{-9}/a$) and the principal tensile strain axis is basically consistent with the extending direction of the oceanic ridge; the northwest boundary of the PCFC is an underthrusting one. The principal compressive strain rate near the boundary is the largest (average: $0.75 \times 10^{-9}/a$) and the principal compressive strain axis is basically coincident with the underthrusting direction of the PCFC.

Key words PCFC, Elastic motion equation, Two kinds of models, Intraplate deformation, Strain field

1 引言

自板块构造理论确立以来,地学研究者为 PCFC 建立了许多运动模型^[1-6]. 这些都是由地质学和地球物理学研究结果建立的运动模型,其中应用最广泛的是由 DeMets et al 建立的 NNR-NUVELIA 模型. 自 20 世纪 90 年代以来,空间大地测量技术 VLBI (Very Long Baseline Interferometry)、SLR (Satellite Laser Ranging)、GPS (Global Position System) 和 DRIS (Doppler Orbitography and Radios-Position Integrated by Satellite) 取得了突破性进展,定位精度达到了毫米级,可以精确监测板块运动以及板块边缘与内部的形变. 许多研究者根据空间大地测量资料建立了太平洋板块新的运动模型^[7-12]. 上述模型都是刚体运动模型. 按照传统的板块构造理论,板块是一个刚体,板块的边界是狭窄的,板块的形变只存在于边界带上,内部是不发生形变的. 实际上板块并不是刚体,早在 1998 年 Gordon 就曾指出板块的非刚性^[13], Burbidge^[14] 和 Nanjo et al.^[15] 研究指出,板块是可变形的. 板块边界也并不是狭窄的,而是发散的^[13]. 许多研究者发现,在“稳定的大陆内部”存在地震活动,并认为这些地震是由于大陆内部弹性应变积累引起的^[16-20]. 一个板块在周围板块的作用下,它的整体将发生旋转,它的边缘和内部将发生形变^[21].

在一定时期内,岩石圈可以认为是经受应力作用的弹性刚性层,在板块构造、板内断裂带以及构造异常的狭窄区域经受非弹性变形的水平剪切变形发

生在地壳不是不可能的,因为矿物晶格的定向排列在不同区域内存在^[22]. 这就是说,在一定时期内,岩石圈在应力场作用下的变形是弹性刚性的,而在板块构造、板内断裂带以及构造异常的狭窄区域内,下地壳的变形可能是非弹性的. 岩石圈在不同条件下表现出不同的物理特征. 例如,在地表温度较低,岩石圈在受力后多表现为弹性性质,当受力达到一定程度,近地表处发生脆性破裂产生地震,将弹性能释放,并由地震波将弹性能通过地球传到世界各地^[23]. 这就是说,岩石圈上部(上地壳)受力后,在弹性强度之内,其变形主要表现为弹性性质. 岩石圈的力学性能可以用松弛时间判断,松弛时间越长,介质的弹性越显著,它的力学性能越接近于固体材料. 地幔岩石的松弛时间为 10^{10} s 量级. 即对于发生在地幔内部的物理力学过程,若地幔响应的的时间尺度远小于 10^{10} s,则对这个过程可以把地幔介质当作弹性介质;若地幔响应的的时间尺度远大于 10^{10} s,则对这个过程可以把地幔介质当作黏性介质^[24]. 岩石圈包括地壳和上地幔,几年到几十年的时间尺度远小于 10^{10} s,因此对于几年到几十年时间尺度的岩石圈板块的变形,可以把岩石圈板块当作弹性介质. 综上所述,除了板块边界、板内断裂带以及构造异常的狭窄区域外,板块内部几年到几十年时间尺度的变形主要是弹性变形,因此我们可以把板块内部几年到几十年时间尺度的变形当作弹性变形. 既然板块内部存在弹性变形,我们应当研究板块内部弹性变形的规律,建立板块的弹性运动模型. 本文试图根据 PCFC 上大地测量的结果,建立 PCFC 的弹性运动模

型,同时研究 PCFC 内部的形变、应变场.

(6)

2 板块的弹性运动方程

板块一般被视为刚体,其运动用方程(1)描述

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin \cos & -\sin \sin & \cos \\ \sin & -\cos & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中 v_e, v_n 是板块上任一点(、)的东向与北向速度, r 为地球半径, x, y, z 为板块的欧拉矢量.

一个板块在周围板块的作用下,它的整体将发生旋转,它的边缘和内部将发生弹性形变.板内地壳的运动主要包括板块整体旋转产生的运动与由于内部弹性形变产生的运动.大地测量站都是建在地壳上,因此用大地测量观测的地壳运动是板块旋转运动与内部形变的复合运动.在研究大范围地壳运动与变形时应以球面作为地壳运动的参考面,在球面上建立正交曲线坐标系.以板块中心为坐标原点(0, 0),纬线为 x 轴,经线为 y 轴,板块上任一点沿纬线到 y 轴的平行圈弧长为其 x 坐标,沿经线到 x 轴的子午圈弧长为其 y 坐标,则有

$$\begin{cases} x = r \cos(\theta - \theta_0), \\ y = r(\theta - \theta_0). \end{cases} \tag{2}$$

假设板块内部的运动是连续的,板块发生变形后,板块上任一点沿经向、纬向的位移 u, v 的全微分可表示为

$$\begin{aligned} du &= \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \\ &= \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) dy \\ &\quad - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dy, \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} dv &= \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \\ &\quad + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx. \end{aligned} \tag{4}$$

假设在一个板块内部, $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \frac{\partial v}{\partial y}$ 和

$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ 是位置的线性函数:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = A_0 + A_1 x + A_2 y \tag{5}$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = B_0 + B_1 x + B_2 y,$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = C_0 + C_1 x + C_2 y, \tag{7}$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = D_0 + D_1 x + D_2 y. \tag{8}$$

将式(5)~(8)代入式(3)、(4),积分得到

$$\begin{aligned} u &= A_0 x + \frac{1}{2} A_1 x^2 + A_2 xy + B_0 y + B_1 xy \\ &\quad + \frac{1}{2} B_2 y^2 - D_0 y - D_1 xy - \frac{1}{2} D_2 y^2, \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} v &= B_0 x + \frac{1}{2} B_1 x^2 + B_2 xy + C_0 y + C_1 xy \\ &\quad + \frac{1}{2} C_2 y^2 + D_0 x + \frac{1}{2} D_1 x^2 + D_2 xy. \end{aligned} \tag{10}$$

式(9)与(10)可表示为矩阵

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_s &= \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ B_0 & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_1 & B_2 - D_2 \\ B_1 + D_1 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} A_2 + B_1 - D_1 \\ B_2 + C_1 + D_2 \end{bmatrix} xy + D_0 \begin{bmatrix} -y \\ x \end{bmatrix}_s, \end{aligned} \tag{11}$$

在方程(11)中, u, v 是位移量.如果 u, v 是单位时间的位移量,则 u 与 v 就分别为东向与北向的位移速度 v_e 与 v_n .方程(11)右边的最后一项 $D_0 \begin{bmatrix} -y \\ x \end{bmatrix}_s$ 是围绕以地球中心和板块中心连线为旋转轴的一个旋转量, D_0 为旋转角.在单位时间内, D_0 就是旋转角速度.

板块的整体旋转可用方程(1)表示,板块内部的变形可用方程(11)表示,板块上任一点的运动是上述两种运动的合成,根据物体运动速度合成法则得到

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} &= r \begin{bmatrix} -\sin \cos & -\sin \sin & \cos \\ \sin & -\cos & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_R \\ &\quad + \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ B_0 & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_1 & B_2 - D_2 \\ B_1 + D_1 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} A_2 + B_1 - D_1 \\ B_2 + C_1 + D_2 \end{bmatrix} xy + D_0 \begin{bmatrix} -y \\ x \end{bmatrix}_s. \end{aligned} \tag{12}$$

方程(12)右边的第1项和最后一项都是旋转量,根据球面上板块旋转的欧拉定律,这两项可合成为一

个旋转量,方程(12)可简化为

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin \cos & -\sin \sin & \cos \\ \sin & -\cos & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ B_0 & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix} xy, \quad (13)$$

$$1 = A_1, \quad 2 = (B_2 - D_2),$$

$$3 = A_2 + B_1 - D_1,$$

$$1 = (B_1 + D_1), \quad 2 = C_2,$$

$$3 = B_2 + C_1 + D_2,$$

方程(13)即为统一描述板块整体旋转与线性应变的弹性运动方程.在方程(13)中,有12个未知数: x 、 y 、 z 、 A_0 、 B_0 、 C_0 、 1 、 2 、 3 、 1 、 2 、 3 .前3个是旋转参数,后9个是应变参数.方程右边的第一项代表了板块的整体旋转运动,第二到四项代表了板块内部的连续变形,因此板块的运动是它的整体旋转与内部变形的复合运动.

在方程(13)中,若9个应变参数 $A_0 \sim 3$ 全为零,则方程(13)就变成了板块的刚体运动方程(1).可见,板块的刚体运动方程(1)只是板块弹性运动方程(13)的一个特例,它属于弹性运动方程(13)之中,可视为是对板块运动的零阶逼近.

在方程(13)中,若 x 和 y 二次项的应变参数 $1 \sim 3$ 全为零,则方程(13)就变成了方程(14),

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin \cos & -\sin \sin & \cos \\ \sin & -\cos & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ B_0 & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (14)$$

在方程(14)中,若把 A_0 、 B_0 、 C_0 用 e 、 e_n 、 n 表示, x 和 y 分别用 $r \cos(\quad - \quad_0)$ 、 $r(\quad - \quad_0)$ 表示,方程(14)就是我们以前推导的块体弹性运动方程^[25].由于 A_0 、 B_0 、 C_0 都是常数,可以认为板块内部的应变是均匀的,方程(14)可称为板块的整体旋转和均匀应变的弹性运动方程,它可视为是对板块运动的一阶逼近.这样我们可以用方程(13)把方程(1)和方程(14)统一为一个板块运动方程.

3 PCFC 板块的弹性运动模型

3.1 数据收集与处理

Sella et al. 在建立现今板块运动模型时,提供了

PCFC 上 24 个站 ITRF97 的运动速度.他们选择其中的 9 个站建立了 PCFC 的刚体运动模型^[10].由于 guam 站(144.87°E, 13.59°N)位于菲律宾海板块上,应当去掉,在 PCFC 上只有 23 个站. Prawirodirdjo et al 在建立全球板块运动模型时,提供了 PCFC 上 6 个站 ITRF2000 的运动速度,他们选择其中的 5 个站建立了 PCFC 的运动模型^[12]. Prawirodirdjo et al 提供的是由 12 年 GPS 连续观测得到的 ITRF2000 的站速度,与 Sella et al 得到的 ITRF97 站速度相比具有更高的精度.因此我们以 Prawirodirdjo et al 得到的 ITRF2000 站速度为基准,将 Sella et al 得到的 PCFC 上的 ITRF97 站速度转换为 ITRF2000,与 Prawirodirdjo et al PCFC 上的站速度融合为一体.融合的方法是:在 PCFC 和澳大利亚板块上, Prawirodirdjo et al 给出了 18 站 ITRF2000 的站速度. Sella et al 给出了 42 个站 ITRF97 的站速度,其中包括了 Prawirodirdjo et al 给出的 18 站.根据这 18 个站的坐标和在两组数据中的站速度,求出由 ITRF97 站速度转换为 ITRF2000 的转换参数(使用两个板块上的数据是为了多使用一些共用站,提高转换参数的精度),然后将 Sella et al 给出的 PCFC 上 23 个站 ITRF97 的站速度转换为 ITRF2000,与 Prawirodirdjo et al 给出的 ITRF2000 参考框架统一.站速度融合后,在 PCFC 上共有 29 个站,其中有 6 个站是重复的.在 Sella et al 的数据中,坐标为 210.39°E 与 17.58°S 的站有 3 个,坐标为 243.33°E 与 31.87°N 的站有 3 个.实际上,在 Sella et al 和 Prawirodirdjo et al 提供的 PCFC 的数据中,只有 19 个站是独立的,其余 10 个站都是并置的或者是重复的.图 1 绘制了这 19 个站速度矢量的图像.

3.2 PCFC 弹性运动模型的建立

用 PCFC 上大地测量站的速度和最小二乘法可估计方程(13)的待定参数,从而建立 PCFC 的弹性运动模型.在参数估计中,由于站筛选的方法不同,往往会得到不同的结果.为了建立一个既有充分代表性,模型参数精度又尽可能高的运动模型,必须研究站筛选与模型参数优化的最优方案.在多年研究的基础上,本文提出了模型参数优化与站筛选相结合的方案.这个方案的基本思路是:如果一个板块的运动可以用方程(13)描述,板块内部各站用方程(13)计算的站速度分量 v_{ec} 与 v_{nc} 应当与观测的站速度分量 v_{eo} 与 v_{no} 比较接近,二者的差值($v_e = v_{eo} - v_{ec}$ 与 $v_n = v_{no} - v_{nc}$,以下称为残差)应服从正态分布,残差绝对值越大的站出现的概率将越小. PCFC 上 29 个站 v_{eo} 与 v_{no} 标准偏差的平均值为 1.5 mm/a,

我们取 1.5 mm/a 作为限差,残差绝对值大于限差的站将被删除.站筛选和模型参数优化是逐步进行的,随着残差绝对值大的站被逐步删除,模型参数在不断地优化.现将 PCFC 弹性运动模型的建立过程简述如下:

(1)用 PCFC 上 29 个站的速度和最小二乘法估计方程(13)的第 1 组待定参数.用这一组参数和方程(13)计算 29 个站的速度分量 v_{ec} 与 v_{nc} .计算第一次速度分量的残差 v_e 与 v_n . v_e 与 v_n 绝对值大于 1.5 mm/a 的站很多,我们首先删去绝对值最大的 1 个站,这时剩下 28 个站.

(2)用第一步筛选后剩下的 28 个站的速度和最小二乘法估计方程(13)的第二组待定参数,用这组参数和方程(13)计算 28 个站的速度分量与残差,去掉残差绝对值最大的 1 个站,这时剩下的站数为 27.

(3)按照第二步的方法,继续进行第四步、第五步筛选, ...,直到计算的站速度分量残差的绝对值都小于 3.0 mm/a (2 倍的标准差)时,比较坐标相同的站的 v_e 和 v_n ,去掉 v_e 和 v_n 绝对值最大的一站.

(4)按照(2)的方法继续进行,得到 v_e 和 v_n

后,先检查 v_e 和 v_n 的绝对值是否有大于 3.0 mm/a 的,若有先去掉绝对值最大的那一站,若没有大于 3.0 mm/a 的站,再比较坐标相同的站的 v_e 和 v_n ,去掉绝对值最大的那一站.这样继续下去,直到所有重复站都删除为止.

(5)在完成(4)后,如果还有 v_e 和 v_n 的绝对值大于 1.5 mm/a 的站存在,去掉其中最大的一站.然后继续进行,直到所有站的 v_e 和 v_n 的绝对值都小于或等于 1.5 mm/a 为止.在上述站筛选的过程中,每删除残差绝对值最大的一站后,方程(13)参数的精度就提高一次.当残差的绝对值等于或小于 1 倍标准差时,表示用模型计算的站速度的精度已达到了观测的站速度的精度,这时就不能再删除了.如果再删除,虽然从表面上看用模型计算的站速度的精度超过了观测的精度,这不但是无意义的,而且还减少了建立板块运动模型所需要的观测信息.

按照上述方案,我们最后选择 PCFC 上的 14 站用方程(13)建立了 PCFC 整体旋转线性应变的弹性运动模型.表 1 给出了这 14 个站观测的和模型计算的速度分量、残差、标准差和数据来源. PCFC 弹性运动模型的参数列入了表 2.

表 1 PCFC 上站的观测速度、计算速度、速度残差、标准差和数据来源

Table 1 Observed velocities and their standard deviations, calculated velocities and their residuals and data source

站名	/ (N)	/ (E)	$v_{eo}/$ (mm a ⁻¹)	$v_{no}/$ (mm a ⁻¹)	$v_{ec}/$ (mm a ⁻¹)	$v_{nc}/$ (mm a ⁻¹)	$v_e/$ (mm a ⁻¹)	$v_n/$ (mm a ⁻¹)	$S_e/$ (mm a ⁻¹)	$S_n/$ (mm a ⁻¹)	来源
TRUK	7.45	151.89	- 71.8	21.3	- 71.7	19.9	- 0.1	1.3	1.4	0.8	Sella
MARC	24.29	153.98	- 73.2	20.0	- 72.9	20.8	- 0.3	- 0.8	1.2	1	Sella
KWJ1	8.72	167.73	- 70.0	26.2	- 70.9	27.0	0.9	- 0.7	1.2	0.8	Sella
CHAT	- 43.956	183.434	- 41.4	32.0	- 41.4	31.9	0.0	0.1	0.4	0.3	Prawir.
FALE	- 13.83	188	- 65.3	31.1	- 64.5	32.3	- 0.8	- 1.2	3.5	1.7	Sella
KOKI	21.98	200.24	- 63.6	32.6	- 63.0	32.1	- 0.6	0.5	1.4	0.8	Sella
KOKB	22.13	200.34	- 62.6	31.4	- 62.9	32.1	0.3	- 0.7	0.7	0.5	Sella
HNLC	21.3	202.14	- 63.0	33.0	- 62.9	32.1	- 0.2	0.9	2.7	1.6	Sella
MKEA	19.801	204.544	- 62.7	32.4	- 62.9	31.9	0.2	0.5	0.7	0.4	Prawir.
THTI	- 17.577	210.391	- 65.3	31.8	- 65.5	31.7	0.2	0.1	1.2	0.7	Prawir.
pama	- 17.57	210.43	- 65.2	32.0	- 65.5	31.7	0.3	0.4	3.1	1.4	Sella
farb	37.697	237.001	- 39.2	24.1	- 39.9	23.2	0.7	0.9	0.3	0.2	Prawir.
snil	33.25	240.48	- 43.1	20.7	- 43.0	21.6	- 0.1	- 0.9	0.7	0.4	Sella
scip	32.91	241.51	- 43.5	20.7	- 43.0	21.1	- 0.5	- 0.4	1.1	0.7	Sella
pal	7.34	134.48	- 65.8	19.7	- 72.1	9.4	6.3	10.3	0.8	1.8	Sella
upol	20.25	204.12	- 64.5	35.3	- 62.8	31.9	- 1.7	3.4	1.7	1.2	Sella
vndp	34.56	239.38	- 43.8	20	- 42.1	22.1	- 1.7	- 2.1	0.5	0.4	Sella
Cicl	31.87	243.33	- 40.8	21.2	- 43.4	20.1	2.6	1.1	1.8	1.2	Sella
spmx	31.05	244.53	- 48.3	21.1	- 43.8	19.5	- 4.5	1.6	1.6	1.0	Sella

注: S_e 、 S_n 分别为观测的东向与北向速度的标准差;前 14 个站(TRUK~ scip 站)是建立 PCFC 弹性运动模型使用的站.

表 2 PCFC 弹性运动模型的参数
Table 2 Parameters of the elastic motion model of PCFC

	$\bar{v}_x/(10^{-9} a^{-1})$	$\bar{v}_y/(10^{-9} a^{-1})$	$\bar{v}_z/(10^{-9} a^{-1})$	$A_0/(10^{-9} a^{-1})$	$B_0/(10^{-9} a^{-1})$	$C_0/(10^{-9} a^{-1})$
参数值	- 1.649	4.808	- 10.680	0.464	- 0.180	- 0.171
标准差	0.104	0.071	0.069	0.130	0.110	0.172
	$\bar{v}_1/(10^{-15} a^{-1})$	$\bar{v}_2/(10^{-15} a^{-1})$	$\bar{v}_3/(10^{-15} a^{-1})$	$\bar{v}_4/(10^{-15} a^{-1})$	$\bar{v}_5/(10^{-15} a^{-1})$	$\bar{v}_6/(10^{-15} a^{-1})$
参数值	0.092	0.060	- 0.002	- 0.230	- 0.034	0.024
标准差	0.068	0.092	0.070	0.064	0.096	0.069

4 PCFC 两种运动模型比较

根据统计学原理,评价一个模型优劣的标准主要有 2 个:无偏性与有效性.无偏性,即模型计算值与相对应的观测值之差的平均值(以下称为残差均值)应趋于零.按照无偏性的要求,残差均值的绝对值小者为优.有效性,即残差的离散度为最小.残差的离散度通常用样本方差或标准差度量,标准差小者为优.站速度残差均值(\bar{v})和标准差(S_v)用下式计算

$$\bar{v} = \frac{1}{2n} \left[\sum_{i=1}^n v_{ei} + \sum_{i=1}^n v_{ni} \right], \quad (15)$$

$$S_v = \left[\frac{1}{2n - R} \left(\sum_{i=1}^n v_{ei}^2 + \sum_{i=1}^n v_{ni}^2 \right) \right]^{1/2}, \quad (16)$$

在上式中, n 为测站数; R 为未知数的个数,对于刚体模型为 3,对于整体旋转线性应变模型为 12.

近几年,Sella et al、Zhu et al.和 Prawirodirdjo et al.分别用 PCFC 上大地测量的观测结果建立了 PCFC 的运动模型.他们分别提供了 PCFC 上 23 个站、4 个站和 6 个站的速度,其中 Sella et al 提供的站最多.我们以 Sella et al 提供的数据为基础,对两种运动模型进行对比.Sella et al 用 PCFC 上的 9 个站建立了 PCFC 的刚体运动模型.根据 Sella et al 的模型计算的残差均值 \bar{v} 与标准差 S_v 列入了表 3(表

中的第 2 行).我们用 PCFC 上的 14 个站建立了 PCFC 的整体旋转线性应变运动模型.根据此模型计算的残差均值 \bar{v} 与标准差 S_v 也列入了表 3(表中的第 3 行).Sella et al 提供了 PCFC 上 23 个站的速度,我们分别用 Sella et al 的刚体运动模型和本文的整体旋转线性应变运动模型计算了这 23 个站的残差,残差的分布绘于图 2.残差的均值和标准差列入了表 3(表中的第 4 行与第 5 行).

根据统计学原理,如果一个模型是无偏的,模型计算值相对于观测值的残差均值 $\mu_0 = 0$.假设我们建立的 PCFC 的刚体运动模型与整体旋转线性应变运动模型都是无偏的,即假设

$$H_0: \bar{v} = \mu_0, H_1: \bar{v} \neq \mu_0,$$

检验统计量为

$$T = \frac{|\bar{v} - \mu_0|}{S_v / \sqrt{N}}. \quad (17)$$

在式(17)中, $N = 2n$,对于刚体模型分别为 18 与 46;对于整体旋转线性应变模型分别为 28 与 46.将表 3 中的 \bar{v}, S_v 与 N 分别代入式(17)计算 T ,计算结果列入了表 3.若取 $\alpha = 0.5$,刚体模型都未通过 T 检验;而整体旋转线性应变模型都通过了 T 检验.若取 $\alpha = 0.1$,则刚体模型才通过了 T 检验.这表明,整体旋转线性应变模型在无偏性方面优于刚体模型.

表 3 刚体与弹性运动模型比较

Table 3 Comparison of the rigid and elastic motion models

模型	n	k	\bar{v}	S_v	T	T_1	检验	T_2	检验	F	F	检验
刚体	9	15	- 0.16	0.94	0.722	0.691	×	1.753				
弹性	14	16	0.00	0.83	0.000	0.690		1.746		0.731	1.94	
刚体	23	43	0.81	3.34	1.645	0.681	×	1.684				
弹性	23	34	0.19	2.74	0.470	0.683		1.697		0.851	1.54	

注: $k = 2n - R$, k 为自由度; \bar{v} 和 S_v 的单位为 mm/a; $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.1, \alpha = 0.1$; ×表示未通过检验,表示通过检验.

由统计原理知道,两个模型的方差 S_1^2, S_2^2 分别被其自由度 v_1, v_2 除,其比值可用一个 F 统计量表示:

$$F = \frac{S_1^2/v_1}{S_2^2/v_2} = \frac{S_1^2 v_2}{S_2^2 v_1}. \quad (18)$$

将表 3 中的第 2 行与第 3 行作为第 1 组,将第 4 行与第 5 行作为第 2 组.在每组中,将整体旋转线性应变模型的方差 S_v^2 作为 S_1^2 ,自由度作为 v_1 ;将刚体模型的方差 S_v^2 作为 S_2^2 ,自由度作为 v_2 ,按公式(18)计算 F ,计算结果列表 3.

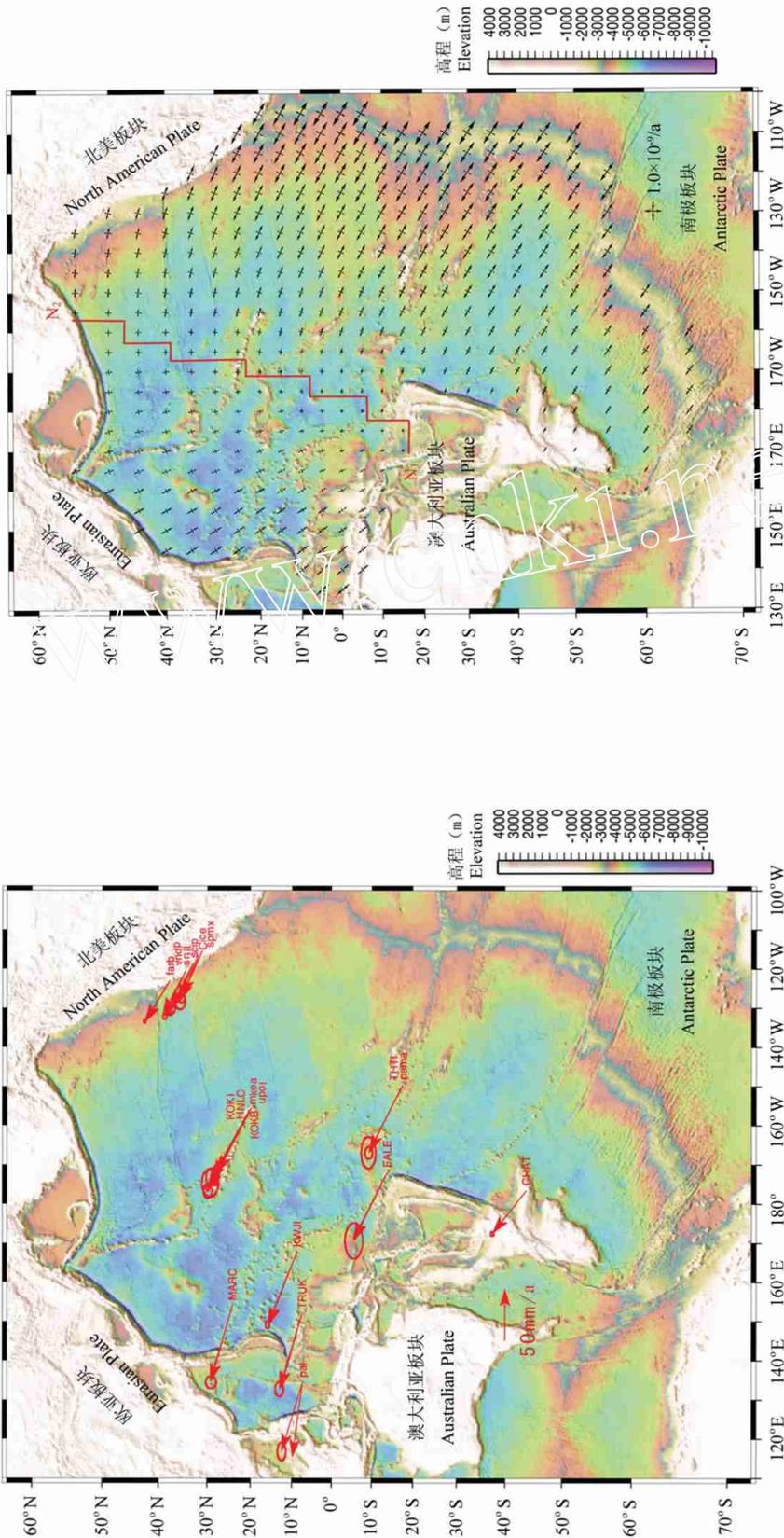


图 1 PCFC 上大地测量站的空间分布和站速度矢量

Fig. 1 Spatial distribution of geodetic sites on the PCFC and site velocity vectors

图 3 PCFC 内部的主应变变场

Fig. 3 Principal strain field within the PCFC

假设: $H_0: S_1^2 < S_2^2, H_1: S_1^2 \geq S_2^2$.

取 $\alpha = 0.1$, 对于两组的检验结果都有 $F < F_{\alpha}$, 因此假设 $S_1^2 < S_2^2$ 成立, 即整体旋转线性应变模型的方差都显著地小于刚体模型的方差.

从图 2 可以看出, 由本文弹性模型得到的站速度残差的分布非常集中, 68.4% 的残差都分布在 1 mm/a 之内 (-1.0 ~ 1.0 mm/a), 与标准正态分布具有很好的一致性. 由 Sella et al 刚体模型得到的残差的分布不太集中, 残差分布在 1 mm/a 范围内的比例为 41.6%, 与标准正态分布存在较大差异. 从这两种模型的残差分布也可以看出, 弹性模型计算的

站速度与实测站速度符合的程度明显地优于刚体模型. 另外, 从图 1 也可以看出, 除了位于板块西边界上的 pal 站、东边界上的 spmx 站外, 用本文弹性模型计算的站速度矢量 (图 1 中用不带误差椭圆的箭头表示的站速度矢量) 与观测的速度矢量 (图 1 中用带误差椭圆的箭头表示的站速度矢量) 符合得都非常好, 这表明用本文模型模拟的站速度与观测的站速度具有很好的一致性.

上述统计结果表明, 整体旋转线性应变运动模型对 PCFC 运动状态的描述在无偏性和有效性两个方面都明显地优于刚体运动模型.

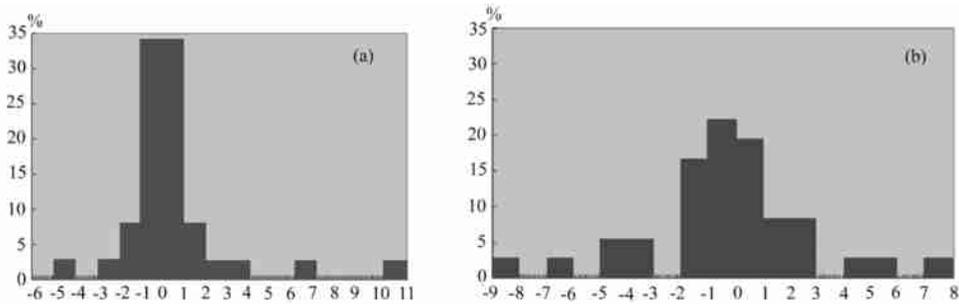


图 2 两种模型残差的分布图

(a) 本文建立的 PCFC 的弹性模型的残差分布; (b) Sella et al. 建立的 PCFC 的刚体模型的残差分布. 横坐标代表残差分布的区间 (残差的单位为 mm/a); 纵坐标代表每个区间的残差占残差总数的百分比.

Fig. 2 Residual distribution of two models

(a) Residual distribution of elastic model of PCFC created in this paper; (b) Residual distribution of rigid model of PCFC created by Sella et al. The abscissa represents the interval of residual distribution, and the ordinate represents the residual percentage of each interval in the total.

如果去掉 Sella et al 提供的 PCFC 上的重复站, 在 PCFC 上只有 19 个站. Sella et al 在建立刚体运动模型时, 选用了其中的 9 个站, 选用率为 47%. 我们在建立整体旋转线性应变运动模型时, 选用了其中的 14 个站, 选用率为 74%, 比刚体运动模型高 27%. 14 个站在 PCFC 上的覆盖面积比 9 个站的覆盖面积大约多 $17.5 \times 10^6 \text{ km}^2$. 上述分析表明, 整体旋转线性应变运动模型描述 PCFC 运动的代表性明显地大于刚体运动模型的.

5 本文模型与其他模型比较

目前, 地学界应用最广的板块运动模型是 NNR - NUVEL1A^[6]. 在最近几年建立的 PCFC 运动模型中, 只有 Zhu et al 和 Prawirodirdjo et al. 的运动模型采用的参考框架是 ITRF2000^[11,12], 这与本文是相同的. 表 4 给出了 NNR - NUVEL1A、Zhu et al、Prawirodirdjo

et al. 和本文模型的旋转参数. 从表 4 可以看出, 3 个大地测量模型的旋转参数是非常接近的, 它们与 NNR - NUVEL1A 模型旋转极的经度和角速度存在一些差异. 3 个大地测量模型旋转极的经度比 NNR - NUVEL1A 旋转极的经度大 $1.6^\circ \sim 3.6^\circ$; 角速度比 NNR - NUVEL1A 大 $0.029^\circ \sim 0.037^\circ/\text{Ma}$. 这可能表示, PCFC 现今的旋转速度与过去 3Ma 的平均旋转速度相比加快了一些. Zhu et al 与 Prawirodirdjo et al 两个模型旋转极的经度是相同的. 本文模型旋转极的经度在 NNR - NUVEL1A 与 Zhu et al、Prawirodirdjo et al 旋转极经度的中间, 与它们的平均值 (108.73°E) 相等. 本文模型的角速度与 Zhu et al 和 Prawirodirdjo et al 模型比较接近, 比 NNR - NUVEL1A 大 $0.037^\circ/\text{Ma}$. 本文模型与 NNR - NUVEL1A、Zhu et al 和 Prawirodirdjo et al 建立的刚体运动模型的主要区别在于, 它不仅可以精确地描述板块的整体旋转运动, 而且还可以精确地估计板块内部的水平形变.

表 4 PCFC 4 个模型的旋转参数
Table 4 Rotation parameters of 4 models of PCFC

模型	ω / (°)	S	ω / (°)	S	ω / (°Ma ⁻¹)	S / (°Ma ⁻¹)	年代	N
NNR - NUVEL1A	107.3		- 63.0		0.641		1994	
Zhu et al.	110.9	0.8	- 64.1	0.6	0.672	0.004	2003	4
Prawir. et al.	110.16	0.59	- 63.83	0.28	0.670	0.003	2004	5
Li et al.	108.93	1.14	- 64.55	0.36	0.678	0.004	2006	14

注: S 、 S 分别为 ω 与 ω 的标准差; S 、 S 分别为旋转的角速度与它的标准差.

6 PCFC 内部的水平形变

从方程(13)可以看出,PCFC 上地壳的运动是板块的整体旋转运动与板块内部变形所产生的运动的复合运动. 如果将 PCFC 上站的观测速度减去由于板块整体旋转产生的运动速度,得到的速度差就是其水平形变的速度. 表 5 给出了 PCFC 上所有站水平形变的速度分量. 从表 5 可以看出,在 PCFC 上,水平形变的分布是不均匀的,但其空间变化是有规律的. 在板块的西北部,15°S 以北和 204.5°E 以西,地壳存在一致的向西形变(在板块西边界的 pal 站和 KOKB 站除外). MARC、TRUK 和 FALE 站存在一致的南西向形变,形变速率为 1.0 ~ 3.4 mm/a; upol、HNLC 和 KOKI 站存在一致的北西向形变,形变速率为 0.8 ~ 3.5 mm/a. 在 204.5°E 以东,地壳存在一致的向东形变(在板块东边界的 spmx 站除外). cice、vndp、shil、scip 和 farb 站存在一致的南东向形变,形变速率为 2.8 ~ 9.1 mm/a;CHAT、pama 和 THTI 站存在一致的北东向形变,形变速率为 1.5 ~ 1.8 mm/a. 204.5°E 以西地区的向西形变与其以东地区存在的较大的南东向形变,反映在 PCFC 内部,存在明显的 NWW - SEE 方向的伸展形变.

表 5 PCFC 上 19 站的水平形变速度

Table 5 Horizontal deformation velocities of 19 sites on PCFC

名称	ω / (°)	ω / (°)	v_e / (mm a ⁻¹)	v_n / (mm a ⁻¹)
pal	7.34	134.48	4.9	5.5
TRUK	7.45	151.89	- 1.3	- 0.8
MARC	24.29	153.98	- 1.8	- 2.9
KWJI	8.722	167.73	0.1	0
FALE	- 13.83	188	- 0.7	- 0.7
KOKI	21.98	200.24	- 0.8	0.2
KOKB	22.126	200.335	1.4	- 0.3
HNLC	21.3	202.14	- 0.3	0.7
upol	20.25	204.12	- 1.9	2.9
mkea	19.801	204.544	0.2	0.2
THTI	- 17.577	210.391	1.5	0.1
pama	- 17.57	210.43	1.6	0.3
CHAT	- 43.956	183.434	1.6	0.8
farb	37.697	237.001	2.4	- 1.4
vndp	34.56	239.38	0.5	- 5
snil	33.25	240.48	2	- 3.5
scip	32.91	241.51	1.7	- 3.2
cice	31.87	243.33	5.3	- 7.4
spxm	31.05	244.53	- 1.8	- 2

7 PCFC 的水平应变场

对方程(13)微分可得到板块应变率张量 ϵ_e 、 ϵ_n 和 ϵ_n 的表达式

$$\epsilon_e = \frac{\partial v_e}{\partial x} = A_0 + \omega_1 x + \omega_3 y, \quad (19)$$

$$\epsilon_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_e}{\partial y} + \frac{\partial v_n}{\partial x} \right) = B_0 + \frac{1}{2} (\omega_1 + \omega_3) x + \frac{1}{2} (\omega_2 + \omega_3) y, \quad (20)$$

$$\epsilon_n = \frac{\partial v_n}{\partial y} = C_0 + \omega_3 x + \omega_2 y. \quad (21)$$

根据 PCFC 整体旋转线性应变运动模型的应变参数 $A_0 \sim \omega_3$ (表 2) 和公式(19) ~ (21) 可计算 PCFC 上任一点的水平应变率张量 ϵ_e 、 ϵ_n 和 ϵ_n , 由此可计算其主压应变率 λ_1 、主张应变率 λ_2 、主压应变的方位角 A_1 . 图 3 绘制了 PCFC 上 5°×5 的主应变场图像. 从图 3 可以看出,PCFC 应变场的空间变化是不均匀的,但其空间变化是有规律的. 折线 $N_1 - N_2$ (它的西南端位于 170°E 与 15°S,东北端位于 203°E 与 55°N) 把 PCFC 板块的水平应变场分为西北与东南两个区. 在西北区,主压应变率大于主张应变率,主压应变占优势. 主压应变轴在折线 $N_1 - N_2$ 附近为 S - N 方向,从 $N_1 - N_2$ 向西主压应变轴逐渐向 NW - SE 方向偏转,到板块的西边界主压应变轴转为 N30°~ 40°W. 主压与主张应变率在 N_1 附近最小,都小于 $0.20 \times 10^{-9}/a$. 从 N_1 附近向西、向北主压与主张应变率都逐渐增加,其中主压应变率比主张应变率增加得快,在板块的西边界主压与主张应变率都达到最大值. 在 135°E 与 5°N 附近主压与主张应变率分别为 $0.89 \times 10^{-9}/a$ 与 $0.37 \times 10^{-9}/a$. 从这里沿边界向北,主压应变率逐渐减小,主张应变率基本上保持不变,到西边界的北端(165°E,55°N)主压与主张应变率分别为 $0.50 \times 10^{-9}/a$ 与 $0.36 \times 10^{-9}/a$. 在板块的东南区,主张应变率大于主压应变率,主张应变占优势. 主压应变轴在 $N_1 - N_2$ 附近为 S - N 方向,从 N_1

- N_2 向东主压应变轴逐渐向 NE - SW 方向偏转,到板块的东边界主压应变轴转为 $N30^\circ \sim 35^\circ E$. 主张与主压应变率从 N_1 附近向东北、东、东南方向逐渐增加,其中主张应变率比主压应变率增加得快得多,到板块的东边界达到最大值. 在 $255^\circ E$ 与 $5^\circ S$ 附近主张与主压应变率分别为 $1.62 \times 10^{-9}/a$ 与 $0.55 \times 10^{-9}/a$,从这里沿边界向北、向南主张与主压应变率都逐渐减小,在 $255^\circ E$ 与 $20^\circ N$ 附近主张与主压应变率分别为 $1.43 \times 10^{-9}/a$ 与 $0.50 \times 10^{-9}/a$,在 $255^\circ E$ 与 $50^\circ S$ 附近,主张与主压应变率分别为 $1.41 \times 10^{-9}/a$ 与 $0.46 \times 10^{-9}/a$.

总观 PCFC 的水平应变场,可以看出它有如下基本特征:在总体上主张应变明显地大于主压应变,主张应变率的平均值为 $0.71 \times 10^{-9}/a$,是主压应变率 ($0.35 \times 10^{-9}/a$) 的 2 倍,在板块的东边界主张应变率是主压应变率的 3 倍;在板块的东南边界,主张应变率最大,主张应变轴为 NWW - SEE 方向,与洋中脊的走向接近于正交,与板块的扩张方向基本一致;在板块的西边界(赤道以北),主压应变率最大,主压应变轴基本上与板块边界走向垂直;在板块的北边界,主压应变轴为 NNW - SSE 或 S - N 方向,基本上与板块边界的走向垂直.

8 讨 论

PCFC 内部的水平形变是明显的,在板块的西北区存在一致的向西形变,北西与南西方向的形变速率分别为 $0.8 \sim 3.5 \text{ mm/a}$ 与 $1.0 \sim 3.4 \text{ mm/a}$;在板块的东南区存在一致的向东形变,北东与南东方向的形变速率分别为 $1.5 \sim 1.8 \text{ mm/a}$ 与 $2.8 \sim 9.1 \text{ mm/a}$. 在整个板块上,主张应变率的平均值为 $0.71 \times 10^{-9}/a$,是主压应变率平均值 ($0.35 \times 10^{-9}/a$) 的两倍,主张应变占绝对优势,因此 PCFC 是一个扩张型板块. 水平应变场的分区与水平形变场的分区是一致的. 在西北区,主压应变率大于主张应变率,主压应变轴为 NW - SE 方向;在东南区,主压应变率小于主张应变率,主压应变轴为 NE - SW 方向.

PCFC 的东南边界是东南太平洋中脊,是扩张型边界,在边界附近的主张应变率最大,主张应变轴基本上与洋中脊的扩张方向一致. 板块的西北边界是 PCFC 相对于欧亚板块和北美板块的俯冲边界,边界附近的主压应变率最大,主压应变轴基本上与 PCFC 的俯冲方向一致. PCFC 应变场空间变化的特征与板块边界动力学的基本特征完全相符.

关于 PCFC 内部的形变问题, Winterer et al 和孙付平等早就有察觉, Winterer et al 根据构造学分析,指出大尺度的张应力正在引起太平洋中部 Huahine 周围地区的形变,并称为“Superswell”^[26]. 孙付平和赵铭在分析全球五大板块上 SLR 站的观测资料时发现,在太平洋中部的 Huahine 地区可能存在较大的局部形变^[27]. 不仅在太平洋板块内部存在形变,一些研究者发现在稳定的澳大利亚和北美大陆内部存在地震活动,并认为这些地震是由于大陆内部弹性应变积累引起的^[16~18]. 在板块内部存在形变可能是一种普遍现象,一个板块在周围板块的作用下,它的整体将发生旋转,它的边缘和内部都将发生形变. 如果一个板块受到周围板块的作用力大,其边界和内部的形变就强烈,比如欧亚板块,在欧亚板块与印度板块汇聚的边界带上和青藏高原及其周围地区存在强烈的形变;如果一个板块受到周围板块的作用力小,其边界和内部的形变就弱,比如 PCFC,与欧亚板块相比,PCFC 内部的形变是比较弱的.

PCFC 内部是存在形变的,本文建立的 PCFC 的整体旋转线性应变的弹性运动模型对 PCFC 现今运动的描述明显地优于 PCFC 的刚体运动模型. 它不仅可逼真地描述板块的现今运动状态(包括水平形变),而且由模型得到的应变场还可以充分反映板块边界的动力学状态.

对于同一个板块,不同研究者所建立的运动模型往往是不同的,除了使用的观测资料和运动模型不同外,他们所采用的站的筛选方案不同也是一个重要因素. 本文提出了一种站筛选和模型参数优化相结合的方案. 这个方案对站的筛选有明确的标准和可操作的筛选程序,可保证站的筛选客观、合理.

我们以前曾推导建立了板内块体的弹性运动方程^[28]. 这个方程的推导是正确的,但在理论上不十分严密,这个方程也可应用于板块. 为了从理论上更严密地建立板块的弹性运动方程,在本文中又重新推导建立了新的板块弹性运动方程. 新方程与原方程在系数的形式上有所不同,但它们是等价的. 用这两个方程对同一个板块分别建立模型,用两个模型计算同一批站的运动速度,得到的站速度是相同的. 用两个模型的应变参数分别计算板块上任一点的应变张量,得到的结果也是相同的.

参考文献 (References)

- [1] Le Pichon X. Seafloor spreading and continental drift. *J. Geophys. Res.*, 1968, 73:3661 ~ 3697

- [2] Chase C G. The N-plate problem of plate tectonics. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1972, **29**: 117 ~ 122
- [3] Minster J B, Jordan T H. Present-day plate motions. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**: 5331 ~ 5354
- [4] DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 1990, **101**: 425 ~ 478
- [5] Argus D F, Gordon R G. No-Net-Rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model Nuvel - 1. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(11): 2039 ~ 2042
- [6] DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**: 2191 ~ 2194
- [7] Sillard P, Altamimi Z, Boucher C. The ITRF96 realization and its associated velocity field. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 3223 ~ 3226
- [8] Zhang Q, Zhu W Y, Xiong Y Q. Global plate motion models, incorporating the velocity field of ITRF96. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**(18): 2813 ~ 2816
- [9] Zhu Y F W, Wang X, Duan W, Wu X, Jiao W. Present-day crustal deformation in China relative to ITRF97 kinematic plate model. *Journal of Geodesy*, 2002, **76**: 216 ~ 225
- [10] Giovanni F Sella, Timothy H Dixon, Ailin Mao. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**, B4, 10.1029/2000JB000033
- [11] Zhu W Y, Fu Y, Li Y, et al. NNR constraint in ITRF2000 and the new global plate motion model NNR-ITRF2000VEL. *Science in China (Series D)*, 2003, **33**(Suppl): 1 ~ 12
- [12] Linette Prawirodirdjo, Yehuda Bock, Cecil H, et al. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, B08405, doi: 10.1029/2003JB002944
- [13] Gordon R G. The plate tectonic approximation: Plate nonrigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1998, **26**: 615 ~ 642
- [14] Burbidge D R. Thin plate neotectonic models of the Australian plate. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109** (B10405), doi: 10.1029/2004JB003156
- [15] Nanjo K Z, Turcotte D L, Shcherbakov R. A model of damage mechanics for the deformation of the continental crust. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110** (B07403), doi: 10.1029/2004JB003438
- [16] Johnstone A C. The seismicity of 'stable continental interiors'. In: Gregersen S, Basham P W eds. Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Post-glacial Rebound. NATO ASI Ser., Ser: C, Vol. 266, Kluwer Acad., Norwell, Mass, 1989. 299 ~ 317
- [17] Johnston A C. Seismotectonics interpretations and conclusions from the stable continental region seismicity database. In: The Earthquakes of Stable Continental Regions. Rep. TR - 102261 - 1, Electr. Power Res. Inst., Palo Alto, Calif, 1994. 1 ~ 102
- [18] Crone A J, Machette M N, Bowman R. Episodic nature of earthquake activity in stable continental regions revealed by palaeoseismicity studies of Australian and North American Quaternary faults. *Aust. J. Earth Sci.*, 1997, **44**: 203 ~ 214
- [19] Bird P, Liu Z. Global finite-element model makes a small contribution to intraplate seismic hazard. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1999, **89**: 1624 ~ 1647
- [20] Standiford M. Neotectonics of southeastern Australia: Linking the Quaternary faulting record with seismicity and in situ stress. In: Hillis R R, Muller D eds. Evolution and Dynamics of the Australian Plate. Spec. Publ. Geol. Soc. Aust. 2003, **22**: 101 ~ 113
- [21] 李延兴, 张静华, 何建坤等. 菲律宾海板块的整体旋转线性应变模型与板内形变 - 应变场. *地球物理学报*, 2006, **49** (5): 1339 ~ 1346
- Li Y X, Zhang J H, He J K, et al. Integral-rotation linear strain model and intraplate deformation-strain field of the Philippine Sea plate. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49** (5): 1339 ~ 1346
- [22] 滕吉文. 固体地球物理学概论. 北京:地震出版社, 2003. 568 ~ 591
- Teng J W. Introduction to Solid Geophysics. Beijing: Seismological Press, 2003. 568 ~ 591
- [23] 金煜, 姜效典. 岩石圈动力学. 北京:科学出版社, 2002. 18 ~ 26
- Jin Y, Jiang X D. Lithospheric Dynamics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002. 18 ~ 26
- [24] 白武明等. 地球动力. 北京:地震出版社, 2003. 1 ~ 72
- Bai W W, et al. Dynamics (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2003. 1 ~ 72
- [25] 李延兴, 黄城, 胡新康等. 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. *地震学报*, 2001, **23** (6): 565 ~ 572
- Li Y X, Huang C, Hu X K, et al. The rigid and elastic-plastic model of the blocks in intra-plate and strain status of principal blocks in the continent of China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23** (6): 565 ~ 572
- [26] Winterer E L, Sandwell D T. Evidence from en echelon crossgrain ridges for tensional cracks in the Plate. *Nature*, 1987, **329**: 534
- [27] 孙付平, 赵铭. 全球五大板块的运动和形变—用激光测距数据导出的站速度分析. *地球物理学报*, 1994, **37** (5): 596 ~ 604
- Sun F P, Zhao M. Study of plate motion and crustal deformation from satellite laser ranging site velocities. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1994, **37** (5): 596 ~ 604
- [28] 李延兴, 张静华, 李智等. 中国大陆及周边地区的水平应变场. *地球物理学报*, 2004, **47** (2): 222 ~ 231
- Li Y X, Zhang J H, Li Z, et al. Horizontal strain field in the Chinese mainland and its surrounding area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47** (2): 222 ~ 231

(本文编辑 胡素芳)