

文章编号: 1000-050X(2001)03-0189-07

文献标识码: A

# 利用局部复测 GPS 网研究中国大陆块体 现今地壳运动速度场

刘经南<sup>1</sup> 施 阖<sup>2</sup> 许才军<sup>2</sup> 姜卫平<sup>2</sup>

(1 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

(2 武汉大学 GPS 工程技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 利用 1992 年以来我国进行的 6 项不同规模高精度 GPS 地壳监测网的资料, 采用统一的数据处理策略, 重新进行了数据处理, 并统一进行了平差, 归算到相同的 ITRF97 坐标框架基准之下, 获得了中国目前覆盖最广、测站最多的一幅完整的、框架统一的 GPS 地壳运动图像和速度场, 并对结果作了初步的地学解释。

**关键词:** GPS; 大陆块体; 地壳运动; 速度场

中图法分类号: P228.42; P227

中国大陆地处欧亚板块的东南部, 其特有的板块构造位置及长期复杂演化的岩石层构造, 使得大陆岩石层被分割成若干块体, 主要的构造变形发生在这些块体边界的断裂带、褶皱带和断陷带上, 而块体内部相对变形较小。沿着块体边缘大多是地震活跃带, 因此研究中国大陆块体的运动规律和相对变形一直是地学界关注的热点。依据板块的会聚速率、上新世夷平面抬升幅度和断裂的滑动速率, 可以估算中国大陆西部各褶皱山系的缩短速率, 推导出各块体相对西伯利亚地块的运动速率(丁国瑜等, 1986), 进一步根据我国活断层滑动速率, 运用板块几何学的方法, 拟合了我国及我国邻区现代地块运动的欧拉极和角速度, 进而算出各地块内部各点平均运动速度矢量(洪汉净等, 1998), 然而这些都是在地质尺度上的平均值。以 GPS 为代表的空间大地测量, 以其高精度、全天候、低成本和机动性强等特点, 成为监测地壳运动以及进行地球动力学研究的有力手段。自 1992 年以来, 我国先后建立了多个大规模的高精度 GPS 地壳形变监测网, 包括国家高精度 GPS A 级网、中国地壳形变监测网、青藏高原地壳形变监测网、华北网、东南沿海 GPS 网、新疆网等, 得到了各单个块体或区域相对于某一 ITRF 框架的运动图像和相对运动图像(刘经南等, 1998; 李延兴等, 1997; 邵占英等, 1999)。然而, 中国大陆还

缺乏一个较为完整的各主要块体基于 GPS 监测的整体运动图像。此外, 这些 GPS 网分别由不同的单位完成作业和数据分析处理, 数据处理方法和分析所采用的基准不同, 使各 GPS 网所单独建立的地壳运动图像不尽相同, 影响到对 GPS 观测资料的充分利用和正确的地学解释。

## 1 采用的中国 GPS 地壳运动监测网的情况

表 1 给出了这次计算中所采用的我国自 1992 年以来建立的规模较大的 GPS 地壳形变监测网的情况。

## 2 GPS 网数据处理策略及框架统一的站速度场的确定原则和算法

上述 6 个 GPS 监测网, 共 14 期独立会战网的 GPS 数据处理, 按以下步骤求得在统一参考框架下的全国覆盖的站速度场成果:

- ① 采用统一的基线解算策略完成单天解;
- ② 在统一的基准下进行各期会战网的平差;
- ③ 分别求出各 GPS 监测网的站速度场;
- ④ 根据各 GPS 监测网的站速度场, 求全国统一的站速度场。

表 1 我国大规模 GPS 地壳形变监测网统计

Tab. 1 Statistics of Large-scale GPS Crustal Deformation Monitoring Network in China

网名	会战网 测期	观测 天数	观测 站数	组织作业单位 或项目名
国家高精度 GPS A 级网	1992	16	28	国家测绘局
	1996	10	29	国家测绘局
中国地壳运动 GPS 监测网	1994	12	22	科技部攀登计划
	1996	7	23	科技部攀登计划
青藏高原 GPS 地壳形变监测网	1993	18	12	武汉测绘科技大学
	1995	16	15	武汉测绘科技大学
	1997	12	15	武汉测绘科技大学
华北地区 GPS 地区运动监测网	1995	94	192	国家地震局
	1996	50	100	国家地震局
东南沿海 GPS 网	1995	13	10	国家自然科学基金委与国家地震局
	1997	8	12	国家自然科学基金委与国家地震局
	1995	10	5	国家测绘局
新疆地壳运动 GPS 监测网	1996	39	10	国家测绘局
	1997	39	11	国家测绘局

## 2.1 GPS 单天解的数据处理策略

各期会战网单天解的基线处理采用了统一的基线解算策略。

① 基线解算软件: 采用 GAMIT Ver 9.74。

② 卫星星历和地球自转参数(EOP): 采用观测瞬时历元的 IGS 综合精密星历, 早期的观测数据采用瞬时历元的 CODE 或 SIO 精密星历; EOP 采用各精密星历所对应的地球自转参数(表 2)。

③ 地面基准站: 采用中国及周边地区的 IGS 站, 其坐标采用 IERS 所提供的、与瞬时历元精密星历相对应的 ITRF 框架下的站坐标和站速度(表 2)。

## 2.2 统一基准下的各期会战网平差

各期会战网基线解的坐标参考框架不尽相同, 加上不同时期观测条件、作业方法、观测时间段选取, 以及 IGS 基准站选取等因素的差异, 将造成各期会战网结果之间的系统性误差。为了消除这种系统误差, 将各期会战网的基线解在统一的坐标框架基准下进行整体平差, 并对系统误差采用附加参数的方法加以估计。

各期会战网的平差策如下。

① 平差软件: 采用 GPS 网平差与形变分析软件 PowerADJ Ver. 3.3。

② 平差采用的观测量: 采用 GAMIT 软件计算的单天解的测站坐标化算为基线向量及相应的全协方差矩阵。

③ 平差的基准站选取: 国内及周边地区的

IGS 站, 并作为固定坐标基准。

④ 基准站的坐标框架和历元基准: 取各 IGS 站在 ITRF97 框架下的站坐标和相应的站速度, 然后化算为各期会战网的观测瞬时历元时的坐标。

⑤ 平差模型: 采用附加尺度(SCL)和旋转( $R_X, R_Y, R_Z$ )4 个未知系统误差参数的最小二乘平差法。这里引入旋转误差参数既吸收了网平差时的框架基准与基线解算时的框架间的定向系统误差, 也吸收了由于两者间可能采用了不同板块运动模型或速度场引起的板块运动模型化误差, 这一措施也一定程度上吸收了起算点松弛度不准确的影响。平差中对于求出的系统误差参数进行  $\chi^2$  检验和  $t$  检验, 以消除不显著的参数。然后重新按剩余的系统误差参数进行平差, 直至所有参数是显著的。

表 2 给出了各期会战网基线解算和平差的基本信息统计。

通过平差, 将各期会战网的成果统计归算到 ITRF97 框架下。表 3 给出了各期会战网观测量相对于平差基准的系统误差参数统计, 其中青藏高原 GPS 地壳形变监测网和东南沿海 GPS 网测区范围较小, 在基准解算时采用的 IGS 站少于 3 个, 平差时未估计其系统误差参数。

## 2.3 各 GPS 监测网的速度场图像

据统一基准下的各期会战网的平差结果, 按坐标求差的方法分别求出各形变监测网 GPS 测站在 ITRF97 框架下的速度场。图 1 给出了各 GPS 形变监测网求出的速度场图像。可以看出, 经过统一基准平差后的各 GPS 监测网求出的同一测站, 速度具有很好的一致性, 但在一些测站上, 特别是西部的监测网, 同一测站各不同监测网得到的速率方向有一些差异, 最大的接近  $20^\circ$ 。

## 2.4 各网速度场的统一与转换

由于通过各形变监测网确定的速度场都统一到了 ITRF97 框架下, 因而对于由不同监测网确定的同一测站的两次测站速率方向不一致的问题, 笔者认为, 在网平差中引入尺度和 3 个旋转参数后, 已经吸收了大部分的基准不一致和板块运动模型不一致引起的测站位移, 这种速率方向的不一致主要是某些未能模型化的系统误差和偶然误差引起的, 因此可采用加权平均的近似处理方法来确定统一的速度场。图 2 是经统一加权处理后的速度场图像(其中椭圆为平均速度的置信误差椭圆), 其坐标参考框架为 ITRF97, 图中细线是根据 NNR-NUVEL1A 模型求出的站速度场。

表 2 各 GPS 网数据处理中的基本信息统计

Tab. 2 Statistics of Basic Information in Data Processing of Each GPS Network

网名	会战网 测期	基线解算采用的基准			各期会战网的平差基准	
		精密星历 和 EOP	卫星星历和基准站 的坐标参考框架	观测瞬时 历元	基准站的坐标 参考框架	历元
国家高精度 GPS A 级网	1992	CODE	IT RF91	1992. 56	IT RF97	1992. 56
	1996	IGS	IT RF93	1996. 37	IT RF97	1996. 37
中国地壳运动 GPS 监测网	1994	IGS	IT RF92	1994. 65	IT RF97	1994. 65
	1996	IGS	IT RF94	1996. 58	IT RF97	1996. 58
青藏高原 GPS 地壳形变监测网	1993	SIO	IT RF93	1993. 58	IT RF97	1993. 58
	1995	IGS	IT RF93	1995. 47	IT RF97	1995. 47
	1997	IGS	IT RF94	1997. 46	IT RF97	1997. 46
华北地区 GPS 地壳运动监测网	1995	IGS	IT RF93	1995. 62	IT RF97	1995. 62
	1996	IGS	IT RF94	1996. 83	IT RF97	1996. 83
东南沿海 GPS 网	1995	IGS	IT RF93	1995. 96	IT RF97	1995. 96
	1997	IGS	IT RF94	1997. 93	IT RF97	1997. 93
新疆地壳运动 GPS 监测网	1995	IGS	IT RF93	1995. 62	IT RF97	1995. 62
	1996	IGS	IT RF94	1996. 69	IT RF97	1996. 69
	1997	IGS	IT RF94	1997. 74	IT RF97	1997. 74

表 3 各 GPS 网系统误差参数统计

Tab. 3 Statistics of the Systematical Error Parameters of Each GPS Network

网名	会战网 测期	相对于平差基准的系统误差参数及其精度			
		$R_x/\text{RMS}$ / mas	$R_y/\text{RMS}$ / mas	$R_z/\text{RMS}$ / mas	$SCL/\text{RMS}$ $/ 10^{-8}$
国家高精度 GPS A 级网	1992	0. 95/ 0. 06	- 0. 93/ 0. 06	- 0. 93/ 0. 07	4. 2/ 0. 6
	1996	0. 95/ 0. 24	不显著	0. 99/ 0. 30	11. 8/ 1. 3
中国地壳运动 GPS 监测网	1994	不显著	- 0. 21/ 0. 05	不显著	- 1. 6/ 0. 4
	1996	0. 19/ 0. 08	- 0. 20/ 0. 08	不显著	不显著
青藏高原 GPS 地壳形变监测网	1993	未估计	未估计	未估计	未估计
	1995	未估计	未估计	未估计	未估计
	1997	未估计	未估计	未估计	未估计
华北地区 GPS 地壳运动监测网	1995	1. 03/ 0. 48	不显著	0. 000 41/ 0. 000 16	1. 2/ 0. 5
	1996	不显著	0. 001 14/ 0. 000 21	不显著	1. 6/ 0. 3
东南沿海 GPS 网	1995	未估计	未估计	未估计	未估计
	1997	未估计	未估计	未估计	未估计
新疆地壳运动 GPS 监测网	1995	不显著	不显著	不显著	- 0. 23/ 0. 07
	1996	不显著	0. 15/ 0. 05	0. 45/ - 0. 07	4. 6/ 0. 7
	1997	不显著	0. 67/ 0. 21	- 0. 38/ 0. 16	2. 2/ 0. 5

为了分析中国各主要块体相对于欧亚块体中相对稳定的西伯利亚地区的运动速度, 采用图 2 中的速度场减去 NNR-NUVEL1A 模型, 得到图 3。

### 3 结语

从图 4 可以看出, 由 GPS 给出的大陆块体速度场与由地质模型计算的速度场总体趋势乃至大多数块体走向变化和量级基本是一致的, 只有个别块体有差别, 主要是鄂尔多斯块体和黑龙江亚板块, 这一方面是因为观测可能存在误差, 另一方面与它们及其周围块体近期构造运动有关。GPS

给出的速度场, 除了各区不同的运动速率矢量特征外, 中国大陆地块运动显示了东西部之间差异的特征, 西部显示出总体向北、北东方向运移的趋势, 而东部则显示向南或东南方向蠕散的特征, 东西部之间出现了一个巨大的北北方向的右旋剪切带, 这便是南北地震带。

从 GPS 速度场来看, 欧亚板块与印度板块碰撞制约着中国大陆, 特别是中西部地区的运动和变形。中国大陆地处印度板块、欧亚板块和太平洋板块的交汇部位, 其内部的构造运动和构造变形是这些板块相对作用的产物。在中国大陆的西南侧, 印度板块以 50 mm/a 的速度向欧亚板块推

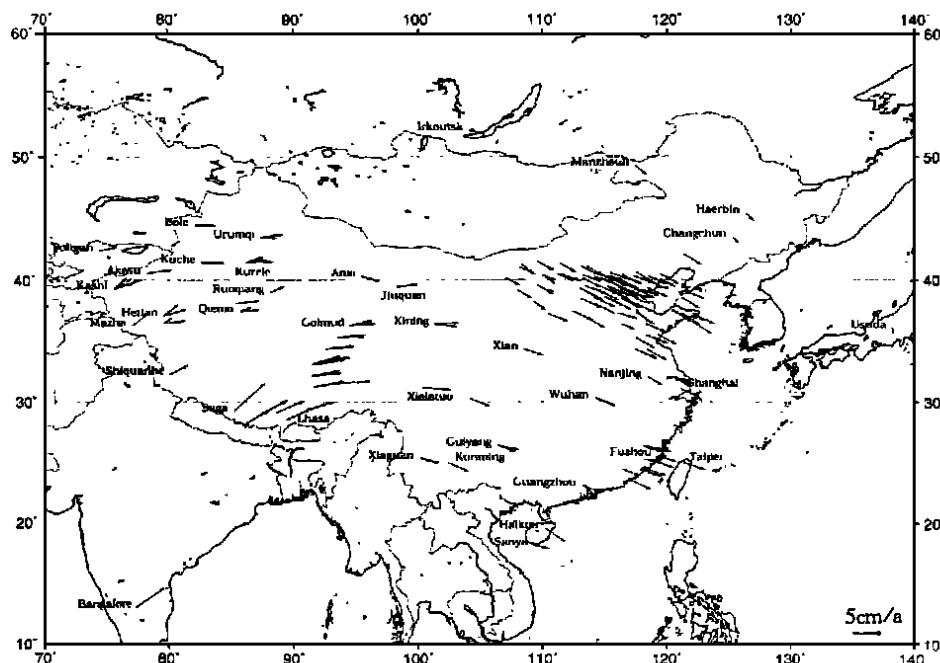
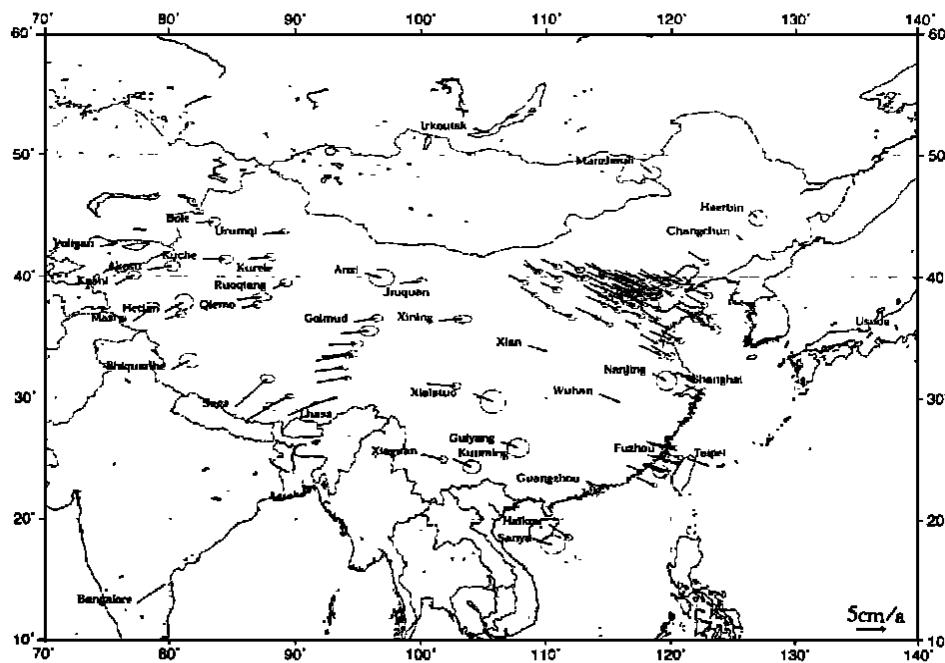


图1 经统一基准平差后的各GPS监测网确定的速度场

Fig. 1 Speed Field Defined by Each GPS Monitoring Network after Adjustment in Uniform Datum



注: 椭圆为95%概率水平下的置信误差椭圆

图2 由各GPS监测网求出的中国大陆加权平均后的统一的速度场

Fig. 2 A Uniform Speed of China Continent Obtained by Each GPS Monitoring Network after Weighted Average

进,在中国西部产生向北的强烈推挤力,形成了一系列近轴向的弧形逆断裂带,在中国东部,太平洋板块向欧亚板块的俯冲和日本海的弧形扩张,相当于施加了一个南西西向的推挤力。因此,由于印度板块、欧亚板块和太平洋板块等相互作用的

综合效应,在中国大陆区形成了主应力轴由西部的近南北的有规律地向东部偏转成北东的总体应力场格局。自新第三纪以来,印度板块与欧亚板块的进一步碰撞,青藏高原急剧隆升和向周围的扩展,南段产生了强烈的北东向的推挤作用,对

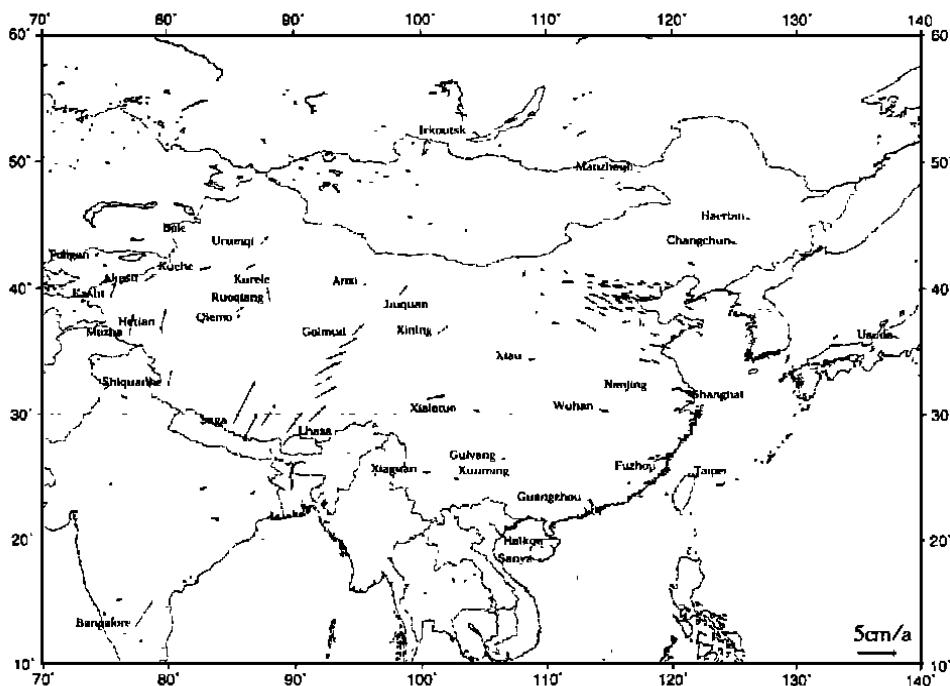


图3 中国大陆相对于欧亚板块的速度场

Fig. 3 Speed Field of China Continent Relative to Eurasian Plate

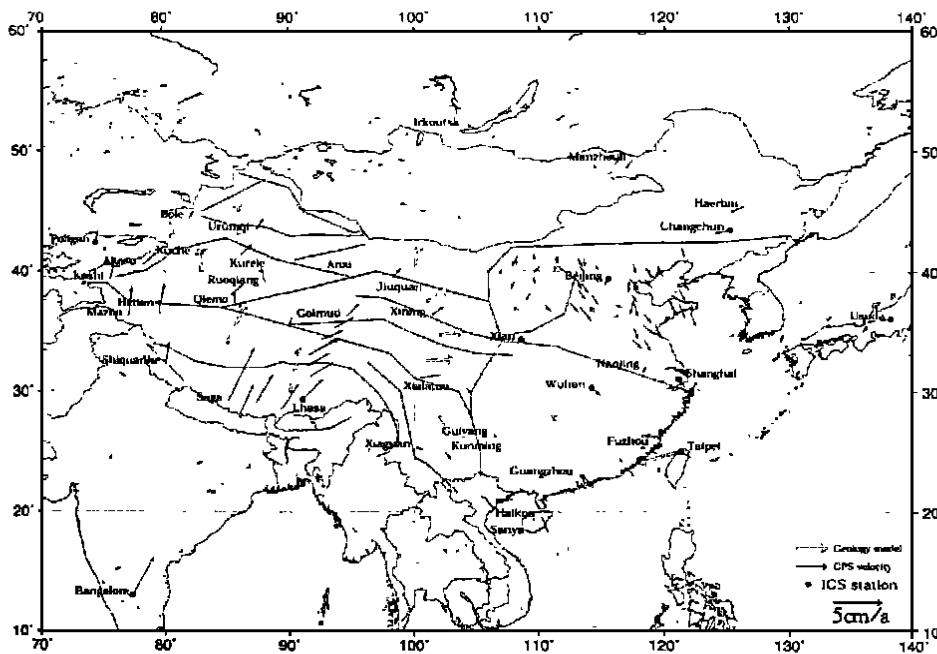


图4 GPS 实测速度场与地质和地球物理模型的比较

Fig. 4 Speed Fields with GPS and Geophysical Model

华北亚板块的两边界(即鄂尔多斯块体西缘)南段实际上受到了一组数值大小由南向北递减,近东西至北东向的推挤力的作用,考虑到块体的刚体特性和周围环境块体的约束,这组推挤力将使鄂尔多斯块体发生逆时针转动。

中国大陆是一个多块体组成的、有复杂地质构造与地形地貌的动力学系统。随着中国地壳网

络工程的进一步实施,可望获得更多更密集的 GPS 复测数据,从而给出更为客观的地壳运动图像。进一步结合地质、地球物理资料,并采用块体不连续变形分析方法及与有限单元法相结合的数据流形方法,可以更好地研究中国大陆块体的动态运动场及其动力学机制。

## 参 考 文 献

- 1 丁国瑜, 卢演伟. 对我国现代板内运动状况的初步探讨. 科学通报, 1986, 18: 1 412~1 415
- 2 洪汉净, 汪一鹏, 沈军, 等. 我国大陆地壳块体运动的平均图像及其动力学意义. 活动断裂研究理论与应用, 1998, 6: 17~29
- 3 许才军, 刘经南, 龚定波, 等. 利用 GPS 资料研究华北地块旋转运动. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(1): 74~78
- 4 刘经南, 葛茂荣. 92' 中国 GPS 会战(A 级网)数据处理分析. 武汉测绘科技大学学报, 1996, 21(1): 40~45
- 5 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 1986

出版社, 1986

- 6 邵占英, 刘经南, 姜卫平, 等. 高精度 GPS 观测及其在福建东南沿海地壳形变研究中的应用. 地壳形变与地震, 1999, 19(4): 39~44
- 7 刘经南, 施闯, 陈俊勇. 92'、96' 国家高精度 GPS A 级网整体平差结果分析与我国块体运动模型研究. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 314~319

**作者简介:** 刘经南, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。主要从事空间大地测量和地球动力学研究。代表成果: 国家高精度 GPS 数据处理理论与方案; GPS 卫星定位处理综合软件; WADGPS 数据处理软件; 青藏高原地壳运动与形变的 GPS 研究等。

E-mail: jnliu@wutsm.edu.cn

## Present-day Crustal Movement Speed Field of China Continent Block Using Local Repeated GPS Network

*LIU Jingnan<sup>1</sup> SHI Chuang<sup>2</sup> XU Caijun<sup>2</sup> JIANG Weiping<sup>2</sup>*

(1 Presidential Secretariat, Wuhan University, Lujia Hill, Wuhan, China 430072)

(2 GPS Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

**Abstract:** Since 1992, China has established many large-scale high precision GPS crustal deformation monitoring network, including state high precision GPS Order-A network, China crustal deformation monitoring network, crustal deformation monitoring network in Qinghai-Tibet plateau, north China network, southeast coastal GPS network and Sinkiang network. GPS measurements of above GPS crustal monitoring networks are collected and they are reprocessed in ITRF97 frame. A complete GPS crustal movement image and speed field with uniform frame, the largest coverage and the most stations are obtained. Finally, a primary geo-scientific explanation of the speed field is given in the paper.

China continent is located in the southeast of Eurasian plate. Its special tectonic location and lithographic structure after long-period complex evolution makes the continental rock layer divided into several plates. And the main tectonic deformation happens at the faulted zone, folded belt and fault depression belt at the border of these plates, while the relative deformation inside the plates is small. There are mostly seismic active belts along the border of plates, thus the research of movement law and relative deformation is the hotspot that catches the attention of the geodetic world. According to the convergence velocity of plates, the uplifting extent of Pliocene epoch leveling and the gliding velocity of the fault, the compression velocity of each fault mountain system in the west of China continent can be estimated, and the movement velocity of each plate relative to Siberian land mass can be deduced. Moreover, the Euler poles and angular velocities of China continent blocks are figured by active fault gliding velocity according to plate geometry, and then average movement velocity vectors of each block are calculated, but they are all average value on the scale of geology. Movement images and relative movement images of each plate or block relative to one ITRF frame are obtained. However, China continent lacks a complete integer movement image of each main plate based on GPS monitoring. And surveying and data analyzing and processing of these GPS networks are accomplished by different units, thus the crustal movement images established by each GPS network are not the same due to different data processing method and datum

in analyzing, which influences the proper utilization of GPS observation data and correct geoscientific explanation.

This paper, collecting 6 items of materials of various high precision GPS crustal monitoring networks of China since 1992, uses uniform data processing method to reprocess data, carries out adjustment and deduces to the same coordinate frame datum, thus the complete GPS crustal movement image and speed field with uniform frame, the largest coverage and the most stations are obtained. This paper introduces the thought, method and final result of this work, and gives a primary geo-scientific explanation.

The bearing and grade of the continent plates by GPS are in accordance with those by geological model, with difference in one or two, mainly the difference of nearly 900 in direction in Erdos plate. In the speed fields given by GPS, China continent land mass movement shows the difference in the west and the east, besides different movement velocity vector characteristics in each area. In the west the trend is moving towards the north and northeast, while in the east the trend is creep towards the south and southeast, with a huge north by north dextral shear zone.

From GPS speed field, we can say the collision of Eurasian plate and Indian plate restrict the movement and deformation of China continent, especially in the middle west area. At the same time, the Pacific plate is diving towards the west, and the impact to China continent, especially northeast China land mass through Japanese Gulf can not be ignored. China continent is located in the intersection of Indian plate, Eurasian plate and Pacific plate, and the internal tectonic movement and deformation are the result of relative action. In the southwest side of China continent, Indian plate is advancing at the speed of 50mm/a; in the west of China, strong pushing force forms a series of adaxial arc reverse faulting zone; and in the east of China, the Pacific plate is diving towards Eurasian plate and the Japanese Sea is extending like an arc, equivalent to add a pushing force in the direction of southwest. Thus, the comprehensive effect of relative action between Indian plate, Eurasian plate and Pacific plate form the general strain field structure that the principal axis of stress is deflecting towards the east to northeast from near north and south in the west. Since the tertiary period, Indian plate is colliding with Eurasian further, and Qinghai-Tibet plateau is rising rapidly and extending around, causing strong pushing force in the south. And the south of two borders of north China sub-plate (west border of Erdos plate) is under a force that decreases from the south to the north and pushes from near west and east to north by east. This pushing force will cause Erdos plate turn anticlockwise.

China continent is a dynamic system consisting of many blocks and with complex geological structure, terrain and relief. With the further implement of China crustal network project, more and denser GPS repeated surveying data are expected to be obtained, and more external crustal movement images can be given. Concerning geological and geophysical materials more, and using numerical manifold method combining block discontinuous deformation analysis method with finite unit method, we can study the dynamic movement field and dynamics mechanism of China continent blocks better.

**Key words:** GPS; continent block; crustal movement; speed field

---

**About the author:** LIU Jingnan, professor, Ph. D supervisor, member of the Chinese Academy of Engineering. His major research orientations include space geodesy and geodynamics. His typical achievements are the theory and scheme high precision GPS data processing in China; the comprehensive software of GPS satellite positioning processing; the software of WADGPS data processing; the crustal movement and deformation of Qingzang plateau using GPS, etc.

E-mail: jnliu@wtusm.edu.cn