

基于陆态网络 GPS 连续站揭示中国大陆现今垂直形变特征

王祖军

江西省九江市城市规划市政设计院

DOI:10.12238/gmsm.v3i5.872

[摘要] 中国大陆内部构造变形复杂,是全球板内构造和大陆动力学研究的热点地区之一,而垂直形变特征对理解该地区的动力学过程具有重要的参考价值。本文通过对收集整理的260个2010~2020年陆态网络连续GPS观测资料进行统一的高精度处理,获取了该地区的垂向形变速度场,并对速度场精度进行了统计分析。结果显示大部分站点的垂向速率精度达1mm/yr,垂向形变速度场揭示了中国大陆垂向形变与地形的继承性及区域差异性特征。

[关键词] 中国大陆; 陆态网络; GPS; 垂直形变

中图分类号: P228.4 文献标识码: A

引言

地壳受冰川均衡调整、水文的负载与卸载、构造运动等作用而发生垂直形变,这些地壳垂直形变在空间和时间域内呈现了显著特征^[1]。过去二十几年,国内外学者利用水准、GPS、InSAR和GRACE等技术进行了大量的监测,实现了不同区域、不同分辨率的地壳垂直形变特征^[2]。垂直形变对理解地球物理过程和研究地球内部相互作用机制具有重要作用。

由于空间大地测量观测手段研究地壳现今垂直运动具有直接和直观的特点,因此在地球动力学、现代构造活动、沉降监测和地震预测等多方面得到了广泛的应用^[3]。而由于水准观测自身的局限性,并不适合大范围的垂直形变监测。InSAR虽然可以获取高时空分辨率的地壳形变信息,但由于其观测精度较差,暂时还不适用于获取形变量较小的垂直形变信息。而GRACE技术虽然可以通过获取大范围的地壳重力变化,从而反映其垂直形变特征,但空间分辨率较低。随着GPS研究的发展,相关结果表明,虽然GPS垂直方向的监测误差为水平方向的2~5倍,但5年以上的连续观测资料可获得精度优于1mm/yr的垂直形变,所以GPS成为了现代垂直形变监测最优的观测手段之一。

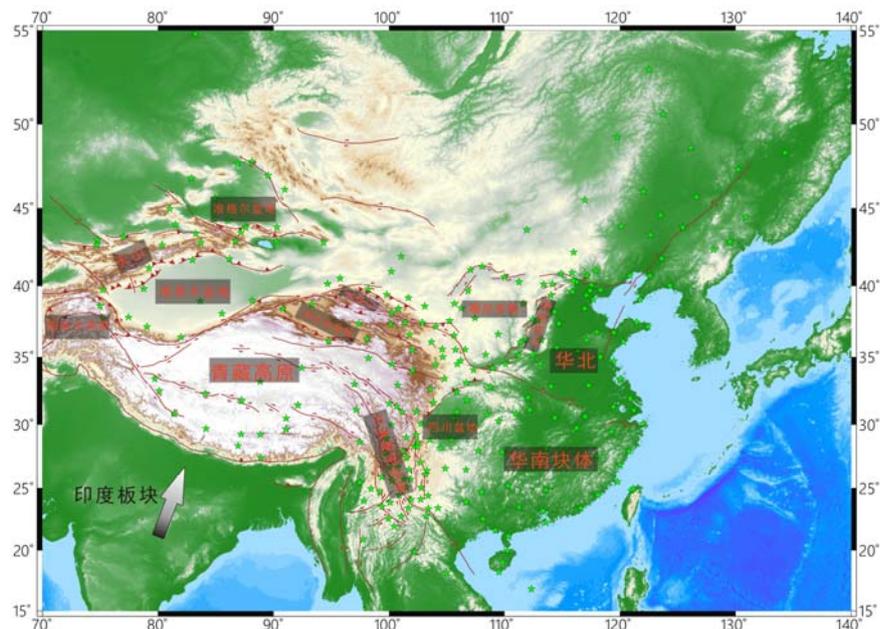


图1 中国大陆主要构造及GPS站点分布

中国大陆由于受到印度板块严重碰撞和持续挤压,使得中国成为全球板块及板内地壳构造运动最强烈的地区之一(图1)。构造运动往往伴随垂直形变,所以垂直形变特征研究将有助于分析中国大陆新生代构造演化特征和岩石圈动力过程。本文收集整理了中国大陆260个陆态网络连续站自2010~2020年的GPS观测资料(图1),并利用GAMIT/GLOBK 10.7进行了统一的高精度处理。最后通过对垂向坐标时间序列进行拟合获取了中国大陆高精度垂向

形变速度场,对中国大陆垂向形变的区域差异有了更清晰的认识。

1 数据处理

1.1 GPS数据处理

本文所有的GPS数据处理均采用GAMIT/GLOBK10.7软件,为保证数据结果的一致性和可靠性,数据处理采用统一的处理模型(表1)和处理策略。数据处理采用最新的卫星、天线绝对相位中心改正模型,单日松弛解处理中对固体潮、极潮、海潮进行改正,采用最新的GPT2全球气压温度模型对对流层延迟

进行改正,估计得到包括测站坐标、卫星轨道、天顶对流层延迟的单日松弛解。第二步,利用GLOBK将区域松弛解与SOPAC(Scripps Orbital and Permanent Array Center)产出的全球IGS站的单日松弛解合并,得到一个包含全球IGS站和本文GPS站的单日松弛解。第三步,在全球范围内选择用于实现参考框架转换的参考站,以全球单日松弛解做为准观测值,利用GLOBK通过7参数(3个平移、3个旋转、1个旋转)的相似变换得到ITRF14参考框架下的单日坐标解。

1.2 垂向形变速率提取

GPS 坐标时间序列中包含了多种信号,既有构造运动的信号,如测站的长期线性运动速率、地震同震形变及震后弛豫形变。也包含了非构造运动信息,如季节性周期形变,仪器更换引起的坐标时间序列的跳变,以及测站观测环境突变引起的阶跃等。本文首先对坐标时间序列的粗差进行剔除,然后对不明原因的阶跃进行探测,并与同震形变一起进行估计改正。由于震后形变对垂向方向形变影响较小,所以本文不考虑震后形变对中国大陆GPS站点垂直形变速率的影响,如受2015年尼泊尔地震影响的XZZF站点(见图2)。长期GPS坐标时间序列的线性拟合可由公式(1)给出:

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{gj}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - T_{hj}) t_i \quad (1)$$

该公式包括了测站的线性速率、周年、半年变化、同震及非同震阶跃等。式中, b 为截距,为线性速率 $c-f$, 是周年半年变化的振幅, g_i 和 h_i 是 t_i 时刻的阶跃值, H 表示Heaviside阶梯函数, n 为阶跃的个数。

图2 XZZF站点垂向坐标时间序列(其中蓝色圆圈为观测值,蓝色直线为2015年两次尼泊尔地震,红色实线为模拟值,黄色实线为最小二乘拟合获取的

表1 GPS 数据处理策略

类别	策略
观测值	LC-AUTCLN
数据处理时段及模式	24小时、双差模式
卫星轨道	松弛轨道模式: 允许卫星轨道(IGS精密星历)和地球自转参数(Bull_A)有微小的调整
对流层	温度气压由GPT2模型计算获得; 每1小时估计天顶对流层延迟及每天估计1个NS和EW梯度,映射函数采用GMF模型
电离层	双频载波相位组合观测和GMAP进行电离层改正
数据定权	采用依据卫星截止高度角(10°)确定观测量的权重的随机模型,即ELEV模型
潮汐模型	IERS03 固体潮模型、FES2004 海潮模型、IERS2010 极潮模型
天线相位中心	IGS14 绝对天线相位中心
其他模型	BERNE 光压模型、EGM08 重力场模型、TUME1 地球辐射模型、IGRF12 地磁场模型

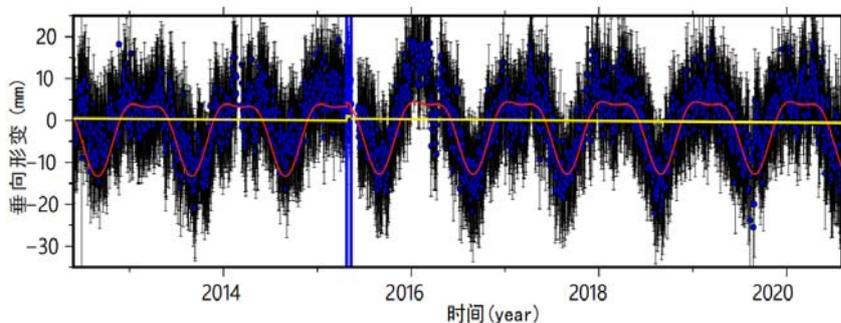


图2 XZZF站点垂向坐标时间序列(其中蓝色圆圈为观测值,蓝色直线为2015年两次尼泊尔地震,红色实线为模拟值,黄色实线为最小二乘拟合获取的长期线性运动值。)

长期线性运动值。)

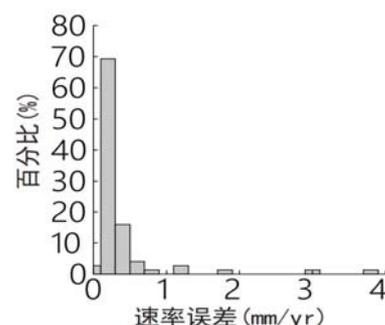
2 速度场精度分析

精度评定的方式分两类,即不同手段间的比较和同一种手段不同评定方法的比较。由于GPS观测站缺少VLBI或SLR等其他观测手段的结果,所以本文对GPS获取的垂直形变速度场的精度评定主要包括对垂向速率误差和垂向坐标时间序列的年平均重复性精度(WRMS/T)进行统计(图3)。其中长期重复性精度是多期观测条件下,对各时段定位结果线性拟合的中误差。它反映出受环境影响(如大气季节性变化、轨道长周期误差等)测站长期定位的离散程度。其计算公式为:

$$wrms = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n \frac{(l_i - l_i^m)^2}{\sigma_i^2}}{(n-2) \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sigma_i}\right)^2}} \quad (2)$$

式中, l_i 为单日解; σ_i 为 l_i 的方差; n 为 l_i 的数目; l_i^m 为 l_i 的线性拟合值。

垂向速率误差结果显示陆态网络连续站93%的站点垂向速率误差小于1mm/yr,时间序列的年平均重复性精度与垂向速率误差基本一致,绝大部分在1mm/yr以内。说明利用陆态网络连续站多年的观测资料可获取高精度的垂直形变场。



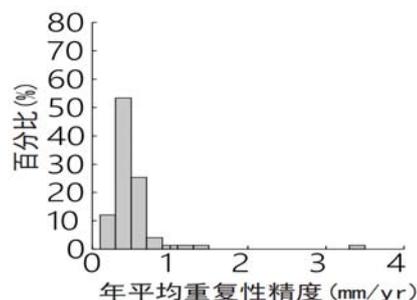


图3 陆态网络连续站垂向速率误差和时间序列年重复性精度统计结果

3 垂向形变速度场结果

考虑到较大的误差会导致垂向速率的不确定度增加,尤其在形变量较小的地区。所以本文获取的站点垂向形变速度场结果需同时满足垂向速率误差和垂向坐标时间序列的年平均重复性精度小于 2mm/yr 以及观测时间大于5年。图4为符合上述条件的GNSS站点垂向速度场结果。图4显示了以下几个主要特征:(1)北天山、鄂尔多斯、山西高原和喜马拉雅地区整体处于隆升;(2)川滇菱形块体、四川盆地、塔里木盆地、华南块体、柴达木盆地、东北及华北地区以沉降为主;(3)青藏高原内部、南天山地区由于缺少GPS站点,其垂向形变特征尚不清晰。从上述形变特征可以看出,中国大陆的垂向形变与地形具有一定的继承性。盆地、平原以沉降为主,高原、山岭以隆升为主。其中隆升速率都 $<3\text{mm/yr}$,沉降速率较大的区域为华北地区,根据前人的研究认为,华北地区的沉降主要是由于地下水过度开采导致。

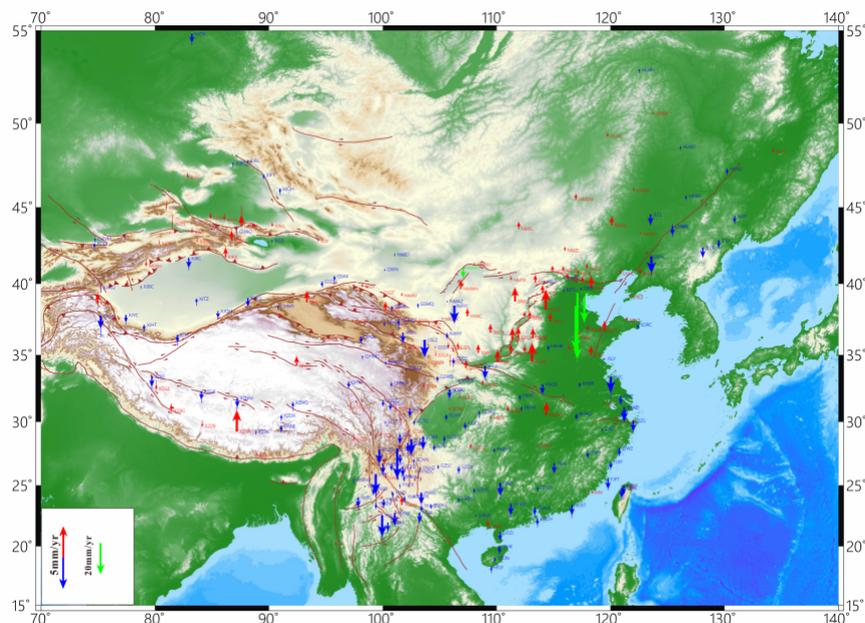


图4 中国大陆 GNSS 站点垂向速度场结果。其中红色箭头表示隆升,

蓝色和绿色表示沉降

4 结束语

本文利用260个陆态网络连续站近10年的观测数据,通过高精度的坐标解算和时间序列分析,获取了中国大陆现今垂直形变速度场。根据上述结果可知,利用中国大陆陆态网络连续站5年以上观测数据可以获取精度约 1mm/yr 的垂向形变速率。中国大陆的垂向形变与地形具有一定的继承性,大部分地区沉降与隆升相间分布,其中隆升地区的速率在 $0.1\sim 3\text{mm/yr}$ 范围;沉降形变由于易受地下水过度开采的影响,使得华北地区的沉降量远远大于其他地区。

[参考文献]

[1]周晓慧,杨艺林,姜卫平等.GNSS

影像及时空特征初探[J].地球物理学报,2020,63(1):155-171.

[2]Blewitt G, Altamimi Z, Davis J, et al. Geodetic Observations and Global Reference Frame Contributions to Understanding Sea-Level Rise and Variability[M]/Understanding Sea-Level Rise and Variability.Wiley - Blackwell, 2010.

[3]Fu Y N & Jeffrey T. Freymueller. Seasonal and long-term vertical deformation in the nepal himalaya constrained by gps and grace measurements[J].Journal of Geophysical Research, 2012,117(B3).