

文章编号: 1001-1595 (2009) 06-0471-06

基于 CGCS2000 的中国地壳水平运动速度场模型研究

蒋志浩<sup>1,2</sup>, 张 鹏<sup>4,1</sup>, 秘金钟<sup>3,4</sup>, 李志才<sup>1</sup>

1. 国家基础地理信息中心, 北京 100044; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 3. 中国测绘科学研究院, 北京 100039; 4. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079

The Model of Crustal Horizontal Movement Based on CGCS2000 Frame

JIANG Zhihao<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>4,1</sup>, BI Jinzhong<sup>3,4</sup>, LI Zhicai<sup>1</sup>

1. National Geomatics Center of china, Beijing 100044, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, china; 3. Chinese Academic of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China; 4. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Firstly, the processing strategy of obtaining the coordinate and velocity based on the CGCS 2000 (Chinese geocentric 3D coordinate system) is introduced. Secondly, a new plates displacement reference frame of Chinese mainland subjected to the regional No-Net-Rotation (NNR) conditions is researched, The results inferred the position of the Euler rotation pole of the Chinese mainland plates is (64.77°N, 94.093°E) and its rate is 0.299 7 (°)/Ma based on the CGCS 2000. Finally, Crustal movement velocity field of Chinese mainland are inferred through the precise result of CORS and national GPS network, and the model of crustal deformation velocity field has been established based on the adoptions of finite element interpolation method. On which, the regional crustal deformation characters of China mainland have been proximately analyzed. Based on the study of this paper, the precision, dynamics and reliability of CGCS 2000 would be further renewed and maintained, further more the basic data with high spatial-temporal resolution and scientific methods are referred to study characteristics of Chinese mainland crustal movement.

Key words: CGCS 2000; Chinese crustal movement; velocity field model

摘 要: 首先介绍通过数据处理获取 CGCS 2000(中国大地坐标系 2000)下点位坐标和速度场的方法, 其次研究分析在 CGCS 2000 下建立满足中国大陆区域无整体旋转条件的中国大陆板块位移基准方法, 计算得到的 CGCS 2000 下中国大陆区域的欧拉角速度是 0.2997 (°)/Ma, 旋转极的位置为 (64.77°N, 94.093°E), 最后利用计算获取的 CGCS 2000 下的国家高精度 GPS 网的坐标和速度值, 采用有限元插值方法建立中国大陆区域地壳运动速度场模型, 并初步分析 CGCS 2000 下的中国大陆地壳运动整体趋势。通过本文的研究可以进一步维护和精化中国 CGCS 2000 的稳定性、动态性和精确性, 也可对 CGCS 2000 坐标参考框架下的中国区域地壳运动特征的研究提供科学方法和高时空分辨率的基础数据。

关键词: CGCS 2000; 中国地壳水平运动; 速度场模型

中图分类号: P22 文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划 (2007AA12Z316, 2007AA12Z313); 国家 863 计划 (2006AA12Z323) 子项目“基于现代空间技术的高精度时空基准”

1 前 言

我国于 2008 年 7 月 1 日启用了中国地心坐标系 2000 (CGCS 2000) 和相应的坐标参考框架, CGCS 2000 参考框架是以 ITRF97 参考框架为基础, 与 GNSS 观测系统一致的参考框架, 参考历元为 2000 年 1 月 1 日。它由全球导航卫星系统国家级连续运行站网(国家 CORS 网)和国家高精度大地控制网这两部分组成。CGCS 2000 的启动实现了我国区域坐标参考框架的可靠性、

精确性和一致性。但是由于我国 CGCS 2000 中的框架点未被赋予点位速度场信息, 没有反映出我国区域地壳水平运动年变化量, 所以不能完全表述我国地心坐标参考框架的动态性和现实性, 也不能满足用户高精度定位的需要。

20 世纪末以来, 国内各部门分别建立了用于不同目的 CORS 网, CORS 网系统由连续运行的 GNSS 观测站、GNSS 数据处理中心、数据传输系统、数据播发系统、用户应用系统五个部分组成。国家测绘局 CORS 网的建设始于 1993 年,

“中国地壳运动观测网络”中的基准网也于1998年正式运行。国家 CORS 网包括了国家测绘局 CORS 网和“中国地壳运动观测网络”的基准网, 目前为止共计 31 个 CORS 站。国家 CORS 网的近十年的连续观测成果和国家高精度 GPS 网的多期观测成果不仅为我国地心坐标框架的建立、维护和更新提供了高精度、高时空分辨率的丰富的数据源, 而且也是实现我国地心坐标参考框架的动态性和现势性的基本条件。本文中提到的

国家高精度 GPS 网是由“中国地壳运动观测网络”的基本网和区域网组成, 其中基本网由 56 个 GPS 站组成, 每年进行整网的复测, 每期整网同步观测 8 天, 目前共完成了 6 次观测。区域网由 1 000 个 GPS 站组成, 每两年观测一次, 每一区域站观测 4 天, 目前共完成了 4 次观测。国家 CORS 网数据和国家高精度 GPS 网的点位分布见图 1。

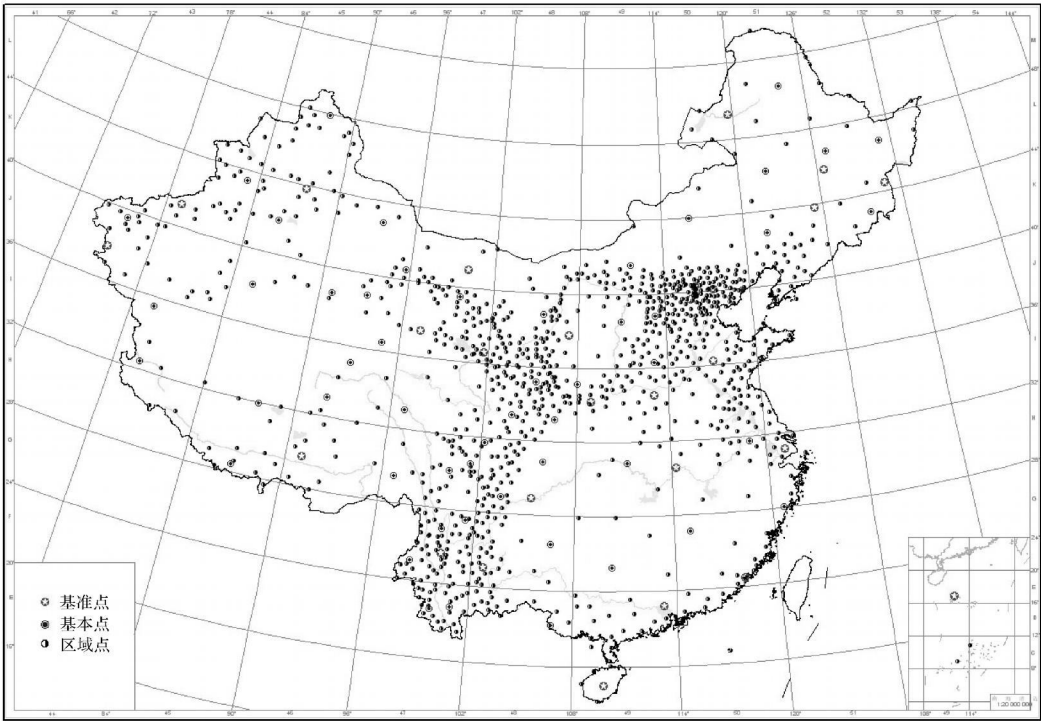


图 1 国内 CORS 网点和高精度 GPS 点分布图  
Fig.1 The map of Chinese CORS network and national GPS network

本文首先介绍获取 CGCS 2000 下 GPS 站坐标和速度场的数据处理方法, 其次对实现区域无整体旋转条件的两种方法进行比较分析, 建立了在 CGCS 2000 下满足无整体旋转条件的中国大陆区域地壳运动背景场, 并以此作为我国大陆区域地壳位移基准, 利用计算获取的 CGCS 2000 下的国家高精度 GPS 网的坐标和速度值, 采用有限元插值方法建立了我国大陆地壳运动速度场模型, 并初步分析了 CGCS 2000 下的我国大陆地壳运动整体趋势。

2 数据处理

本文对国家 CORS 网数据和国家高精度 GPS 网的数据处理采用四个步骤。第一步, 利用

GAMIT 软件获得国内 CORS 网点和国家高精度 GPS 网坐标和卫星轨道的单日松弛解; 第二步, 利用 GLOBK 软件将获得的国内 CORS 网单日松弛解结果和全球 IGS 连续运行站的松弛解合并, 得到一个包含国内 CORS 网和 IGS 站的单日松弛解结果; 第三步, 利用 GLOBK 软件平差处理上一步合并后的单日松弛解, 估算国内 CORS 网测站坐标和速度值, 在估算国内 CORS 网站坐标和速度值时采用了国际 IGS 站在 ITRF1997 的坐标和速度值作为约束, 选取方法见参考文献[1]; 第四步, 利用 GLOBK 软件将国内 CORS 网点位和国家高精度 GPS 网进行统一平差处理, 采用相似变换的方法将国家高精度 GPS 网成果纳入到 CGCS 2000 坐标框架中, 求解出国家高精度 GPS

网的坐标和速度值, 做相似变换时采用了国家 CORS 网在 CGCS 2000 下坐标成果。

采用上述方法对国家 CORS 网站近 10 年的连续观测成果和国家高精度 GPS 网 1999 年至 2007 年多期重复观测数据进行了精细处理, 处理中根据点位重复性检验结果对质量较差的数据进行了剔除。计算得到的 CORS 站坐标水平方向相对精度优于 2 mm, 垂直方向相对精度优于 5 mm。CORS 站速度场水平方向相对精度优于 1 mm, 垂直方向相对精度优于 2 mm。CORS 网基线精度为  $10^{-9}$ 。国家高精度 GPS 网水平方向相对精度优于 3 mm, 垂直方向相对精度优于 10 mm, 全网基线相对精度达  $3 \times 10^{-9}$ 。通过 CORS 网站和国家高精度 GPS 网联合平差最终获取了中国大陆精度高、范围广(覆盖了中国大陆)、观测点数多(1 081 个点)的实测坐标和速度场值。上述结果都达到了较高的精度, 为维持我国 CGCS 2000 的稳定性、动态性和精确性提供了保障, 也为建立我国大陆区域地壳运动速度场模型奠定了基础。

3 我国大陆区域地壳运动速度场模型的建立

目前国际、国内不少学者采用不同的方法建立了中国大陆区域地壳运动速度场。符养等利用攀登项目 GPS 监测网和中国地壳运动观测网络 GPS 观测数据研究了现今中国大陆相对于 ITRF97 模型的形变, 刘经南等用多面函数法对中国区域水平运动进行了数字模拟<sup>[2]</sup>, 杨少敏等采用双三次样条函数建立了中国大陆构造形变场<sup>[3]</sup>。上述学者均给出了在国际地心坐标参考框架下的中国大陆区域地壳运动的趋势, 获取了纯数学意义的水平运动速度模型, 为该领域的深入研究奠定了理论基础。

上述学者在建立中国区域速度场模型时, 所选取的背景场即位移基准大都来源于全球的板块运动模型, 或者采用欧亚块体的运动特征代替中国大陆块体的运动特征, 没有考虑中国大陆块体运动特征个性差异, 也没有考虑中国区域无整体旋转基准。从研究方法而言, 上述学者的拟合方法对已知点均匀分布的要求较高, 考虑到目前我国高精度 GPS 网的分布情况, 认为采用有限元插值方法是建立我国区域速度场模型的一种相对较好的数学方法。

3.1 我国大陆板块位移基准的建立

建立我国 CGCS 2000 框架时直接采用 ITRF 下求得的测站速度场, 会存在一些问题, 因为 ITRF 2000 框架的位移基准模型是 NNR-NUVEL1A 模型, 该模型中的地壳无整体旋转 (NNR) 条件只是解决了全球板块无整体运动问题, 但仍包含区域地壳运动的整体运动信息。在建立区域地心坐标参考系的研究中, 应当采用实测的区域 NNR 模型来替代地球物理模型, 从而更准确地满足区域无整体旋转这个条件。本文通过数据处理获得了精确的国家 CORS 网 31 站的坐标和速度场值, 并采用坐标重复性经验方法, 选取了站址稳定、结果可靠的国家 CORS 网站, 在此基础上采用下述两种方法分别建立了满足我国大陆区域无整体旋转条件的我国大陆板块位移基准。

3.1.1 欧拉矢量模型

为确定我国大陆板块位移基准, 首先把中国大陆板块当作刚性体, 估算了中国大陆区域整体运动的欧拉极方向和旋转速率; 其次因为板块运动主要反映在站点的水平速度之中, 采用国家 CORS 站的水平分量(东向速度  $v_e$  和北向速度  $v_n$ )来求解我国大陆板块运动欧拉矢量  $\omega^{[3]}$ 。

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ \sin \lambda & -\cos \lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $v_e$ 、 $v_n$  是板块上一点东向与北向速度;  $r$  为地球半径;  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  为板块的欧拉矢量;  $\varphi$  是地理坐标纬度;  $\lambda$  是地理坐标经度。

如果已知一定数量的点的位置坐标及速度, 便可以按式(1)求出欧拉矢量  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$ 。欧拉矢量球面表示式为  $(\Omega \ \lambda \ \phi)$ ,  $\lambda$  代表欧拉极经度,  $\phi$  代表欧拉极纬度。

$$\left. \begin{aligned} \Omega &= \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \\ \lambda &= \tan^{-1} \frac{\omega_y}{\omega_x} \\ \phi &= \tan^{-1} \frac{\omega_z}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

按误差传播率可得  $(\Omega \ \lambda \ \phi)$  的中误差

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\Omega &= \sqrt{\omega_x^2 \sigma_{\omega_x}^2 + \omega_y^2 \sigma_{\omega_y}^2 + \omega_z^2 \sigma_{\omega_z}^2} / \Omega \\ \sigma_\lambda &= \sqrt{\omega_x^2 \sigma_{\omega_x}^2 + \omega_y^2 \sigma_{\omega_y}^2} / (\omega_x^2 + \omega_y^2) \\ \sigma_\phi &= \sqrt{(\omega_x^2 + \omega_y^2) \sigma_{\omega_z}^2 + \frac{\omega_z^2}{\omega_x^2 + \omega_y^2} (\omega_x^2 \sigma_{\omega_x}^2 + \omega_y^2 \sigma_{\omega_y}^2)} / \Omega^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

表 1 提供了几种地壳运动模型的比较, 可以看出, 本文的欧拉矢量计算值与 NNR-NUVEL1A、Sillard、Larson 等全球板块运动模型所提供的欧亚板块的欧拉极方向和旋转速率趋势上基本一致, 但也存在着一些差异。本文所建立的中国大陆区域的欧拉运动矢量是局部的, 数据源采用的是我国区域内的国家 CORS 网点, 与其他几种板块运动模型所用的数据源不同, 且 NNR-NUVEL1A 等所建立的整个欧亚块体的欧拉运动矢量是广域的, 因而产生这种差异也是可以理解的。

表 1 几种地壳运动模型的比较

Tab. 1 The comparison of models in several crustal movement

模型	$\varphi/(^{\circ})$	$\lambda/(^{\circ})$	$\Omega/10^{-6}(^{\circ})\ a^{-1}$	适用区域
NNR-NUVEL1A	50.6	-112.4	0.23	欧亚块体
Sillard	48.6±3.2	-120.5±2.82	0.207±0.006	欧亚块体
Larson	56.3±4.3	-102.8±4.1	0.26±0.020	欧亚块体
熊文清、朱文耀等	37.2±1.1	-118.3±3.2	0.206±0.004	欧亚块体
本文计算值	64.77±1.545	-94.093±3.76	0.2997±0.007	区域块体

3.1.2 坐标相似变换方法

由于国家 CORS 网点有多年长期观测数据和精确的 CGCS 2000 框架下的坐标和速度值, 因此可以得到国家 CORS 网点在任何历元下坐标值。做相似变换时选取国家 CORS 网点在 2000.0 历元下的坐标值和 2008.0 历元下坐标值。对这两组坐标值做相似变换求得转换参数。并利用求得的转换参数对高精度 GPS 网的无基准解进行框架转换, 得到了点位在 CGCS 2000 下的点位坐标和速度场值, 求得的速度场值中不包括我国大陆板块运动的整体趋势信息, 可以称作是在我国大陆板块位移基准下的速度值。

3.1.3 不同方法得到的速度场值的比较

为研究分析上述方法在建立我国大陆板块位移基准中的可靠性和合理性, 分别求得在我国大陆板块位移基准和 NNR-NUVEL1A 位移基准下的国家 CORS 网站速度场。图 2 表示了用三种方法求得的国家 CORS 站运动速度值,  $\rightarrow$  代表相似变换方法求得的中国大陆区域背景场下运动

速度,  $\rightarrow$  代表用欧拉矢量模型求得的大陆板块位移基准下运动速度,  $\rightarrow$  代表在 NNR-NUVEL1A 位移基准下速度场。从图 2 可以看出采用欧拉矢量模型和相似变换方法求得的速度场有很好的-致性。我国大陆板块位移基准下国家 CORS 点位的速度矢量方向呈由西往东逐步减弱的北东向旋转变-化, 速度矢量数值上呈由东到西逐步减弱的趋势, 反应中国大陆构造运动西强东弱的整体性运动趋势。与 NNR-NUVEL1A 位移基准下速度场相比前者在数值上要小, 可见本文建立的我国大陆板块位移基准对中国大陆地壳运动整体趋势反映得更彻底。

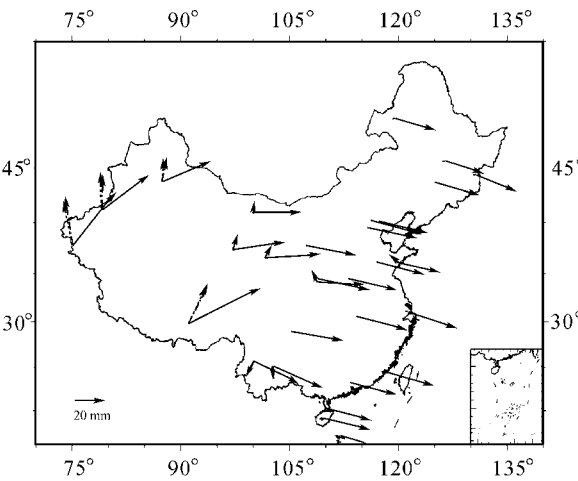


图 2 用不同方法求得的国家 CORS 站速度场比较  
Fig. 2 The comparison of velocity of Chinese CORS derived from several models

3.2 中国大陆地壳运动速度场

在建立的满足我国大陆区域无整体旋转条件的大陆板块位移基准基础上, 利用计算获取的 CGCS 2000 下的国家高精度 GPS 网的坐标和速度值, 得到了中国大陆区域水平运动速度场, 见图 3。由于采用了不同的板块位移基准, 求出的我国区域地壳运动速度场存在明显差别。以黑龙江块体为例, 在 NNR-NUVEL1A 板块位移基准下, 该块体运动趋势为东向运动, 而在我国大陆区域位移基准下, 其运动趋势为西向运动, 这与中国东部由于太平洋板块向欧亚板块的俯冲和日本海的弧形扩张, 而受到西向的推挤力是完全相符的。从力源的角度看中国大陆板块位移基准下的中国地壳运动速度场图像更符合实际。

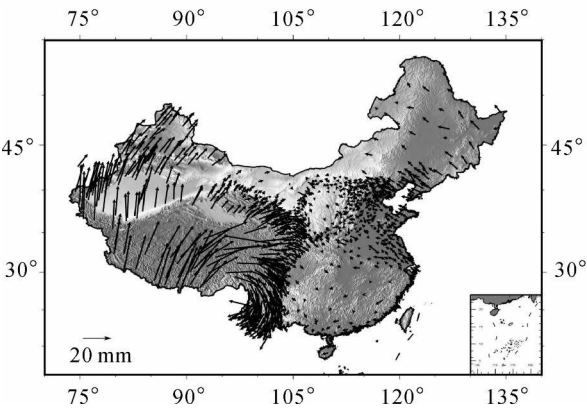


图 3 中国大陆板块位移基准下的地壳水平运动速度场

Fig. 3 The velocity field based on the Chinese plates motion reference frame

3.3 中国大陆地壳运动速度场模型的建立

由于目前国内高精度 GPS 网点数目分布不均匀,通过实测 GPS 网点所反映的中国地壳运动图像是不完整的,它反映的我国大陆区域内动态信息也是不完整的。基于这样的原因,有必要利用现有的区域背景场下的速度场,建立一个分布均匀、有实用价值的中国地壳运动速度场模型,以此进一步维持和精化 CGCS 2000 坐标框架的动态性和现势性。

目前国际、国内建立地壳运动速度场模型的方法有多项式拟合法、双三次样条函数拟合法、多面函数拟合法等。利用上述方法在建立速度场模型时要求拟合区域内的块体为刚性体,如果拟合块体内部具有弹性特征,上述方法建立的速度场模型就会对区域内形变有不准确的表达。目前有些学者依据断裂带分布划分了我国大陆 21 个块体,在此基础上进行速度场模型拟合,但是仍然不能保证每一块体内部都是刚性的,并且如何合理地划分块体也一直存在争议。本文采用有限元插值方法<sup>[4]</sup>(三角形三次多项式插值算法)建立了中国地壳运动速度场模型,有限元插值方法的基本思想是将连续的求解区域离散成一组有限个且按一定方式相互联结在一起的单元的组合体,由于有限元方法对求解区域进行了最小优化,所以对单元内块体的刚弹性特征可以近似忽略。各单元能按不同的联结方式进行组合,且单元本身又有不同的形状,因此可以最大程度上模型化几何形状复杂的求解域,同时使用每一个单元内的近似函数来分片地表示全求解域上的待求未知场函

数。单元内的近似函数由未知场函数及其导数在单元各个结点的数值与其插值函数来表达。本文首先按空圆法则构造 Delaunary 三角网,并在 Delaunary 三角网的基础上,采用三次多项式插值算法,内插出球面上  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  规则格网点上的地壳运动速度值,见图 4。

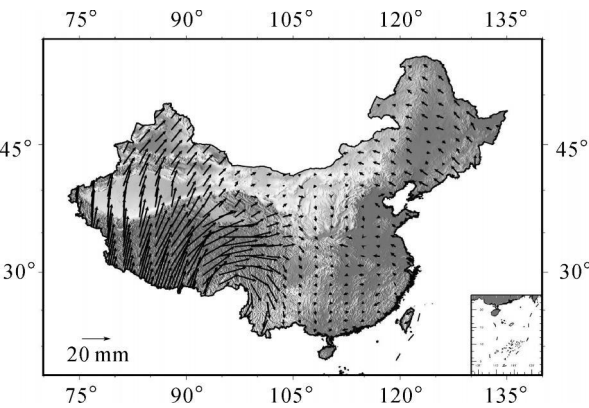


图 4 中国大陆区域地壳水平运动速度场模型

Fig. 4 The model of crustal movement velocity field in Chinese mainland

图 4 表示中国大陆区域背景场下的  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  地壳运动速度场模型图像。图中箭头长度代表运动速度大小,箭头方向代表运动方向,实线表示断层。图 4 整体合成出反映中国大陆地壳水平运动速度场模型图像,比较直观、清楚地描述了我 国大陆西部与东部、南部与北部之间速度场相对变化的大趋势。该模型的建立能够为研究全国范围内的地块运动提供有用的先验信息,也能为国内 GPS 网的数据处理和平差提供较高精度的测站速度改正信息。速度场模型描述了我 国区域地壳运动特征:

1. 总体趋势由南往北、由西往东速度场矢量逐渐递减。
2. 运动方向变化描述。东西部运动方向以东经  $90^{\circ}$  左右为界差异明显。西部地区构造变形具有北向逐渐转向北北东向转移的特点,而东部地区北到南表现出北东向到近东西向再到东南向旋转的趋势,向东的运动分量较大。喜马拉雅构造东部地区表现出,近似  $180^{\circ}$  的顺时针旋转,川滇地区运动表现出南东-南南东-南南西趋势,构成了一个分布式的左旋剪切带。
3. 运动量变化描述。东西部运动量以南北地震带(东经  $104^{\circ}$ ) 为界,西部地区地壳水平变形速率远大于东部地区。在我国大陆的东部,由南

往北速度场矢量是逐渐递增的;在我国大陆西部的南半部,由西往东速度场矢量也是逐渐递增的。拟合 GPS 速度观测值得到的速度场模型与实测速度场的分析结论基本一致,不过模拟结果具有更均匀的空间分布和分辨率。

4 结 论

1. 采用了国家 CORS 网络多年连续观测数据和国家高精度 GPS 网多期复测成果,首先通过数据处理获得了 CGCS 2000 下精确的站点坐标和速度场成果,其次研究了在 CGCS 2000 下满足我国区域无整体旋转条件的板块位移基准的建立方法,最后在研究分析国内外相关领域研究成果的基础上,采用有限元插值方法建立了我国区域速度场模型,为进一步维护和精化我国 CGCS 2000 坐标框架的稳定性、动态性和精确性提供了科学方法。

2. 分别利用欧拉矢量法和相似变换方法建立了满足区域无整体旋转条件的我国大陆板块位移基准,通过对两种方法的比较分析进一步验证了合理性,在此基础上建立的中国大陆地壳运动速度场模型也是可靠的。

3. 计算得到的“中国大陆地壳运动速度场模型”,可为国内 GPS 网的数据处理和平差提供较高精度的测站速度改正信息,同时本文的研究成果也可对 CGCS 2000 坐标参考框架下的我国大陆板块运动特征的研究提供科学方法和高时空分辨率的基础数据。

4. 对描述中国大陆块体的局部运动特征而言,本文采用我国 CORS 网实测数据建立的大陆板块位移基准优于 NNR-NUVEL1A 全球板块位移基准,得到的中国大陆区域背景场下的运动图像也与现今最新的地学解释极为一致。

参考文献:

[1] BI Jinzhong, JIANG Zhihao, ZHANG Peng, et al. On Framework Sites Selection for Unite-Processing of IGS CORS and Domestic CORS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(8): 704-706. (秘金钟,蒋志浩,张鹏,等. IGS 跟踪站与国内跟踪站联

合处理的框架点选择研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(8): 704-706.)

[2] LIU Jingnan, SHI Chuang, YAO Yibin, et al. Hardy Function Interpolation and Its Applications to the Establishment of Crustal Movement Speed Field[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(12): 500-508. (刘经南,施闯,姚宜斌,等. 多面函数拟合法及其在建立中国地壳平面运动速度场模型中的应用研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(12): 500-508.)

[3] YANG Shaomin, YO U Xinzhaoh, DU Ruilin, et al. Contemporary Horizontal Tectonic Deformation Fields in China Inversed from GPS Observations[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(1): 16-30. (杨少敏,游新兆,杜瑞林,等. 用双三次样条函数和 GPS 资料反演现今中国大陆构造形变场[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(1): 16-30.)

[4] BARBER C B, DOBKIN D P, HUHDANPAA H. The Quickhull Algorithm for Convex Hulls[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 1996, 22(4): 469-483.

[5] JIANG Zhihao, ZHANG Peng, LI Yulin, et al. Analysis of Crustal Movement in Northern Qinghai-Tibet Plateau Based on Multiple GPS Data in Xinjiang[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(8): 417-421. (蒋志浩,张鹏,李毓麟,等. 基于新疆 GPS 联测资料分析青藏高原北缘地壳运动规律[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(8): 417-421.)

[6] ZHANG Peng, JIANG Zhihao, BI Jinzhong, et al. Data Processing and Time Series Analysis for GPS Fiducial Stations in China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(3): 251-254. (张鹏,蒋志浩,秘金钟,等. 我国基准站数据处理与时间序列特征分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(3): 251-254.)

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2009-04-01  
修回日期: 2009-08-24  
第一作者简介: 蒋志浩(1972—),男,硕士,高级工程师,目前主要从事 GNSS 数据处理与成果分析工作。  
Email: zhjiang@nsdi.gov.cn  
First author: JIANG Zhihao(1972—), male, master of science, senior engineer, working in GNSS data processing and result analysis.  
Email: zhjiang@nsdi.gov.cn