

文章编号: 0253-3782(2000)06-0561-07

# 中国大陆 1998~1999 年地壳运动观测结果<sup>\*</sup>

顾国华 牛红叶 郑贵明 许永江  
孟国杰 孙世英 方 穗

(中国北京 100036 中国地震局分析预报中心, 中国地壳运动观测网络数据中心)

**摘要** 介绍了中国地壳运动观测网络 1998~1999 年基准站 GPS 观测概况, 简要介绍了用伯尔尼(Bernese)软件对 GPS 观测数据的处理结果, 详细介绍了所获取的 1998 年 9 月初~1999 年 7 月初基准网地壳运动, 包括各基准站位移与网内各部分的应变。在所述观测期间, 我国东部地区较为稳定。相对东部地区, 西南部地区以向北运动为主, 位移量约 17 mm, 受北北东向挤压为主; 西北部地区以北西向运动为主, 位移量约 11 mm; 而云南地区以向南运动为主, 位移量约 14 mm。我国中部南北地震带则是一强烈的剪切变形带。网内最大主应变量为  $2.9 \times 10^{-8}$ 。观测结果表明, 印度板块向北挤压依然是影响我国地壳运动的主要因素。

**关键词** 地壳运动 GPS 基准站 位移 应变

中图分类号: P542 文献标识码: A

## 引言

中国地壳运动观测网络(下称网络)是我国“九五”期间国家重大科学工程。网络 25 个基准站和 56 个基本站于 1998 年 8 月 26 日~9 月 6 日完成首次 GPS 观测, 81 个点全部为同步观测点。1999 年 3 月下旬起, 25 个基准站开始连续观测。此外, 西安一个 IGS(国际 GPS 服务)站(XIAN), 也有连续观测资料可供利用。基准站分布见图 1。基准站、IGS 站点名与代码对照见表 1。除了 4 个基准站(SHAO、WUHN、LHAS、URUM, 均为 IGS 站)及 XIAN 采用 Turbo Rogue 接收机外, 其它各站均使用 Ashtech CGRS 型接收机, 所有基准站均使用可抑制多路径效应、有稳定的相位中心的抑径圈天线。1998 年观测中 14 个基本站采用 Ashtech Z-12 型接收机与大地测量型天线观测, 其余的基本站采用 Ashtech CGRS 型接收机及抑径圈天线。网络基准站、基本站首次 GPS 观测要求基准站连续观测数据不少于 10 天、基本站数据不少于 8 天, 每天数据量不少于 23.5 小时, 除个别站(如 CHAN, XIAM 等)因某些原因观测天数少于规定外, 其余各站均符合上述对数据量的要求。所有测站均为强制归心观测, 无需作天线相位中心归心改正, 以避免对点误差影响。观测数据采样率均为 30 s。

\* 国家重点基础研究发展项目(95-13-03-07)资助。

1999-10-27 收到初稿, 2000-08-21 收到最后修改稿并决定采用。

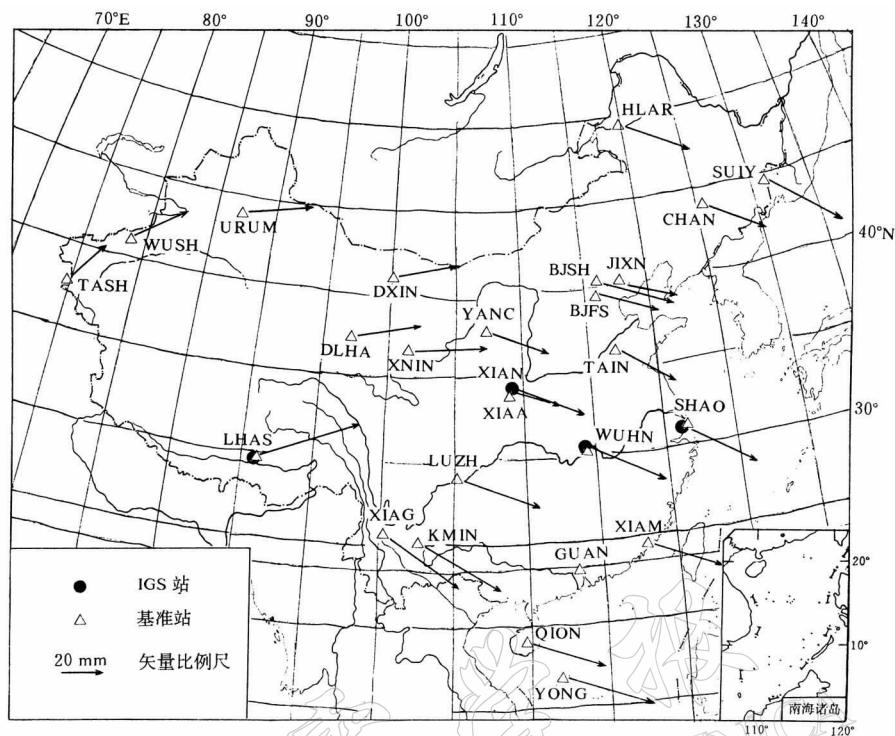


图 1 中国地壳运动观测网络基准站位移速率

表 1 基准站、IGS 站点名与代码对照表

利用重复 GPS 观测数据可求得地壳运动。本文简要叙述用伯尔尼软件对 GPS 观测数据进行处理与计算，详细介绍利用基准站 GPS 观测资料所获得的我国大陆地壳运动最新信息的方法和结果，包括各基准站的位移和基准网内的应变。

## 1 数据处理与分析

1998年基准站与基本站首次GPS观测数据曾用GAMIT/GLOBK软件,由中国地壳运动观测网络数据中心(设于中国地震局,下称数据中心)、总参测绘局与国家测绘局作了处理,数据中心还用伯尔尼软件作了处理。此后网络数据中心利用伯尔尼软件(Rothacher, Mervart, 1996)及GAMIT/GLOBK软件处理了1999年3月下旬后基准站的观测数据,各软件每周得到一个综合解。

对中国地壳运动观测网络中大量 GPS 观测数据处理表明, 瑞士伯尔尼大学天文研究所研制的伯尔尼 GPS 数据处理软件(4.0 版)处理结果的重复性, 特别是水平分量的重复精

度较高。本研究利用伯尔尼软件得到的 GPS 观测数据处理结果获取地壳运动信息。为获取地壳运动信息，利用 1998 年基准站和基本站首次 GPS 观测数据处理结果，以及 1999 年年积日 185~191(7 月 4~10 日)基准站的观测数据处理结果，两次观测相隔 10 个月。1999 年 3 月下旬后基准站虽然开始了连续观测，但由于各种原因，连续几天各站观测数据都能利用的观测时间段并不多，而 185~191 日除 GUAN 基准站外，其它站的观测数据都可利用，且与 1998 年观测相隔较久。所有观测数据处理的方法与要求一致，观测数据的处理可参阅文献(Rothacher, Mervart, 1996)。所不同的是 1998 年观测数据组成的边较短。

利用伯尔尼软件处理网络 GPS 观测数据时，为得到高精度的计算结果，采取了以下方法或措施：采用 ITRF96 坐标框架；只采用国内的全球 GPS 网 IGS 连续观测站(SHAO, XIAN, LHAS 和 WUHN)观测数据以及 ITRF96 坐标框架中的精密坐标，在每日的 GPS 观测数据处理中只对其中一个点(一般取 LHAS)作强约束(各坐标分量的约束均为 0.1 mm)；采用 IGS 精密星历作为已知数据，不作轨道松弛或定轨计算；每天每站估计 9 个天顶方向对流层延迟参数；卫星最小高度角取为 20°；用准无电离层影响的方法解算相位观测值中的模糊整周数；作固体潮理论值改正；采用两个频率的相位观测值的组合值作为平差观测值，以消除电离层影响；在综合平差静态解中取以 SHAO, XIAN, LHAS 和 WUHN 为基准的自由网解，避免地面点坐标约束条件的影响等。

从 GPS 观测结果获取地壳运动位移信息有各种不同的方法。本研究采用如下两种方法：一种是利用各期观测得到的综合平差静态结果求得两期测量间的位移及其协方差；另一种是利用多期 GPS 观测数据计算结果作位移线性速率平差，得到各点的位移年速率及其协方差。

计算位移或位移速率必须有描述相对运动的参照点，也即所谓的位移解基准。位移解基准选择是多样的，因此位移解具有多解性。所谓恰当地选择基准是同相对运动的分析有关的。图 1 是在 ITRF96 框架中全球板块运动基准下观测期间各基准站的位移速率，计算中 SHAO, XIAN, LHAS 和 WUHN 采用 ITRF96 框架中的已知位移速率，利用多周 GPS 平差结果再作线性速率模型平差求得其它各点位移速率。图 1 清楚地反映了欧亚板块带动下基准站的运动。由于板块运动量大，由图 1 不易分辨我国大陆内部的相对运动。因此这种全球运动基准不一定适用于描述局部地区的地壳运动。图 2 则很清楚地反映了我国大陆内部的相对运动。图中主要以东部的一组点为基准求得，即以 BJSH, BJFS, JIXN, HLAR, SUIY, YANC, XIAN, LUZH, CHAN, QION 和 WUHN 点组成位移解的基准。图 2 东部不少点，如 BJSH, BJFS, JIXN, HLAR, QION 和 WUHN 等的位移在误差椭圆之内或相当小，表明选此基准是合理的。取东部的点作位移解基准的原因是东部大部分点较为稳定，更利于反映我国大陆的地壳运动。由于选作基准的点分布范围广，可减小解中网旋转位移的影响，得到的各周的解较为稳定。利用相似变换由一个自由网位移解可求得其它任何自由网位移解，即可由一种基准的自由网位移解变换为另一种基准的自由网位移解。由此可知，当两期或多期 GPS 结果是在不同的坐标框架(如 ITRF93, ITRF94 和 ITRF96 等)下计算得到时，可通过相似变换求得一个(组)自由网位移解，然后可变换为其它自由网解，无须先作复杂甚至难以实现的坐标系统的统一。为避免高程变化对椭球面上水平位移的影响，相似变换中只顾及椭球面上的水平位移。

由于东部的一些基准站位移量较小，由图 2 的位移再以其中的任一点为基准作仅含平

移的相似变换得到的位移图象与图 2 基本一致, 且位移越小, 图象越一致。实际上以图 2 为基础, 将其它各点的位移矢量减去某点的位移矢量, 即可得到以此点为基准的位移图。因此, 图 2 与取 BJSB, BJFS, JIXN, HLAR, QION 和 WUHN 中任一点为基准的位移图几乎完全一样, 而取图 2 中位移量不大的 CHAN 为基准的位移图与图 2 大体一致。

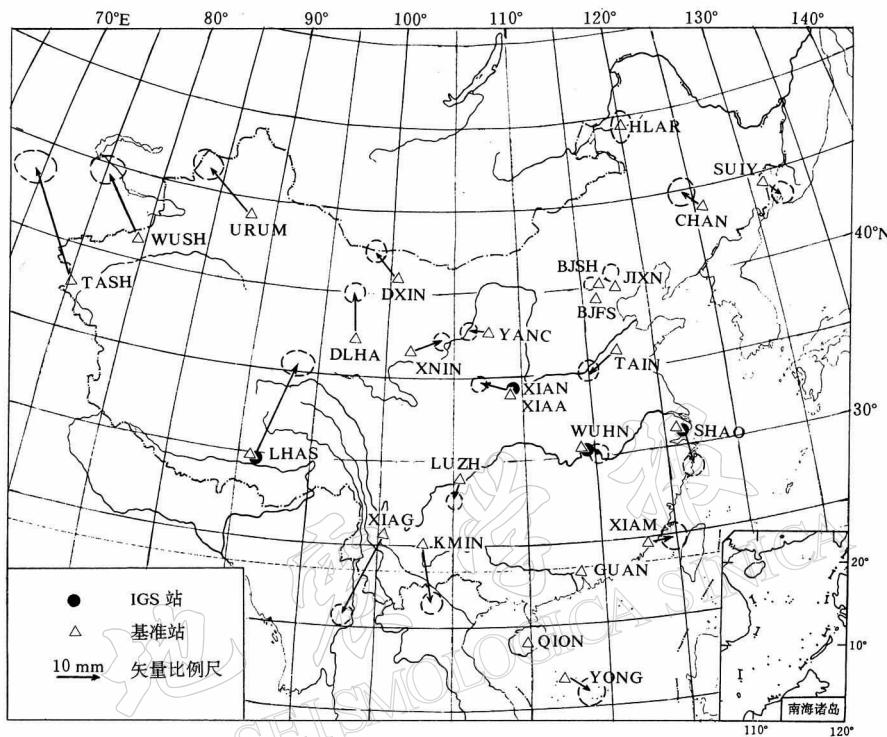


图 2 中国地壳运动观测网络基准站位移  
(1998 年 9 月~1999 年 7 月, 以东部为相对运动基准)

GPS 观测地壳运动的精度及可靠性是人们最为关心的问题。首先须对 GPS 测量精度给出较客观的估计。1998 年基准站和基本站首次 GPS 观测数据综合平差结果精度分析表明, 网内点位精度, 水平分量精度为 2 mm, 高程分量精度为 7 mm, 这一精度与国际上同类网一致。此次 GPS 测量的精度达到了对基本网设计的观测精度要求, 即相邻点组成的基线边水平分量的测量精度为 3~5 mm, 垂直分量的精度为 10~15 mm。1999 年 185~191 日(仅 7 天)综合解的精度与 1998 年结果的精度相同。由两期观测可求位移并可得到位移的协方差阵, 由此协方差阵, 可估计位移的精度或其误差椭圆。图 2 中的误差椭圆(两倍中误差)就是由此得到的。图 2 误差椭圆最长的长轴为 3.0 mm。另一种估计位移精度的方法, 是利用基准网中相邻两周的两个综合解作相似变换, 利用相似变换的残差分析位移解的精度。一般情况下相邻两周之间位移很小, 可认为相似变换的残差主要是由 GPS 测量误差所产生的。计算表明, 由相邻两周每周的综合解相似变换残差求得的水平分量中误差约为 2 mm, 其两倍值大于图 2 中误差椭圆最长的长轴, 此值作为位移的中误差更恰当。此外, 在网中利用这种中误差值可检验一组点的位移总体上是否显著, 而且这种检验方法更

简单、更直观。当采用两期结果对一组点作相似变换时，相似变换水平分量中误差越接近或小于此值，则这一组点相互间的位移越不显著。通过对图 2 的位移误差椭圆及相似变换分析表明，中国大陆的地壳运动是显著的，但中国东部地区的地壳运动总体上不显著。这也是选择东部一些点作位移解基准的依据。图 1 中的精度与图 2 中的精度相近。对多周结果的时间序列分析表明，各点的变化有明显规律，特别是东部的一些点经纬度分量的变化仅为 3~4 mm 以内，说明各周的计算结果是可靠的。

应变同构造应力有直接的力学关系，是十分有意义的形变量。应变量的另一个主要特点是与位移基准无关，即无多解性。由于基准网范围大，已不能当作平面计算应变，可采用在球面上作近似计算，但更恰当的是在椭球面上计算应变（顾国华等，1998）。用大地坐标系可由三维位移或其它形变量计算三维应变。由于区域 GPS 形变监测网只覆盖地球表面的一部分，并不深入地球内部，或者只包括地球很薄的一层，因此只适宜计算地表二维应变。

在大地坐标系中，地球表面测得的两点之间的水平位移之差为  $\Delta U = [\Delta U_E, \Delta U_N]^T$ ，其中， $\Delta U_E$  为经度 E(东西)方向上的位移之差， $\Delta U_N$  为纬度 N(南北)方向上的位移之差，可用下式由位移在椭球面上用大地坐标计算二维应变

$$\begin{bmatrix} \Delta U_E \\ \Delta U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_E}{\partial E} & \frac{\partial U_E}{\partial N} \\ \frac{\partial U_N}{\partial E} & \frac{\partial U_N}{\partial N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_E}{\partial E} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_E}{\partial N} + \frac{\partial U_N}{\partial E} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_N}{\partial E} + \frac{\partial U_E}{\partial N} \right) & \frac{\partial U_N}{\partial N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_E}{\partial N} - \frac{\partial U_N}{\partial E} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_N}{\partial E} - \frac{\partial U_E}{\partial N} \right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \end{bmatrix} = \epsilon \Delta P + dR \Delta P$$

这里， $\Delta P = [\Delta E, \Delta N]^T$ ，为相应点之间的经度与纬度差。 $\epsilon$  和  $dR$  即椭球面上的应变张量和旋转张量，由此可计算各种应变量，如剪应变、总剪应变面膨胀等。通常须采用相关平差方法，顾及位移的协方差矩阵，由位移计算应变。

由于基准网观测站数量少，且点距较长，本次应变计算只能顾及相邻区域连续的应变分布。图 3 为由基准站的位移计算得到的中国地壳运动观测网络中相应的各三角形内的应变张量。用构成三角形的三点位移计算应变，可将计算得到的位移量完全体现为应变量。网中有的三角形图形较差，求得的应变量较大，不具有代表性，故未在图中标出。除了较小的应变外，网内的多数主应变值大于两倍中误差。

图 2 中的位移及图 3 中的应变表明，在 1998 年 9 月~1999 年 7 月，我国东西部地壳相对运动非常显著。我国东部地区基准站间相对位移小，较为稳定，主应变以拉张为主。相对东部地区，西部地区青藏块体以向北运动为主，位移量为 17 mm 左右，以北北东向挤压、南东东向拉张为主。西北部地区新疆块体以北西向运动为主，位移量为 11 mm 左右。云南地区菱形块体以向南运动为主，位移量约为 14 mm。这表明印度板块向北挤压依然是影响我国地壳运动的主要因素。从位移和应变分布可以看出，中国大陆东部与西部形成右旋相对运动，在中部即南北地震带形成一水平剪切形变最强烈的地带，应变分布较为复杂；而新疆与青藏块体构成近东西向左旋相对运动。图 3 中北京附近 3 个基准点构成的三

角形内的应变量较大, 达  $3.4 \times 10^{-8}$ . 由于该三角形各边均较短, 大小与其它三角形相比小得多, 其应变不能同其它较大的三角形中的应变在量值上相比. 该三角形内的应变同华北地区 GPS 网 1995~1996 年观测数据的计算结果基本一致, 表明该区仍然有应力积累(顾国华等, 1999). 除此三角形, 网内最大主应变量为  $2.9 \times 10^{-8}$ , 位于云南地区.

由基准站获取的中国大陆地壳运动概貌与地质年代的构造运动基本一致.

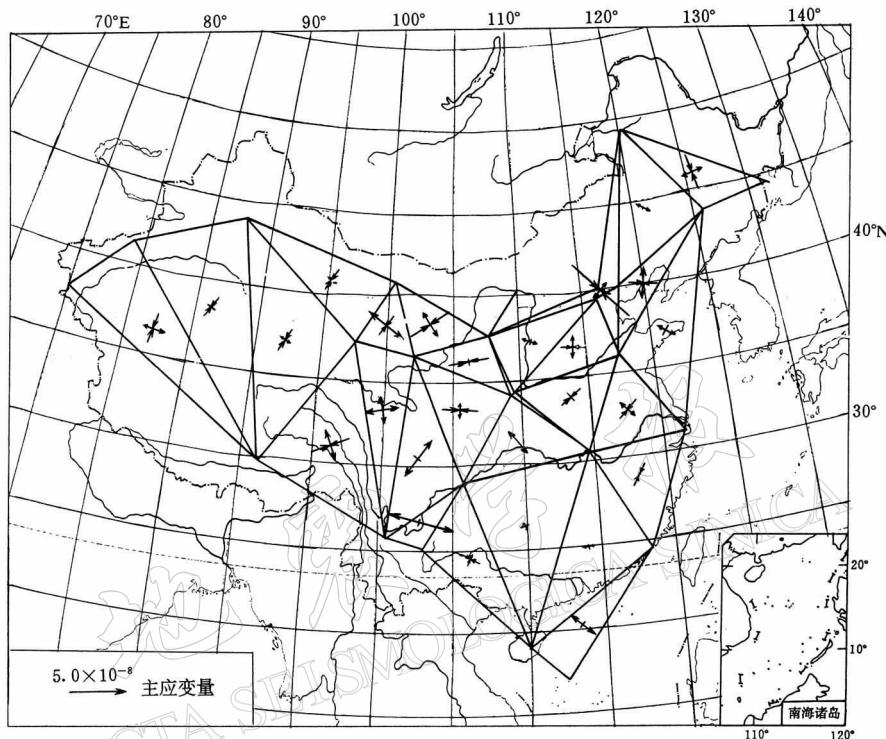


图 3 中国地壳运动观测网络中的应变  
(1998 年 9 月~1999 年 7 月)

## 2 结论

中国地壳运动观测网络经过了近一年的观测, 获取了大量的宝贵的数据. 通过对观测数据及时处理和分析, 得到了我国大陆地壳运动的最新信息. 本研究给出了基准点在全球构造运动中的位移速率及更能反映我国大陆内西部相对东部地壳运动的基准点位移, 用大地坐标系统求得了由基准点构成的三角形内的应变, 从不同的方面反映了中国大陆地壳水平运动的特点.

观测结果表明, 印度板块向北挤压依然是影响我国大陆地壳运动的主要因素. 东部地区基准站间相对运动小, 较为稳定; 东西部构成右旋运动; 相对东部地区, 西南地区向北运动, 新疆地区向北西运动, 云南地区向南运动; 中部的南北地震带则是构造运动强烈而又复杂的剪切构造运动地区, 是主要的地震危险区. 我国大陆地壳现今运动的这一概貌与地质年代的构造运动基本一致.

对现有基准网观测结果时间序列的分析表明, 中国地壳运动观测网络基准站绝大多数

站标志质量高、观测数据好、数据处理结果精度高且可靠，本研究结果与时间序列分析结果相符。还须说明的是，利用 GAMIT/GLOBK 软件与利用伯尔尼软件处理得到的地壳运动结果十分一致。

显然，加密 GPS 观测站，特别是连续观测站，才能得到中国大陆地壳运动时空分布的详细信息，以便更深入研究块体运动特征以及应变分布特点等地球动力学问题。

## 参 考 文 献

- 顾国华，孙汉荣，孙惠娟，等。1998. 利用 GPS 地形变资料在大地坐标系中计算应变[J]. 地壳形变与地震, **18**(3): 26~31
- 顾国华，王若柏，孙惠娟，等。1999. 华北地区 GPS 形变测量结果及地震地质研究[J]. 地震地质, **21**(2): 97~104
- Rothacher M, Mervart L. 1996. *Bernese GPS Software Version 4.0, Sept, 1996*[M]. Berne, Switzerland: Astronomical Institute, University of Berne, 43~252

# CRUSTAL MOVEMENT IN CHINA MAINLAND OBSERVED FROM 1998 TO 1999

Gu Guohua Niu Hongye Zheng Guiming Xu Yongjiang  
Meng Guojie Sun Shiyong Fang Ying

(Data Center for the Crustal Movement Observation Network of China, Center for Analysis and  
Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China)

**Abstract:** In this paper, GPS observations during 1998 to 1999 at fiducial stations in the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) and GPS observation data processing with Bernese Software are briefly introduced. The processed results of crustal movement in the network during the period from early September 1998 to early July 1999, including the displacements at each fiducial station and strains in different part of the network, discussed in detail. During the above mentioned period of observations, the eastern part of China was relatively stable. In contrast with it, the southwest part of China moved northwards about 17 mm with a dominant compression in NNE; the northwestern part of China moved northwestwards about 11 mm; and the Yunnan area moved southwards about 14 mm. The North-South seismic belt in the middle part of China is a belt of strong shear deformation. The maximum principal strain in the network is  $2.9 \times 10^{-8}$ . The observation result shows that the northward push by the Indian plate has still played the dominant role in the crustal movement in China.

**Key words:** crustal movement; GPS; fiducial station; displacement; strain